

TECNOLOGIE DI DISIDRATAZIONE DEI FANGHI

Simone Visigalli^{2,*}, Ludovico Spinosa¹, Roberto Canziani²

¹ Esperto ISO e CEN, Bari, Italia.

² Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA).

Sommario – Un problema chiave nel funzionamento degli impianti di trattamento delle acque reflue è rappresentato dalla gestione dei fanghi. La disidratazione meccanica è una fase cruciale per la riduzione dei volumi e dei costi di smaltimento dei fanghi. Tuttavia, essendo un processo delicato e dipendente da numerosi fattori, quali il tipo di trattamento biologico, il metodo di stabilizzazione e l'operazione di condizionamento, la scelta della tecnologia di disidratazione più adatta risulta sempre complessa. Infatti, le caratteristiche stesse del fango influenzano notevolmente l'efficienza di disidratazione, in termini di contenuto di sostanza secca (SS) finale, e spesso non si hanno ben chiari quali possano essere i parametri discriminanti per la selezione della macchina da installare. In questa review vengono descritte le principali tecnologie di disidratazione, riportando i parametri operativi e le prestazioni medie di centrifughe, filtropresse, nastropresse, presse a maniche, presse a vite e presse rotative. Vengono inoltre introdotti alcuni modelli presenti sul mercato che sfruttano il principio di disidratazione elettro-assistita e, per ultimi, alcuni metodi di disidratazione a inferiore livello tecnologico, che richiedono ampia disponibilità di spazi, quali letti di essiccamento, essiccamento solare, geofiltri tubolari, lagunaggio e fitodisidratazione. Per meglio comprendere le tecnologie di disidratazione elencate, vengono introdotte le caratteristiche dei fanghi più influenti nella fase di disidratazione, con qualche accenno ai metodi di misura sperimentale della disidratabilità da effettuare in laboratorio.

Parole chiave: centrifuga, disidratazione, fanghi di depurazione, filtropressa, nastropressa.

SLUDGE DEWATERING TECHNOLOGIES

Abstract – A key problem in the operation of wastewater treatment plants is the management of sludge. Mechanical dewatering is a crucial phase for reducing volumes and sludge disposal costs. However, being a delicate process and dependent on numerous factors, such as the type of biological treatment, the stabilization method and the conditioning operation, the choice of the most suitable dewatering technology is always complex. Indeed, the characteristics of sludge greatly influence the dewatering efficiency, in terms of final dry solid (DS) content, and often it is not clear what are the discriminating parameters for the selection of the machine to be installed. This review describes the main dewatering technologies, reporting the operating parameters and the average performance of centrifuges,

filter presses, belt presses, hydraulic filter presses, screw presses and rotary presses. Moreover, some models that exploit the principle of electro-dewatering, that are already available on the market, and, lastly, some dewatering methods with low technological level, but needing wide available areas, such as drying beds, solar drying, tubular geofilters, lagoons and reed beds are also introduced. To better understand the dewatering technologies, the sludge characteristics that most affect the dewatering phase are reported, with some references to the experimental measurement methods of dewaterability in the laboratory.

Keywords: belt press, centrifuge, dewatering, filter press, sewage sludge.

Ricevuto il 15-10-2019. Correzioni richieste il 15-11-2019. Accettazione finale il 2-1-2020.

1. INTRODUZIONE

In Europa ogni anno vengono prodotte circa 13,3 milioni di tonnellate di fango di depurazione (Eurostat, 2016). In Italia si stima una produzione di circa 850 mila tonnellate di sostanza secca (SS) (Drusiani, 2017), corrispondenti a circa 3,4 milioni di tonnellate di fango umido al 25% di secco. Si tratta di quantità destinate ad aumentare, soprattutto per la sempre maggiore percentuale di popolazione servita da impianti di depurazione, conseguente alla attuazione delle direttive comunitarie. A fronte di questa situazione risulta evidente l'importanza di una corretta gestione dei fanghi da trattare e per i quali trovare una destinazione, possibilmente volta al recupero di risorse, che ne riduca l'impatto ambientale. Altrettanto importante è la ricerca dell'ottimizzazione delle tecnologie esistenti. Una delle possibilità è la riduzione dei volumi di fanghi prodotti, anche grazie a nuove tecnologie di trattamento.

Generalmente, i fanghi prodotti da un impianto di depurazione (Figura 1), prima del loro smaltimento finale, sono sottoposti ad un processo di disidratazione, e in alcuni casi ad essiccamento termico, per poter rimuovere una buona parte del loro contenuto di acqua e ridurre quindi i costi di trasporto verso la destinazione finale, che sia discarica, incenerimento o riutilizzo agricolo.

* Simone Visigalli, Politecnico di Milano – DICA, Sezione Ambientale, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, Italia. Tel. (+39) 02 2399 4227, (+39) 347 1572449. E-mail: simone.visigalli@polimi.it

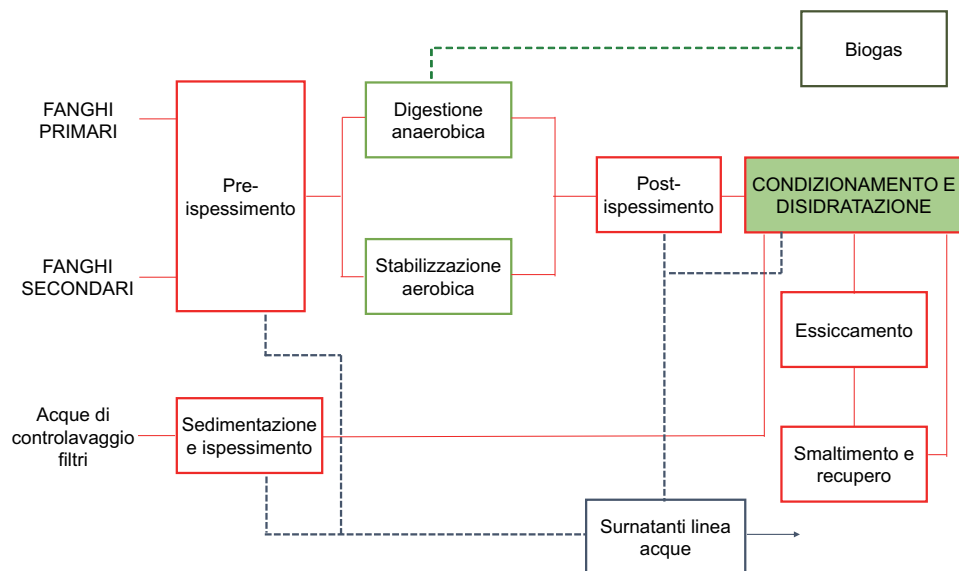


Figura 1 – Tipico schema della linea fanghi di un impianto di depurazione

Gli obiettivi della disidratazione, pertanto, possono essere riassunti nelle voci riportate in Tabella 1.

In questo lavoro sono descritte le tecnologie utilizzate convenzionalmente per la disidratazione di fanghi (biologici ed eventualmente chimici) derivanti da trattamento delle acque reflue urbane, con qualche accenno alle tecnologie più recenti che si stanno affacciando sul mercato.

2. DISTRIBUZIONE DELL'ACQUA NEL FANGO

Il principale costituente dei fanghi è l'acqua ed il suo contenuto può oscillare dal 99% per fanghi molto diluiti, come quelli che si ottengono da un processo biologico a fanghi attivi, fino all'88% nel caso di processi chimici di precipitazione (Marinetti, 2007).

I fanghi di depurazione sono generalmente difficili da disidratare a causa della loro struttura gelatinosa (Mahmoud et al., 2011), colloidale e comprimibile. Inoltre, a causa della presenza di particelle solide, non tutta l'acqua contenuta nei fanghi ha proprietà simili in termini di tensione di vapore, entalpia, entropia, viscosità e densità (Vaxelaire and Cézac, 2004). Infatti, convenzionalmente, nei fanghi vengono classificati quattro diversi tipi di acqua (Figura 2a): (i) acqua libera non associata a particelle solide; (ii) acqua interstiziale/capillare intrappolata all'interno degli spazi interstiziali dei fiocchi; (iii) acqua superficiale trattenuta sulla superficie delle particelle solide per adsorbimento e adesione; (iv) acqua legata chimicamente alle cellule batteriche e alle particelle del fango

Tabella 1 – Effetto della disidratazione sulle caratteristiche del fango e sul suo smaltimento: ↓ indica una diminuzione e ↑ indica un aumento del valore del parametro considerato

Voce	Range tipico	Unità di misura	Effetto della disidratazione
Contenuto di acqua nel fango	75 – 85	%SS	↓
Potere calorifico del fango t.q.	10 – 20	MJ/kg	↑
Costi di trasporto	15 – 20	€/ton	↓
Costi di smaltimento	70 – 250	€/ton	↓
Percolazione in discarica	-	-	↓
Odori e putrescibilità	-	-	↓

(Smith and Vesilind, 1995; Vaxelaire and Cézac, 2004; Vesilind and Hsu, 1997). In generale, l'acqua libera rappresenta circa il 65-85%, l'acqua capillare il 15-25% mentre l'acqua superficiale e quella legata, che possono essere rimosse solo mediante essiccamento termico a temperatura superiore a 105 °C (Jin et al., 2004), circa il 10% (Zhang and Sun, 2012). Pertanto, l'efficienza di disidratazione dipende non solo dai dispositivi di disidratazione e dagli additivi chimici utilizzati per il condizionamento, ma anche dal contenuto d'acqua e dalla sua distribuzione nel fango (He et al., 2017). La Figura 2b mette in evidenza come diverse tecnologie di disidratazione ed essiccamento possano avere efficienze diverse nella rimozione dei diversi tipi di acqua presenti all'interno del fango.

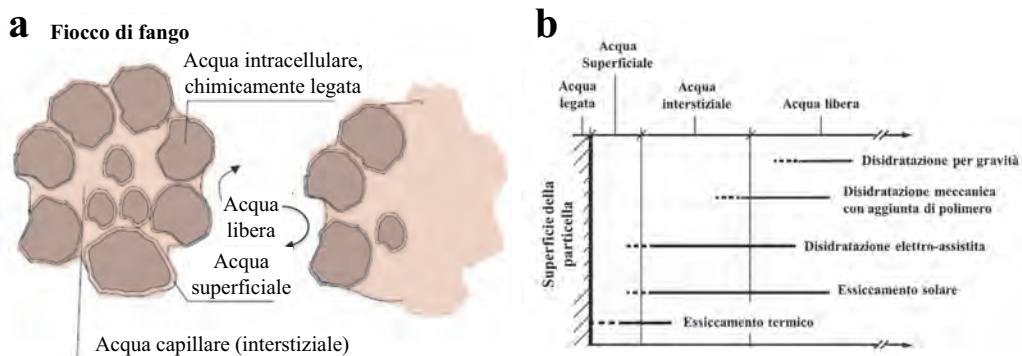


Figura 2 – (a) Distribuzione di acqua libera, acqua capillare, acqua superficiale e acqua legata nel fango (Vesilind and Martel, 1990); (b) effetto dei processi di disidratazione sui diversi tipi di acqua (Metcalf & Eddy and AECOM, 2014)

3. CONDIZIONAMENTO

Generalmente i fanghi di depurazione non possono essere convenientemente disidratati se non dopo un'operazione di condizionamento, che, modificandone alcune caratteristiche chimico-fisiche, consente di incrementare notevolmente la velocità di separazione solido-liquido e di migliorare le caratteristiche del liquido separato in termini di solidi sospesi. Infatti, il condizionamento dei fanghi consente di aumentare le dimensioni delle particelle e la loro distribuzione, modificando le cariche superficiali e l'interazione tra particelle stesse. In questo modo, le particelle più fini vengono agglomerate in fiocchi più grandi attraverso la coagulazione e la conseguente flocculazione. La coagulazione destabilizza le particelle, diminuendo l'intensità delle forze di repulsione elettrostatica e comprimendo il doppio strato elettrico che circonda ciascuna particella facilitandone la reciproca attrazione. La flocculazione, invece, consente l'agglomerazione dei colloidi attraverso bassi gradienti di miscelazione (Andreoli et al., 2007). Più in dettaglio, i principali meccanismi responsabili dell'aggregazione delle particelle costituenti i fanghi biologici consistono nella compressione del doppio strato, neutralizzazione della carica, inglobamento in precipitati e *bridging* (formazione di ponti interparticellari) (Marinetti, 2007).

Il condizionamento può essere realizzato mediante l'utilizzo di prodotti chimici inorganici, prodotti chimici organici o, più raramente, trattamenti fisici tramite l'applicazione di energia termica, sonora od elettrica. La quantità di additivi da utilizzare può variare in base alle caratteristiche del fango e alle tecnologie di disidratazione adottate.

3.1. Polimeri organici

I polimeri utilizzati nel condizionamento dei fanghi sono costituiti da lunghe catene di monomeri solubili in acqua, spesso basati su acrilammide. Poiché i fanghi sono prevalentemente dotati di carica negativa, i polimeri sono solitamente cationici. I polielettroliti agiscono sui legami tra acqua e particelle solide dei fanghi, causando desorbimento delle acque superficiali, neutralizzazione delle cariche ed agglomerazione delle particelle più piccole attraverso dei ponti (Andreoli et al., 2007).

La scelta del polimero da utilizzare ed il suo dosaggio dipendono fortemente dalle caratteristiche del fango. Ad esempio, è necessario l'utilizzo di un polimero ad elevata carica quando le particelle di fango sono molto fini ed il contenuto di acqua e le relative cariche superficiali sono elevati. Inoltre, una densità di carica elevata è opportuna nel caso si vogliano ottenere reazioni rapide come nelle nastropresse per la fase iniziale di drenaggio, mentre non è adatta per le centrifughe dove occorre che la reazione sia ritardata per evitare la rottura dei fiocchi, i quali subiscono un forte stress meccanico all'ingresso della macchina dovuto alle forti velocità di rotazione. I polimeri si trovano sotto forma di polvere o in forma liquida (acquosa oppure in emulsione di acqua in olio).

Rispetto ai condizionanti chimici, in cui il peso secco dei fanghi può aumentare fino al 15-30% rispetto al valore iniziale, i polimeri organici consentono un incremento dell'1% circa, senza ridurre il potere calorifico del fango disidratato (Andreoli et al., 2007).

In *Tabella 2* vengono riportati i dosaggi tipici dei condizionanti organici utilizzati con le diverse tecnologie di disidratazione. È subito evidente come pressa a vite e pressa rotativa richiedano, in me-

Tabella 2 – Dosaggi tipici di polimero utilizzati nella disidratazione di diverse tipologie di fanghi con centrifughe, nastropresse, presse a vite e presse rotative (Metcalf & Eddy and AECOM, 2014)

Tipologia di fango	Tecnologia	Dosaggio polimero (kg/tSS)																				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Non stabilizzato																						
Primario	Centrifuga																					
	Nastropressa																					
	Pressa a vite																					
	Pressa rotativa																					
Primario + Attivo	Centrifuga																					
	Nastropressa																					
	Pressa a vite																					
	Pressa rotativa																					
Attivo	Centrifuga																					
	Nastropressa																					
	Pressa a vite																					
	Pressa rotativa																					
Stabilizzato anaerobicamente																						
Primario	Centrifuga																					
	Nastropressa																					
	Pressa a vite																					
	Pressa rotativa																					
Primario + Attivo	Centrifuga																					
	Nastropressa																					
	Pressa a vite																					
	Pressa rotativa																					
Stabilizzato aerobicamente																						
Primario + Attivo	Centrifuga																					
	Nastropressa																					
	Pressa a vite																					
	Pressa rotativa																					

dia, dosaggi di polielettrolita superiori rispetto a quanto richiesto da centrifughe e nastropresse.

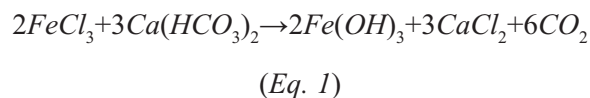
3.2. Additivi chimici inorganici

Il condizionamento chimico inorganico viene principalmente utilizzato per la disidratazione con filtrazione sottovuoto o sotto pressione. I prodotti chimici maggiormente utilizzati sono la calce e il cloruro ferrico e, meno frequentemente, cloruro ferroso, solfato ferroso e solfato di alluminio.

3.2.1. Cloruro ferrico

Il cloruro ferrico viene principalmente utilizzato in combinazione con la calce per condizionare il fango prima della disidratazione con filtropressa, consentendo una migliore filtrabilità grazie alla coagulazione dei colloidali e mediante micro-flocculazione degli idrossidi. Infatti, il cloruro ferrico idrolizza in acqua e forma complessi di ferro caricati positivamente che neutralizzano le cariche super-

ficiali negative del fango, permettendo la loro aggregazione. Inoltre, esso reagisce con l'alcalinità del bicarbonato del fango, formando idrossidi che agiscono come flocculanti (Eq. 1).



I dosaggi di cloruro ferrico, di solito venduto in soluzioni acquose al 30-40% (Andreoli et al., 2007), sono generalmente compresi tra il 3% e il 15% del contenuto di SS, a seconda della qualità del fango.

3.2.2. Calce

La calce spenta viene solitamente utilizzata insieme al cloruro ferrico principalmente per il controllo del pH e dell'odore, e per la riduzione del contenuto di patogeni nel fango. Il prodotto risultante dalla reazione della calce con bicarbonato (CaCO₃) produce una struttura granulare nel fango, aumenta la sua porosità e riduce la sua compressibilità.

Tabella 3 – Dosaggi tipici di cloruro ferrico e calce utilizzati nelle filtropresse per la disidratazione di diverse tipologie di fango (Metcalf & Eddy and AECOM, 2014)

Tipologia di fango	Additivo chimico	Dosaggio additivo inorganico (kg/tSS)																																			
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300					
Non stabilizzato																																					
Primario	FeCl ₃																																				
	CaO																																				
Primario + Attivo	FeCl ₃																																				
	CaO																																				
Attivo	FeCl ₃																																				
	CaO																																				
Stabilizzato anaerobicamente																																					
Primario	FeCl ₃																																				
	CaO																																				
Primario + Attivo	FeCl ₃																																				
	CaO																																				

La calce è commercializzata come calce viva (CaO) o come calce spenta (Ca(OH)₂). L'operazione di spegnimento della calce viva con acqua per produrre Ca(OH)₂ rilascia considerevole calore e richiede attrezzature adeguate per proteggere gli impianti e i lavoratori. Al contrario, la calce spenta si miscela facilmente con l'acqua, rilasciando poco calore, e non richiede particolari requisiti di stoccaggio. Tuttavia, il costo del prodotto risulta maggiore della calce viva. I dosaggi di calce hanno normalmente concentrazioni del 15-40% del contenuto di SS. La Tabella 3 mostra i dosaggi tipici di cloruro ferrico e calce utilizzati nelle filtropresse.

3.3. Additivi naturali

Recentemente, i coagulanti inorganici e i polimeri sintetici sono stati associati a problematiche ambientali e sanitarie, come ad esempio l'acrilammide, il principale costituente dei polielettroliti cationici, che può essere causa di effetti neurotossici e cancerogeni (Senthilkannan Muthu, 2018). Per questi motivi si è cercato di prendere in considerazione nuove potenziali alternative per il condizionamento dei fanghi e la ricerca ha mostrato un interesse sempre maggiore nello sviluppo di polimeri naturali. Esempi di polimeri cationici naturali sono il chitosano e gli amidi cationici, mentre alcuni esempi di polimeri anionici sono i polisaccaridi solfati e ligninsolfonati modificati. I derivati dell'amido e della cellulosa sono esempi di polimeri naturali non ionici. Lin et al. (2019) hanno dimostrato come il chitosano cloridrato possa essere utilizzato come sostituto ideale delle poliacrilammidi catio-

niche per il condizionamento dei fanghi. Inoltre, l'uso di lisozima ha permesso un miglioramento dell'efficienza di disidratazione grazie alla sua capacità nel rompere le pareti cellulari dei batteri e rimuovere l'acqua trattenuta al loro interno (Lin et al., 2019). In base alla loro origine, i coagulanti naturali possono essere suddivisi in tre categorie: derivati da piante, da microrganismi o da animali. Essendo i coagulanti di origine vegetale molto più diffusi rispetto ai coagulanti di origine animale, additivi come tannino (ottenuto da *Acacia*, *Castanea*, *Schinopsis*, *Cassia obtusifolia* o *Castanea sativa*), *Moringa oleifera*, basilico, *Cereus peruvianus*, acido galatturonico (dall'ocra) e *Cassia* stanno riscuotendo interesse nella coagulazione di acque di scarico industriali (Senthilkannan Muthu, 2018).

3.4. Condizionamento fisico

Tra i trattamenti fisici, il condizionamento effettuato tramite congelamento-scongelo mostra un elevato miglioramento della disidratabilità dei fanghi, con costo di processo moderato se effettuato in paesi con climi rigidi e freddi. Il principio di questo processo consiste nel congelamento dell'acqua presente nel fango a temperature di -10/-20 °C per 1-4 ore. In questo modo, il volume occupato dall'acqua tende ad aumentare, la pressione osmotica cambia e i cristalli di ghiaccio crescono con struttura organizzata e simmetrica (Tsang and Vesilind, 1990). Ogni cristallo continua a crescere fino a quando sono disponibili molecole d'acqua, mentre tutte le altre impurità e particelle solide sono costrette ai confini del cristallo stesso dove vengono compresse, permettendo la rimozione di acqua legata. In gene-

rare, i fanghi congelati a basse velocità mostrano una migliore disidratabilità rispetto a quelli condizionati con congelamento rapido (Tuan, 2011).

Un altro metodo di condizionamento fisico è il trattamento termico. È stato dimostrato come il trattamento termico dei fanghi nell'intervallo di temperatura tra 40 e 180 °C e l'idrolisi termica tra 130 e 180 °C migliorino la disidratabilità, grazie alla degradazione delle sostanze polimeriche esocellulari (*extracellular polymeric substances*, EPS) e alla distruzione della struttura colloidale, con conseguente rilascio dell'acqua legata dalle particelle di fango. Tuttavia, il trattamento ad alta temperatura distrugge le pareti cellulari e trasforma alcuni dei solidi sospesi organici in composti solubili, facilitando la disidratazione ma peggiorando contemporaneamente la qualità del filtrato (Marinetti, 2007; Tuan, 2011). I costi e i consumi energetici elevati rappresentano gli svantaggi più importanti per questo tipo di trattamento.

4. CARATTERISTICHE CHE INFLUENZANO LA DISIDRATABILITÀ

Tra i parametri che maggiormente influiscono sulla disidratabilità del fango vi sono il pH, la carica delle particelle, il contenuto di acqua legata, il contenuto di sostanza organica e di EPS, la granulometria dei solidi in sospensione, la tipologia di fango, il tipo di additivi chimici utilizzati ed il grado di miscelazione della fase di condizionamento, la resistenza meccanica degli aggregati e la porosità. Il condizionamento chimico consente una riduzione dei tempi di filtrazione, un maggiore tenore di secco e un minore contenuto di solidi sospesi nel filtrato. Tuttavia, dosaggi troppo elevati possono causare un'inversione della carica delle particelle, con conseguente ri-destabilizzazione dei colloidi e riduzione dell'efficienza di disidratazione. Le particelle più fini del fango (1-100 µm) causano molto spesso fenomeni di intasamento dei filtri e del pannello di fango, influenzando negativamente l'efficienza di disidratazione. Il condizionamento permette la formazione di aggregati di dimensioni maggiori, caratterizzati da elevata densità e modesto contenuto di filamentosi, i quali sopportano discretamente le sollecitazioni meccaniche tipiche dei processi di filtrazione e disidratazione. In questo modo, l'acqua può essere rimossa più facilmente attraverso i canali dei fiocchi, consentendo l'ottenimento di fango disidratato con elevati tenori di secco. Inoltre, quando viene utilizzato un polielettrolita, al crescere del dosaggio la porosità

del pannello tende a diminuire fino al raggiungimento di un minimo, mentre nel caso di condizionamento con calce e cloruro ferrico il pannello risulta più rigido e poroso, consentendo una maggiore facilità di disidratazione (Wu et al., 2001).

Le EPS causano un'elevata ritenzione di acqua interstiziale e legata all'interno dei fiocchi di fango e sono considerate uno dei fattori limitanti nell'efficienza di filtrazione e disidratazione. Inoltre, a causa della loro carica superficiale, un maggiore contenuto di EPS determina anche un aumento del potenziale zeta della sospensione e un incremento del contenuto di solidi volatili (Kopp and Dichtl, 2001; Skinner et al., 2015): un elevato contenuto di sostanza organica, oltre ad influenzare la deformabilità dei fiocchi di fango, determina un incremento della quantità di acqua legata e quindi una minore disidratabilità. Infatti, come già accennato nel *Capitolo 2*, il contenuto di acqua legata è determinante nel definire il limite di secco raggiungibile nel pannello, in quanto non tutte le frazioni dell'acqua sono eliminabili con trattamenti meccanici.

Il pH del fango influenza notevolmente l'entità delle cariche superficiali e del potenziale zeta. Infatti, le interazioni elettrostatiche repulsive tra una particella e l'altra sono minimizzate per valori di pH compresi tra 2,6 e 3,6, in prossimità del punto isoelettro. Inoltre, il pH rappresenta un parametro di fondamentale importanza nel processo di condizionamento chimico, per la sua capacità di influire sull'efficienza degli additivi organici e inorganici utilizzati. In particolare, nel caso di condizionamento inorganico con sali di ferro ed alluminio, il pH influenza sia la carica dei prodotti di idrolisi, responsabili della neutralizzazione della carica superficiale delle particelle, sia la solubilità degli idrossidi metallici, i quali agiscono inglobando i colloidi all'interno del precipitato (Marinetti, 2007).

I trattamenti di stabilizzazione determinano cambiamenti irreversibili della struttura dei fiocchi di fango e delle loro dimensioni, che risultano generalmente di diametro inferiore. Inoltre, essi modificano la concentrazione dei solidi, del contenuto di acqua e delle EPS, peggiorando la disidratabilità del fango e aumentando la richiesta di additivi chimici per il condizionamento.

5. TEST PER LA DISIDRATABILITÀ

Come visto nel capitolo precedente, l'elevata variabilità delle caratteristiche dei fanghi, la tipologia e il dosaggio di polielettrolita rendono difficile predire l'efficienza del processo di disidratazione in

un impianto di depurazione. Per questo motivo sono stati studiati dei test in scala di laboratorio e alcuni parametri per ottimizzare la fase di condizionamento e indirizzare la scelta verso una specifica tecnologia di disidratazione.

Le tecniche di misura della disidratabilità più comuni includono la resistenza specifica alla filtrazione (*specific resistance to filtration*, SRF), il tempo di filtrazione (*time to filter*, TTF), il tempo di suzione capillare (*capillary suction time*, CST) e la comprimibilità.

Il test SRF misura la resistenza dei fanghi alla filtrazione attraverso un mezzo poroso mediante vuoto o pressione. La misura della SRF viene eseguita applicando il vuoto in un apparato dotato di imbuto Buchner e carta da filtro (Figura 3a), su cui vengono versati 100-200 ml di fango. Il test può essere condotto anche con cellette a pressione che permettono di operare a livelli di pressione più elevati (UNI – Ente Italiano di Normazione, 2013). Durante la filtrazione, il volume del filtrato viene registrato in funzione del tempo e i dati vengono tracciati rispetto al flusso inverso del volume del filtrato (tempo/volume del filtrato), mentre la pendenza della retta serve a calcolare la SRF (m/kg) secondo l'Eq. 2.

$$SRF = \frac{2\Delta P A^2 b}{\mu C} \quad (Eq. 2)$$

Dove ΔP (N/m²) è la perdita di carico del filtro, A (m²) è l'area di filtrazione, μ (kg/m·s) è la viscosità del filtrato, C (kg/m³) è la massa di solidi depositati per unità di volume di filtrato (solitamente considerato uguale alla concentrazione iniziale di solidi nel fango) e b (s/m⁶) è la pendenza del tratto rettili-

neo che si ottiene riportando in grafico i valori di t/V in funzione di V (m³, volume di filtrato al tempo t). Maggiore è la resistenza specifica, più difficile è la disidratazione dei fanghi e viceversa. In generale, i fanghi con valori di SRF compresi tra 10¹⁰-10¹¹ m/kg sono classificati come facili da disidratare, mentre fanghi con valori di SRF tra 10¹⁴-10¹⁵ m/kg sono considerati difficili da disidratare (Phuong To et al., 2016).

Il TTF sfrutta lo stesso apparato del test di SRF ma non tiene conto delle variabili riportate nella Eq. 2. Infatti, questo metodo misura semplicemente il tempo di filtrazione (min) del 50% del volume iniziale del fango (APHA/AWWA/WEF, 2012). Pertanto, questo test, rispetto alla SRF, ha il vantaggio di non dover registrare i dati durante la fase di filtrazione, con lo sconveniente di una minor facilità di confronto tra fanghi con caratteristiche differenti.

La comprimibilità consente di valutare la convenienza nell'adottare apparecchiature di filtrazione in pressione e di scegliere il campo di pressioni più conveniente. Questo indicatore consiste nella determinazione della SRF a diverse pressioni e nello studio della pendenza della retta ottenuta diagrammando *Log SRF vs. Log P*. Valori di comprimibilità maggiori di 1 indicano un aumento della SRF più che proporzionale con la pressione, tale da non rendere conveniente operare a pressioni elevate (Arimieari and Ademiluyi, 2019; IRSA-CNR, 1984).

Il CST è costituito da due componenti principali (Figura 3b): un'unità di filtrazione e un cronometro automatico. L'unità di filtrazione comprende una carta da filtro spessa (di solito Whatman n° 17), inserita tra due blocchi rettangolari di plastica. Un

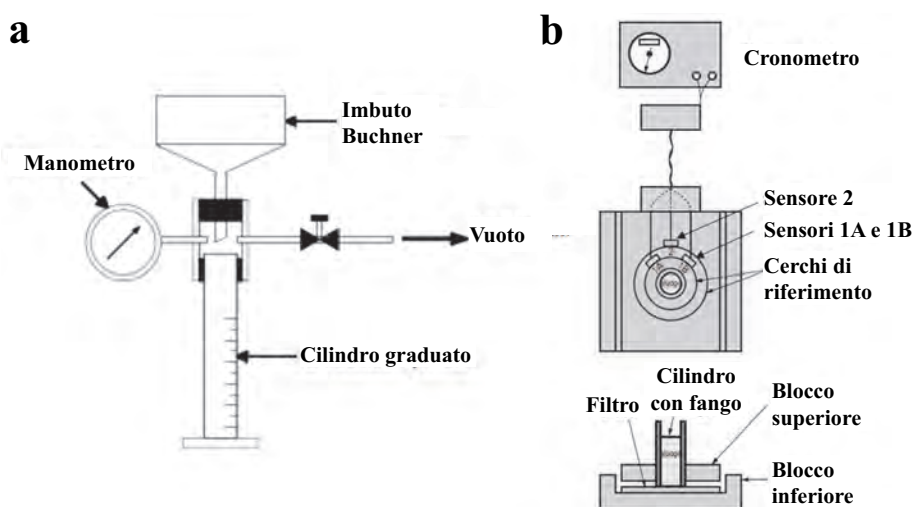


Figura 3 – Apparati per la determinazione di (a) resistenza specifica alla filtrazione (SRF) e (b) tempo di suzione capillare (CST)

cilindro cavo in acciaio (diametro di 18 mm) è posto sopra il filtro al centro del blocco di plastica superiore. Attorno al cilindro sono presenti due cerchi concentrici di diametri rispettivamente di 32 mm e 45 mm, sui quali sono posti dei sensori collegati ad un cronometro. Il cilindro viene riempito con il campione di fango e, non appena il fango raggiunge la carta da filtro sul fondo, inizia la fase di filtrazione. Quando l'acqua nell'interfaccia fango-filtro viene assorbita dalla carta, il fango che entra in contatto diretto con la carta diventa compatto e funge da barriera per un'ulteriore perdita di acqua. Il cronometro si attiva automaticamente quando il filtrato raggiunge i due sensori sul primo cerchio mentre si ferma e mostra il valore di CST (s) quando il filtrato raggiunge il secondo cerchio. La velocità con cui il filtrato si diffonde concentricamente sulla carta filtro indica la filtrabilità del campione di fango: un valore CST più basso indica migliori proprietà di filtrazione dei fanghi.

Il CST viene utilizzato principalmente per studiare il dosaggio ottimale del polimero per la fase di condizionamento, mentre il confronto tra fanghi di diversi impianti e con contenuti di SS diversi risulta molto più complesso (APHA/AWWA/WEF, 2012). Un fango viene generalmente ritenuto ben filtrabile quando il rapporto tra CST ed il tenore di secco è inferiore a 30, valori superiori a 150 corrispondono a fanghi difficilmente filtrabili.

Come visto, gli indici di disidratazione utilizzati tradizionalmente sono stati sviluppati principalmente per valutare la filtrabilità dei fanghi e ciò ha spesso causato errori significativi e imprecisioni nella valutazione dell'efficienza della disidratazione. Infatti, lo studio della filtrabilità non tiene conto della successiva fase di consolidamento che, per strutture comprimibili come i fanghi, risulta molto più lunga ed efficiente nella rimozione di filtrato rispetto alla fase di filtrazione. In altre parole, gli indicatori di disidratatilità non sono del tutto in grado di prevedere il contenuto massimo di SS ottenibile durante la disidratazione. I metodi descritti sopra danno indicazioni utili per tecnologie che utilizzano la filtrazione come metodo di disidratazione, soprattutto per quanto riguarda l'ottimizzazione della fase di condizionamento. Tuttavia, oltre ai dispositivi di filtrazione, anche le centrifughe sono ampiamente utilizzate e necessitano di indicatori adatti per studiare sia le prestazioni di disidratazione sia in grado di valutare la capacità del fango di essere estratto dalla coclea (compattezza), cosa non valutabile con le normali centrifughe a cestello da laboratorio.

Spinosa e Mininni (1984) hanno riportato che la sedimentabilità, la scrollabilità e la resistenza dei fiocchi sono le principali caratteristiche dei fanghi che influenzano la centrifugabilità. Tuttavia, non sono disponibili metodi standard in cui le proprietà di cui sopra siano considerate nel loro complesso. La compattabilità è definita dal contenuto di SS ottenuto e dall'altezza dello strato di fango compattato dopo la centrifugazione (Erdincler and Vesilind, 2000), ma non quantifica lo stress impartito sulla pannello di fango durante la disidratazione. Il metodo della forza del fiocco, che sfrutta la misura con CST dopo aver sottoposto il fango a tempi variabili di agitazione a 1000 rpm, permette di studiare la capacità dei fiocchi del fango di resistere agli stress meccanici in una centrifuga (IRSA-CNR, 1984). Wu et al. (2003) hanno suggerito l'utilizzo di centrifughe per fanghi con elevata resistenza dei fiocchi, mentre metodi di filtrazione per fanghi con media resistenza dei fiocchi (Wu et al., 2003). Chu e Lee (2001) hanno introdotto una centrifuga dotata di una videocamera sospesa per studiare la separazione dell'acqua dal fango e determinare la velocità di rotazione ottimale per la massima efficienza di disidratazione. Tuttavia, questo metodo non consente di determinare il contenuto di SS finale ottenibile con una centrifuga.

Recentemente, è stato studiato un dispositivo di centrifuga modificato che permette di ottenere un indice di centrifugazione modificato (MCI): lo stress causato dalla centrifuga viene misurato usando il parametro adimensionale gt , che è il prodotto di g (correlato alla velocità di rotazione della centrifuga e al raggio del rotore) e al tempo di centrifugazione t (s) (To et al., 2016). In generale, all'aumentare dei valori di gt si ottiene un aumento del contenuto di SS nel fango, il che implica che maggiore è l'intensità di centrifugazione, migliori sono le proprietà di disidratazione. Questo metodo permette di determinare la dose ottimale di polimero nel condizionamento del fango.

Tuttavia, non è stato ancora standardizzato nessun parametro o indicatore appropriato per predire la centrifugabilità del fango a causa delle difficoltà nel riprodurre i processi che avvengono all'interno di una centrifuga.

Lo studio della reologia è ulteriore parametro da tenere in considerazione come indicatore per la disidratatilità. Anche se il comportamento reologico dei fanghi con contenuto di SS molto basso (inferiore al 2%) è considerato newtoniano (come l'acqua), il comportamento comune riscontrato per i fanghi concentrati è descritto come non newtoniano.

Di conseguenza, i fanghi sono considerati un materiale molto complesso da studiare, a causa di diversi limiti sperimentali e dibattiti sulla metodologia e la standardizzazione (Eshtiaghi et al., 2013; Spinosa and Lotito, 2003).

Per concludere, la valutazione dell'efficienza di disidratazione risulta un compito complesso a causa della natura estremamente variabile dei fanghi. Infatti, gli indici di disidratazione più tradizionali non riescono a prevedere il contenuto massimo di SS ottenibile durante la disidratazione in impianto.

6. CRITERI DI SELEZIONE DELLE MACCHINE

Per poter indirizzare la scelta della tecnologia di disidratazione più adatta in un impianto di depurazione, si devono considerare quei parametri che tengano conto sia delle caratteristiche sia delle quantità di fango da trattare. Come mostrato in *Figura 4*, i bilanci di volume e massa in entrata e in uscita dalla macchina di disidratazione sono i seguenti:

$$Q_{Fango\ IN} + Q_{H_2O} + Q_{Condizionante} = Q_{Fango\ OUT} + Q_{Filtrato} \quad (Eq. 3)$$

$$Q_{Fango\ IN} \cdot SS_{Fango\ IN} + Q_{Condizionante} \cdot SS_{Condizionante} + Q_{H_2O} = Q_{Fango\ OUT} \cdot SS_{Fango\ OUT} + Q_{Filtrato} \cdot SS_{Filtrato} \quad (Eq. 4)$$

Dove Q indica le portate (m^3/h) in ingresso e uscita e SS il contenuto di sostanza secca (kg/m^3). Pertanto, per un corretto dimensionamento della macchina e per valutare l'efficienza della disidratazione, due parametri acquisiscono notevole importanza: il contenuto di SS nel fango disidratato e l'indice di cattura dei solidi. Infatti, come detto, un maggiore contenuto di SS finale consente di ridurre i costi di trasporto e smaltimento del fango, a

causa dei ridotti volumi da trattare, e incrementa il potere calorifico del fango per l'incenerimento. Al contrario, un basso indice di cattura dei solidi può portare a maggiore usura delle unità di disidratazione, delle pompe ed altre attrezzature, con conseguente aumento dei costi operativi per la manutenzione, oltre a comportare maggiori dosaggi di condizionanti e a incrementare i carichi inquinanti riciccolati in testa all'impianto.

L'indice di cattura dei solidi (ICS, %) può essere calcolato secondo l'*Eq. 5* (Porteous, 1983).

$$ICS = \frac{SS_{OUT}}{SS_{IN}} \times \frac{SST_{IN} - SST_{Filtrato}}{SS_{OUT} - SST_{Filtrato}} \times 100 \quad (Eq. 5)$$

Dove SS_{OUT} (%) indica il contenuto di sostanza secca del fango disidratato, mentre SST_{IN} (%) e $SST_{Filtrato}$ (%) indicano il contenuto di solidi sospesi rispettivamente del fango in ingresso alla macchina e del filtrato o centrato ottenuto dopo disidratazione.

Come già detto, la selezione della tecnologia di disidratazione è determinata dal tipo e dalle caratteristiche del fango, dalla sua destinazione finale nello smaltimento e dallo spazio disponibile. La filtrazione sottovuoto, talvolta utilizzata in passato, è oggi una rarità, soppiantata dalle apparecchiature di disidratazione meccanica basate su filtrazione e centrifugazione. Nel caso degli impianti più piccoli, in cui la disponibilità del terreno non è generalmente un problema, vengono ancora oggi utilizzati letti di essiccamento o lagune. Al contrario, per strutture più grandi o strutture localizzate in siti dove lo spazio è limitato, vengono installate filtopresse, centrifughe o nastropresse. Tra i tanti fattori da considerare, non va trascurato il controllo degli odori. Il livello di rilascio varia in base al tipo di fango, al suo grado di stabilizzazione e alla tecnologia di disidratazione selezionata.



Figura 4 – Schema del processo di condizionamento e disidratazione

La selezione delle macchine di disidratazione non può prescindere dalla acquisizione preliminare dei seguenti dati e informazioni (Bertanza et al., 2014):

- portata del fango da disidratare;
- caratteristiche del fango;
- concentrazione da conseguire nel fango disidratato;
- caratteristiche e trattamento della frazione liquida (filtrati e centrati);
- costi d'investimento;
- costi di gestione;
- spazio per l'installazione della macchina;
- destinazione finale del fango (uso agricolo, compostaggio, incenerimento, altro).

Per evitare l'accumulo di fanghi oltre alla capacità di stoccaggio dell'impianto di depurazione è importante definire la taglia delle macchine o il loro numero, se utilizzate in combinazione, e garantirne la continuità di servizio, tenendo conto dei necessari tempi di fermo per ordinaria manutenzione. La zona adibita alla disidratazione deve essere progettata in modo tale che la rimozione e la sostituzione di tutte le attrezzature avvenga in modo semplice e rapido. Inoltre, devono essere previste strutture adeguate alla ventilazione, mentre gli impianti di miscelazione della calce devono essere completamente chiusi per impedire la fuoriuscita della polvere.

7. TECNOLOGIE PER LA DISIDRATAZIONE

Nel seguente capitolo sono descritte le principali tecnologie di disidratazione dei fanghi utilizzate negli impianti di depurazione. Vengono inoltre riportati i parametri operativi di utilizzo e le prestazioni delle diverse macchine, in modo da facilitarne il confronto e comprendere le differenze in termini di efficienza, non solo per quanto riguarda il contenuto di SS finale, ma anche per la capacità di trattamento (in termini di carico solido e di portata liquida) e per i consumi energetici.

7.1. Centrifuga

7.1.1. Descrizione e principi di funzionamento

La centrifuga (o decanter) sfrutta la forza centrifuga per accelerare il processo di sedimentazione delle particelle di fango che si addensano sulle pareti del tamburo e dalle quali viene separata l'acqua, dotata di una minore densità. Generalmente, la centrifuga ha una struttura conico-cilindrica (Figura 5), costituita da un tamburo e da una coclea che ruota nella stessa direzione del tamburo ma ad una velocità leggermente inferiore (solitamente di circa 5-15 rpm).

Il fango viene introdotto nel tamburo da un tubo di alimentazione stazionario e, durante lo scorrimento, la forza centrifuga fa sì che i solidi si accumulino fuori dal liquido e si depositino contro la parete del tamburo. Questo strato di solidi viene così spinto in direzione orizzontale verso l'estremità opposta dello scarico del liquido dalla coclea per poi essere scaricati dal tamburo. La fase liquida scorre dal punto in cui viene introdotta fino agli sbarramenti del liquido all'estremità del gruppo rotante. Le centrifughe si suddividono in due tipologie, a seconda della direzione del flusso. Nella centrifuga con flusso controcorrente i solidi viaggiano verso l'estremità conica mentre la fase liquida viene rimossa nella direzione opposta. Nella centrifuga con flusso equicorrente sia la fase liquida che la fase solida percorrono tutta la lunghezza del tamburo. In questa tipologia i fanghi non vengono disturbati dall'alimentazione in ingresso e la turbolenza viene ridotta. Tuttavia, questo modello necessita di lunghi tubi di alimentazione e viene utilizzato più raramente a causa dei maggiori problemi di manutenzione.

I principali vantaggi della centrifugazione consistono nella possibilità di lavorare in continuo, all'interno di un sistema chiuso che minimizza i problemi legati agli odori, nel limitato ingombro e nella ridotta richiesta di manodopera per la conduzione. Tuttavia, le centrifughe sono soggette ad abrasione, sono spesso rumorose, hanno consumi energetici elevati e richiedono manodopera specializ-

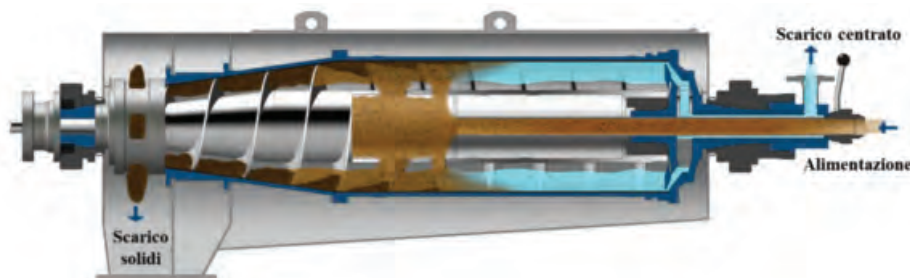


Figura 5 – Schema di una centrifuga (Flottweg, 2016)

zata per la manutenzione. Di conseguenza, alcune linee guida generali di progettazione per le centrifughe prevedono i seguenti punti:

- all'avvio deve essere prevista una linea di ritorno per il fango con basso contenuto di SS;
- può essere necessario rimuovere la sabbia e settacciare il flusso di fanghi di alimentazione;
- le parti soggette ad usura devono essere protette con materiali duri come il carburo di tungsteno;
- il basamento della macchina deve essere in grado di assorbire i carichi e le vibrazioni.

7.1.2. Parametri operativi

La *Tabella 4* riporta i range dei parametri operativi delle centrifughe per fanghi. Per poter confrontare la centrifuga con le macchine di disidratazione descritte nei capitoli successivi, si devono tenere in considerazione le dimensioni della centrifuga, la portata di fango in ingresso e la potenza installata. L'elevata velocità di rotazione del tamburo mette in evidenza i fattori più limitanti della tecnologia: consumi energetici importanti, se comparati a dispositivi come nastropresse o presse a vite, forti vibrazioni e rumore e maggiori costi per la manutenzione delle parti soggette ad usura.

Analizzando più nel dettaglio, dalla *Tabella 5* si può notare come al variare dei parametri operativi della centrifuga vengano modificate le efficienze di disidratazione, in termini di SS e indice di cattura dei solidi nel centrato.

Aumentando il diametro o la lunghezza del tamburo, incrementa il tempo di ritenzione del fango all'interno della macchina, migliorando quindi l'indice di cattura dei solidi. Tuttavia, le particelle più piccole rimosse dal centrato tendono ad accumularsi sul fango andando a bagnarlo e causando un minore contenuto di SS nel fango. L'aumento della velocità di rotazione del tamburo aumenta la forza centrifuga e permette un miglioramento sia del contenuto di SS nel fango sia dell'indice di cattura nel centrato. Tuttavia, un'eccessiva velocità di

Tabella 4 – Parametri operativi di una centrifuga (Andreoli et al., 2007; Metcalf & Eddy and AECOM, 2014; Sanin et al., 2011)

Parametro operativo	Valore
Diametro tamburo (mm)	230 – 1.800
Rapporto lunghezza/diametro del tamburo	2,5 : 1 – 4 : 1
Velocità di rotazione del tamburo (rpm)	1.200 – 6.000
Portata fango (m ³ /h)	0,2 – 280
Potenza installata (kW)	7 – 410

Tabella 5 – Influenza dei parametri operativi di una centrifuga sull'efficienza di disidratazione (Andreoli et al., 2007; Metcalf & Eddy and AECOM, 2014; Porteous, 1983; Sanin et al., 2011). ↓ indica una diminuzione e ↑ indica un incremento della concentrazione di SS nel fango o dell'indice di cattura dei solidi all'aumentare del valore del parametro

Incremento nel parametro	Concentrazione SS nel fango	Indice di cattura dei solidi
Diametro del tamburo	↑	↓
Lunghezza tamburo	?	↓
Velocità di rotazione del tamburo	↓	↓
Velocità differenziale coclea/tamburo	↓	↑
Altezza di anello liquido	↑	↓
Passo dell'elica	↓	↑
Tempo di residenza del fango	↑	↓
Angolo della sezione conica	↓	↑
Portata alimentazione	↑	↑
Concentrazione dell'alimentazione	↓	?
Condizionamento chimico	?	↓

rotazione potrebbe causare la rottura dei fiocchi, e quindi risultati peggiori, e implicherebbe inoltre maggiori costi di manutenzione.

Aumentando la velocità differenziale coclea/tamburo, i solidi vengono spinti fuori dalla centrifuga più velocemente, lasciando i solidi più pesanti ed umidi indietro nella macchina e risultando quindi in un fango con contenuto di SS maggiore. Questo comporta però un minore indice di cattura nel centrato. Tuttavia, una troppo elevata velocità differenziale aumenta la turbolenza all'interno della centrifuga, peggiorando l'efficienza di disidratazione (“Acqua aria: mensile di scienze e tecniche ambientali,” 1987). Un maggiore contenuto di SS nel fango lo si ottiene anche all'aumentare della dimensione del passo dell'elica e a maggiori angoli della sezione conica.

Una maggiore altezza dell'anello liquido comporta un aumento del tempo di ritenzione del fango e quindi dell'indice di cattura, causando però un minore contenuto di SS.

L'aumento della portata riduce il tempo di permanenza della sospensione nel tamburo, provocando un aumento della quantità di solidi nel filtrato e aumentando il livello del liquido.

Gli additivi chimici più comunemente usati per il condizionamento sono i polimeri che vengono ge-

neralmente immessi direttamente all'interno della centrifuga per evitare il taglio dei fiocchi. La massima efficacia si ottiene generalmente diluendo il flocculante a concentrazioni dello 0,1% o inferiori.

7.1.3. Prestazioni

In *Tabella 6* sono riportate le prestazioni di disidratazione delle centrifughe, in termini di contenuto di SS e indice di cattura dei solidi, su diverse tipologie di fanghi.

In generale, l'efficienza di disidratazione per fanghi primari risulta superiore rispetto ai fanghi misti o fanghi attivi. Il processo di stabilizzazione, ed in particolare la stabilizzazione aerobica, porta infatti ad un contenuto di SS minore rispetto al fango tal quale. A condizioni operative e dosaggi di polielettrolita ottimali, l'indice di cattura dei solidi è solitamente superiore al 95%. Va però tenuto in considerazione che gli intervalli di SS riportati in *Tabella 6* sono fortemente dipendenti dai modelli di centrifughe utilizzate, dai parametri operativi, dai tipi e dosaggi di polimero e dall'alta variabilità nelle caratteristiche dei fanghi. Pertanto, risulta molto spesso complesso avere una visione complessiva e definitiva delle prestazioni delle centrifughe e delle altre tecnologie di disidratazione.

trolita ottimali, l'indice di cattura dei solidi è solitamente superiore al 95%. Va però tenuto in considerazione che gli intervalli di SS riportati in *Tabella 6* sono fortemente dipendenti dai modelli di centrifughe utilizzate, dai parametri operativi, dai tipi e dosaggi di polimero e dall'alta variabilità nelle caratteristiche dei fanghi. Pertanto, risulta molto spesso complesso avere una visione complessiva e definitiva delle prestazioni delle centrifughe e delle altre tecnologie di disidratazione.

7.1.4. Innovazioni

Una possibile soluzione che possa permettere un ulteriore incremento del contenuto di SS nel fango consiste nell'utilizzo di una centrifuga collegata ad un essiccatore termico o ad un'altra sorgente di calore (*Figura 6*). Le particelle solide che vengono espulse ad alta velocità dalla centrifuga vengono circondate dal vapore caldo e sono pre-essiccate ad un contenuto di secco di circa il 65%. Ovviamente, questa tecnologia deve tenere in considerazione maggiori consumi energetici rispetto ai metodi di disidratazione convenzionali.

Tabella 6 – Tipici intervalli di SS finale e indice di cattura dei solidi ottenuti dalla disidratazione di diverse tipologie di fanghi con centrifughe

Tipo di fango	SS _{OUT} (%)		Indice di cattura solidi (%)
	[1]	[2]	
Non stabilizzato			
Primario	25 – 50	28 – 34	95+
Primario + Attivo	25 – 35	28 – 32	95+
Attivo	16 – 25	14 – 18	95+
Stabilizzato anaerobicamente			
Primario	25 – 40	35 – 40	95+
Primario + Attivo	22 – 35	26 – 30	95+
Stabilizzato aerobicamente			
Attivo	18 – 25	18 – 22	95+

[1] (Metcalf & Eddy and AECOM, 2014)

[2] (Andreoli et al., 2007)

7.2. Filtropressa

7.2.1. Descrizione e principi di funzionamento

Nelle filtropresse a piastre a volume fisso la disidratazione del fango avviene sotto pressione in una serie di piastre scanalate ricoperte di tessuto drenante, in cui l'acqua attraversa il tessuto mentre i solidi vengono trattenuti (*Figura 7*). In un ciclo di lavoro della filtropressa si susseguono le seguenti fasi: riempimento delle camere, compressione dei pannelli, apertura del filtro e scarico dei pannelli. Nella prima fase ha luogo il riempimento della camera che dura circa 20-30 minuti e, raggiunta la pres-

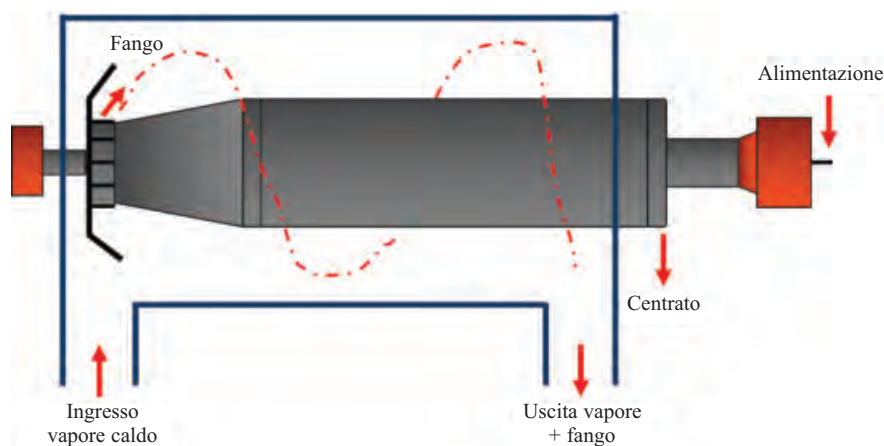


Figura 6 – Esempio di disidratazione ed essiccazione del fango con una centrifuga modificata

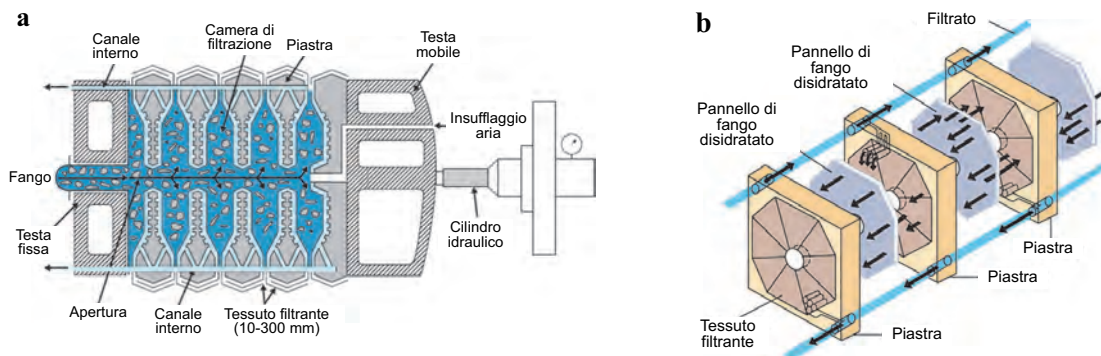


Figura 7 – (a) schema di una filtropressa (Degremont, 2019) e (b) descrizione della fase di scarico del pannello di fango (Beckart Environmental, 2019)

sione di esercizio, la filtrazione continua per 1-4 ore. La durata del tempo di filtrazione deve garantire un compromesso tra SS finali e produttività oraria della macchina. Dopo aver interrotto l'alimentazione e aver scaricato la pressione dal polmone, il filtro viene aperto e i pannelli scaricati in una tramoggia che normalmente alimenta un trasportatore a nastro. È evidente come uno dei limiti principali di questa tecnologia risulti nella discontinuità dell'operazione di disidratazione.

Prima della chiusura del filtro, periodicamente, si può procedere con il lavaggio delle tele utilizzando acqua in pressione fino a 100 bar. L'operazione di lavaggio è effettuata ogni 2-3 settimane nel caso di utilizzo di cloruro ferrico e calce (in questo caso il lavaggio deve essere acido) come condizionanti e ogni 2-4 mesi nel caso di policlorigli di alluminio o di polielettroliti.

A differenza della filtropressa a volume fisso, le filtropresse a membrana sono dotate di una membrana di gomma posta dietro il filtro (Figura 8). Durante la filtrazione, questo diaframma si espande per raggiungere la pressione di compressione fi-

nale, riducendo così il volume del pannello durante la fase di compressione. Generalmente, sono necessari da 10 a 20 minuti per riempire la pressa e 15-30 min a pressione fissa per disidratare il pannello di fango.

Quando per la disidratazione viene utilizzata una filtropressa, la ventilazione dell'edificio è essenziale per la riduzione degli odori e la protezione dai fumi. Infatti, il condizionamento con calce e cloruro ferrico porta alla produzione di quantità significative di ammoniaca che viene rilasciata all'aumentare del pH.

7.2.2. Parametri operativi

La Tabella 7 elenca gli intervalli tipici di alcuni parametri operativi delle filtropresse a volume fisso. Come detto precedentemente, i tempi di filtrazione e disidratazione sono molto lunghi, se paragonati ad una centrifuga. Per sostenere maggiori portate di fango, le filtropresse si estendono in lunghezza occupando una superficie significativa all'interno di un impianto di depurazione. Inoltre, la disidratazione procede con processo *batch* e la

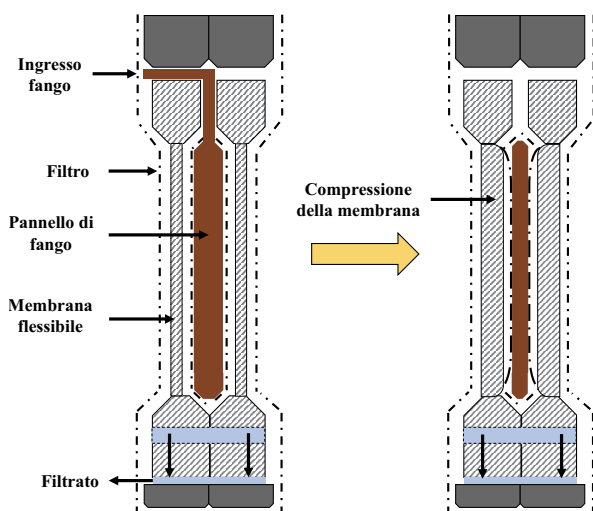


Figura 8 – Schema di una filtropressa a membrana

Tabella 7 – Parametri operativi di una filtropressa a volume fisso (Metcalf & Eddy and AECOM, 2014)

Parametro operativo	Valore
Pressione di esercizio (kPa)	500 – 2.100
Tempo di filtrazione (ore)	1 – 3
Tempo totale carico/scarico (ore)	2 – 5
Spessore pannello di fango (mm)	25 - 38
Dimensione piastre (mm)	400 x 400 / 2.000 x 2.000
Max numero piastre	5 – 180
Superficie filtrante (m ²)	1,5 – 2.000
Portata specifica di secco (kgSS m ² h ⁻¹)	1 – 5
Potenza installata (kW)	3 – 15

rimozione del pannello richiede spesso assistenza manuale da parte degli operatori.

Come anticipato, oltre a un valore finale di secco superiore rispetto alle filtropresse a volume fisso, il vantaggio delle filtropresse a membrana consiste nei minori tempi di filtrazione che variano dai 15 ai 30 min, con tempi totali di carico/scarico del fango fino a circa 45 min.

L'Eq. 6 mostra come calcolare la portata di filtrato ($Q_{filtrato}$, m/s) rimossa con una filtropressa:

$$Q_{filtrato} = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu \times (R_{fangho} + R_{filtro})}$$

(Eq. 6)

Dove A è l'area di filtrazione (m^2), dV/dt (m^3/s) è la velocità di filtrazione, ΔP (N/m^2) è la differenza di pressione tra le due parti del filtro, μ ($N \cdot s/m^2$) è la viscosità del filtrato e R_{fangho} e R_{filtro} sono rispettivamente la resistenza del pannello di fango filtro e del filtro (m^{-1}).

7.2.3. Prestazioni

Il vantaggio principale delle filtropresse consiste nella capacità di disidratare tutti i tipi di fanghi raggiungendo concentrazioni elevate, che arrivano fino al 45-50% di SS (Tabella 8). Le filtropresse sono anche in grado di ottenere elevate efficienze nella cattura di solidi e di conseguenza produrre un filtrato relativamente pulito.

Tra tutte le tecnologie di disidratazione meccanica, le filtropresse sono quelle che consentono di ottenere il maggior contenuto di SS nei fanghi.

Tabella 8 – Tipici intervalli di SS finale e tempi di filtrazione ottenuti dalla disidratazione di diverse tipologie di fanghi con filtropresse

Tipo di fango	SS _{OUT} (%)	Tempo di filtrazione (h)
FILTROPRESSA A VOLUME FISSO		
Non stabilizzato		
Primario	45	1,5 – 2,0
Primario + Attivo	27 – 41	2,5 – 3,5
Stabilizzato anaerobicamente		
Primario	23 – 37	1,0 – 3,0
Primario + Attivo	37 – 42	2,0 – 3,0
Stabilizzato aerobicamente		
Attivo	22 – 30	-
FILTROPRESSA A MEMBRANA		
Non stabilizzato		
Primario + Attivo	35 – 50	0,75 - 1,0

7.2.4. Innovazioni

Le filtropresse disponibili sul mercato includono diversi accorgimenti atti a migliorare l'efficienza di disidratazione e la facilità di trattamento, diminuendo anche il costo della manodopera. Alcune modifiche riguardano l'alimentazione del fango che può essere eseguita dall'alto o al centro della macchina, lo scarico del pannello di fango che può essere assistito dall'insufflazione di aria, il lavaggio automatico dei mezzi filtranti, il rilascio sequenziale o simultaneo del pannello di fango e infine l'utilizzo di una fase finale di compressione per mezzo di una membrana (filtropressa a membrana, descritta sopra).

Tra le innovazioni più recenti di questa tecnologia, è da menzionare la filtropressa verticale (Figura 9a) che utilizza un nastro continuo e diverse camere so-

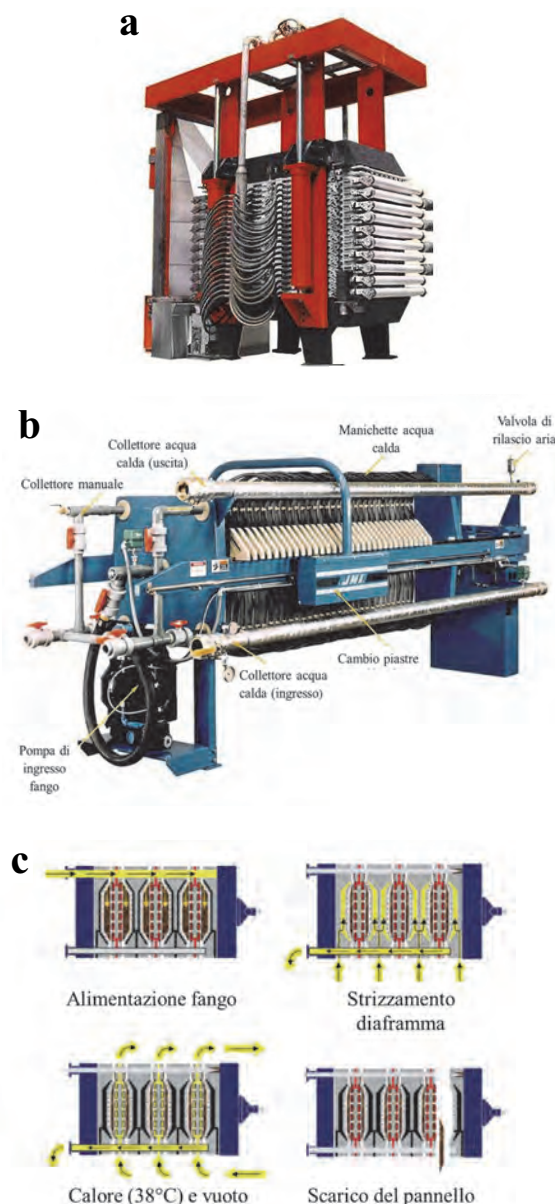


Figura 9 – (a) Filtropressa verticale (Toncin, 2019), (b) filtropressa J-Vap e (c) suo schema di funzionamento (Siemens, 2019)

vrapposte per ottenere una filtrazione uniforme ed efficiente. Non appena tutte le camere del sistema si chiudono simultaneamente, il fango viene pompato all'interno e distribuito uniformemente in tutte le camere sulla superficie dei teli filtranti orizzontali. Immediatamente inizia la rimozione del filtrato e la formazione del pannello di fango disidratato. Successivamente, viene pompata acqua ad alta pressione dietro i diaframmi, comprimendo il pannello in tutte le camere e creando un flusso di filtrazione ancora maggiore, disidratando ulteriormente il fango.

Un ulteriore esempio di innovazioni della tecnologia è il sistema di disidratazione J-Vap® (Figura 9b-9c) che combina una filtropressa a membrana e una tecnologia di evaporazione sottovuoto. Questo sistema consente di raggiungere un contenuto di SS fino al 99% in un solo passaggio. Il sistema è completamente chiuso per ridurre gli odori e consente un minor consumo di energia rispetto ai sistemi di essiccamento termico.

I vantaggi di questa tecnologia sono i seguenti:

- processo *single-step*;
- facilità di operazione e manutenzione;
- minimo intervento degli operatori;
- basse emissioni;
- riduzione del contenuto di patogeni;
- minor consumo energetico della disidratazione termica.

7.3. Nastropressa

7.3.1. Descrizione e principi di funzionamento

Le nastropresse sono essenzialmente costituite da due nastri continui che permettono la compressione e la filtrazione del fango. Generalmente, una nastropressa è dotata di tre zone di disidratazione distinte: una zona di drenaggio per gravità, una zona di pressione e una zona di taglio ad alta pressione (Figura 10). La pressione viene esercitata dai rulli e dai nastri trasportatori. Durante la fase di dre-

naggio iniziale si utilizzano solitamente polimeri ad alta densità di carica che possano agire e far flocculare il fango rapidamente. Nella zona di taglio, il pannello di fango viene ulteriormente disidratato facendo passare i nastri attorno e tra i rulli disassati verticalmente, che causano una configurazione a serpentina nel movimento del pannello: l'azione di taglio risulta dalla differente velocità lineare delle due tele che si avvolgono su rulli con raggi differenti e su un tamburo che ruota a una determinata velocità angolare.

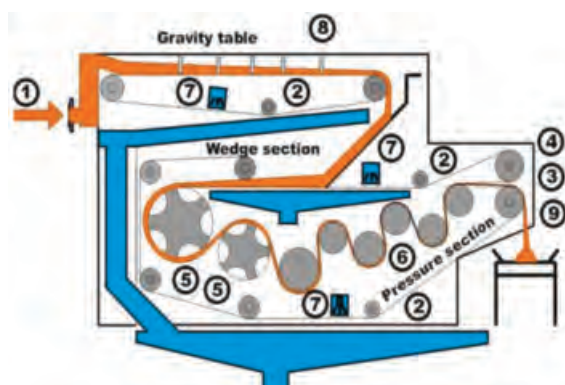
7.3.2. Parametri operativi

In Tabella 9 sono elencati i parametri operativi delle nastropresse. È evidente come la potenza installata risulti nettamente inferiore rispetto a quella delle centrifughe.

A causa della loro configurazione aperta, le nastropresse possono causare emissione di aerosol e cattivi odori. Inoltre, la presenza di un elevato numero di cuscinetti richiede assistenza e sostituzioni regolari. Tuttavia, le nastropresse hanno bassi costi iniziali e ridotto consumo di energia elettrica. Un limite di questa tecnologia consiste nei considerevoli consumi di acqua di lavaggio.

Tabella 9 – Parametri operativi di una nastropressa (Andreoli et al., 2007)

Parametro operativo	Valore
Larghezza tela (m)	0,5 – 3,5
Area installazione (m ²)	3,3 – 36
Velocità della tela (m/h)	50 – 100
Flusso specifico di fango (L/(min·m))	110 – 640
Flusso specifico di fango (kg _{SS} /(h·m))	180 – 1.600
Pressione acqua di lavaggio (kPa)	400 – 600
Consumo di acqua (m ³ /h)	4 – 30
Portata di fango (m ³ /h)	0,5 – 80
Potenza installata (kW)	0,4 – 6,5



- 1) fango di alimentazione,
- 2) rullo di ritorno
- 3) rullo di trazione
- 4) rullo di scarico
- 5) rulli perforati a bassa pressione
- 6) rulli a elevata pressione
- 7) lavaggio delle tele
- 8) aratri di distribuzione del fango
- 9) scarico del fango

Figura 10 – Schema di una nastropressa (Wastewater 101, 2019)

Tabella 10 – Tipici intervalli di portate di fango, SS finale e indice di cattura dei solidi ottenuti dalla disidratazione di diverse tipologie di fanghi con nastropresse (Andreoli et al., 2007; Metcalf & Eddy and AECOM, 2014)

Tipo di fango	Portata di fango (kg/h·m)	SS _{OUT} (%)	Indice di cattura solidi (%)
Non stabilizzato			
Primario	1130 – 1590	26 – 35	95
Primario + Attivo	340 – 820	15 – 25	95
Attivo	180 – 340	12 – 20	90 – 95
Stabilizzato anaerobicamente			
Primario	680 – 910	24 – 35	-
Attivo	230 – 410	13 – 23	-
Primario + Attivo	320 – 540	15 – 28	95
Stabilizzato aerobicamente			
Attivo	250 – 410	12 – 22	92 – 95

7.3.3. Prestazioni

La Tabella 10 riporta le prestazioni delle nastropresse in termini di portata di fango in ingresso, contenuto di SS e indice di cattura dei solidi in diverse tipologie di fango.

In generale, i valori di SS finali risultano inferiori rispetto a quanto ottenuto con centrifughe e, soprattutto, filtropresse. Tuttavia, le minori efficienze di disidratazione sono bilanciate dai minori consumi energetici.

7.3.4. Innovazioni

Tra le innovazioni della tecnologia, troviamo il modello 2VP (Figura 11). Esso utilizza un gradiente di pressione che, iniziando da bassi valori e aumentando gradualmente, evita picchi di pressione e riduce la tendenza all'estrusione del pannello di fango. Inoltre, la struttura di questo modello con-

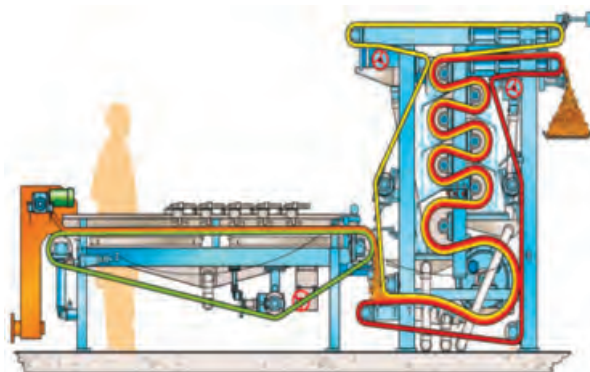


Figura 11 – Modello di nastropressa 2VP (BDP Industries, 2015)

sente di non bagnare il pannello di fango a causa della caduta del filtrato da aree e rulli adiacenti. A differenza delle altre nastropresse, che spesso necessitano di essere sollevate a causa del punto di scarico del fango posto in basso, il modello 2VP ha la zona dello scarico ad altezza elevata e non richiede costose piattaforme o scale che ostacolano l'accesso dell'operatore. Questo permette di ridurre i costi di installazione e semplifica il layout della struttura.

7.4. Filtropressa idraulica a maniche

7.4.1. Descrizione e principi di funzionamento

La filtropressa a maniche (Figura 12) permette la compressione del fango all'interno di una camera in cui sono presenti alcune maniche in tessuto che catturano e filtrano la parte liquida del fango.

In Figura 13 sono mostrate le fasi della disidratazione. Inizialmente si ha il riempimento della camera con il fango (circa 60-70 min), seguito da molteplici fasi di compressione e decompressione (circa 60-70 min) in cui le maniche in tessuto filtrano la fase liquida e la rimuovono dal fango stesso. Al termine del processo, la macchina viene aperta e il fango scaricato (5 min).

7.4.2. Parametri operativi

In Tabella 11 sono mostrati i parametri operativi di una filtropressa a maniche. A differenza delle convenzionali tecnologie di filtrazione eseguite con nastropresse, filtropresse a volume fisso e filtropresse a membrana, la potenza installata e i consumi energetici sono superiori.

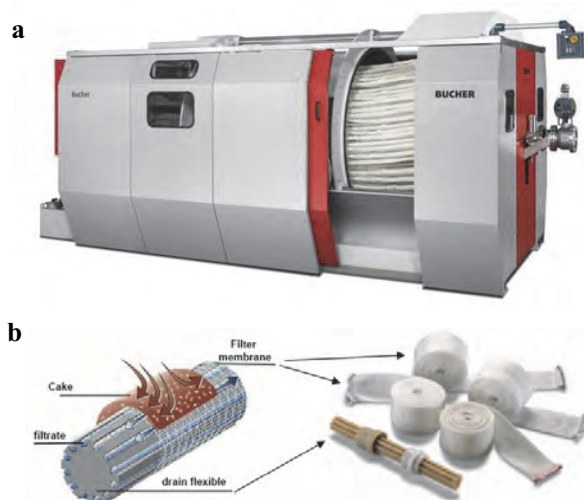


Figura 12 – (a) Filtropressa a maniche e (b) dettaglio delle maniche utilizzate per la disidratazione (Bucher Unipektin, 2019)

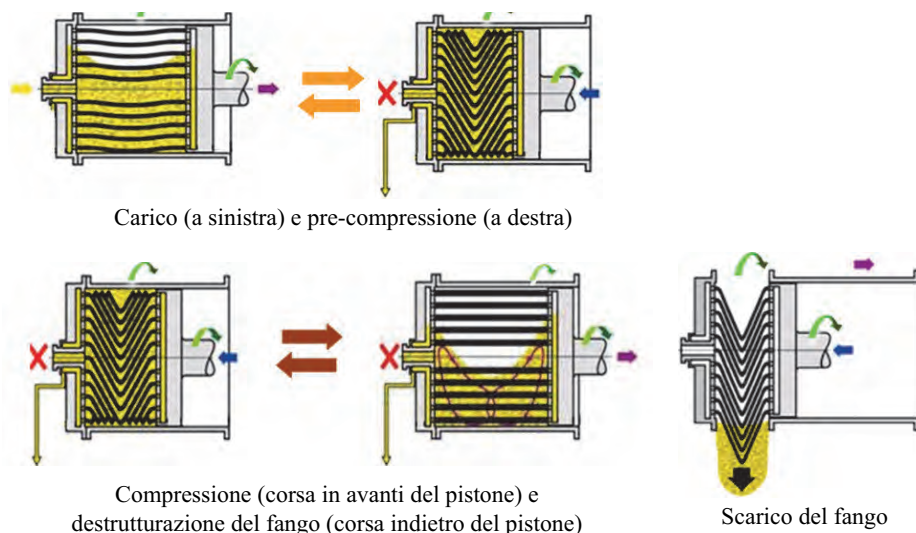


Figura 13 – Fasi della disidratazione del fango con filtropressa a maniche (Bucher Unipektin, 2019)

Tabella 11 – Parametri operativi di una filtropressa a maniche (Bucher Unipektin, 2019)

Parametro operativo	Valore
Portata fango (kgSS/h)	100 – 800
Area filtrante (m ²)	82
Tempo di processo (min)	70 – 120
Portata di fango (m ³ /ciclo)	80
Potenza (kW)	17 – 48

7.4.3. Prestazioni

Il contenuto di SS nei fanghi disidratati con filtropressa a maniche può arrivare fino al 50%.

7.5. Pressa a vite

7.5.1. Descrizione e principi di funzionamento

La pressa a vite (Figura 14) permette la disidratazione del fango all'interno di un'unità cilindrica chiusa, per mezzo della rotazione di una co-

clea a bassa velocità. Il fango, preventivamente condizionato con polielettrolita altamente cationico, viene alimentato all'interno di un vaglio forato (wedge wire) ad una pressione relativamente bassa e portato in avanti per mezzo di una coclea rotante. Il filtrato passa attraverso il fondo e i lati del vaglio mentre il fango viene portato in avanti verso il cono in pressione, continuando la disidratazione. È richiesta acqua di lavaggio a intermittenza per pulire il vaglio forato e sciacquare i solidi dall'unità durante il normale ciclo operativo. Solitamente, le presse a vite sono disponibili sia in configurazione orizzontale sia inclinata.

7.5.2. Parametri operativi

In Tabella 12 sono riportati i parametri operativi delle presse a vite. Da notare come la potenza installata, date le basse velocità di rotazione della coclea, sia considerevolmente bassa rispetto ad altri sistemi di disidratazione.

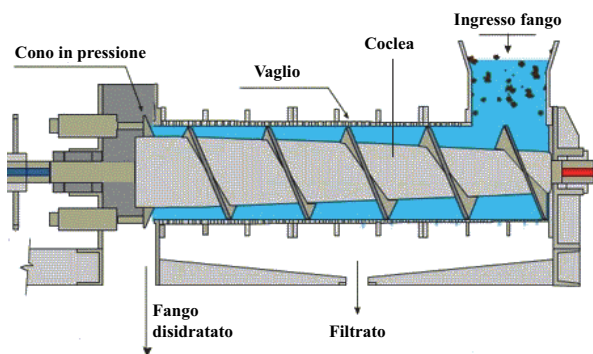


Figura 14 – Schema di una pressa a vite (TIM Shredding & Dewatering, 2019)

Tabella 12 – Parametri operativi di una pressa a vite (Metcalf & Eddy and AECOM, 2014)

Parametro operativo	Valore
Pressione di esercizio (kPa)	280 – 550
Acqua di lavaggio (L/min)	7 – 45
Ciclo di lavaggio (s/min)	15 s / 10 min
Numero di giri (rpm)	0,3 – 1,5
Portata fango (kg _{SS} /h)	10 – 756
Portata fango (m ³ /h)	0,1 – 52
Potenza installata (kW)	0,25 – 9

Si deve però considerare che alcune tipologie di fanghi, avendo una consistenza gelatinosa, sono meno adatti alla disidratazione con presse a vite: quando viene applicata la pressione, può succedere che il fango esca dai filtri senza rilasciare la parte acquosa impedendone il compattamento. Per questo motivo, il consumo di acqua di lavaggio dei filtri risulta molto spesso elevato.

7.5.3. Prestazioni

La *Tabella 13* riporta le prestazioni delle presse a vite in termini di contenuto di SS e indice di cattura dei solidi in diverse tipologie di fango.

Come già visto nel *Capitolo 3*, il dosaggio di polimero risulta considerevolmente alto se confrontato con le nastropresse e le centrifughe. Tuttavia, il contenuto di SS finale risulta generalmente inferiore rispetto a quanto ottenuto con le altre tecniche di disidratazione, mentre l'indice di cattura dei solidi raramente supera il 95%.

Tabella 13 – Tipici intervalli di SS finale e indice di cattura dei solidi ottenuti dalla disidratazione di diverse tipologie di fanghi con presse a vite (Metcalf & Eddy and AE-COM, 2014)

Tipo di fango	SS _{OUT} (%)	Indice di cattura solidi (%)
Non stabilizzato		
Primario	30 – 40	90+
Primario + Attivo	25 – 35	90+
Attivo	15 – 22	88 – 95
Stabilizzato anaerobicamente		
Primario	22 – 28	90+
Attivo	17 – 25	90+
Primario + Attivo	15 – 25	88 – 95
Stabilizzato aerobicamente		
Attivo	15 – 20	88 – 95

7.5.4. Innovazioni

A differenza dei convenzionali tamburi forati o con conformazione *wedge wire*, la tecnologia *Volute™* (*Figura 15*) utilizza degli elementi filtranti dotati di molteplici anelli metallici. Infatti, il tamburo di queste presse a vite è composto da anelli fissi e da anelli mobili che sono spinti e deformati dalla coclea in movimento. Le aperture tra gli anelli e il passo dell'elica sono disegnate in modo da restringersi nella direzione dell'uscita del fango. Questa configurazione permette di ridurre l'ostruzione del tamburo da parte del fango e quindi limita l'utilizzo di acqua di lavaggio.

7.6. Pressa rotativa

7.6.1. Descrizione e principi di funzionamento

La pressa rotativa (*Figura 16*) è un'unità modulare chiusa a velocità ridotta. Il fango viene alimentato nell'unità, dopo condizionamento con polielettroliti cationici, ad una pressione relativamente bassa nello spazio tra i due filtri metallici paralleli. Il fango flocculato avanza all'interno del canale che si forma tra i due filtri in acciaio inossidabile, e, mentre viene disidratato, il filtrato passa attraverso i lati dei filtri, mentre i solidi vengono trattenuti. La forza di attrito sui filtri causata dalla lenta rotazione e la restrizione nell'uscita creano una contropressione che spinge ulteriore filtrato al di fuori del filtro stesso che permette la formazione di un'estrusione di fango disidratato relativamente asciutta. Per pulire i filtri e sciacquare i solidi dall'unità, è richiesta acqua di lavaggio circa 5 minuti al giorno a fine esercizio. Poiché la pressa rotativa è totalmente racchiusa, essa fornisce maggiore sicurezza, contenimento degli odori e livelli di rumore relativamente bassi rispetto ad altri sistemi di disidratazione.

7.6.2. Parametri operativi

In *Tabella 14* sono riportati i parametri operativi delle presse rotative. Il numero di unità collegate

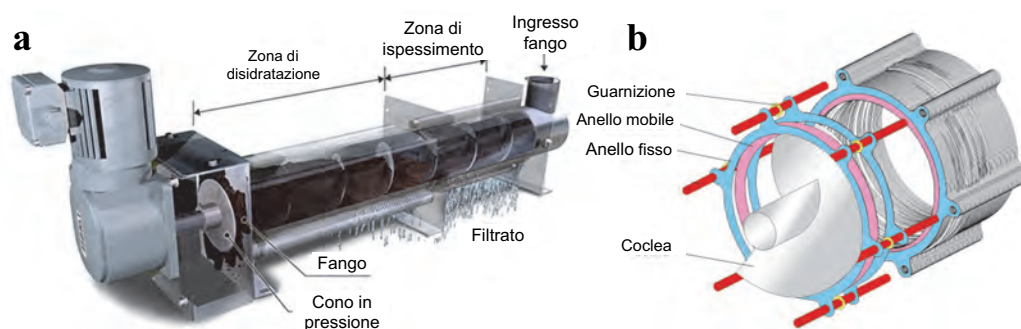


Figura 15 – (a) Modello di pressa a vite Volute™ (AMCON, 2019) e (b) particolare del tamburo (Boeep, 2019)

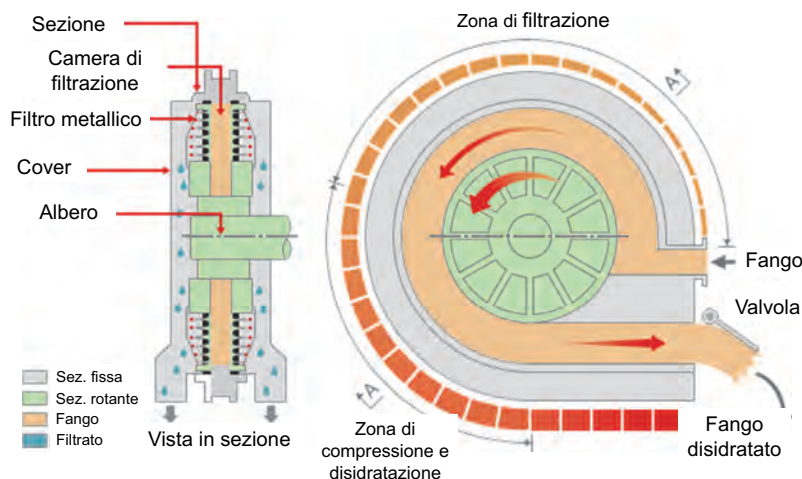


Figura 16 – Schema di una pressa rotativa (Metawater, 2019)

Tabella 14 – Parametri operativi di una pressa rotativa (Metcalf & Eddy and AECOM, 2014)

Parametro operativo	Valore
Numero di canali	1 – 8
Diametro (mm)	460 – 1220
Acqua di lavaggio (L/min)	190 – 1.520
Ciclo di lavaggio (min/giorno)	5
Pressione in ingresso (kPa)	10 – 100
Numero di giri (rpm)	0,2 – 2
Portata massima fango al 3% (kg/h·m ²)	244 – 254
Potenza installata (kW)	1,1 – 56

determina sia le portate di fango trattate sia i consumi energetici.

7.6.3. Prestazioni

La Tabella 15 riporta le prestazioni delle presse rotative in termini di contenuto di SS e indice di cattura dei solidi in diverse tipologie di fango.

Come per la pressa a vite, l'efficienza di disidratazione risulta inferiore rispetto a quanto ottenuto con centrifughe e filtropresse.

7.7. Disidratazione elettro-assistita

7.7.1. Descrizione e principi di funzionamento

Come descritto precedentemente, a causa delle elevate forze di legame e la natura colloidale dei fanghi, l'acqua legata non può essere rimossa efficacemente con mezzi meccanici. Come trattamento alternativo alla convenzionale disidratazione meccanica, la disidratazione elettro-assistita (*Electro-Dewatering*, EDW) permette di liberare l'acqua intrappolata nelle cellule rendendola maggiormente separabile ed è in grado di incrementare il contenuto di SS fino al

Tabella 15 – Tipici intervalli di SS finale e indice di cattura dei solidi ottenuti dalla disidratazione di diverse tipologie di fanghi con presse rotative (Metcalf & Eddy and AECOM, 2014)

Tipo di fango	SS _{OUT} (%)	Indice di cattura solidi (%)
Non stabilizzato		
Primario	28 – 45	95+
Primario + Attivo	20 – 32	92 – 98
Attivo	13 – 18	90 – 95
Stabilizzato anaerobicamente		
Primario	22 – 32	90 – 95
Attivo	18 – 25	90 – 95
Primario + Attivo	12 – 17	85 – 90
Stabilizzato aerobicamente		
Attivo	28 – 45	90 – 95

40-45% (Feng et al., 2014; Mahmoud et al., 2010; Tuan et al., 2008; Weng et al., 2013).

Questa tecnologia consiste nell'applicazione di un campo elettrico ai fanghi che vengono posti tra due elettrodi. Durante il processo, il fango, caricato negativamente, si muove verso l'elettrodo positivo (anodo) mentre le molecole d'acqua si muovono verso l'elettrodo negativo (catodo), dove vengono poi rimosse attraverso il tessuto filtrante che copre l'elettrodo. In generale, diversamente dai processi di filtrazione comuni (filtropresse e nastropresse) il filtro non si ostruisce, poiché le particelle solide vengono respinte dal catodo. Solitamente, il fango viene sottoposto a compressione per consentire alla corrente applicata di muoversi in modo più uniforme dall'anodo al catodo e aumentare le effi-

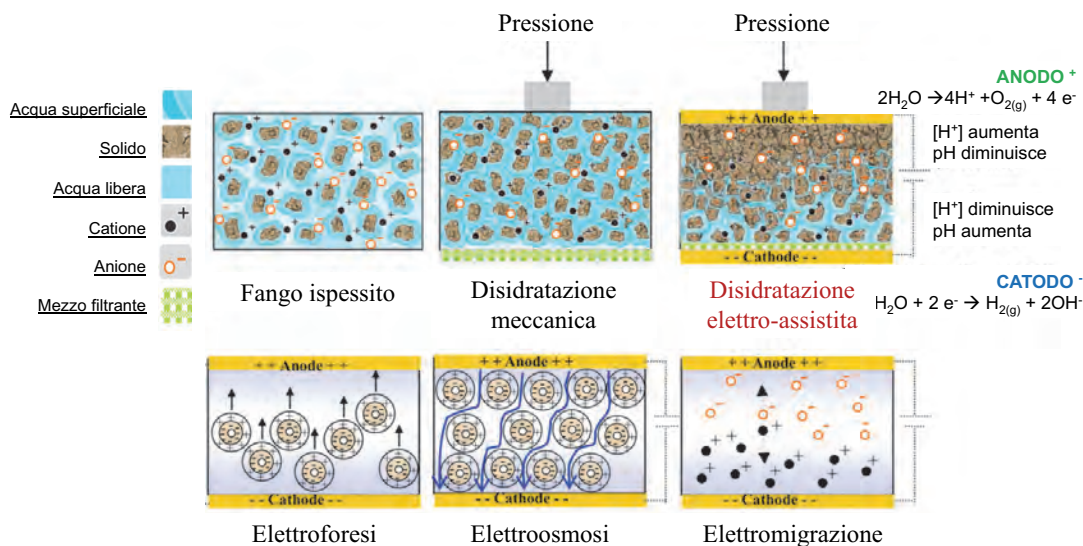


Figura 17 – Schema del processo di disidratazione elettro-assistita (Mahmoud et al., 2010)

cienze di disidratazione. La Figura 17 mostra lo schema del processo.

Negli ultimi anni, il processo EDW ha riscosso notevole interesse e sono stati sviluppati diversi dispositivi, come ad esempio i sistemi Cinetik® (Ovivo, USA), Dehydris™ Osmo (Suez, Francia) ed Elode® (Siemens Water Technologies & ACE Korea Corporation, Corea del Sud).

7.7.2. Cinetik® e Dehydris Osmo

I sistemi Cinetik® e Dehydris™ Osmo (Figura 18) permettono la disidratazione di fanghi civili ed industriali attraverso fasi di compressione e applicazione di un campo elettrico su fanghi pre-ispessiti e/o disidratati con concentrazioni di SS superiori al 10-20%. I fanghi vengono alimentati in una tramoggia e, all'inizio di ogni ciclo di trattamento, vengono attivati il nastro trasportatore e il modulo di alimentazione che formano uno strato sottile ed uniforme di fango. Una volta che il pannello di fango viene spostato nell'area di trattamento, dei pistoncini, che fungono da anodi, applicano una pres-

sione predeterminata e permettono alla corrente continua di fluire attraverso il pannello verso il nastro filtrante, che funge da catodo.

La corrente continua viene applicata a valori predefiniti per un periodo di tempo controllato fino a quando non viene raggiunto il livello di disidratazione desiderato. Successivamente, i blocchi anodici vengono risolti e il pannello di fango viene scaricato. Durante il suo spostamento, il nastro filtrante viene pulito utilizzando un sistema di lavaggio ad alta pressione con acqua di processo filtrata o acqua potabile. I controlli della macchina garantiscono la gestione di parametri operativi quali pressione, tensione, corrente, tempo di trattamento, velocità del nastro e cicli di lavaggio automatici. Tra i vantaggi di questa tecnologia troviamo:

- semplicità di funzionamento;
- processo completamente automatizzato;
- SS fino al 50%;
- consumi energetici inferiori ai trattamenti termici;
- riduzioni significative degli odori;
- abbattimento del contenuto dei patogeni.

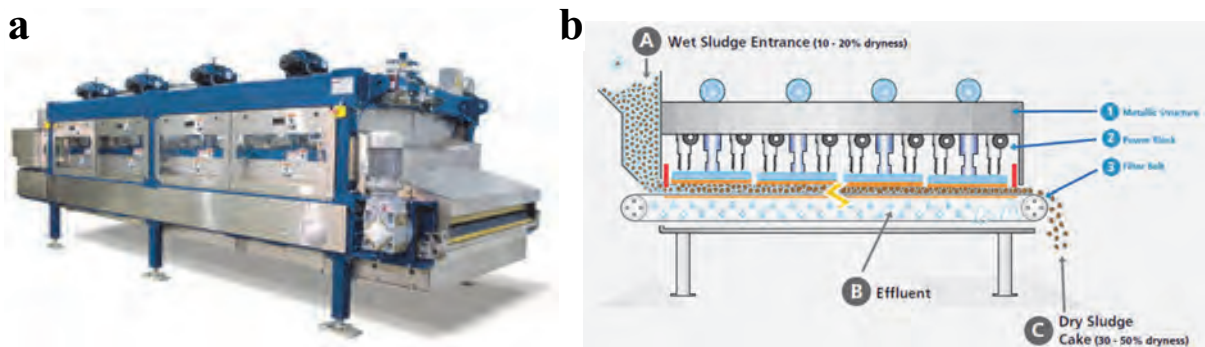


Figura 18 – Sistemi di disidratazione elettro-assistita (a) Cinetik® (Ovivo, 2019) and (b) Dehydris Osmo™ (Suez, 2019a)

Tabella 16 – Tipici intervalli di SS in ingresso e uscita e consumi energetici ottenuti dalla disidratazione elettro-assistita di diverse tipologie di fanghi con tecnologia Cinetik® (Metcalf & Eddy and AECOM, 2014)

Tipo di fango	SS _{IN} (%)	SS _{OUT} (%)	Consumo di energia specifico (kWh/ton)	Consumo di energia specifico (kWh/kg _{H2O})
Non stabilizzato				
Primario	22 – 24	29 – 49	110 – 260	0,12 – 0,29
Attivo	13 – 17	28 – 43	150 – 270	0,17 – 0,30
Attivo	25	33 – 38	210 – 310	0,23 – 0,34
Attivo	16 – 20	32 – 43	230 – 310	0,25 – 0,34
Stabilizzato aerobicamente				
Attivo	16 – 20	32 – 43	230 – 310	0,25 – 0,34

Le macchine Cinetik®, a seconda della taglia scelta, necessitano di un'area di installazione di 11,6-27,9 m² e permettono di trattare da 270 a 2.360 kg/h di fanghi. La Tabella 16 mostra i tipici intervalli di SS in ingresso e uscita su diversi tipi di fango. Ovviamente, i consumi energetici risultano superiori rispetto a quelli della convenzionale disidratazione meccanica.

7.7.3. Elode®

La Figura 19 mostra i modelli Elode® SELO e BELO. SELO consiste in una nastropressa compatta che utilizza il processo elettro-osmotico per disidratare ulteriormente fanghi già disidratati meccanicamente, in modo da ottenere un contenuto di SS maggiore. BELO combina un primo stadio di disidratazione meccanica con nastropressa e un secondo stadio con processo elettro-osmotico. La Tabella 17 mostra i parametri operativi dei modelli SELO e BELO di Elode®. Con questa tecnologia, si possono ottenere contenuti di SS finali fino al 40-45%.

7.7.4. X E-RAD (Figura 20)

A differenza dalle macchine descritte precedentemente, che applicano il principio elettro-osmo-

Tabella 17 – Parametri operativi dei modelli SELO e BELO di Elode® (Ace Korea Incorporation Co. LTD, 2019)

Parametro operativo	Valore	
	SELO (SS = 10-32%)	BELO (SS = 1-5%)
Larghezza nastro (mm)	1.000 – 3.000	1.000 – 3.000
Acqua di lavaggio (m ³ /h)	0,9 – 1,9	11,2 – 33
Spessore iniziale fango (mm)	<8	<9
Velocità nastro	0,5 – 2,4	0,5 – 2,4
Portata fango (m ³ /h)	0,2 – 2,3	1,6 – 23,3
Potenza installata (kW)	40 – 206	80 – 220

tico su nastropresse o simili, il modello X E-RAD (X2 Solutions Srl, Italia) sfrutta la tecnologia delle presse a vite. In questo modello (brevetto No. WO/2019/082150 – Device for sludge treatment) vengono applicati degli elementi anodici sulla colea mentre il tamburo esterno si comporta da catodo. Uno dei vantaggi di questa macchina è rappresentato dalla possibilità di avere una continua miscelazione del fango sottoposto a campo elettrico, evitando la formazione di una crosta secca, ad alta resistività elettrica, vicino all'anodo. In questo modo, il passaggio della corrente e il pro-



Figura 19 – Modelli Elode® per la disidratazione elettro-assistita: (a) SELO e (b) BELO (Ace Korea Incorporation Co. LTD, 2019)



Figura 20 – Modello X E-RAD di X2 Solutions Srl

cesso elettro-osmotico vengono favoriti e, al contempo, vengono ridotte le emissioni di fumi prodotti dall'incremento della temperatura per effetto Joule.

7.8. Disidratazione a bassa intensità tecnologica

7.8.1. Letti di essiccamento

I letti di essiccamento a sabbia (Figura 21) vengono generalmente utilizzati per disidratare i fanghi digeriti e sedimentati da impianti che utilizzano il processo di trattamento a fanghi attivi senza pre-spessimento. Sono quindi utilizzati per comunità di piccole e medie dimensioni (<20.000 AE).

In un tipico letto di essiccamento, il fango viene posto su strati di sabbia e ghiaia di varia granulometria e lasciato essiccare per gravità e per evaporazione dalla superficie esposta all'aria. I letti di essiccamento sono dotati di linee di drenaggio laterali, mediante tubi di plastica perforati o di argilla, sono inclinati di almeno 1% e distanziati tra di loro di 2,5-6 m. L'area di essiccamento è tipicamente suddivisa in letti singoli di 7,5 m di larghezza e 30-60 m di lunghezza (Metcalf & Eddy and AECOM, 2014). Le partizioni sono in genere costruite con terrapieni di terra, assi di legno, tavole di cemento o blocchi di cemento armato. Lo strato di sabbia ha una profondità compresa tra 200

e 460 mm e una dimensione delle particelle di circa 0,3-0,75 mm: gli strati di sabbia più profondi generalmente ritardano il processo di drenaggio.

I fanghi vengono generalmente alimentati tramite un canale aperto o tubazioni chiuse. Inoltre, di fronte agli sbocchi del fango sono posizionate delle piastre paraspruzzi per spargere il materiale sul letto e prevenire l'erosione della sabbia. La velocità di caricamento del fango varia da 50 a 125 kg/(m²·anno) per letti di essiccamento aperti e da 60 a 200 kg/(m²·anno) per letti chiusi (Metcalf & Eddy and AECOM, 2014; Sanin et al., 2011). Quando il contenuto di SS nel fango raggiunge valori all'incirca del 30% (Andreoli et al., 2007), la rimozione del fango viene effettuata spalando manualmente in carriole o camion. Da sottolineare, inoltre, che per letti di essiccamento chiusi si possono raggiungere valori di SS fino al 75% (Sanin et al., 2011).

A causa dell'odore sgradevole, i letti di essiccamento dovrebbero essere posizionati a sufficiente distanza dagli insediamenti ed abitazioni circostanti in funzione del loro tipo e situazione locale.

7.8.2. Lagunaggio

Il lagunaggio (Figura 22) può essere utilizzato come sostituto dei letti di essiccamento per la disidratazione dei fanghi digeriti. Le lagune non sono adatte per disidratare fanghi non trattati o fanghi



Figura 22 – Esempio di lagunaggio (FA. IMP. Impianti Trattamento Acque, 2014)

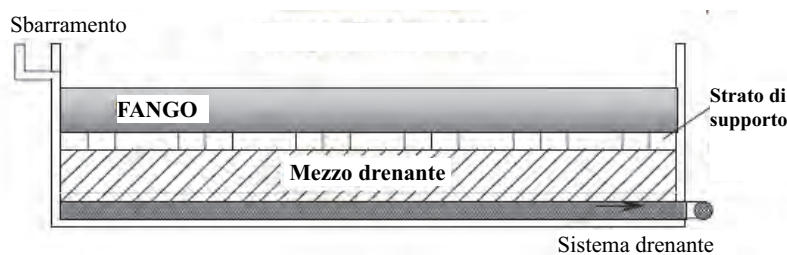


Figura 21 – Schema e foto di un tipico letto di essiccamento a sabbia (Andreoli et al., 2007)

calcinati a causa del loro odore sgradevole. Le efficienze di disidratazione sono influenzate dal clima, in quanto precipitazioni e basse temperature rallentano l'evaporazione. Inoltre, la disidratazione con drenaggio sotterraneo e percolazione è limitata da normative ambientali sempre più severe (Metcalf & Eddy and AECOM, 2014).

Le profondità dei fanghi variano solitamente da 0,75 a 1,25 m o superiori. Generalmente si ottengono fanghi con un contenuto di SS compreso tra il 25% e il 30%. Il tempo del ciclo per le lagune varia da diversi mesi a diversi anni e i tassi di caricamento dei fanghi variano da 35 a 39 kg/(m³·anno) (Metcalf & Eddy and AECOM, 2014; Sanin et al., 2011).

7.8.3. Fitodisidratazione

La fitodisidratazione dei fanghi è una particolare tecnologia per la gestione dei fanghi di supero provenienti da grossi impianti a fanghi attivi che può sostituire l'intera linea fanghi di un impianto di depurazione, garantendo notevoli vantaggi economici e permettendo il riuso in agricoltura dei fanghi prodotti. I letti di fitodisidratazione con macrofite (Figura 23) permettono la disidratazione dei fanghi grazie a meccanismi di decomposizione che risultano dall'interazione fra le piante, i microrganismi, il sistema filtrante e lo strato di fango depositato. I principali meccanismi che si instaurano sono i seguenti:

- disidratazione, evapotraspirazione;
- percolazione;
- stabilizzazione;
- ri-ossigenazione;
- processi di riduzione aerobici.

La fase di ispessimento avviene mediante filtrazione delle particelle solide sulla superficie del bacino, costituita da uno strato crescente di fanghi residui, mentre la maggior parte dell'acqua filtra attraverso lo strato di fango e gli strati inferiori di ghiaie fini e grossolane. Il contenuto in acqua re-

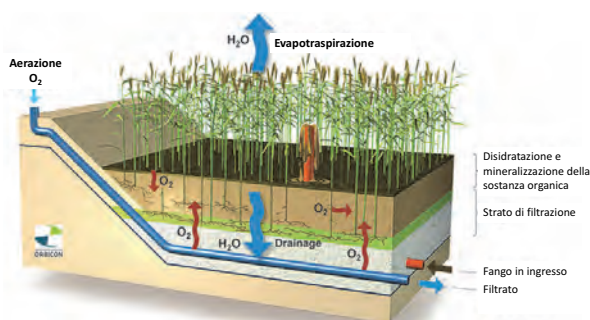


Figura 23 – Schema di un letto di fitodisidratazione (Orbicon, 2019)

siduo che rimane nello strato superficiale viene ulteriormente ridotto mediante evapotraspirazione (IRIDRA srl, 2019), raggiungendo contenuti di SS nel fango fino al 40%.

La velocità di caricamento del fango varia da 30 a 60 kgSS/(m²·anno) (Metcalf & Eddy and AECOM, 2014).

Tuttavia, questa tecnologia di disidratazione presenta alcuni limiti di applicazione legati a:

- area disponibile: richiede ampi spazi su aree pianeggianti, sufficientemente lontani dalle abitazioni ma vicini all'impianto di depurazione;
- costo elevato dei terreni nelle aree residuali;
- tipologia di fango: se le concentrazioni di metalli fossero troppo elevate, si porrebbero problematiche legate allo smaltimento delle macrofite alla fine del ciclo di utilizzo dell'area;
- clima: in zone sottoposte ad eccessivo dilavamento da piogge potrebbe causare inquinamento della falda acquifera superficiale e dei corsi d'acqua;
- caratteristiche idrogeologiche: se l'area non insiste su orizzonti naturalmente impermeabili, va prevista una impermeabilizzazione del fondo, ad evitare infiltrazioni del liquido di percolazione;
- caratteristiche morfologiche: l'area deve essere pianeggiante o con pendenza molto modesta, tale da consentire il drenaggio superficiale delle acque piovane senza che questi provochino danni per una eccessiva azione erosiva;
- acque di percolazione: vanno raccolte e trattate prima della immissione in un corpo idrico recettore;
- emissioni in atmosfera: emissioni di N₂O e metano causati dai processi di degradazione rispettivamente anossica o anaerobica del fango.

Pertanto, nonostante la letteratura riporti l'utilizzo della fitodisidratazione anche per impianti di grandi dimensioni, la sua applicazione è strettamente dipendente dall'area geografica. Ad esempio, considerando una produzione media di fanghi già stabilizzati (su base secca), di circa 25-30 gSS per AE al giorno, il fabbisogno di area per un impianto che serve 100 000 AE sarebbe pari a 1,5 – 1,8 ha. La disponibilità di aree residuali a basso costo diventa quindi un requisito indispensabile per la fattibilità di questa tecnica. Va inoltre considerato l'impegno di manodopera per la rimozione e il ripristino dell'area per accogliere nuovi fanghi dopo un periodo di non oltre 10-12 anni. Infine, nel caso di fanghi inadatti all'utilizzo agricolo, questa tecnica potrebbe richiedere la impermeabilizzazione del terreno al di sotto della vegetazione, per evitare la percolazione in falda di metalli e composti organici non biodegradabili.

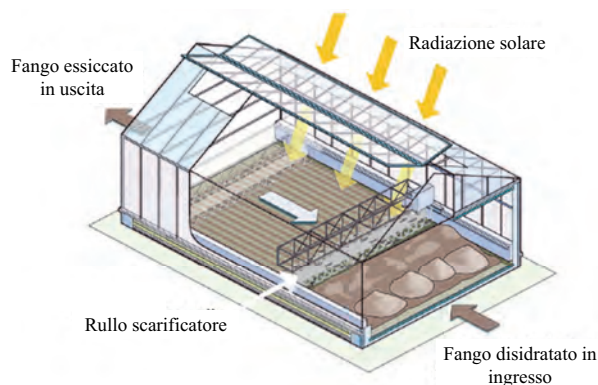


Figura 24 – Schema di un impianto per essiccamento solare (Suez, 2019b)

7.8.4. Essiccamento solare

L'essiccamento solare (Figura 24) permette la disidratazione del fango tramite irradiazione solare in serre apposite, ottenendo contenuti di SS finali pari a circa l'85%. Questo processo consiste in una soluzione economicamente ed ambientalmente favorevole. Solitamente i sistemi di essiccamento solare non vengono utilizzati per fanghi primari non digeriti a causa della produzione di odori sgradevoli e l'elevato contenuto di SS finale, superiore al 90%, richiesto per poter rientrare nella classe A dei biosolidi (definiti come solidi provenienti da trattamenti delle acque reflue che, previa stabilizzazione, possono essere utilizzati come ammendante agricolo). I biosolidi di classe A, per poter essere smaltiti senza restrizioni in agricoltura, devono rispettare standard rigorosi per quanto riguarda il contenuto di metalli, gli odori e l'attrazione di possibili vettori di malattie, con concentrazioni di patogeni praticamente non rilevabili (Norma U.S. EPA). Questa tecnologia viene quindi maggiormente utilizzata sui fanghi stabilizzati, i quali rientrano nella classe A dei biosolidi a valori di SS inferiori (SS del 75%).

La serra utilizzata per l'essiccamento è costituita da una struttura a base rettangolare, una camera traslucida, dei sensori per misurare le condizioni atmosferiche, dei deflettori d'aria, delle ventole di circolazione e ventilazione, un dispositivo elettromeccanico mobile che agita e muove i fanghi essiccati e un microprocessore che controlla l'ambiente. Questo sistema permette anche la disidratazione di fango liquido ma necessita di aree maggiori e spesso questo fattore riduce il vantaggio derivante dall'eliminazione della fase di disidratazione meccanica di disidratazione. L'essiccamento solare è più adatto per ambienti tropicali o aridi, tuttavia ci sono installazioni anche in paesi del nord o in montagna.

7.8.5. Geofiltro tubolare

Recentemente è stata sviluppata un'innovativa tecnologia di disidratazione che prevede l'impiego di geofiltri tubolari (Figura 25): si tratta di contenitori tubolari flessibili con superficie filtrante in grado di drenare i liquidi e di trattenere al suo interno le particelle solide. I geofiltri sono in grado di funzionare sia in continuo che in discontinuo, permettono di realizzare strutture per lo stoccaggio dei fanghi direttamente in sito, hanno ridotti consumi energetici e costi di esercizio e gestione contenuti. La maturazione del sedimento dipende dalla natura del fango trattato e, orientativamente, può richiedere tempi dell'ordine di qualche mese. I geofiltri tubolari sono realizzati con filtri in polipropilene ad elevata permeabilità, inerzia chimica e resistenza a trazione: essi hanno elevata affidabilità e richiedono una manutenzione pressoché nulla. Ciascun geofiltro può sostenere portate di fango fino a 2000 m³/h. Al termine del processo di disidratazione, il materiale, ormai consolidato e con un contenuto di SS fino al 50%, può essere facilmente rimosso e smaltito (Nuove Tecnologie Ambientali S.r.l., 2019).

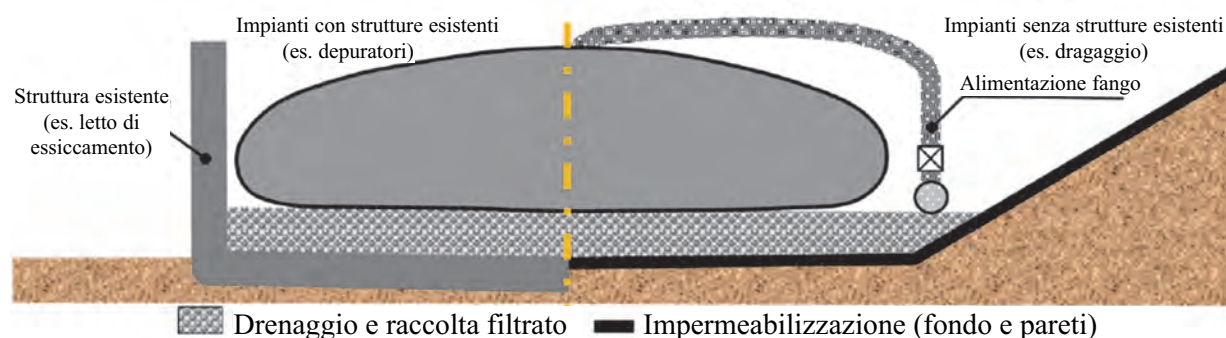


Figura 25 – Schema di un geofiltro tubolare (Nuove Tecnologie Ambientali S.r.l., 2019)

8. CONFRONTO TRA LE TECNOLOGIE DI DISIDRATAZIONE

La *Tabella 18* elenca sinteticamente vantaggi e svantaggi delle diverse tecnologie di disidratazione dei fanghi di depurazione.

È evidente come ogni tecnologia abbia pro e contro per la sua applicazione all'interno di un impianto di depurazione. Tuttavia, le dimensioni dell'impianto, le portate da trattare e la destinazione finale del fango per lo smaltimento sono tre fattori importanti da tenere in considerazione.

Tabella 18 – Vantaggi e svantaggi delle diverse tecnologie utilizzate per la disidratazione dei fanghi

Metodo di disidratazione	Vantaggi	Svantaggi
Centrifuga	<ul style="list-style-type: none"> • Problemi di odore ridotti • Avvio e arresto rapido • Facilità di installazione • Design compatto • Produzione di fango relativamente asciutto • Costo del capitale relativamente basso 	<ul style="list-style-type: none"> • Manutenzione frequente dovuta all'elevata usura • Elevato consumo energetico • Alta rumorosità e vibrazioni • Necessità di personale qualificato per la manutenzione • Contenuto di solidi sospesi nel centrato superiore ai sistemi di filtrazione • Richiesti pretrattamenti di rimozione di sabbia • Ottimizzazione delle prestazioni limitata a causa della zona di disidratazione nascosta
Filtropressa	<ul style="list-style-type: none"> • Produzione di fango ad elevato contenuto di secco • Alto indice di cattura dei solidi • Funzionamento semplice 	<ul style="list-style-type: none"> • Operazione discontinua • Elevato costo dell'apparecchiatura • Alti costi operativi • Requisiti speciali per la struttura di supporto • Elevata superficie richiesta • Maggiore produzione di solidi dovuti ad elevate quantità di prodotti chimici • Limitazioni sulla durata del filtro
Nastropressa	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo di energia relativamente basso • Costi del capitale e di funzionamento relativamente bassi • Facilità di manutenzione • Produzione di fango ad elevato contenuto di secco • Facilità di spegnimento del sistema 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevata richiesta di acqua di lavaggio • Possibile formazione di aerosol • Richiesti pretrattamenti di rimozione di sabbia • Elevata sensibilità alle caratteristiche dei fanghi in ingresso • Vita media breve rispetto ad altri dispositivi che utilizzano supporti in tessuto • Possibile intasamento del tessuto
Pressa a maniche	<ul style="list-style-type: none"> • Produzione di fango ad elevato contenuto di secco • Alto livello di automazione e flessibilità • Bassa rumorosità 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevato consumo energetico
Pressa a vite	<ul style="list-style-type: none"> • Bassa velocità (0,3 – 1,5 rpm) • Bassa rumorosità (<68 dBA) • Il design non permette la fuoriuscita di odori e aerosol • Consumo di energia relativamente basso • Il sovraddosaggio di polimero non ostruisce il vaglio e non ostacola la disidratazione • La bassa forza di taglio riduce gli odori 	<ul style="list-style-type: none"> • I limiti di capacità richiedono più unità per gli impianti medio-grandi • L'acqua di lavaggio è necessaria periodicamente per tutto il tempo del ciclo operativo • Ottimizzazione delle prestazioni limitata a causa della zona di disidratazione nascosta
Pressa rotativa	<ul style="list-style-type: none"> • Bassa velocità (0,5 – 2,5 rpm) • Bassa rumorosità (<68 dBA) • Il design non permette la fuoriuscita di odori e aerosol • Il sovraddosaggio di polimero non ostruisce il vaglio e non ostacola la disidratazione • Acqua di lavaggio utilizzata solo durante lo spegnimento del sistema • La bassa forza di taglio riduce gli odori 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevato spazio richiesto in rapporto alla capacità di disidratazione • I limiti di capacità richiedono più unità per gli impianti medio-grandi • Ottimizzazione delle prestazioni limitata a causa della zona di disidratazione nascosta
Elettro-disidratazione	<ul style="list-style-type: none"> • Funzionamento automatico • Buoni risultati per fanghi poco disidratabili • Miglioramento degli odori e abbattimento degli agenti patogeni sul fango • Buona flessibilità per le caratteristiche dei fanghi in ingresso • Risparmio energetico 3-5 volte superiore rispetto agli essiccatori termici in relazione al contenuto di SS ottenibile 	<ul style="list-style-type: none"> • Costi di capitale da moderati ad elevati • Non adatto per grandi impianti • Contenuto di solido secco finale del 45-50% • Difficile prevedere la prestazione senza preliminari test in laboratorio • Richiede trattamento degli odori • Necessaria disidratazione preliminare per ottenere un contenuto di solido del 10-25% • Consumi energetici superiori ai sistemi di filtrazione tradizionali
Letto di essiccamento	<ul style="list-style-type: none"> • Basso costo del capitale se il terreno è a disposizione • Non necessita di operatori specializzati • Basso consumo energetico • Poco o nessun consumo di additivi chimici • Poco sensibile alla variabilità dei fanghi • Maggiore contenuto di solidi rispetto ai metodi meccanici 	<ul style="list-style-type: none"> • Richiede ampi spazi su terreni • Richiede tempi lunghi • Bassa flessibilità • Richiede fango stabilizzato • La progettazione deve tenere in considerazione il clima • Contenuto di solidi sospesi moderatamente elevato nel filtrato • Può attrarre insetti • La rimozione del fango essiccato richiede lavoro intenso
Lagunaggio	<ul style="list-style-type: none"> • Basso consumo energetico • Nessun consumo di additivi chimici • La materia organica è ulteriormente stabilizzata • Basso costo del capitale se il terreno è a disposizione • Minima specializzazione degli operatori per il funzionamento intenso 	<ul style="list-style-type: none"> • Potenziale vettore di odori • Potenziale inquinamento delle acque sotterranee • Sfruttamento del terreno più intensivo rispetto ai metodi meccanici • L'aspetto potrebbe essere sgradevole • La progettazione richiede di tenere in considerazione il clima
Fito-disidratazione	<ul style="list-style-type: none"> • Maggiore contenuto di solidi rispetto ai metodi meccanici • Alta flessibilità rispetto ai carichi in ingresso • Bassa produzione di percolato • Assenza di problemi igienici • Buona integrazione paesaggistica con il territorio circostante • Costi operativi e di manutenzione ridotti 	<ul style="list-style-type: none"> • Richiede ampi spazi su terreni pianeggianti • Non è applicabile in zone sottoposte a dilavamento eccessivo • Necessita metitiera periodica delle piante • Può attrarre insetti
Essiccamento solare	<ul style="list-style-type: none"> • Contenuto di solidi molto elevato • Non produce odori • Costi operativi e di manutenzione ridotti • Alto livello di automazione 	<ul style="list-style-type: none"> • Richiede ampi spazi su terreni • Preferibile l'utilizzo su fango già disidratato • Richiede fango stabilizzato • La progettazione richiede di tenere in considerazione il clima
Geofiltro tubolare	<ul style="list-style-type: none"> • Pretrattamenti non necessari • Elevate portate (> 400 m³/h) • Elevata qualità del filtrato • Bassi consumi energetici • Bassi costi di gestione 	<ul style="list-style-type: none"> • Richiede ampi spazi su terreni

Tabella 19 – Valori medi del contenuto di SS in diverse tipologie di fango ottenuti con centrifuga, filtropressa, nastropressa, pressa a vite, pressa rotativa e processo di disidratazione elettro-assistita

Tipo di fango	SS fango disidratato (%) – VALORI MEDI					
	Centrifuga	Filtropressa	Nastropressa	Pressa a vite	Pressa rotativa	Elettro-disidratazione
Non stabilizzato						
Primario	34,2	45,0	27,2	35,0	36,5	39,0
Primario + Attivo	30,0	34,0	22,7	30,0	26,0	36,0
Attivo	18,0	28,0	16,0	18,5	15,5	-
Stabilizzato anaerobicamente						
Primario	35,0	30,0	29,5	25,0	27,0	-
Primario + Attivo	28,0	39,5	21,2	21,0	21,5	-
Attivo	-	-	18,0	20,0	14,5	-
Stabilizzato aerobicamente						
Attivo	21,5	-	16,5	17,5	36,5	37,0

Limitandosi alle considerazioni relative al contenuto di SS finale, i valori medi riportati in *Tabella 19* mettono nuovamente in evidenza come filtropressa e, in minor misura, centrifuga siano i processi più efficienti. La disidratazione elettro-assistita porta ovviamente a contenuti di SS finali elevati, ma a discapito di consumi energetici maggiori.

Per meglio confrontare le diverse tecnologie di disidratazione, la *Figura 26* mostra gli intervalli di consumi energetici, portate di fango in ingresso e valori di SS in uscita. Appare evidente come centrifughe e filtropresse coinvolgano maggiori consumi energetici specifici rispetto agli altri metodi di disidratazione, ma con efficienze di disidratazione, in termini di SS finali e di portate trattate, maggiori. Limitandosi ad un'analisi relativa alle prestazioni, la filtropressa appare la migliore

candidata per la disidratazione dei fanghi di depurazione. Tuttavia, per trattare le stesse portate di fango di una centrifuga, una filtropressa richiede maggiori ingombri, ha un minore livello di automazione e il condizionamento con cloruro ferrico e calce è causa di aumento considerevole dei volumi. La pressa rotativa e la pressa a vite trattano invece portate molto inferiori, con valori finali di SS solitamente minori del 25%, mentre la nastropressa si colloca a valori intermedi. Geofiltri tubolari e letti di essiccamento, ovviamente, hanno consumi energetici specifici di molto inferiori, con una buona resa in termini di SS finale. In conclusione, La *Tabella 20* riassume graficamente il confronto di alcune caratteristiche da tenere in considerazione per la scelta della tecnologia di disidratazione in un impianto di depurazione.

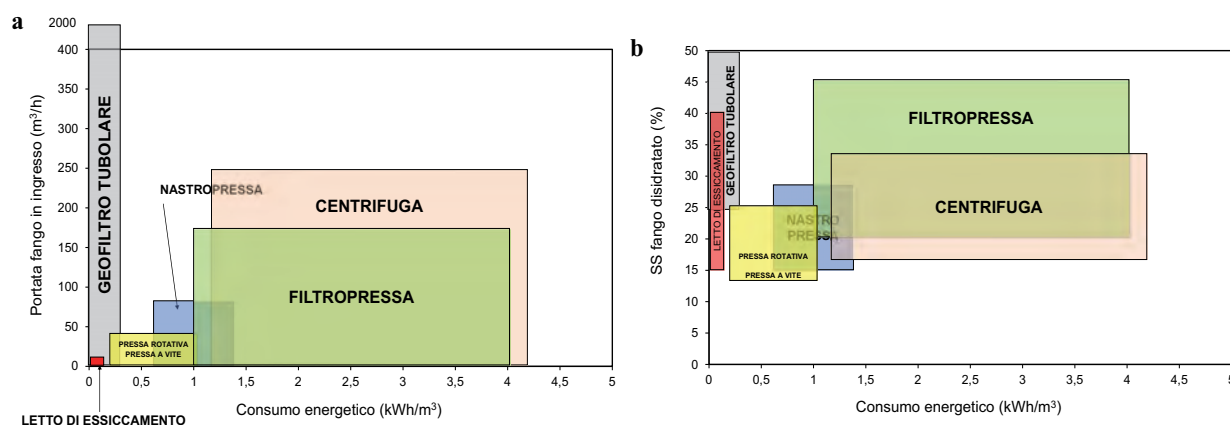


Figura 26 – Efficienze di disidratazione delle diverse tecnologie di disidratazione: (a) consumo energetico vs. portata di fango in ingresso e (b) consumo energetico vs. contenuto di SS nel fango disidratato (Nuove Tecnologie Ambientali S.r.l., 2019)

Tabella 20 – Confronto tra le diverse tecnologie di disidratazione dei fanghi

	Centrifuga	Filtropressa	Nastropressa	Pressa a vite	Pressa rotativa	Elettro-disidratazione
Ingombro	■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■	■ ■	■ ■ ■
Consumo energetico	💡 💡 💡 💡	💡 💡 💡	💡 💡	💡	💡 💡 💡	💡 💡 💡 💡
Efficienza disidratazione	😊 😊 😊	😊 😊 😊 😊	😊 😊	😊 😊	😊 😊	😊 😊 😊 😊
Manodopera	👤	👤 👤 👤	👤 👤	👤	👤	👤 👤
Rumore	🌀 🌀 🌀 🌀	🌀 🌀 🌀	🌀 🌀	🌀	🌀	🌀 🌀
Costi di manutenzione	🔧 🔧 🔧 🔧	🔧 🔧	🔧 🔧 🔧	🔧	🔧	🔧 🔧 🔧 🔧
Costi operativi	€ € € €	€ € €	€ € €	€	€ €	€ € € € €

9. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Ace Korea Incorporation Co. LTD, 2019. Elode.
- Acqua aria: mensile di scienze e tecniche ambientali, 1987.
- AMCON, 2019. AMCON's VOLUTE technology [WWW Document]. URL <https://en.amcon.co.jp/products/volute/features1/> (accessed 10.11.19).
- Andreoli C.V., von Sperling M., Fernandes F., Vitorio Andreoli C., von Sperling M., Fernandes F., 2007. Biological Wastewater Treatment Series – Sludge Treatment and Disposal. IWA Publishing, London.
- APHA/AWWA/WEF, 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Stand. Methods 541. ISBN 978-087553-013-0
<http://www.standardmethods.org/>
- Arimieari L.W., Ademiluyi J.O., 2019. Effect of sludge compressibility coefficient on sludge filtration resistance. Int. J. Sci. Eng. Res. 10, 631-637.
- BDP Industries, 2015. Model 2VP Belt Filter Press.
- Beckart Environmental, 2019. Filter Press Manufacturer Specializes in Dewatering Industrial and Municipal Sludges with Over 2000 Recessed Plate Filter Presses Installed Worldwide [WWW Document]. URL http://www.beckart.com/wastewater_treatment/filter_presses.php (accessed 10.14.19).
- Bertanza G., Papa M., Canato M., Collivignarelli M.C., Pedrazzani R., 2014. How can sludge dewatering devices be assessed? Development of a new DSS and its application to real case studies. J. Environ. Manage. 137, 86-92.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.02.002>
- Boeep, 2019. Volute screw press [WWW Document]. URL <https://www.chinaboep.com/Volute-Screw-Press-id592137.html> (accessed 10.15.19).
- Bucher Unipektin, 2019. Sludge dewatering technology.
- Chu C., Lee D., 2001. Experimental analysis of centrifugal dewatering process of polyelectrolyte flocculated waste activated sludge. Water Res. 35, 2377-2384.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00539-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00539-X)
- Degremont S., 2019. Conventional recessed plate filter press [WWW Document]. URL <https://www.suezwaterhandbook.com/processes-and-technologies/liquid-sludge-treatment/filter-press/conventional-recessed-plate-filter-press>
- Drusiani R., 2017. L'utilità di un approccio aperto per la valorizzazione dei fanghi di depurazione, in: Ecomondo. Rimini.
- Erdinçler A., Vesilind P.A., 2000. Effect of sludge cell disruption on compactibility of biological sludges. Water Sci. Technol. 42, 119-126.
<https://doi.org/10.2166/wst.2000.0185>
- Eshtiaghi N., Markis F., Yap S.D., Baudez J.-C., Slatter P., 2013. Rheological characterisation of municipal sludge: A review. Water Res. 47, 5493-5510.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.07.001>
- Eurostat, 2016. Sewage sludge production and disposal [WWW Document]. URL http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_ww_spd&lang=en
- FA. IMP. Impianti Trattamento Acque, 2014. Lagunaggio aerato [WWW Document]. URL <http://www.faimp.it/portfolio/lagunaggio-aerato/> (accessed 10.15.19).
- Feng J., Wang Y.L., Ji X.Y., 2014. Dynamic changes in the characteristics and components of activated sludge and filtrate during the pressurized electro-osmotic dewatering process. Sep. Purif. Technol. 134, 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.07.019>
- Flottweg, 2016. The new Xelleter Series.
- He D.-Q., Zhang Y.-J., He C.-S., Yu H.-Q., 2017. Changing profiles of bound water content and distribution in the activated sludge treatment by NaCl addition and pH modification. Chemosphere 186, 702-708.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.045>
- IRIDRA srl, 2019. Fitodisidratazione fanghi [WWW Document]. URL <http://www.iritra.eu/it/fitodepurazione/applicazioni/fito-fanghi-2.html> (accessed 8.29.19).
- IRSA-CNR, 1984. Quaderni Ist. Ric. Acque, 64, Metodi Analitici per i Fanghi.
- Jin B., Wilén B.M., Lant P., 2004. Impacts of morphological, physical and chemical properties of sludge flocs on dewaterability of activated sludge. Chem. Eng. J. 98, 115-126.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2003.05.002>
- Kopp J., Dichtl N., 2001. Influence of the free water content on the dewaterability of sewage sludges. Water Sci. Technol. 44, 177-183.
- Lin F., Zhu X., Luo Y., Yu P., Liu M., 2019. Improvement of activated sludge dewatering properties using green conditioners: Chitosan hydrochloride and lysozyme. RSC Adv. 9, 6936-6945. <https://doi.org/10.1039/c8ra10349f>

- Mahmoud A., Olivier J., Vaxelaire J., Hoadley A.F.A., 2011. Electro-dewatering of wastewater sludge: Influence of the operating conditions and their interactions effects. *Water Res.* 45, 2795-2810. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.02.029>
- Mahmoud A., Olivier J., Vaxelaire J., Hoadley A.F.A., 2010. Electrical field: A historical review of its application and contributions in wastewater sludge dewatering. *Water Res.* 44, 2381-2407. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.01.033>
- Marinetti M., 2007. Condizionamento e disidratazione dei fanghi. Politecnico di Milano.
- Metawater, 2019. Rotary press filter [WWW Document]. URL http://www.metawater.co.jp/eng/product/plant/sewer/rotary_press/ (accessed 9.3.19).
- Metcalf & Eddy, AECOM (Eds.), 2014. *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. McGraw Hill Education, New York.
- Nuove Tecnologie Ambientali S.r.l., 2019. Dewatering fanghi con geofiltri tubolari.
- Orbicon, 2019. Treatment of sludge in sludge treatment reed beds [WWW Document]. URL <https://www.orbicon.com/expertise/treatment-of-sludge-in-sludge-treatment-reed-beds> (accessed 10.15.19).
- Ovivo, 2019. Cinetik(R) Linear Electro-dewatering.
- Phuong To V.H., Nguyen T.V., Vigneswaran S., Ngo H.H., 2016. A review on Sludge Dewatering Indices. *Water Sci. Technol.* 75, 1-23. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.102>
- Porteous G.C., 1983. *Dewatering Sewage Sludge by Centrifuge*. London.
- Sanin F.D., Clarkson W.W., Vesilind P.A., 2011. *Sludge Engineering: The Treatment and Disposal of Wastewater Sludges*. DEStech Publications, Inc, Lancaster, Pennsylvania.
- Senthilkannan Muthu S., 2018. *Detox Fashion, Textile Science and Clothing Technology*. Springer Singapore, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4780-0>
- Siemens, 2019. J-Vap System [WWW Document]. URL <http://corrosion.thomasnet-navigator.com/Asset/J-Vap-Dewatering-and-Drying-System.pdf> (accessed 8.29.19).
- Skinner S.J., Studer L.J., Dixon D.R., Hillis P., Rees C.A., Wall R.C., Cavalida R.G., Usher S.P., Stickland, A.D., Scallies P.J., 2015. Quantification of wastewater sludge dewatering. *Water Res.* 82, 2-13. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.045>
- Smith J.K., Vesilind P.A., 1995. Dilatometric measurement of bound water in wastewater sludge. *Water Res.* 29, 2621-2626.
- Spinosa L., Lotito V., 2003. A simple method for evaluating sludge yield stress. *Adv. Environ. Res.* 7, 655-659. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00041-2)
- Spinosa L., Mininni G., 1984. Assessment of sludge centrifugability, in: Casey T.J., L.P. and N.P. (Ed.), *Methods of Characterization of Sewage Sludges*. D. Reidel Publishing Company, Dublin, Eire, pp. 16-30.
- Suez, 2019a. DehydriTM Osmo.
- Suez, 2019b. Natural sludge drying in green house – HeliantisTM [WWW Document]. URL <https://www.suezwater-handbook.com/degremont-R-technologies/sludge-treatment/drying/natural-sludge-drying-in-green-house-Heliantis> (accessed 8.29.19).
- TIM Shredding & Dewatering, 2019. High Performance Dewatering Squeezer [WWW Document]. URL <http://shred-ding-machine.com/index.php/product/dewatering-screw-press/> (accessed 10.15.19).
- To V.H.P., Nguyen T.V., Vigneswaran S., Duc Nghiem L., Murthy S., Bustamante H., Higgins M., 2016. Modified centrifugal technique for determining polymer demand and achievable dry solids content in the dewatering of anaerobically digested sludge. *Desalin. Water Treat.* 57, 25509-25519. <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1157524>
- Toncin, 2019. HVPF vertical fully-automatic filter press [WWW Document]. URL <http://www.toncin.com/product/872.html> (accessed 9.3.19).
- Tsang K.-W.R., Vesilind P.A., 1990. Moisture distribution in sludges, in: *Water Science and Technology*. pp. 135-142. <https://doi.org/10.2166/wst.1990.0108>
- Tuan P.-A., 2011. *Sewage Sludge Electro-dewatering*. Lap-pee-ranta University of Technology. <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/72598>
- Tuan P.-A., Jurate V., Mika S., 2008. Electro-Dewatering of Sludge Under Pressure and Non-Pressure Conditions. *Environ. Technol.* 29, 1075-1084. <https://doi.org/10.1080/09593330802180294>
- UNI – Ente Italiano di Normazione, 2013. UNI EN 14701-2:2013 Caratterizzazione dei fanghi – Proprietà di filtrazione – Parte 2: Determinazione della resistenza specifica alla filtrazione.
- Vaxelaire J., Cézac P., 2004. Moisture distribution in activated sludges: A review. *Water Res.* 38, 2214-2229. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.02.021>
- Vesilind P.A., Hsu C.-C., 1997. Limits of sludge dewaterability. *Water Sci. Technol.* 36, 87-91. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00673-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00673-2)
- Vesilind P.A., Martel C.J., 1990. Freezing of water and wastewater sludges. *J. Environ. Eng. (United States)* 116, 854-862. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1990\)116:5\(854\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1990)116:5(854))
- Wastewater 101, 2019. Study Time Treatment Plant (Discussion) – Solids Handling [WWW Document]. URL <https://wastewater101.net/2018/10/study-time-treatment-plant-discussion-solids-handling-8/> (accessed 10.15.19).
- Weng C.H., Lin Y.T., Yuan C., Lin Y.H., 2013. Dewatering of bio-sludge from industrial wastewater plant using an electrokinetic-assisted process: Effects of electrical gradient. *Sep. Purif. Technol.* 117, 35-40. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.06.013>
- Wu C.C., Wu J.J., Huang R.Y., 2003. Floc strength and dewatering efficiency of alum sludge. *Adv. Environ. Res.* 7, 617-621. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00048-5](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00048-5)
- Wu R., Lee D., Wang C., Chen J., Tan R.B., 2001. Novel cake characteristics of waste-activated sludge. *Water Res.* 35, 1358-1362. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00513-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00513-3)
- Zhang W.J., Sun K.C., 2012. Comparative analysis of the measurement methods of bound water content in municipal sewage sludge. *Adv. Mater. Res.* 518-523, 2991-2995. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.518-523.2991>

RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca ha ricevuto finanziamenti dal *Seventh Framework Programme* dell'Unione Europea nell'ambito del progetto n. 611593 "SLUDGE-treat".



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2019 è sostenuta da:

