



Interreg



UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME



Componente T3

OUTPUT T3.2

**Area attrezzata per il trattamento di
sedimenti di dragaggio contaminati**

La cooperazione al cuore del Mediterraneo

questo Programma è cofinanziato dal Fondo Europeo per lo Sviluppo Regionale

INDICE

1.	Area attrezzata per il trattamento di sedimenti di dragaggio contaminati	3
2.	Area attrezzata per il trattamento <i>Soil washing</i>	4
3.	Area attrezzata per il trattamento Elettrocinesi e Landfarming.....	13
	Sistema sperimentale di decontaminazione elettrocinetica	14
	Criteri per la progettazione dell'impianto pilota di EK	21
	Progettazione impianto pilota EK.....	23
	Dimensionamento geometrico	23
	Modalità di controllo del prototipo	26
	Il concetto di enhanced landfarming.....	27
4.	Biibliografia	31

1. Area attrezzata per il trattamento di sedimenti di dragaggio contaminati

L'area attrezzata è stata sviluppata per applicare uno schema di trattamento basato su un processo preliminare di lavaggio e separazione granulometrica seguito dall'applicazione di elettrocinesi e landfarming su frazioni granulometriche specifiche originate dalla prima fase di trattamento. L'area costituirà uno strumento/risorsa di grande utilità per lo studio di schemi di trattamento da applicare, anche secondo combinazioni diverse, a sedimenti prodotti da future attività di dragaggio.

Le aree attrezzate sono fisicamente in due siti distinti:

- l'impianto pilota di *Soil washing* di Livorno, gestito da ISPRA
- gli impianti pilota di *Elettrocinesi e Landfarming* di Pisa, gestiti da UNIPI.

2. Area attrezzata per il trattamento *Soil washing*

L'impianto di lavaggio e separazione granulometrica (Figura 1) è sito all'interno dell'area portuale di Livorno (Figura 2).

Data l'elevata presenza all'interno dei campioni della componente sabbiosa e sulla base dei risultati dei test preliminari è stato messo in funzione l'impianto di lavaggio e separazione granulometrica, a carattere sperimentale e di proprietà di ISPRA, volto alla separazione ed al recupero delle varie frazioni sabbiose/pelitiche presenti nei sedimenti oggetto degli interventi di dragaggio.



Figura 1: impianto di lavaggio e separazione granulometrica



Figura 2: Localizzazione impianto di lavaggio e separazione granulometrica

L'obiettivo principale del processo operato dall'impianto è, infatti, quello di separare quantitativi sperimentali di sedimento marino nelle diverse frazioni granulometriche che lo costituiscono, in modo da recuperare sia la componente sabbiosa, cioè la parte di sedimento considerata meno contaminata e più riutilizzabile, sia la parte fine (frazioni pelitiche), considerata più contaminata e di più difficile riutilizzo.

Il primo nucleo di tale impianto, utilizzato per il progetto LIFE *Coast-Best* ("*Sediment treatment and beneficial reuse in small harbours networks*") è stato installato all'interno del Porto di Livorno tra dicembre 2012 e gennaio 2013; recentemente (ottobre-novembre 2018) all'impianto è stata aggiunta un'ulteriore sezione di vagliatura costituita da un Rotovaglio e sono state revisionate le altre sezioni già presenti, per adattare le operazioni ai sedimenti scelti per il progetto. L'impianto è stato autorizzato ai sensi dell'art.211 del D.lgs. 152/2006 dalla Regione Toscana con Decreto Dirigenziale N.8493_del 30/05/2018.

La separazione della sabbia avviene tramite una classificazione per via umida del sedimento, basata sulla velocità limite di spostamento dei grani in un campo di forze gravitazionali (classificatori a sedimentazione) e/o in un campo di forze centrifughe (idrocloni). La frazione fine del sedimento viene da ultimo avviata alla fase di *dewatering*, mentre le acque di processo saranno raccolte in appositi contenitori ed idoneamente smaltite.

L'impianto sperimentale è costituito dalle seguenti sezioni/moduli:

- a)** Tramoggia di carico da 1 mc, per l'alimentazione del sedimento tal quale (2,40x1,30 m). La tramoggia di carico serve ad alimentare il letto vagliante permettendo la regolarizzazione della portata del materiale in ingresso all'impianto.
- b)** Modulo by-passabile per la rimozione della posidonia/frazioni di plastica disperse nel sedimento da trattare. Qualora il sedimento in ingresso presenti elevate percentuali di materiali vegetali quali fibre e/o frammenti di alghe e piante acquatiche, quali ad es. posidonia oceanica, e di frammenti di plastica, sarà sottoposto ad una specifica fase di vagliatura, mediante un rotovaglio, finalizzata alla rimozione degli stessi. Tale modulo è posto tra le sezioni di omogeneizzazione (cassone scarrabile) ed il vibrovaglio. Il modulo è costituito da un tamburo ruotante perforato con fori di diametro differenziato che permette il lavaggio e la separazione dal sedimento dei materiali più grossolani.



Figura 3: Rotovaglio

- c)** Vibrovaglio con tela vagliante di diametro 2 mm (dimensioni: 2,40x1,60 m). Il vibrovaglio separa il materiale grossolano da quello più fine. La separazione avviene attraverso il passaggio del materiale più fine su una griglia vibrante. Il moto di vibrazione della griglia è assicurato da due motori, fissati alla struttura del vaglio, ai quali sono collegate masse eccentriche in rotazione. Il sedimento viene contemporaneamente irrorato con 4 getti d'acqua ad alta pressione per facilitare la separazione tessiturale e consentire la movimentazione di quest'ultimo attraverso le successive sezioni dell'impianto.



Figura 4: Tamis vibrant et pompe d'homogénéisation

- d)** N. 2 celle di attrizione, (dimensioni: 1,20x0,70 m - vol. 0,125 mc cad.). La torbida (acqua più sedimento) in uscita dal classificatore a spirale, viene convogliata, in condizioni di elevata turbolenza, all'interno di due celle di attrizione del volume di 125 litri che determinano la disgregazione di eventuali agglomerati fangosi ancora presenti.



Figura 5: Celle di attrizione

- e)** Unità di idrociclonatura (dimensioni: 3,50x1,3 m). E' costituita da 2 distinti idrocycloni (di cui uno by-passabile). L'idrociclone opera la separazione tra sabbia fine e frazione

limoso-argillosa attraverso l'azione della forza centrifuga. È costituito da un cilindro a fondo conico, dotato di un augello laterale per l'alimentazione della miscela sedimento/acqua, di una sezione di uscita delle particelle fini trascinate dal fluido, nonché di una sezione di uscita dei materiali a granulometria maggiore posta nel vertice del cono.

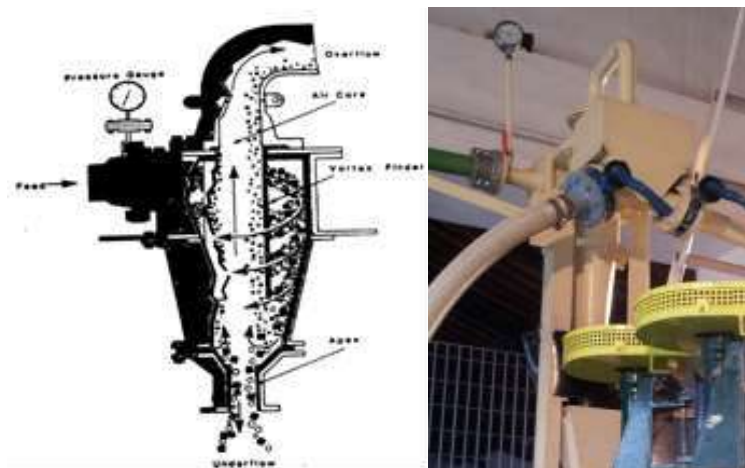


Figura 6: idrociclone

- f) Classificatore a spirale (dimensioni: 2,90x1,00 m - diam. 300 mm). Il classificatore a spirale è impiegato come unità di classificazione. Il principio di funzionamento dipende dalla differente velocità di deposito delle particelle solide per differenza di densità.



Figura 7: Classificatore a spirale

Nonostante la potenzialità massima della sola unità di idrociclonatura sia superiore ai quantitativi necessari alla sperimentazione proposta, l'allestimento contestuale alle altre unità dell'apparato impiantistico, riduce la potenzialità complessiva di trattamento a quantitativi di sedimento dell'ordine di poche unità di metri cubi (2-3 mc) per un'ora di funzionamento.

Oltre ai limiti tecnico-impiantistici, dovuti, della tramoggia di carico e dell'unità di disidratazione, l'attività sperimentale è finalizzata all'ottimizzazione della gestione del sedimento trattato e pertanto prevede, comunque, l'utilizzo di piccoli quantitativi di sedimento da cadenzare in un tempo di lavorazione piuttosto lungo (indicativamente 60-90 minuti per ciascuna prova sperimentale).

Di seguito si riporta uno schema semplificato delle sezioni dell'impianto (Figura 3) e una documentazione fotografica (Figura 4) relativa ad alcune attività condotte con l'impianto pilota di lavaggio e separazione granulometrica.

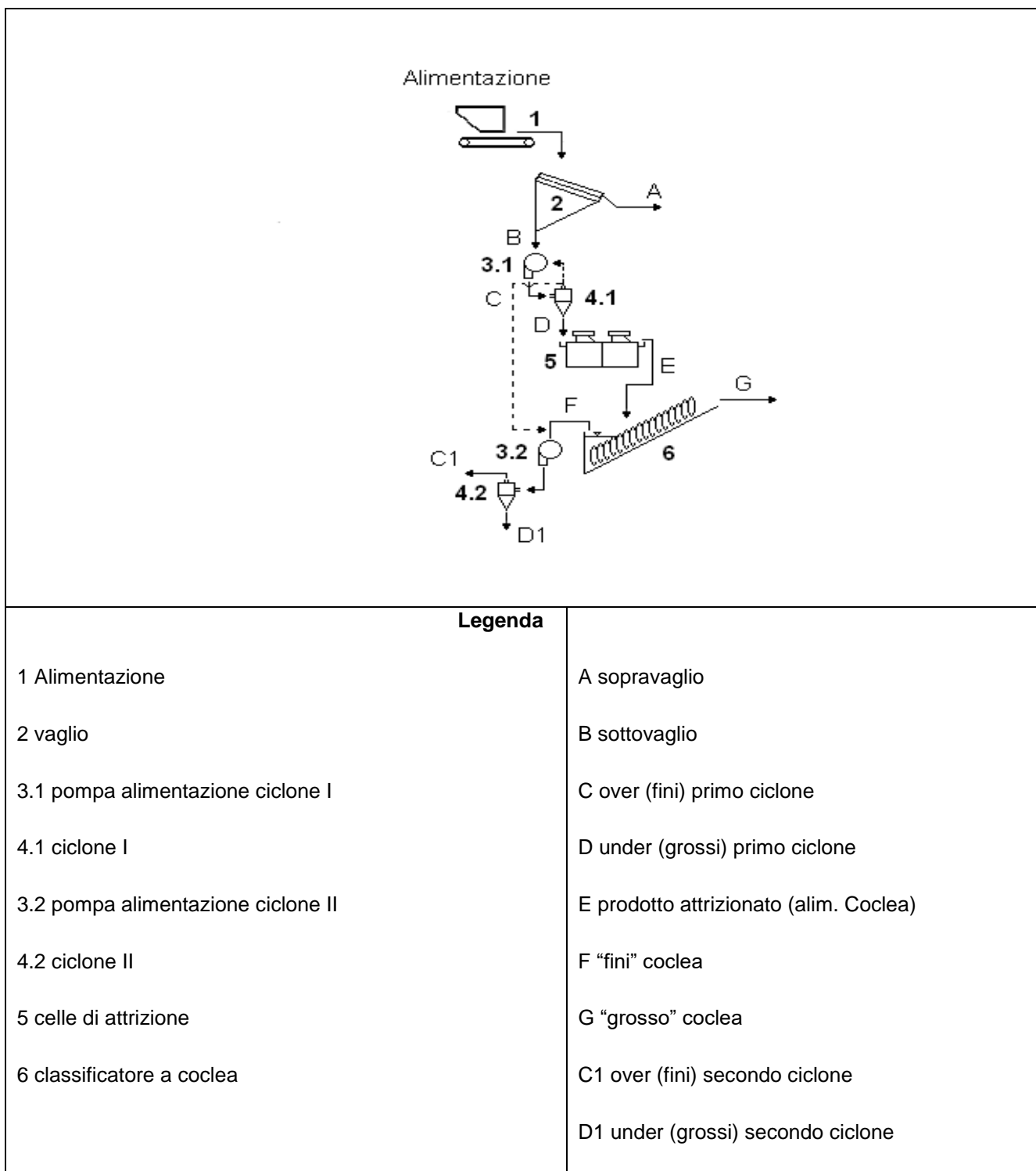


Figura 8- Layout semplificato dell'impianto di separazione granulometrica



Figura 9: Fasi di lavorazione sedimenti con impianto di lavaggio e separazione granulometrica.

Successivamente al trattamento di lavaggio e separazione granulometrica (LSG) i campioni provenienti dalla Vasca di Colmata del Porto di Livorno sono stati trasportati dal personale ISPRA fino al laboratorio del nostro Dipartimento, dove sono stati ulteriormente omogeneizzati, campionati ed inviati a laboratorio esterno (Geochim di Rosi e C. s.a.s. – Gualdo Tadino (PG)) per essere caratterizzati in maniera *specific* da un punto di vista chimico. I campioni giunti al nostro laboratorio risultano così composti:

- tal quale: risultato dell'omogeneizzazione dei vari campioni provenienti dai 3 punti di prelievo e non trattato fisicamente tramite LSG;
- sabbioso post-trattamento: fine e grossolano;
- pelitico post-trattamento: in fase acquosa per evitare l'essiccamento.

Di seguito si riportano le figure (figura 5) relative ai campioni sopraelencati e le analisi chimiche specifiche dei vari campioni confrontate con i valori limite espressi nel D.lgs. 152/2006 relativi al riutilizzo per "A-Siti ad uso verde pubblico, privato e residenziale" e per "B-Siti ad uso commerciale ed industriale".



Figura 10: Campione tal quale – sabbia grossa – sabbia fine – pelite in fase acquosa

3. Area attrezzata per il trattamento Elettrocinesi e Landfarming

L'area attrezzata si trova presso la sede del DESTEC – UNIPi in via gabba 22, Pisa.

Nella suddetta area attrezzata si svolgeranno i test a scala pilota di Elettrocinesi (EK) e di Landfarming.

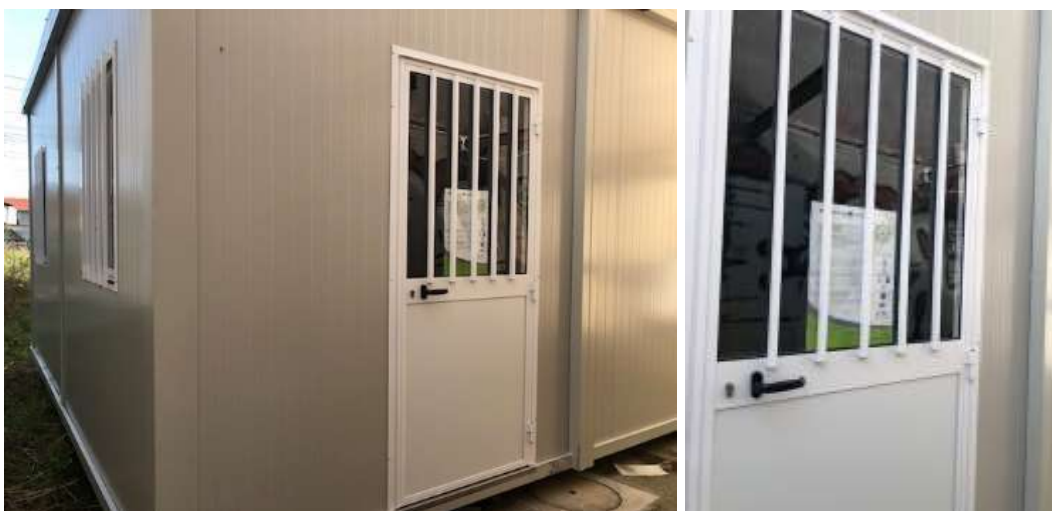


Figura 11: indicazione dell'area di interesse (indicatore di colore rosso) – dettaglio box noleggiato

Sistema sperimentale di decontaminazione elettrocinetica

I test di laboratorio sono stati ivi eseguiti per riprodurre i fenomeni che concorrono al trasferimento dei contaminanti durante il processo elettrocinetico, per valutare le % di rimozione ed il comportamento del sedimento durante il trattamento stesso e per valutare i parametri operativi necessari al dimensionamento idraulico ed elettrico del futuro impianto pilota.

I test sono stati eseguiti in reattorino di plexiglass, di forma rettangolare di dimensioni 50 cm (lunghezza) x 9 cm (altezza) x 7 cm (larghezza) progettata, sviluppata ed utilizzata da Masi et.al (2015) durante le prove di laboratorio del progetto Life + Sekret. Il setup è costituito da sei parti principali: il compartimento riservato al sedimento, i compartimenti dove sono alloggiati gli elettrodi, i serbatoi di acqua e acido, i serbatoi di eccedenza della soluzione elettrolitica, il sistema di alimentazione ed il sistema di controllo del pH. La dimensione del campione da trattare è pari a 30 cm (lunghezza) x 9 cm (altezza) x 7 cm (larghezza) ed il peso del sedimento umido impiegato in ciascun esperimento è di circa 3.5 kg. Le due camere laterali, dove sono posizionati gli elettrodi e la soluzione elettrolitica hanno una lunghezza pari a 10 cm l'una. Una griglia di nylon (dimensioni della maglia pari a 2 mm) e carta da filtro sono stati utilizzati per separare il comparto del sedimento dai compartimenti degli elettrodi.

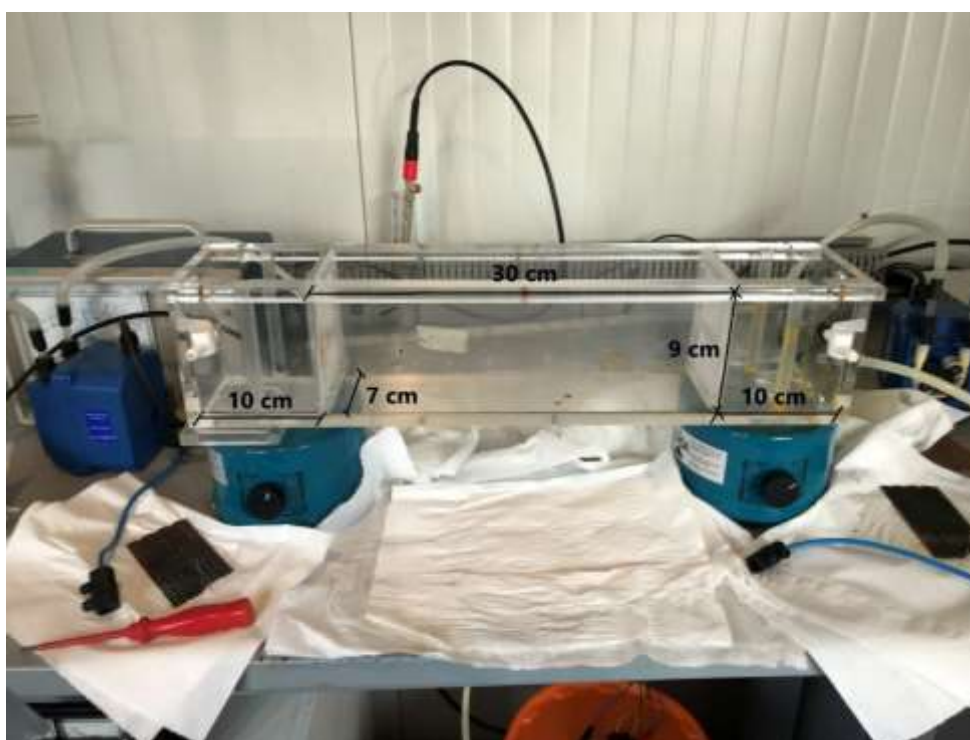


Figura 12: Dimensioni cella elettrocinetica in scala di laboratorio



Figura 13: Sezioni della cella elettrocinetica

I sedimenti sono stati inseriti nella cella elettrocinetica e compattati staticamente applicando una pressione di 40 g/cm^2 per almeno 3 giorni prima dell'inizio del test. La camera dell'anolita e del catolita sono a superficie libera ed i livelli degli elettroliti sono mantenuti costanti grazie a 2 sfioratori posti ad un'altezza di 7 cm dal fondo della cella. Gli elettroliti in entrambe le camere sono tenuti in agitazione grazie a delle "ancorine" poste in movimento grazie agli agitatori meccanici. Il materiale compattato deve risultare circa 2 cm più alto rispetto al livello dell'elettrolita per evitare il flusso idraulico di quest'ultimo sulla superficie del sedimento. Entrambi gli elettrodi (anodo e catodo) sono costituiti da una rete di titanio nobilitato con un metallo misto ossido (MMO – Mixed Metal Oxide) fornito da Industrie De Nora s.p.a, Italia.



Figura 14: Elettrodo

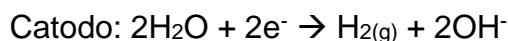
Durante gli esperimenti il catolita è mantenuto a condizioni di pH costante ($\text{pH} = 3$) per mezzo di un sistema di controllo automatizzato: una sonda di pH è inserita infatti all'interno della cella catodica ed i valori sono registrati in tempo reale da un software di misura e automazione sviluppato su misura che controlla automaticamente una valvola per l'iniezione della soluzione acida nella cella stessa.

Le due camere laterali, mediante una pompa peristaltica, vengono riempite inizialmente con acqua deionizzata ad una velocità costante (4 litri/ora) al fine di compensare le perdite d'acqua dovute ad esempio all'elettrolisi e all'evaporazione. Durante il processo, la soluzione nella cella anodica si arricchirà spontaneamente di ioni H_3O^+ , mentre la soluzione nella cella catodica tenderà a condizioni di basicità e quindi si deve prevedere un dosaggio in continuo di una soluzione di acido nitrico 3,7 M per mantenere, come detto precedentemente, il pH a valori pari a 3.



Figura 15: Sistema di controllo pH

Agli elettrodi è stata applicata una corrente costante pari a 0.5 A (densità di corrente pari a circa 80 A/m²) in modo da creare una circolazione di corrente elettrica all'interno del sedimento tale da provocare la separazione elettrocinetica e quindi la migrazione degli inquinanti (si veda il Capitolo 3: “*Tecnologie di trattamento elettrocinetico*”). Il flusso di corrente provoca l'elettrolisi dell'acqua che modifica il pH sia del catolita che dell'anolita secondo le seguenti reazioni:



Naturalmente il catolita, in assenza di “interventi”, raggiungerebbe in maniera abbastanza veloce una condizione di netta basicità che porterebbe ad un lento desorbimento dei contaminanti presenti nel sedimento: però, tramite il dosaggio controllato e automatizzato della soluzione acida, che viene effettuato ogni qual volta che il pH dell'elettrolita super il valore di 3, si riesce a contrastare questo processo che aumenterebbe notevolmente i tempi di decontaminazione.

Di seguito si riporta lo schema di laboratorio per i test elettrocinetici.

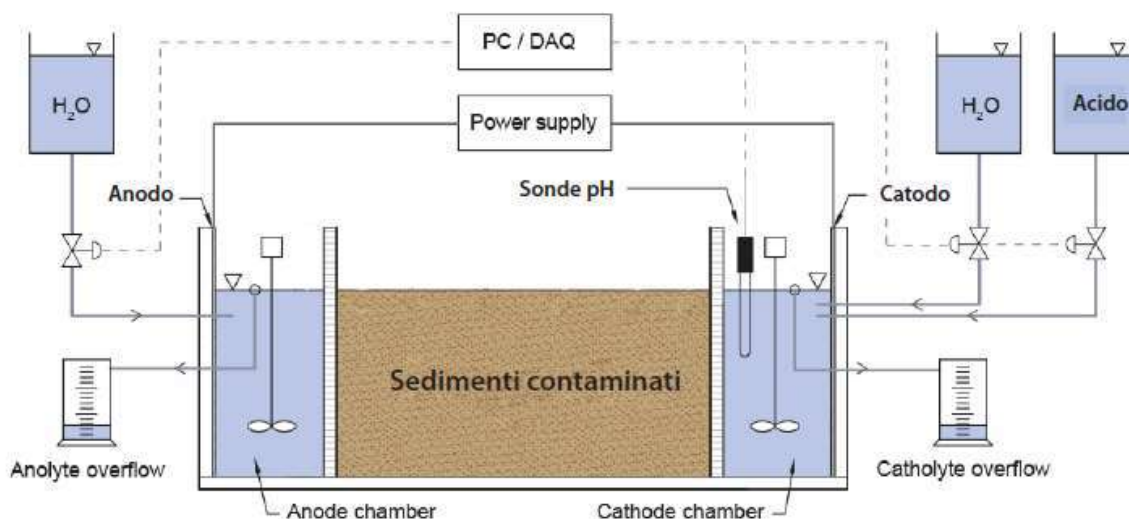
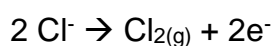


Figura 16: Schema di laboratorio

Da sottolineare è lo sviluppo, soprattutto durante la prima fase del trattamento, di quantità significative di cloro gassoso secondo la seguente relazione:



Infatti, a causa del contenuto di sale dell'acqua marina, la concentrazione di cloruri è abbastanza elevata e sarebbe opportuno raccogliere e convogliare il gas sviluppato in uno scrubber contenente una soluzione di idrossido di sodio (NaOH) in modo da trasformare il cloro gassoso in ipoclorito.

Nello specifico l'apparecchiatura rappresentata è stata impiegata per 3 esperimenti:

- Esperimento n°1 – riguardante i sedimenti provenienti dall'Area Darsena Lucchini del Porto di Piombino iniziato in data 11 febbraio 2019, della durata di 30 giorni;
- Esperimento n°2 – riguardante i sedimenti provenienti dall'Area Vasca Piccola del Porto di Piombino iniziato in data 19 marzo 2019, della durata anch'esso di 30 giorni;
- Esperimento n° 3 – riguardante i sedimenti provenienti dall'Area Darsena Pescherecci del Porto di Piombino prelevati a marzo 2019, iniziato in data 14 maggio 2019, della durata di almeno 60 giorni e quindi attualmente in funzione.

La prima operazione che è necessario compiere durante la messa in opera dei test elettrocinetici è quella di omogeneizzare il sedimento da decontaminare all'interno di secchi e successivamente porlo all'interno della "cella centrale di decontaminazione". Successivamente il sedimento è compattato staticamente applicando una pressione di 40 g/cm^2 per almeno 3 giorni prima dell'inizio del test in modo da eliminare l'eccesso di acqua presente nel materiale. Poi le soluzioni elettrolitiche vengono pompate automaticamente nelle due camere laterali tramite una pompa peristaltica e gli elettrodi sono collegati ad un "alimentatore stabilizzato" che opera in controllo di corrente. Durante l'esperimento si applica una corrente costante di 0.5 A , che produce una densità di corrente pari a 80 A/m^2 . Di seguito si riportano le foto delle fasi di preparazione del test EKR dei sedimenti provenienti dall' Area Vasca Piccola del Porto di Piombino.



Figura 17: Sedimento omogeneizzato e collocamento nella camera centrale



Figura 18: Compattazione del sedimento ed inizio esperimento

Criteri per la progettazione dell'impianto pilota di EK

L'ultima parte del seguente elaborato di tesi è costituita dalla progettazione e dalla prototipazione di un impianto pilota di decontaminazione elettrocinetica di forma cilindrica. L'obiettivo fondamentale è stato quello di ampliare i test da scala di laboratorio a scala pilota e cercare di valutare le condizioni operative dell'impianto in modo da ottimizzare e perfezionare per gli sviluppi futuri il trattamento di decontaminazione.

Il progetto consiste nella realizzazione di un impianto pilota di forma cilindrica cava, composto essenzialmente da un singolo elettrodo (+) posto al centro e da sei elettrodi (-) posti invece all'estremità del cilindro stesso. Questa particolare forma è stata scelta in modo che il flusso elettrico che viene generato dall'applicazione di correnti elettriche a bassa intensità sia diretto radialmente dalla zona centrale verso la zona esterna. L'obiettivo è quello di passare da una configurazione a maglia quadrata/rettangolare ad una costituita da maglie di forma esagonale: al centro di ogni esagono è posizionato un anodo (+) e all'estremità invece sono presenti 6 catodi (-). Ciascuno dei 6 catodi è condiviso da 3 celle contemporaneamente e quindi il flusso elettrico in prossimità del catodo è il doppio rispetto a quello che c'è nell'anodo. Le sperimentazioni future saranno quindi deputate a verificare e studiare gli eventuali effetti benefici della decontaminazione elettrocinetica utilizzando una configurazione a maglie esagonali.

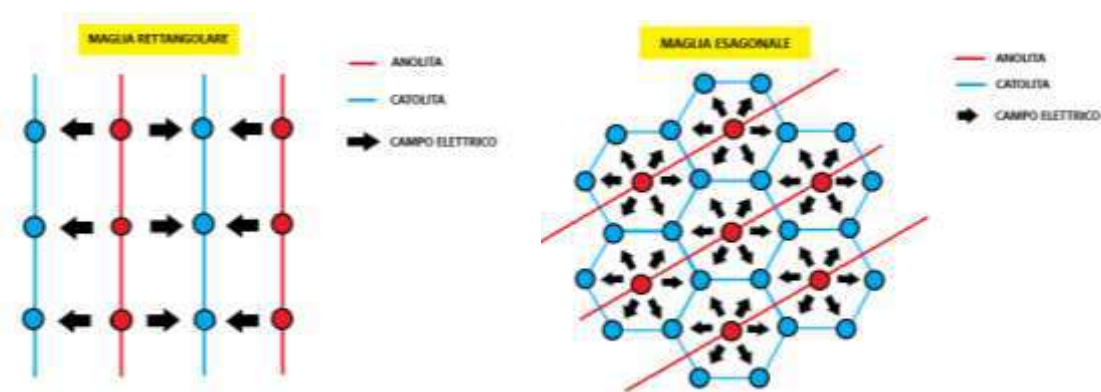


Figura 19: Differenze tra la maglia rettangolare e esagonale

Dopo un ampio studio della letteratura e grazie alle esperienze maturate durante il progetto Life+ Sekret, i principali parametri di dimensionamento possono essere così elencati:

- mobilità degli ioni (elettromigrazione), delle molecole d'acqua (elettrosmosi) o delle particelle cariche (elettroforesi): espressa in $\frac{m^2}{V*s}$ e rappresenta la velocità con cui ioni/molecole/particelle si muovono all'interno di una matrice solida soggetta ad una differenza di potenziale specifica. Lagemann indica i seguenti valori di mobilità media:
 - cationi H^+ (elettromigrazione): $\simeq 33 \times 10^{-8} m^2/Vs$;
 - anioni OH^- (elettromigrazione): $\simeq 18 \times 10^{-8} m^2/Vs$;
 - ioni metallici (elettromigrazione): $\simeq 5 \times 10^{-8} m^2/Vs$
 - molecole d'acqua (elettrosmosi): $\simeq 0,5 \times 10^{-8} m^2/Vs$
 - particelle di argilla polarizzate (elettroforesi): \simeq compreso tra 0,01 e $0,3 \times 10^{-8} m^2/Vs$

In realtà lo spostamento effettivo degli ioni metallici è probabilmente più lento di quello sopra indicato e considerando un valore prudenziale si stabilisce una mobilità ionica uguale a quella scelta per il progetto Life+ Sekret, pari a $MI = 0,1 \times 10^{-8} \frac{m^2}{V*s}$;

- resistività del terreno (R): è espressa in $\Omega*m$ ed è l'inverso della conduttività espressa in S/m. per un terreno normale la resistività in genere varia tra 10 e 1000 $\Omega*m$, per i

sedimenti marini però le cose peggiorano: infatti la conduttività dell'acqua di mare è pari a $\approx 5 \text{ S/m}$ corrispondente ad una resistività pari a $0,2 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$;

- densità di corrente massima: in seguito alle esperienze ed ai risultati ottenuti dalle prove elettrocinetiche di laboratorio, si imposta una densità di corrente pari a 80 A/m^2 ;
- distanza tra gli elettrodi: nell'impianto pilota progettato la distanza tra l'anodo centrale ed i catodi esterni è pari a 200 mm ;
- ipotesi di dimensionamento: il dimensionamento consiste nel fissare una durata massima ammissibile di decontaminazione ed in base alla distanza tra gli elettrodi, alla resistività del sedimento ed alla densità di corrente andare a calcolare la potenza necessaria in kWh e quindi il costo complessivo dell'energia (considerando un costo dell'energia pari a $0,3 \text{ €/kWh}$). La resistività può essere incrementata lavando il sedimento prima di iniziare il trattamento.

La tensione è pari a $= \text{Resistività } [\Omega \cdot \text{m}] * \text{Distanza } [\text{m}] * \text{Densità } [\text{A/m}^2]$

La potenza, calcolata in kW è pari a $= \frac{\text{Volume } [\text{m}^3]}{\text{Distanza } [\text{m}]} * \text{Densità } [\text{A/m}^2] * \text{Tensione } [\text{V}] * 1/1000$

Progettazione impianto pilota EK

I criteri per la progettazione dell'impianto pilota sono già stati definiti nel Capitolo 4.4 al quale si rimanda. Il progetto consiste nella realizzazione di un impianto pilota di forma cilindrica cava, stata scelta in modo che il flusso elettrico che viene generato dall'applicazione di correnti elettriche a bassa intensità sia diretto radialmente dalla zona centrale verso la zona esterna. Il disegno è stato sviluppato utilizzando il software di progettazione meccanica Autodesk Inventor.

Dimensionamento geometrico

L'impianto pilota è stato pensato e progettato per il trattamento di una matrice solida del peso totale di circa 60 kg, corrispondente ad un cilindro cavo di spessore 100 mm e di altezza ≈ 460 mm. E' stata considerata l'altezza della soluzione elettrolitica all'interno del prototipo inferiore di circa 30 mm (430 mm) rispetto al livello del sedimento stesso, per evitare il verificarsi di un flusso idraulico dell'elettrolita sulla superficie del sedimento. Inoltre, come nell'impianto in scala di laboratorio, è necessario prevedere due geotessili che hanno lo scopo fondamentale di separare il comparto del sedimento dai compartimenti degli elettrodi. Il geotessile da utilizzare è costruito dalla "BOODE waterwell system" ha uno spessore di circa 2 mm ed è lo stesso usato durante il progetto Europeo Life+ Sekret.



Figura 20: Geotextile wrap

Di seguito si riporta un'immagine del file "PDF 3D" generato in seguito alla progettazione dell'impianto, nella quale si evidenziano i singoli componenti che costituiscono il reattore.

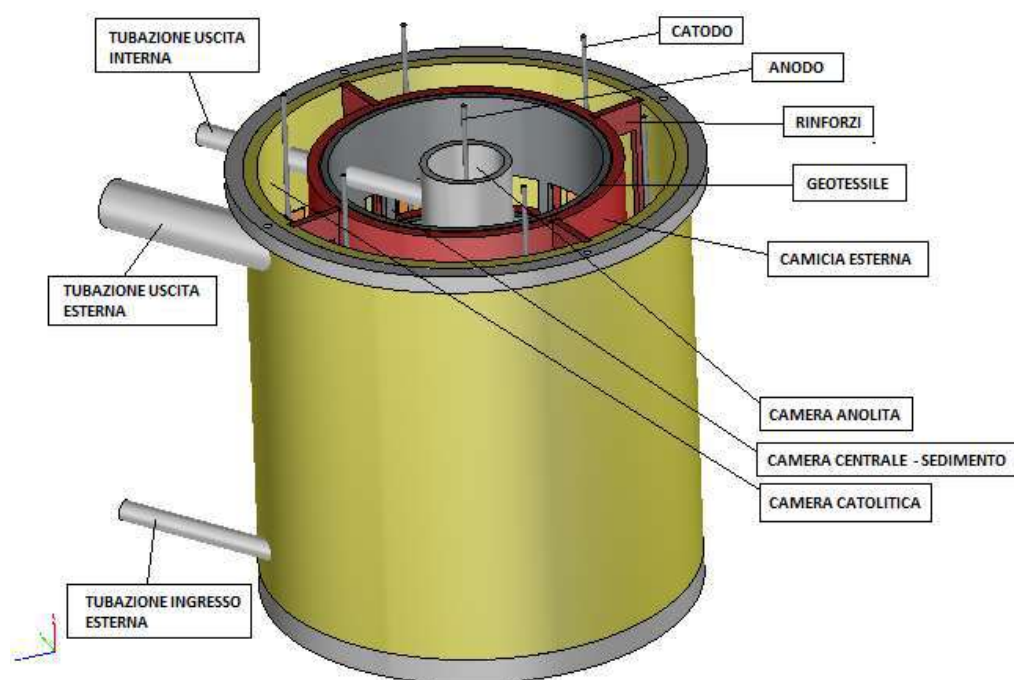


Figura 21: Impianto pilota e singoli componenti

È stata assolutamente necessaria la progettazione di una “camicia” da inserire tra il materiale da decontaminare ed il comparto esterno del catolita con lo scopo fondamentale di bloccare e fermare il geotessile a contatto con il sedimento stesso, in modo che sia impedito nel muoversi e che siano quindi prevenute delle eventuali fuoriuscite di materiale. La camicia è stata inoltre provvista di un’asola per permettere il suo corretto e facilitato inserimento intorno all’alloggio cilindrico. Sono state previste inoltre delle forature a maglia quadrata sia sulla camicia che sulle due componenti all’interno del cilindro cavo: queste sono state progettate per avere una percentuale di foratura di circa il 50%. Non si eccede per non compromettere la stabilità e la resistenza del prototipo stesso. Sempre per migliorare la resistenza dell’impianto sono stati previsti N°4 rinforzi, anch’essi forati per consentire il passaggio dell’elettrolita, da alloggiare nella camera esterna del catolita.

Le camere dell’anolita e del catolita sono a superficie libera ed i livelli degli elettroliti sono mantenuti costanti grazie a 2 tubazioni di troppo pieno. La camera centrale (anolitica) è riempita inizialmente con acqua deionizzata grazie ad una pompa peristaltica a portata fissa, da 60 litri/ora (1 litro/minuto), al fine sia di consentire un buon ricambio idrico all’interno del

reparto anolitico sia di compensare le perdite d'acqua dovute ad esempio all'elettrolisi e all'evaporazione. La pompa è fabbricata da "SEKO" che progetta pompe dosatrici e sistemi di misurazione per i mercati del trattamento delle acque e dei processi industriali. È stato scelto il modello PSH con funzionamento On/Off e contropressione di lavoro massima pari a 0,1 bar. In allegato V è riportata la scheda tecnica della pompa.

Modalità di controllo del prototipo

Da tenere presente è lo sviluppo, come dimostrato dagli esperimenti in scala di laboratorio, soprattutto durante i primi giorni di trattamento, di quantità significative di cloro gassoso: per questo motivo l'impianto è dotato di un tappo a tenuta stagna nel quale è stato previsto un foro di 1/4" filettatura gas, necessario per convogliare e trattare all'interno di uno scrubber il cloro gas sviluppato. Sul tappo è stato previsto inoltre un foro per consentire il passaggio di una sonda di pH/temperatura i cui valori saranno registrati in tempo reale da un software di misura e automazione che controllerà automaticamente una "valvola a tre vie" per il dosaggio della soluzione acida.

La sonda di pH/temperatura sarà acquistata presso l'azienda "Mettler-Toledo S.p.A." che produce sensori che sono utilizzati nelle unità di elettrolisi di importanti impianti industriali qui in Toscana. In parallelo, sempre presso la solita azienda, sarà anche acquistato un trasmettitore multi-parametro. È inoltre da prevedere l'acquisto di un sensore di misurazione del livello di riempimento delle camere interne all'impianto pilota. Quest'ultimo sarà acquistato presso "SICK Italia" che è uno dei principali produttori di sensori e sistemi per l'automazione. Per quanto riguarda il sensore pH/temperatura è stato scelto il modello "NPRO4260I/SG/225", per il trasmettitore è stato selezionato il modello "M300 PROCESS 2-CH, 1/4 DIN", mentre per il sensore di livello è stato scelto il modello "LFP0500-A4NMB". Negli allegati VII/VIII/IX si riportano le relative schede tecniche.

È infine necessaria la realizzazione di un software su misura per l'acquisizione dei suddetti sensori e per il controllo del processo in Labview, visualizzazione su grafico, impostazione dei set point e salvataggio dati su file. Il sistema digitale verrà sviluppato e fornito da "Florence

Engineering S.r.l.”, un’azienda specializzata in risoluzione di problemi connessi all’ingegneria elettronica.

Il concetto di enhanced landfarming

Il landfarming è un processo di trattamento dei sedimenti dragati che può essere definito correttamente come on-site in quanto consiste nel collocare i sedimenti dragati in un bacino confinato ed impermeabilizzato alla base. I sedimenti vengono distribuiti su tutta la superficie del bacino con uno spessore che varia in funzione delle capacità tecniche delle macchine agricole che possono movimentarli. Di conseguenza lo spessore è generalmente al di sotto del metro. I sedimenti quindi vengono regolarmente movimentati per garantire una adeguata ossigenazione degli stessi. Il landfarming consiste infatti nel favorire i processi biodegradativi a carico dell’ecologia microbica del sedimento stesso, con particolare interesse ai processi ossidativi. Un impianto di landfarming deve quindi assicurare il corretto bilanciamento dei nutrienti di sistema ed il trasferimento di ossigeno alle popolazioni microbiche. Questo avviene in genere mediante rimescolamento del materiale e aggiunta di macroelementi come azoto e fosforo e di agenti adatti (bulking agents) a facilitare lo scambio gas all’interno di una matrice, altrimenti a granulometria fine e refrattaria agli scambi gassosi, siano essi ossigeno o i prodotti volatili eventualmente prodotti dalla degradazione dei contaminanti primari. Deve inoltre essere mantenuto un idoneo tenore di umidità e un pH della matrice in trattamento, di fatto condizione imprescindibile per l’attività metabolica microbica. I tempi di residenza in impianto sono variabili, in funzione della natura e concentrazione dell’inquinante e delle condizioni ambientali.

L’enhanced landfarming consiste nell’inoculare la matrice con isolati microbici, siano essi batteri o funghi, autocotoni od alloctoni alla matrice in trattamento, i quali presentino delle attività metaboliche di interesse, quali la capacità di degradare i contaminanti primari dei sedimenti in trattamento.

Nel caso specifico del progetto i sedimenti saranno inoculati con il ceppo fungino *Sclerotinia* sp. MUT 5852, che si è già dimostrato in grado di abbattere significativamente il contenuto in TPH in sperimentazioni in mesocosmo dedicate alla modellizzazione di impianti da landfarming

per il trattamento sia di suoli che di sedimenti di dragaggio fluviali, entrambi contaminati da idrocarburi pesanti (Siracusa, 2018, Becarelli 2019).

La sperimentazione prevede l'inoculo della biomassa fungina ad una percentuale in peso fresco del 10% in mesocosmi sperimentali.

La sperimentazione in mesocosmo prevede l'allestimento di 3 vasi per tempo di analisi in due treni di trattamento: uno inoculato con il candidato fungino: enhanced landfarming ed uno non inoculato: landfarming, contenenti sedimento corretto nel rapporto tra macronutrienti al rapporto specifico di 100:10:1 rispettivamente di C:N:P ed ammendato con il 10% in peso di materiale lignocellulosico (cippato di legno).

Si ottiene quindi un totale di 18 mesocosmi mantenuti in assenza di luce diretta a temperatura ambiente ed omogenati una volta alla settimana, con correzione del contenuto idrico, inizialmente corretto all'80% della capacità di ritenzioni idrica massima, mediante pesata su bilancia di precisione.

Il peso iniziale di ogni singolo mesocosmo è stato corretto a 460 gr, la sperimentazione è iniziata il 28 giugno 2019 e si è conclusa 28 Luglio 2019

Di seguito sono riportate immagini relative all'allestimento dei mesocosmi



Figura 22: Mesocosmi di enhanced landfarming

Cippato
lignocellulosico



Sedimento contaminato



Sedimento contaminato ammendato con
cippato



Figura 23: Strutturante per enhanced landfarming

4. Bibliografia

- Iannelli, R., M. Masi, A. Ceccarini, M. Ostuni, R. Lageman, A. Muntoni, D. Spiga, A. Poletti, A. Marini, and R. Pomi (2015). "Electrokinetic remediation of metal-polluted marine sediments: experimental investigation for plant design". In: *Electrochimica Acta* 181, pp. 146–159. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.04.093.
- Iannelli, R., M. Masi, and A. Ceccarini (2016). "Gestione e trattamento degli elettroliti nella bonifica elettrocinetica di matrici contaminate da metalli pesanti". In: *Ingegneria dell'Ambiente* 3.2, pp. 140–152. DOI: 10.14672 /ida.v3i2.466.
- ICRAM (2006). Progetto preliminare di bonifica dell'area marina inclusa nella perimetrazione del sito di bonifica di interesse nazionale di Livorno. Tech. rep., p. 134.
- Lageman, R and WPool (2009). "Experiences with field applications of electrokinetic remediation". In: *Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater*, C. Cameselle and K. R. Reddy. John Wiley & Sons, Inc., pp. 697–717. DOI: 10.1002/9780470523650.ch7.
- Lageman, R, W Pool, and G. A. Seffinga (1989). "In-Situ Bodensanierung durch elektrokinetischen Schadstofftransport". In: *Sanierung kontaminierter Standorte*. Ed. by E. S. Verlag. Vol. 33. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis. Berlin, Germany, pp. 255–282.
- Masi, M. and R. Iannelli (2015). "Trattamento elettrocinetico di sedimenti di dragaggio portuale contaminati da metalli pesanti: il progetto life+ "SEKRET"". In: *Ingegneria dell'Ambiente* 2.2, pp. 45–58. DOI: 10.14672 /ida.v2i2.334.



Interreg



UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME



Composante T3

OUTPUT T3.2

**Zone équipée pour le traitement de
sédiments de dragage contaminés**

La coopération au cœur de la Méditerranée

Ce projet est cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional

INDEX

1.	Zone équipée pour le traitement des sédiments de dragage contaminés.....	3
2.	Espace équipé pour le traitement de lavage des sols	3
3.	Zone équipée pour l'électrokinésie et le traitement d'landfarming	11
4.	Biobibliographie.....	23

1. Zone équipée pour le traitement des sédiments de dragage contaminés

La zone équipée a été développée pour appliquer un schéma de traitement basé sur un processus préliminaire de lavage et de séparation granulométrique suivi de l'application de l'électrokinésie et de l'enfouissement sur des fractions granulométriques spécifiques issues de la première phase de traitement. La zone sera un outil/ressource très utile pour l'étude des schémas de traitement à appliquer, même en différentes combinaisons, aux sédiments produits par les futures activités de dragage.

Les zones équipées sont situées sur deux sites différents :

- l'usine pilote de lavage des sols à Livourne, gérée par l'ISPRA
- les usines pilotes Elettrocinesi et Landfarming de Pise, gérées par l'UNIFI.

2. Espace équipé pour le traitement de lavage des sols

L'installation de lavage et de séparation granulométrique (figure 1) est située dans la zone portuaire de Livourne (figure 2).

Compte tenu de la forte présence de la composante sableuse dans les échantillons et sur la base des résultats des essais préliminaires, l'usine expérimentale de lavage et de séparation granulométrique, propriété d'ISPRA, a été mise en service pour séparer et récupérer les différentes fractions sableuses/péltiques présentes dans les sédiments soumis aux opérations de dragage.



Figure 1 : Installation de lavage et séparation granulométrique



Figure 2 : Emplacement de l'installation de lavage et séparation granulométrique

L'objectif principal du procédé mis en œuvre par l'usine est, en effet, de séparer des quantités expérimentales de sédiments marins dans les différentes fractions granulométriques qui les composent, afin de récupérer à la fois la partie sableuse, c'est-à-dire la partie des sédiments considérée comme moins contaminée et réutilisable, et la partie fine (fractions pelitiques), considérée comme étant plus contaminée et plus difficile à réutiliser.

Le premier noyau de cette usine, utilisé pour le projet LIFE Coast-Best ("Traitement des sédiments et réutilisation bénéfique dans les petits réseaux portuaires") a été installé dans le port de Livourne entre décembre 2012 et janvier 2013 ; récemment (octobre-novembre 2018) une section supplémentaire de criblage composée d'un Rotovaglio a été ajoutée à l'usine et les autres sections déjà présentes ont été revues pour adapter les opérations aux sédiments choisis pour le projet. L'usine a été autorisée conformément à l'article 211 du décret législatif 152/2006 par la Région Toscane par le décret n° 8493_du 30/05/2018.

La séparation du sable s'effectue par une classification humide des sédiments, basée sur la vitesse limite de déplacement des grains dans un champ de force gravitationnelle (classificateurs de sédimentation) et/ou dans un champ de force centrifuge (hydrocyclones). La fraction fine des sédiments est finalement envoyée à la phase de déshydratation, tandis que l'eau de traitement est recueillie dans des conteneurs spéciaux et éliminée de manière appropriée.

L'installation d'essai se compose des sections/modules suivants :

- a) Trémie de chargement de 1 m³ pour l'alimentation des sédiments en l'état (2,40x1,30 m). La trémie de chargement sert à alimenter le lit de tamisage, ce qui permet de réguler le débit du matériau entrant dans l'installation.
- b) Module by-passable pour l'élimination des posidonies/fractions plastiques dispersées dans les sédiments à traiter. Si le sédiment entrant contient des pourcentages élevés de matières végétales telles que des fibres et/ou des fragments d'algues et de plantes aquatiques, comme la posidonie océanique, et de fragments de plastique, il sera soumis à une phase de criblage spécifique, au moyen d'un tamis rotatif, visant à l'éliminer. Ce module est placé entre les sections d'homogénéisation (boîte amovible) et le tamis vibrant. Le module se compose d'un tambour rotatif

perforé de trous de différents diamètres qui permettent le lavage et la séparation du sédiment des matériaux les plus grossiers.



Figure 3 : Tamis rotatif

c) Tamis vibrant avec toile de tamisage de 2 mm de diamètre (dimensions : 2,40x1,60 m). Le crible vibrant sépare le matériau grossier du matériau fin. La séparation s'effectue par le passage du matériau le plus fin sur une grille vibrante. Le mouvement vibratoire de l'écran est assuré par deux moteurs, fixés à la structure de l'écran, auxquels sont reliées des masses excentriques rotatives. Le sédiment est pulvérisé simultanément avec 4 jets d'eau à haute pression pour faciliter la séparation des tissus et permettre le mouvement de ces derniers à travers les sections suivantes de la plante.



Figure 4 :

d) N. 2 cellules d'attrition, (dimensions : 1,20x0,70 m - vol. 0,125 mc chacune). Le turbide (eau plus sédiments) qui sort du classificateur en spirale est transporté, dans des conditions de forte turbulence, dans deux cellules de frottement d'un volume de 125 litres qui déterminent la désintégration des éventuels agglomérats boueux encore présents.



Figure 5 : Cellule d'attrition

e) Unité d'hydrocyclage (dimensions : 3,50 x 1,3 m). Il se compose de 2 hydrocyclones distincts (dont l'un est by-passable). L'hydrocyclone sépare le sable fin de la fraction limono-argileuse par force centrifuge. Il se compose d'un cylindre à fond conique, équipé d'une vis sans fin latérale pour l'alimentation du mélange sédiments/eau, d'une section de sortie des fines particules traînées par le fluide, ainsi que d'une section de sortie des matériaux à granulométrie supérieure placée au sommet du cône.

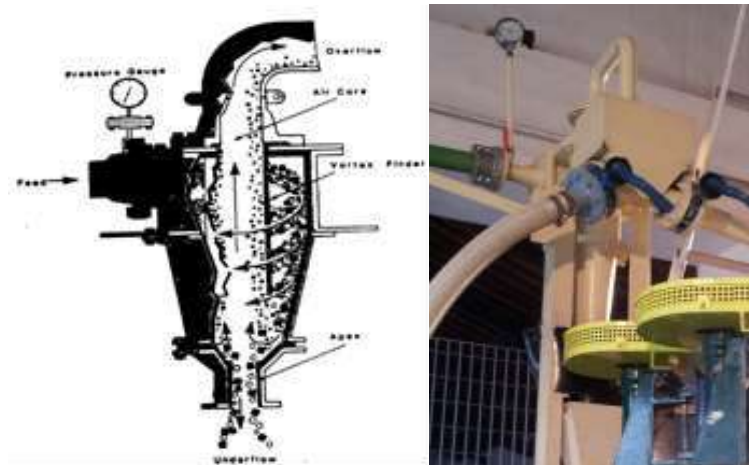


Figure 6 : Hydrocyclone

f) Classeur en spirale (dimensions : 2,90x1,00 m - diamètre 300 mm). Le classificateur en spirale est utilisé comme unité de classification. Le principe de fonctionnement dépend du taux de dépôt différent des particules solides pour la différence de densité.

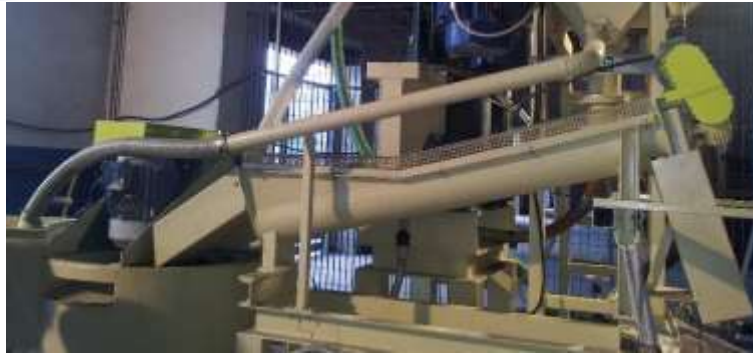


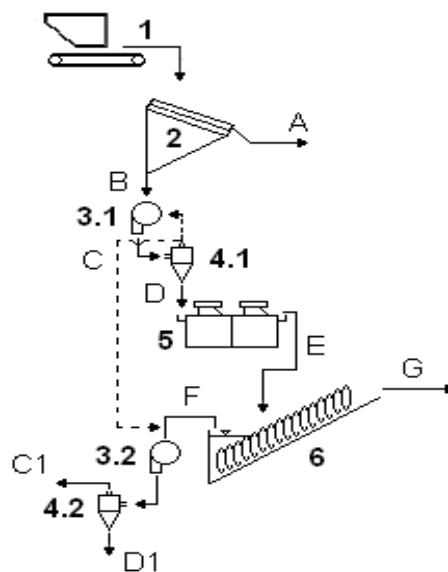
Figure 7 : Classeur en spirale

Bien que la capacité maximale de l'unité d'hydrocyclage seule soit supérieure aux quantités nécessaires à l'expérimentation proposée, la mise en place, avec les autres unités de l'appareil d'ingénierie de l'usine, réduit la capacité globale de traitement à des quantités de sédiments de l'ordre de quelques unités de mètres cubes (2-3 mètres cubes) pour une heure de fonctionnement.

Outre les limites techniques de l'installation dues à la trémie de chargement et à l'unité de déshydratation, l'activité expérimentale vise à optimiser la gestion des sédiments traités et permet donc l'utilisation de petites quantités de sédiments à cadencer dans un temps de traitement assez long (environ 60-90 minutes pour chaque essai expérimental).

La figure 3 montre un diagramme simplifié des sections de l'usine et les photos de la figure 4 mettent en avant quelques activités réalisées avec l'usine pilote pour le lavage et la séparation granulométrique.

Alimentazione



Légende

1 Alimentation électrique

2 tamis

3.1 Pompe d'alimentation cyclone I

4.1 Cyclone I

3.2 Pompe d'alimentation Cyclone II

4.2 Cyclone II

5 Cellules d'Attrition

6 classificateur à vis

A - au-dessus de l'écran

B - sous l'écran

C sur (fin) premier cyclone

D sous le (grand) premier cyclone

Et produit attritionné (alim. Cochlée)

F "fine" cochlée

G "grande" cochlée

C1 au-dessus du deuxième cyclone (fin)

D1 sous (grand) deuxième cyclone

Figure 1- Disposition simplifiée de l'installation de séparation granulométrique



Figura 2: Phases du traitement des sédiments avec installation de lavage et séparation granulométrique.

Après le traitement de lavage et de séparation granulométrique (LSG), les échantillons provenant de la cuve Colmata du port de Livourne ont été transportés par le personnel d'ISPRA au laboratoire de notre département, où ils ont été homogénéisés, échantillonnés et envoyés à un laboratoire externe (Geochim di Rosi e C. s.a.s. - Gualdo Tadino (PG)) pour une analyse spécifique du point de vue chimique. Les échantillons arrivés à notre laboratoire sont ainsi composés :

- échantillon brut: résultat de l'homogénéisation des différents échantillons provenant des 3 points de prélèvement et non traités physiquement par LSG ;
- Post-traitement sablonneux : fin et grossier ;
- Post-traitement pélitique : en phase aqueuse pour éviter le séchage.

La figure 5 ci-dessous montre les chiffres correspondant aux échantillons cités plus haut et les analyses chimiques spécifiques des différents échantillons par rapport aux valeurs limites exprimées dans le décret législatif 152/2006, relatif à la réutilisation pour les "sites A à usage public, privé et résidentiel vert" et pour les "sites B à usage commercial et industriel".



Figure 3: Echantillon brut - sable grossier - sable fin - pelite en phase aqueuse

3. Zone équipée pour l'électrokinésie et le traitement d'landfarming

La zone équipée est située au siège de DESTEC - UNIPI, via gabba 22, Pise.

Dans cette zone équipée seront réalisés les essais pilotes d'électrokinésie (EK) et d'enfouissement à l'échelle pilote.

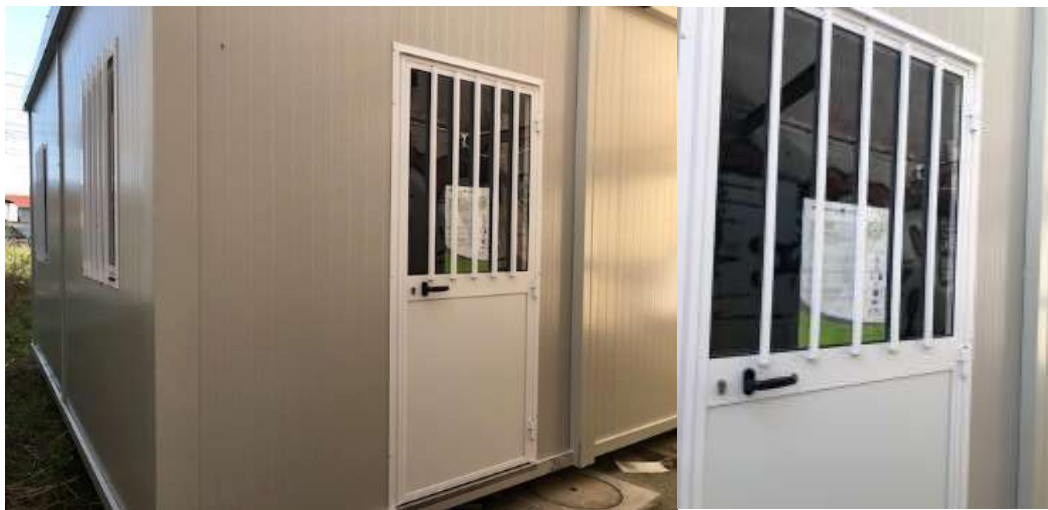


Figure 11 : indication de la zone d'intérêt (indicateur rouge) - détail de la boîte de location

Système expérimental de décontamination électrocinétique

Les essais en laboratoire y ont été réalisés pour reproduire les phénomènes qui contribuent au transfert des contaminants au cours du processus électrocinétique, pour évaluer le pourcentage d'enlèvement et le comportement des sédiments pendant le traitement lui-même et pour évaluer les paramètres opérationnels nécessaires au dimensionnement hydraulique et électrique de la future installation pilote.

Les essais ont été réalisés dans un réacteur rectangulaire en plexiglas de 50 cm (longueur) x 9 cm (hauteur) x 7 cm (largeur) conçu, développé et utilisé par Masi et.al (2015) lors des essais en laboratoire du projet Life + Sekret. L'installation se compose de six parties principales : le compartiment réservé aux sédiments, les compartiments où sont logées les électrodes, les réservoirs d'eau et d'acide, les réservoirs en excès de la solution électrolytique, le système d'alimentation électrique et le système de contrôle du pH. La taille de l'échantillon à traiter est de 30 cm (longueur) x 9 cm (hauteur) x 7 cm (largeur) et le poids du sédiment humide utilisé dans chaque expérience est d'environ 3,5 kg. Les deux chambres latérales, où sont positionnées les électrodes et la solution électrolytique, ont une longueur de 10 cm chacune. Une grille en nylon (maille de 2 mm) et du papier filtre ont été utilisés pour séparer le compartiment à sédiments des compartiments à électrodes.

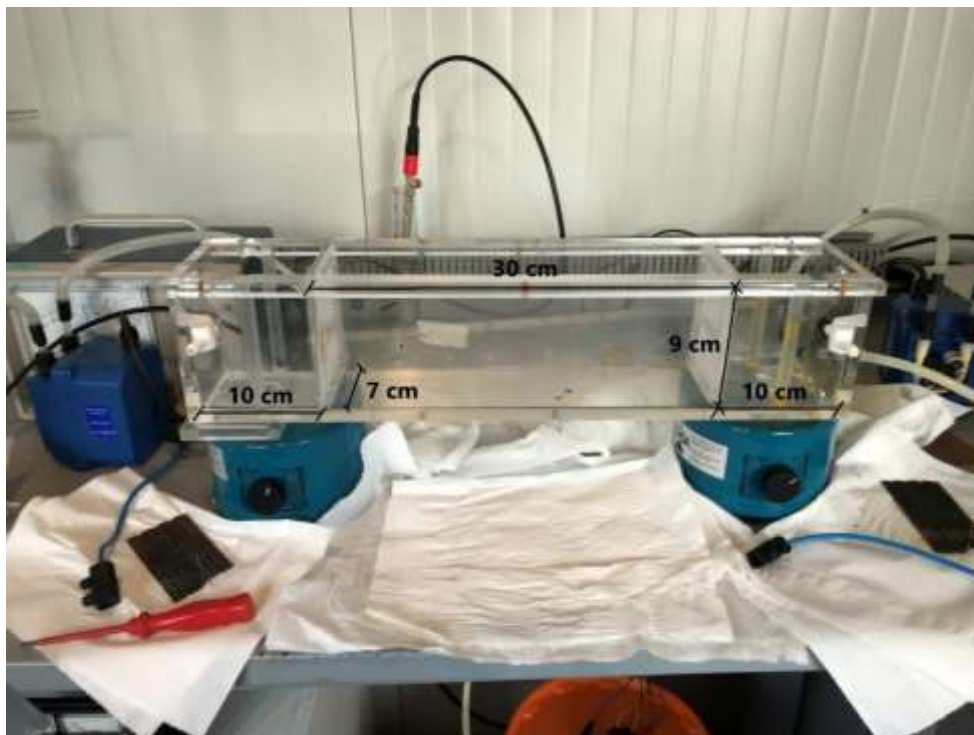


Figure 12: Dimensions des cellules électrocinétiques à l'échelle du laboratoire



Figure 4: Sections de la cellule électrocinétique

Les sédiments ont été insérés dans la cellule électrocinétique et compactés statiquement en appliquant une pression de 40 g/cm² pendant au moins 3 jours avant le début du test. La chambre anodique et la chambre cathodique sont en surface libre et les niveaux d'électrolyte sont maintenus constants grâce à 2 déversoirs placés à une hauteur de 7 cm du fond de la cellule. Les électrolytes des deux chambres sont maintenus en agitation grâce aux "ancres" mises en mouvement grâce aux agitateurs mécaniques. Le matériau compacté doit être environ 2 cm plus haut que le niveau de l'électrolyte pour éviter l'écoulement hydraulique de ce dernier à la surface du sédiment. Les deux électrodes (anode et cathode) sont constituées d'un treillis de titane revêtu d'un oxyde métallique mixte (MMO - Mixed Metal Oxide) fourni par Industrie De Nora s.p.a, Italie.



Figure 14 : Électrode

Pendant les expériences, le catholyte est maintenu à pH constant (pH = 3) au moyen d'un système de contrôle automatisé : une sonde pH est insérée dans la cellule cathodique et les valeurs sont enregistrées en temps réel par un logiciel de mesure et d'automatisation développé sur mesure qui

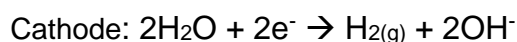
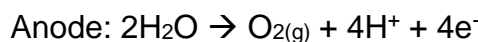
commande automatiquement une valve pour l'injection de la solution acide dans la cellule elle-même.

Les deux chambres latérales, au moyen d'une pompe péristaltique, sont d'abord remplies d'eau désionisée à une vitesse constante (4 litres/heure) afin de compenser les pertes d'eau dues, par exemple, à l'électrolyse et à l'évaporation. Pendant le processus, la solution dans la cellule anodique sera spontanément enrichie en ions H_3O^+ , tandis que la solution dans la cellule cathodique aura tendance à être basique et donc un dosage continu d'une solution d'acide nitrique 3,7 M doit être fourni pour maintenir, comme mentionné ci-dessus, le pH à des valeurs égales à 3.



Figure 15 : Système de contrôle du pH

Un courant constant de 0,5 A (densité de courant d'environ 80 A/m²) a été appliqué aux électrodes afin de créer une circulation de courant électrique à l'intérieur du sédiment qui provoque une séparation électrocinétique et donc la migration des polluants (voir chapitre 3 : "Technologies de traitement électrocinétique"). L'écoulement du courant provoque l'électrolyse de l'eau, qui modifie le pH du catholyte et de l'anolyte selon les réactions suivantes :



Naturellement, le catholyte, en l'absence d'"interventions", atteindrait rapidement un état de nette basicité qui conduirait à une lente désorption des contaminants présents dans le sédiment : cependant, grâce au dosage contrôlé et automatisé de la solution acide, qui est effectué lorsque le pH de l'électrolyte dépasse la valeur 3, il est possible de contrer ce processus qui augmente significativement le temps de décontamination.

Vous trouverez ci-dessous le diagramme de laboratoire pour les tests électrocinétiques.

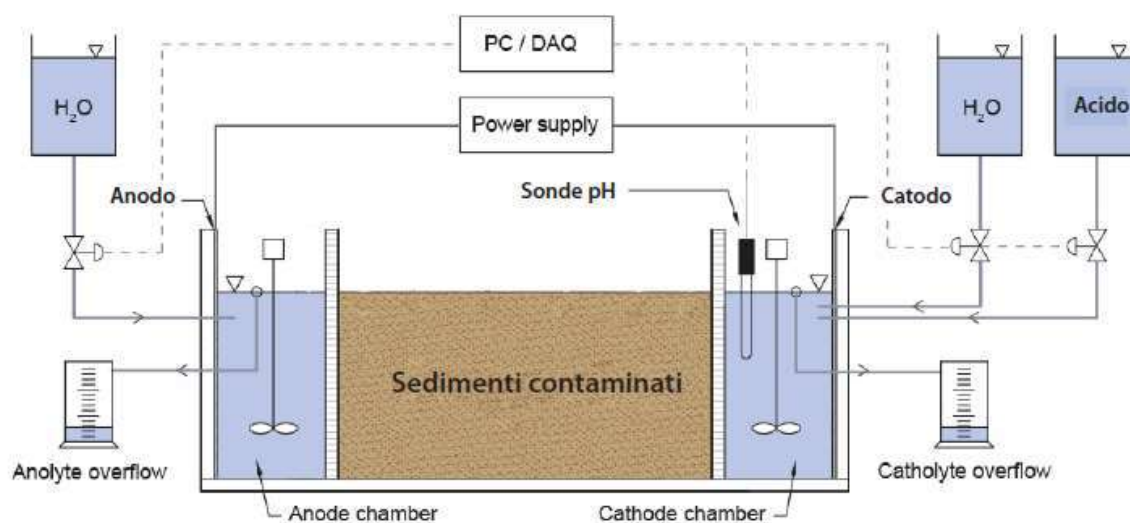


Figure 16 : Schéma de laboratoire

Il est important de souligner le développement, en particulier pendant la première phase de traitement, de quantités importantes de chlore gazeux, selon le rapport suivant :



En effet, en raison de la teneur en sel de l'eau de mer, la concentration en chlorure est assez élevée et il conviendrait de collecter et de transporter le gaz développé dans un laveur contenant une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) afin de transformer le chlore gazeux en hypochlorite.

Plus précisément, l'équipement représenté a été utilisé pour 3 expériences :

L'expérience n°1 - concernant les sédiments provenant du chantier naval Lucchini du port de Piombino - a débuté le 11 février 2019 et a duré 30 jours ;

L'expérience n°2 - concernant les sédiments provenant de la Zone du Petit Bassin du Port de Piombino - a débuté le 19 mars 2019 et a duré également 30 jours ;

L'expérience n° 3 - concernant les sédiments de la zone d'amarrage des navires du port de Piombino, réalisée en mars 2019, a débuté le 14 mai 2019, d'une durée d'au moins 60 jours et donc actuellement en service.

La première opération à effectuer lors de la mise en œuvre des essais électrocinétiques consiste à homogénéiser le sédiment à décontaminer à l'intérieur des seaux puis à le placer dans la "cellule centrale de décontamination". Ensuite, le sédiment est compacté statiquement en appliquant une pression de 40 g/cm² pendant au moins 3 jours avant le début de l'essai afin d'éliminer l'excès d'eau présente dans le matériau. Ensuite, les solutions électrolytiques sont automatiquement pompées dans les deux chambres latérales au moyen d'une pompe péristaltique et les électrodes sont connectées à un "bloc d'alimentation stabilisé" qui fonctionne en régulation de courant. Pendant l'expérience, un courant constant de 0,5 A est appliqué, ce qui produit une densité de courant de 80 A/m². Ci-dessous se trouvent les photos des phases de préparation de l'essai EKR des sédiments provenant de la Zone du Petit Bassin du Port de Piombino.



Figure 5: Sédiments homogénéisés et mise en place dans la chambre centrale



Figure 6: Compactage des sédiments et début de l'expérience

Critères de conception de l'installation pilote EK

La dernière partie de l'article qui suit porte sur la conception et le prototypage d'une installation pilote de décontamination électrocinétique cylindrique. L'objectif principal était d'étendre les essais à

l'échelle du laboratoire à une échelle pilote et d'essayer d'évaluer les conditions de fonctionnement de l'usine afin d'optimiser et d'affiner le traitement de décontamination pour les développements futurs.

Le projet consiste en la réalisation d'une installation pilote de forme cylindrique creuse, composée essentiellement d'une électrode unique (+) placée au centre et de six électrodes (-) placées à l'extrémité du cylindre lui-même. Cette forme particulière a été choisie de telle sorte que le flux électrique généré par l'application de courants électriques de faible intensité est dirigé radialement de la zone centrale vers la zone externe. L'objectif est de passer d'une configuration à mailles carrées/rectangulaires à une configuration à mailles hexagonales : au centre de chaque hexagone, il y a une anode (+) et à l'extrémité, 6 cathodes (-). Chacune des 6 cathodes est partagée par 3 cellules en même temps et donc le flux électrique à proximité de la cathode est le double de celui de l'anode. Les expériences à venir auront pour but de vérifier et d'étudier les effets bénéfiques possibles de la décontamination électrocinétique à l'aide d'une configuration à mailles hexagonales.

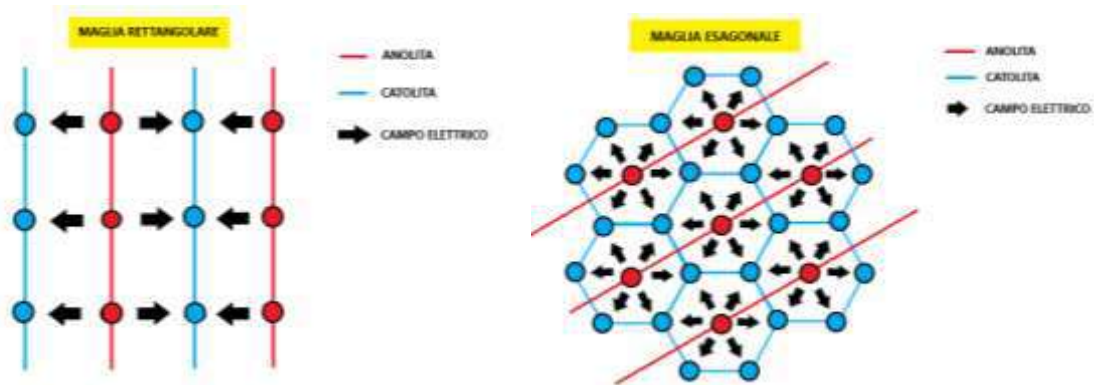


Figure 7: Différences entre mailles rectangulaires et hexagonales

Après une étude approfondie de la littérature et grâce à l'expérience acquise dans le cadre du projet Life+ Sekret, les principaux paramètres de dimensionnement peuvent être énumérés comme suit :

mobilité des ions (électromigration), des molécules d'eau (électrosmose) ou des particules chargées (électrophorèse) : exprimée en $m^2/(V*s)$ et représente la vitesse à laquelle les ions/molécules/particules se déplacent dans une matrice solide soumise à une différence potentielle spécifique. Lagemann indique les valeurs moyennes de mobilité suivantes :

H⁺ cations (électromigration) : $\approx 33 \times 10^{-8} m^2/Vs$;

anions OH⁻ (électromigration) : $\approx 18 \times 10^{-8} m^2/Vs$;

ions métalliques (électromigration) : $\approx 5 \times 10^{-8} m^2/Vs$

molécules d'eau (électrosmose) : $\approx 0,5 \times 10^{-8} m^2/Vs$

particules d'argile polarisée (électrophorèse) : \approx entre 0,01 et 0,3 $\times 10^{-8} m^2/Vs$

En fait, le déplacement réel des ions métalliques est probablement plus lent que celui indiqué ci-dessus et en considérant une valeur conservatrice, une mobilité ionique égale à celle choisie pour le projet Life+ Sekret est établie, égale à $MI=0.1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$;

Résistivité du sol (R) : s'exprime en $\Omega\cdot\text{m}$ et est l'inverse de la conductivité exprimée en S/m. Pour un sol normal, la résistivité varie généralement entre 10 et 1000 $\Omega\cdot\text{m}$, pour les sédiments marins, cependant, les choses empirent : en fait, la conductivité de l'eau de mer est de $\approx 5 \text{ S/m}$ correspondant à une résistivité de 0,2 $\Omega\cdot\text{m}$;

Densité maximale de courant : suite à l'expérience et aux résultats obtenus lors d'essais électrocinétiques en laboratoire, une densité de courant de 80 A/m² est fixée ;

distance entre électrodes : dans l'installation pilote conçue, la distance entre l'anode centrale et les cathodes externes est de 200 mm ;

hypothèse de dimensionnement : le dimensionnement consiste à fixer une durée maximale admissible de décontamination et sur la base de la distance entre les électrodes, la résistivité du sédiment et la densité de courant permettent de calculer la puissance nécessaire en kWh et donc le coût total de l'énergie (considérant un coût d'énergie égal à 0,3 €/kWh). La résistivité peut être augmentée en lavant les sédiments avant de commencer le traitement.

La tension est égale à $= \text{Résistivité}[\Omega\text{m}] \cdot \text{Distance}[\text{m}] \cdot \text{Densité}[\text{A}/\text{m}^2]$.

La puissance, calculée en kW est égale à $= (\text{Volume}[\text{m}^3]) / (\text{Distance}[\text{m}] \cdot \text{Densité}[\text{A}/\text{m}^2] \cdot \text{Tension}[\text{V}] \cdot 1000$

Conception de l'installation pilote EK

Les critères de conception de l'installation pilote ont déjà été définis au chapitre 4.4, auquel il convient de se référer. Le projet consiste en la réalisation d'une installation pilote de forme cylindrique creuse, choisie pour que le flux électrique généré par l'application de courants électriques de faible intensité soit dirigé radialement de la zone centrale vers la zone externe. La conception a été réalisée à l'aide du logiciel de conception mécanique Autodesk Inventor.

Dimensionnement géométrique

L'installation pilote a été conçue pour le traitement d'une matrice solide d'un poids total d'environ 60 kg, correspondant à un cylindre creux de 100 mm d'épaisseur et de hauteur $\approx 460 \text{ mm}$. La hauteur de la solution électrolytique à l'intérieur du prototype a été jugée inférieure d'environ 30 mm (430 mm) au niveau du sédiment lui-même, afin d'éviter la formation d'un écoulement hydraulique de l'électrolyte à la surface du sédiment. De plus, comme dans l'installation de laboratoire, il est nécessaire de prévoir deux géotextiles qui ont pour fonction fondamentale de séparer le compartiment du sédiment des compartiments des électrodes. Le géotextile à utiliser est construit par le "BOODE waterwell system" avec une épaisseur d'environ 2 mm et est le même que celui utilisé lors du projet européen Life+ Sekret.



Figure 20. Enveloppe géotextile

Ci-dessous est présentée une image du fichier "PDF 3D" générée lors de la planification de l'installation, dans lequel les différents éléments qui composent le réacteur sont mis en évidence.

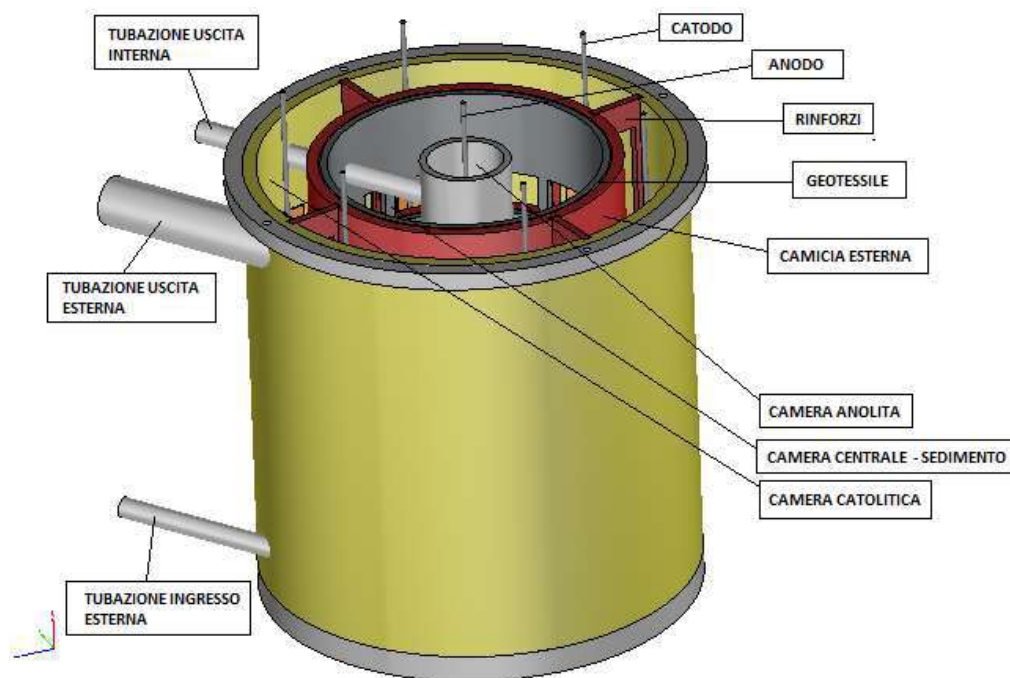


Figure 21 : Système pilote et composants individuels

Il était absolument nécessaire de concevoir une "chemise" à insérer entre le matériau à décontaminer et le compartiment extérieur du catholyte dans le but fondamental de bloquer et d'arrêter le géotextile en contact avec le sédiment lui-même, afin qu'il ne puisse pas bouger et que tout déversement de matériau soit ainsi évité. La chemise a également été munie d'une boutonnière pour permettre son insertion correcte et facile autour du boîtier cylindrique. Des trous à mailles carrées ont également été prévus sur la chemise et sur les deux composants à l'intérieur du cylindre creux : ils ont été conçus pour avoir un pourcentage de perçage d'environ 50 %. Elle n'est pas

excessive afin de ne pas compromettre la stabilité et la résistance du prototype lui-même. Afin d'améliorer la résistance du système, 4 renforts ont été prévus, également perforés pour permettre le passage de l'électrolyte, pour être logés dans la chambre externe du catholyte.

Les chambres anolite et catholyte sont en surface libre et les niveaux d'électrolyte sont maintenus constants grâce à 2 tuyaux de trop-plein. La chambre centrale (anolitique) est d'abord remplie d'eau désionisée grâce à une pompe péristaltique avec un débit fixe de 60 litres/heure (1 litre/minute), afin de permettre un bon échange d'eau à l'intérieur du département anolitique et pour compenser les pertes d'eau dues par exemple à l'électrolyse et l'évaporation. La pompe est fabriquée par "SEKO", qui conçoit des pompes doseuses et des systèmes de mesure pour les marchés du traitement des eaux et des procédés industriels. Le modèle PSH a été choisi avec un fonctionnement tout ou rien et une contre-pression de service maximale de 0,1 bar. L'annexe V contient la fiche technique de la pompe.

Méthodes de vérification du prototype

Il faut garder à l'esprit le développement de quantités importantes de chlore gazeux, comme le démontrent les expériences de laboratoire, en particulier pendant les premiers jours de traitement : pour cette raison, l'usine est équipée d'un capuchon étanche dans lequel est prévu un trou de fil de gaz ¼" nécessaire pour transporter et traiter le chlore gazeux développé dans un épurateur. Un trou est également prévu sur le bouchon pour permettre le passage d'une sonde pH/température dont les valeurs seront enregistrées en temps réel par un logiciel de mesure et d'automatisation qui pilotera automatiquement une "vanne trois voies" pour le dosage de la solution acide.

La sonde de pH/température sera achetée à la société "Mettler-Toledo S.p.A." qui produit des capteurs utilisés dans les unités d'électrolyse d'importantes installations industrielles ici en Toscane. En parallèle, sera également acheté un émetteur multi-paramètres. L'achat d'un capteur pour mesurer le niveau de remplissage des chambres à l'intérieur de l'installation pilote doit également être envisagé. Ce dernier sera acheté auprès de "SICK Italia" qui est l'un des principaux fabricants de capteurs et de systèmes d'automatisation. Pour la sonde de pH/température, le modèle "NPRO4260I/SG/225" a été choisi, pour le transmetteur, le modèle "M300 PROCESS 2-CH, 1/4 DIN" a été choisi et pour le capteur de niveau, le modèle "LFP0500-A4NMB". Les annexes VII/VIII/IX contiennent les fiches techniques correspondantes.

Enfin, il est nécessaire de créer un logiciel personnalisé pour l'acquisition de ces capteurs et pour le contrôle du processus dans Labview, l'affichage sur un graphique, le réglage des points de consigne et la sauvegarde des données dans un fichier. Le système numérique sera développé et fourni par "Florence Engineering S.r.l.", une société spécialisée dans la résolution de problèmes liés à l'ingénierie électronique.

Le concept de l'amélioration de la mise en décharge

L'enfouissement est un procédé de traitement des sédiments dragués qui peut être correctement défini comme étant sur le site puisqu'il consiste à placer les sédiments dragués dans un bassin confiné et scellé à la base. Les sédiments sont répartis sur toute la surface du bassin avec une épaisseur qui varie en fonction de la capacité technique des machines agricoles qui peuvent les traiter. Par conséquent, l'épaisseur est généralement inférieure à un mètre. Les sédiments sont

ensuite déplacés régulièrement pour assurer une oxygénation adéquate de ces derniers. En effet, l'enfouissement consiste à favoriser les processus biodégradables au détriment de l'écologie microbienne des sédiments eux-mêmes, avec un intérêt particulier pour les processus oxydatifs. Une plante de bordure de champ doit donc assurer le bon équilibre entre les nutriments du système et le transfert de l'oxygène aux populations microbiennes. Cela se fait généralement en mélangeant le matériau et en ajoutant des macroéléments tels que l'azote et le phosphore et des agents appropriés (agents de charge) pour faciliter l'échange de gaz dans une matrice, autrement à grains fins et réfractaires aux échanges gazeux, qu'il s'agisse d'oxygène ou de produits volatils éventuellement produits par la dégradation des contaminants primaires. En outre, une teneur en humidité et un pH appropriés de la matrice sous traitement doivent être maintenus, ce qui est en fait une condition préalable à l'activité métabolique microbienne. Les temps de séjour dans l'installation sont variables en fonction de la nature et de la concentration du polluant et des conditions environnementales.

L'amélioration de l'enfouissement consiste à inoculer à la matrice des isolats microbiens, qu'il s'agisse de bactéries ou de champignons, d'autochtones ou d'allochtones, qui présentent des activités métaboliques intéressantes, comme la capacité de dégrader les contaminants primaires des sédiments sous traitement.

Dans le cas spécifique du projet, les sédiments seront inoculés avec la souche de champignon *Sclerotinia* sp. MUT 5852, qui s'est déjà révélée capable de réduire significativement la teneur en TPH dans des expériences mésocosmiques dédiées à la modélisation d'installations d'enfouissement pour le traitement des sols et des sédiments de dragage des rivières, contaminés par des hydrocarbures lourds (Syracuse, 2018, Becarelli 2019).

L'expérimentation prévoit l'inoculation de la biomasse fongique à un pourcentage en poids de fraises de 10% dans les mésocosmes expérimentaux.

L'expérimentation du mésocosme implique la préparation de 3 vaisseaux par temps d'analyse dans deux trains de traitement : l'un inoculé avec le champignon candidat : une culture améliorée et l'autre non inoculé : une culture de terre, contenant un sédiment corrigé dans le rapport des macronutriments au rapport spécifique 100:10:1 respectivement de C:N:P et sali avec 10% en poids de matière lignocellulosique (copeaux de bois).

Un total de 18 mésocosmes est ensuite obtenu, maintenu en l'absence de lumière directe à température ambiante et homogénéisé une fois par semaine, avec correction de la teneur en eau, initialement corrigée à 80% de la capacité maximale de rétention d'eau, par pesée sur une balance de précision.

Le poids initial de chaque mésocosme individuel a été corrigé à 460 g, l'expérience a débuté le 28 juin 2019 et s'est terminée le 28 juillet 2019.

Ci-dessous des images relatives à la préparation des mésocosmes sont présentées.



Figura 8: Mesocosmi di enhanced landfarming



Figure 23 Amélioration des mésocosmes d'enfouissement

4. Bibliographie

Iannelli, R., M. Masi, A. Ceccarini, M. Ostuni, R. Lageman, A. Muntoni, D. Spiga, A. Poletti, A. Marini, and R. Pomi (2015). "Electrokinetic remediation of metal-polluted marine sediments: experimental investigation for plant design". In: *Electrochimica Acta* 181, pp. 146–159. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.04.093.

Iannelli, R., M. Masi, and A. Ceccarini (2016). "Gestione e trattamento degli elettroliti nella bonifica elettrocinetica di matrici contaminate da metalli pesanti". In: *Ingegneria dell'Ambiente* 3.2, pp. 140–152. DOI: 10.14672/ida.v3i2.466.

ICRAM (2006). Progetto preliminare di bonifica dell'area marina inclusa nella perimetrazione del sito di bonifica di interesse nazionale di Livorno. Tech. rep., p. 134.

Lageman, R and WPool (2009). "Experiences with field applications of electrokinetic remediation". In: *Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater*, C. Cameselle and K. R. Reddy. John Wiley & Sons, Inc., pp. 697–717. DOI: 10.1002/9780470523650.ch7.

Lageman, R, W Pool, and G. A. Seffinga (1989). "In-Situ Bodensanierung durch elektrokinetischen Schadstofftransport". In: *Sanierung kontaminierter Standorte*. Ed. by E. S. Verlag. Vol. 33. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis. Berlin, Germany, pp. 255–282.

Masi, M. and R. Iannelli (2015). "Trattamento elettrocinetico di sedimenti di dragaggio portuale contaminati da metalli pesanti: il progetto life+ "SEKRET"". In: *Ingegneria dell'Ambiente* 2.2, pp. 45–58. DOI: 10.14672/ida.v2i2.334.