

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

---

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali  
Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale

*Tesi di Laurea*

**Pompe volumetriche monovite per il  
trattamento dei fanghi di depurazione**

Relatore:

*Prof. Massimo Masi*

Laureando:

*Nicola Tamburin*

---

Anno Accademico 2022 – 2023



*A mio nonno*



## **Ringraziamenti**

Mi è doveroso dedicare questo spazio della mia tesi a tutte le persone che mi hanno supportato nel mio percorso di crescita universitaria e professionale, a partire dalla mia famiglia, la mia ragazza, i colleghi di lavoro e collaboratori, i miei amici.

Un sentito ringraziamento va poi al mio relatore prof. Massimo Masi per la sua disponibilità ed i suoi preziosi consigli.

## **Indice:**

### **1. Sommario**

### **2. Sezione 1 – Impianti di depurazione delle acque reflue**

1. Introduzione
2. Aspetti generali dei processi di trattamento delle acque reflue
  - 2.1. Trattamenti meccanici
    - 2.1.1. Grigliatura
    - 2.1.2. Dissabbiatura
    - 2.1.3. Disoleazione
    - 2.1.4. Sedimentazione
  - 2.2. Trattamenti biologici
    - 2.2.1. Impianti a fanghi attivi
    - 2.2.2. Impianti a filtri percolatori
  - 2.3. Trattamenti chimici
  - 2.4. Trattamenti di disinfezione
  - 2.5. Trattamenti dei fanghi
    - 2.5.1. Caratteristiche generali del fango
    - 2.5.2. Trattamenti
      - 2.5.2.1. Ispessimento
      - 2.5.2.2. Stabilizzazione del fango
        - 2.5.2.2.1. Stabilizzazione biologica (o digestione del fango)
        - 2.5.2.2.2. Stabilizzazione chimica
      - 2.5.2.3. Disinfezione e pastorizzazione
      - 2.5.2.4. Disidratazione o essiccamento
      - 2.5.2.5. Smaltimento finale
3. Classificazione degli impianti di depurazione

### **3. Sezione 2 – Sistemi di pompaggio negli impianti di depurazione delle acque reflue**

1. Schema idraulico esemplificativo di un impianto di depurazione
2. Descrizione delle principali pompe utilizzate
  - 2.1. Pompe rotodinamiche
  - 2.2. Pompe volumetriche
    - 2.2.1. Pompe volumetriche alternative a stantuffi
    - 2.2.2. Pompe volumetriche alternative a membrana
    - 2.2.3. Pompe volumetriche rotative

### **4. Sezione 3 – Pompe volumetriche monovite per il trattamento dei fanghi**

1. Introduzione
2. Funzionamento e prestazioni
  - 2.1. Principio di funzionamento
  - 2.2. Geometria di rotore e statore: elementi teorici
  - 2.3. Parametri geometrici
  - 2.4. Prestazioni
3. Analisi del comportamento fluidodinamico dei fanghi
4. Criteri di selezione di una pompa monovite per il trattamento dei fanghi

### **5. Conclusioni**

### **6. Bibliografia**

## Sommario

Le pompe volumetriche monovite vengono impiegate in diverse fasi di trattamento dei fanghi negli impianti di depurazione delle acque reflue. Tali pompe presentano delle caratteristiche e dei vantaggi peculiari che le distinguono nettamente da altre tipologie di pompe per il trattamento di fluidi particolarmente viscosi ed abrasivi.

Il presente lavoro si occupa di illustrare come tali pompe possano essere impiegate in un impianto di depurazione; a tal fine è stato diviso in tre sezioni:

- Nella prima sezione, vengono esaminati i diversi processi che avvengono in un impianto di depurazione. Si fornisce un'analisi approfondita delle fasi coinvolte e dei principali macchinari utilizzati. Vengono descritti dettagliatamente i trattamenti meccanici, biologici e chimici, nonché i trattamenti di disinfezione e le principali operazioni relative ai fanghi, come l'ispessimento, la stabilizzazione e la disidratazione.  
Infine, viene presentato un metodo di classificazione degli impianti di depurazione basato sulla loro potenzialità, ossia in base al numero di abitanti equivalenti da servire.
- Nella seconda sezione, viene offerta una panoramica sui diversi sistemi di pompaggio utilizzati per il trasporto di acqua e/o fango all'interno di un impianto di depurazione.  
Si analizza la classificazione delle pompe in base al loro principio di funzionamento, fornendo un'analisi dettagliata delle caratteristiche principali e dei vantaggi rilevanti nell'ambito degli impianti di depurazione.
- Nella terza sezione, si approfondisce in modo specifico la costruzione delle pompe volumetriche monovite e se ne discute l'applicabilità nel trattamento dei fanghi.  
Si analizza il comportamento fluidodinamico dei fanghi e si evidenziano le peculiarità delle pompe monovite che le rendono adatte a questa particolare applicazione.



## Sezione 1 – Impianti di depurazione delle acque reflue

### 1. Introduzione

Nei decenni passati e fino a pochi anni fa, il notevole aumento del consumo di acqua da parte delle industrie, delle attività produttive e domestiche, portò ad un proporzionale aumento dell'inquinamento delle acque reflue, complicando o addirittura impedendo in parte, il potere di autodepurazione dell'acqua.

Si comprende perciò come la strada da percorrere per ovviare a questo problema sia quella della depurazione con sistemi di trattamento che riproducono in parte, e in tempi ridotti, quello che avviene in natura, richiedendo spazi ridotti, macchinari specifici, opere murarie e non indifferenti risorse energetiche.

I processi di depurazione delle acque prevedono primariamente processi di concentrazione finalizzati a concentrare sotto forma di fango le sostanze indesiderabili presenti all'origine. Il fango prodotto viene poi sottoposto ad ulteriori trattamenti di concentrazione, stabilizzazione, inertizzazione e smaltimento.

Pertanto, in un qualsiasi processo di depurazione, sviluppato con criteri impiantistici, sono sempre ben distinguibili:

- **una linea acqua:** che deve provvedere alla concentrazione delle sostanze indesiderabili contenute nelle acque reflue sotto forma di fango (estratto e successivamente inviato alla linea fango) e convogliare all'esterno del sistema l'acqua depurata;
- **una linea fango:** che deve concentrare ulteriormente il fango e renderlo non più putrescibile, per poterlo smaltire nel modo più conveniente ed ecologico possibile.

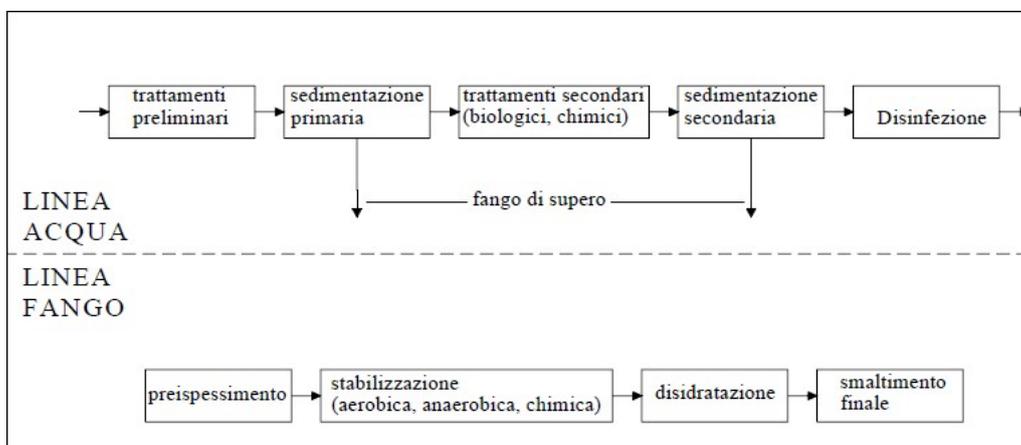


Fig. 1 – Diagramma a blocchi di un impianto di depurazione

Nell'ambito del trattamento delle acque reflue ci sono degli indici di inquinamento largamente utilizzati: il BOD (Biochemical Oxygen Demand) corrisponde all'ossigeno richiesto dai microrganismi per il loro ciclo vitale, e il COD (Chemical Oxygen Demand) che quantifica la richiesta di ossigeno necessario ad ossidare chimicamente le sostanze organiche.

In particolare, il processo di depurazione prevede una serie di trattamenti primari, secondari e terziari attraverso i quali si abbattano i livelli di BOD e di COD delle acque reflue, portandoli a livelli accettabili per legge.

## **2. Aspetti generali dei processi di trattamento delle acque reflue**

Vediamo ora più in dettaglio cosa avviene all'interno di un sistema di depurazione tipo delle acque reflue. Il liquame arriva all'impianto di depurazione tramite il collettore primario; dopo la misurazione della portata vengono eseguiti una serie di trattamenti che si distinguono in:

- Meccanici
- Biologici
- Chimici

I primi sono quelli che separano dal liquame tutte le sostanze che possono eliminarsi con mezzi meccanici; comprendono i *trattamenti preliminari* (grigliatura, dissabbiatura, disoleazione) e la *sedimentazione primaria* che serve a separare il fango fresco di fogna.

I *trattamenti biologici*, detti anche trattamenti ossidativi, mirano a separare dal liquame le sostanze organiche semidisciolte e disciolte. In realtà, nei trattamenti biologici la maggior parte delle sostanze organiche viene trasformata, per mezzo dell'azione dei microrganismi aerobi, in sostanze sedimentabili, ed una parte minore viene mantenuta nell'effluente in forma disciolta, dopo essere stata ossidata (cioè resa imputrescibile). Ogni trattamento biologico richiede quindi una successiva sedimentazione, detta *sedimentazione secondaria*.

I *trattamenti chimici* sono quelli che richiedono l'aggiunta di prodotti che svolgono determinate attività quali la flocculazione, che agevola la formazione dei fiocchi con l'utilizzo di cloruro ferrico prima della sedimentazione, o la disinfezione che provvede all'abbattimento della carica batterica, mediante l'uso di ipoclorito di sodio.

Tanto i fanghi freschi di fogna (*fanghi preliminari*) quanto i fanghi della ossidazione (*fanghi finali*) sono poi di norma trattati per mezzo della digestione, che è un procedimento biologico.

Qui di seguito si riporta lo schema di trattamento delle acque reflue.

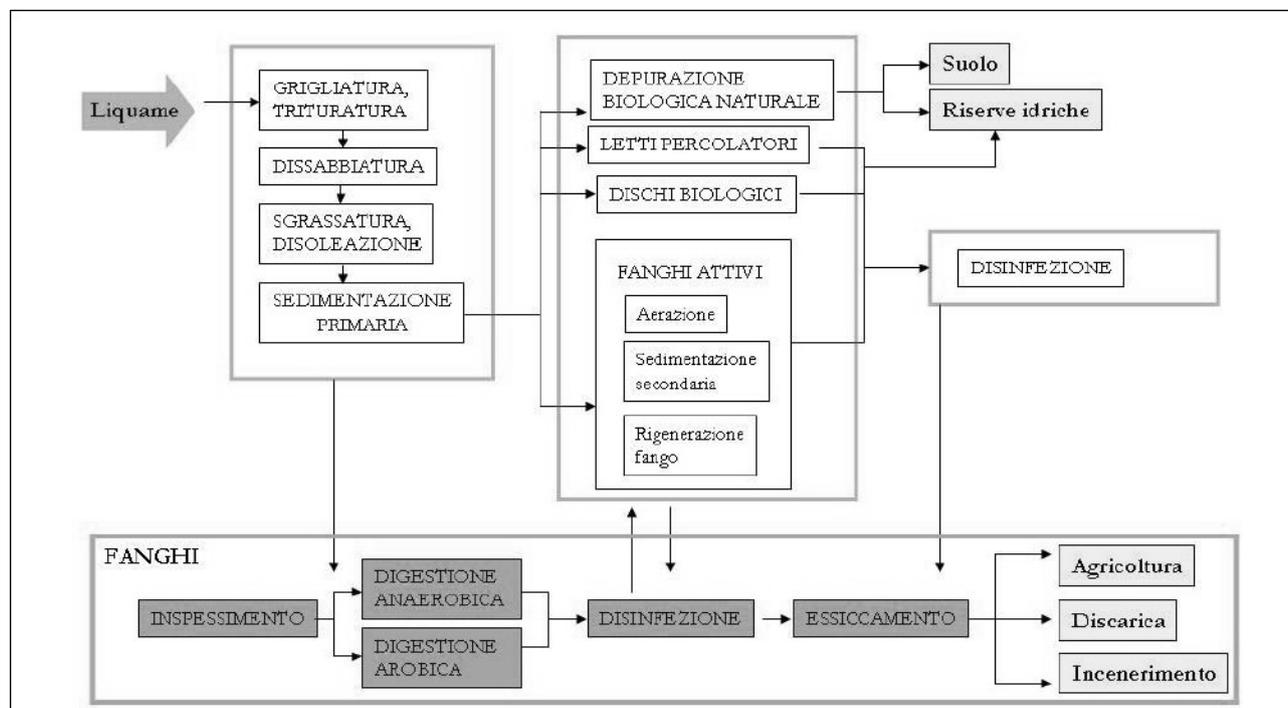


Fig. 2 – Schema di trattamento delle acque reflue

Nei sotto-paragrafi che seguono, vengono trattate singolarmente le tre categorie di processi appena introdotte.

## 2.1. Trattamenti meccanici

Nei liquami si trovano corpi grossolani di ogni genere: allo scopo di evitare il loro ingresso negli impianti (dove provocherebbero intasamenti e danni nelle apparecchiature presenti) o nei corpi d'acqua naturali, i liquami sono quasi sempre sottoposti ad un trattamento preliminare di separazione, che può essere di grigliatura, dissabbiatura, disoleazione.

### 2.1.1. Grigliatura

La grigliatura ha la funzione di intercettare i corpi grossolani presenti nel liquame grezzo. Questi potrebbero bloccare o danneggiare i macchinari installati nell'impianto, ridurre l'efficacia dei processi o peggiorare le caratteristiche dei fanghi.

Si utilizzano in genere griglie a barre che intercettano il flusso del liquame mediante una struttura costituita da profilati (o barre) di varia forma e sezione. Possono essere classificate sulla base della spaziatura e dello spessore tra le barre, della forma ed inclinazione e del sistema di pulizia adottato.

Le griglie possono essere classificate in:

- Grossolana (40 – 60 mm)
- Normale (30 – 10 mm)
- Fine (< 10 mm)

Per quanto riguarda la forma dei profilati, si parla di *griglie piane* e *griglie ad arco*: le prime, inclinate sull'orizzontale da 45° a 90°, possono consentire lo scarico del grigliato all'altezza desiderata; le seconde sono generalmente ad asse orizzontale e prevedono l'evacuazione del grigliato solo 20-30 cm al di sopra del canale.

Per quanto concerne il dimensionamento delle griglie, bisogna far riferimento ai seguenti parametri:

- la velocità media deve rispettare l'intervallo  $v_m = 0,6 - 1$  m/s;
- la velocità massima deve rispettare l'intervallo  $v_{max} = 1,2 - 1,4$  m/s;
- la larghezza utile del canale di grigliatura (m) di calcola con la seguente formula:

$$L_u = \frac{q}{v \cdot h}$$

dove:

$q$  = portata transitante attraverso la griglia ( $m^3/s$ )

$v$  = velocità di attraversamento della griglia ( $m/s$ )

$h$  = altezza della corrente ( $m$ )

- la larghezza totale del canale di grigliatura ( $m$ ) si calcola con la seguente formula:

$$L_t = L_u \cdot \frac{b + s}{s}$$

dove:

$b$  = spessore delle barre ( $mm$ )

$s$  = spaziatura tra le barre ( $mm$ )

Per quanto riguarda il sistema di pulizia adottato, si parla di *griglie a pulizia manuale* e *griglie a pulizia automatica*. In entrambi i casi la pulizia avviene ad opera di un pettine (o rastrello) i cui denti penetrano nelle luci di passaggio della griglia ed asportano il grigliato muovendosi dal fondo del canale verso il pelo libero. Il materiale grigliato può essere smaltito come un normale rifiuto solido urbano.

### 2.1.2. Dissabbiatura

La presenza nelle acque di rifiuto di sabbie e di altre sostanze abrasive o pesanti può comportare notevoli inconvenienti negli impianti di depurazione, come ad esempio ostacolare il movimento dei macchinari installati nell'impianto o formare depositi ed intasamenti nelle condotte, nei canali e nelle tramogge di estrazione dei fanghi.

La dissabbiatura avviene in vasche dette dissabbiatori nelle quali si sfrutta la forza di gravità per eliminare tutte quelle particelle solide caratterizzate da un peso specifico maggiore di quello dell'acqua e tali da depositarsi sul fondo della vasca in tempi accettabili.

Da lunga data, negli impianti di depurazione vengono utilizzati *dissabbiatori a canale* (Fig. 3).

Questi ultimi sono realizzati in vasche con una sezione di forma particolare (a sezione trasversale trapezia, rettangolare o più complessa) e dimensionate in modo tale che il flusso al loro interno, per qualsiasi valore di portata in ingresso, deve avere una velocità praticamente costante (dell'ordine di

0,3 m/s), poiché per questi valori di velocità si è constatata la massima efficienza nel decantamento della sabbia, inoltre la quantità di materia organica e di materiali inerti che decanta risulta contenuta entro limiti accettabili (la funzionalità di un dissabbiatore è legata alla capacità di consentire la sedimentazione dei materiali inerti di diametro superiore a certi valori, che la pratica indica di 0,2 - 2,5 mm, e limitare l'entità delle sostanze organiche che inevitabilmente assieme a questi decantano). Nel caso di portata in ingresso variabile, per mantenere la velocità del flusso costante, spesso a valle del dissabbiatore viene realizzata una strozzatura (tipicamente un venturimetro) di opportuna forma che può essere utilizzato anche per misurare la portata.

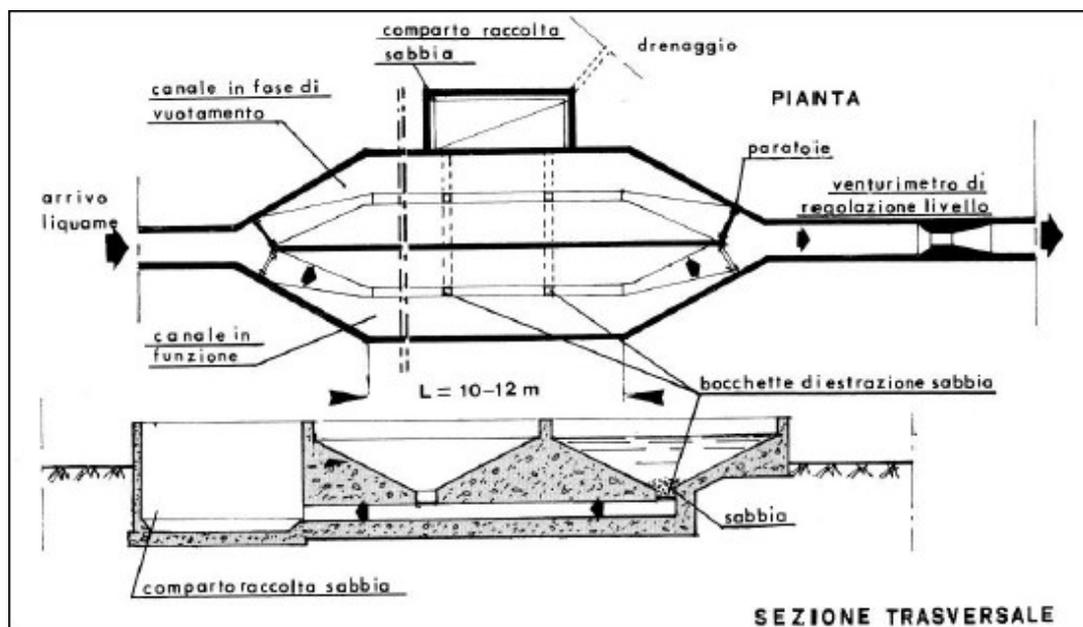


Fig. 3 – Dissabbiatore a canale

L'utilizzo di dissabbiatori a canale si è dimostrato però inadeguato nei piccoli impianti, siccome tali dissabbiatori hanno l'inconveniente di assumere dimensioni spesso troppo ingombranti, ed uno scorretto dimensionamento porterebbe al deposito di materiale organico vario e ad una inefficiente decantazione della sabbia.

Pertanto, mentre nei grandi impianti trovano largo impiego i dissabbiatori a canale dotati di dispositivi di raccolta meccanica delle sabbie, nel campo dei piccoli e medi impianti generalmente si utilizzano dissabbiatori funzionanti secondo principi diversi, realizzati a pianta circolare con fondo a tramoggia, di minore ingombro e configurati in modo tale da creare correnti trasversali secondarie (elicoidali, toroidali) che, sovrapponendosi alla corrente principale, favoriscono la concentrazione e la selezione dei materiali sedimentati.



### 2.1.3. Disoleazione

L'abbattimento degli olii e dei grassi, presenti in tutti gli scarichi civili e industriali, risulta necessario prima dell'immissione del refluo depurato in qualsiasi corpo idrico naturale, non solo per gli effetti visivi che essi inducono, ma anche per altri problemi che possono provocare nelle fasi di trattamento biologico aerobico e nella fase di digestione anaerobica del fango: essi infatti, aderendo ai fiocchi di fango, non solo ostacolano la sedimentazione, ma anche l'assorbimento nutritivo da parte del terreno e gli scambi di ossigeno con i batteri nella successiva fase di digestione aerobica.

Allo scopo di realizzare una disoleatura particolarmente efficiente in spazi ridotti, sono utilizzati particolari tipi di *vasche di disoleatura*, dotate di un pacco di lamelle metalliche disposte affiancate in modo che l'acqua che deve essere trattata percorra lo spazio interposto tra le varie lamelle con un flusso laminare assai favorevole per una efficace separazione delle particelle non solubili nella massa liquida ed evitare l'instaurarsi di moti vorticosi nel fluido che influenzerebbero negativamente il processo.

I percorsi del liquido sono schematicamente indicati in Fig. 5: l'olio in sospensione, viene raccolto dalla superficie, mentre sul fondo della vasca si raccolgono le eventuali sostanze pesanti presenti nel liquame sotto forma di fango; questa fase di trattamento comporta allo stesso tempo anche l'eliminazione dei residui leggeri ("schiume")

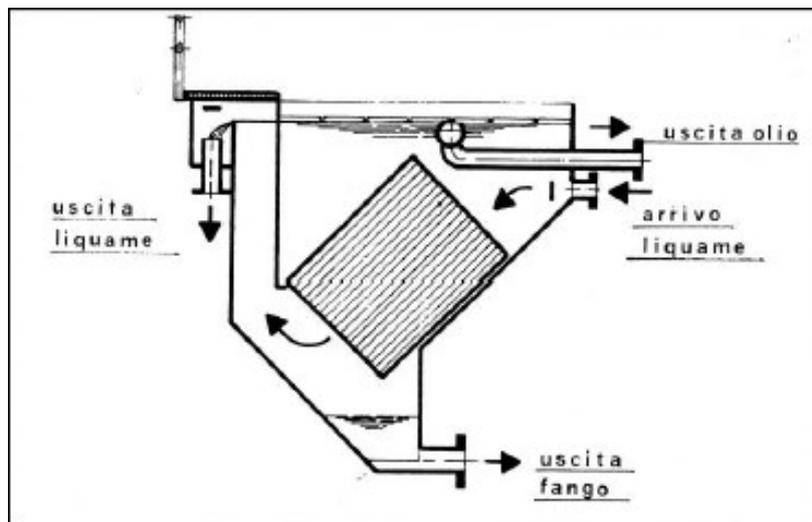


Fig. 5 – Disoleatore con pacco lamellare

#### 2.1.4. Sedimentazione

Nella sedimentazione si sfrutta la forza di gravità per separare dall'acqua le particelle solide "sedimentabili", caratterizzate da massa volumica maggiore di quella dell'acqua, e che sono in grado di depositarsi sul fondo del contenitore in tempi accettabili.

Essa si realizza in vasche appositamente conformate, in modo da facilitare:

- la separazione delle particelle dal mezzo liquido;
- la raccolta delle particelle, come fango;
- la concentrazione del fango;
- l'allontanamento del fango;

Affinché le particelle solide possano efficacemente sedimentare sul fondo, occorre che sia assicurato un sufficiente tempo di permanenza del liquido nella vasca e che il *carico idraulico superficiale* ( $C_s$ ), inteso come rapporto tra la portata di liquame  $Q$  e la superficie della vasca  $S$ , non superi certi valori limite. Le vasche di sedimentazione si comportano come vasche a livello fisso, con limitatissime escursioni: ogni diverso valore della portata in arrivo comporta, in tempi brevi, una proporzionale variazione della velocità ascensionale nella vasca; quindi, punte elevate di portata, comportano una risposta di velocità ascensionale altrettanto elevata, che può determinare il sollevamento del fango depositato sul fondo della vasca, e la sua "fuga" nel recapito.

#### Cenni teorici sulla sedimentazione:

I solidi sedimentabili presenti nelle acque di rifiuto sono classificabili in due categorie:

- particelle "granulose", che sedimentano individualmente, senza che si verifichino particolari interferenze o interazioni tra particelle vicine;
- particelle "fiocose", che per il loro carattere appunto fiocoso e per le forze di attrazione superficiale che le caratterizzano, durante la fase di caduta nelle vasche di sedimentazione tendono ad agglomerarsi.

*Particelle granulose:*

Se nell'acqua ci sono delle particelle solide di peso specifico maggiore, e che non abbiano dimensioni tanto piccole e cariche elettriche tali da subire l'attrazione delle particelle vicine e rimanere così stabilmente in sospensione (sospensioni colloidali), esse tendono naturalmente a depositarsi sul fondo. Per fissare le idee, esaminiamo il comportamento di una sola di queste particelle sedimentabili e supponiamo per semplicità che abbia una forma sferica.

Essa è soggetta all'azione del proprio peso  $P$ , alla spinta idrostatica  $S$  diretta verso l'alto ed alla resistenza  $R$  del fluido, che risulta essere all'incirca proporzionale al quadrato della velocità  $v$  e alla sezione trasversale della sferetta. Si ha dunque, se  $\gamma$  è il peso specifico della sostanza in sospensione,  $\gamma_0$  quello del fluido,  $W$  il volume della particella e  $\Omega$  la sua sezione, si ha che:

$$P = W \cdot \gamma \quad S = W \cdot \gamma_0 \quad R = \lambda \cdot \Omega \cdot v^2$$

dove  $v = \frac{dz}{dt}$  è la velocità delle particelle all'istante  $t$  e  $z$  è la profondità sotto il pelo libero dell'acqua, mentre  $\lambda$  è una costante che dipende dal tipo di fluido.

Il sistema di forze agenti è quindi  $P - S - R$  e possiamo scrivere quindi l'equazione del moto della particella nel seguente modo:

$$P - S - R = \frac{P}{g} \cdot \frac{d^2z}{dt^2}$$

È facile verificare che la velocità, partendo da zero, cresce rapidamente e tende asintoticamente ad un valore  $v_0$  corrispondente alla condizione  $P - S - R = 0$  (Fig. 6)

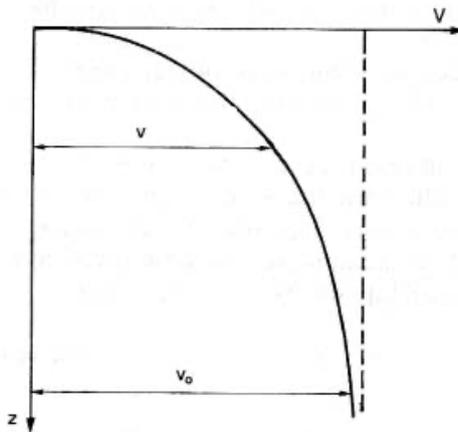


Fig. 6 – Andamento della velocità della particella

In pratica però questo processo dura talmente poco da poter considerare il moto della particella come uniforme ( $v_0 = cost$ ). Quindi sostituendo i valori di P, S ed R si ottiene:

$$v_0^2 = k \cdot \frac{W}{\Omega} \cdot (\gamma - \gamma_0) = k_1 \cdot D \cdot (\gamma - \gamma_0)$$

dove  $D$  è il diametro della particella e  $k$  e  $k_1$  sono delle costanti dipendenti principalmente dalla natura delle particelle e del liquido.

Si tratta ora di determinare questa velocità praticamente uniforme: per far ciò occorre controllare i tempi in più posizioni della particella durante il moto.

Ma un qualunque sedimento è formato da particelle di dimensioni e pesi specifici diversi, e risulta impossibile determinare per ognuna la sua velocità di sedimentazione. È evidente però che le velocità  $v_0$  saranno tanto più piccole quanto minore è il diametro della particella e quanto più piccola è la differenza tra il suo peso specifico e quello del liquido.

Si considerino allora le particelle in sospensione più lente, quelle cioè che sono le ultime a depositarsi. Per analizzarne il comportamento si prenda in considerazione un bicchiere di sedimentazione con all'interno un campione di acqua torbida: il liquido si chiarificherà gradualmente dall'alto.

Se misuriamo il tempo impiegato per la chiarificazione fino ad un certo livello, e tale tempo lo dividiamo per l'altezza corrispondente al suddetto livello, avremo quella che è la velocità di sedimentazione delle particelle più lente, supposta come si è detto uniforme.

La sedimentazione inoltre non è mai assoluta, ovvero, in un determinato tempo sedimenta solo una percentuale delle particelle in sospensione, ma questa percentuale non ha significato se non è correlata al tempo in cui si è ottenuta.

In pratica, perciò, si usa fissare un tempo tipico (generalmente di due ore) ed un recipiente di sedimentazione determinato, e si considerano come sedimentabili le sostanze che si depositano in quel bicchiere in quel tempo: si ritiene cioè che in due ore avvenga la sedimentazione totale (l'esperienza dimostra infatti che ciò che rimane da sedimentare dopo due ore è poco e trascurabile). Sempre dalla sedimentazione di un liquido in bicchiere si può costruire la curva di sedimentazione (Fig. 7): si può notare come praticamente dopo un'ora è già avvenuta una sedimentazione del 95% di quella totale; si ritiene perciò che per le acque di fogna sia sufficiente un'ora di sedimentazione.

In realtà però, le vasche si progettano sempre in vista di un tempo di 1 ½ o 2 ore e questo perché la sedimentazione in vasca non avviene mai in assoluta quiete.

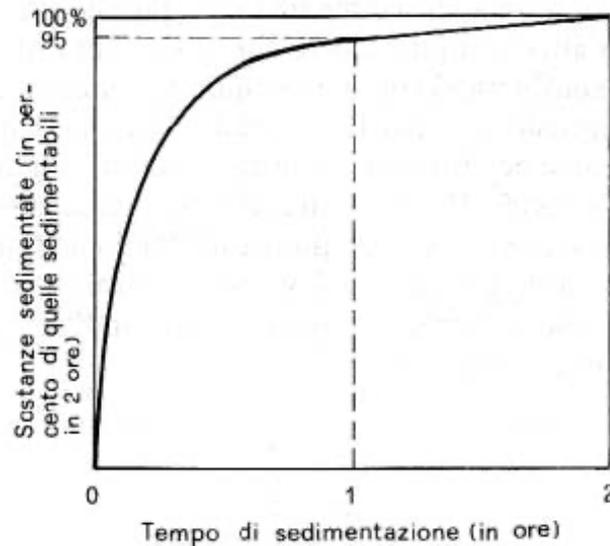


Fig. 7 – Curva di sedimentazione

Si consideri ora una vasca a sezione rettangolare, e si supponga che l'acqua si muova nella vasca con un flusso costante di velocità  $V$ . L'esperienza dimostra che la velocità  $V$  dell'acqua non interferisce particolarmente con velocità  $V_s$  di sedimentazione (purché sia abbastanza piccola).

Nel caso in cui si verifichi un regime di moto laminare della particella (cioè la particella scenda con una velocità sufficientemente bassa tale da non indurre moti vorticosi nel fluido) in base alla legge di Stokes, la velocità di sedimentazione  $V_s$  delle particelle immerse in acqua è data dalla seguente relazione:

$$V_s = \frac{g}{18} \cdot (\gamma_s - \gamma_a) \cdot \frac{D^2}{\mu}$$

dove:

$g$  è l'accelerazione di gravità

$\gamma_s$  rappresenta il peso specifico delle particelle

$\gamma_a$  rappresenta il peso specifico dell'acqua

$D$  è il diametro della particella (mm)

$\mu$  rappresenta la viscosità cinematica dell'acqua

Osservando lo schema di Fig. 8, si nota come la vasca sia caratterizzata da una zona di ingresso del liquame, da una zona di uscita e dal fondo sul quale si depositano le particelle sedimentate.

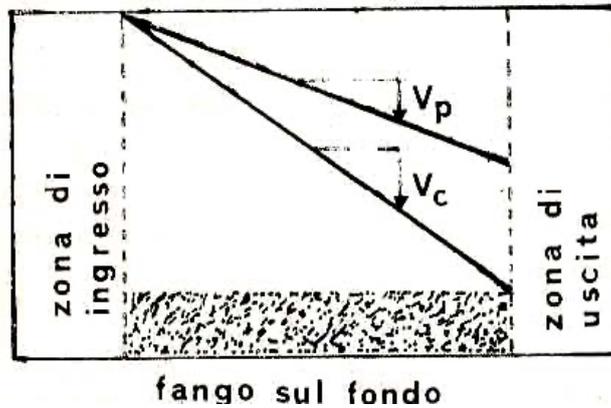


Fig. 8 – Schema ideale di una vasca di sedimentazione di tipo rettangolare a flusso longitudinale

Con riferimento invece allo schema di Fig. 9, si consideri la particella X immessa nella vasca nella posizione più sfavorita agli effetti della sua possibilità di incidere sul fondo della vasca.

Si tratta di calcolare, in base alle caratteristiche della vasca, la velocità di sedimentazione che deve avere la particella X per poter essere trattenuta in vasca, cioè affinché la sua traiettoria incida sul punto estremo A del fondo indicato in Fig. 8.

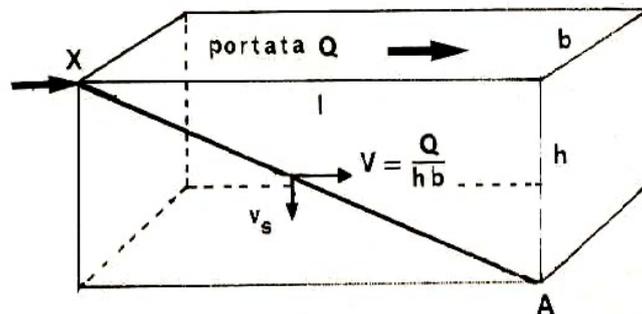


Fig. 9 – Schema di funzionamento della vasca in Fig. 8

Chiamando con:

- $Q$  la portata in ingresso;
- $V$  la velocità di traslazione longitudinale dell'acqua (e quindi anche della particella);
- $V_s$  la velocità di sedimentazione della particella;
- $l, b, h$  rispettivamente lunghezza, larghezza e profondità della vasca;

Risulta che:

$$Q = h \cdot b \cdot V \rightarrow V = \frac{Q}{h \cdot b}$$

il tempo di percorrenza orizzontale  $t_1$  è dato da:

$$t_1 = \frac{l}{V} = \frac{l \cdot h \cdot b}{Q}$$

il tempo di caduta verticale è:

$$t_2 = \frac{h}{V_s}$$

Evidentemente  $t_1 = t_2$ , per cui essendo  $h \cdot b = S$  ( $S$  è la superficie della vasca), si ha:

$$\frac{l \cdot h \cdot b}{Q} = \frac{h}{V_s} \rightarrow V_s = \frac{Q}{S} = C_s$$

dove  $C_s = \frac{Q}{S}$  rappresenta il carico idraulico superficiale introdotto all'inizio del paragrafo.

Ciò significa che, data una certa portata  $Q$  e la vasca di superficie  $S$ , sono trattenute nella vasca tutte le particelle che hanno velocità di sedimentazione pari o superiore al carico superficiale  $C_s$ ; le particelle con velocità di sedimentazione inferiore sono trattenute solo in parte, in dipendenza dall'altezza di introduzione della zona di ingresso.

Pertanto, risulta dimostrato che, anche per vasche a flusso longitudinale, l'effetto di sedimentazione su particelle di tipo granuloso, dipende esclusivamente dalla superficie  $S$  della vasca e non dal volume della stessa.

Per tener conto dell'influenza della superficie sull'efficienza della sedimentazione viene impiegato il parametro  $C_s$  suddetto: nota  $Q$  e fissato  $C_s$  è immediato il calcolo di  $S$ .

Al carico idraulico superficiale  $C_s$  vengono di norma assegnati valori compresi tra 0,9 – 1,5 per la sedimentazione primaria e tra 0,5 – 1,2 nel caso di vasche impiegate nella sedimentazione finale.

*Particelle fioccosse:*

Come già accennato, durante il soggiorno nella vasca di sedimentazione, le particelle fioccosse tendono ad agglomerarsi tre di loro, aumentando quindi il loro diametro equivalente.

Per ogni particella è possibile applicare la legge di Stokes; tuttavia, a mano a mano che aumentano le dimensioni delle particelle, con il passare del tempo lungo il loro percorso aumenta anche la velocità di sedimentazione  $V_s$ .

Ad esempio, nel caso di una vasca di sedimentazione rettangolare a flusso longitudinale, la traiettoria delle singole particelle non è più rettilinea, ma assume un andamento curvilineo, con velocità gradualmente maggiori (Fig. 10).

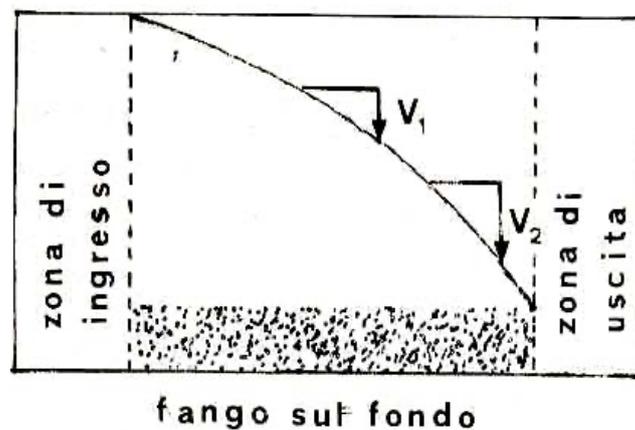


Fig. 10 – Traiettoria di particelle di tipo fioccoso

È evidente che l'efficacia nell'agglomerazione delle particelle è tanto maggiore quanto più lungo è il tempo di permanenza della particella nella vasca; pertanto, il tempo di permanenza nella vasca (che nel caso delle particelle granulari assumeva importanza marginale) in questo caso assume valore fondamentale.

## Tipi di vasche:

Negli impianti molto piccoli la sedimentazione è molto spesso realizzata nel comparto di sedimentazione di fosse Imhoff.

Per gli impianti fino a qualche centinaio di abitanti sono ancora utilizzate vasche di tipo statico, dette anche vasche a flusso ascensionale di tipo Dortmund (Fig. 11): queste possono essere a pianta circolare con fondo conico oppure a pianta quadrata con fondo piramidale.

La vasca ha pareti fortemente inclinate per evitare che il fango possa depositarsi sulle pareti stesse, e permettere invece che, scivolando, si depositi integralmente sul fondo della tramoggia da cui deve poi essere estratto. L'inclinazione minima delle pareti è di  $45^\circ$  sull'orizzontale, tuttavia, nelle vasche rettangolari o quadrate conviene che nel centro delle pareti laterali la pendenza sia di almeno  $60^\circ$ , in modo che negli spigoli di connessione fra le pareti contigue la pendenza risulti di circa  $50^\circ$ ; è infatti proprio negli spigoli che si possono più facilmente instaurare accumuli indesiderati di fango.

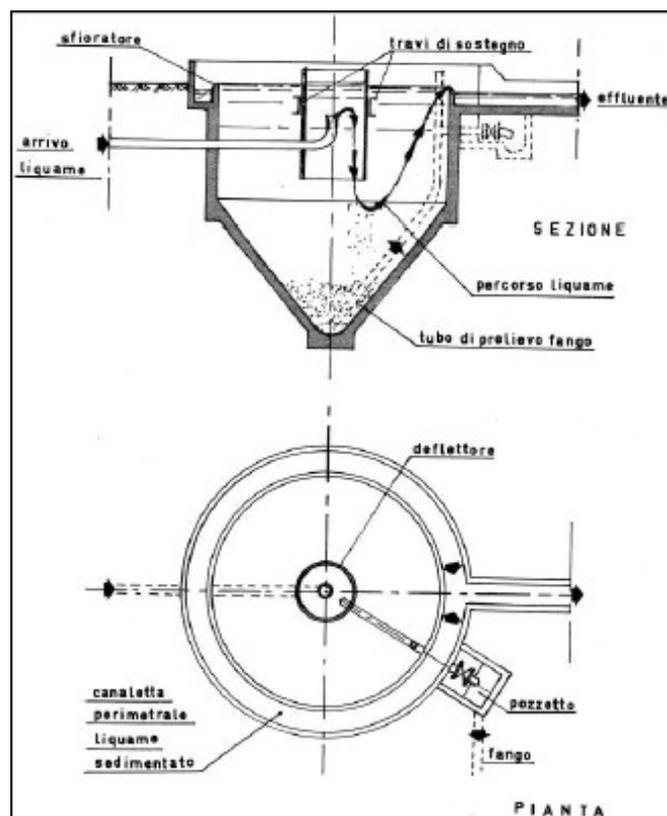


Fig. 11 – Vasca di sedimentazione a flusso ascensionale tipo Dortmund di forma cilindrica

Il liquame immesso nella vasca è distribuito uniformemente e deviato verso il basso tramite un apposito tubo deflettore, e quindi, con un percorso ascendente, confluisce per sfioro alla canaletta di raccolta, posta alla superficie della vasca.

Il fango, addensatosi sul fondo, viene raccolto in un apposito pozzetto, cui confluisce tramite una tubazione che pesca dal fondo della vasca, sfruttando il carico idrostatico dato dalla differenza di quota esistente tra il pelo libero nella vasca e la quota di posizionamento della saracinesca di immissione del fango nel pozzetto.

Ormai per impianti di una certa potenzialità si utilizzano quasi sempre *vasche di sedimentazione meccanizzate* (Fig. 12) dotate di fondo con limitata pendenza e di particolari dispositivi di raschiamento meccanico del fondo che, spostandosi molto lentamente, spingono il fango sedimentato verso la tramoggia di raccolta.

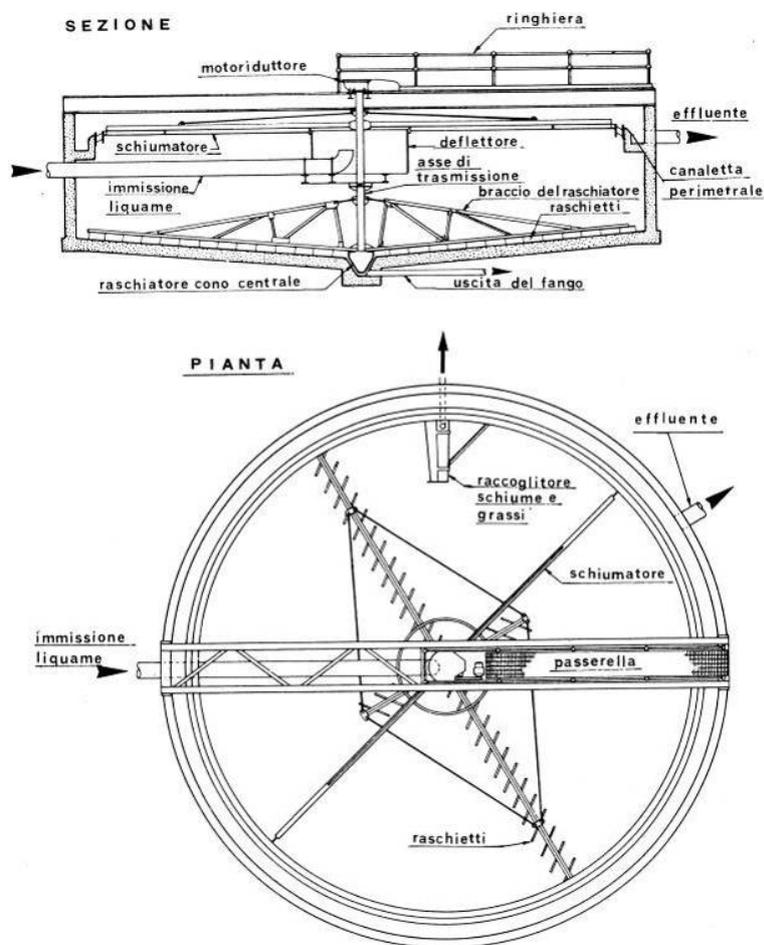


Fig. 12– Vasca di sedimentazione a pianta circolare meccanizzata

## 2.2. Trattamenti biologici

I trattamenti biologici possono essere utilizzati non solo per la rimozione della sostanza organica ma anche, all'occorrenza, per la rimozione dei nutrienti (azoto e fosforo) presenti nel liquame.

Allo scopo, possono realizzarsi processi a biomassa sospesa (*impianti a fanghi attivi*) e a biomassa adesa (*impianti a filtri percolatori*) che coinvolgono batteri aerobi o anaerobi specializzati nei vari trattamenti.

### 2.2.1. Impianti a fanghi attivi:

Il processo a fanghi attivi è un trattamento biologico aerobico a biomassa sospesa il cui scopo ultimo è separare in un sedimentatore secondario l'effluente chiarificato dalla biomassa estratta sotto forma di fango attivo.

La Fig. 13 riporta uno schema a blocchi completo di un impianto a fanghi attivi "classico", ossia nella versione che ancora oggi viene adottata nei grandi impianti urbani, costituito da:

- una vasca di aerazione
- una vasca di sedimentazione
- un circuito di ricircolo dei fanghi e di allontanamento dei fanghi di supero
- opportuni dispositivi di aerazione e miscelazione

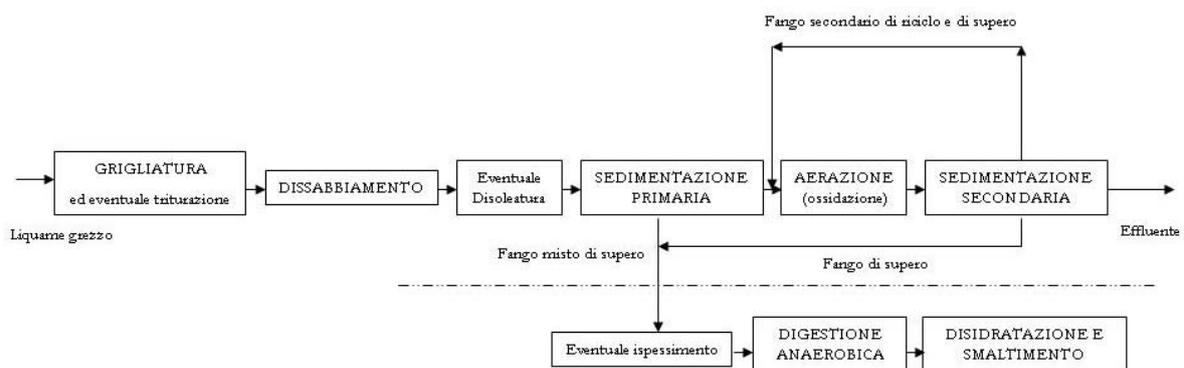


Fig. 13 – Schema a blocchi di un impianto a fanghi attivi di tipo "classico"

La biomassa attiva è prodotta in continuo all'interno della vasca di aerazione utilizzando l'energia accumulata a seguito della degradazione aerobica del substrato organico introdotto e di parte della biomassa stessa, assimilando parte della sostanza organica e dei nutrienti (in primo luogo azoto e fosforo) presenti nel sistema per sintetizzare nuovo materiale cellulare.

La biomassa accumulata in vasca viene mantenuta in sospensione a scapito di energia meccanica e reintegrata mediante l'apposito ricircolo dei fanghi. Questi sono estratti dalla tramoggia di raccolta del sedimentatore che quindi non funge solo da chiarificatore dell'effluente ma ha un ruolo importante nell'intera economia del processo, separando il tempo di ritenzione idraulica del liquame da quello dei fanghi (detto tempo di residenza cellulare). Solo i fanghi prodotti in eccesso rispetto alle esigenze di stabilità del processo vengono periodicamente allontanati sotto forma di fanghi di supero.

Relativamente ai rendimenti depurativi di un impianto a fanghi attivi, il rendimento nell'abbattimento del BOD si mantiene sui valori dell'ordine del 90%.

Per quanto riguarda la rimozione dei solidi sospesi totali, per tutti i tipi di impianto a fanghi attivi, in cui si provveda al regolare smaltimento del fango di supero, si può contare su rendimenti dell'85÷90%. In merito alla rimozione dei microrganismi (batteri e virus), l'impianto a fanghi attivi risulta essere il trattamento più efficiente: vengono indicati rendimenti nell'abbattimento dei batteri patogeni (colera, tifo, ecc) dell'ordine del 96÷98%, mentre più limitata è la rimozione dei virus, dell'ordine del 50%, per quanto siano stati registrati anche rendimenti del 90÷98%, dovuti all'effetto di assorbimento operato dai fiocchi di fango.

Infine, con gli impianti a fanghi attivi si ottengono rendimenti nella rimozione dei detersivi dell'ordine del 60÷70%. Valori simili di rendimento si ottengono anche per l'abbattimento di olii e grassi.

### 2.2.2. Impianti a filtri percolatori:

Il trattamento biologico dei liquami può anche essere condotto utilizzando l'azione di colonie batteriche adese che si sviluppano sotto forma di pellicole su idonei supporti, secondo tipologie costruttive ed impiantistiche che verranno trattate in seguito.

A differenza dei processi a fanghi attivi, la biomassa non risulta più sospesa nell'effluente che verrà sottoposto al trattamento; essa rimane nel reattore biologico fino a quando non intervengono fenomeni di distacco connessi al metabolismo batterico o al regime idraulico del processo.

Ciò consente di svincolare i tempi di residenza cellulare ed idraulico del sistema senza dover ricorrere, come nel caso dei fanghi attivi, al ricircolo della biomassa; la decantazione finale è pertanto necessaria solamente per migliorare la qualità dell'effluente trattato, rimuovendo i solidi sedimentabili costituiti dalla pellicola staccatasi dai supporti.

Tra i processi a biomassa adesa per i quali vi sono stati recenti sviluppi nel campo del dimensionamento e/o nell'impiantistica, si possono menzionare i letti percolatori.

Il letto percolatore (Fig. 14) è costituito da una massa di materiale (pietrisco, pezzi di carbon coke, scorie di altoforno, ecc.) dell'altezza di alcuni metri (2÷3 m) contenuto in una parete perimetrale generalmente cilindrica.

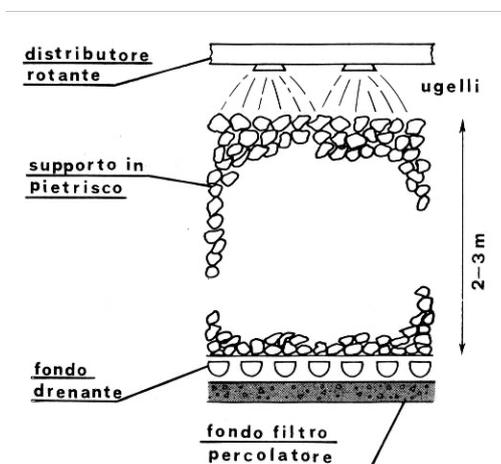


Fig. 14 – Schema della conformazione di un filtro percolatore

Il liquame (preventivamente chiarificato nella vasca di sedimentazione primaria) viene spruzzato sopra la superficie del filtro, mediante vari sistemi di distributori fissi o mobili, e percola attraverso lo strato di pietrisco, scorrendo lungo la superficie degli elementi che costituiscono il letto; lo spazio fra un elemento e l'altro non viene mai saturato per consentire la presenza di aria e di ossigeno libero. Dopo il passaggio attraverso lo strato di pietrisco il liquame si raccoglie alla base dello stesso, dove un sistema di canalette lo convoglia fuori dal letto percolatore. In tal modo il pietrisco viene a costituire un supporto ove attecchiscono i microrganismi che costituiscono la pellicola biologica, alimentata dalle sostanze contenute nel liquame che scorre attraverso il letto in un ambiente ove è assicurata la presenza di ossigeno.

Nel periodo iniziale di funzionamento di un percolatore, il liquame passa attraverso il letto senza subire praticamente alcuna trasformazione. Gradualmente la superficie di ogni elemento di pietrisco del letto si ricopre di una pellicola biologica gelatinosa attiva, dello spessore di 2÷3 mm, costituito da un'associazione di batteri, funghi, protozoi, alghe e anche da organismi più complessi come vermi ed insetti aderenti al materiale di supporto.

Gli organismi costituenti la membrana adsorbono e degradano le sostanze organiche disciolte e colloidali presenti nei liquami.

Per effetto di complessi fenomeni, la membrana biologica si distacca, periodicamente e con continuità dal materiale di supporto e viene raccolta in una fase di sedimentazione (sedimentazione secondaria) secondo lo schema di Fig. 15.



Fig. 15 – Schema a blocchi di un impianto a filtro percolatore di tipo “classico”

Il processo biologico che si sviluppa nel letto percolatore viene comunemente ritenuto di natura aerobica; la membrana biologica, in presenza di sufficiente ossigeno nell'aria, ossida i composti organici biodegradabili presenti nel liquame con formazione di prodotti quali anidride carbonica, acqua, nitrati e solfati.

Con i filtri percolatori si possono ottenere rendimenti depurativi piuttosto buoni e, rispetto ai fanghi attivi, presentano il vantaggio che i consumi di energia sono molto più ridotti in quanto l'aerazione avviene per effetto di tiraggio naturale, mediante un camino di tiraggio attraverso il quale è assicurato il richiamo di aria dall'esterno, non necessitando perciò di sistemi elettro-meccanici dedicati.

Altro vantaggio dei filtri percolatori consiste nel fatto che, essendo i microrganismi che provvedono alla depurazione saldamente ancorati al materiale di supporto, sono evitati quei pericoli di dilavamento dei microrganismi in conseguenza di eccessivi carichi idraulici che sono invece assai temibili negli impianti a fanghi attivi.

I rendimenti depurativi raggiunti con un impianto a filtri di percolazione non riescono però a raggiungere quelli dei fanghi attivi relativamente alla rimozione del BOD: ciò è dovuto essenzialmente al fatto che il tempo di contatto tra le sostanze organiche presenti nei liquami e gli organismi della membrana biologica è più basso di quello in genere realizzabile con gli impianti a fanghi attivi normali, per cui una parte del BOD solubile riesce a sfuggire.

### 2.3. Trattamenti chimici

La Fig. 16 illustra lo schema a blocchi di un trattamento chimico delle acque di rifiuto.

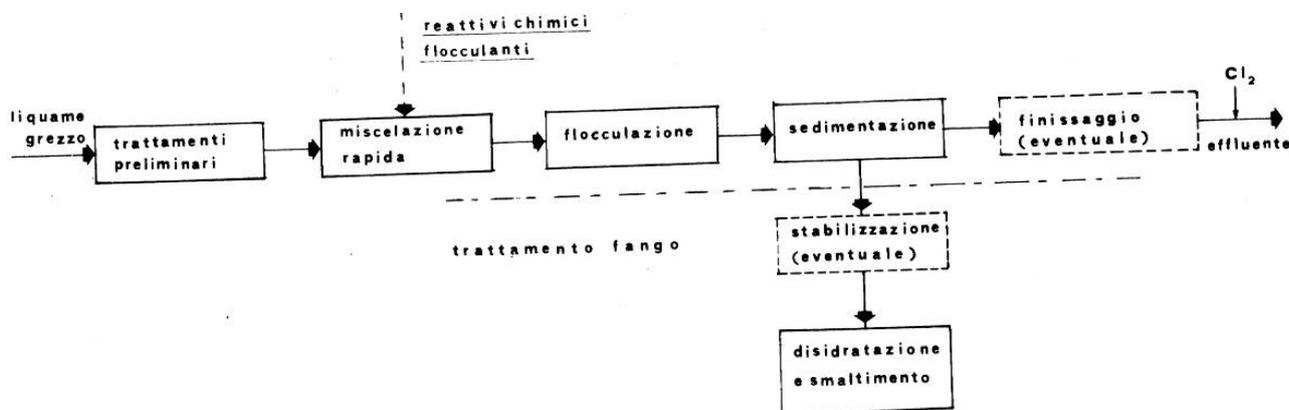


Fig. 16 – Schema a blocchi di trattamento chimico

Il liquame grezzo, dopo gli usuali trattamenti preliminari (grigliatura, dissabbiamento, eventuale disoleatura), viene mescolato in uno o più reagenti chimici (miscelazione rapida): le particelle colloidali (organiche ed inorganiche), in sospensione stabile per effetto di repulsione reciproca determinata dalle cariche elettriche di stesso segno (in genere negativo) che possiedono, vengono destabilizzate dai reagenti chimici aggiunti, con conseguente coagulazione che si verifica con elevatissima velocità all'atto stesso del contatto con i reagenti chimici (la fase di coagulazione con miscelazione rapida si manifesta con un avvicinamento reciproco delle particelle colloidali, potendo, una volta annullata o ridotta la carica elettrica causa di mutua repulsione, avere la predominanza le forze di attrazione reciproca molecolare fra le singole particelle - forze di Van der Waals).

Le particelle destabilizzate, sotto forma di “microflocchi” sono assoggettate ad una successiva fase di flocculazione (o “coagulazione ortocinetica”): la miscela viene agitata dolcemente, onde favorire l'opportunità di collisione (statistica) delle particelle, e conseguentemente la “coalescenza”, cioè l'aggregazione e crescita dei microflocchi, che si legano reciprocamente per fenomeni di adsorbimento, e nel contempo provvedono ad inglobare meccanicamente quelle particelle colloidali rimaste ancora in sospensione. Viene aumentato conseguentemente il volume ed il peso specifico dei flocchi, che risultano così ben visibili ad occhio nudo.

Risultato della coagulazione-flocculazione è pertanto la trasformazione di sostanze colloidali, non sedimentabili, in sostanze sedimentabili, cioè in fiocchi che, in una successiva fase di sedimentazione, possono essere agevolmente raccolti sul fondo della vasca o comparto di sedimentazione, sotto forma di fango. I fanghi di supero prodotti sono eventualmente stabilizzati per via biologica o per via chimica, e sono quindi avviati alla disidratazione e smaltimento finale, con modalità del tutto analoghe a quelle attuate per i trattamenti biologici precedentemente considerati.

I rendimenti depurativi nella rimozione delle sostanze organiche, per quanto buoni, sono inferiori rispetto a quelli ottenibili negli impianti con trattamento secondario di tipo biologico, in quanto con questo processo si rimuovono bene le sostanze organiche colloidali, ma non altrettanto bene quelle disciolte, che sono abbattute solo in piccola parte per adsorbimento: cioè, con il solo trattamento chimico, si ottengono rendimenti “medi”, che stanno fra quelli della semplice sedimentazione e quelli dei processi biologici secondari.

I reattivi coagulanti più adatti sono certi sali minerali a cationi polivalenti, in particolare i sali di ferro e di alluminio, e specificatamente:

- il solfato di alluminio
- il solfato ferroso e ferrico
- il cloruro ferrico
- il policloruro di alluminio

Particolarmente utilizzato è il *cloruro ferrico*, per la sua economicità e per la sua facilità a formare fiocchi compatti e grossi, oltre che per la facilità di dosaggio, venendo esso commercializzato prevalentemente in soluzione acquosa; esso è adatto su liquami concentrati, a pH alcalino, ricchi anche di ammoniaca.

Uno degli svantaggi più consistenti dei trattamenti chimici rispetto a quelli biologici, va visto nella maggiore, spesso sensibilmente maggiore, quantità di fango di supero prodotta sia perché le sostanze organiche presenti nei liquami grezzi non subiscono quelle riduzioni dovute al metabolismo dei microrganismi tipiche dei processi biologici, sia perché ai solidi presenti originariamente nei liquami si aggiungono anche i solidi presenti nei reagenti chimici.

Con i trattamenti chimici si ottengono rendimenti nella *rimozione del BOD* che sono intermedi fra quelli ottenibili con la sedimentazione semplice e quelli realizzabili con i trattamenti biologici ossidativi.

In effetti, con i trattamenti chimici non si riesce ad abbattere più del 20÷25% del BOD solubile, per effetto di adsorbimento. Risulta, pertanto, che i rendimenti complessivi nella rimozione del BOD non superano il 65÷70%. Per la *rimozione dei solidi sospesi* si può contare su valori massimi dell'ordine del 90%.

Per quanto riguarda la *rimozione dei microrganismi* (e specificatamente di batteri e virus) con coagulanti metallici si raggiungono valori assai elevati, analoghi a quelli con impianti biologici, di oltre il 90%; inoltre, se si utilizzano reagenti chimici con valori di pH superiore ad 11, l'abbattimento dei microrganismi può arrivare ad essere del 95-99%, portando quindi ad una vera e propria disinfezione dell'effluente finale.

Con il trattamento chimico si ottiene una sostanziale *rimozione* anche dei *composti del fosforo*. Meno significativo è invece l'abbattimento dei *composti dell'azoto*.

Ottima è la *rimozione di oli e grassi*, migliore ancora che negli impianti biologici: in effetti, i reagenti coagulanti riescono anche a “rompere” le emulsioni oleose, consentendo quindi la separazione di oli e grassi per gravità, e il loro allontanamento tramite apposite spatole superficiali. Sono attesi rendimenti normali del 70%, ma talvolta anche superiori. Per giunta, anche con acque in origine molto ricche di oli e grassi, si possono limitare i pretrattamenti di disoleatura, deferendo questa funzione appunto al trattamento chimico di flocculazione-sedimentazione.

## 2.4. Trattamenti di disinfezione

La disinfezione è un trattamento chimico (o più raramente fisico) in cui avviene la distruzione dei microrganismi patogeni (batteri, virus e protozoi) presenti nell'effluente e solo parzialmente rimossi con gli altri trattamenti (i quali rendimenti massimi di abbattimento si attestano nell'intervallo del 70-99%). Lo scopo della disinfezione è ottenere un effluente che possa essere scaricato nel corpo idrico ricettore, minimizzando i rischi igienico-sanitari dovuti all'utilizzo di quest'ultimo (produzione di acque potabili, balneazione, pesca, molluschicoltura, etc.).

Sono stati individuati ed applicati diversi agenti disinfettanti di tipo chimico (cloro e suoi composti, bromo e suoi composti, ozono, acido peracetico, ecc.) e fisico (raggi ultravioletti, calore, etc.): solo una limitata parte di essi risulta economicamente applicabile agli impianti di depurazione di piccole dimensioni.

Il disinfettante ottimale è quello che associa un'elevata tossicità nei confronti dei microrganismi anche a basse concentrazioni ad una scarsa tossicità nei confronti delle forme di vita superiori; è economico, stabile, persistente, ad azione rapida, sicuro, di semplice utilizzo, non interagisce con altro materiale organico che non sia il materiale cellulare e non genera composti chimici pericolosi per la salute umana e per l'ambiente acquatico.

L'applicazione della disinfezione agli impianti di depurazione privilegia l'utilizzo di un agente disinfettante che sia economico e, soprattutto, sicuro e di semplice impiego: l'agente disinfettante tipico è l'ipoclorito di sodio ( $\text{NaClO}$ ), anche se più recentemente si va affermando il ricorso ai raggi ultravioletti (UV).

*L'ipoclorito di sodio* è più economico rispetto ai raggi UV, affidabile in un'ampia gamma di condizioni (ad esempio non richiede che l'effluente sia limpido), più stabile (non deve essere preparato sul luogo), persistente (quindi ad azione disinfettante e tossica prolungata) e ha una moderata capacità di rimuovere colore e odore (a causa della tipica azione ossidante nei confronti della sostanza organica). Per contro, i *raggi UV* sono agenti battericidi a largo spettro (non solo nei confronti dei batteri ma anche dei virus) indipendentemente dai valori del pH, non reagiscono con l'ammoniaca, non generano sottoprodotti pericolosi, non incrementano il contenuto solido nell'effluente, non sono corrosivi e la loro applicazione richiede brevissimi tempi di contatto (dell'ordine dei secondi) ed è molto semplice, ma non è persistente (la sua azione non si prolunga nel tempo in caso di sovraesposizione e pertanto può dar luogo a fenomeni di fotoriattivazione della carica batterica).

## 2.5. Trattamento dei fanghi

Come già accennato in precedenza, durante i trattamenti di depurazione si vengono a formare ingenti quantità di fango: un fango è un miscuglio di sostanze organiche ed inorganiche in acqua, caratterizzato anche da una bassa percentuale di sostanze solide in sospensione.

È assolutamente indispensabile assicurare che tali fanghi non vengano, neppure in piccola parte, a contatto con il corpo idrico ricevente; infatti, i depositi di fango sul fondo di un fiume influenzano sfavorevolmente il corso del processo naturale di autodepurazione, a causa della loro elevata domanda di ossigeno. Si instaurano così, a livello del fondo, processi anaerobi con sviluppo di gas nocivi, quindi, le sostanze inquinanti che vengono eliminate dal flusso liquido tramite il processo depurativo, si ritrovano allo stato più o meno concentrato sotto forma di fanghi, che richiedono un trattamento e uno smaltimento finale.

Accanto alla linea acqua, i cui componenti, dispositivi e trattamenti associati sono stati presentati fino a questo punto, in ogni impianto di depurazione è pertanto individuabile una linea fanghi, più o meno complessa, cui viene avviato il fango di supero o fango in eccesso: esso deve essere prelevato ed allontanato periodicamente e con continuità dalla linea acqua, per evitare che le concentrazioni di solidi sospesi presenti in fasi caratteristiche di trattamento dei liquami, superino i valori accettabili per un corretto funzionamento dell'impianto stesso.

I trattamenti che possono essere ipotizzati per i fanghi dipendono da numerosi fattori: caratteristiche ambientali, locali, caratteristiche intrinseche dei fanghi da trattare, potenzialità dell'impianto e tipo di smaltimento finale.

### 2.5.1. Caratteristiche generali del fango:

I solidi sospesi presenti in un liquame, e quindi nel fango, sono in parte solidi non volatili (minerali), e in parte solidi volatili (organici).

Una grandezza caratteristica dei fanghi è la *concentrazione di materie secche*, che è la grandezza corrispondente ai solidi totali vista a proposito dei liquami, e si esprime generalmente in g/l o in % di volume. Rappresenta la quantità di solidi sospesi caratteristici del fango, e di solidi filtrabili presenti nella miscela liquida, che rimangono in un contenitore dopo che tutta l'acqua è stata fatta evaporare a 105°C. I solidi filtrabili presenti nell'acqua del fango rappresentano una percentuale assai ridotta, per cui la concentrazione di materie secche presenti nel fango, è normalmente assimilabile al contenuto di solidi del fango.

L'aspetto fisico del fango di supero è diverso a seconda della sua origine e dei trattamenti subiti:

- I *fanghi provenienti dalla sedimentazione primaria* hanno colore grigio, caratteristiche vischiose, odore che può essere nauseabondo, specie se il fango ha soggiornato per tempi troppo lunghi sul fondo della vasca di sedimentazione.
- Il *fango attivo* ha normalmente colore bruno, e caratteristiche fioccosi.
- Il *fango proveniente da impianti a filtri percolatori* è brunastro, con caratteristiche che sono granulose per un fango proveniente da filtri a basso carico, e fioccosi per un fango proveniente da filtri ad alto carico.
- Nel caso di *impianti con precipitazione chimica*, il fango assume caratteristiche assai variabili a seconda del tipo di reagente utilizzato; è normalmente scuro, ma assume colore rossastro se il coagulante è costituito da sali di ferro, e aspetto gelatinoso se si sono adottati sali di alluminio.

L'acqua presente nel fango (Fig. 17) può essere di tre diverse tipologie:

- A. *Acqua interparticellare*: è quella trattenuta fra le particelle di fango, e può essere facilmente allontanata per mezzo dell'azione stessa della gravità oppure con specifici metodi di disidratazione naturale ed artificiale. Costituisce la porzione più cospicua, in quanto rappresenta mediamente il 70÷75% dell'umidità del fango.
- B. *Acqua interstiziale*: si tratta di acqua di idratazione colloidale e di acqua capillare legata alle singole particelle del fango da forze di attrazione elettrica e molecolare: è più difficile da eliminare rispetto all'acqua interparticellare, e per eliminarla sono richiesti specifici processi di disidratazione, corredati anche da una azione di condizionamento del fango. Si trova nel fango in percentuali di circa il 20%.
- C. *Acqua particellare*: è la porzione più difficile da eliminare, e richiede notevole energia, in quanto fa parte della struttura stessa delle particelle di fango. È presente in percentuali variabili fra il 2,5% e l'8%. Può essere estratta solo con processi di essiccamento per via termica.

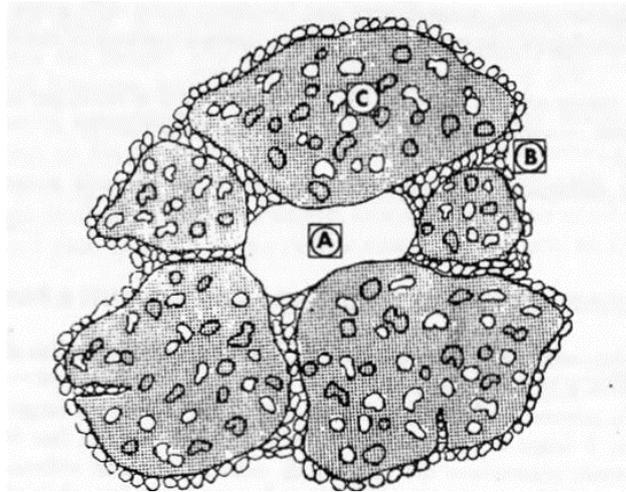


Fig. 17 – Indicazione schematica dei vari tipi di acqua individuabile nel fango

### 2.5.2. Trattamenti

I trattamenti possibili sui fanghi hanno lo scopo di:

- consentire una *riduzione del contenuto d'acqua* dei fanghi per ridurre così il volume di fango da inviare ai successivi trattamenti e per renderlo economicamente trasportabile;
- consentire la *stabilizzazione dei fanghi* dal punto di vista dell'attività biologica al fine di rendere il fango non putrescibile;
- rendere i fanghi idonei alla destinazione prevista.

#### 2.5.2.1. Ispessimento

Un fango si dice ispessito, o addensato, quando il suo tenore in acqua, o umidità, è notevolmente più basso del normale tenore d'acqua che ha quando viene prodotto. Pertanto, un ispessitore è una particolare apparecchiatura atta ad ottenere, come scopo primario, una sostanziale riduzione del tenore in acqua del fango (Fig. 18).

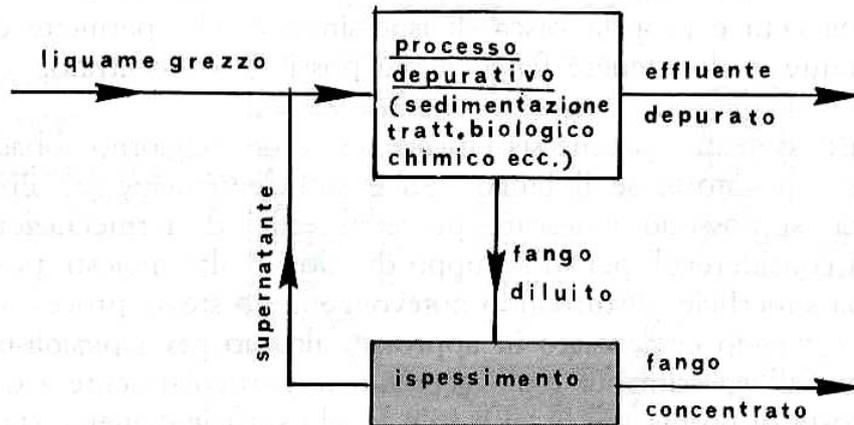


Fig. 18 – Schema del processo di ispessimento

L'ispessitore tradizionale avente il funzionamento più economico è quello a gravità: è costituito da una vasca di sedimentazione in cui, anziché immettere liquame, viene immesso fango con concentrazione già abbastanza elevata, e in cui l'effetto gravitazionale consente di realizzare un maggiore addensamento delle particelle solide (Fig. 19).

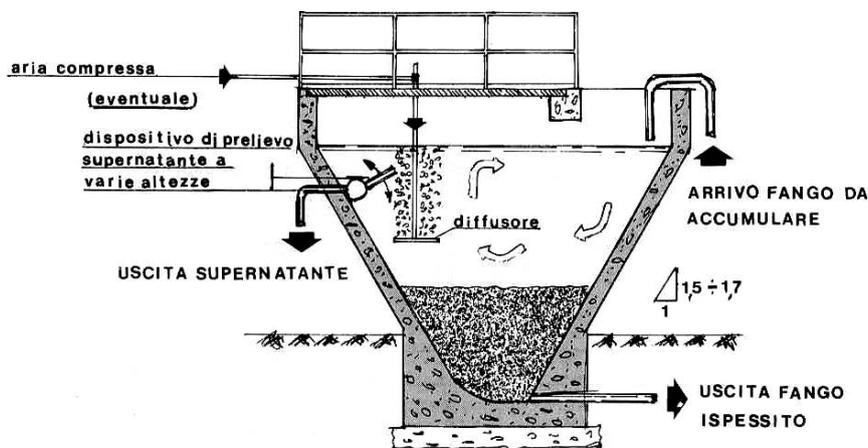


Fig. 19 – Vasca di ispessimento “a gravità” di tipo statico a funzionamento discontinuo

Oggi si utilizzano sempre più di frequente ispessitori a funzionamento continuo a miscelazione e raccolta meccanica del fango, al fine di accorciare i tempi di trattamento (Fig. 20).

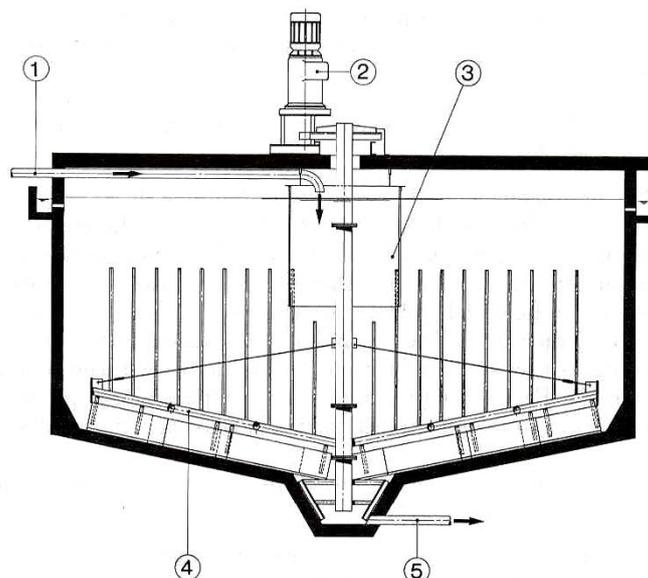


Fig. 13.10 - Tipo di vasca di ispessimento con funzionamento continuo a miscelazione e raccolta meccanica del fango.  
 1) Alimentazione; 2) gruppo motoriduttore di azionamento; 3) deflettore di ripartizione; 4) braccio del raschiatore; 5) uscita fango ispessito (doc. Degrémont).

Fig. 20 – Vasca di ispessimento di tipo meccanico con funzionamento continuo

Con l'ispessimento del fango si ottiene il risultato finale desiderato della liberazione del *supernatante* (acqua del fango), che normalmente viene risollevato a monte del trattamento depurativo del liquame. Il grande vantaggio dell'ispessimento è quello di consentire una notevolissima riduzione del volume e del peso di fango, che risulta preziosa, in quanto permette sostanziali economie nelle fasi successive di trattamento del fango. L'accumulo del fango è opportuno ogniqualvolta convenga che il fango sia trattenuto prima di potere essere sottoposto ad un successivo trattamento, o prima di essere smaltito. L'accumulo può essere realizzato creando appositi volumi di raccolta di fango estratto da altri trattamenti, oppure in vasche a parte. In questo ultimo caso, dato che l'accumulo comporta in definitiva, la raccolta del fango in condizioni statiche entro un contenitore, si può ottenere anche l'ispessimento del fango, per cui vale la pena che la vasca di accumulo sia una vera e propria vasca d'ispessimento, che permette di allontanare il liquido supernatante, e di ottenere fango il più possibile concentrato. L'operazione d'ispessimento, affinché sia efficace, esige un soggiorno abbastanza prolungato del fango nell'ispessitore: se il fango non è sufficientemente stabilizzato, in questo periodo di sosta si possono innescare processi settici di fermentazione che, oltre a provocare disagi considerevoli per lo sviluppo di odori molto molesti, possono indurre la risalita di gas alla superficie, disturbando notevolmente lo stesso processo d'ispessimento. Pertanto, è opportuno avviare all'ispessimento e all'accumulo solo fanghi sufficientemente stabilizzati, per via aerobica o anaerobica, o anche per via chimica.

#### 2.5.2.2. Stabilizzazione del fango

I fanghi estratti dalla linea trattamento acque come fango di supero sono generalmente ancora caratterizzati da un elevato grado di putrescibilità; cioè, se lasciati all'aria, la notevole quantità di sostanze organiche ancora in essi presente, in mancanza di sufficiente ossigeno disponibile allo stato disciolto nella massa del fango, entra in fermentazione settica, con sviluppo di odori modesti, e con l'acquisizione da parte del fango di caratteristiche chimico-fisiche che male si adattano ai trattamenti successivi.

Altro punto fondamentale è che nel fango si concentrano gran parte di quei microrganismi che sono presenti in enormi quantità nei liquami di origine civile, e quindi anche una grande quantità di microrganismi patogeni: ciò rende la manipolazione del fango notevolmente pericolosa per gli operatori degli impianti di depurazione, e anche per coloro che provvedono allo smaltimento finale. La stabilizzazione del fango può essere ottenuta o *per via biologica*, o *per via chimica*.

##### 2.5.2.2.1. Stabilizzazione biologica (o digestione del fango)

Quando è ottenuta per via biologica, in condizioni controllate, si parla di *digestione del fango*.

La digestione completa o totale comporta una elaborazione molto spinta delle sostanze organiche presenti nei fanghi; negli impianti di depurazione interessa ottenere invece una digestione tecnica, cioè anche non perfetta e completa, ma pur tale che il fango risulti condizionato, si presenti cioè senza inconvenienti alle successive manipolazioni, e possa in particolare essere disidratato mediante spandimento all'aria aperta senza sviluppo di cattivi odori.

La *stabilizzazione biologica* può essere effettuata o *per via aerobica* (cioè sfruttando l'azione dei microrganismi aerobi, che vivono e si sviluppano in presenza di ossigeno disciolto nel fango), o *per via anaerobica* (cioè utilizzando microrganismi anaerobi che vivono e si sviluppano in assenza di ossigeno disciolto).

Con la stabilizzazione biologica non solo si ottiene una riduzione della putrescibilità del fango e della carica batterica, ma anche una riduzione sostanziale della quantità di solidi sospesi presenti inizialmente nel fango. In effetti, i solidi volatili, cioè la materia organica di cui è costituita il fango, sono in parte biodegradabili e in parte non biodegradabili: un fango è da considerarsi perfettamente stabile quando tutte le sostanze organiche biodegradabili sono state appunto degradate, in quanto su un siffatto fango non possono più innescarsi reazioni biologiche, non essendovi più cibo disponibile per i microrganismi. La degradazione delle sostanze organiche comporta la loro trasformazione secondo ben note reazioni, donde la conseguente riduzione complessiva dei solidi sospesi.

In pratica, in un fango stabilizzato biologicamente, circa l'80÷90% delle sostanze organiche biodegradabili originariamente presenti vengono degradate, con grado di stabilizzazione tanto più elevato quanto maggiore è la riduzione.

La conseguente riduzione dei solidi sospesi totali presenti inizialmente nel fango è molto importante ed interessante, in quanto comporta una notevole diminuzione della quantità di fango che deve essere successivamente manipolata, contrariamente a quanto avviene con il trattamento chimico con calce in cui non solo non si riducono le sostanze organiche, ma anzi aumenta la massa del fango per effetto dell'aggiunta dei reagenti chimici.

Il grado di riduzione dei solidi volatili nella fase di digestione del fango dipende essenzialmente da due parametri fondamentali:

- tempo di permanenza del fango nella fase di digestione;
- temperatura alla quale si sviluppano i processi.

Per quanto riguarda il primo parametro, normalmente si hanno età del fango comprese fra 15 e 40 giorni. Per quanto concerne la temperatura, sia per la digestione aerobica che per quella anaerobica possono essere individuate tre zone:

- zona criofila, con temperature liquide sotto i 10°C;
- zona mesofila, con temperature liquide fra 10 e 40°C;
- zona termofila, con temperature liquide oltre 40°C, fino a 60°C.

I digestori aerobici lavorano in genere a temperature comprese fra la zona criofila e la zona mesofila, dipendendo la temperatura del fango essenzialmente dalla temperatura dell'ambiente esterno; solo tipi particolari di digestori aerobici lavorano nel campo termofilo.

I digestori anaerobici tendono sempre più a lavorare nel campo mesofilo, a temperatura costante controllata (32÷38°C), e meno frequentemente nel campo termofilo. Nel campo criofilo possono lavorare, solo stagionalmente, digestori non riscaldati.

In pratica, con il processo aerobico, il fango si può ammettere che sia sufficientemente stabilizzato quando la concentrazione dei solidi sospesi volatili presenti originariamente nel fango ha subito una diminuzione di circa il 40%; con il processo anaerobico, con il quale il grado di riduzione ottenibile è maggiore, il limite di riduzione è di circa il 50%.

*Digestione aerobica:*



Fig. 21 – Schema a blocchi di un impianto di digestione aerobica del fango con alimentazione continua con ispessimento del fango e ricircolo

Il processo di stabilizzazione del fango tramite digestione aerobica si è sviluppato negli anni '50, in concomitanza con l'introduzione degli impianti a fanghi attivi ad aerazione prolungata. Alla fine degli anni '60 e negli anni '70, le notevoli semplificazioni di gestione consentite da questo processo hanno portato a molteplici applicazioni anche su impianti di media potenzialità, in sostituzione della digestione anaerobica. A causa degli attuali costi dell'energia, il suo campo di applicazione si sta ridimensionando, restringendosi nell'ambito di impianti di piccola potenzialità, e solo in particolari situazioni può essere esteso ad impianti di media potenzialità.

Con la digestione aerobica si completano quei processi di assimilazione e degradazione biologica delle sostanze organiche presenti nel fango, in ambiente aerobico ricco di ossigeno, già iniziatesi e prolungatesi, a livello più o meno spinto, nella fase di ossidazione biologica.

La digestione aerobica del fango è essenzialmente applicata negli impianti a fanghi attivi (Fig. 22), soprattutto in quelli a schema semplificato, senza sedimentazione primaria; più raramente in impianti dotati anche di sedimentazione primaria.

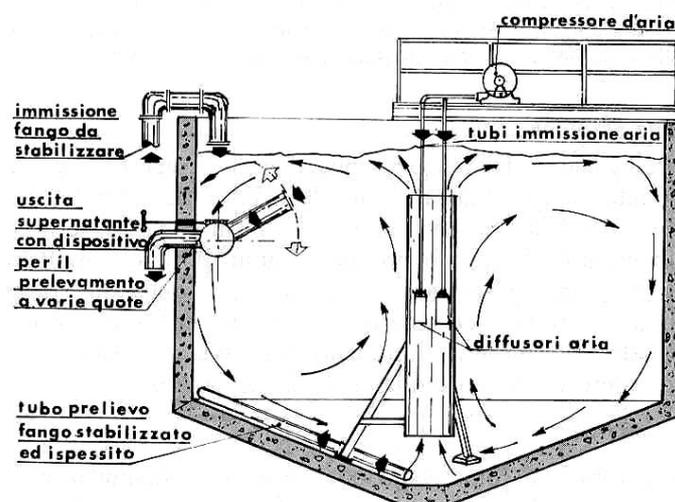


Fig. 22 – Digestore aerobico ad alimentazione discontinua

### *Digestione anaerobica:*

La digestione anaerobica del fango è applicata da lunga data, praticamente dall'inizio del '900. In seguito, fra il 1910 e il 1935, tale processo di stabilizzazione è stato approfonditamente studiato, e si è proceduto all'applicazione di digestori riscaldati artificialmente.

Si tratta di un processo che, andato abbastanza in disgrazia verso gli anni '60 a causa delle difficoltà gestionali ad esso connesse, sta attualmente subendo una notevole rivalutazione non solo nel campo degli impianti di elevata potenzialità, ma anche nel campo degli impianti di media potenzialità, per i vantaggi in termini energetici che esso comporta nell'ambito dell'economia generale dei trattamenti di depurazione.

La stabilizzazione anaerobica consiste semplicemente nell'introduzione del fango entro recipienti chiusi e privi di aria, ove i microrganismi anaerobi demoliscono le sostanze organiche contenute nel fango stesso, con produzione di una miscela di anidride carbonica e metano.

La stabilizzazione anaerobica, presenta i seguenti vantaggi:

- le sostanze organiche vengono stabilizzate, di modo che il BOD ne risulta notevolmente ridotto;
- la struttura del fango è modificata in modo tale che esso diviene più disidratabile;
- il lungo periodo di ritenzione, a temperatura relativamente elevata, fa diminuire fortemente il numero degli organismi patogeni;
- parte della sostanza solida è degradata in modo da formare liquidi e gas, così che il volume finale di fango da smaltire è sensibilmente minore;
- il fango digerito non attira i roditori;
- il gas prodotto durante la decomposizione delle sostanze organiche ha un elevato potere calorifico, e può essere riutilizzato.

Le sostanze organiche presenti nel fango, in mancanza di un sufficiente apporto di ossigeno, diventano sede di processi riduttivi anaerobi, che portano ad una progressiva stabilizzazione; negli impianti di depurazione, questi processi vengono attuati in appositi contenitori, o nel comparto di digestione delle fosse Imhoff, o in vasche chiuse separate, appositamente conformate, o in veri e propri fermentatori (i digestori anaerobici) entro i quali le reazioni biologiche si sviluppano al di fuori del contatto con l'atmosfera.

I digestori anaerobici (Fig. 23) sono strutture che in grandi impianti assumono volumi ed altezze molto rilevanti, rappresentando senz'altro le opere civili di maggiore impegno dal punto di vista costruttivo fra tutte quelle esistenti in un impianto di depurazione.

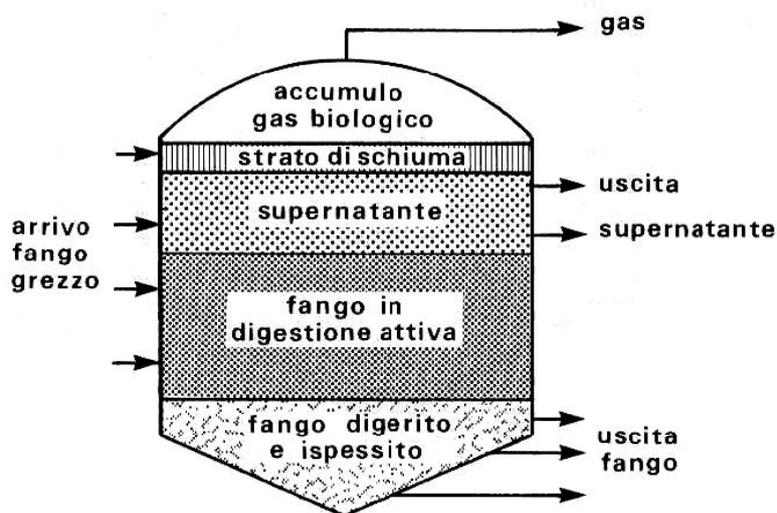


Fig. 23 – Digestore anaerobico a basso carico di tipo stratificato

Risultato della digestione anaerobica è la produzione di gas biologico, che è una miscela di gas con il 60÷70% di metano, il 23÷30% di anidride carbonica, il 2÷5% di azoto e piccole porzioni di altri gas, caratterizzato da un buon potere calorifico e che rappresenta circa il 90% dell'energia originariamente presente nelle sostanze organiche biodegradabili del fango, con pertanto rendimenti energetici nella trasformazione particolarmente elevati.

La produzione di metano costituisce uno dei motivi del rinnovato interesse nel trattamento anaerobico del fango: il metano, essendo poco solubile in acqua, si libera facilmente dal fango, accumulandosi nella parte superiore del digestore; è inoltre un buon combustibile, che può trovare interessanti applicazioni come fonte di energia, nell'ambito dell'impianto di depurazione, soprattutto per il riscaldamento dei digestori stessi.

La temperatura di riscaldamento dei digestori è normalmente di 32÷38°C; non mancano applicazioni con temperature anche di 55°C, con la quale si realizza una stabilizzazione più rapida del fango, ovviamente con maggiori costi di esercizio, e con per giunta l'inconveniente della produzione di un supernatante più ricco di materiale disciolto, e di una peggiore stabilità del processo.

I digestori anaerobici sono particolarmente adatti nel trattare i fanghi provenienti dalla sedimentazione primaria.

Negli impianti a fanghi attivi impostati secondo lo schema convenzionale per il trattamento dei liquami, cioè dotati di sedimentazione primaria, diventa quasi d'obbligo adottare per la stabilizzazione del fango la digestione anaerobica; in effetti, la sedimentazione primaria toglie dal

flusso liquido, con spesa minima di energia, una notevole porzione di sostanze organiche: queste sostanze, avviate alla digestione anaerobica, possono essere stabilizzate senza praticamente alcuna ulteriore spesa di energia.

Tanto vale allora adottare la digestione anaerobica anche per i fanghi secondari, che normalmente vengono mescolati con i primari nella vasca di sedimentazione primaria.

Negli impianti a fanghi attivi a schema semplificato, cioè non dotati della sedimentazione primaria, non sussiste più il vantaggio di trattare i fanghi primari con un processo poco costoso come quello di digestione anaerobica; conviene allora trattare tutti i fanghi per via aerobica.

Negli impianti a filtri percolatori classici, la digestione anaerobica è indubbiamente del tutto valida, è spesso attuata nel comparto di digestione di vasche combinate di tipo Imhoff, adatte per piccoli impianti, mentre nei medio-grandi impianti si passa a vasche autonome. Una digestione aerobica potrebbe invece risultare adatta per i tipi di filtri percolatori con supporto in materiale plastico senza sedimentazione primaria.

In linea generale, nella scelta fra questi due processi di stabilizzazione biologica dei fanghi, si può affermare che:

- la digestione anaerobica è da preferirsi sempre per il trattamento di fanghi primari e dei fanghi misti provenienti da impianti a medio e alto carico, mentre la digestione aerobica è più adatta per il trattamento di fanghi di supero prodotti da impianti a basso carico;
- la digestione aerobica è più adatta per impianti di piccola potenzialità, sprovvisti di fase di sedimentazione primaria, nei limiti di potenzialità fino a 20000÷30000 abitanti, in cui i minori costi d'installazione e l'esercizio più semplificato, giustificano i maggiori costi dovuti ai maggiori consumi di energia;
- la digestione anaerobica è più adatta per impianti di elevata potenzialità, per i quali installazioni più costose, e di più delicato esercizio, sono giustificate dai risparmi ed eventualmente anche dai recuperi energetici;
- la digestione anaerobica è sconsigliabile laddove si verificano notevoli variazioni nella quantità e qualità del fango da trattare.

Il più evidente svantaggio dei processi di stabilizzazione aerobica è costituito senz'altro dai notevoli consumi di energia richiesta dal processo: si tratta di una debolezza che, in tempi di carenza di energia può dimostrarsi piuttosto pesante, e che sta portando ad una rivalutazione dei digestori anaerobici anche sui piccoli impianti.

#### 2.5.2.2.2. Stabilizzazione chimica

Mentre con i processi biologici la stabilizzazione del fango è ottenuta con una degradazione biologica delle sostanze organiche, con i reattivi chimici la stabilizzazione può essere raggiunta o creando un ambiente con condizioni tali da rendere impossibile la vita e lo sviluppo dei microrganismi, oppure con reazioni ossidanti, che degradano chimicamente le sostanze organiche.

– *Stabilizzazione con calce:*

Aggiungendo al fango un'elevata quantità di calce (viva o idrata) fino a portarlo a valori del pH molto alti, è praticamente inibita la vita dei batteri e dei microrganismi in genere, e anche dei parassiti particolarmente resistenti; pertanto, nel fango vengono a cessare le fermentazioni biologiche, esso non presenta odori molesti, è facilmente disidratabile su letti di essiccamento, in altre parole il fango risulta stabilizzato.

– *Stabilizzazione con ossidazione chimica a mezzo di cloro:*

È effettuata sfruttando l'azione ossidante del cloro sul fango: si utilizza preferibilmente cloro gassoso anziché ipoclorito di sodio, così da non indurre una diluizione ulteriore sul fango. Esso viene messo in contatto con il fango in una apposita camera di reazione: si ottiene un fango perfettamente stabile, oltre che disinfettato, data la caratteristica capacità del cloro. Si tratta di un processo che, tuttavia, tende ad essere abbandonato, oltre che a causa del consumo di cloro, anche per il pericolo di tossicità dei composti organoclorati prodotti dalle reazioni delle sostanze organiche con il cloro.

– *Stabilizzazione con trattamento termico:*

Il trattamento termico dei fanghi può essere eseguito mediante due sistemi simili, denominati *Porteous* e *Zimpro*. Entrambi sono basati sull'ossidazione ad umido, ottenuta chimicamente in fase acquosa, entro reattori funzionanti ad alte temperature e pressioni.

Il *processo Porteous* si svolge a pressione di 12-14 atm e temperatura di 200°C. Il fango passa attraverso un tritatore, entra in un accumulatore, poi in uno scambiatore di calore, dove è preriscaldato dal fango già trattato. Si inietta nel reattore una corrente di vapore ad alta

pressione, per un tempo di ritenzione di circa 30 minuti. Si ottiene una riduzione della sostanza organica dell'80-90%; purtroppo tra i sottoprodotti si trovano sensibili quantità di ammoniaca. Il *processo Zimpro* differisce dal *Porteous* soprattutto perché si inietta aria invece di vapore. Si opera a pressione di 10-200 atm e temperatura di 150-320°C. Anche qui la riduzione della sostanza organica è dell'80-90%. Il trattamento termico ha come meriti principali quelli di fornire un fango residuo sterilizzato, deodorato e facilmente filtrabile.

#### 2.5.2.3. Disinfezione e pastorizzazione del fango

Con la digestione si ottengono, almeno per certe tipologie di microrganismi, rendimenti di rimozione dell'ordine del 98%. Viene così riconfermato uno dei vantaggi della stabilizzazione di fanghi, che è proprio anche quello di contribuire a fare diminuire considerevolmente la carica di microrganismi patogeni presenti nei fanghi, rendendo così meno pericolosa la manipolazione dei fanghi da parte degli operatori degli impianti, e nelle fasi successive di smaltimento finale.

Date le elevatissime concentrazioni di patogeni presenti in origine nei fanghi freschi, nei fanghi stabilizzati rimangono, comunque, concentrazioni di patogeni tali da giustificare le particolari cautele che devono essere adottate per manipolare il fango anche se stabilizzato.

I metodi sono diversi: come si è visto, la *disinfezione* è automaticamente associabile alla stabilizzazione chimica con calce o con cloro.

Non mancano le applicazioni di *radiazioni ionizzanti (raggi gamma)*, adatte soprattutto su grandi impianti municipali, oltre all'essiccamento termico, con cui si perviene ad una vera e propria sterilizzazione del fango.

Efficace è anche lo stazionamento del fango in bacini di accumulo: con temperature maggiori di 20°C e tempi di stoccaggio maggiori di 90 giorni, si ottengono abbattimenti di batteri e virus dell'80÷90%. Per impianti di piccola-media potenzialità, anche di poche migliaia di abitanti, il metodo migliore di disinfezione, per la sua economicità e semplicità, è la *pastorizzazione*, cioè il riscaldamento del fango a temperatura sufficientemente elevata e per un tempo adeguato, che consenta l'eliminazione efficace degli organismi nocivi.

Oltre agli organismi patogeni, la pastorizzazione del fango consente anche la completa inattivazione dei semi di piante varie presenti nel fango.

Normalmente, si mantiene il fango per 25÷30 minuti, alla temperatura di 70°C, iniettando vapore. Negli impianti con stabilizzazione anaerobica, il combustibile può essere lo stesso gas biologico e, per la produzione del vapore, si possono utilizzare le stesse caldaie del digestore.

Nei piccoli impianti, l'impianto di pastorizzazione si riduce ad una semplice camera di riscaldamento, in cui il fango è portato alla temperatura richiesta per il tempo desiderato.

#### 2.5.2.4. Disidratazione o essiccamento

Il fango fin qui trattato, ovvero stabilizzato, può essere smaltito sia allo stato liquido che allo stato solido. Ove possibile, conviene sempre cercare di provvedere allo smaltimento del fango ancora allo stato liquido, in quanto ogni trattamento ulteriore induce sempre maggiori costi.

Nello smaltimento del fango in questa condizione, una particolare importanza assume una corretta soluzione del problema del trasporto del fango, data la notevole incidenza economica di questa fase. Per impianti di piccolo-media potenzialità, il metodo più flessibile e più applicato è quello del trasporto su strada a mezzo di auto-botte, in quanto consente di portare il fango nelle località più varie, senza particolari vincoli. Questi vincoli esistono, invece, qualora il trasporto del fango avvenga per pompaggio in tubazioni in pressione, oppure qualora il trasporto avvenga per ferrovia.

Nel caso di smaltimento allo stato solido, occorre effettuare dei trattamenti di essiccamento o di disidratazione. Tali trattamenti possono essere di tipo naturale (letti di essiccamento) o meccanici.

##### – Essiccamento:

Il metodo più semplice per essiccare i fanghi provenienti dal trattamento dei liquami consiste nello spandimento su appositi letti provvisti di sistemi di sotto-drenaggio, riempiti di uno strato alto 20÷25 cm di sabbia. Il fango viene distribuito sopra il letto su uno strato alto 20÷30 cm ed ivi lasciato fino a che non sia possibile asportarlo manualmente, o meglio, meccanicamente; ciò accade quando il contenuto di sostanze secche nel fango è salito al 25% circa. Ai letti di essiccamento devono essere inviati solo fanghi ben stabilizzati, dati i gravi inconvenienti che indurrebbero i fanghi freschi o poco stabilizzati.

L'evaporazione è responsabile del 23÷25% della disidratazione dei fanghi, mentre il resto è dovuto al drenaggio, il quale a sua volta dipende sia dalle caratteristiche del mezzo drenante, sia dalla drenabilità del fango; con questo termine, si indica la capacità del fango di perdere acqua sgocciolando, capacità che è proporzionale alla resistenza specifica alla filtrazione. È quindi molto importante, prima di progettare un letto di essiccamento, l'esame della drenabilità del fango. In genere, si può dire che i fanghi digeriti si essiccano meglio dei fanghi freschi, ed i primari meglio dei secondari.

Un inconveniente dei letti di essiccamento è rappresentato dal fatto che la pioggia restituisce al fango buona parte dell'acqua perduta durante l'essiccazione. A ciò si può porre rimedio coprendo i letti, ma a parte la spesa non indifferente, le coperture opache d'estate trattengono i raggi solari, e d'inverno impediscono al fango di gelare.

Si tende pertanto ad impiegare coperture trasparenti, con le quali è possibile aumentare anche del 50% la resa del letto di essiccamento.

Il drenaggio è assicurato da scanalature praticate sul pavimento del letto.

– Disidratazione:

Per impianti di media potenzialità, disposti in zone urbane o suburbane in cui non ci si area disponibile per la costruzione dei letti di essiccamento, o comunque in quei casi in cui l'essiccamento naturale non risulta efficace, diventa quasi indispensabile ricorrere a sistemi di *disidratazione meccanica* dei fanghi, con particolari macchinari, nei quali la tecnologia moderna si è ampiamente perfezionata.

In questo caso, le tipologie di impianto utilizzate per l'essiccamento del fango sono:

- con filtro a vuoto
- con filtro pressa
- con pressa a nastri filtranti
- con centrifuga

Si tratta di macchinari molto costosi, sia per la spesa di primo impianto, sia anche per la spesa di esercizio, in quanto richiedono l'assistenza di personale qualificato, sono elevati i costi di energia occorrente per il loro funzionamento, i costi per le manutenzioni, e soprattutto sono elevati anche i costi per i reattivi chimici che in generale vengono utilizzati per rendere il fango facilmente disidratabile al fine di catturare la maggiore quantità possibile di particelle solide presenti nel fango.

#### 2.5.2.5. Smaltimento finale

Lo smaltimento finale dei fanghi può avvenire nei seguenti modi:

- discarica controllata;
- utilizzo agronomico;
- incenerimento con recupero di calore o energia;

Sebbene la *discarica controllata* sia il metodo più semplice e sin ora il più usato, non può essere considerata una soluzione definitiva del problema, soprattutto per gli impianti delle grandi città, in quanto si deve rilevare la progressiva riduzione di disponibilità di siti idonei per la realizzazione di discariche controllate. Ciò determina la conseguente tendenza all'incremento dei costi di trasporto e smaltimento finale.

Una seconda possibilità è *lo smaltimento del fango in agricoltura*, a condizione che esso possieda contenuti di metalli, ed altre sostanze nocive, in valori ragionevolmente bassi. Il fango essiccato, risulta essere completamente igienizzato, in quanto qualsiasi attività biologica è stata eliminata; tuttavia, il mercato lo accetta solo in modo episodico. Inoltre, l'utilizzazione dei fanghi di depurazione biologica è vincolata alla periodicità delle colture e al rispetto di regole ben precise e limitative, per cui tale soluzione non è affidabile e proponibile per un'effettiva soluzione dello smaltimento dei fanghi di depurazione delle grandi città.

La terza possibilità di smaltimento finale è la *combustione*, in quanto il fango può essere utilizzato come combustibile dato l'elevato potere calorifico, che si aggira su i 2500÷3000 kcal/kg in funzione del contenuto di sostanze organiche. Il fango secco può essere perciò incenerito assieme ai rifiuti urbani nei normali forni, migliorando notevolmente la resa termica ed energetica di eventuali stadi di recupero energetico.

### 3. Classificazione degli impianti di depurazione

Gli impianti di depurazione vengono classificati in base alla loro potenzialità, ossia in base al numero di abitanti equivalenti da servire.

L'Abitante Equivalente (AE) rappresenta l'unità di misura basilare per il dimensionamento e la scelta dell'idoneo sistema di depurazione delle acque reflue domestiche e/o assimilate; infatti, per dimensionare correttamente i sistemi di trattamento dei reflui, sarebbe necessario valutare l'effettiva produzione di liquame dei centri urbani generati dalle abitazioni e/o alle attività produttive o di servizio. Quando tale strada è impraticabile, si preferisce far riferimento al numero di abitanti equivalenti: l'abitante equivalente è convenzionalmente definito come la quantità di carico inquinante biodegradabile prodotto ed immesso in fognatura da un abitante stabilmente residente nel centro urbano nell'arco della giornata.

Ma nella rete fognaria di un centro urbano di solito non vengono convogliati i soli liquami di origine domestica ma anche quelli derivanti da altri tipi di utenze (i cui scarichi sono assimilabile dal punto di vista qualitativo a quelle domestiche), quali quelle dovute alle attività commerciali ed industriali. La valutazione del relativo carico inquinante è ottenuta mediante l'individuazione di una popolazione fittizia che è capace di produrre un carico organico biodegradabile complessivamente equivalente a quello posseduto dalle acque reflue di natura non domestica.

Il carico organico generato dal numero totale di abitanti equivalenti (residenti + fittizi) è quello che deve essere trattato nell'impianto di depurazione.

- Si definiscono "piccoli impianti di depurazione" quelli a servizio di abitazioni singole, villette a schiera, condomini residenziali, e comunque tutte quelle comunità fino a 50 abitanti equivalenti.
- Si definiscono "medio – piccoli impianti di depurazione" quelli a servizio di edifici condominiali raggruppati, collegi, convitti, e comunque tutte quelle comunità fino a 300 abitanti equivalenti.
- Si definiscono "medi impianti di depurazione" quelli a servizio di ospedali, caserme, villaggi turistici, e comunque tutte quelle comunità fino a 2000 abitanti equivalenti.
- Si definiscono "medio – grandi impianti di depurazione" quelli a servizio di quartieri e paesi cittadini, e comunque tutte quelle comunità fino a 10.000 abitanti equivalenti.
- Si definiscono "grandi impianti di depurazione" quelli a servizio di città, e comunque tutte quelle comunità da 10.000 abitanti equivalenti in su.

## Sezione 2 – Sistemi di pompaggio negli impianti di depurazione delle acque reflue

### 1. Schema idraulico esemplificativo di un impianto di depurazione

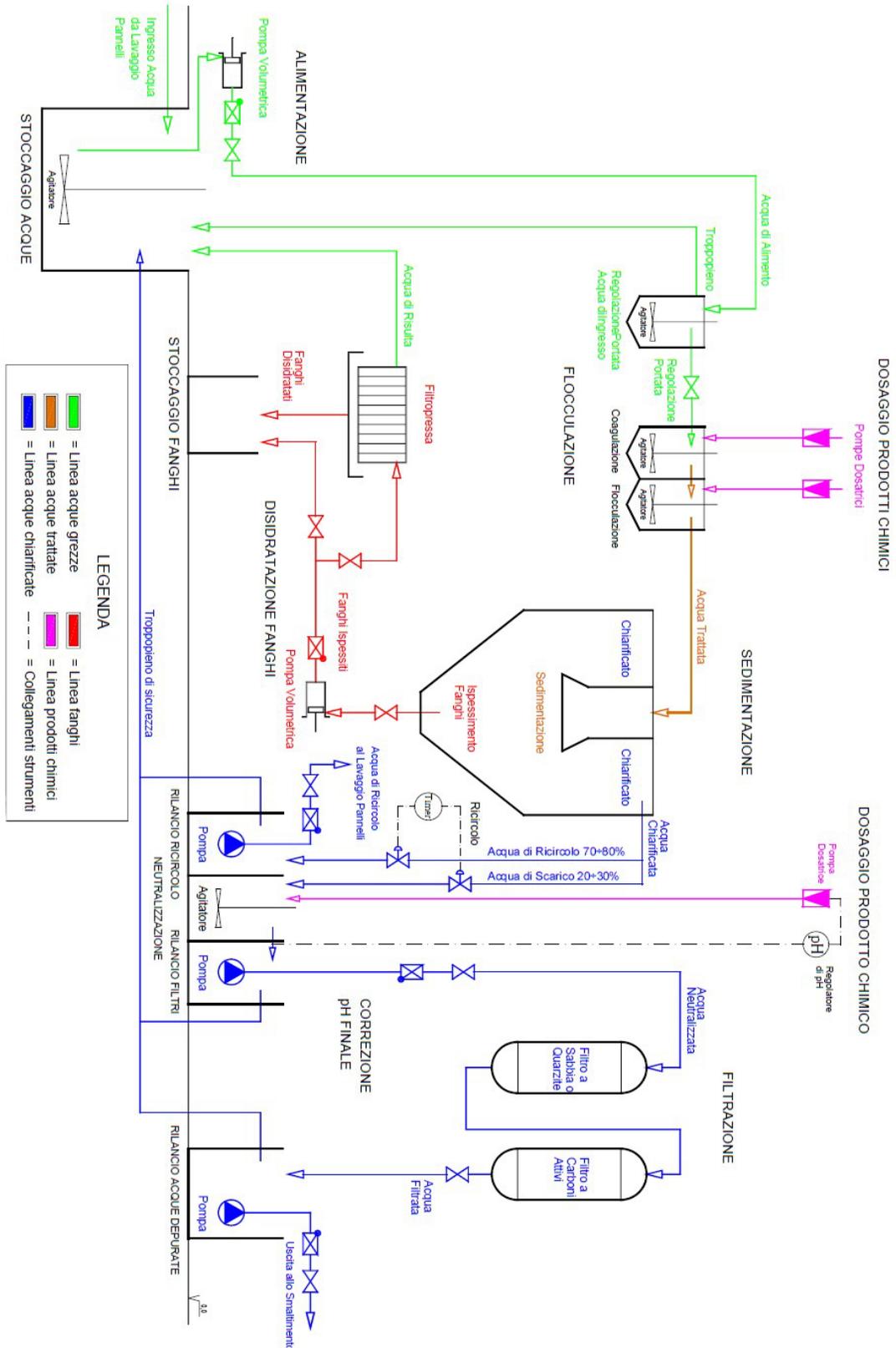


Fig. 24 – Schema idraulico semplificato di un impianto di depurazione

### Considerazioni:

Lo schema idraulico in Fig. 24 rappresenta in maniera semplificata l'insieme dei componenti e delle interconnessioni necessarie al funzionamento di un impianto di depurazione: alcune delle operazioni e dei dispositivi schematizzati in figura sono stati oggetto dei precedenti capitoli.

Qui si evidenzia che, in buona sostanza, un sistema di depurazione è un impianto di servizio costituito in buona parte da macchine a fluido. In questo capitolo ci si sofferma sulle macchine a fluido delegate allo scambio di lavoro, avendo già illustrato nei capitoli precedenti le caratteristiche delle altre principali macchine a fluido presenti nell'impianto.

In particolare, l'utilizzo di pompe è fondamentale per il trasporto di acque e/o fango tra i vari processi coinvolti; tali pompe si distinguono per tipologia a seconda del tipo di prodotto trattato, e possono essere rotodinamiche o volumetriche.

Nei prossimi paragrafi verranno discusse più nel dettaglio queste due famiglie di pompe, evidenziandone caratteristiche, vantaggi e svantaggi e campo di applicabilità.

## 2. Descrizione delle principali pompe utilizzate negli impianti di depurazione

Una pompa idraulica è una macchina di servizio che sfrutta organi meccanici in movimento rotatorio o rettilineo alternativo per trasferire energia meccanica al fluido, il che solitamente corrisponde al servizio utile di sollevare o comunque spostare fluido.

L'impiego di pompe è dunque necessario in tutti quegli scenari in cui il fluido non può essere trasportato sfruttando la gravità, oppure quando l'azione della gravità non sia sufficiente a compensare le dissipazioni che danno origine a perdite di pressione sia localizzate (determinate da giunti, raccordi, valvole, curve, etc.) che distribuite (per effetto della rugosità dei tubi lungo tratti rettilinei a sezione costante).

Le pompe utilizzabili negli impianti di depurazione si suddividono in due macrocategorie:

- *Pompe rotodinamiche*: nelle quali il pompaggio del fluido avviene sfruttando le azioni dinamiche che si sviluppano dall'interazione derivante dal moto relativo tra fluido e organi mobili;
- *Pompe volumetriche*: nelle quali il pompaggio del fluido avviene per mezzo di variazione di volume all'interno di una camera per creare aspirazione e spinta su un fluido; il fluido viene prima aspirato nella camera, creando una depressione nella medesima, e quindi espulso dalla camera, aumentando la pressione all'interno della medesima.

### 2.1. Pompe rotodinamiche

Le pompe rotodinamiche sono macchine a fluido nelle quali l'energia è trasmessa al fluido in modo continuo attraverso la rotazione di una girante, la quale impartisce al fluido energia cinetica.

Le pompe rotodinamiche possono essere classificate a seconda del modo in cui il fluido scorre all'interno della pompa; in particolare, si distinguono le pompe centrifughe (o a flusso radiale), le pompe assiali (o a flusso assiale) e le pompe a flusso misto.

Verranno qui di seguito discusse le principali caratteristiche costruttive e di funzionamento delle pompe centrifughe, in quanto macchine di più largo impiego nell'ambito degli impianti di depurazione, per poi offrire una breve panoramica generale sul principio di funzionamento delle altre suddette tipologie.

### Caratteristiche costruttive delle pompe centrifughe:

Le pompe centrifughe (Fig. 25), sono costituite da un organo mobile detto girante, caratterizzato da un moto rotatorio, da organi fissi, quali la cassa della pompa e la voluta, e da diversi elementi di accoppiamento meccanico, quali tenute e cuscinetti.

La girante è costituita da un disco su cui sono ricavate delle pale la cui geometria porta alla generazione di condotti divergenti; la girante è calettata su un albero sorretto da cuscinetti.

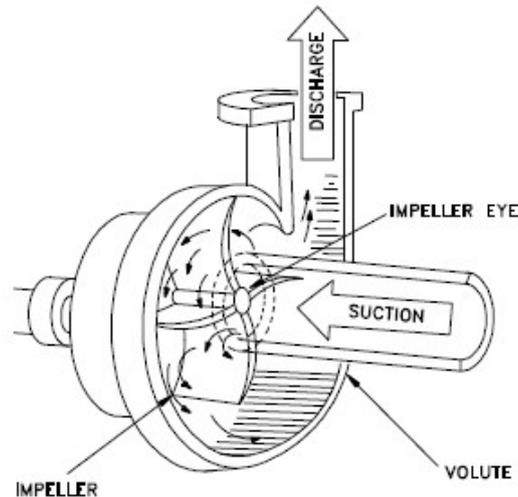


Fig. 25 – Schema di funzionamento di una pompa centrifuga

Una pompa centrifuga per poter movimentare il fluido deve essere “adescata”, cioè è necessario che sia il condotto di aspirazione, sia il corpo della pompa siano pieni di fluido; tale tipologia di pompa, infatti, richiede la presenza di fluido all'interno del suo corpo per facilitare la creazione di una depressione che permetta di aspirare ulteriore fluido; pertanto, l'aria presente all'interno della pompa potrebbe ostacolare in modo dannoso il funzionamento creando dei "blocchi d'aria", con conseguente riduzione dell'efficienza operativa. L'adescamento della pompa può realizzarsi disponendo all'inizio del condotto di aspirazione una valvola di fondo (o di non ritorno), che permette il passaggio del fluido nella direzione che porta dal serbatoio del fluido alla condotta di aspirazione.

### Principio di funzionamento delle pompe centrifughe:

Il fluido entra nella girante da un condotto assiale e scorre nel canale meridiano incrementando progressivamente la sua distanza dall'asse; grazie alla rotazione della girante, quindi, il fluido viene spinto per effetto centrifugo dal centro verso la periferia della girante.

La forza centrifuga generata, avente direzione radiale, crea in prossimità del centro della girante (detto occhio della girante) una depressione capace di richiamare altro fluido dalla condotta di aspirazione, così da mantenere sempre piena tale condotta.

In alcune pompe centrifughe vi può essere, intorno alla girante, un diffusore (Fig. 26) costituito da una corona di palette fisse che circondano la girante; la sua funzione è trasformare in energia di pressione parte dell'energia cinetica presente all'uscita della girante prima dell'ingresso del fluido nella voluta attraverso il processo di diffusione (rallentamento) della corrente.

Il fluido viene infine scaricato nella voluta (un condotto a sezione crescente che si allarga progressivamente in direzione circonferenziale) e inviato alla tubazione di mandata. La voluta ha anche il compito di completare il processo di diffusione.

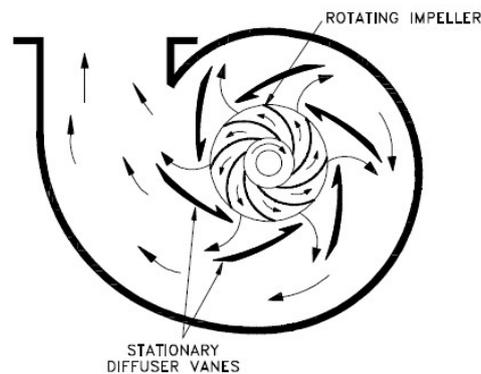


Fig. 26 – Diffusore in una pompa centrifuga

### Curve caratteristiche di funzionamento delle pompe centrifughe:

Le curve caratteristiche di funzionamento di una pompa centrifuga si ottengono diagrammando la prevalenza  $H$ , la potenza assorbita  $P_a$  e il rendimento  $\eta$  in funzione della portata  $Q$ , per una velocità di rotazione  $n = costante$ .

Per una generica pompa centrifuga, le curve caratteristiche presentano un andamento come quello riportato in Fig. 27; si noti in particolare come la portata sia strettamente inversamente proporzionale alla prevalenza della pompa.

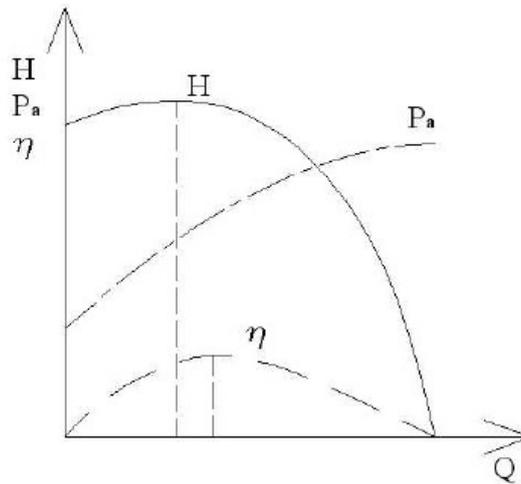


Fig. 27 – Curve caratteristiche di una pompa centrifuga

Altre tipologie di pompe rotodinamiche:

Le pompe rotodinamiche, come detto in precedenza, possono essere classificate a seconda del modo in cui il fluido scorre attraverso la girante, è ciò dipende principalmente dalla geometria e dalla costruzione della girante. In una pompa rotodinamica il flusso del fluido può essere di tipo radiale, assiale o misto; il funzionamento di una pompa centrifuga ad architettura radiale è stata già discussa in precedenza, di seguito viene riportata una breve descrizione delle pompe rotodinamiche a flusso assiale e a flusso misto.

- Pompe assiali (o a flusso assiale):

In una pompa rotodinamica a flusso assiale, la girante spinge il fluido in una direzione parallela all'albero della pompa. Le pompe a flusso assiale sono talvolta chiamate pompe ad elica in quanto il principio di funzionamento è essenzialmente uguale all'elica di una barca.

La girante di una pompa a flusso assiale ed il flusso attraverso di essa sono mostrati in Fig. 28.

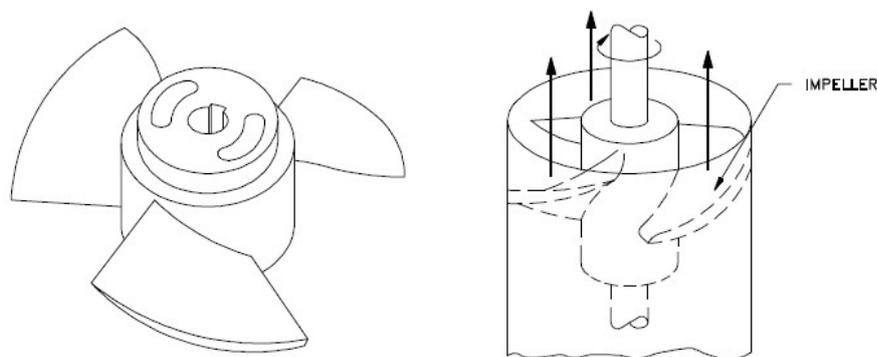


Fig. 28 – Pompa rotodinamica a flusso assiale

- Pompe a flusso misto:

Le pompe rotodinamiche a flusso misto condividono caratteristiche sia delle pompe a flusso radiale che di quelle a flusso assiale.

Quando il fluido attraversa la girante di una pompa a flusso misto, le pale della girante spingono il flusso del liquido dall'aspirazione della pompa alla sua voluta con un angolo minore di  $90^\circ$  rispetto alla direzione assiale.

La girante di una pompa a flusso misto ed il flusso attraverso di essa sono mostrati in Fig. 29.

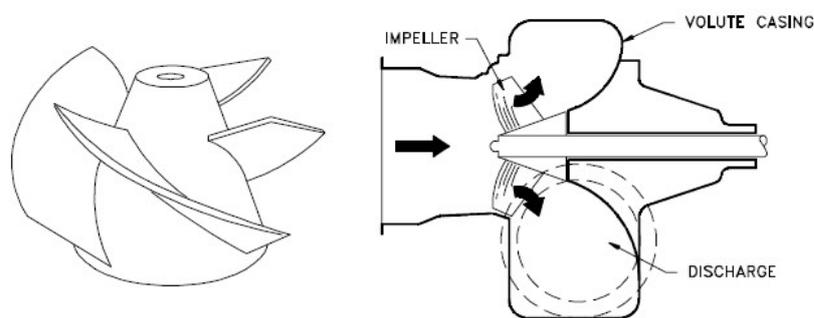


Fig. 29 – Pompa rotodinamica a flusso misto

### Applicabilità delle pompe centrifughe negli impianti di depurazione:

#### *Vantaggi:*

Le pompe centrifughe sono largamente impiegate in un vasto campo di applicazioni industriali che spaziano dal settore chimico-petrochimico, al tessile, elettronico, alimentare e molti altri.

Trovano inoltre impiego nel trattamento delle acque reflue degli impianti di depurazione, vista la loro possibilità di realizzare portate superiori rispetto ad altre pompe, con ingombri piuttosto limitati.

Risultano essere altamente affidabili, necessitano di poca manutenzione, sono relativamente economiche rispetto ad altre tipologie di pompe e possono essere realizzate con un'ampia varietà di materiali, potendo così essere configurate a seconda delle caratteristiche chimico-fisiche del fluido trattato. Le prevalenze possono arrivare a 50 – 60 mt e dipendono strettamente dalla portata, i rendimenti variano dal 30% al 92% a seconda delle condizioni di funzionamento, le velocità di rotazione sono elevate (fino a 3000 rpm).

### *Svantaggi:*

Per contro, nel contesto degli impianti di depurazione, lo svantaggio principale delle pompe centrifughe è la limitata possibilità di trattare fluidi particolarmente densi e viscosi (tipiche proprietà che caratterizzano particolarmente i fanghi di depurazione), in quanto tali fluidi generano rilevanti perdite di carico nelle tubazioni di mandata, portando alla necessità di utilizzare pompe con alte prevalenze per essere trasportati, che le pompe centrifughe non possono garantire.

Inoltre, l'eventuale presenza di solidi nel fluido trattato può portare, nel caso delle pompe centrifughe, al fenomeno negativo noto come "intasamento", che consiste nell'avvolgimento di componenti solidi come detriti e brandelli attorno all'albero su cui è posizionata la girante, portandone in certi casi al completo bloccaggio. Pertanto, nel caso di trattamento di acque reflue con una consistente presenza di solidi, le pompe centrifughe da impiegare dovrebbero essere del tipo ad aspirazione singola e con una particolare girante aperta anti-intasamento. Risulta importante poi limitare il numero delle pale della girante a due o tre (fornendo così grandi sezioni di passaggio), e l'utilizzo di uno sgrigliatore a monte della pompa può ulteriormente ridurre l'incidenza dell'intasamento.

## 2.2. Pompe volumetriche:

Tuttavia, se le portate richieste sono minori, indicativamente inferiori a 1.000 l/min, e le prevalenze superiori a 50 – 60 mt, oppure se il fluido da trattare è caratterizzato da reologia complessa (fluidi visco-plastici o miscele bifase di liquidi e solidi), diviene tecnicamente interessante fare ricorso a pompe volumetriche, cioè macchine che operano mantenendo il fluido in condizioni quasi statiche che, grazie alla loro costruzione ed al loro principio di funzionamento, permettono di generare prevalenze maggiori e di operare con fluidi non trattabili con delle comuni pompe rotodinamiche.

Le pompe volumetriche operano secondo un principio diverso rispetto a quelle rotodinamiche, in quanto sfruttano variazioni di volume in una camera per provocare azioni sul fluido.

In tal modo le pompe volumetriche possono garantire qualsiasi valore di prevalenza richiesto dalla mandata indipendentemente dal valore della portata (almeno in prima approssimazione), purché tale prevalenza sia compatibile con la resistenza meccanica dei componenti della pompa.

Le pompe volumetriche si distinguono in diverse tipologie a seconda delle caratteristiche costruttive e di funzionamento; in particolare, si distinguono le pompe alternative e le pompe rotative. Le prime sono caratterizzate da un movimento alternato dell'elemento che spinge il fluido, mentre le seconde realizzano la spinta sul fluido tramite la rotazione di componenti mobili.

### 2.2.1. Pompe volumetriche alternative a stantuffi

Le pompe volumetriche alternative a stantuffi sono costituite da un corpo cilindrico entro cui si muove uno stantuffo, collegato ad un sistema biella-manovella che conferisce ad esso un moto alternato.

In corrispondenza dell'aspirazione e dello scarico sono presenti valvole che alternativamente si aprono o chiudono durante le diverse fasi del processo.

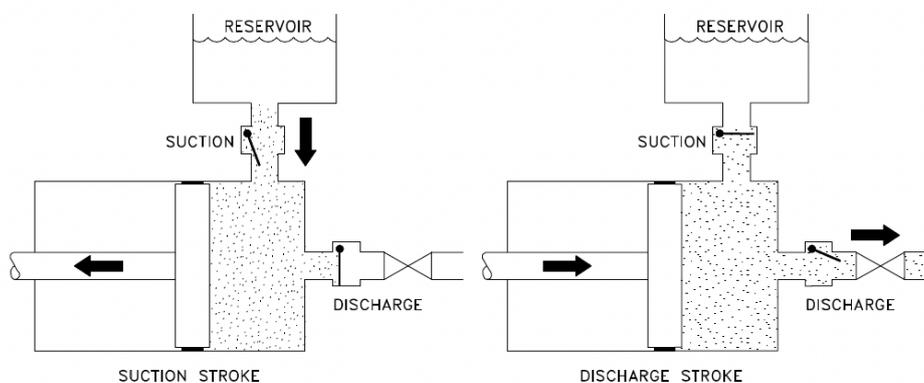


Fig. 32 – Principio di funzionamento di una pompa volumetrica alternativa a stantuffi

Prendendo come esempio l'illustrazione in Fig. 32, durante la fase di aspirazione, lo stantuffo si sposta verso sinistra, provocando l'apertura della valvola di aspirazione e permettendo il richiamo di fluido dal serbatoio al cilindro della pompa; successivamente, nella fase di scarico, lo stantuffo si sposta verso destra, provocando la chiusura della valvola di aspirazione e l'apertura della valvola di scarico, permettendo quindi la fuoriuscita del fluido dal cilindro e generando di conseguenza una portata. Il movimento alternativo dello stantuffo avviene grazie all'impiego di un motore che trascina l'albero a cui il meccanismo biella-manovella è collegato.

#### *Tipologie di pompe volumetriche alternative:*

Le pompe volumetriche alternative possono essere distinte secondo differenti criteri:

- pompe ad azionamento diretto o ad azionamento indiretto;
- pompe simplex o duplex;
- pompe a singolo effetto o a doppio effetto;

#### Pompe alternative ad azionamento diretto o indiretto:

Alcune pompe volumetriche alternative sono alimentate da motori che sono anch'essi dotati di uno stantuffo con moto alternativo; tale stantuffo può essere collegato direttamente allo stantuffo della pompa oppure può essere collegato indirettamente tramite un albero di collegamento; si distinguono così pompe alternative rispettivamente ad "azionamento diretto" e "indiretto".

#### Pompe alternative simplex e duplex:

Una pompa volumetrica alternativa dotata di un singolo cilindro, talvolta definita come pompa singola, è generalmente indicata con il termine "simplex"; analogamente, una pompa "duplex" è l'equivalente di due pompe simplex affiancate. L'azionamento degli stantuffi di una pompa duplex assicura che quando uno dei due stantuffi è in corsa ascendente, l'altro stantuffo è in corsa discendente e viceversa. Questo permette di raddoppiare la portata della pompa duplex rispetto a una analoga pompa simplex.

### Pompe alternative a singolo effetto e a doppio effetto:

Una pompa a “singolo effetto” aspira il fluido da una sola direzione, riempiendo il cilindro della pompa durante la fase di aspirazione, e successivamente spinge il fluido fuori dal cilindro nella stessa direzione nella fase di scarico.

Una pompa a “doppio effetto”, invece, durante la fase di aspirazione riempie un'estremità del cilindro di fluido, e scarica al contempo altro fluido dall'estremità opposta del cilindro. Durante la fase di scarico, l'estremità del cilindro appena svuotata viene riempita di altro fluido e l'estremità appena riempita viene svuotata. Viene mostrata una possibile configurazione di pompe alternative a singolo e doppio effetto in Fig. 33.

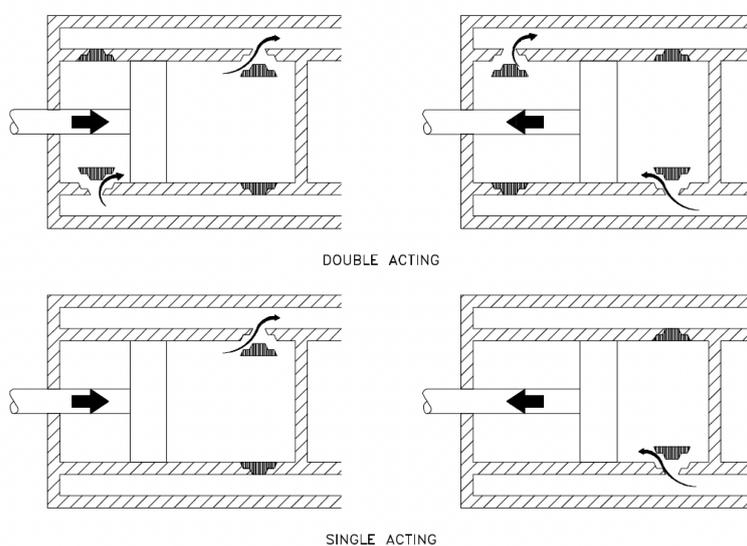


Fig. 33 – Pompa alternativa a doppio effetto (sopra) e a singolo effetto (sotto)

### Applicabilità delle pompe volumetriche alternative a stantuffi negli impianti di depurazione:

#### *Vantaggi:*

Nell’ambito degli impianti di depurazione, le pompe volumetriche alternative a stantuffi sono impiegate in tutte le applicazioni che richiedono portate modeste (al massimo dell’ordine di 50 l/s) e prevalenze molto elevate (fino a 4000 m); sono robuste e relativamente durevoli nel tempo grazie al numero ridotto di parti mobili.

### *Svantaggi:*

Uno degli svantaggi principali delle pompe volumetriche alternative a stantuffi è il flusso pulsante generato durante il funzionamento: questa pulsazione nel flusso deriva dall'azione alternativa degli stantuffi all'interno dei cilindri e, sebbene il flusso pulsante possa non rappresentare un problema in molte applicazioni industriali, potrebbe influire negativamente su alcuni processi che richiedono un flusso di fluido estremamente costante e uniforme. A differenza di altri tipi di pompe, devono lavorare necessariamente con fluidi non contenenti residui solidi all'interno, in quanto essi potrebbero danneggiare irrimediabilmente le parti interne dell'impianto e della pompa stessa.

Inoltre, le pompe volumetriche alternative, come le pompe centrifughe, non sono generalmente autoadescanti e ciò significa che, a seconda delle condizioni, necessitano di una certa quantità di fluido all'interno della camera pompante per potersi avviare.

Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione è la necessità di manutenzione programmata: a causa della loro complessa progettazione meccanica, tali pompe richiedono un livello di manutenzione adeguato a non compromettere la vita utile della pompa stessa.

#### 2.2.2. Pompe volumetriche alternative a membrana

Nelle pompe volumetriche alternative a membrana, dette anche a diaframma, la variazione di volume è data dall'oscillazione di una membrana che chiude un lato di una camera. Il movimento della membrana può essere impresso per via meccanica, per esempio attraverso un sistema a leva e manovella o attraverso una camma, oppure tipicamente in maniera pneumatica, introducendo e rilasciando aria compressa alternativamente in una camera opposta a quella di pompaggio.

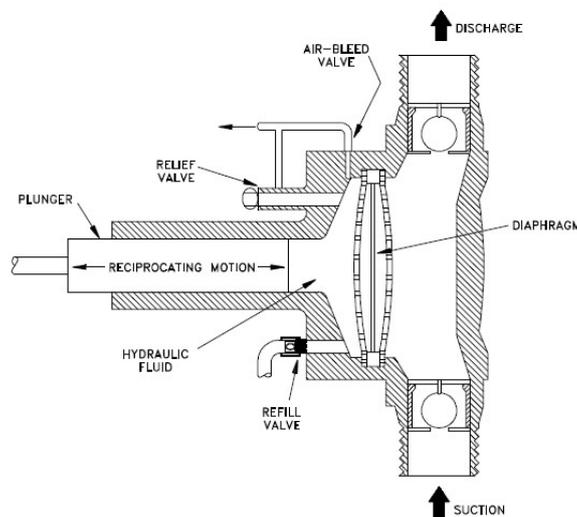


Fig. 34 – Pompa volumetrica alternativa a membrana

La prevalenza massima raggiungibile dalla pompa è determinata dalla resistenza meccanica del materiale elastico che costituisce la membrana (solitamente gomma) e, nel caso di alimentazione pneumatica, è direttamente proporzionale alla pressione fornita dall'aria di alimentazione.

Le pompe a membrana sono utilizzate per portate fino a 1000 l/min; tipicamente lavorano nel range compreso fra la pressione atmosferica ed i 10 mbar di vuoto finale, ma possono in alcuni casi arrivare fino a 0,3 mbar.

Il vantaggio principale delle pompe a membrana è l'assoluta impermeabilità della macchina ottenuta eliminando qualsiasi contatto tra il fluido pompato e l'aria compressa per imprimere il movimento alla membrana; questo permette di eliminare la possibilità di perdite, il che è fondamentale quando si trattano liquidi tossici, corrosivi o molto costosi.

### 2.2.3. Pompe volumetriche rotative

Le pompe volumetriche rotative sono utilizzate in un gran numero di applicazioni in quanto adatte a gestire fluidi di natura complessa (molto viscosi, visco-plastici o miscele bifase). Inoltre, non necessitano di valvole di aspirazione e scarico e, dunque, sono caratterizzate da una maggiore semplicità costruttiva, garantendo un'erogazione più regolare di portata.

Le pompe volumetriche rotative operano attraverso la rotazione di uno o più componenti mobili: tale rotazione genera l'apertura automatica di luci di accesso per il fluido, che viene quindi incapsulato in un volume opportunamente generato (dipendente dalla tipologia e dal disegno della macchina); la massa di fluido viene quindi trasportata verso la mandata dagli elementi rotanti; nel momento in cui si aprono le luci di mandata, la pressione agente nel condotto a valle stabilisce la prevalenza che la macchina fornisce spingendo il fluido.

Tali pompe sono tipicamente autoadescanti, essendo in grado di generare un'elevata aspirazione.

Nelle pompe progettate per operare in sistemi che richiedono elevata altezza di aspirazione (ovvero che operano ad un'altezza superiore ai 5 – 6 mt rispetto al pelo libero del fluido da trattare) e che siano autoadescanti, è essenziale che tutti gli spazi liberi tra le parti rotanti e le parti fisse siano ridotti al minimo per ridurre il fenomeno del trafilamento, detto comunemente "slippage", che penalizza il rendimento volumetrico.

A causa degli spazi liberi ridotti all'interno delle camere di pompaggio nelle pompe rotative, è necessario che queste operino a velocità di rotazione piuttosto basse per garantire un funzionamento affidabile e preservare le prestazioni per un periodo prolungato di tempo.

Diversamente, si verifica un'azione erosiva dovuta alle elevate velocità di passaggio del fluido a causa degli spazi ristretti, che causerebbe un'usura eccessiva delle componenti della pompa ed un aumento dei giochi tra i diversi organi, con conseguente progressivo peggioramento del rendimento.

Esistono differenti tipi di pompe volumetriche rotative, e normalmente vengono raggruppate in tre categorie base, cioè le pompe ad ingranaggi, le pompe a vite e le pompe a palette.

#### Pompe volumetriche rotative ad ingranaggi:

Vi sono diverse varianti di pompe ad ingranaggi, un esempio è la pompa ad ingranaggi semplici dritti mostrata in Fig. 35. Essa è costituita da due ruote dentate (dette anche ingranaggi) che si ingranano tra loro e ruotano in direzioni opposte all'interno della cassa della pompa, trascinate da due alberi tra loro paralleli su cui esse sono calettate. È presente un gioco di solamente pochi micrometri tra il corpo della pompa, le facce degli ingranaggi e le estremità dei loro denti.

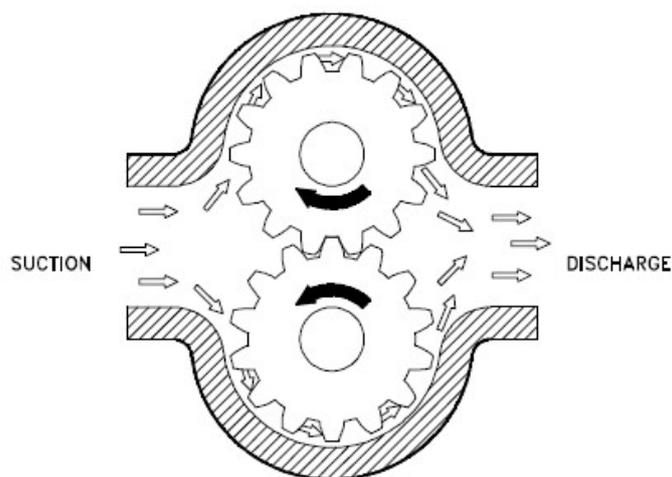


Fig. 35 – Pompa ad ingranaggi semplici

Il fluido, che in Fig. 35 si muove da sinistra a destra, viene incapsulato nello spazio tra i denti e la cassa, lungo la periferia del corpo pompa; in tal modo si produce una depressione che richiama altro fluido dal condotto di aspirazione. Nella parte opposta, dove i denti ingranano, il fluido viene espulso dai vani tra dente e dente e imbecca il condotto di mandata.

Dato il gran numero di denti solitamente impiegato negli ingranaggi, il pompaggio del fluido risulta relativamente regolare e continuo, con piccole e costanti quantità di fluido erogate alla linea di scarico in rapida successione. Se gli ingranaggi, invece, presentano meno denti, lo spazio tra di essi è maggiore e la portata volumetrica aumenta a prefissata velocità, a discapito dell'ampiezza delle pulsazioni nel pompaggio.

In tutte le pompe ad ingranaggi, la potenza viene applicata all'albero di una sola delle ruote dentate e la rotazione è trasmessa al secondo ingranaggio condotto attraverso i denti in presa.

Le elevate velocità di rotazione della girante richieste dalle pompe centrifughe non sono necessarie nelle pompe ad ingranaggi; pertanto, la pompa ad ingranaggi è particolarmente adatta per la movimentazione di fluidi viscosi che potrebbero compromettere l'integrità dei componenti di una pompa centrifuga.

Il rendimento complessivo risulta mediamente compreso nel range  $0.60 \div 0.70$ ; il rendimento volumetrico è tipicamente abbastanza ridotto, solitamente compreso nel range  $0.75 \div 0.80$ , perché parte del fluido aspirato non riesce ad essere smaltito in mandata e ritorna sul lato di aspirazione a causa del trafilamento.

*Altre geometrie di ingranaggi:*

Oltre agli ingranaggi a denti dritti, possono essere utilizzate anche altre due tipologie di ingranaggi: gli ingranaggi elicoidali e gli ingranaggi a pettine.

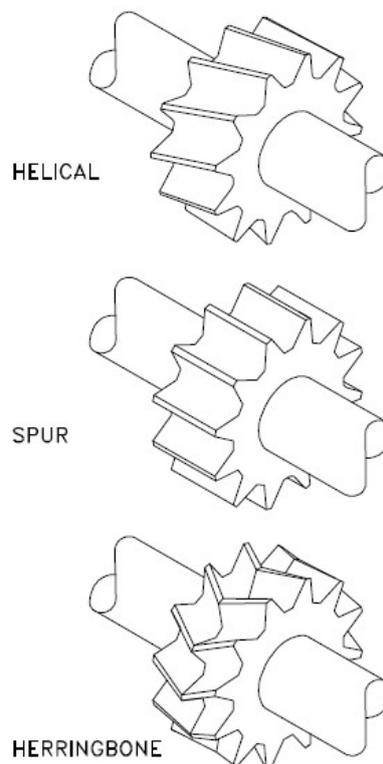


Fig. 36 – In ordine, geometria di un ingranaggio elicoidale, semplice dritto, a pettine

La pompa ad ingranaggi elicoidali presenta alcuni vantaggi rispetto agli ingranaggi dritti: in un ingranaggio dritto, l'intera lunghezza del dente dell'ingranaggio si innesta contemporaneamente con il secondo ingranaggio, mentre in un ingranaggio elicoidale il punto di innesto si muove lungo la lunghezza del dente dell'ingranaggio man mano che l'ingranaggio ruota.

Ciò fa sì che le pompe ad ingranaggi elicoidali presentino una pressione di scarico più uniforme e con minori pulsazioni rispetto ad una pompa ad ingranaggi dritti.

La pompa ad ingranaggi a pettine presenta anch'essa alcuni vantaggi rispetto agli ingranaggi dritti: la principale differenza di funzionamento è che la sezione centrale appuntita dello spazio tra due denti inizia a scaricare fluido prima che le estremità esterne divergenti completino lo scarico; questo permette di fornire una pressione di scarico più uniforme. Anche la trasmissione di potenza all'ingranaggio condotto risulta essere più regolare e silenziosa.

#### Pompe volumetriche rotative a lobi:

La pompa rotativa a lobi mostrata in Fig. 37 è una pompa concettualmente simile ad una pompa ad ingranaggi.

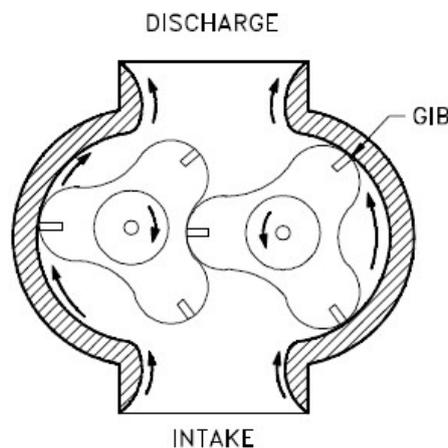


Fig. 37 – Pompa rotativa a lobi

Rispetto ad una pompa ad ingranaggi, però, presenta non più di quattro lobi per capsulismo (cioè i precedenti denti per un ingranaggio); inoltre, le superfici coniugate dei capsulismi vengono rivestite interamente da particolari gomme che permettono un innesto migliore e più regolare rispetto alle pompe ad ingranaggi tradizionali; ciò fa sì che le pompe a lobi possano garantire un flusso di fluido più regolare, con minori pulsazioni; inoltre garantiscono migliori capacità di autoadesamento rispetto alle altre pompe ad ingranaggi.

Possono essere impiegati, inoltre, particolari inserti sostituibili (detti anche “piastre”) inseriti nelle pareti frontali e/o radiali del corpo della pompa per assorbire l’usura del corpo della pompa.

I rendimenti sono relativamente alti, dell’ordine di  $0.6 \div 0.9$ .

#### Pompe volumetriche rotative a vite:

Esistono differenti tipologie di pompe a vite, che si distinguono a seconda del numero di viti impiegate, al loro passo e alla direzione generale del flusso del fluido.

Due comuni configurazioni di pompe a vite sono quelle a due viti a passo corto e quelle a tre viti a passo lungo.

#### *Pompe a due viti a passo corto:*

La pompa a due viti a passo corto (Fig. 38) opera attraverso due viti, poste all’interno di un cilindro, che ingranano tra loro e vengono montate su due alberi paralleli. Una delle viti ha una filettatura destrorsa mentre l’altra una filettatura sinistrorsa. Uno degli alberi su cui sono montate è l’albero motore e muove l’altro albero attraverso un set di ingranaggi di sincronizzazione a pettine. Tali ingranaggi servono a mantenere costanti i giochi tra le viti durante la rotazione, e a garantire un funzionamento più silenzioso. La distanza tra le viti è tipicamente di 2-3 millimetri, e non vi è contatto tra le due viti o tra le viti e le pareti del cilindro.

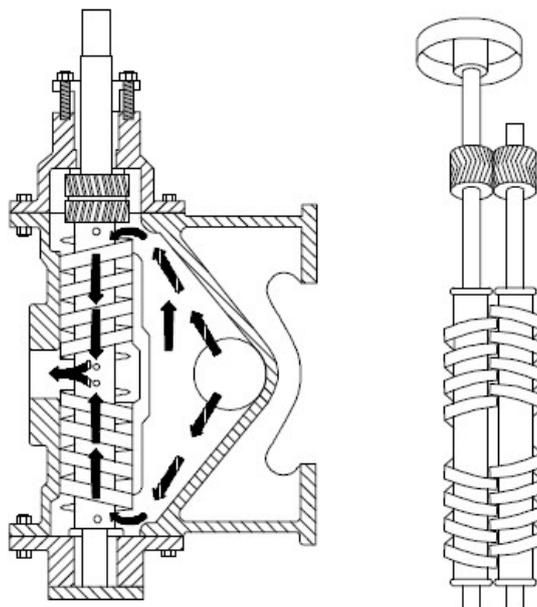


Fig. 38 – Pompe rotativa a due viti a passo corto

Durante il funzionamento, il liquido viene intrappolato all'estremità esterna di ciascuna coppia di viti. Nel momento in cui si genera dello spazio tra i filetti delle viti, una certa quantità di fluido viene dapprima richiamata e quindi intrappolata quando l'estremità della vite ingrana nuovamente con la vite opposta. Man mano che la vite continua a ruotare, il fluido intrappolato scorre lungo il cilindro verso la zona di scarico centrale, mentre ulteriore quantità di fluido viene intrappolata a monte. Ciascuna delle due viti opera in modo analogo e scarica una quantità uguale di fluido in flussi con direzioni opposte, eliminando di conseguenza la potenziale spinta idraulica non bilanciata. Le pompe a vite possono operare ad elevate velocità di rotazione (fino 10.000 rpm) e pressurizzare il fluido fino a 350 bar, erogando con continuità portate superiori ai 1200 m<sup>3</sup>/h. Risultano interessanti, a livello tecnologico, anche perché sono caratterizzate da vibrazioni molto contenute e da basse emissioni acustiche (aspetto critico per le macchine volumetriche, in particolare per quelle alternative).

#### *Pompe a tre viti a passo lungo:*

La pompa a tre viti passo lungo, illustrata in Fig. 39, condivide molte caratteristiche con la pompa a due viti a passo corto, compresa la loro somiglianza concettuale del funzionamento.

In questo caso, sono impiegate tre viti con filettature opposte, che ruotano all'interno di un cilindro; il passo delle viti è molto più elevato rispetto alla pompa a due viti a passo corto; pertanto, la vite centrale (detta anche rotore motore) viene utilizzata per azionare direttamente le altre due viti più esterne senza la necessità di ingranaggi di sincronizzazione (per mantenere la posizione assiale delle viti vengono impiegati specifici cuscinetti di supporto).

Come nelle pompe a due viti, il fluido entra nella zona di aspirazione, scorre attraverso le viti da entrambe le estremità in flussi opposti verso lo scarico centrale.

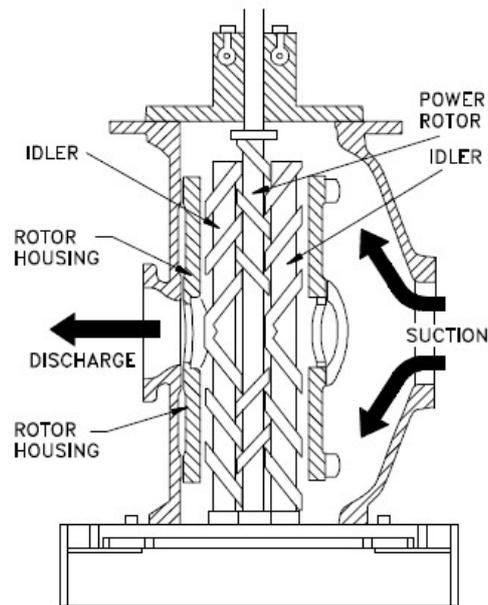


Fig. 39 – Pompe rotativa a tre viti a passo lungo

Pompe rotative a palette:

La pompa rotativa a palette, mostrata in Fig. 40, è costituita da un corpo cilindrico, entro il quale ruota eccentricamente un altro elemento cilindrico che reca due o più palette mobili in senso radiale. Durante la rotazione del corpo cilindrico interno, le palette aderiscono sempre alla cassa del corpo cilindrico esterno per effetto della forza centrifuga coadiuvata dall'azione di opportune molle; in tal modo il fluido viene dapprima incapsulato tra una paletta e l'altra, quindi trasportato ed infine spinto verso la mandata al termine della rotazione.

Il rendimento volumetrico delle pompe rotative a palette risulta contenuto tra 0.75 e 0.85.

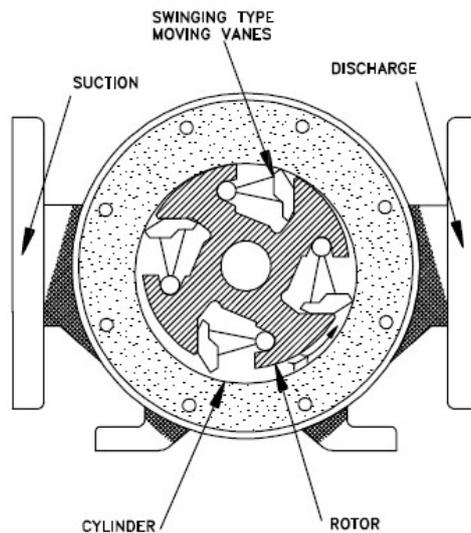


Fig. 40 – Pompa rotativa a palette



### Sezione 3 – Pompe volumetriche monovite per il trattamento dei fanghi di depurazione

#### 1. Introduzione

Le pompe monovite sono una tipologia di pompa volumetrica rotativa a vite eccentrica, frequentemente impiegata nei processi di depurazione delle acque. Tali pompe trovano impiego in molti altri settori industriali, quali industrie alimentari, cartiere, miniere, impianti di biogas, zuccherifici, industrie chimiche ed altro; tale ampio impiego è conseguenza della loro versatilità nel poter trattare differenti tipologie di fluidi con caratteristiche chimico-fisiche spesso molto differenti.

La pompa monovite fu inventata nel 1932 dall'ingegnere francese, René Joseph Louis Moineau (1887 – 1948). Moineau guadagnò il brevetto di pilota e partecipò ad una competizione internazionale di idrovolanti a Deauville il 31 agosto 1913. Prendendo i comandi del “Breguet n° 8”, vinse il premio di velocità delle 100 miglia, ad una velocità di 99,6 km/h. Poco dopo decise di produrre un compressore ad alte prestazioni e si laureò alla Facoltà di Scienze dell'Università di Parigi, dopo aver presentato una tesi di dottorato su “Il nuovo capsulismo”. La sua ricerca lo portò a richiedere il suo primo brevetto relativo ad un nuovo sistema, utilizzabile come pompa, motore o come semplice dispositivo di trasmissione. Nello stesso anno espose una versione in cartone della nuova pompa Moineau alla “Invention Exhibition” di Parigi.

Nel 1932, aiutato da Robert Bienaimé della società Gevelot, René Moineau fondò una nuova società – “Pompe Compresseur Mécanique” (PCM) – di cui divenne il presidente fondatore.

Nel 1936 René Moineau stipulò una serie di accordi di licenza con società straniere: Mono Pumps Ltd in Inghilterra, Robbins & Myers negli Stati Uniti e Netzsch in Germania.

René Moineau continuò a studiare e sviluppare il suo prodotto fino alla morte nel 1948; la sua ultima invenzione fu una pompa monovite multilobo, basata sullo stesso principio del modello originale, ma utile soprattutto per il fatto di poter generare portate doppie, rispetto al modello a singolo lobo, con ingombri pressoché identici.

Nel 1951 il gruppo tedesco Netzsch acquisì la licenza per produrre e distribuire le pompe monovite Nemo® secondo il sistema di pompaggio di tipo Moineau (Nemo® prende il nome da: NETzsch + Moineau).

La società statunitense Robbins & Myers, Inc. è un fornitore leader di apparecchiature ingegnerizzate e sistemi per il mercato industriale, chimico e farmaceutico. La sua filiale Moyno Inc è un produttore e distributore di pompe monovite Moyno®. Il marchio “Moyno®” suona simile a “René Moineau”, il nome dell’inventore.

Diverse altre società industriali con sede in Germania, Russia, Cina, Brasile e Canada producono questa tipologia di pompa. In Italia il primo costruttore di tali pompe fu la società Bellin S.p.A. che iniziò a proporle al mercato italiano a partire dagli anni ‘70.

I produttori angloamericani chiamano questa pompa *Progressing (o Progressive) Cavity Pump* nella forma abbreviata PCP. Le cavità che si formano all’interno della pompa hanno lo stesso volume, ma la pressione progredisce dall’aspirazione allo scarico man mano che il fluido viene pompato, e ciò spiega il significato del nome.

## 2. Funzionamento e prestazioni

### 2.1. Principio di funzionamento

Una pompa volumetrica monovite è costituita da due elementi, o ingranaggi elicoidali: un elemento rotante metallico, detto rotore, ed uno statore elastomerico. Il rotore è una vite a geometria elicoidale che ruota eccentricamente attorno al proprio asse longitudinale all'interno dello statore.

Lo statore è costituito da un cilindro in acciaio con incollato internamente tramite un processo di iniezione un elastomero; tale elastomero presenta un profilo interno a doppia elica con passo doppio rispetto a quello del rotore.

Quando il rotore ruota all'interno dello statore, il fluido si muove lungo l'asse della pompa all'interno di cavità chiuse che si vanno a formare tra il rotore e lo statore.

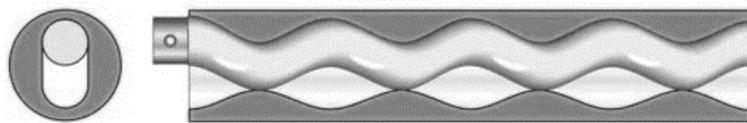


Fig. 41 – Rotore e statore di una pompa monovite

Il principio di allineamento geometrico tra rotore e statore di una pompa monovite è diverso da quello, ad esempio, delle viti e dei dadi: il centro di una vite rimane sempre allineato con il centro di un dado corrispondente, invece, il centro di un rotore di una pompa monovite cambia posizione lungo il proprio asse. Infatti, il rotore ruota attorno al proprio asse longitudinale, il quale risulta parallelo, ma distanziato, rispetto all'asse dello statore: tale distanza si definisce *eccentricità* del rotore. La rotazione del rotore all'interno dello statore è quindi data dalla combinazione di due movimenti:

- un movimento di rotazione attorno al proprio asse, con verso orario o antiorario;
- un movimento di rotazione nella direzione opposta al proprio asse centrale attorno all'asse centrale dello statore;

La coordinazione di questi due movimenti crea un movimento detto di “nutazione” del rotore all'interno della sezione statorica.

Il numero dei lobi (o denti) del rotore e dello statore differisce sempre di uno, permettendo in questo modo la formazione di cavità tra i due componenti. Solitamente le pompe monovite sono di tipo “1-2”, e ciò significa che il rotore presenta un lobo mentre lo statore due lobi.

Tuttavia, esistono alcune pompe monovite di tipo “2-3”, costituite quindi da un rotore a due lobi e da uno statore a tre lobi; tali pompe si definiscono multilobo e vengono impiegate soprattutto dove sono richieste portate più elevate che una pompa monovite di tipo “1-2” non potrebbe garantire.

L'aumento della portata è conseguenza di un volume più ampio della cavità dello statore e del fatto che ciascuna cavità dello statore viene percorsa più volte durante un singolo giro del rotore (due volte in una pompa di tipo “2-3”), invece di una sola volta per una pompa a singolo lobo.

Tra rotore e statore si sviluppa una linea di contatto, chiamata “linea di tenuta”, la quale garantisce che le cavità che si formano siano “sigillate” ed ermetiche, permettendo una determinata pressione. L'aumento della lunghezza dello statore e del rotore aumenterà il numero di cavità dall'aspirazione allo scarico e aumenterà di conseguenza la capacità di pressione della pompa, essendo questa data dalla somma delle pressioni generate da ciascuna cavità.

In Fig. 42 si mostra uno schema di funzionamento in cui lo statore (mostrato in sezione longitudinale) è fisso, mentre il rotore gira in senso orario. Tra i due elementi si formano delle cavità all'estremità sinistra, quando il rotore gira. Le cavità si espandono, si separano all'estremità opposta di destra e diminuiscono.

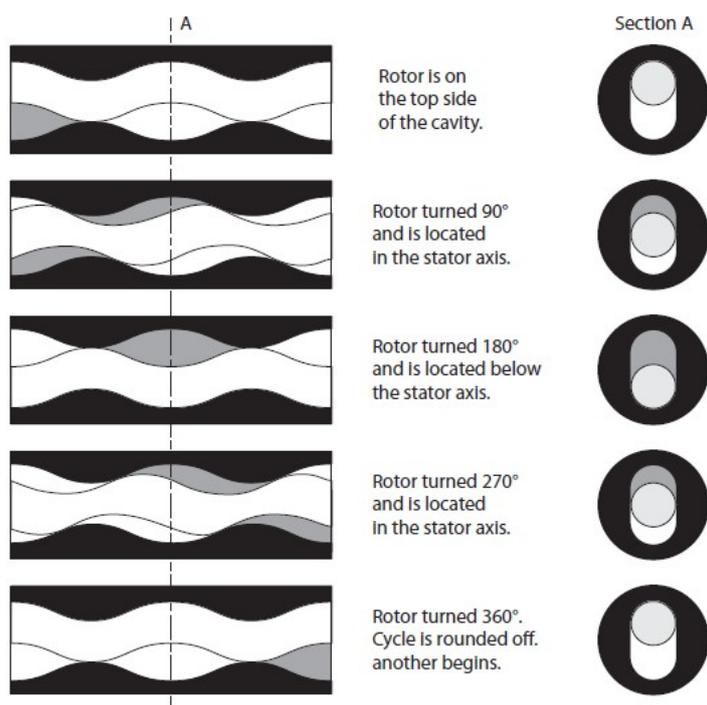


Fig. 42 – Principio di funzionamento di una pompa monovite

Man mano che una cavità diminuisce di volume, la cavità longitudinalmente opposta aumenta di volume esattamente alla stessa velocità, portando ad una somma complessiva dei volumi costante: il risultato di ciò è un flusso volumetrico senza pulsazioni e senza la necessità di valvole di ritegno.

In Fig. 43 si evidenzia un'altra presentazione del principio di funzionamento che mostra per ciascuna sezione la forma, la posizione del rotore all'interno dello statore ed il movimento del fluido che scorre in una cavità. Lo scarico e l'aspirazione sono sempre isolati l'uno dall'altro da una linea di tenuta di lunghezza costante. Se il rotore ruota con verso antiorario, le cavità si spostano da destra verso sinistra secondo lo stesso principio; pertanto, il verso di rotazione della pompa monovite è reversibile.

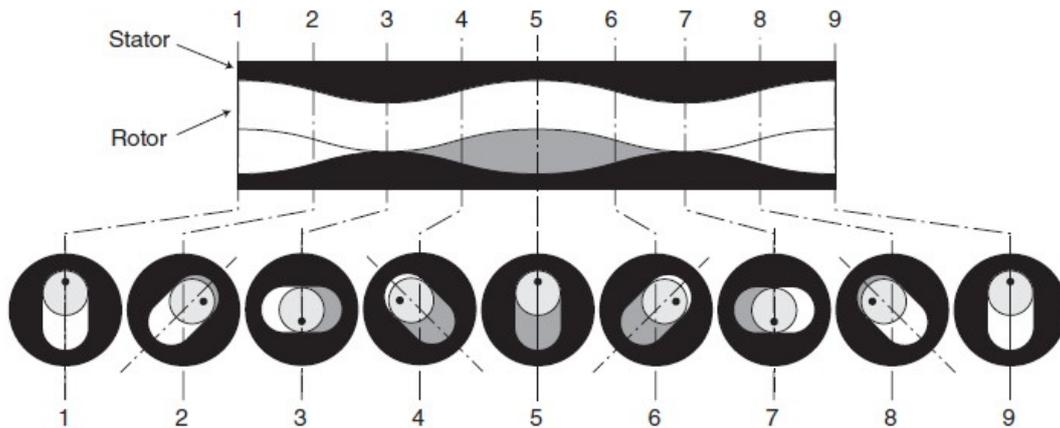


Fig. 43 – Principio di funzionamento di una pompa monovite

## 2.2. Geometria di rotore e statore: elementi teorici

Al fine di ottenere delle “cavità chiuse” all’interno della pompa è necessario che si verifichino due condizioni:

1. Il rotore deve avere sempre un lobo (o dente) in meno dello statore;
2. Ogni lobo (o dente) del rotore deve essere sempre in contatto con la superficie interna dello statore;

Prima condizione:

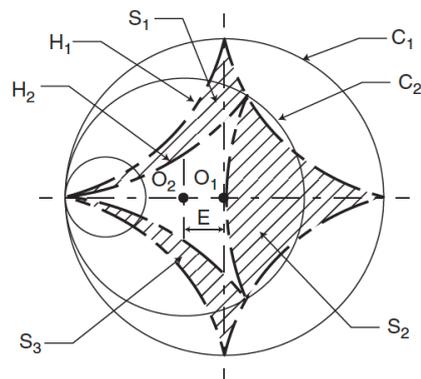


Fig. 44 – Ipicicloidi H<sub>1</sub> e H<sub>2</sub>

L'ipocicloide H<sub>1</sub> (statore) con n denti, la cui base è il cerchio C<sub>1</sub> (O<sub>1</sub>, R<sub>1</sub>), è legata all'ipocicloide H<sub>2</sub> (rotore) con (n-1) denti, la cui base è il cerchio C<sub>2</sub> (O<sub>2</sub>, R<sub>2</sub>), dalla relazione  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{n-1}{n}$ .

Essendo H<sub>1</sub> fisso, quando H<sub>2</sub> ruota in un certo verso il suo centro O<sub>2</sub> disegna nella direzione opposta un cerchio di centro O<sub>1</sub> e di raggio O<sub>1</sub>O<sub>2</sub> tale che:

- O<sub>1</sub> = *asse centrale dello statore*;
- O<sub>2</sub> = *asse centrale del rotore*;
- *distanza O<sub>1</sub>O<sub>2</sub> = E = eccentricità della pompa*;

Durante questo moto i vertici di H<sub>2</sub> sono sempre in contatto con H<sub>1</sub> e su queste curve si generano le superfici chiuse S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> di area variabile, la cui somma (S<sub>1</sub> + S<sub>2</sub> + S<sub>3</sub>) rimane costante.

Se si sostituiscono H<sub>1</sub> e H<sub>2</sub> con i loro involuipi E<sub>1</sub> ed E<sub>2</sub> (Fig. 45), di un identico cerchio C di qualsiasi diametro D il cui centro descrive H<sub>1</sub> e H<sub>2</sub>, le caratteristiche precedenti rimangono invariate e quindi la prima condizione è soddisfatta.

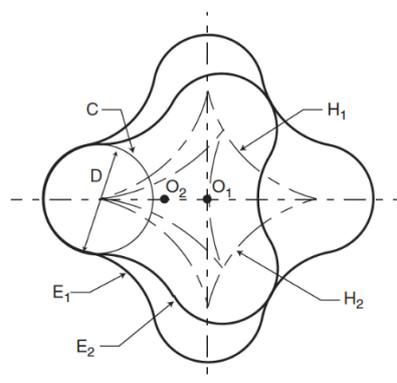


Fig. 45– Involuipi delle ipocicloidì

Seconda condizione:

Per soddisfare la seconda condizione, i profili  $E_1$  ed  $E_2$  si muovono longitudinalmente come eliche il cui rapporto di passo corrisponde al rapporto del numero di denti.

L'avvolgimento elicoidale delle superfici  $S_1, S_2, S_3$  consente di ottenere, tra i due elementi elicoidali, delle "cavità chiuse" la cui lunghezza è pari al passo dell'elemento esterno.

Per ottenere la totale tenuta della pompa, la lunghezza di inserimento del rotore deve essere almeno pari ad un passo dello statore. La porzione delle linee di contatto del rotore e dello statore compresa tra le cavità ad alta pressione e le cavità a bassa pressione costituisce la linea di perdita.

### 2.3. Parametri geometrici

La geometria di una pompa monovite ( $L_r - L_s$ ) è generalmente definita da due numeri, il primo è il numero di lobi del rotore  $L_r$  ed il secondo è il numero di lobi dello statore  $L_s$ .

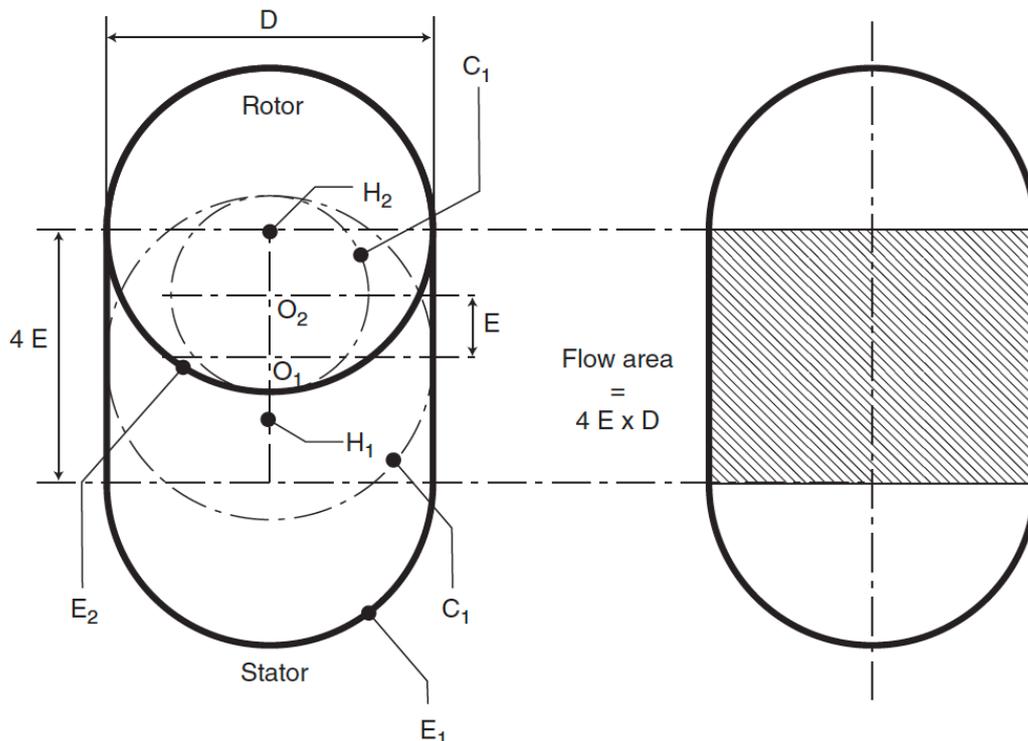


Fig. 46 – Pompa monovite a rotore singolo e statore doppio

### *Diametri ed eccentricità:*

- Lo spessore del rotore (diametro minore del rotore) è indicato come  $D$ ;
- L'eccentricità corrisponde alla distanza tra l'asse centrale del rotore e l'asse centrale dello statore ed è indicata come  $E = O_1O_2$ ;
- Il diametro del rotore (diametro maggiore del rotore) è indicato come  $(D + 2E)$ ;
- La larghezza della doppia elica filettata nello statore è  $D$  e  $(D + 4E)$ ;

### *Lunghezza del passo:*

La lunghezza del passo è definita come la lunghezza di una rotazione di  $360^\circ$  della traccia di una cresta di uno dei lobi del rotore, ed è indicata come  $P$ ; pertanto, le lunghezze del passo di rotore e statore sono più chiaramente indicate come  $P_r$  e  $P_s$ .

Nel caso di una pompa con rotore a singolo lobo vale la relazione:

$$P_s = 2P_r$$

Mentre nel caso di una pompa con rotore multilobo, indicando con  $L_r$  il numero dei lobi del rotore, vale:

$$P_s = \frac{L_r + 1}{L_r} \cdot P_r$$

### *Cavità:*

Le cavità che si vanno a creare durante il movimento del rotore sono lenticolari, spiraliformi, e portano alla generazione di volumi separati tra statore e rotore quando vengono assemblati.

La lunghezza delle cavità corrisponde sempre alla lunghezza del passo dello statore ( $P_s$ ), mentre il numero di cavità che si formano ( $C$ ) è calcolato come segue:

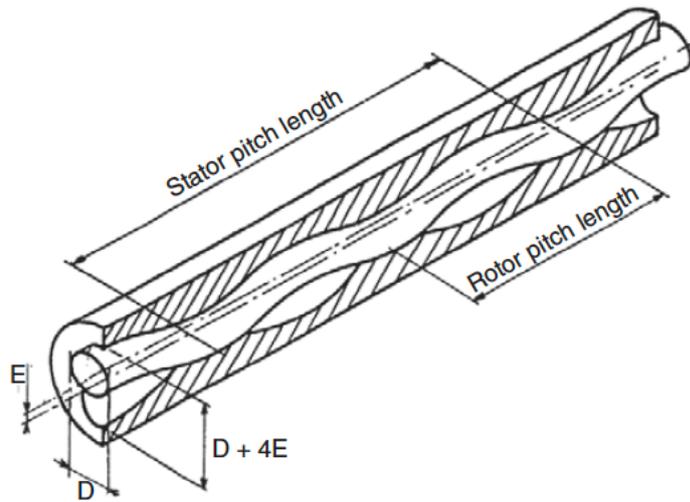
$$C = L_r \cdot \left( \frac{H_s}{P_r} - 1 \right)$$

dove:

$L_r$  = numero di lobi del rotore

$H_s$  = lunghezza dello statore

$P_r$  = lunghezza del passo del rotore



**Figure 8-1**  
Rotor – Stator perspective.

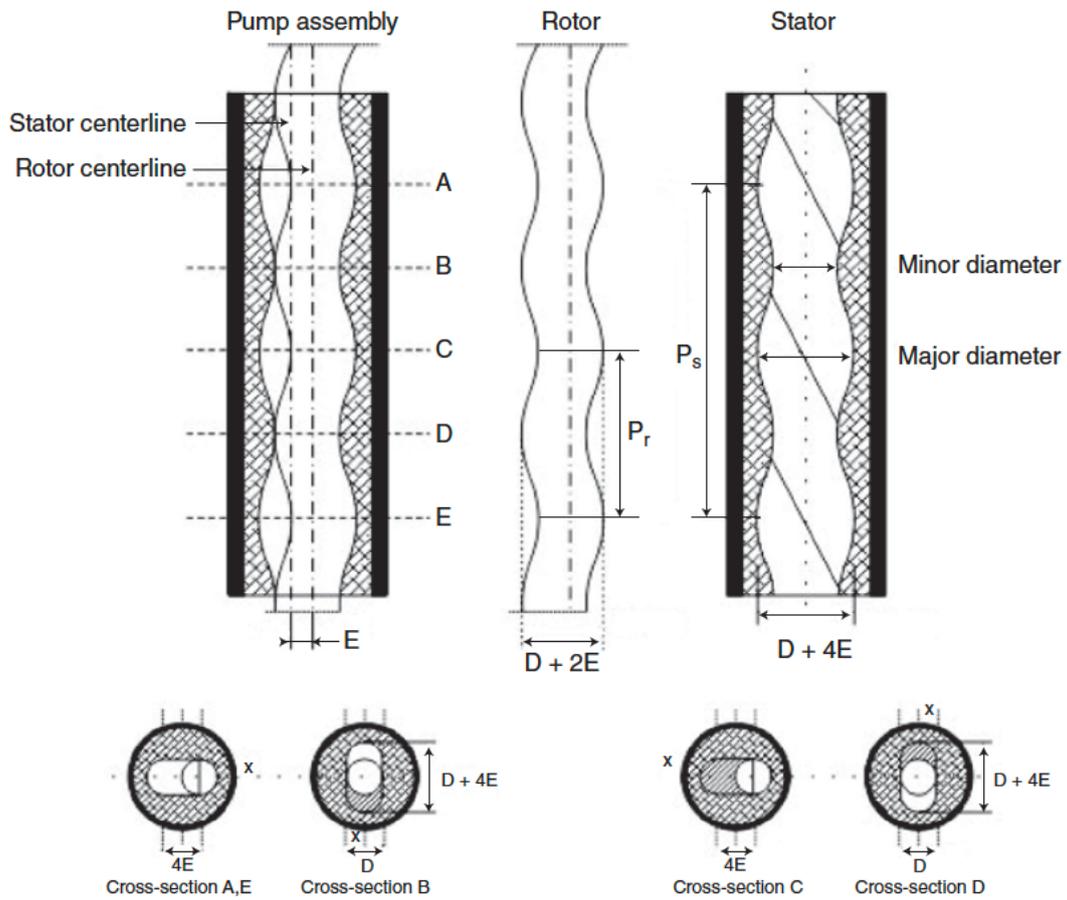


Fig. 47 – Geometria di rotore e statore di una pompa monovite

#### 2.4. Prestazioni:

*Portata:*

Durante il funzionamento le cavità si spostano longitudinalmente dall'aspirazione allo scarico, creando un'azione di pompaggio nel processo. Durante ogni rotazione, il volume di fluido contenuto in una cavità subisce uno spostamento longitudinale pari alla lunghezza del passo dello statore.

La portata della pompa è determinata dal volume di fluido spostato ad ogni rotazione del rotore, e risulta direttamente proporzionale a tre costanti di progetto: l'eccentricità del rotore ( $e$ ), il diametro del rotore ( $D$ ) ed il passo dello statore ( $P_s$ ); quest'ultimo corrisponde anche, come già detto, alla lunghezza delle cavità.

L'area netta della sezione trasversale del fluido è costante lungo l'asse della pompa e si calcola come segue:

$$A = 4E \cdot D$$

Il volume di una cavità è funzione di tale area di fluido e della lunghezza della cavità, che corrisponde al passo dello statore  $P_s$ :

$$V = 4E \cdot D \cdot P_s$$

Essendo una pompa di tipo volumetrico, la portata teorica  $Q_{th}$  è direttamente proporzionale alla sua cilindrata e alla sua velocità di rotazione  $N$ , risultando indipendente dalla prevalenza; tale portata si calcola come:

$$Q_{th} = 4E \cdot D \cdot P_s \cdot N$$

La portata effettiva della pompa  $Q$  viene determinata considerando la perdita volumetrica  $Q_s$ :

$$Q = Q_{th} - Q_s$$

*Prevalenza:*

La pressione differenziale tra aspirazione e mandata genera un certo trafileamento di fluido tra due cavità successive, di conseguenza si ha un gradiente di pressione lungo la pompa; questo gradiente di pressione dipende dalle caratteristiche del fluido pompato.

I liquidi (fluidi quasi incompressibili) generano gradienti di pressione lineari, mentre fluidi ad alto contenuto di gas hanno gradienti di pressione che aumentano in modo quasi esponenziale dall'aspirazione allo scarico.

La prevalenza, o pressione, della pompa è determinata da:

1. Il numero di cavità formate tra il rotore e lo statore;
2. La prevalenza sviluppata in una singola cavità, associata al massimo trafileamento ritenuto accettabile, che dipende da:
  - il leggero flusso di ricircolo interno del fluido, dato dallo slittamento, o perdita di accoppiamento, tra rotore e statore;
  - le caratteristiche del fluido pompato (prevalenze maggiori si ottengono con fluidi viscosi);
  - valori che determinano il profilo geometrico della pompa: diametro, passo, eccentricità;
  - la composizione chimica dell'elastomero;
  - le caratteristiche meccaniche dell'elastomero;
  - lo spessore dell'elastomero;

In un primo approccio, viene scelto un valore di riferimento della prevalenza  $\delta p$  per una cavità di circa 300-500 kPa (da 3 a 5 bar). Per resistere a un'elevata prevalenza, le pompe monovite sono spesso realizzate con un gran numero di cavità; quindi, la prevalenza complessiva della pompa si calcola come:

$$\Delta P = \delta p \cdot (2n_p - 1)$$

dove  $n_p$  corrisponde al numero di passi dello statore  $P_s$ .

La pressione è generata da ciascuna cavità effettiva del rotore ed il numero delle cavità effettive del rotore è pari a  $2n_p$  perché  $P_r = \frac{P_s}{2}$

### *Coppia:*

Le pompe monovite sono pompe rotative che richiedono una determinata coppia di spunto, oltre che una certa coppia di funzionamento a pompa avviata.

La coppia di spunto corrisponde alla coppia iniziale necessaria per avviare la pompa. Quasi sempre risulta molto più alta rispetto alla coppia di funzionamento. Pertanto, il motore di azionamento ed il sistema di trasmissione devono essere in grado di garantire la coppia di spunto iniziale; inoltre, dovrebbe essere sempre considerato un certo coefficiente di sicurezza.

La rotazione del rotore trasferisce il fluido da una cavità all'altra, producendo così una pressione differenziale: l'energia necessaria per generare questa azione necessita di una coppia di funzionamento sufficiente per il rotore e gli organi di trasmissione.

Tale coppia dipende da:

- la potenza idraulica della pompa (direttamente proporzionale alla prevalenza);
- la qualità della cromatura del rotore;
- la classe dell'elastomero e le caratteristiche lubrificanti del fluido pompato;
- la lunghezza della pompa;

Una relazione pratica che permette di valutare la coppia funzionamento massima (T) risulta la seguente:

$$T_{(\text{daNm})} = 1,63 \cdot V_{(\text{cm}^3)} \cdot \Delta P_{(\text{kPa})} \cdot 10^{-5} \cdot \rho^{-1}$$

dove  $V$  corrisponde alla cilindrata della pompa e  $\rho$  la sua efficienza (si considera tipicamente  $\rho = 0,7$ ).

In Fig. 48 viene mostrata una curva caratteristica di una pompa monovite: si noti come la portata sia direttamente proporzionale alla velocità di rotazione a meno di perdite dovute ad un aumento di pressione.

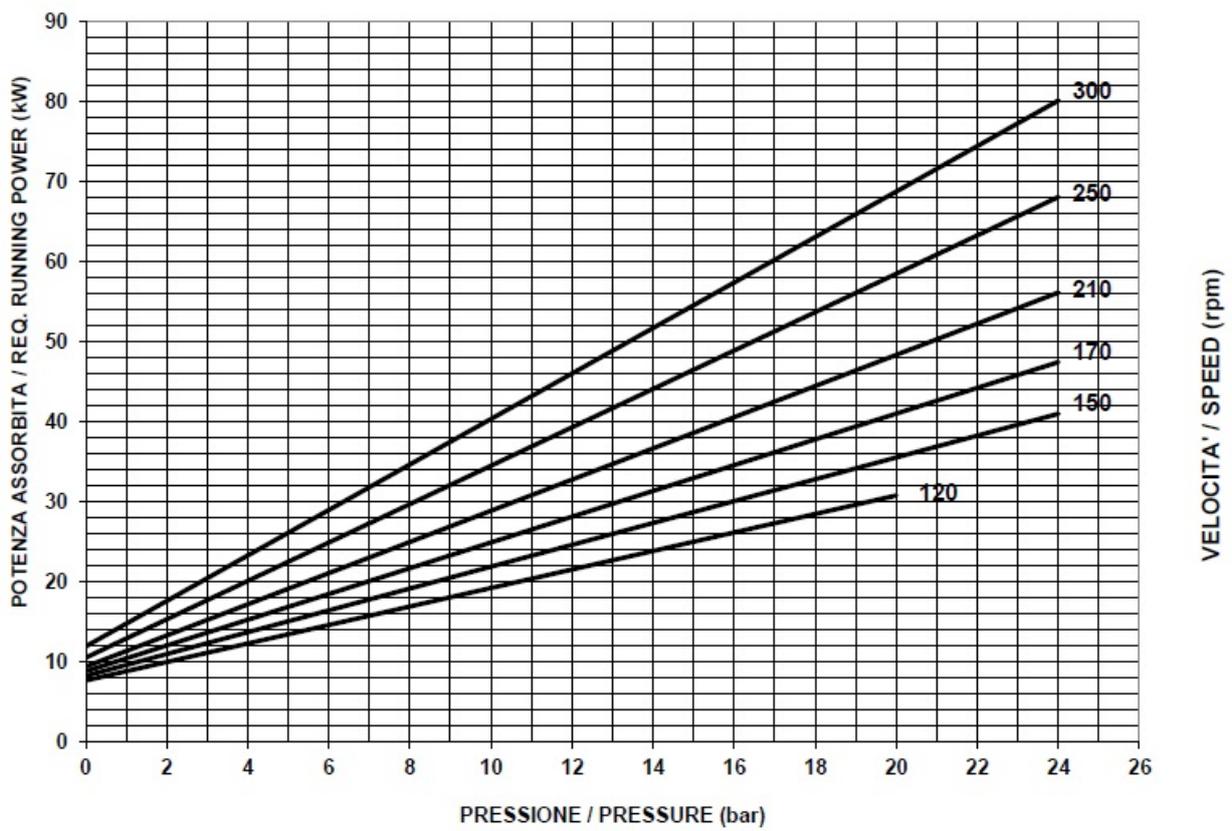
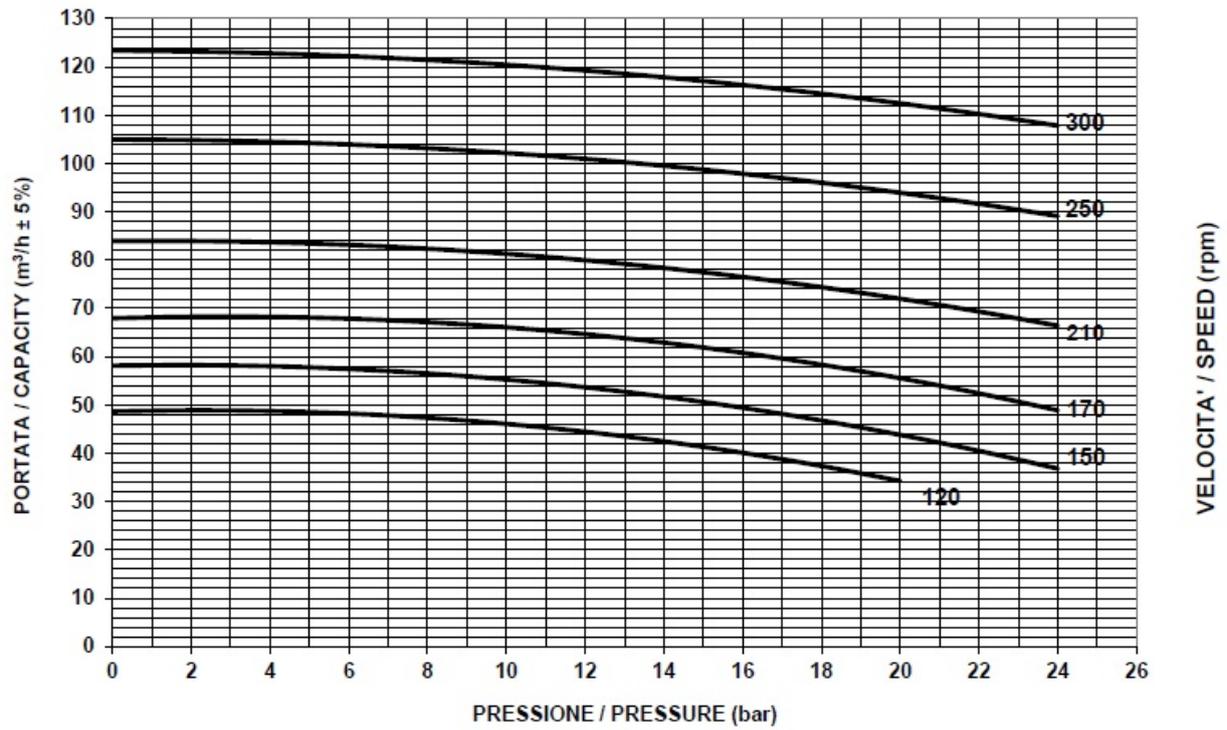


Fig. 48 – Curva caratteristica di una pompa volumetrica monovite

### 3. Analisi del comportamento fluidodinamico dei fanghi

Sebbene il comportamento fluidodinamico della maggior parte dei fluidi sia possibile descriverlo matematicamente e verificarlo empiricamente, non esiste una conoscenza simile per le miscele liquido-solido. A causa della natura complessa di tali miscele, risultano molto utili rilievi sperimentali.

Anche se una quantità sostanziale di dati sta cominciando ad accumularsi, esistono ampie variazioni tra i risultati ottenuti, più come conseguenza della complessità dei fenomeni piuttosto che dovute ad errori nelle indagini.

La seguente è una breve discussione sulle diverse classificazioni dei fluidi, su ciò che complica i calcoli nello studio del loro comportamento fluidodinamico, su come tali considerazioni si applichino ai fanghi di depurazione e su cosa possa essere fatto per prevederne il comportamento fluidodinamico in una tubazione.

In reologia, è possibile fornire una prima sostanziale distinzione tra fluidi monofase e multifase: un fluido monofase è un fluido o una miscela fluido-solido così finemente dispersa da comportarsi come un fluido indipendentemente dalla velocità (si parla in questo caso di miscela omogenea). Tali considerazioni valgono anche nel caso di una miscela gas-liquido o liquido-liquido.

Un'ulteriore distinzione nel caso dei fluidi monofase è tra fluidi newtoniani e non newtoniani. Nei fluidi newtoniani, come ad esempio l'acqua e l'olio, la velocità di taglio del fluido (cioè la velocità con cui una deformazione di taglio progressiva si trasmette nel fluido) è direttamente proporzionale allo sforzo di taglio. In questo caso la viscosità non cambia con la velocità o con lo sforzo di taglio.

I fanghi con basse concentrazioni di solidi spesso si avvicinano a questa condizione.

I fluidi non newtoniani, invece, possono presentare proprietà pseudoplastiche, dilatanti, tixotropiche o reopectiche (Fig. 49).

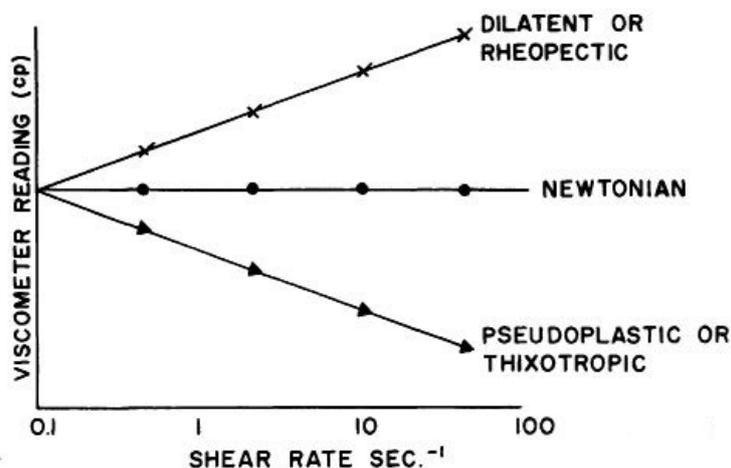


Fig. 49 – Differenti proprietà di fluidi non newtoniani

I fluidi pseudoplastici diminuiscono la loro viscosità all'aumentare dello sforzo di taglio o della velocità di taglio, mentre i fluidi dilatanti aumentano la loro viscosità. Tuttavia, raramente i fanghi presentano caratteristiche dilatanti, se non in particolari casi in cui siano presenti alte percentuali di solidi.

I fluidi reopectici sono l'equivalente “tempo-dipendente” dei fluidi dilatanti: non solo la loro viscosità aumenta con l'incremento dello sforzo di taglio o della velocità nel di taglio, ma aumenta anche con il tempo durante il quale sono sottoposti a sollecitazioni di taglio.

I fluidi tixotropici, invece, diventano meno viscosi all'aumentare dello sforzo di taglio, della velocità di taglio e del trascorrere del tempo sotto sollecitazione. Se un fango di depurazione fosse veramente omogeneo (cosa che in realtà non si verifica mai), probabilmente il comportamento tixotropico sarebbe quello che meglio descriverebbe le sue proprietà.

Nei casi in cui un fango mostrasse queste tendenze, si noterebbe che, anche se la velocità nel tubo fosse la stessa in due punti diversi, la viscosità del fango in un punto sarebbe più alta di quella del fango situato in punto posto più avanti, in quanto nel primo caso il fango è stato sottoposto a sollecitazioni di taglio per un intervallo di tempo inferiore.

Questa dipendenza dal tempo della viscosità del fango è ovviamente problematica quando si tratta di prevederne il suo comportamento fluidodinamico. Anche i test di laboratorio eseguiti con fango non circolato sono di dubbia validità; infatti, se lo stesso fango è stato trasportato al di fuori del sistema di ricircolo, non è più nelle stesse condizioni di sforzo di taglio e tempo sotto sollecitazione a cui sarebbe sottoposto nel sistema.

Oltre ai fenomeni sopra citati di viscosità che varia con lo sforzo di taglio e con il tempo, molti fluidi mostrano un punto di snervamento al di sotto del quale non avviene alcun movimento. Mostrano quindi rigidità quando viene applicata una forza fino a un certo grado e, quindi, in seguito si “rompono” mostrando di solito tendenze pseudoplastiche o tixotropiche. Questi fluidi sono gergalmente chiamati “corpi-falsi”, o plastici di Bingham (Fig. 50).

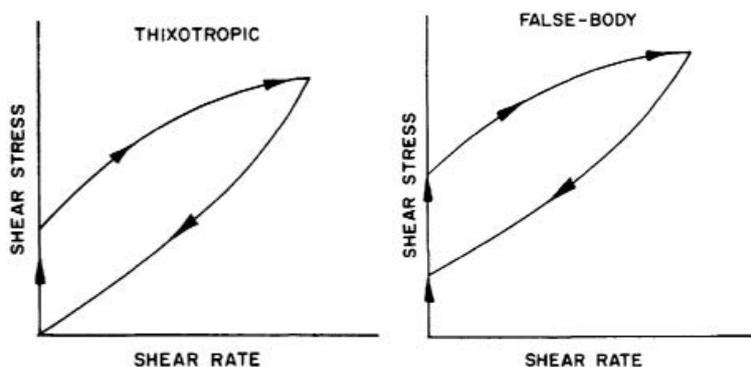


Fig. 50 – Comportamento dei “corpi-falsi”

Una delle formule utilizzabili per prevedere il comportamento fluidodinamico di un fluido non newtoniano è la legge di potenza proposta originariamente da Ostwald, che differisce dalla legge di Newton applicabile solamente nel caso di fluidi newtoniani.

*Legge di Ostwald:*  $\tau = \kappa \cdot \gamma^n$

*Legge di Newton:*  $\tau = \mu \cdot \gamma$

$\tau =$  sforzo di taglio

$\kappa =$  costante (coincidente con la viscosità se il fluido è newtoniano)

$\gamma =$  velocità di taglio

$\mu =$  coefficiente di viscosità

Mentre la legge di Newton per i fluidi newtoniani stabilisce che lo sforzo di taglio varia linearmente con la velocità di taglio, la legge di potenza di Ostwald stabilisce che per i fluidi newtoniani e non newtoniani lo sforzo di taglio varia con la velocità di taglio elevata alla potenza "n".

Il fattore di potenza "n" è unitario nel caso di fluidi newtoniani, maggiore di 1 per i fluidi dilatanti o reopectici, inferiore a 1 per i fluidi pseudoplastici o tixotropici.

Risulta interessante analizzare il profilo di velocità di differenti tipologie di fluido all'interno di una tubazione per differenti valori del fattore "n" (Fig. 51).

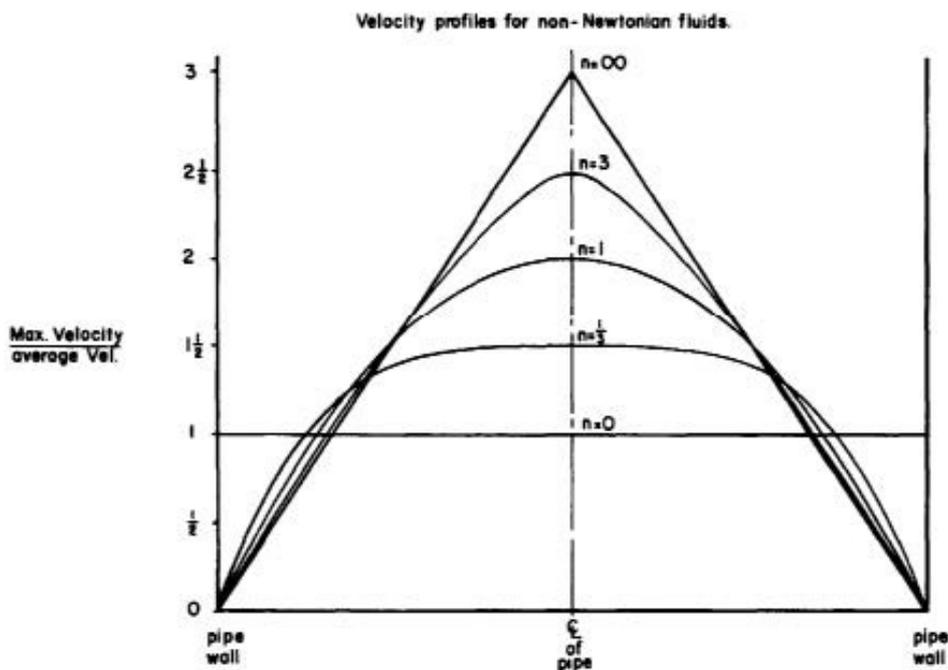


Fig. 51 – Profili di velocità di fluidi diversi in una tubazione

Per un fluido newtoniano in cui  $n=1$ , il profilo di velocità del fluido in moto all'interno della tubazione assume un andamento parabolico, con la velocità massima, al centro del tubo, doppia rispetto alla velocità media.

Per un fluido dilatante o reopectico, dove  $n>1$ , maggiore è il fattore  $n$ , più la velocità massima si avvicina a quella di un fluido dilatante perfetto (puramente teorico) dove  $n=\infty$ ; il profilo di velocità è conico anziché parabolico e la velocità massima al centro del tubo è tre volte quella media.

Nel caso di un fluido pseudoplastico o tixotropico perfetto, dove  $n=0$ , esso fluirebbe come un "tappo solido", senza differenze di velocità tra le pareti ed il centro del tubo. Anche se un fluido pseudoplastico o tixotropico perfetto non esiste, si noti che per un fluido pseudoplastico o tixotropico con un fattore di potenza  $n=1/3$ , il comportamento al centro del tubo è pressoché uguale a quello di un fluido pseudoplastico o tixotropico perfetto, quindi nella porzione centrale della tubazione il fluido scorre come un tappo solido.

Contestualizzando questi concetti nel caso dei fanghi di depurazione, ed analizzandone il comportamento con differenti concentrazioni di solidi, è possibile mettere in relazione lo sforzo di taglio con la velocità di taglio in un grafico in scala logaritmica noto come "curva di Behn" (Fig. 52).

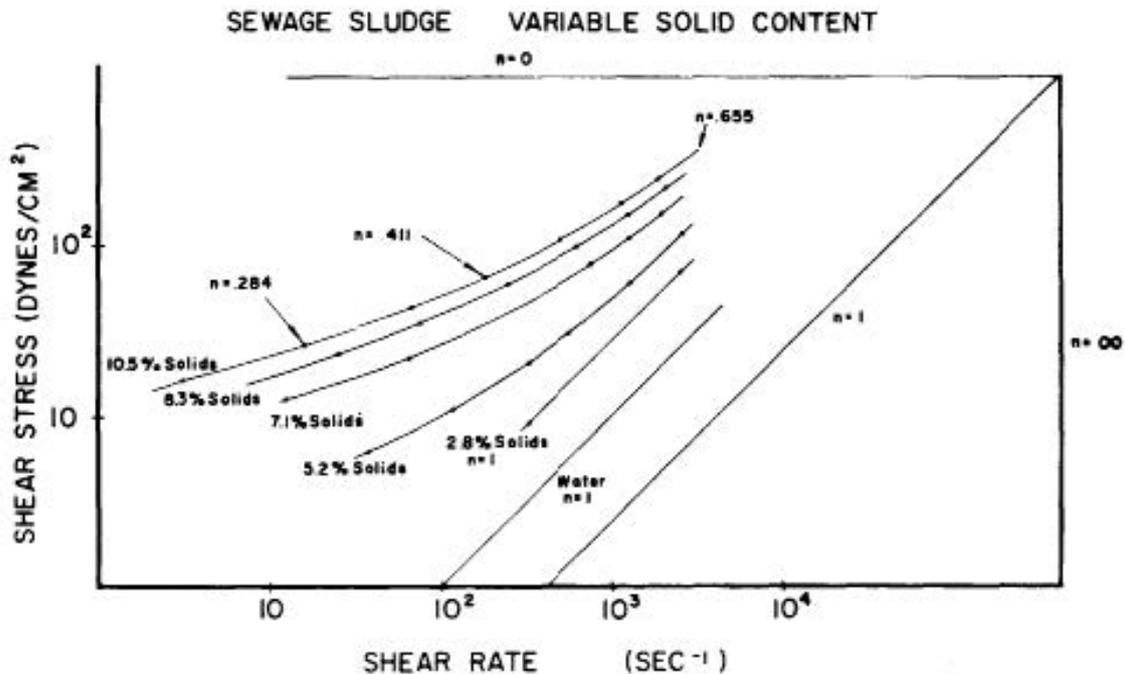


Fig. 52 – Curva di Behn

Nel caso di un fluido newtoniano, con  $n=1$ , lo sforzo di taglio varia linearmente con la velocità di taglio, e la relazione è rappresentata da una retta con pendenza di  $45^\circ$ .

Per un fluido pseudoplastico perfetto, con  $n=0$ , la linea sarebbe orizzontale, mentre per un dilatante perfetto, con  $n=\infty$ , la linea sarebbe verticale.

La curva di Behn evidenzia che la curva nel caso dell'acqua (fluido newtoniano) ha una pendenza prevista di  $45^\circ$ ; nel caso di un fango al 2,8% di solidi la curva risulta essere parallela a quella dell'acqua, mostrando quindi tendenze newtoniane, e quindi una viscosità pressoché costante (sebbene più elevata di quella dell'acqua) su un ampio intervallo di velocità di taglio. Sulla base di ciò, per fanghi fino al 3% di solidi, nel calcolo delle perdite di carico è possibile assumere convenzionalmente un moltiplicatore costante del 25% rispetto alla curva dell'acqua, indipendentemente dalle dimensioni del tubo e dalla portata.

Tuttavia, ciò che accade quando la percentuale di solidi supera il 5% è ben diverso; infatti, la linea non è più parallela a quella dell'acqua, indicando così che il fluido non è più newtoniano e che un moltiplicatore costante per le curve dell'acqua non sarebbe più accurato. Inoltre, non solo la linea non è parallela a quella dell'acqua, ma non è nemmeno più retta. Pertanto, anche i calcoli pratici della legge di potenza di Ostwald non sono adatti in questo caso a meno che non vengano utilizzati su un intervallo relativamente ristretto di velocità.

Ciò si verifica perché le relazioni della legge di Ostwald sono valide realmente solo per flussi omogenei o monofase, cioè fanghi che scorrono ad una velocità continua senza tendenza a separarsi o a fluire a velocità diverse da quella del fluido vettore. Questo di solito si verifica solo quando la dimensione delle particelle è estremamente piccola, nell'intervallo di pochi micron, e questo spiega il motivo per cui le relazioni della legge di potenza di Ostwald possono valere solo per fanghi con basse concentrazioni di solidi.

Analizzando poi il comportamento delle particelle di solidi all'interno di un fluido in movimento, si è dimostrato che le particelle sotto i 300 micron, con massa volumica maggiore di quella del fluido vettore, tendono a fluire in sospensione, mentre le particelle di dimensioni maggiori di 300 micron tendono a muoversi più velocemente a valle del fluido (come nel caso delle particelle pesanti che scorrono in un tubo verticale), concentrandosi sulle pareti del tubo. Mentre, quando le particelle tendono a muoversi più lentamente a valle del fluido, migrano al centro del tubo. Le particelle galleggianti con la stessa massa volumica del fluido vettore fluiscono in un anello intorno all'asse del tubo, a circa metà strada tra il centro e la parete della tubazione.

#### **4. Criteri di selezione di una pompa monovite per il trattamento dei fanghi**

Le pompe volumetriche monovite sono frequentemente utilizzate per la movimentazione di fanghi abrasivi e particolarmente viscosi, e trovano quindi spesso impiego nei processi di depurazione delle acque reflue. Uno dei motivi del loro utilizzo in queste applicazioni è la possibilità di tali pompe di operare a basse velocità di rotazione (indicativamente 100-400 rpm), riducendo in tal modo le sollecitazioni dei componenti e di conseguenza la loro usura.

Inoltre, l'utilizzo di un componente elastomerico (statore) permette una resistenza all'abrasione superiore rispetto a quella di altre pompe rotative convenzionali, in quanto le particelle tendono ad incorporarsi anziché abradarsi. L'elastomero dello statore consente un certo margine di deformazione per trattare, entro certi limiti, particelle solide come piccole rocce, stracci o metalli estranei.

Attraverso l'utilizzo di un accoppiamento a compressione tra statore e rotore, lo spazio tra gli organi di lavoro, richiesto nel caso delle pompe ad ingranaggi o a lobi, non è invece necessario nelle pompe monovite, permettendo di trattare fluidi più viscosi e generare pressioni maggiori. Infine, non sono presenti valvole che potrebbero intasarsi durante il funzionamento a causa di certi prodotti.

Di conseguenza, con tali pompe è possibile trattare quasi ogni elemento simile ad un fluido, tra cui: greggio sabbioso, fanghi di carbone, polimeri, fanghi di scarto, fanghi di perforazioni, fanghi disidratati, fanghi petroliferi, grassi, emulsioni, malta refrattaria, boiaccia di cemento, bentonite, scarti di macellazione, liquami di vario tipo e molto altro.

L'allestimento, la selezione dei materiali, il numero di stadi e la selezione della velocità ottimale di funzionamento sono fattori determinanti per la massima durata dei componenti della pompa e le migliori prestazioni. La corretta selezione della velocità della pompa ed il calcolo delle pressioni del sistema possono risultare però difficili quando sono coinvolti fluidi non newtoniani.

### Selezione della velocità di funzionamento ottimale:

La determinazione della velocità di rotazione della pompa è strettamente correlata alle proprietà fisico-chimiche del fluido trattato: in linea generale, più il fango è abrasivo, più lenta deve essere la velocità di rotazione.

Il livello di usura dei componenti della pompa nel caso di un fango abrasivo risulta essere più strettamente proporzionale al quadrato della velocità di rotazione piuttosto che avere un rapporto diretto. Indicativamente, nel caso di un fango abrasivo e a seconda del livello di abrasività, le velocità massime consigliate per una buona longevità della pompa sono 100 – 150 rpm.

Tuttavia, un effetto dannoso che la riduzione della velocità può avere sulla durata della pompa viene illustrato in Fig. 53, in cui viene evidenziato l'effetto dell'usura sulla curva prestazionale per una velocità A e una velocità B pari alla metà di A.

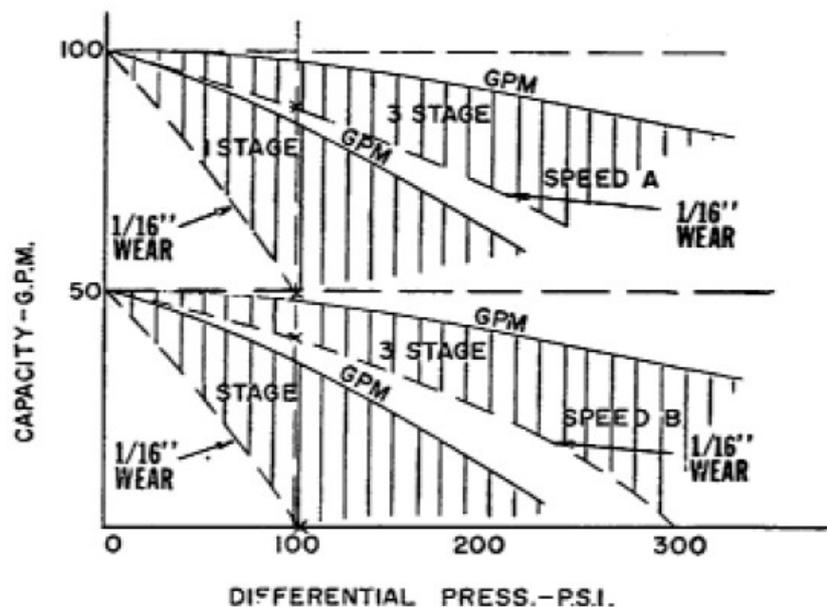


Fig. 53 – Effetto dell'usura sulle curve prestazionali di una pompa monovite

La pompa alla velocità B impiegherebbe un tempo quattro volte superiore rispetto ad A per raggiungere le curve prestazionali nel caso di presenza di usura e, fin tanto che la pressione differenziale è nulla o molto bassa, ciò comporta una durata dei componenti quattro volte superiore rispetto al caso A.

Sotto pressione, però, lo stesso livello di usura ha un effetto maggiore sull'efficienza volumetrica alla velocità più bassa B rispetto a quella più alta A; ad esempio, a 100 psi, lo stesso livello di usura comporta un calo della portata a zero alla velocità B, mentre alla velocità A la portata a quella pressione è ancora superiore al 50% della velocità prima che si verificasse l'usura.

Quindi, anche se occorrerebbe un tempo quasi quattro volte superiore per raggiungere lo stesso livello di usura a metà velocità, l'effetto dell'usura sulla portata, nel caso di pressioni più elevate, è più evidente alla velocità più bassa (portando ad una inevitabile necessità di sostituzione dei componenti). Tale effetto annulla parzialmente, o addirittura (in casi estremi) totalmente, la maggiore durata dei componenti attesa dalla riduzione della velocità. Per compensare ciò, vengono utilizzati più stadi di pompa nelle applicazioni abrasive; ciò aiuta a mantenere elevate efficienze volumetriche sotto pressione anche alle velocità più basse (come mostrato nella curva), riducendo l'effetto dell'usura sulla portata e quindi aumentando il tempo necessario prima della sostituzione dei componenti della pompa.

#### Selezione dei materiali costruttivi:

Un altro aspetto fondamentale per una lunga durata della pompa è la corretta selezione dei materiali di costruzione dei componenti.

Per la migliore resistenza all'abrasione il componente interno, o rotore, è realizzato in acciaio temprato C45 65 HRC con un sottile rivestimento superficiale a base di cromo (tipicamente di 0,254 mm). Sebbene siano stati effettuati diversi tentativi per trovare una soluzione alternativa al rivestimento a base di cromo (utilizzando ad esempio carburi di tungsteno e silicio, ossidi di alluminio, titanio), non è ancora stata trovata un'alternativa valida per garantire una migliore resistenza all'abrasione e all'usura. Il rotore può essere inoltre realizzato in acciaio inossidabile 304 o 316, garantendo una migliore resistenza alla corrosione; tuttavia, la maggiore tenerezza riduce notevolmente la resistenza all'abrasione, portando ad escludere questa tipologia di acciai nel caso di fanghi particolarmente abrasivi.

La compatibilità con il fluido pompato determina normalmente i materiali di costruzione del componente esterno, o statore. A meno che la durezza delle particelle abrasive non sia inferiore a quella di un acciaio temprato, non sono consigliabili statori metallici o rigidi. Come accennato in precedenza, tipicamente lo statore è costituito da un alloggiamento tubolare in acciaio con un'anima interna elastomerica a geometria elicoidale; questa si rileva essere la configurazione migliore per la maggiore resistenza all'abrasione.

Se l'elastomero è troppo morbido, il rendimento volumetrico sotto pressione crolla a causa della facilità di deformazione che comporta la perdita delle linee di tenuta tra rotore e statore; se invece l'elastomero è troppo duro esso si abrade troppo rapidamente. L'intervallo di durezza ottimale per la massima durata è compreso tra 50 e 70 durometri (Shore A).

Di gran lunga, la miscela di gomma più resistente all'abrasione è una gomma naturale di alta qualità; tuttavia, la mancanza di resistenza ad oli e grassi ne esclude l'utilizzo in molte applicazioni a causa dell'incompatibilità con il fluido pompato.

Il secondo per resistenza all'abrasione, ed il primo per compatibilità universale, è l'utilizzo di una gomma Nitrile Butadine (NBR), ovvero di una gomma acrilonitrile-butadiene che offre un'eccellente resistenza a grassi e oli.

Le gomme al Fluorocarburo (FKM/FPM) mostrano una discreta resistenza ad alcuni degli idrocarburi come toluene e benzene, ma hanno una resistenza all'abrasione inferiore a quella delle gomme precedentemente citate, non hanno resistenza ai chetoni e risultano in genere estremamente costose.

La gomma Etilene Propilene Diene (EPDM) presenta una buona resistenza ai chetoni, discrete proprietà meccaniche, un costo ragionevole, ma non resiste agli idrocarburi e ad oli/grassi.

Si evidenzia, quindi, come non esista una gomma universale adatta ad ogni tipologia di fluido trattato, e risulta necessario perciò selezionare la miscela di gomma più adatta a seconda del contesto applicativo.

## **Conclusioni:**

L'utilizzo di pompe volumetriche monovite offre dei significativi vantaggi per il trattamento dei fanghi di depurazione, in particolar modo quando questi risultano essere particolarmente densi, viscosi ed abrasivi.

I trattamenti di tali fanghi risultano essere molteplici in un impianto di depurazione, portando ad avere fanghi con caratteristiche chimico-fisiche spesso molto diverse.

Si è riscontrato che i fanghi di depurazione spesso presentano proprietà reologiche diverse da quelle di fluidi comuni, introducendo una complessità nella previsione del loro comportamento all'interno dell'impianto. In questo contesto, la selezione accurata della costruzione della pompa monovite e la definizione delle sue condizioni operative si rivelano aspetti fondamentali. Questa scelta adeguata non solo garantisce il corretto funzionamento di tutti i processi legati alla depurazione, ma preserva anche l'integrità dei componenti della pompa nel lungo periodo.

In conclusione, l'utilizzo delle pompe volumetriche monovite risulta non solo un mezzo efficiente per affrontare le problematiche legate alla gestione di fanghi, ma anche come un elemento chiave nella promozione della durabilità e dell'efficacia complessiva degli impianti di depurazione delle acque reflue.

## **Bibliografia:**

- Dispense depurazione – Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Del Territorio, Edile e di Chimica del Politecnico di Bari.
- Centrifugal and Positive Displacement Pumps – CEDengineering.
- Macchine a Fluido – Vincenzo Dossena, Giancarlo Ferrari, Paolo Gaetani, Gianluca Montenegro, Angelo Onorati, Giacomo Persico.
- Progressing Cavity Pumps – Henri Cholet, Christian Wittrisch (IFP Energies nouvelles 2013).
- Sludge handling characteristics in pipe system – J. David Bourke (Moyno®).
- Pumping abrasive sludge with progressing cavity pumps – J. David Bourke (Moyno®).