



Projet SEDITERRA (N°CUP : I42F17000010006)



ATTIVITÀ T2.3 : IMPIANTO PILOTA DI TRATTAMENTO DEI SEDIMENTI NON IMMERGIBILI

ACTIVITE T2.3 : PILOTES DE TRAITEMENTS DE SÉDIMENTS NON IMMERGEABLES

PRODOTTO T2.3.3 - TRATTAMENTO DI SEPARAZIONE GRANULOMETRICA E SOIL WASHING

LIVRABLE T2.3.3 - TRAITEMENT PAR SÉPARATION GRANULOMÉTRIQUE ET « SOIL WASHING »



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

ANNÉE 2020 / ANNO 2020

<p>Nom du livrable :</p> <p>Nome del deliverable :</p>	<p>Traitement par séparation granulométrique et Soil Washing</p> <p>Trattamento di separazione granulometrica e Soil Washing</p>
<p>Redatto da :</p>	<p>Fabiano Pilato ; Andrea La Camera ; Lorenzo Morroni</p>
<p>Validé par / Validato da :</p>	<p>Enrichetta Barbieri ; David Pellegrini</p>
<p>Mise en forme finale / Formattazione finale</p>	<p>Erwan Tessier (INSA de Lyon)</p>



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

INSA | INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON

ORGANISATION DU DOCUMENT :

SYNTHÈSE DU LIVRABLE EN FRANÇAIS ET EN ITALIEN

LIVRABLE T2.3.3 INTÉGRAL (en italien)

LIVRABLE T2.3.3 INTÉGRAL (en français)

ORGANIZZAZIONE DEL DOCUMENTO :

SINTESI DEL DELIVERABLE IN FRANCESE E ITALIANO

PRODOTTO T2.3.3 INTEGRALE (in italiano)

PRODOTTO T2.3.3 INTEGRALE (in francese)

SOMMAIRE GÉNÉRAL

I.	SYNTHÈSE DU LIVRABLE	5
II.	SINTESI DEL DELIVERABLE	6
III.	DELIVERABLE T2.3.3	7
	3.1) INTRODUZIONE	7
	3.2) PRINCIPI GENERALI E OBIETTIVI DEL TRATTAMENTO	8
	3.3) MATERIALI E METODI DI MESSA IN OPERA DEL TRATTAMENTO	8
	3.4) PROTOCOLLO DELLE OPERAZIONI	10
	3.4.1) Trattamenti soil washing - ISPRA di Livorno	10
	3.4.2) Trattamenti di separazione meccanica – INSA Tolone	16
	3.5) RISULTATI	17
	3.5.1) Risultati - sedimento Livorno	18
	3.5.2) Risultati sedimento Cagliari	23
	3.6) COMPONENTE ECONOMICA	32
	3.7) CONCLUSIONI E PROSPETTIVE	33
	3.8) RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI e NORMATIVI	35
	3.9) LISTA ALLEGATI	35
IV.	LIVRABLE T2.3.3	36
	4.1) INTRODUCTION	36
	4.2) PRINCIPES ET OBJECTIFS DU TRAITEMENT	37
	4.3) MATÉRIELS ET MÉTHODES DE MISE EN OEUVRE DU TRAITEMENT	37
	4.4) PROTOCOLE DES OPÉRATIONS	39
	4.4.1) Traitements de soil washing - ISPRA de Livourne	39
	4.4.2) Traitements de séparation mécanique – INSA Toulon	45
	4.5) RÉSULTATS	46
	4.5.1) Résultats - sédiment de Livourne	47
	4.5.2) Résultats - sédiment de Cagliari	52
	4.6) COMPOSANTE ÉCONOMIQUE	62
	4.7) CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	63
	4.8) RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET NORMATIVES	65
	4.9) LISTE DES ANNEXES	65
V	ALLEGATI : METODICHE E RISULTATI ANALITICI	66

I. SYNTHÈSE

L'installation pilote pour le traitement expérimental des sédiments a rempli de manière efficace et précise sa fonction de séparation mécanique des sédiments entre les différentes classes granulométriques dont ils sont composés.

Les résultats obtenus indiquent que les sédiments portuaires traités par l'installation pilote fournissent des matériaux adéquats et de bonne qualité chimique et physique : il est en effet possible de réutiliser les fractions de sable grossier [SG] récupérées (par ex. pour : matériaux routiers, remblayage de plages, matériaux de construction, etc.).

Le processus de *soil washing* a permis d'obtenir un sable de bonne qualité environnementale, adapté pour des activités de réutilisation, ainsi qu'une fraction fine, destination principale de la migration des polluants.

Avec un matériau brut [TQ : Tel Quel] de bonne qualité environnementale, même la fraction sableuse fine [SF] pourrait également être réutilisée ; la fraction fine résiduelle [PE : Pélites] représente un faible volume de sédiment à éliminer par rapport au volume initial ce qui apporte des avantages tant du point de vue économique que du point de vue environnemental.

Par ailleurs, l'analyse chimique des eaux en contact avec les sédiments durant le traitement a permis d'évaluer le transfert des contaminants présents dans les sédiments vers les eaux de process et a constitué ainsi une analyse grossière des impacts potentiels que les différentes options de gestion et de réutilisation pourraient avoir sur l'environnement.

Cela a révélé que, tant la concentration initiale des éléments chimiques dans les sédiments, que la variabilité environnementale des sites de collecte des sédiments traités, ainsi que les différents paramètres physico-chimiques - tels que le pH, le potentiel Redox, la solubilité, la température, les concentrations d'Oxygène et de Carbone organique - en interagissant entre eux, influencent les processus de mobilité des polluants et complexifient l'évaluation qualitative des différents paramètres étudiés et du processus de traitement utilisé. L'étude de ces facteurs combinés pourrait être approfondie lors d'expériences ultérieures, notamment en utilisant des sédiments marins présentant des niveaux de contamination plus élevés que ceux testés à l'occasion de ce projet.

D'autres expériences similaires à celles menées dans le cadre du projet Sediterra sont nécessaires et souhaitables, afin de mettre en œuvre et de promouvoir la récupération et l'utilisation des matériaux traités dans le cadre de travaux de réemplois bénéfiques.

Il convient de continuer à approfondir les expérimentations menées, y compris par le développement et l'application de nouvelles techniques intégrées et innovantes, appliquées à des sédiments marins présentant des niveaux de contamination plus élevés que ceux testés dans le cadre de ce projet.

II. SINTESI

L'impianto pilota per il trattamento sperimentale dei sedimenti ha svolto in maniera efficiente e precisa la propria funzione di separazione meccanica dei sedimenti nelle diverse classi granulometriche di cui si compongono.

I risultati ottenuti indicano che i sedimenti portuali trattati attraverso l'impianto pilota possono fornire materiali idonei e di buona qualità chimico-fisica: sono quindi possibili interventi di riutilizzo delle frazioni sabbiose grossolane [SG] recuperate (es. sottofondi stradali, ripascimenti arenili, materiali edili, etc...).

Dal processo di *soil washing* si è ottenuta una sabbia caratterizzata da una buona qualità ambientale, idonea per le attività di riutilizzo e una frazione fine quale principale sede di destinazione nella migrazione dei contaminanti.

Con un materiale di partenza tale quale [TQ] di buona qualità ambientale, anche la frazione sabbiosa fine [SF] potrebbe essere riutilizzata; la residua frazione pelitica [PE] rappresenta un esiguo volume di sedimento da smaltire rispetto alla totalità del sedimento tal quale, con benefici economici e ambientali.

Tramite l'esecuzione dei test di cessione è stata valutata, inoltre, la capacità di trasferimento dei contaminanti dal sedimento alle acque di processo, simulando i potenziali impatti che le differenti opzioni di gestione e riutilizzo potrebbero avere sull'ambiente.

E' apparso evidente che sia la concentrazione di partenza degli elementi chimici indagati nei sedimenti, sia la grande variabilità ambientale del sito di prelievo dei sedimenti trattati, anche altri fattori chimico-fisici, quali pH, potenziale Redox, solubilità, temperatura, concentrazioni di Ossigeno e Carbonio organico, interagendo tra loro, influiscono sui processi di mobilità degli inquinanti, apportando ulteriori difficoltà nella valutazione qualitativa dei diversi parametri indagati nonché del processo di trattamento utilizzato. Lo studio di tali fattori interferenti potrebbero essere oggetto di ulteriore approfondimento in successive sperimentazioni, specialmente se applicate a sedimenti marini con livelli di contaminazione di partenza più elevati rispetto a quelli testati all'interno di questo progetto.

È altresì auspicabile continuare ad approfondire le sperimentazioni condotte con l'impianto pilota anche attraverso lo sviluppo di ulteriori tecniche integrate ed innovative.

III. DELIVERABLE T2.3.3 : TRATTAMENTO DI SEPARAZIONE GRANULOMETRICA E SOIL WASHING

3.1) INTRODUZIONE

Tra le numerose attività di ricerca e supporto tecnico-scientifico per conto anche delle Amministrazioni Pubbliche centrali e periferiche (MATTM, Regioni, Università), ISPRA conduce da tempo programmi di ricerca scientifica finalizzati all'abbattimento delle cariche inquinanti presenti nei sedimenti marini e fluviali.

Presso la sede ISPRA di Livorno è stata allestita un'area sperimentale dedicata all'applicazione di differenti trattamenti sia su scala pilota che di laboratorio. A tale scopo è stato assemblato un *impianto pilota* con la funzione principale di separare meccanicamente le differenti frazioni granulometriche che costituiscono il sedimento marino e fluviale proveniente da interventi di dragaggio.

Le attività sperimentali riportate nel presente documento sono state condotte all'interno dei progetti di ricerca, di cui ISPRA è partner, denominati SEDITERRA e GRRinPORT. Entrambi i progetti di ricerca sono cofinanziati nell'ambito del Programma di Cooperazione Transfrontaliera Marittimo Italia-Francia 2014-2020.

Tutte le attività incluse nei progetti summenzionati non sono svolte a scopo di lucro ma hanno valenza esclusivamente tecnico-scientifica in quanto finalizzate all'individuazione di possibili protocolli per il riutilizzo a terra dei materiali dragati provenienti da porti industriali e/o turistici (SEDITERRA) ovvero per l'individuazione di soluzioni tecniche innovative per il trattamento dei sedimenti portuali contaminati (GRRinPORT).

Le attività sperimentali condotte con l'impianto pilota di separazione meccanica sono state oggetto di autorizzazione regionale ai sensi dell'art. 211 del D.Lgs 152/06 e s.m.i. con il Decreto Dirigenziale n. 8493 del 30/05/2018, per tale motivo ARPAT ha eseguito sopralluoghi ed alcune analisi chimico-fisiche su alcuni campioni di acque e sedimento, finalizzati al monitoraggio delle attività sperimentali previste.

Nell'allegato - *"Metodiche e risultati analitici relativi ai campioni di sedimento trattato e alle acque di processo"* sono riportati i risultati analitici della totalità dei parametri ricercati nei differenti campioni di acque e sedimento durante la sperimentazione, mentre nel capitolo 3.5 sono riportate osservazioni relative solo agli elementi le cui concentrazioni hanno denotato qualche difformità e superato dei limiti normativi di riferimento, sia per i sedimenti provenienti dal sito di Livorno che quelli di Cagliari.

3.2) PRINCIPI E OBIETTIVI DEL TRATTAMENTO

L'obiettivo principale del processo operato dall'impianto è separare quantitativi sperimentali di sedimento marino nelle diverse frazioni granulometriche che lo costituiscono, in modo da recuperare la componente sabbiosa, cioè la parte di sedimento solitamente meno contaminata e riutilizzabile. Le frazioni sabbiose separate possono comunque essere più o meno contaminate e quindi suscettibili di ulteriori trattamenti, che possono consistere in semplici lavaggi, accompagnati da azioni meccaniche di raschiatura e spazzolatura (tecniche tipiche dei processi di *soil-washing*), o processi chimico-fisici e biologici più complessi (ossidoriduzioni, *bio-remediation*, etc.), da applicarsi anche alle frazioni sabbiose più fini.

Secondo quanto riportato in letteratura, le granulometrie di taglio su cui si opera la separazione vanno dai 63 a 40 μm , dimensioni che rispondono ad esigenze di tipo tecnologico ed economico e ad esigenze relative al contenuto di inquinante che le sabbie possono contenere.

Nonostante la potenzialità massima della sola unità di idrociclonatura sia superiore ai quantitativi necessari alla sperimentazione proposta, l'allestimento contestuale delle altre unità dell'apparato impiantistico, soprattutto la capacità di trattamento delle celle di attrizione (125 l cad.), 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.

L'attività sperimentale è finalizzata all'ottimizzazione della gestione del sedimento trattato e pertanto prevede l'utilizzo di piccoli quantitativi di sedimento da cadenzare in un tempo di lavorazione piuttosto lungo (indicativamente 60-90 minuti per ciascuna prova sperimentale).

3.3) MATERIALI E METODI DI MESSA IN OPERA DEL TRATTAMENTO

La separazione della sabbia può avvenire tramite una classificazione per via umida del sedimento, classificazione che in un mezzo fluido è 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 (idrocycloni). La frazione fine del sedimento (più contaminata) viene avviata alla fase di dewatering mentre le acque di processo sono raccolte in appositi contenitori ed idoneamente smaltite da ditte autorizzate.

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

1. modulo per la rimozione di materiali a basso peso specifico, quali posidonia oceanica e frammenti di plastica
2. vibrovagliatura
3. idrocycloni
4. celle di attrizione
5. classificatore a spirale

I sedimenti utilizzati nelle sperimentazioni, prelevati dai siti di dragaggio precedentemente individuati (*livrable T2.1.1: rapport de synthese de caracterisation prealables*) sono stati conferiti nell'area sperimentale ISPRA di Livorno a bordo di autocarri a tenuta stagna, in forma palabile e contenuti in Big Bags.

Il sedimento in entrata all'impianto è da considerarsi a norma di legge un rifiuto, corrispondente al codice C.E.R. 17.05.06 <<Fanghi di dragaggio, diversa da quella di cui alla voce 17 05 05>>.

Al materiale trattato in uscita dall'impianto, sia per le frazioni da smaltire come rifiuto che per le frazioni destinate alla sperimentazione può essere attribuito il cod. CER 19.12.09, <<minerali (ad esempio sabbia, rocce)>>.

Il trattamento di separazione non comporta riduzioni di materiale salvo ridotti quantitativi necessari all'esecuzione di attività analitiche (prelievo dei campioni per l'analisi) - pari a circa 15-20 kg per ciascuna prova - prelevati nei diversi step del processo, pertanto, i quantitativi raccolti a fine processo e in uscita dall'impianto sono dello stesso ordine di grandezza di quelli in ingresso.

Ogni prova sperimentale di separazione meccanica nelle diverse frazioni granulometriche ha visto l'utilizzo di circa 4 mc di sedimento (corrispondenti a circa 6 tonnellate).

L'acqua utilizzata per il funzionamento del processo è stata prelevata dall'acquedotto industriale che serve il porto di Livorno.

L'acqua di processo, preventivamente stoccata in apposite cisterne di raccolta del volume di 2,5 m³, segue un ciclo chiuso, senza scarichi durante il processo di trattamento. Difatti l'acqua utilizzata per il lavaggio dei sedimenti è stata raccolta solamente a valle del trattamento in apposito silos a tenuta stagna del medesimo volume di 2,5 m³ e in seguito smaltita come rifiuto liquido secondo le disposizioni della normativa vigente.

Considerando che l'impianto è ubicato all'interno degli ex Magazzini FS dell'area della stazione marittima del porto di Livorno, tutte le operazioni – stoccaggio temporaneo dei sedimenti marini, trattamento di separazione meccanica ad opera dell'impianto, stoccaggio dei materiali trattati per classi granulometriche, utilizzo dei materiali trattati a fini di ricerca, invio delle frazioni trattate residue allo smaltimento finale – sono state condotte al coperto, evitando così il dilavamento di eventuali residui di lavorazione ad opera delle acque meteoriche.

In ogni caso, per le fasi del trattamento, sono stati presi tutti gli opportuni accorgimenti volti ad evitare sia la perdita accidentale di acque di processo, sia la dispersione della eventuale fase liquida presente nei sedimenti marini in ingresso.

Gli unici rifiuti liquidi prodotti sono quelli risultati dal processo di trattamento, classificati come <<soluzioni acquose di scarto, diverse da quelle di cui alla voce 16.10.01>> codice CER 16.10.02.

Durante la fase di esercizio le componenti ambientali, potenzialmente soggette agli impatti diretti legati al funzionamento dell'impianto, sono l'atmosfera e il clima acustico.

Non ci sono, invece, impatti diretti sulle matrici acqua e suolo in quanto, come descritto sopra, i materiali di risulta del processo (acque di processo, sedimenti suddivisi per classi granulometriche) sono stati utilizzati nell'ambito di progetti di ricerca summenzionati ovvero smaltiti in idonei impianti di trattamento/smaltimento.

Gli impatti su atmosfera e il clima acustico sono stati esercitati esclusivamente durante i giorni di funzionamento dell'impianto (2 giornate lavorative) corrispondenti al numero dei cicli di trattamento previsti.

Per quanto riguarda le emissioni in atmosfera le uniche previste sono state quelle prodotte dall'utilizzo di un generatore di corrente alternata, alimentato a gasolio, di potenza pari al fabbisogno energetico dell'intero apparato, stimata inferiore ai 40 kW.

Il generatore utilizzato per il funzionamento dell'apparato sperimentale è stato posizionato all'esterno del capannone, esclusivamente a servizio delle attività di separazione meccanica, quindi con una messa in funzionamento limitata al numero di ore di ciascuna operazione di trattamento.

Le emissioni sonore sono state quelle prodotte dai diversi macchinari utilizzati, stimate complessivamente inferiori a 90 dB. Al riguardo, si fa presente che la messa in funzione della totalità dei suddetti macchinari è stata limitata a prove di durata inferiore a 120 minuti e che la zona in cui insiste l'impianto è esclusivamente ad uso industriale e priva di abitazioni.

Le metodiche utilizzate per l'esecuzione delle analisi chimico-fisiche ed ecotossicologiche sono fornite in ALLEGATO 3 - *"METODICHE E RISULTATI ANALITICI RELATIVI AI CAMPIONI DI SEDIMENTO TRATTATO E ALLE ACQUE DI PROCESSO"* insieme ai risultati analitici ottenuti.

3.4) PROTOCOLLO DELLE OPERAZIONI

3.4.1. Trattamenti soil washing eseguiti presso la piattaforma sperimentale ISPRA di Livorno

Il Soil Washing è un trattamento ex situ di separazione granulometrica per terreni e sedimenti contaminati basato su meccanismi fisici e/o chimici che consentono di separare le frazioni che lo compongono utilizzando una matrice acquosa, a cui può essere affiancato un lavaggio con solventi specifici per la rimozione dei contaminanti.

Prima del trattamento sperimentale è stata prevista una fase di stoccaggio dei sedimenti appartenenti ai singoli lotti all'interno di un cassone scarrabile impermeabile di volumetria adeguata per un periodo temporale idoneo ad evitare il deterioramento fisico-chimico del materiale. Il materiale da trattare è stato sottoposto a un trattamento preliminare di omogeneizzazione all'interno del medesimo cassone scarrabile, mediante minipala, effettuando così una macrovagliatura avente la finalità di rimuovere i trovanti e le frazioni lapidee più grossolane.

Allo scopo di recuperare tutte le frazioni granulometriche maggiormente suscettibili di riutilizzo quali peliti, sabbie e ghiaie, dopo i pretrattamenti di cui ai punti precedenti, il materiale è stato sottoposto al processo di separazione e classificazione meccanica vero e proprio costituito dalle seguenti sezioni :

- 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, viene sottoposto ad una specifica fase di vagliatura, mediante un rotovaglio (Foto 1), 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.



Foto 1 – Rotovaglio

- c) **Vibrovaglio** (Foto 2) 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.



Foto 2- Vibrovaglio e pompa di omogeneizzazione

- d) **Celle di attrizione** (Foto 3), (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.



Foto 3- Celle di attrizione

- e) **Unità di idrociclatura** (dimensioni: 3,50x1,3 m). E' costituita da 2 distinti idrocycloni (di cui uno *by-passabile*). L'idrociclone (Foto 4) 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 ugello 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.

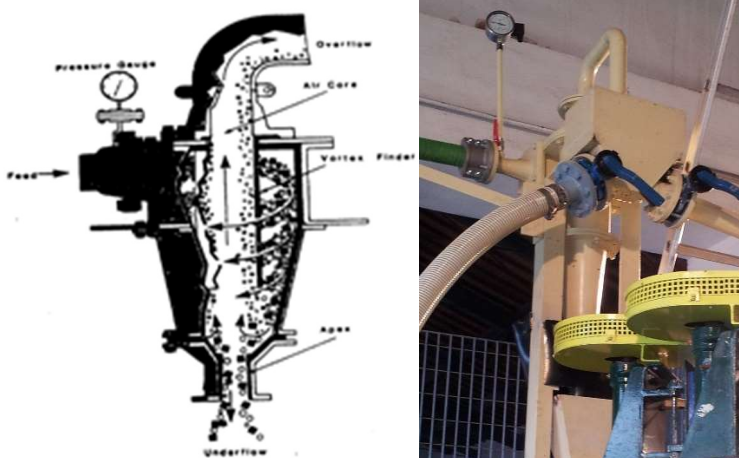


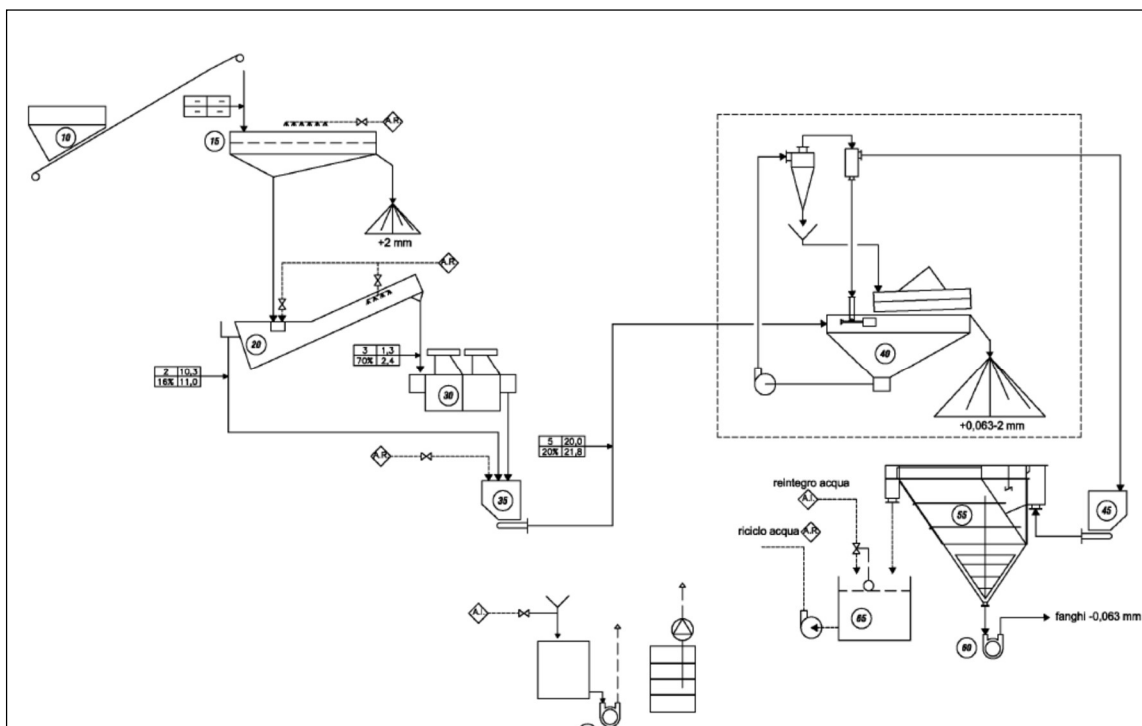
Foto 4- idrociclone

- f) **Classificatore a spirale** (dimensioni: 2,90 x 1,00 m - diam. 300 mm). Il classificatore a spirale (Foto 5) è impiegato come unità di classificazione. Il principio di funzionamento dipende dalla differente velocità di deposito delle particelle solide per differenza di densità.

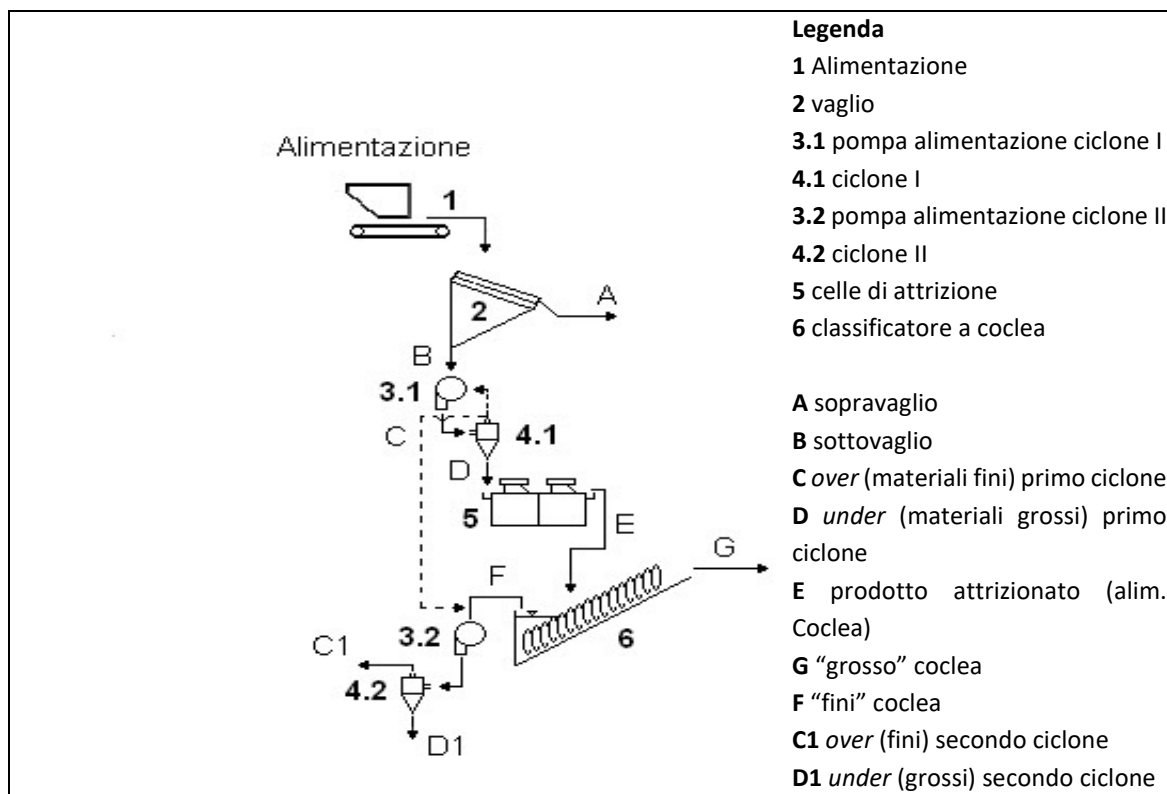


Foto 5- Classificatore a spirale

Negli **scemi 1 e 2** dell'impianto sono rappresentate le sezioni ed i flussi di acqua e sedimento che agiscono durante il **processo di trattamento meccanico dei sedimenti**.



Schema 1 - Layout impianto di separazione granulometrica



Schema 2 - Layout semplificato dell'impianto di separazione granulometrica

Tale processo può essere così descritto e schematizzato:

- il sedimento proveniente dal cassone di omogeneizzazione, denominato **SEDIMENTO TAL QUALE (TQ)**, viene caricato nella tramoggia di carico per l'alimentazione dell'impianto (1)
- le frazioni grossolane (A) (sopravaglio), generalmente costituite da conchiglie e da residui di origine organica e antropica, vengono separate dalla frazione solida sabbiosa, comprendente ancora anche la frazione argillosa e pelitica
- Il sottovaglio (B) mediante pompa ad asse verticale con cassa integrata (3.1) costituisce l'alimentazione del ciclone I (4.1), che ha il compito di classificare il materiale inviando all'overflow le frazioni più fini (C) e nel contempo di addensare all'underflow la torbida contenente il materiale più grossolano (D), che costituisce l'alimentazione alle celle di attrizione (5). Modificando i flussi di torbida e la sequenza di alcune componenti è possibile adeguare l'impianto alle caratteristiche dei materiali da trattare e agli obiettivi da raggiungere.
- Il materiale (D) alimenta il classificatore a coclea (6) che separa e disidrata il materiale con pezzatura 200µm-2 mm (G), denominato in seguito "**SABBIE GROSSOLANE**" (SG), dalla torbida contenente ancora solidi con pezzatura < 200 µm (F).
- La cella di attrizione ha la funzione di disgregare il materiale e di separare il materiale fine e il contaminante adeso alla sabbia ; questa operazione risulta più efficiente se viene effettuata su una torbida viscosa con alta concentrazione di solidi, pertanto è determinante l'operazione di addensamento svolta dal ciclone.
- All'uscita dell'overflow del Ciclone I si trova una valvola che consente di inviare il flusso alla cassa della pompa (3.2) che alimenta il ciclone II (4.2) e/o di riciclarlo parzialmente alla pompa (3.1) in funzione delle necessità della prova.
- Il materiale (F) viene inviato alla pompa ad asse verticale con cassa integrata (3.2) e, assieme all'overflow proveniente dal ciclone (4.1), costituisce l'alimentazione del ciclone (4.2) che ha il compito di recuperare in uscita dall'underflow (D1) la frazione sabbiosa residuale fine (materiale con pezzatura >63 µm) denominato in seguito "**SABBIE FINI**" (SF) e di eliminare attraverso l'overflow le argille e i limi (C1), cioè materiale con pezzatura inferiore a 63 µm, denominato in seguito "**PELITI**" (PE).
- La frazione solida trattata viene quindi totalmente separata dall'acqua di processo mediante filtri a sacchetto ed avviata ad un serbatoio di accumulo.

Le frazioni uscenti dall'impianto (solide e liquide) sono state campionate miscelando più aliquote raccolte durante il funzionamento dell'impianto ed avviate ad attività analitica, attribuendo ai campioni le seguenti sigle :

TQ = SEDIMENTO TAL QUALE SG = SABBIE GROSSOLANE

SF = SABBIE FINI PE = PELITI

Tutti i materiali residui, solidi e liquidi, sono stati infine avviati ad opportuno smaltimento secondo la normativa vigente in materia.

Alla fine del processo di trattamento le frazioni di sedimento recuperate, separate per classi granulometriche, sono state analizzate dal punto di vista chimico, fisico e biologico per la valutazione qualitativa dei materiali e l'individuazione delle opzioni di gestione e riutilizzo.

Le diverse frazioni recuperate dal processo possono essere sottoposte ad ulteriori azioni/trattamenti sperimentali finalizzate alla rimozione dei contaminanti eventualmente ancora presenti e al loro potenziale riutilizzo.

A tale scopo, nel progetto Sediterra è stata condotta un'azione di trattamento sperimentale che ha previsto la miscelazione delle frazioni sabbiose recuperate dal *soil washing* con diverse percentuali di cemento di tipo tradizionale o ad uso marino, per la realizzazione di differenti formulazioni finalizzate alla realizzazione di lastre e materiale cementizio per l'impiego in opere civili.

Questa parte sperimentale sarà trattata nel documento T.2.4.7 "*Synthèse des pilotes de traitement et valorisation*" (a cura del partner INSA). Nello stesso documento verrà illustrata anche un'ulteriore attività sperimentale svolta in parallelo presso le piattaforme trattamenti ISPRA a Livorno e INSA a Tolone in cui circa 2 tonnellate di sedimento tal quale, proveniente da 4 siti di prelievo differenti, sono state confinate all'interno di due *lisimetri* per un periodo di 26 settimane e sottoposte ad un sistema di irrigazione di acqua temporizzato, volto a simulare le condizioni climatiche specifiche della zona dell'area del Marittimo.

3.4.2. Trattamenti di separazione meccanica eseguiti presso la piattaforma sperimentale CPEM (INSA-Envisan) a Tolone

Sempre presso la piattaforma di trattamenti ISPRA a Livorno, nell'ambito delle attività di separazione granulometrica dei sedimenti, era stato previsto un focus sulla separazione di fibre vegetali (*Posidonia Oceanica*) dal sedimento proveniente dal porto di Centuri (Corsica).

A tal fine, sull'Impianto Pilota di Livorno era stato realizzato un adeguamento, dotando questo di un rotovaglio quale componente aggiuntivo, che permettesse la separazione di fibre di *posidonia* dal resto dei sedimenti.

A causa della lunga tempistica riscontrata a diversi livelli, amministrativi e burocratici, per ottenere l'Autorizzazione all'impianto di trattamento, i partner corsi non hanno potuto inviare i sedimenti dalla Corsica avvalendosi delle procedure di spedizione transfrontaliera nei tempi previsti dal progetto; pertanto, per evitare di allungare ulteriormente i tempi, si è deciso di trasferire i sedimenti corsi in Francia, e non in Italia come inizialmente previsto.

La componente “rotovaglio” dell’impianto pilota ISPRA, è stata quindi appositamente smontata, trasportata e riallestita a Tolone per l’esecuzione delle attività di separazione previste per la separazione delle fibre di *posidonia* dal sedimento tal quale.

Alla presenza di tecnici ISPRA e INSA, nei giorni 30 e 31 gennaio 2019 presso la Piattaforma CPME di Tolone sono state quindi condotte alcune prove di separazione delle fibre di *posidonia oceanica* dai sedimenti provenienti dal porto di Centuri (Corsica), con recupero finalizzato ad attività di valorizzazione energetica.

I risultati, purtroppo, non sono stati quelli attesi, probabilmente a causa del fatto che si è riscontrata una scarsa presenza di fibre di Posidonia nel sedimento dragato e, in ogni caso, forse a causa del dragaggio, tali fibre erano completamente disgregate. Inoltre, c’è da considerare che il rotovaglio ha lavorato senza il supporto del resto dell’impianto come avrebbe dovuto essere. Si può concludere dunque, che la sperimentazione può considerarsi andata a buon fine ma con una bassa efficacia di separazione.

Sarebbe opportuno riprovare ad effettuare il trattamento con un sedimento più ricco di fibre di posidonia e meno disgregate.

3.5) RISULTATI

Data la notevole quantità di dati che si sono originati da ciascuna prova di trattamento sperimentale, nel presente capitolo si riportano solamente alcune elaborazioni e considerazioni relative agli elementi chimico-fisici che sono risultati più “difformi” dagli intervalli di concentrazione totali propri dei sedimenti marini di analoghe aree marino-costiere con scarso/assente impatto antropico (Quaderno ISPRA: Aspetti tecnico-scientifici per la salvaguardia ambientale nelle attività di movimentazione dei fondali marini: dragaggi portuali; Pellegrini et al 2002.).

I risultati sono stati suddivisi secondo le 2 aree di prelievo di sedimento da trattare: Livorno e Cagliari. Per entrambi i siti di indagine, il sedimento tal quale è da considerarsi quello prelevato dal sito di deposizione portuale, talvolta analizzato su differenti aliquote e successivamente dragato e trasportato all’impianto.

Per una valutazione dei risultati ottenuti, sono stati presi in considerazione sia valori di riferimento presenti in letteratura individuati per aree marino-costiere in cui ricadono i nostri casi di studio, sia i valori “L1” e “L2”, così come definiti nel D.M. 173/2016, relativi alla gestione dei sedimenti in ambiente marino-costiero (Fig. 5.25). I risultati valutati sulla base di questi valori risultano quindi più cautelativi nel caso se ne ipotizzi il riutilizzo nella filiera terrestre, ad eccezione del parametro cloruri.

Tutti i risultati analitici relativi alle analisi condotte sia sui sedimenti trattati che sulle acque utilizzate si riportano in Allegato .

3.5.1. Risultati sedimento Livorno

3.5.1.1) Composizione granulometrica del sedimento di Livorno

La composizione granulometrica del sedimento tal quale proveniente dal sito di Livorno evidenzia un prevalente contenuto di sabbie grossolane, con una frazione pelitica inferiore al 20% del totale, come si evidenzia nel grafico di seguito riportato (Fig 5.1).

Nel processo di separazione meccanica del sedimento tal quale tramite impianto pilota, si nota che una residua frazione di sabbie fini (SF) si ritrova comunque all'interno della frazione di sabbie grossolane (SG). Ciò è dovuto al differente taglio granulometrico applicato al sedimento tal quale nel processo di trattamento su scala pilota (idrociclonatura con taglio 200 micron tra sabbie grossolane e sabbie fini) e quello previsto dalla metodica utilizzata nell'esecuzione delle analisi granulometriche in laboratorio con setacciatura e conseguente separazione a 250 micron. Quindi, la frazione di sabbie fini comprese tra 200 e 250 micron viene conteggiata come sabbia grossolana. La frazione pelitica invece viene separata in modo ottimale, infatti nelle frazioni sabbiose ne ritroviamo delle percentuali bassissime.

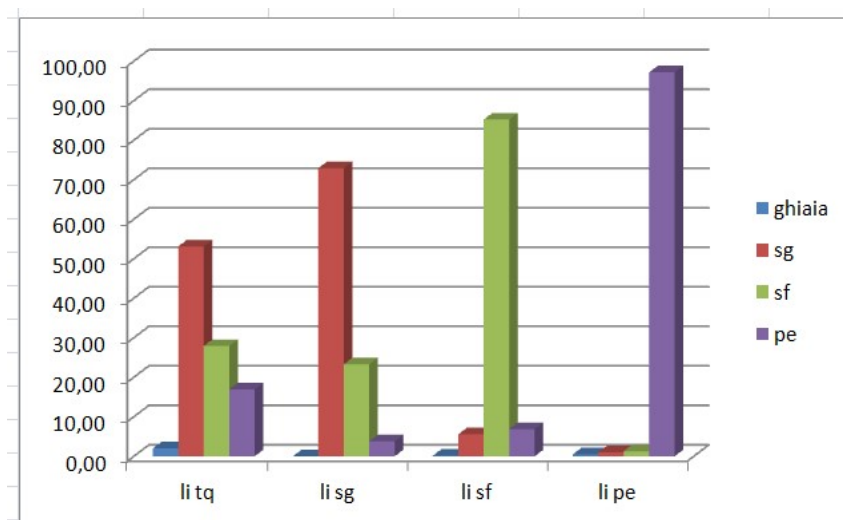


Fig 5.1 - Composizione granulometrica percentuale del sedimento di Livorno tal quale e delle frazioni ottenute dal trattamento di separazione.

3.5.1.2) Chimica del sedimento e delle acque di processo del trattamento dei sedimenti di Livorno

In riferimento ai valori chimici di aree limitrofe con bassa contaminazione e con frazione pelitica paragonabile, lo zinco nel sedimento tal quale (TQ) è l'unico elemento che evidenzia una concentrazione media (di 3 campioni diversi) con valori relativamente alti, ma comunque inferiore al valore "L1" così come definito nel D.M.173/2016.

Lo zinco contenuto in TQ lo ritroviamo, dopo separazione, maggiormente presente nella frazione pelitica (PE), dove supera ampiamente il valore “L2” del D.M.173/2016 (Fig 5.2).

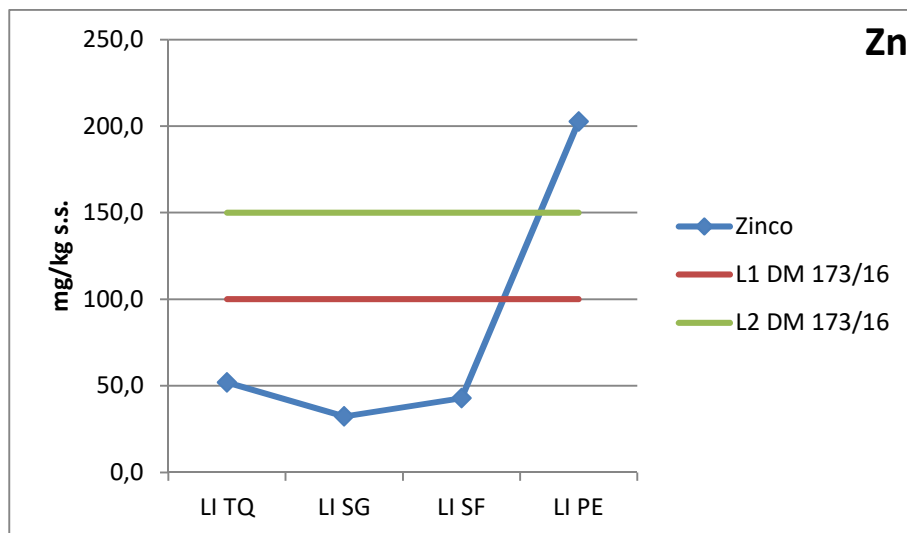


Fig. 5.2 – Andamento della concentrazione dello zinco (sedimenti Livorno).

Le concentrazioni di zinco anomale non si riscontrano tuttavia nelle acque di processo, evidenziando una scarsa solubilità del metallo che quindi risulta prevalentemente associato alla frazione solida.

Oltre allo zinco, nonostante i valori non rilevanti riscontrati nei sedimenti di partenza (TQ), sono da valutare con attenzione le concentrazioni di rame e nichel: in particolare, nella frazione PE si evidenziano concentrazioni superiori al valore “L2” (Figg. 5.3; 5.4). Inoltre, per entrambi i metalli, si nota un arricchimento delle concentrazioni nelle acque di processo in uscita dall’impianto, rispetto a quelle registrate in entrata (Fig. 5.5).

Riguardo la presenza di metalli in traccia nei sedimenti di Livorno, possiamo concludere che, seppure non siano state rilevate evidenti contaminazioni nel sedimento trattato, il processo di separazione meccanico (e di ri-mobilizzazione dei vari metalli) determina la mobilizzazione, e quindi un aumento della concentrazione di alcuni di essi da tenere sotto attenzione a seconda della gestione da individuare.

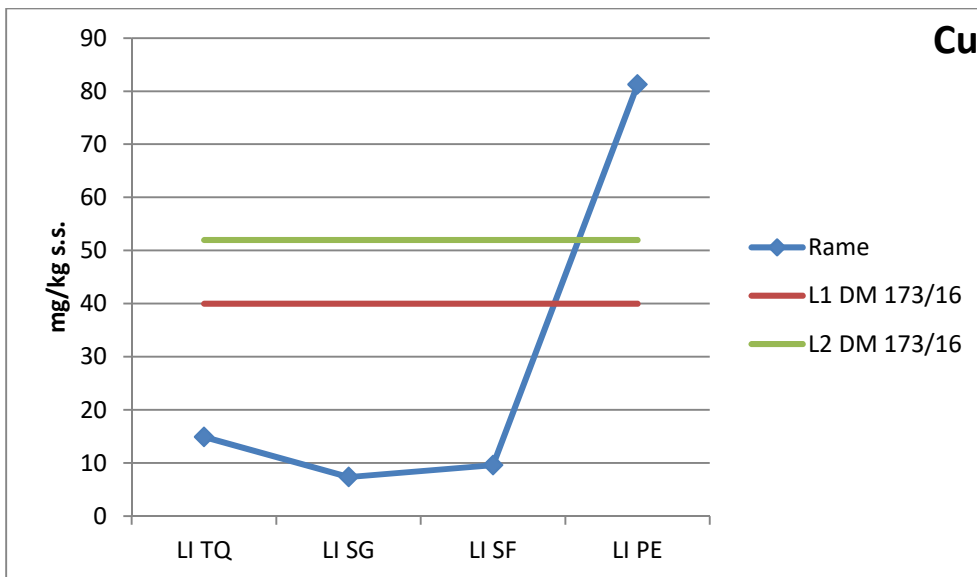


Fig. 5.3 – Andamento della concentrazione del rame (sedimenti Livorno)

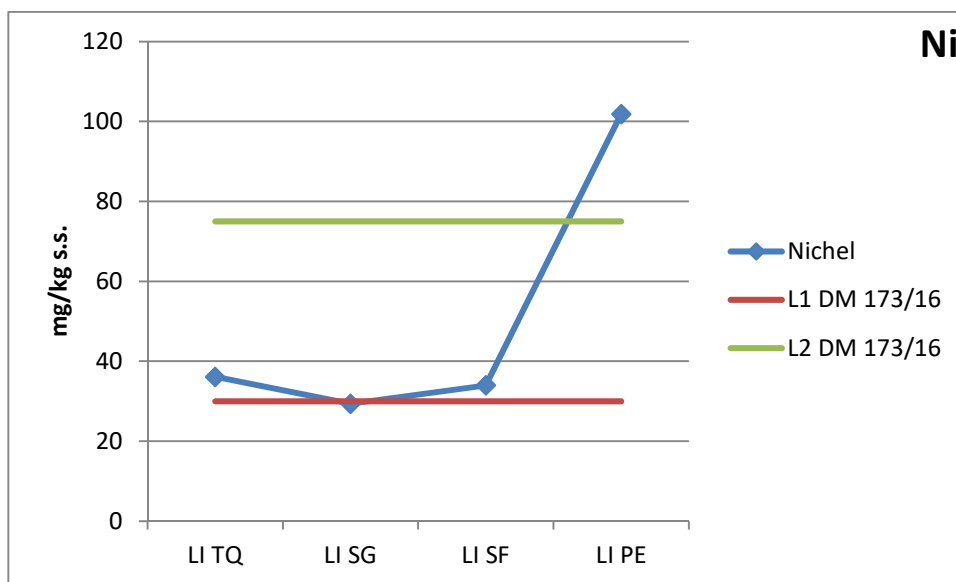


Fig. 5.4 – Andamento della concentrazione del nichel (sedimenti Livorno)

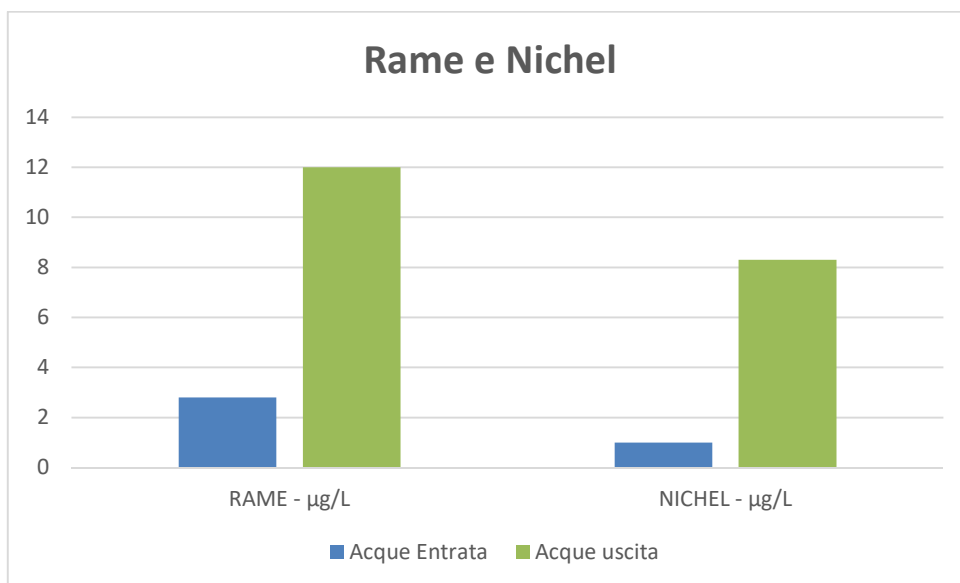


Fig. 5.5 – Concentrazione di rame e nichel nelle acque di processo (sedimenti Livorno)

Per quanto riguarda la contaminazione da organici si riportano le seguenti considerazioni: le concentrazioni dei composti organostannici (TBT) nel sedimento TQ, risultano superiori ai valori di “L1”; tuttavia si evidenzia che la sommatoria degli MBT, DBT E TBT, non oltrepassa il valore “L2” (Figg. 5.6; 5.7). La preponderanza del MBT rispetto al DBT e, a loro volta del DBT rispetto al TBT, indicherebbe una contaminazione non attribuibile a fenomeni recenti.

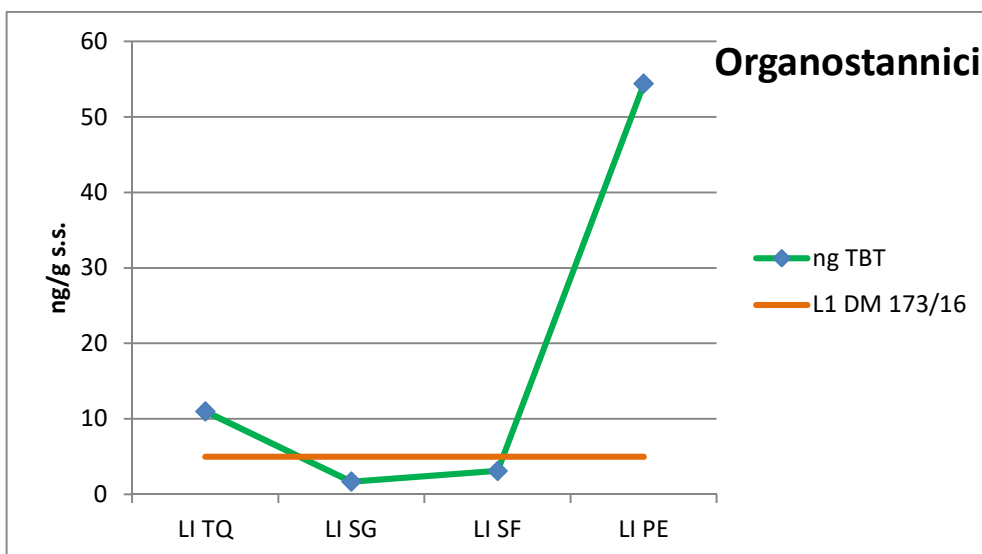


Fig. 5.6 – Andamento della concentrazione del TBT (sedimenti Livorno)

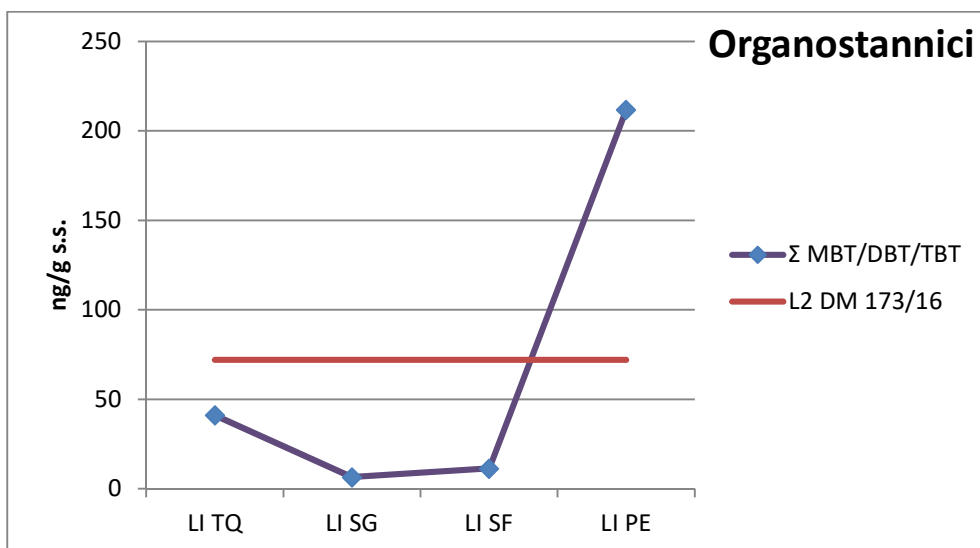


Fig. 5.7 – Andamento della concentrazione della Σ MBT/DBT/TBT (sedimenti Livorno)

Le concentrazioni degli idrocarburi pesanti ($C>12$) risultano superiori al limite “L2” in tutte le frazioni ad esclusione delle SG, con un valore massimo registrato nella frazione PE (Fig. 5.8). Tale contaminazione non è stata riscontrata nelle acque in uscita al processo, che indicando forse che gli idrocarburi presenti non possono essere separati facilmente dalla matrice in cui si trovano. Da rilevare, inoltre, le basse concentrazioni di IPA in tutte le frazioni analizzate.

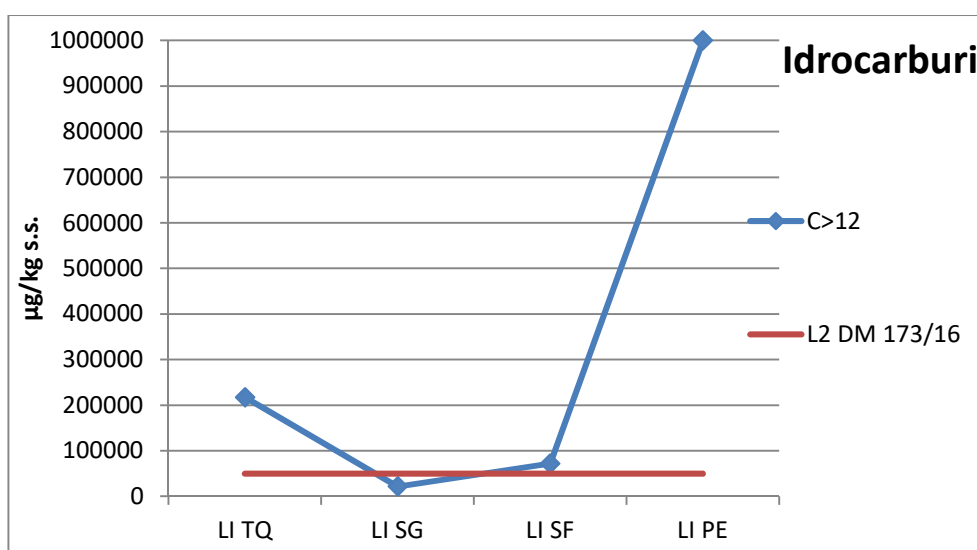


Fig. 5.8 – Andamento della concentrazione degli idrocarburi $C>12$ (sedimenti Livorno)

La sommatoria dei PCB risulta essere superiore al limite “L1” ma comunque inferiore al limite “L2” per la sola componente PE (Fig. 5.9).

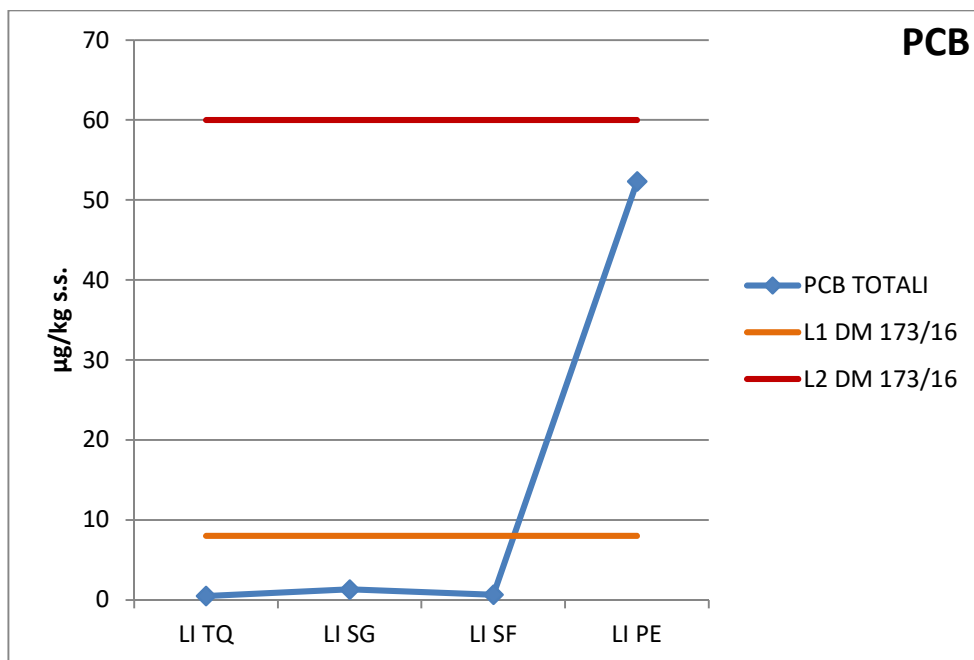


Fig. 5.9 – Andamento della concentrazione dei PCB (sedimenti Livorno)

3.5.2. Risultati sedimento Cagliari

3.5.2.1) Composizione granulometrica del sedimento di Cagliari

La composizione granulometrica del sedimento tal quale (TQ) proveniente dal sito di Cagliari evidenzia un prevalente contenuto di sabbie fini, con una frazione pelitica intorno al 15% del totale, come si evidenzia nel grafico sottostante (Fig. 5.10).

In maniera più evidente, rispetto a quanto già visto per i sedimenti di Livorno, si riscontra che nel processo di separazione meccanica del sedimento tal quale tramite impianto pilota, una residua frazione (ca. 30%) di sabbie fini (SF) si ritrova all’interno della frazione di sabbie grossolane (SG). Ciò è dovuto, oltreché ai differenti tagli granulometrici applicati nel processo di trattamento su scala pilota e in laboratorio, anche al fatto che una maggiore presenza di sabbia fine nei sedimenti di Cagliari, determina, probabilmente, una riduzione della efficienza di separazione tra queste due classi granulometriche. Comunque, considerando le due frazioni sabbiose unite (SG+SF) e le peliti (PE), l’efficienza complessiva dell’impianto è ancora da ritenersi molto buona.

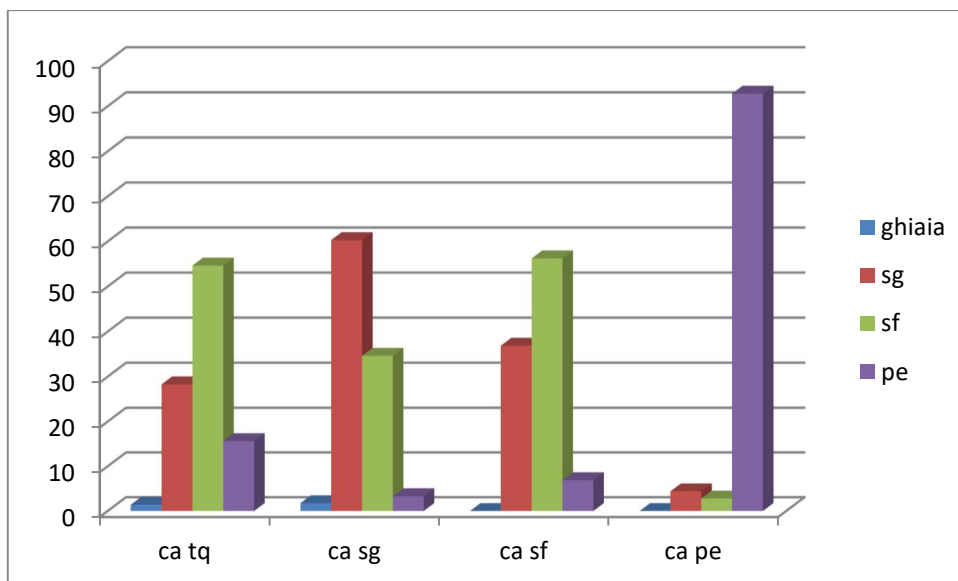


Fig 5.10 - *Composizione granulometrica percentuale del sedimento di Cagliari tal quale e delle frazioni ottenute dal trattamento di separazione.*

3.5.2.2) Chimica del sedimento e delle acque di processo del trattamento dei sedimenti di Cagliari

In riferimento ai risultati delle analisi il piombo, il cadmio e lo zinco determinati nei sedimenti hanno concentrazioni di rilievo (Figg. 5.11; 5.12; 5.13). Nell'ipotesi di volersi attenere ai limiti così come definiti nel D.M.173/2016, si registrano superamenti sia dei livelli L1 che L2. In particolare:

- il piombo presenta concentrazioni superiori a L2 in tutte le frazioni, ad eccezione della SG che supera soltanto il limite L1. Da osservare che il sedimento TQ presenta valori piuttosto alti, rispetto alle diverse frazioni separate, probabilmente a causa della evidente variabile contaminazione del sito di prelievo. Le acque di processo non presentano un aumento della concentrazione di piombo.
- Anche il cadmio presenta concentrazioni superiori a L2 ad eccezione della frazione di SG (comunque superiore a L1). Analogamente al piombo, l'andamento nelle differenti frazioni conferma l'elevata contaminazione. Nelle acque di processo si registra un aumento di un ordine di grandezza pari a quello della sua concentrazione. Per questo metallo si evidenzia, quindi, anche un più debole legame con la frazione solida.
- Lo zinco ha un comportamento analogo al cadmio, con superamento del limite L2 per tutte le frazioni ad eccezione della SG, che presenta valori in linea con L1. Analogamente a quanto indicato per il piombo, anche la concentrazione di zinco nei sedimenti non influisce su quella determinata nelle acque di processo.

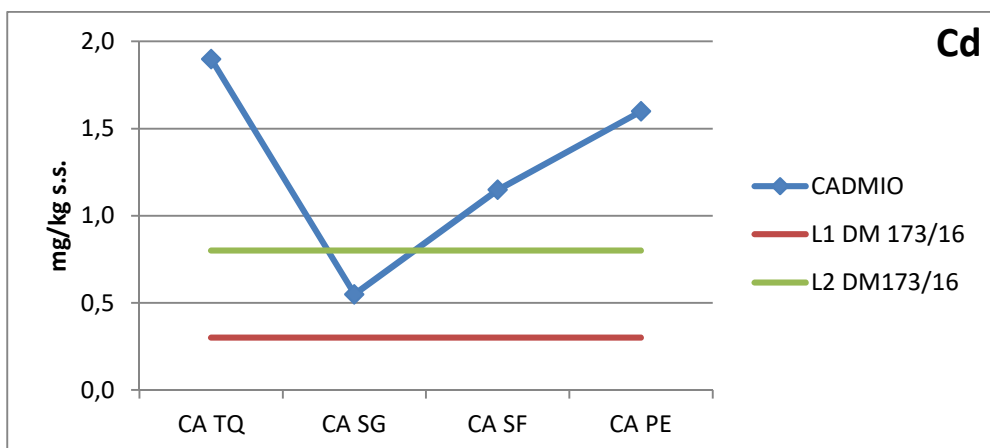


Fig. 5.11 – Andamento della concentrazione di cadmio (sedimenti Cagliari)

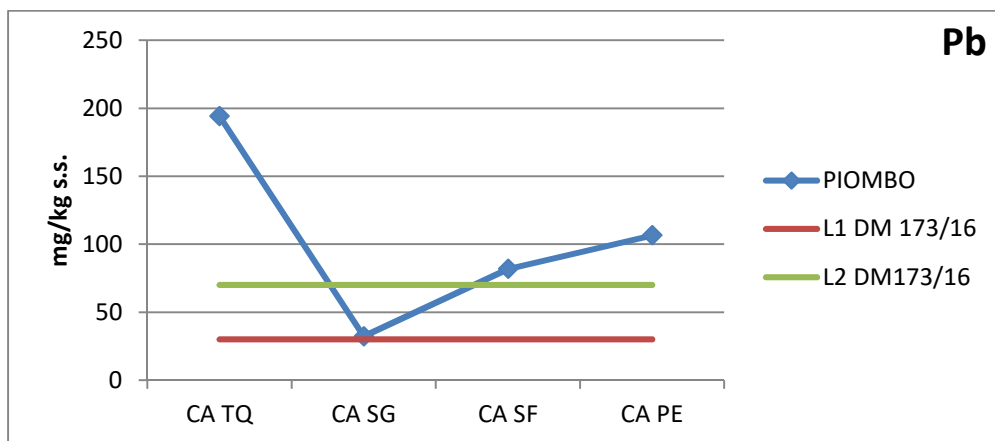


Fig. 5.12 – Andamento della concentrazione del piombo (sedimenti Cagliari)

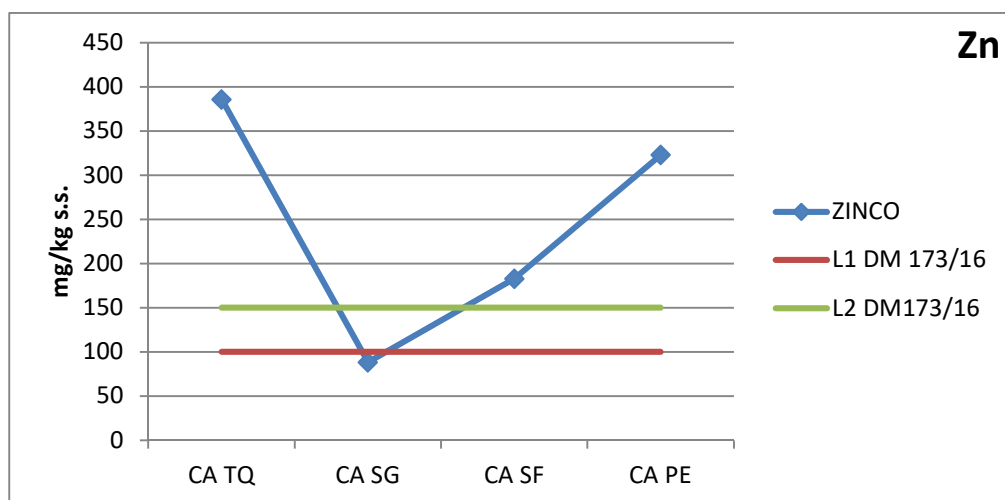


Fig. 5.13 – Andamento della concentrazione dello zinco (sedimenti Cagliari)

Inoltre, per le acque di processo dei sedimenti di Cagliari, si registra, oltre al cadmio, l'aumento di concentrazione per alcuni metalli che non risultano avere concentrazioni elevate nei sedimenti: arsenico, antimonio, boro e mercurio (Fig. 5.14; 5.15; 5.16).

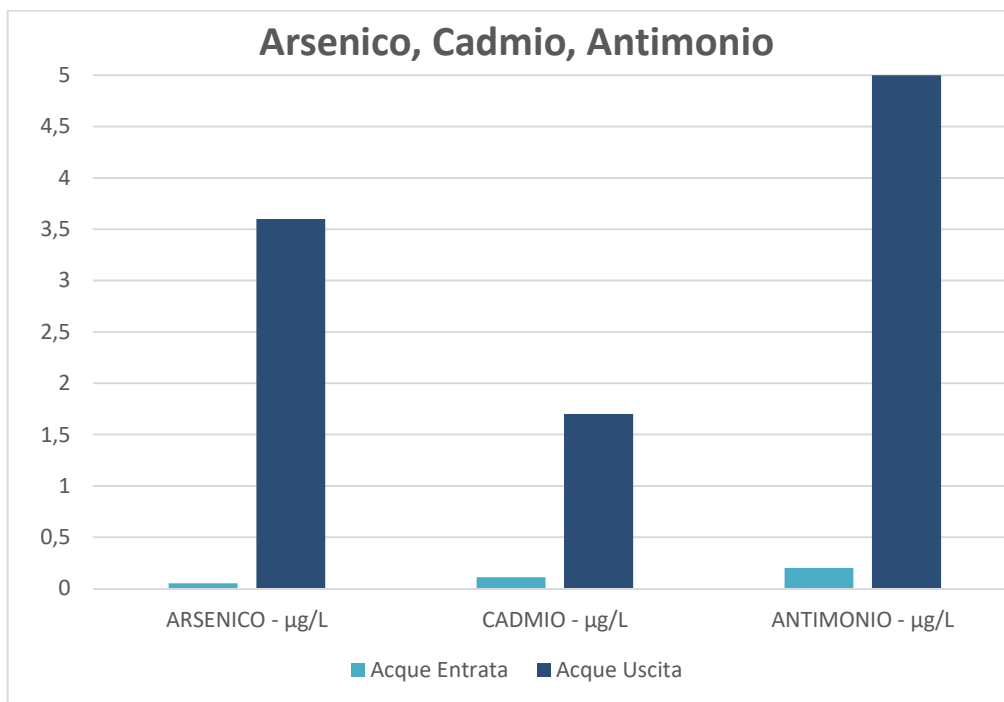


Fig. 5.14 – Concentrazione di arsenico, cadmio e antimonio nelle acque di processo (sedimenti Cagliari)

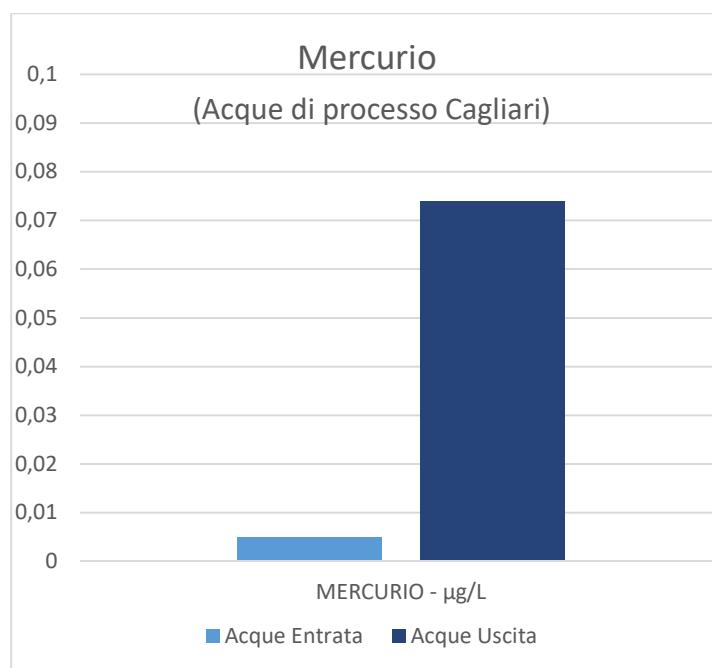


Fig. 5.15 – Concentrazione di mercurio nelle acque di processo (sedimenti Cagliari)

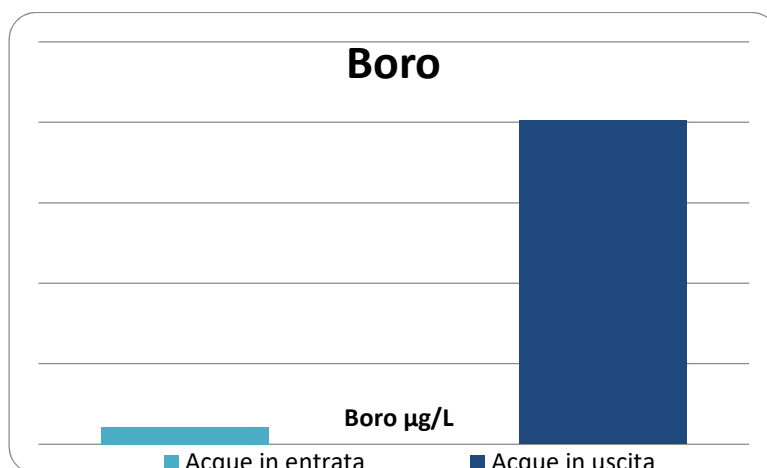


Fig. 5.16 – Concentrazione di boro nelle acque di processo (sedimenti Cagliari)

In sintesi, riguardo ai sedimenti di Cagliari, possiamo rilevare una maggiore contaminazione della frazione in entrata (Cd, Pb e Zn), un efficiente abbattimento nella frazione “sabbie grossolane” a fronte di un arricchimento delle acque di processo, anche di metalli meno evidenziabili nel sedimento tal quale (As e Hg).

Considerando i contaminanti organici, per quanto riguarda i composti organostannici (TBT) si osserva per Cagliari che, nonostante non si rilevino valori maggiori di L2 per la sommatoria MBT-DBT-TBT (con DBT>TBT>MBT), nel sedimento TQ e nelle frazioni sabbiose si ha una bassa concentrazione di questo contaminante. Il suo valore risulta però superiore a L1 nella PE (Figg. 5.17; 5.18).

A differenza di Cagliari, la lieve contaminazione da TBT nel TQ dei sedimenti di Livorno risulta comunque meno recente in considerazione del differente rapporto tra MDT, DBT e TBT (MBT>DBT>TBT).

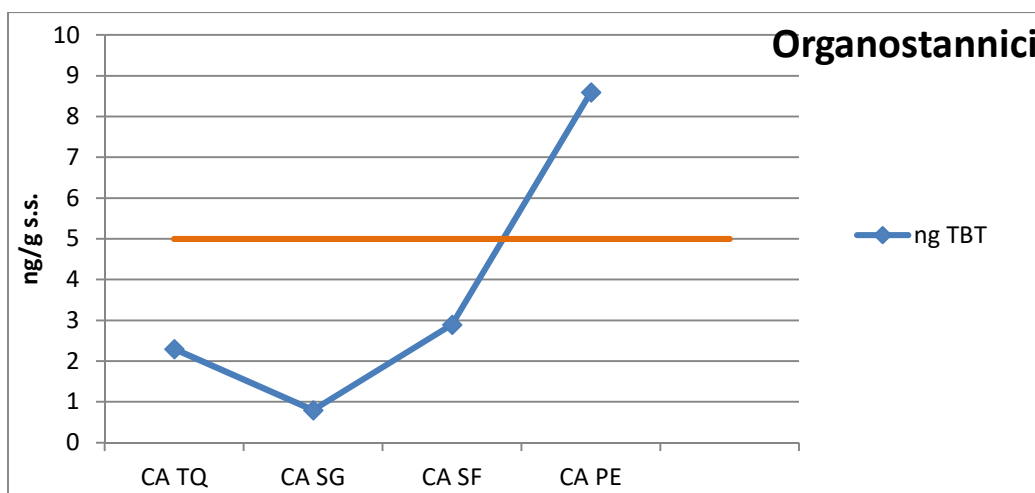


Fig. 5.17 – Andamento della concentrazione dei TBT (sedimenti Livorno)

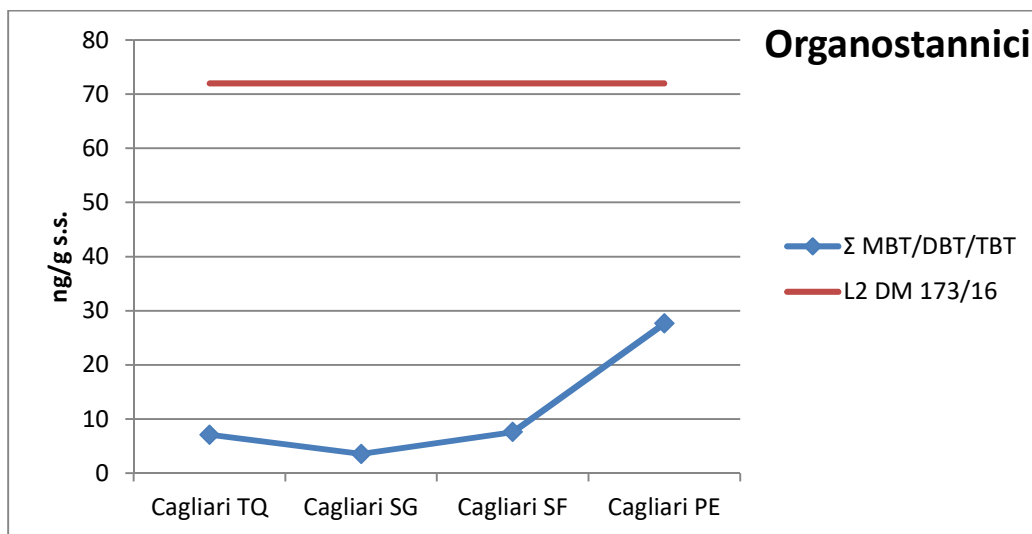


Fig. 5.18 – Andamento della concentrazione della Σ MBT/DBT/TBT (sedimenti Cagliari)

La concentrazione degli idrocarburi pesanti ($C>12$) risulta alta nei sedimenti in ingresso (TQ>L2) e si conferma maggiormente concentrata nella frazione PE (Fig. 5.19). Non si evidenziano invece concentrazioni elevate nelle altre due frazioni (SG e SF). Tale contaminazione non si ritrova nemmeno nelle acque in uscita del processo a indicare che evidentemente gli idrocarburi presenti, anche nelle acque di Cagliari, non possono essere separati facilmente dalla matrice solida.

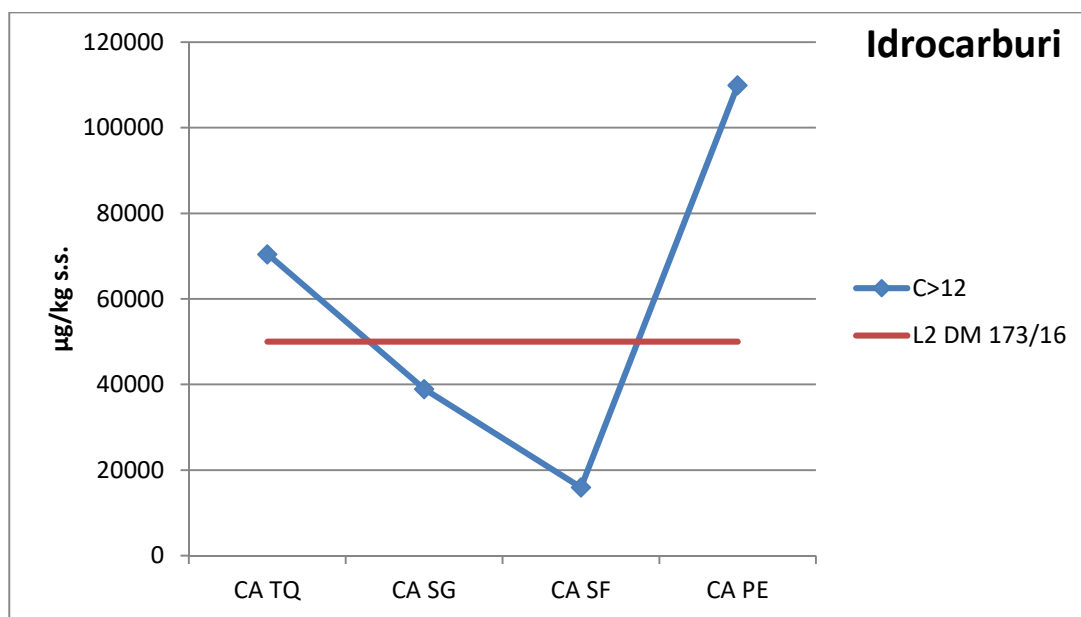


Fig. 5.19 – Andamento della concentrazione degli idrocarburi $C>12$ (sedimenti Cagliari)

A differenza di Livorno, riguardo agli IPA, si osservano valori non trascurabili di alcuni cogeneri che sembrano concentrarsi nelle SF (Fig. 5.20; 5.21; 5.22; 5.23; 5.24), probabilmente per la formazione di piccoli agglomerati, come osservato in studi pregressi (*Quality assessment of the solid matrix obtained after a process of mechanical separation of harbour sediments. Aquatic Ecosystem Health and Management* 8(2):209-219; Mugnai C., Pilato F., Pellegrini D., Merico G., 2005..).

In questo caso quindi, nonostante nelle acque di processo non si rilevino particolari aumenti della concentrazione di questi cogeneri considerati sostanze pericolose prioritarie, particolare attenzione deve esser data alla gestione delle frazioni sabbiose.

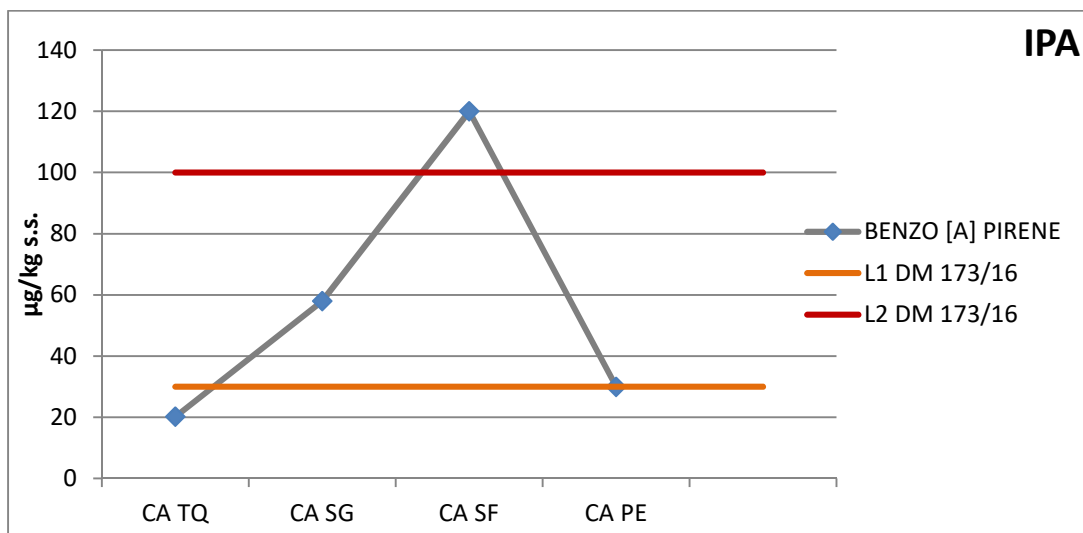


Fig. 5.20 – Andamento del benzo [A] pirene (sedimenti Cagliari)

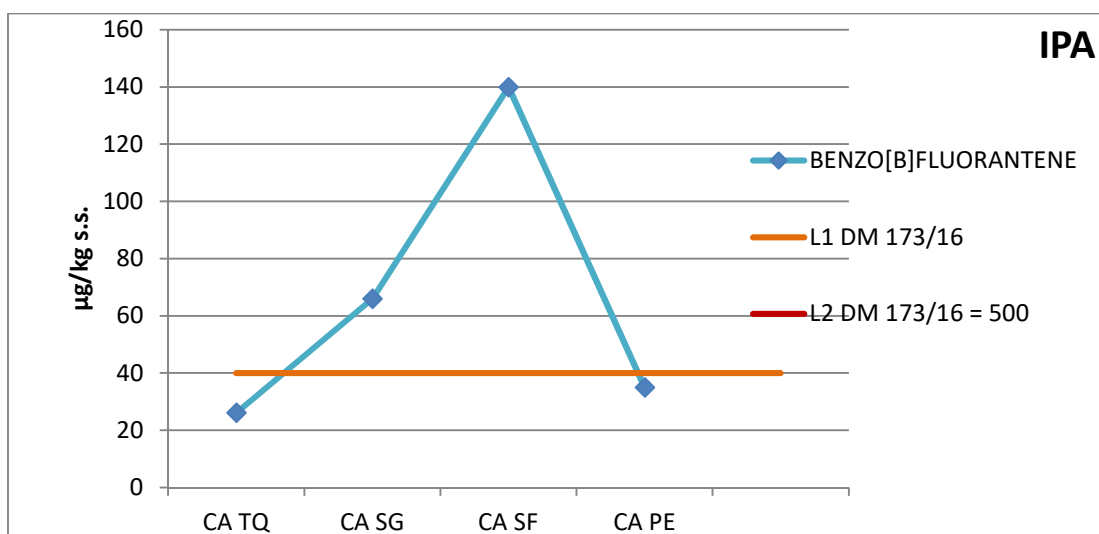


Fig. 5.21 – Andamento del benzo [B] fluorantrene (sedimenti Cagliari)

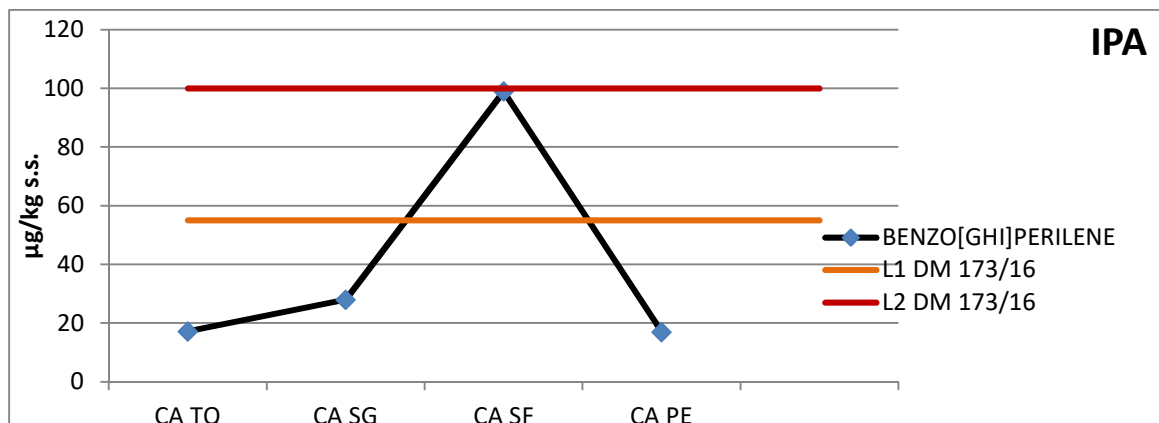


Fig. 5.22 – Andamento del benzo [GHI] perilene (sedimenti Cagliari)

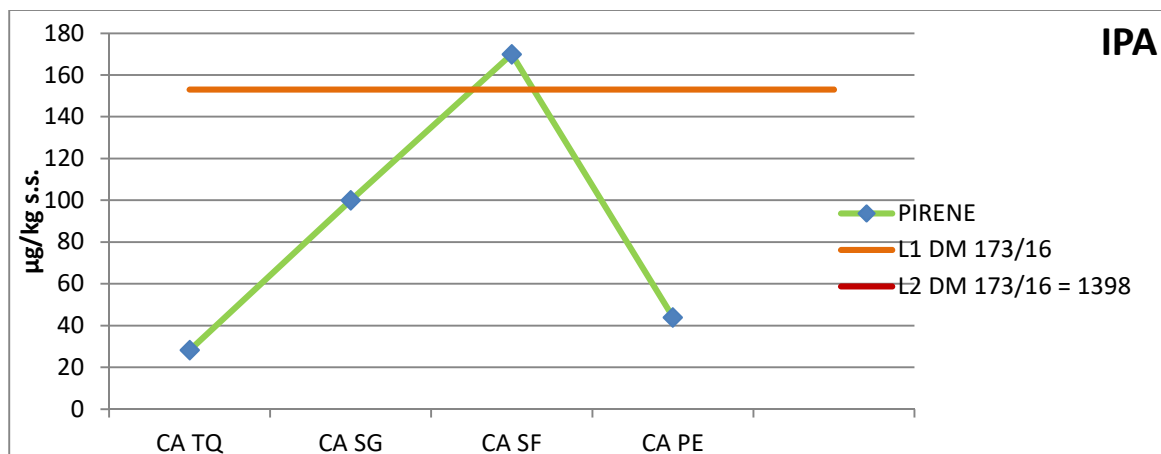


Fig. 5.23 – Andamento del pirene (sedimenti Cagliari)

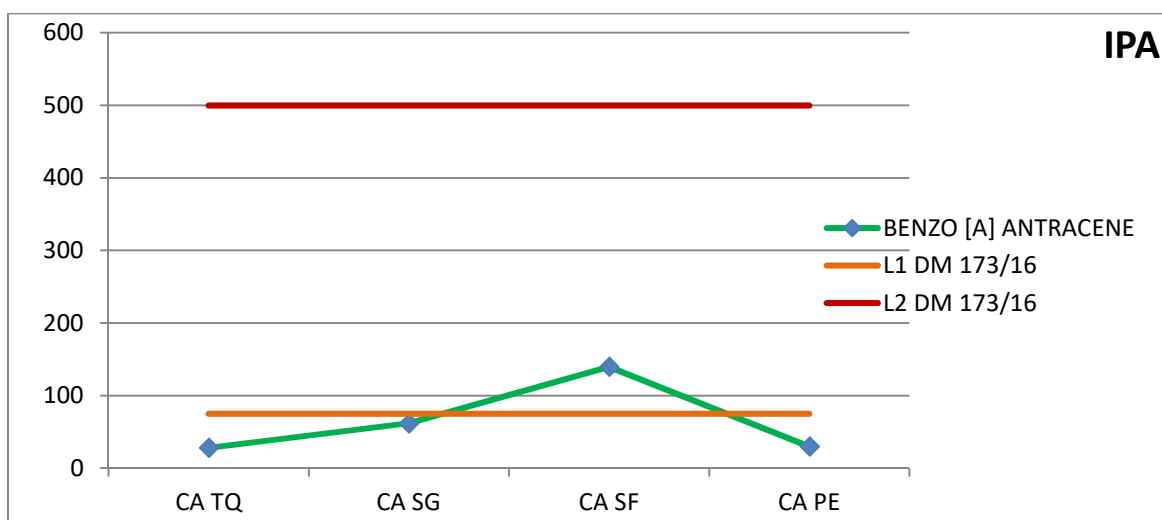


Fig. 5.24 – Andamento del benzo [A] antracene (sedimenti Cagliari)

PARAMETRO	L1	L2
Elementi in tracce	[mg kg⁻¹] p.s.	
Arsenico	12	20
Cadmio	0,3	0,80
Cromo	50	150
Cr VI	2	2
Rame	40	52
Mercurio	0,3	0,80
Nichel	30	75
Piombo	30	70
Zinco	100	150
Contaminanti organici	[µg kg⁻¹] p.s.	
Composti organostannici	5 ⁽³⁾	72 ⁽²⁾
Σ PCB ⁽³⁾	8	60
Σ DDD ⁽⁴⁾	0,8	7,8
Σ DDE ⁽⁴⁾	1,8	3,7
Σ DDT ⁽⁴⁾	1,0	4,8
Clordano	2,3	4,8
Aldrin	0,2	10 ⁷
Dieldrin	0,7	4,3
Endrin	2,7	10

PARAMETRO	L1	L2
α-HCH	0,2	10 ⁷
β-HCH	0,2	10 ⁷
γ-HCH (Lindano)	0,2	1,0
Eptacloro epossido	0,6	2,7
HCB	0,4	50 ⁷
Idrocarburi C>12	Non disponibile	50000
Σ IPA(16) ⁽⁵⁾	900	4000
Antracene	24	245
Benzo[a]antracene	75	500
Benzo[a]pirene	30	100
Benzo[b]fluorantene	40	500 ⁷
Benzo[k]fluorantene	20	500 ⁷
Benzo[g,h,i]perilene	55	100 ⁷
Crisene	108	846
Indenopirene	70	100 ⁷
Fenantrene	87	544
Fluorene	21	144
Fluorantene	110	1494
Naftalene	35	391
Pirene	153	1398
Σ T.E. PCDD,PCDF ⁽⁶⁾ (Diossine e Furani) e PCB diossina simili	2 x 10 ⁻³	1 x 10 ^{-2*}

Fig. 5.25 - Valori di riferimento "L1" e "L2" stabiliti nel D.M.173/2016

3.6) COMPONENTE ECONOMICA

Le principali voci di spesa che hanno influito sulle prove di trattamento dei sedimenti mediante il processo di *soil washing* possono essere sintetizzate nelle seguenti categorie:

Voci di spesa	Euro (€)
Allestimento area attrezzata e acquisto materiali e componenti per l'adeguamento dell'impianto e per le utenze, attraverso affidamenti a Ditte e società esterne ad ISPRA:	35.000
acquisto moduli e <i>up grade</i> impianto esistente	2.200
revisioni impianti elettrico e idraulico, sicurezza	3.700
manutenzione ordinaria e straordinaria delle componenti meccaniche esistenti	500
pulizie area.	
Spese per operazioni di prelievo, trasporto e conferimento dei sedimenti dal luogo di prelievo all'impianto:	
Livorno	750
Cagliari	2500
Consulenze ed impiego di operai e tecnici specializzati per la preparazione delle operazioni di trattamento.	4.900
Assistenza, controllo e attività di monitoraggio ambientale (ARPAT)	14.500
Spese amministrative e assicurative (fidejussione)	650
Noleggio escavatore e generatore	750
Spese per spedizione materiali e campioni	150
Smaltimento rifiuti solidi e matrici liquide	3.500
consumi acqua (acquedotto industriale: ca. 20m ³)	30
consumo carburante gruppo elettrogeno da 30 KVA (ca. 50 litri)	75
Personale tecnico ISPRA (per gestione dell'impianto, esecuzione trattamenti ed analisi chimiche, fisiche ed ecotossicologiche)	1.500 ore/uomo

3.7) CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

Terminate le prove sperimentali di *soil washing*, le principali considerazioni che derivano dalle procedure sia tecniche che amministrative che hanno portato all'esecuzione delle prove di trattamento dei sedimenti contaminate, possono essere sintetizzate come in seguito riportate.

Il *soil washing* sfrutta la tendenza delle sostanze inquinanti a concentrarsi maggiormente nella frazione fine, a causa della sua maggiore superficie specifica, quindi maggiormente interessata ai fenomeni di adsorbimento riguardanti sia la sostanza organica, sia i contaminanti stessi.

Rispetto alla matrice sabbiosa, costituita principalmente da silice e carbonati, la frazione limo-argillosa è caratterizzata tendenzialmente da minerali argillosi, ossidi e idrossidi di ferro e alluminio e materiale organico, tutte specie chimiche molto attive nei processi di scambio ionico e complessazione.

Dal processo di *soil washing* si è ottenuta una sabbia caratterizzata da una buona qualità ambientale, idonea per le attività di riutilizzo indicate dagli altri partner del progetto SEDITERRA, e una frazione fine quale principale sede di destinazione nella migrazione dei contaminanti.

L'esecuzione di *test di cessione* condotti sulle acque di processo e sull'eluato dei sedimenti è stata ritenuta utile per analizzare la mobilità degli inquinanti in matrici complesse come i sedimenti marini, al fine di capire come possa variare il rilascio di questi elementi nell'ambiente marino-costiero e nel riutilizzo in ambito terrestre.

Oltre che per la valutazione qualitativa dei sedimenti, tali test sono stati utili anche per valutare la capacità di trasferimento dei contaminanti dal sedimento alle acque di processo, simulando i potenziali impatti che le differenti opzioni di gestione e riutilizzo (es. sottofondi stradali, ripascimenti arenili, materiali edili, etc...) potrebbero avere sull'ambiente.

Oltre alla concentrazione di partenza degli elementi chimici indagati nei sedimenti e alla grande variabilità ambientale del sito di prelievo dei sedimenti trattati, alcuni fattori chimico-fisici, quali pH, potenziale Redox, solubilità, temperatura, concentrazioni di Ossigeno e Carbonio organico, interagendo tra loro potrebbero influire sui processi di mobilità degli inquinanti e creare alcune difficoltà nella valutazione qualitativa dei diversi parametri indagati e quindi del processo di trattamento utilizzato. Tali fattori interferenti potrebbero essere oggetto di ulteriore approfondimento in successive sperimentazioni.

La *“relazione conclusiva sulle attività di monitoraggio a carico di arpat”* si trovano le considerazioni espresse da ARPAT che, sintetizzando, denotano nelle acque di processo *“una generale tendenza ad una migrazione degli inquinanti monitorati, con aumento della loro concentrazione”* e nelle frazioni solide recuperate *“un generale aumento della concentrazione degli inquinanti monitorati nelle frazioni pelitiche rispetto alle frazioni sabbiose”*.

Il confronto con i valori chimici di riferimento per aree limitrofe con bassa contaminazione e con frazione pelitica paragonabile, hanno evidenziato una situazione di partenza (TQ) non particolarmente compromessa.

Applicando il processo di separazione meccanica si evidenzia una concentrazione dei metalli nelle frazioni più fini (PE) a favore delle sabbie grossolane (SG), che risultano fundamentalmente non più contaminate e quindi riutilizzabili: i valori riscontrati risultano generalmente inferiori a L1, ad eccezione del cadmio per il quale peraltro non è evidente un'associabilità alla composizione granulometrica.

Al fine del riutilizzo dei materiali recuperati, l'attenzione va comunque posta ai processi di trasferimento e solubilizzazione di alcuni elementi chimici, poiché si è registrato nelle prove condotte l'aumento di concentrazione di alcuni metalli nelle acque di processo, rispetto a quelle in entrata, a testimonianza del passaggio di alcuni metalli dal sedimento alle acque.

La valutazione delle concentrazioni dei composti organostannici evidenziano valori diversi tra Livorno e Cagliari. In particolare per Livorno: partendo da livelli superiori a L1, nelle peliti si arriva a valori maggiori di L2, ottenendo comunque frazioni sabbiose SG e SF riutilizzabili, poiché si ha un abbattimento della contaminazione.

Per quanto riguarda la contaminazione degli idrocarburi, si pone l'attenzione solamente sulle concentrazioni degli idrocarburi pesanti ($C>12$) che risultano superiori al valore "L2" in tutte le frazioni ma comunque con valori trascurabili nelle sabbie grossolane. Non vi è evidenza di trasferimento dal sedimento alle acque di processo.

Per gli IPA di Cagliari, nonostante nelle acque di processo non si rilevino particolari aumenti della concentrazione dei cogeneri risultati a concentrazioni più elevate ma essendo quest'ultimi sostanze pericolose prioritarie, particolare attenzione deve esser data alla gestione delle frazioni sabbiose, nonostante l'ottima efficienza di abbattimento da parte dell'impianto pilota riguardo ad altri contaminanti.

Gli idrocarburi pesanti non sono indice di preoccupazione, anche derivante dal fatto che essendo una contaminazione aspecifica andrebbe indagato, con ulteriori analisi, a quali composti sia veramente imputabile l'elevato contenuto.

Dalle indagini relative al contenuto di PCB, si rileva una concentrazione degli stessi nelle frazioni pelitiche e rilascio trascurabile dal TQ alla matrice acquosa.

L'impianto pilota ha svolto in maniera efficiente e precisa la propria funzione di separazione meccanica dei sedimenti nelle diverse classi granulometriche di cui si compongono.

I risultati ottenuti indicano che i sedimenti portuali trattati attraverso l'impianto pilota possono fornire materiali idonei e di buona qualità chimico-fisica : sono quindi possibili interventi di riutilizzo delle frazioni sabbiose SG recuperate.

Con un materiale di partenza TQ di buona qualità ambientale, anche la frazione sabbiosa fine SF potrebbe essere riutilizzata; la residua frazione pelitica rappresenta comunque un esiguo volume di sedimento da smaltire rispetto alla totalità del sedimento tal quale, con benefici economici e ambientali.

Si rendono necessarie ed auspicabili ulteriori esperienze analoghe a quelle condotte con il progetto Sediterra, al fine di implementare e favorire il recupero e l'impiego dei materiali trattati in opere di *beneficial re-use*.

E' auspicabile continuare ad approfondire le sperimentazioni condotte, compresi lo sviluppo e l'applicazione di ulteriori tecniche integrate ed innovative, applicate a sedimenti marini con livelli di contaminazione di partenza più elevati rispetto a quelli testati all'interno di questo progetto.

3.8) RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI e NORMATIVI

- DIRETTIVA 2000/60/CE Ottobre 2000
- DIRETTIVA 2008/56/CE Giugno 2008

- Regolamento (CE) n.1013/2006 14 giugno 2006
- Regolamento (CE) n.660/2014 15 maggio 2014

- Decreto legislativo n. 152/2006
- Decreto ministeriale n.172/2016
- Decreto ministeriale n.173/2016

- Quaderno ICRAM "Aspetti tecnico-scientifici per la salvaguardia ambientale nelle attività di movimentazione dei fondali marini: dragaggi portuali". Gennaio 2002

- Manuale per la movimentazione dei sedimenti marini; 2006, APAT-ICRAM.

- Linee Guida SNPA 18/2018. Analisi granulometriche dei sedimenti marini. Romano E., Ausili A., Bergamin L., Celia Magno M., Pierfranceschi G., Venti F., 2018.

3.9) LISTA ALLEGATI

ALLEGATO : METODICHE E RISULTATI ANALITICI : *Vedi alla fine del documento (pagina 66)*

IV. LIVRABLE T2.3.3 : TRAITEMENT DE SÉPARATION GRANULOMÉTRIQUE ET SOIL WASHING

4.1) INTRODUCTION

Parmi les nombreuses activités de recherche et de support technique et scientifique exercées également pour le compte des Administrations publiques centrales et périphériques (MATTM, Régions, Universités), l'ISPRA mène, depuis longtemps, des programmes de recherche scientifique destinés à l'abattement des charges polluantes présentes dans les sédiments marins et fluviaux.

Une zone expérimentale dédiée à l'application des différents traitements, aussi bien à l'échelle pilote qu'à l'échelle de laboratoire, a été mise en place au siège ISPRA de Livourne. Une *installation pilote* a été assemblée, à cet effet, dans le but principal de séparer, par voie mécanique, les différentes fractions granulométriques qui constituent le sédiment marin et fluvial provenant des opérations de dragage.

Les activités expérimentales décrites dans le présent document ont été menées dans le cadre des projets de recherche SEDITERRA et GRRinPORT, dont ISPRA est partenaire. Ces deux projets de recherche sont cofinancés dans le cadre du Programme de Coopération transfrontalière Marittimo Italie-France 2014-2020.

Toutes les activités menées dans le cadre des projets susmentionnés n'ont pas de but lucratif et ont une importance exclusivement technique et scientifique, car elles sont destinées à l'identification d'éventuels protocoles de réutilisation à terre des matériaux dragués provenant de ports industriels et/ou touristiques (SEDITERRA) ou bien à l'identification de solutions techniques innovantes pour le traitement des sédiments portuaires contaminés (GRRinPORT).

Les expériences menées par l'installation pilote de séparation mécanique ont fait l'objet d'une autorisation régionale selon l'art. 211 du D.-L. 152/06 et suivants et selon le Decreto Dirigenziale [Arrêté portant agrément du Dirigeant] n° 8493 du 30/05/2018, c'est la raison pour laquelle l'ARPAT a procédé à des inspections et des analyses chimiques et physiques sur des échantillons d'eau et de sédiments, destinées à la surveillance des activités expérimentales prévues.

Vous trouverez en annexe – « *Méthodes et résultats d'analyses relatifs aux échantillons de sédiments traités et aux eaux de traitement* », les résultats des analyses de la totalité des paramètres analysés dans les différents échantillons d'eau et de sédiments dans le cadre des expériences, tandis que le chapitre 4.5 contient les observations relatives uniquement aux éléments dont les concentrations ont fait ressortir des anomalies et un dépassement des seuils de référence, que ce soit pour les sédiments provenant du site de Livourne ou pour ceux provenant de Cagliari.

4.2) PRINCIPES ET OBJECTIFS DU TRAITEMENT

L'objectif principal du processus mis en œuvre par l'usine est de séparer des quantités expérimentales de sédiments marins dans les différentes fractions granulométriques qui les constituent, afin de récupérer la composante sableuse, c'est-à-dire la partie du sédiment habituellement la moins contaminée et réutilisable. Les fractions sableuses séparées peuvent toutefois être plus ou moins contaminées et donc susceptibles de subir d'autres traitements, qui peuvent consister en un simple lavage, accompagné d'un raclage et d'un brossage mécaniques (techniques typiques des processus de lavage des sols), ou en des processus chimico-physiques et biologiques plus complexes (oxydation-réduction, bio-réhabilitation, etc.), à appliquer également aux fractions sableuses les plus fines.

Selon la littérature, les granulométries de coupe sur lesquelles la séparation est effectuée vont de 63 à 40 μm , dimensions qui répondent aux exigences technologiques et économiques et aux exigences relatives à la teneur en polluants que les sables peuvent contenir.

Bien que le potentiel maximal de l'unité d'hydrocyclonage soit supérieur aux quantités nécessaires pour l'expérience proposée, le contexte de mise en œuvre des autres unités de l'installation, notamment la capacité de traitement des cellules d'attrition (125L chacune) réduit le potentiel global du traitement à des quantités de sédiment de l'ordre de quelques mètres cubes (2-3 m^3) par heure de fonctionnement.

L'activité expérimentale vise à optimiser la gestion des sédiments traités et implique 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).

4.3) MATÉRIELS ET MÉTHODES DE MISE EN ŒUVRE DU TRAITEMENT ET OBJECTIFS DU TRAITEMENT

La séparation du sable peut avoir lieu par le biais d'une classification par voie humide du sédiment, qui, dans un milieu fluide, se fonde sur la vitesse maximale de déplacement des grains dans un champ de forces gravitationnelles (classificateurs à sédimentation) et/ou dans un champ de forces centrifuges (hydrocyclones). La fraction fine du sédiment (plus polluée) est acheminée vers la phase de *dewatering*, tandis que les eaux de traitement sont collectées dans des récipients prévus à cet effet et éliminées de manière adéquate par des entreprises spécialisées.

L'installation expérimentale comprend les parties/modules suivant(e)s :

1. Module pour l'élimination des matériaux de faible densité, tels que la *posidonia oceanica* et les fragments de plastique
2. Vibro-tamassage
3. Hydrocyclones
4. Cellules d'attrition
5. Classificateur à spirale

Les sédiments utilisés dans les expériences, qui ont été prélevés sur les sites de dragage précédemment identifiés (*livrable T2.1.1 : rapport de synthèse de caractérisation préalable*) ont été acheminés vers la zone expérimentale de l'ISPRa de Livourne à bord de camions étanches, sous une forme semi-solide, dans des Big Bags.

Le sédiment qui entre dans l'installation doit être considéré, selon la loi, comme un déchet, correspondant au code C.E.R. 17.05.06 <<Boues de dragage, autres que les boues visées au poste 17 05 05>>.

Le code CER 19.12.09 <<minéraux (par ex. sable, roches)>> peut être attribué au matériau traité en sortie de l'installation, aussi bien pour les fractions à éliminer comme déchets que pour les fractions destinées à l'expérimentation.

Le traitement de séparation ne comporte aucune réduction de matériau, sauf la quantité réduite nécessaire à l'exécution des analyses (prélèvement des échantillons pour analyse) – d'un poids d'environ 15-20 kg par essai - qui est prélevée tout au long des différentes phases du processus ; par conséquent, les quantités collectées au terme du processus et en sortie de l'installation ont le même ordre de grandeur que celles en entrée.

Chaque expérience de séparation mécanique des différentes fractions granulométriques a nécessité l'utilisation de 4 m³ de sédiments (correspondant à environ 6 tonnes).

L'eau utilisée pour alimenter le fonctionnement du processus provient de l'aqueduc industriel qui dessert le port de Livourne.

L'eau de traitement, préalablement stockée dans des citernes de stockage d'un volume de 2,5 m³, suit un circuit fermé, sans aucune évacuation pendant le processus de traitement. En effet, l'eau utilisée pour le lavage des sédiments a été collectée uniquement en aval du traitement, dans un silo étanche prévu à cet effet, doté du même volume de 2,5 m³ et a été, ensuite, éliminée en tant qu'effluent liquide, selon les normes en vigueur.

L'installation se trouvant à l'intérieur des anciens hangars de la gare maritime du Port de Livourne, toutes les opérations – stockage temporaire des sédiments marins, traitement de séparation mécanique par l'installation, stockage des matériaux traités par classes granulométriques, utilisation des matériaux à des fins de recherche, acheminement des fractions traitées résiduelles vers l'élimination finale – ont été réalisées à l'intérieur, afin d'éviter la lixiviation d'éventuels résidus de traitement par les eaux de pluie.

Dans tous les cas, en ce qui concerne les phases du traitement, nous avons adopté toutes les précautions requises afin d'éviter la perte accidentelle d'eaux de traitement, ainsi que la dispersion de l'éventuelle phase liquide présente dans les sédiments marins en entrée.

Les seuls effluents liquides produits sont ceux qui résultent du processus de traitement, qui sont classés en tant que <<déchets de solutions aqueuses, autres que celles faisant l'objet du poste 16.10.01>> code CER 16.10.02.

Pendant la phase d'exploitation, les composantes environnementales potentiellement soumises aux impacts directs liés au fonctionnement de l'installation sont l'atmosphère et le climat acoustique. En revanche, il n'y a pas d'impact direct sur les matrices eau et sol car, comme indiqué plus haut, les déchets produits par le processus (eaux de traitement, sédiments répartis par classes granulométriques) ont été employés dans le cadre du projet de recherche susmentionné ou bien éliminés dans des usines de traitement ou d'élimination appropriées.

Les impacts sur l'atmosphère et le climat acoustique ont été exercés exclusivement pendant les journées de fonctionnement de l'installation (2 journées ouvrables) correspondant au nombre de cycles de traitement prévus.

En ce qui concerne les émissions dans l'atmosphère, les seules émissions prévues ont été celles produites par l'utilisation d'un générateur à courant alterné, alimenté au gazoil, doté d'une puissance égale aux besoins énergétiques de l'ensemble de l'installation, qui a été estimée à moins de 40 kW.

Le générateur utilisé pour le fonctionnement de l'équipement expérimental a été positionné à l'extérieur du hangar, pour servir uniquement aux opérations de séparation mécanique, donc avec un nombre d'heures de fonctionnement limité au nombre d'heures de chaque opération de traitement.

Les émissions sonores sont celles produites par les différents équipements et machines utilisés, dont l'estimation est globalement inférieure à 90 dB. Nous rappelons, à ce propos, que la mise en service de l'ensemble de ces équipements et machines a été limitée à des essais d'une durée inférieure à 120 minutes et que la zone dans laquelle se trouve l'installation est exclusivement destinée à un usage industriel et est inhabitée.

Les méthodes utilisées pour la réalisation des analyses chimiques et physiques et écotoxicologiques sont décrites en annexe – « *méthodes et résultats des analyses relatives aux échantillons de sédiments traités et aux eaux de traitement* » avec les résultats des analyses.

4.4) PROTOCOLE DES OPÉRATIONS

4.4.1) Traitements de *soil washing* exécutés auprès de la plateforme ISPRA de Livourne

Le Soil Washing est un traitement ex situ de séparation granulométrique pour les sols et les sédiments contaminés, qui se fonde sur des mécanismes physiques et/ou chimiques permettant de séparer les fractions qui les composent, à l'aide d'une matrice aqueuse, éventuellement complétée par un lavage effectué avec des solvants spécifiquement prévus pour l'élimination des substances polluantes.

Une phase de stockage des sédiments appartenant aux différents lots a été prévue, avant le traitement expérimental, dans un caisson interchangeable imperméable doté d'un volume adéquat, pendant une durée suffisante afin d'éviter la détérioration physique et chimique du matériau. Le matériau à traiter est soumis à un traitement préalable d'homogénéisation à l'intérieur dudit caisson interchangeable, à l'aide d'une chargeuse, par macro-tamassage ayant pour but d'éliminer les corps étrangers et les fractions pierreuses les plus grossières.

Afin de récupérer toutes les fractions granulométriques les plus susceptibles d'être réutilisées, telles que les fines, sables et graviers, après le prétraitement mentionné aux points précédents, le matériau a été soumis à un véritable processus de séparation et classification mécanique par l'utilisation des équipements suivants :

a) Trémie de chargement de 1 m³ (2,40 x 1,30 m), pour l'alimentation des sédiments « en l'état ». La trémie de chargement sert à alimenter le lit de criblage, permettant, ainsi, la régulation du débit du matériau entrant dans l'unité.

b) Module 'by-pass' pour l'élimination des fragments de posidonies/plastiques contenus dans le sédiment à traiter. Lorsque le sédiment en entrée présente un pourcentage élevé de matières végétales, telles que des fibres et/ou des fragments d'algues ou de plantes aquatiques (par ex. Posidonia oceanica) et de fragments de plastique, il est soumis à un tamisage spécial, par un tamis rotatif (photo 1), visant à éliminer ces fragments. Ce module est placé entre les équipements d'homogénéisation (caisson interchangeable sur roulettes) et le crible vibrant. Le module est composé d'un tambour rotatif perforé, doté de trous de différents diamètres, permettant le lavage et la séparation du sédiment des matériaux les plus grossiers.



Photo 1 – Tamis rotatif

c) Crible vibrant (Photo 2) avec toile de criblage de 2 mm de diamètre (dimensions : 2,40 x 1,60 m). Le crible vibrant sépare les matériaux grossiers des matériaux plus fins. Le tri a lieu par le passage des matériaux les plus fins sur une grille vibrante. La vibration de la grille est assurée par deux moteurs, fixés à la structure du crible, auxquels sont reliées les masses excentriques en rotation. Le sédiment est pulvérisé par 4 jets d'eau à haute pression pour faciliter le tri par tailles et permettre son déplacement dans les sections suivantes de l'installation.



Photo 2- Crible vibrant et pompe d'homogénéisation

d) 2 cellules d'attrition (Photo 3), (dimensions : 1,20 x 0,70 m - vol. 0,125 m³ chacune). Le mélange trouble (eau + sédiment) qui sort du classificateur à spirale est acheminé, dans des conditions de turbulence élevée, vers deux cellules d'attrition dotées d'un volume de 125 litres, qui entraînent la désagrégation des agglomérats boueux éventuellement présents.

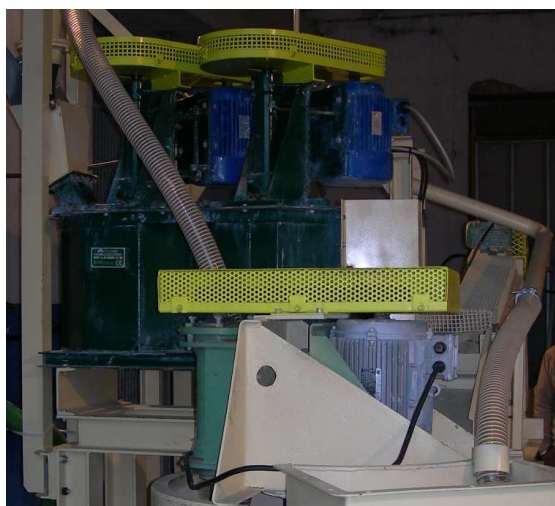


Photo 3- Cellules d'attrition

e) Unité d'hydrocyclonage (dimensions : 3,50 x 1,3 m). Elle comprend 2 hydrocyclones séparés (dont un est *by-passable*). L'hydrocyclone (photo 4) opère le tri entre sable fin et fraction limoneuse-argileuse, grâce à l'action de la force centrifuge. Il est composé d'un cylindre à fond conique, doté d'une vis sans fin latérale pour l'alimentation du mélange sédiment/eau, d'une sortie pour les particules fines entraînées par le fluide et d'une autre sortie pour les matériaux dotés d'une granulométrie plus importante, située au sommet du cône.

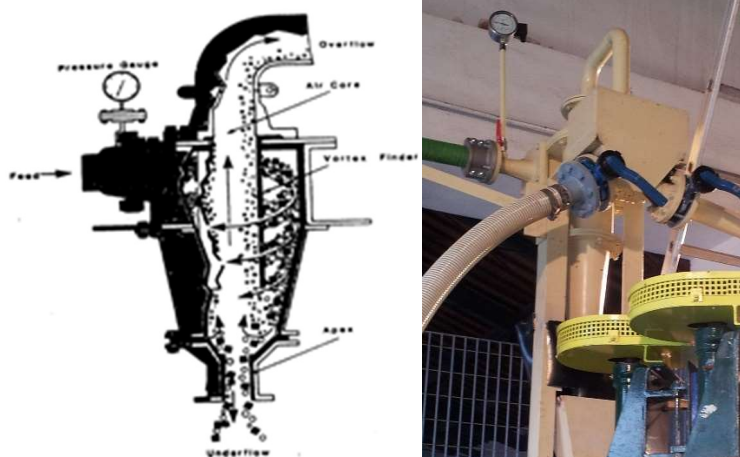


Photo 4- Hydrocyclone

f) **Classificateur à spirale** (dimensions : 2,90 x 1,00 m - diam. 300 mm). Le classificateur à spirale (Photo 5) est employé comme unité de classification. Le principe de fonctionnement dépend de la vitesse différente de dépôt des particules solides en raison des différences de densité.



Photo 5- Classificateur à spirale

Les *schémas 1 et 2* de l'installation représentent les différentes parties de l'installation et les débits d'eau et de sédiment qui agissent pendant le processus de traitement mécanique des sédiments.

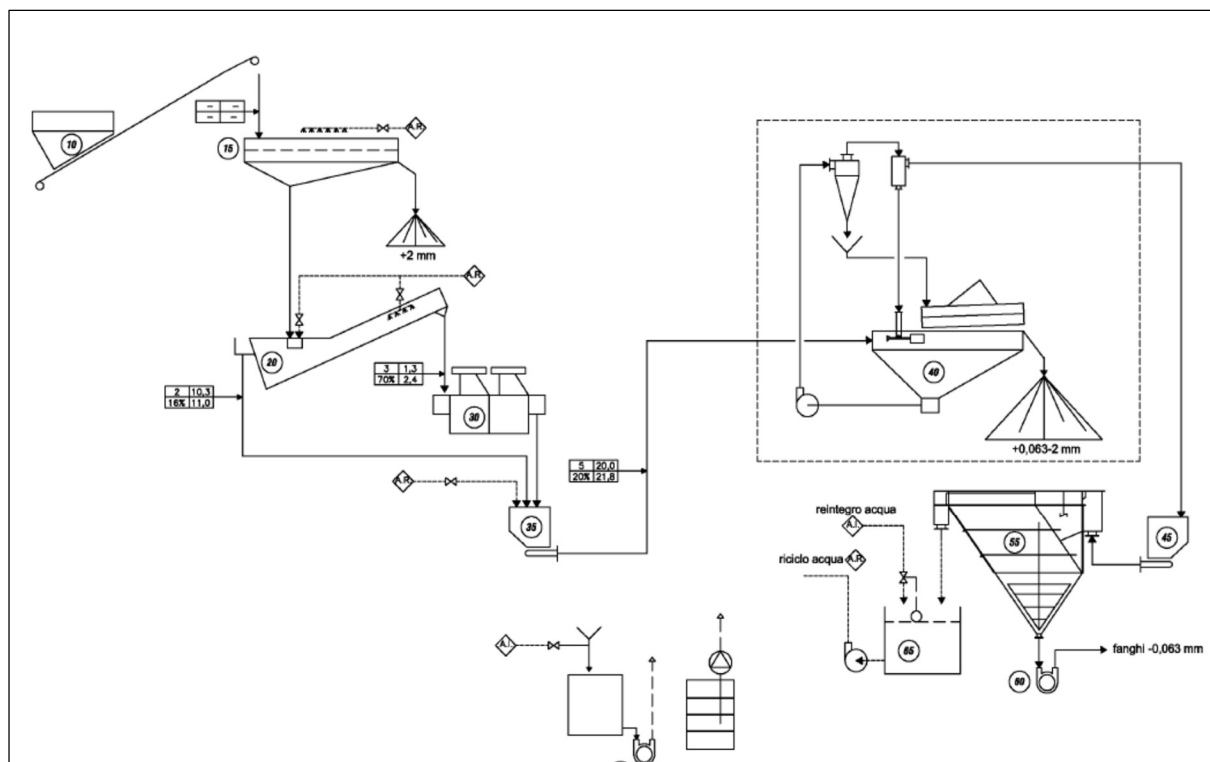


Schéma 1 - Schéma de l'installation de séparation granulométrique

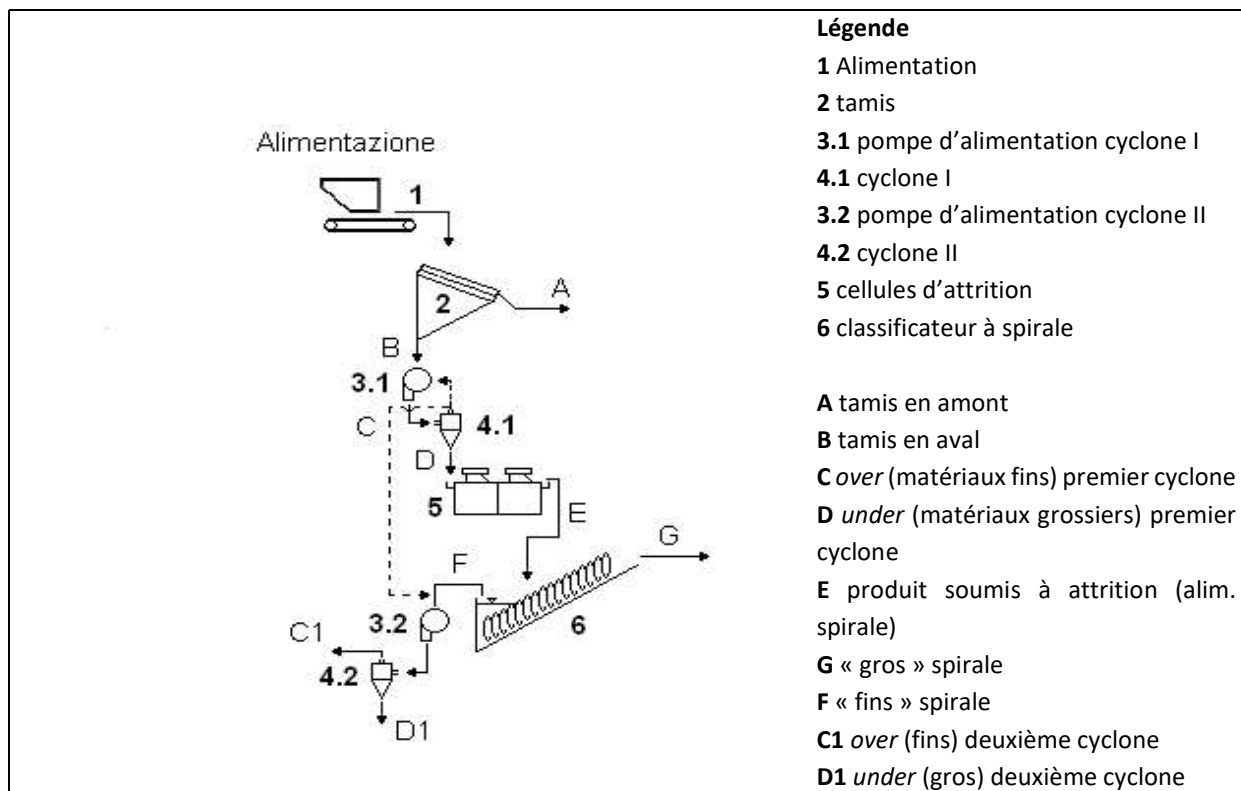


Schéma 2 - Schéma simplifié de l'installation de séparation granulométrique

Ce processus peut être défini et synthétisé comme suit :

- Le sédiment provenant du caisson d'homogénéisation, désigné « Sédiment Tel Quel » (TQ), est chargé dans la trémie de chargement pour l'alimentation de l'installation (1)
- Les fractions grossières (A) (tamis en amont), généralement composées de coquillages et de résidus d'origine organique et anthropique, sont séparées de la fraction solide sableuse, comprenant également la fraction fine.
- Le tamis en aval (B), doté de pompe à axe vertical avec caisse intégrée (3.1), constitue l'alimentation du cyclone I (4.1), qui est chargé de trier le matériau, en acheminant à l'*overflow* les fractions les plus fines (C) tout en concentrant dans l'*underflow* la matière trouble contenant le matériau le plus grossier (D), qui alimente les cellules d'attrition (5). En modifiant les débits de la matière trouble et la séquence de certains composants, l'on peut adapter l'installation aux caractéristiques des matériaux à traiter et aux objectifs à atteindre.
- Le matériau (D) alimente le classificateur à spirale (6) qui déshydrate et sépare le matériau de taille 200 µm-2 mm (G), ci-après désigné « SABLE GROSSIER » (SG), de la matière trouble contenant encore des solides de dimensions < 200 µm (F).
- La cellule d'attrition est employée pour désagréger le matériau, en séparant le matériau fin et les polluants qui adhèrent au sable ; cette opération étant plus efficace si elle est effectuée sur une matière trouble visqueuse à forte concentration de solides, l'action de concentration développée par le cyclone est très importante.
- Une vanne a été placée à la sortie de l'*overflow* du Cyclone I. Elle permet d'envoyer le débit vers la caisse de la pompe (3.2) qui alimente le cyclone II (4.2) et/ou de le recycler, partiellement, sur la pompe (3.1) en fonction des conditions requises par l'essai.
- Le matériau (F) est envoyé vers la pompe à axe vertical avec caisse intégrée (3.2) et représente, avec l'*overflow* provenant du cyclone (4.1), l'alimentation du cyclone (4.2), qui est chargée de collecter, à la sortie de l'*underflow* (D1), la fraction sableuse résiduelle fine (matériau de taille > 63 µm) ci-après désignée « SABLE FIN » (SF) et d'éliminer, à travers l'*overflow*, les argiles et les limons (C1), à savoir le matériau de taille inférieure à 63 µm, ci-après désigné « PÉLITES » (PE).
- La fraction solide traitée est totalement séparée de l'eau de traitement par des filtres presse et acheminée vers un réservoir de stockage.

Les fractions en sortie de l'installation (solides et liquides) ont été échantillonnées en mélangeant plusieurs prélèvements collectés pendant le fonctionnement de l'installation et destinés à des analyses, en attribuant aux échantillons les acronymes suivants :

TQ = SÉDIMENT EN L'ÉTAT

SG = SABLE GROSSIER

SF = SABLE FIN

PE = PÉLITES

Tous les matériaux résiduels, solides et liquides, ont été, enfin, acheminés vers leur élimination selon les normes en vigueur.

Au terme du processus de traitement, les fractions de sédiment récupérées, triées en fonction de leurs classes granulométriques respectives, ont été soumises à des analyses chimiques, physiques et biologiques, en vue de l'évaluation de la qualité des matériaux et de l'identification des solutions de gestion et de réutilisation.

Les différentes fractions générées par le processus et collectées peuvent être soumises à d'autres actions/traitements expérimentaux en vue de l'élimination des polluants qui seraient encore présents et de leur réutilisation potentielle.

À cet effet, un traitement expérimental a été effectué dans le cadre du projet Sediterra, prévoyant le mélange des fractions sableuses récupérées suite au *soil washing* avec différents pourcentages de ciment de type traditionnel ou à usage marin, en vue de la réalisation de différentes formulations destinées à la fabrication de plaques et de matériel à base de ciment à employer dans des ouvrages de génie civil.

Cette partie expérimentale sera traitée dans le document T.2.4.7 « *Synthèse des pilotes de traitement et valorisation* » (rédigé par le partenaire INSA). Ce même document contiendra également une description d'une autre expérience menée, en parallèle, sur les plateformes de traitement ISPRA, à Livourne, et INSA, à Toulon, dans le cadre de laquelle environ 2 tonnes de sédiments « en l'état », provenant de 4 sites de prélèvement différents, ont été confinées à l'intérieur de deux lysimètres, pendant une durée de 26 semaines, et ont été soumises à un système d'irrigation à l'eau temporisée, visant à simuler les conditions climatiques spécifiques présentes dans l'aire du Marittimo.

4.4.2) Traitements de séparation mécanique réalisés sur la plateforme expérimentale CPEM (INSA-Envisan) à Toulon

Dans le cadre de l'activité de classification granulométrique des sédiments, une mise au point avait été prévue, sur la plateforme de traitement de l'ISPRA, à Livourne, concernant la séparation des fibres végétales (*Posidonia Oceanica*) du sédiment provenant du port de Centuri (Corse).

À cette fin, l'Installation pilote de Livourne avait subi un certain nombre d'adaptations, notamment par la mise en place d'un tamis rotatif en tant qu'équipement complémentaire permettant la séparation des fibres de posidonie du reste des sédiments.

Suite aux longs délais italiens constatés, tant au niveau administratif qu'au niveau bureaucratique, pour l'obtention de l'autorisation relative à l'installation de traitement, les partenaires corses n'ont pas eu la possibilité d'envoyer leurs sédiments par les procédures d'expédition transfrontalière ; par conséquent, il a été décidé de transférer les sédiments corses vers la France et non pas vers l'Italie, comme initialement envisagé.

L'élément « Tamis rotatif » de l'installation pilote ISPRA a, donc, été démonté, transporté et remonté à Toulon, en vue de l'exécution des opérations de tri prévues pour la séparation des fibres de posidonie du sédiment en l'état.

Des essais de séparation des fibres de *posidonia oceanica* des sédiments provenant du port de Centuri (Corse) ont, donc, été réalisés en présence des techniciens ISPRA et INSA, les 30 et 31 janvier 2019, sur la plateforme ENVISAN du CPEM de Toulon, avec récupération des déchets destinée à des activités de valorisation énergétique (à INSA Lyon).

Malheureusement, les résultats obtenus n'ont pas été conformes aux attentes (faible efficacité de séparation), probablement à cause de la faible présence de fibres de posidonie dans le sédiment dragué et à leur état de désagrégation. A ces constats, il faut également indiquer que le tamis rotatif n'a pas été connecté, dans son action, au reste de l'installation contrairement à ce qui était initialement prévu à ISPRA.

Il conviendrait, donc, de réessayer le traitement avec un sédiment plus riche en fibres de posidonie et moins désagrégées ; et en poursuivant le traitement dans son intégralité.

4.5) RÉSULTATS

Compte tenu de l'importante quantité de données résultant de chaque essai de traitement expérimental, le présent chapitre contient uniquement un certain nombre de considérations et d'observations relatives aux éléments chimiques et physiques les moins conformes aux intervalles de concentration totaux propres aux sédiments marins provenant de zones marines côtières soumises à un impact anthropique faible voire inexistant (Cahier ISPRA : *Aspetti tecnico-scientifici per la salvaguardia ambientale nelle attività di movimentazione dei fondali marini: dragaggi portuali*; Pellegrini et al 2002.).

Les résultats ont été répartis entre les deux zones de prélèvement des sédiments destinés au traitement : Livourne et Cagliari. Pour ces deux sites, le sédiment « en l'état » est celui qui a été prélevé sur le site de dépôt portuaire, qui a été parfois analysé sur différentes fractions avant d'être dragué et transporté jusqu'à l'installation.

En vue de l'évaluation des résultats obtenus, nous avons pris en considération aussi bien des valeurs de référence présentes dans la documentation scientifique et réparties en fonction des zones marines côtières concernées par les cas étudiés, que les valeurs « L1 » et « L2 », telles que définies par l'A. min. 173/2016, relatif à la gestion des sédiments dans l'environnement marin côtier (Fig. 5.25). Les résultats évalués selon ces valeurs sont, donc, plus prudents dans le cas d'une réutilisation prévue dans la filière terrestre, sauf en ce qui concerne le paramètre applicable aux chlorures.

Tous les résultats des analyses menées sur les sédiments traités ainsi que sur les eaux utilisées figurent en Annexe (p66).

4.5.1) Résultats relatifs aux sédiments de Livourne

4.5.1.1) Composition granulométrique du sédiment de Livourne

La composition granulométrique du sédiment « Tel Quel » provenant du port de Livourne fait ressortir un contenu prédominant de sable grossier, avec une fraction pélitique inférieure à 20 % du total, comme le montre le graphique ci-après (Fig 5.1).

Il est constaté, dans le processus de séparation mécanique du sédiment « en l'état » par l'installation pilote, que le sable grossier contient, dans tous les cas, une fraction résiduelle de sable fin (SF). Ceci est dû à la différente coupe granulométrique appliquée au sédiment « en l'état » dans le cadre du processus de traitement à l'échelle pilote (hydrocyclonage avec coupe 200 microns entre sables grossiers et sables fins) par rapport à celle prévue par la méthode employée dans les analyses granulométriques de laboratoire, avec tamisage et séparation à 250 microns. Par la suite, la fraction de sables fins comprise entre 200 et 250 microns est comptabilisée comme sable grossier. La fraction pélitique, en revanche, est séparée de manière optimale : en effet, les fractions sableuses en contiennent des pourcentages très faibles.

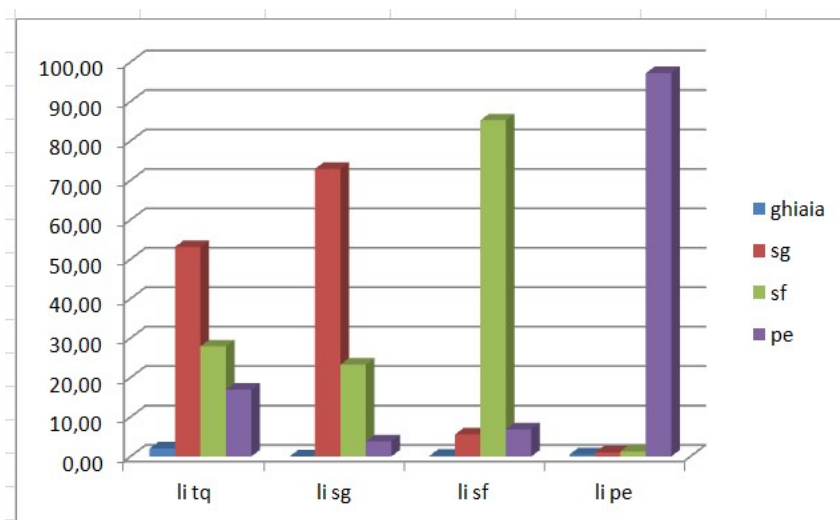


Fig 5.1 – Composition granulométrique en pourcentage relative au sédiment « en l'état » provenant de Livourne et aux fractions obtenues par le traitement de séparation.

4.5.1.2) Chimie du sédiment et des eaux de traitement dans le traitement des sédiments de Livourne

Par rapport aux valeurs chimiques des zones limitrophes faiblement polluées dotées d'une fraction pélitique comparable, le zinc est le seul élément contenu dans le sédiment « en l'état » (TQ) qui présente une concentration moyenne (sur 3 échantillons différents) relativement élevée, mais inférieure, dans tous les cas, à « L1 » tel que défini par l'A. min. 173/2016.

Le zinc contenu dans TQ est davantage présent, après séparation, dans la fraction pélitique (PE), dans laquelle il dépasse amplement la valeur « L2 » de l'A. min. 173/2016 (Fig 5.2).

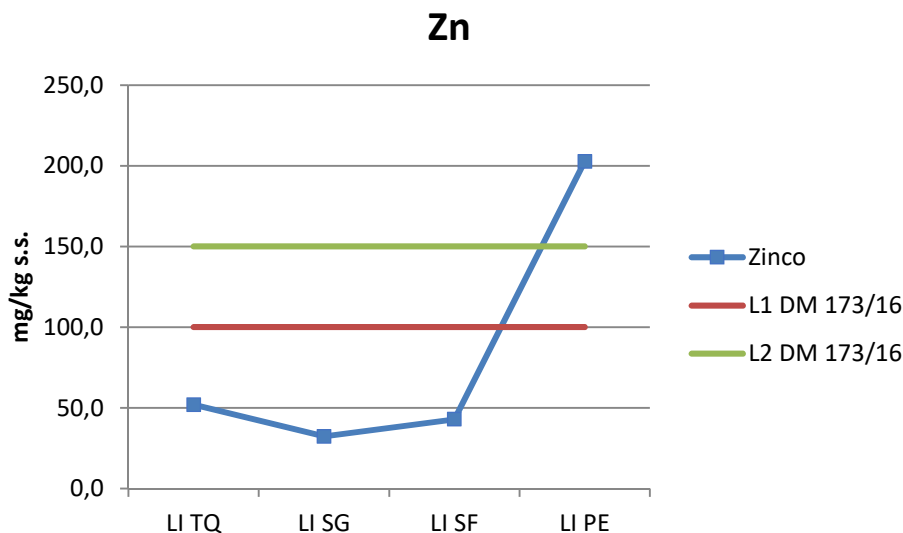


Fig. 5.2 – Évolution de la concentration de zinc (sédiments de Livourne)

Les concentrations anormales de zinc ne sont pas présentes, toutefois, dans les eaux de traitement, ce qui indique une faible solubilité du métal, qui est donc principalement associé à la fraction solide.

Outre le zinc, malgré les faibles valeurs constatées dans les sédiments de départ (TQ), les concentrations de cuivre et de nickel doivent également être évaluées de manière attentive : notamment, la fraction PE fait ressortir des concentrations supérieures à « L2 » (Figures 5.3 ; 5.4). L'on observe, par ailleurs, pour ces deux métaux, un enrichissement des concentrations dans les eaux de traitement en sortie de l'installation, par rapport à celles en entrée (Fig. 5.5).

Quant à la présence de métaux en trace dans les sédiments de Livourne, nous pouvons déduire que, bien qu'aucune pollution significative n'ait été décelée dans le sédiment traité, le processus de séparation mécanique (et de remobilisation des différents métaux) détermine la mobilisation et, par conséquent, une augmentation de la concentration de certains d'entre eux, qui doit être surveillée en fonction de la gestion identifiée.

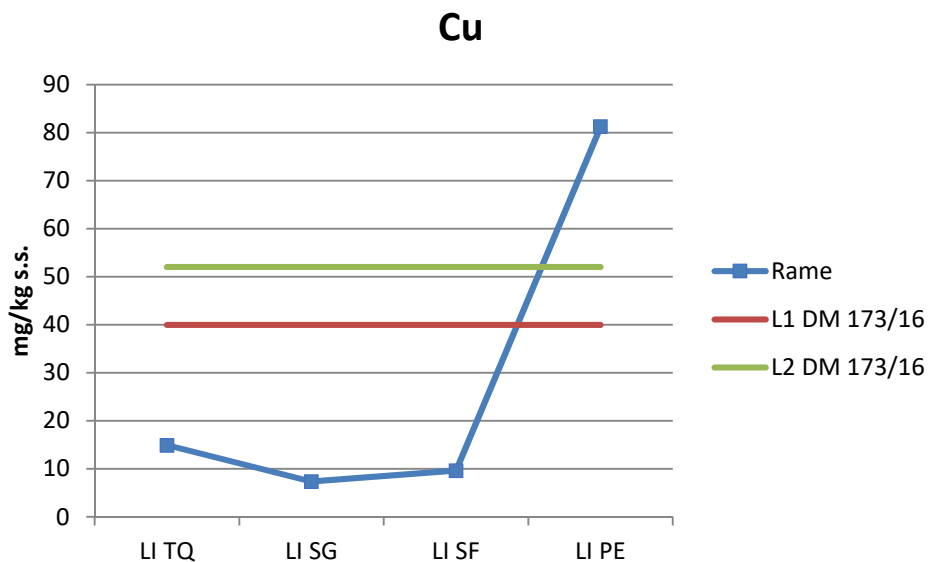


Fig. 5.3 – Évolution de la concentration de cuivre (sédiments Livourne)

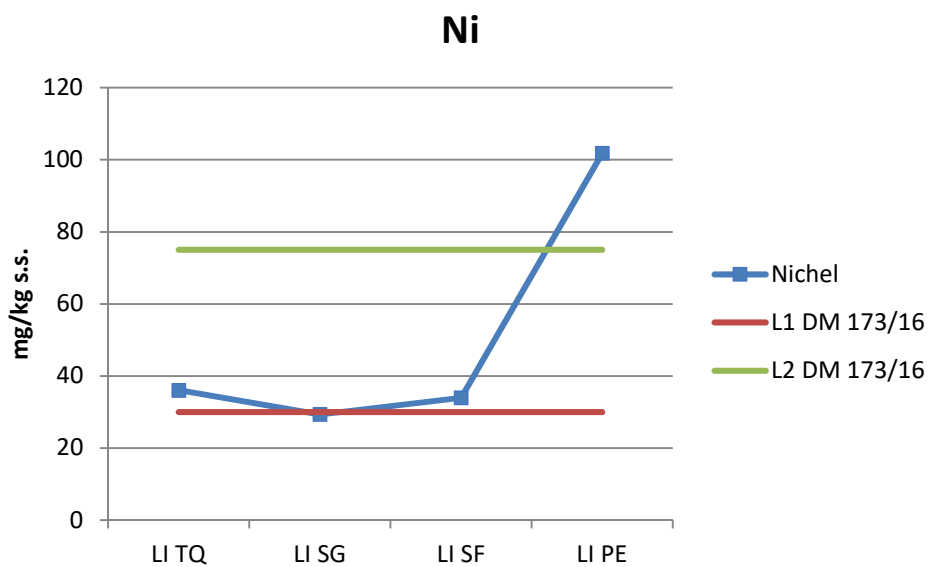


Fig. 5.4 – Évolution de la concentration de nickel (sédiments Livourne)

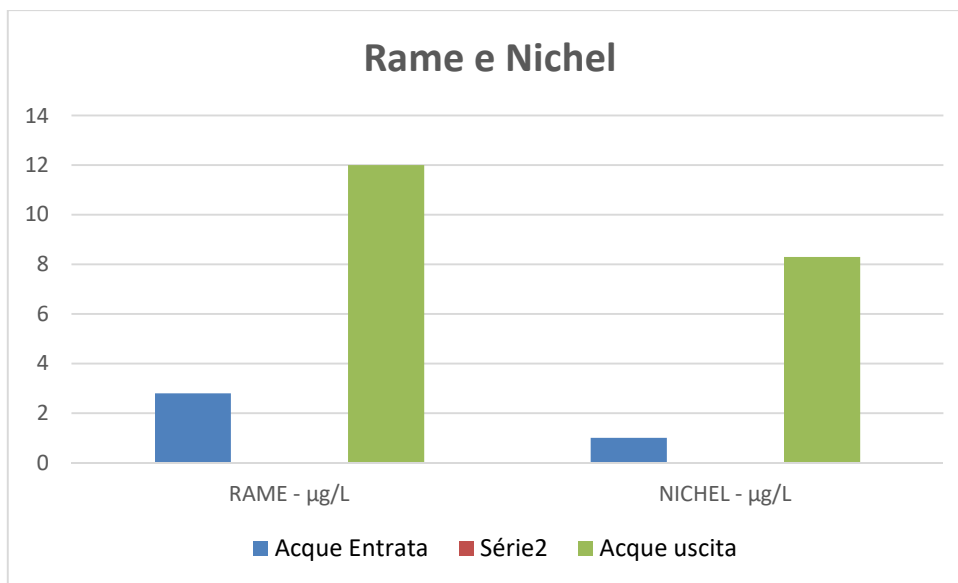


Fig. 5.5 – Concentration de cuivre et nickel dans les eaux de traitement (sédiments Livourne)

Quant à la pollution par des polluants organiques, les considérations suivantes s'appliquent : les concentrations de composés organostanniques (TBT) dans le sédiment TQ sont supérieures aux valeurs de « L1 » ; toutefois, la somme MBT, DBT et TBT, ne dépasse pas la valeur « L2 » (Figures 5.6 ; 5.7). La prépondérance de MBT par rapport à DBT et, à son tour, de DBT par rapport à TBT, semble indiquer une pollution non imputable à des phénomènes récents.

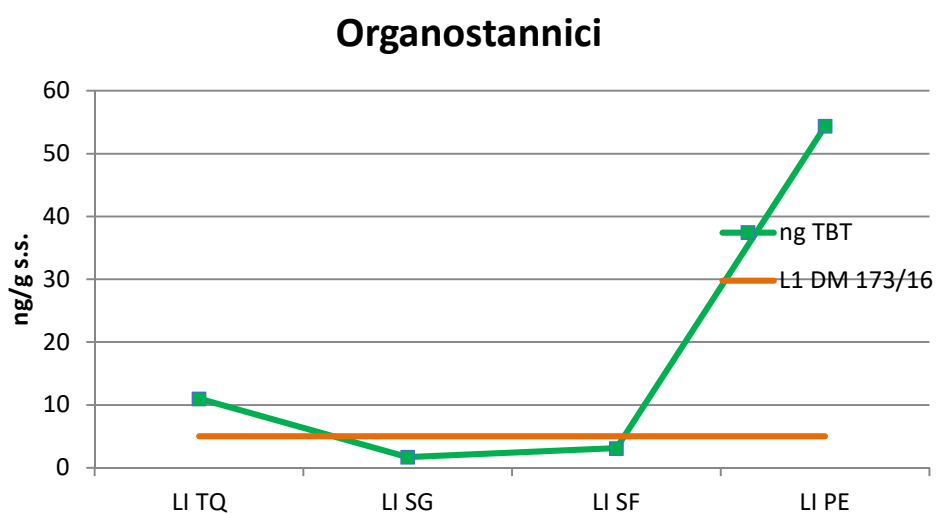


Fig. 5.6 – Évolution de la concentration de TBT (sédiments Livourne)

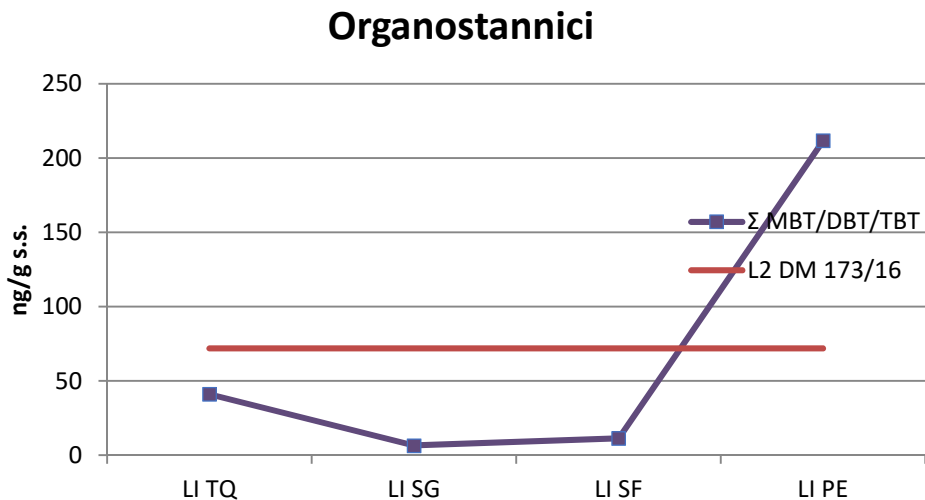


Fig. 5.7 – Évolution de la concentration de Σ MBT/DBT/TBT (sédiments Livourne)

Les concentrations d'hydrocarbures lourds (C > 12) sont supérieures à la limite « L2 » dans toutes les fractions, sauf pour les SG, avec une valeur maximale enregistrée dans la fraction PE (Fig. 5.8). Cette pollution n'a pas été constatée dans les eaux en sortie du processus, ce qui indique, peut-être, que les hydrocarbures présents ne peuvent pas être séparés facilement de la matrice dans laquelle ils se trouvent. Il convient de noter, en outre, les faibles concentrations d'HAP présentes dans toutes les fractions analysées.

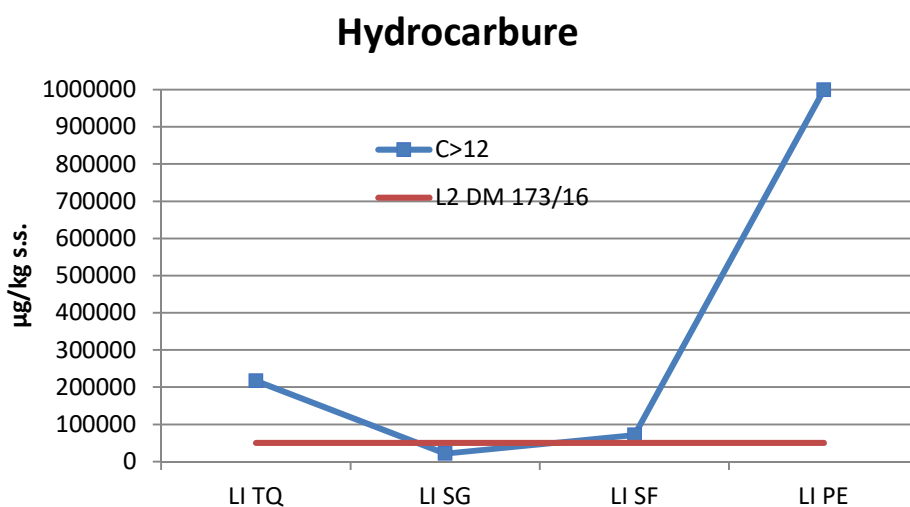


Fig. 5.8 – Évolution de la concentration d'hydrocarbures C > 12 (sédiments Livourne)

La somme des PCB est supérieure à la limite « L1 », mais inférieure, dans tous les cas, à la limite « L2 » uniquement pour la composante PE (Fig. 5.9).

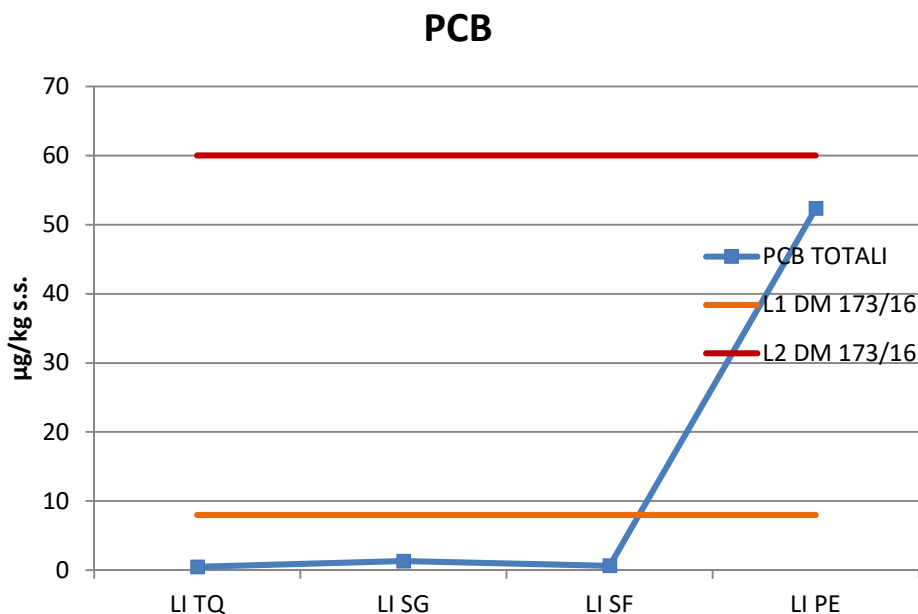


Fig. 5.9 – Évolution de la concentration de PCB (sédiments Livourne)

4.5.2) Résultats relatifs aux sédiments de Cagliari

4.5.2.1) Composition granulométrique du sédiment de Cagliari

La composition granulométrique du sédiment « en l'état » (TQ) provenant du site de Cagliari fait ressortir une teneur prédominante en sables fins, avec une fraction pélitique correspondant à environ 15 % du total, comme le montre le graphique ci-dessous (Fig. 5.10).

On remarque de manière encore plus évidente par rapport à ce que nous avons constaté pour les sédiments de Livourne que, dans le cadre du processus de séparation mécanique du sédiment « en l'état » par l'installation pilote, une fraction résiduelle de sables fins (SF) (environ 30 %) se trouve à l'intérieur de la fraction de sables grossiers (SG). Ceci est dû non seulement aux différentes coupes granulométriques appliquées dans le processus de traitement à l'échelle pilote et en laboratoire, mais aussi à une présence plus importante de sable fin dans les sédiments de Cagliari, qui entraîne, probablement, une réduction de l'efficacité de séparation entre ces deux classes granulométriques. Dans tous les cas, en prenant en compte les deux fractions sableuses dans leur ensemble (SG+SF) et les pérites (PE), l'efficacité globale de l'installation peut être considérée encore très satisfaisante.

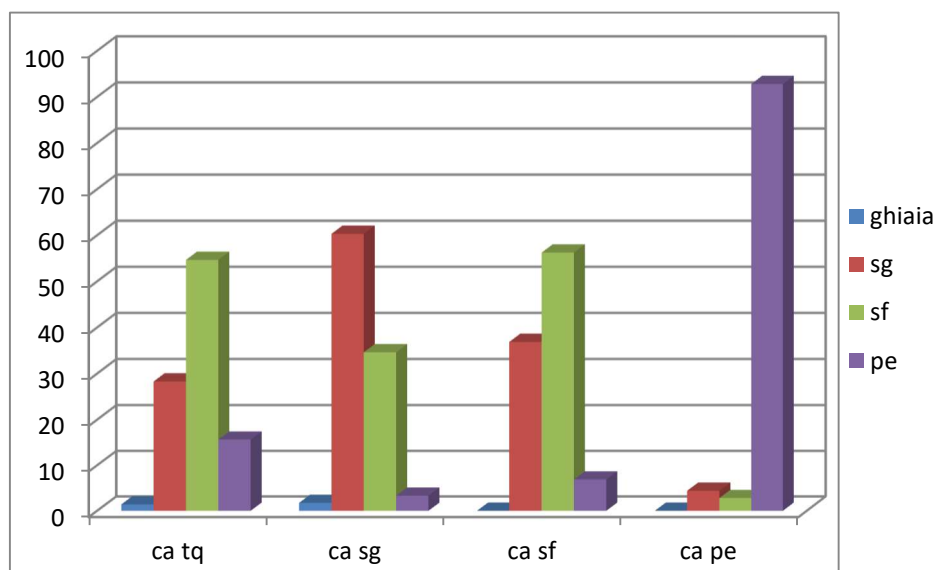


Fig 5.10 – Composition granulométrique en pourcentage des sédiments « en l'état » de Cagliari et des fractions obtenues par le traitement de séparation.

4.5.2.2) Chimie des sédiments et des eaux de traitement des sédiments de Cagliari

Faisant suite aux résultats des analyses, le plomb, le cadmium et le zinc trouvés dans les sédiments présentent des concentrations significatives (Figures 5.11 ; 5.12 ; 5.13). Les niveaux L1 et L2 de l'A. min. 173/2016 ont été dépassés, notamment :

- Le plomb présente des concentrations supérieures à L2 dans toutes les fractions, sauf pour le SG qui dépasse uniquement la limite L1. Il convient de noter que le sédiment TQ présente des valeurs plutôt élevées par rapport aux différentes fractions séparées, probablement à cause de la pollution visiblement variable du site de prélèvement. Les eaux de traitement ne présentent aucune augmentation de la concentration de plomb.

- Le cadmium présente également des concentrations supérieures à L2, sauf en ce qui concerne la fraction SG (qui est de toute façon supérieure à L1). Tout comme pour le plomb, l'évolution des différentes fractions confirme un niveau de pollution élevé. L'on constate dans les eaux de traitement, une augmentation dont l'ordre de grandeur est égal à celui de la concentration. L'on remarque également, donc, pour ce métal, un plus faible lien avec la fraction solide.

- Le zinc a un comportement similaire à celui du cadmium, avec un dépassement de la limite L2 pour toutes les fractions, sauf le SG, qui présente des valeurs conformes à L1. Tout comme pour le plomb, la concentration de zinc dans les sédiments n'influe pas sur celle mesurée dans les eaux de traitement.

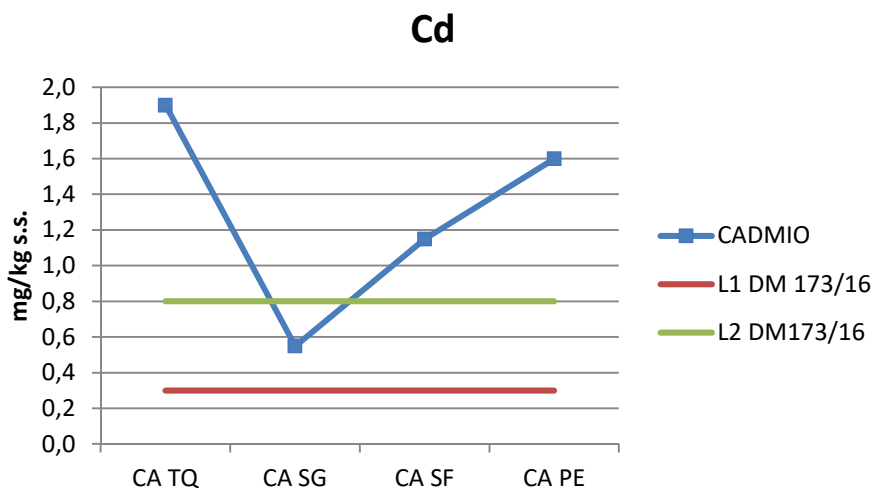


Fig. 5.11 – Évolution de la concentration de cadmium (sédiments Cagliari)

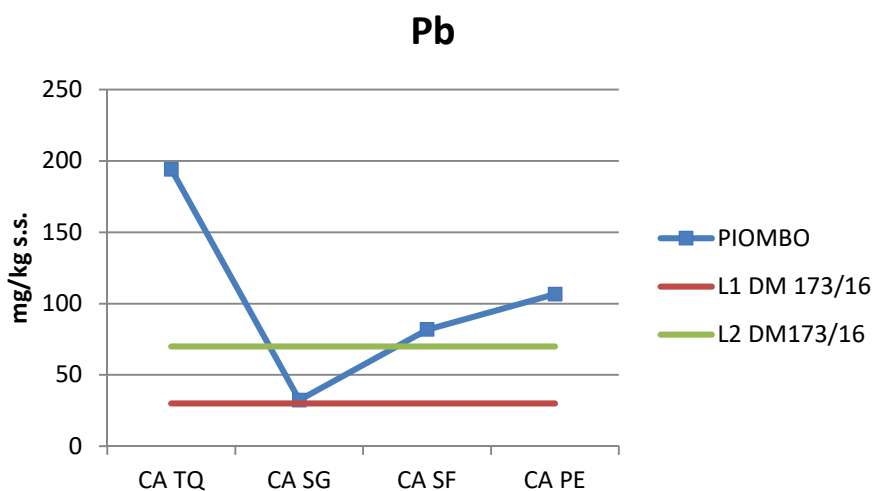


Fig. 5.12 – Évolution de la concentration de plomb (sédiments Cagliari)

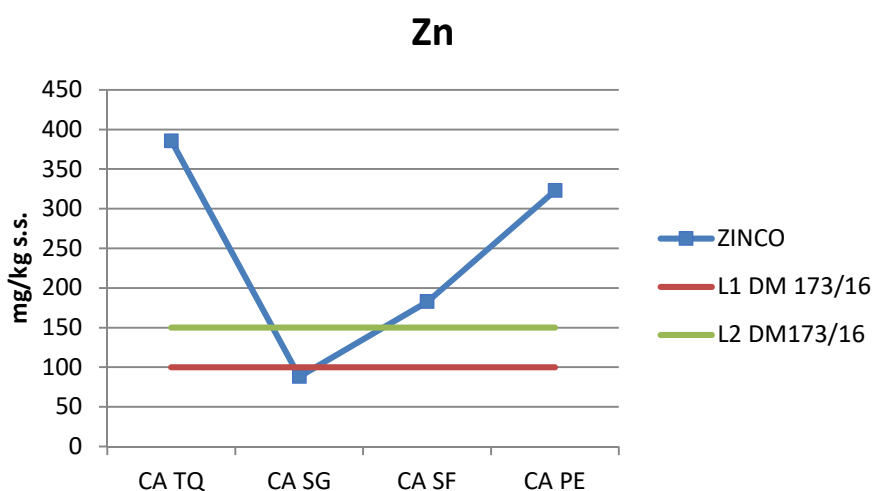


Fig. 5.13 – Évolution de la concentration de zinc (sédiments Cagliari)

En outre, en ce qui concerne les eaux de traitement des sédiments de Cagliari, l'on constate une augmentation non seulement de la concentration de cadmium, mais aussi de certains métaux dont la concentration n'est pas élevée dans les sédiments : arsenic, antimoine, bore et mercure (Figures 5.14 ; 5.15 ; 5.16).

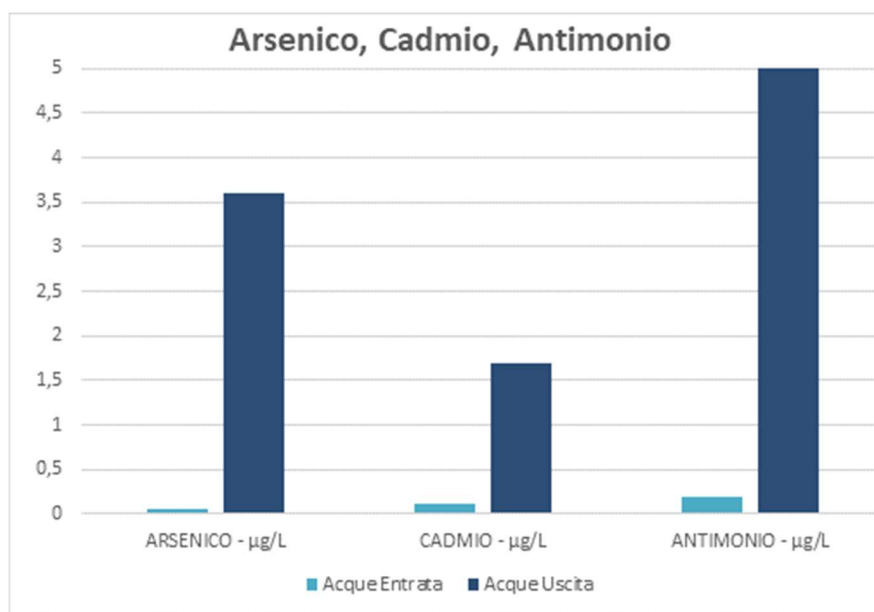


Fig. 5.14 – Concentration d'arsenic, cadmium et antimoine dans les eaux de traitement (sédiments Cagliari)

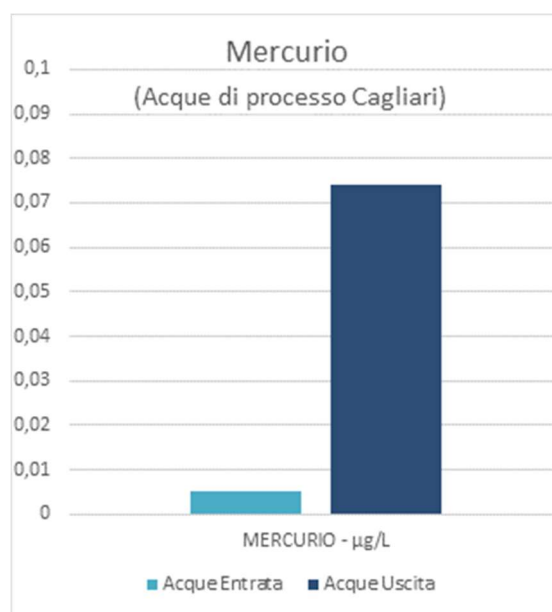


Fig. 5.15 – Concentration de mercure dans les eaux de traitement (sédiments Cagliari)

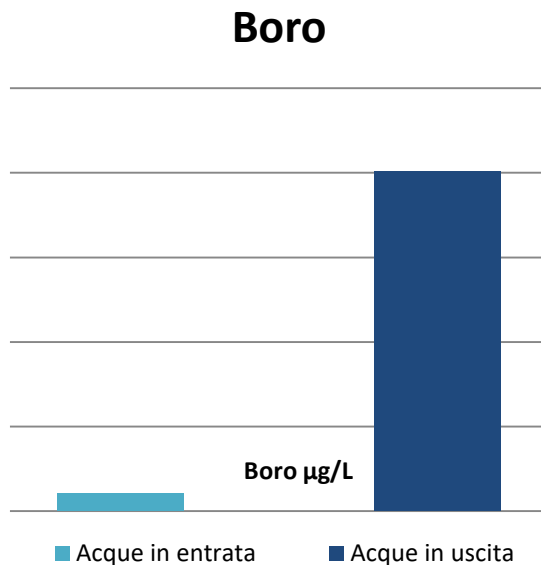


Fig. 5.16 – Concentration de bore dans les eaux de traitement (sédiments Cagliari)

En récapitulant, en ce qui concerne les sédiments de Cagliari, nous pouvons constater une pollution plus élevée de la fraction entrante (Cd, Pb et Zn), un abattement efficace dans la fraction « sable grossier » face à un enrichissement des eaux de traitement, y compris pour des métaux moins présents dans le sédiment « en l'état » (As et Hg).

En prenant en compte les polluants organiques, l'on constate, pour les composés organostanniques (TBT) provenant de Cagliari que, bien qu'aucune valeur supérieure à L2 n'ait été mesurée pour la somme MBT-DBT-TBT (avec DBT > TBT > MBT), le sédiment TQ et les fractions sableuses présentent une faible concentration de ce polluant. Toutefois, sa valeur est supérieure à L1 dans la PE (Figures 5.17 ; 5.18).

Contrairement à Cagliari, la légère pollution causée par les TBT dans les sédiments TQ de Livourne semble, dans tous les cas, moins récente compte tenu du différent rapport MDT, DBT et TBT (MBT > DBT > TBT).

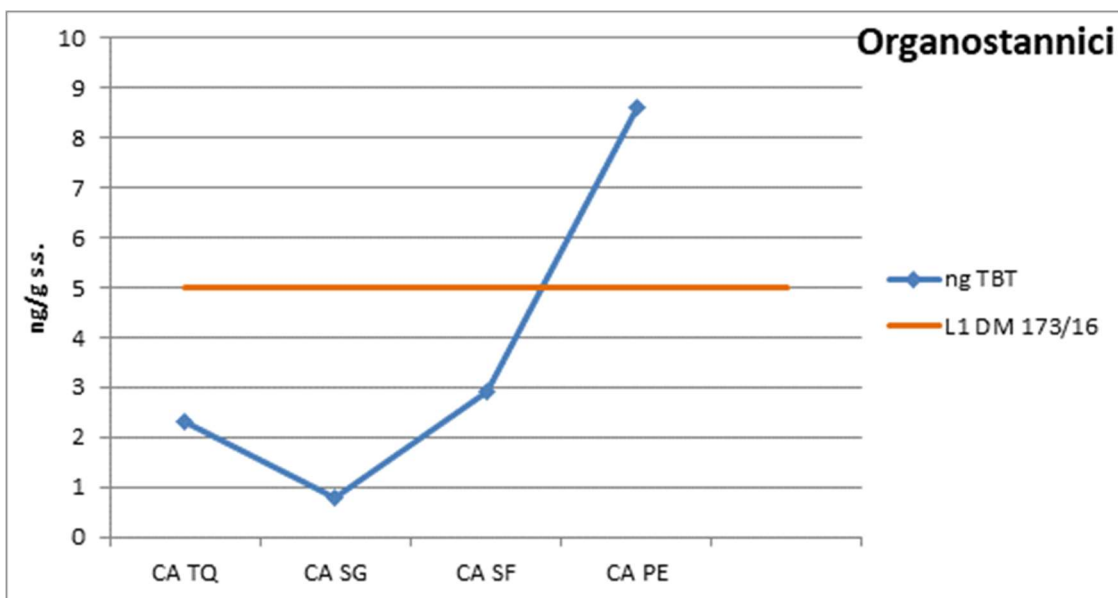


Fig. 5.17 – Évolution de la concentration des TBT (sédiments Livourne)

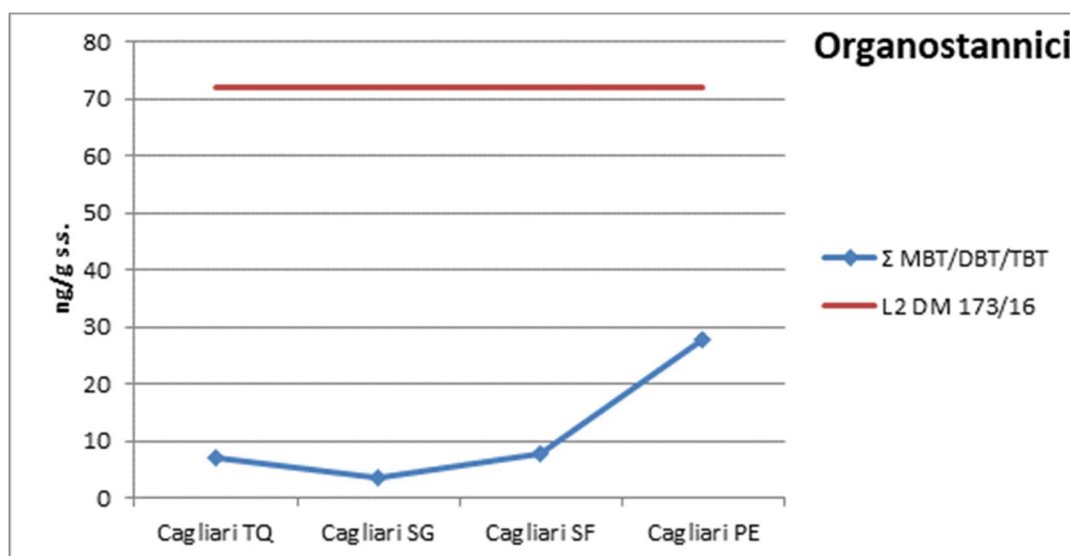


Fig. 5.18 – Évolution de la concentration de Σ MBT/DBT/TBT (sédiments Cagliari)

La concentration d'hydrocarbures lourds ($C > 12$) est élevée dans les sédiments entrants (TQ > L2), en particulier dans la fraction PE (Fig. 5.19). Aucune concentration élevée n'est présente, en revanche, dans les deux autres fractions (SG et SF). Cette pollution n'est pas présente, non plus, dans les eaux en sortie du processus, ce qui indique que, de toute évidence, les hydrocarbures présents, y compris dans les eaux de Cagliari, ne peuvent être séparés facilement de la matrice solide.

Idrocarburi

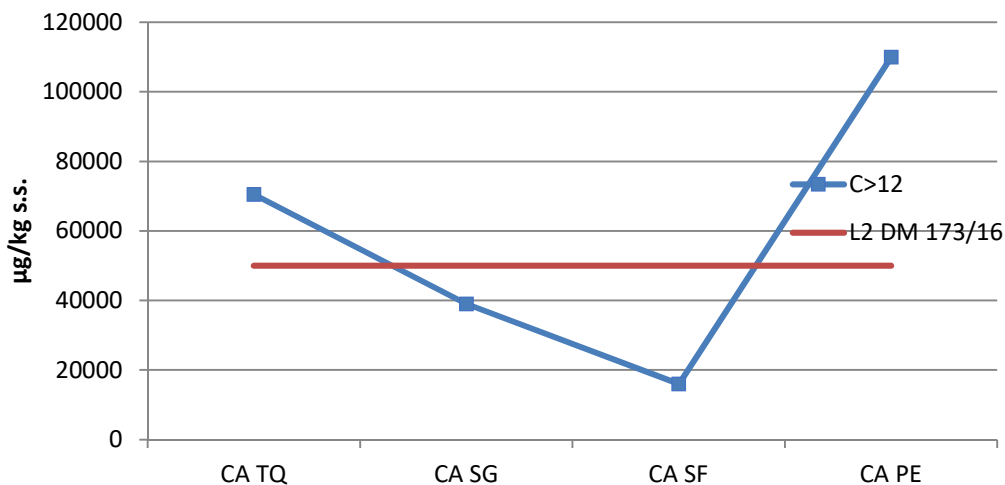


Fig. 5.19 – Évolution de la concentration d'hydrocarbures C > 12 (sédiments Cagliari)

Contrairement à Livourne, en ce qui concerne les HAP, l'on constate des valeurs non négligeables de congénères qui semblent se concentrer dans les SF (Fig. 5.20 ; 5.21 ; 5.22 ; 5.23 ; 5.24), probablement en vue de la formation de petits conglomerats, comme déjà observé dans de précédentes études (*Quality assessment of the solid matrix obtained after a process of mechanical separation of harbour sediments. Aquatic Ecosystem Health and Management* 8(2):209-219; Mugnai C., Pilato F., Pellegrini D., Merico G., 2005..).

Dans ce cas, donc, bien que l'analyse des eaux de traitement ne fasse ressortir aucune augmentation de la concentration de ces congénères considérés comme des substances dangereuses prioritaires, la gestion des fractions sableuses mérite une analyse approfondie.

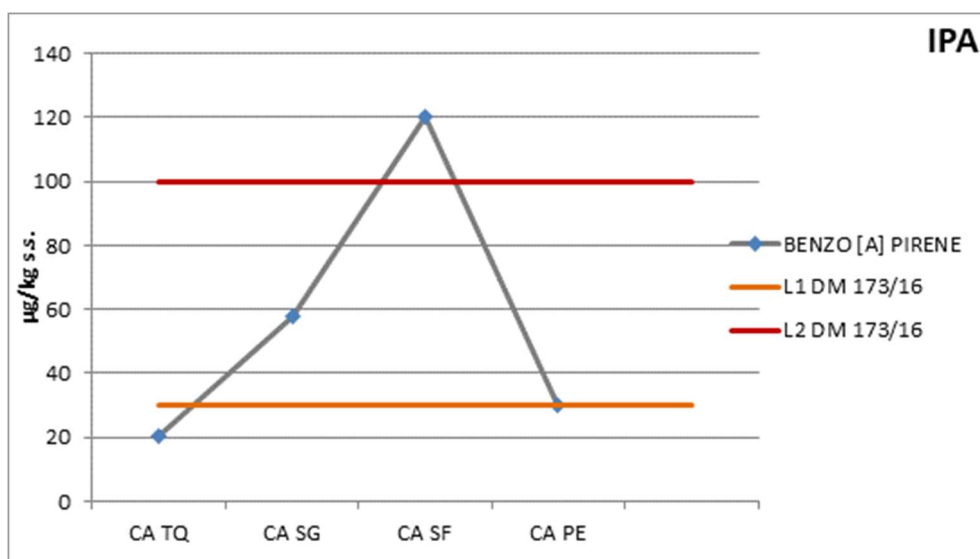


Fig. 5.20 – Évolution du benzo [A] pyrène (sédiments Cagliari)

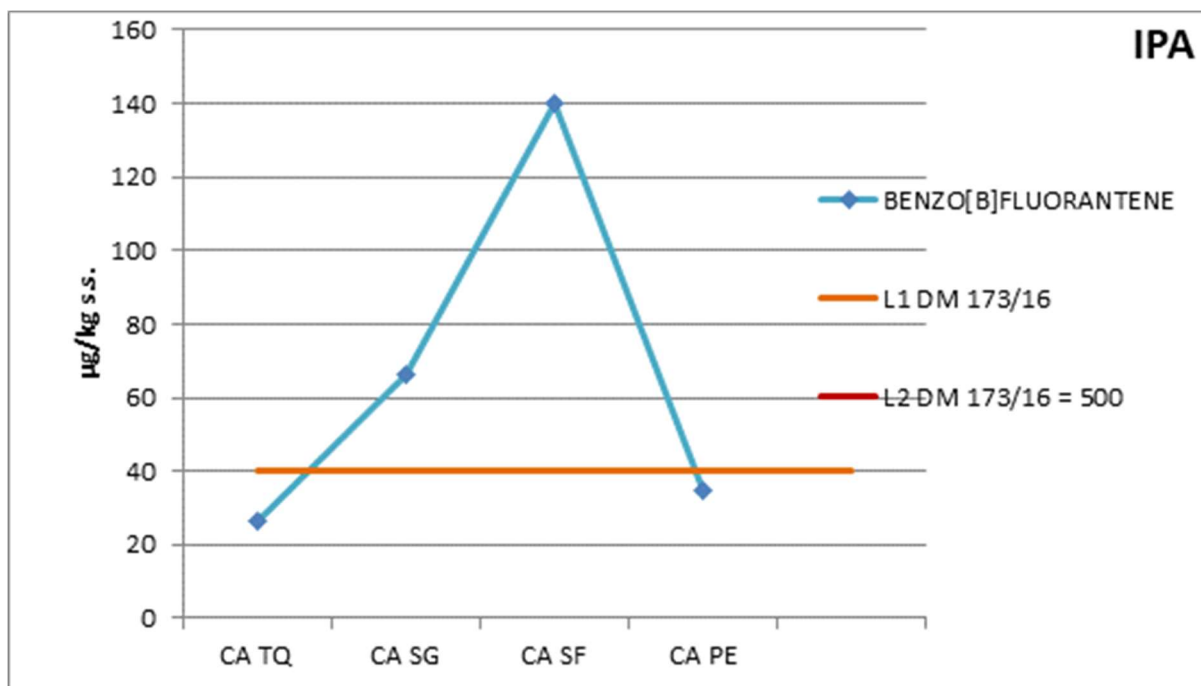


Fig. 5.21 – Évolution du benzo [B] fluoranthène (sédiments Cagliari)

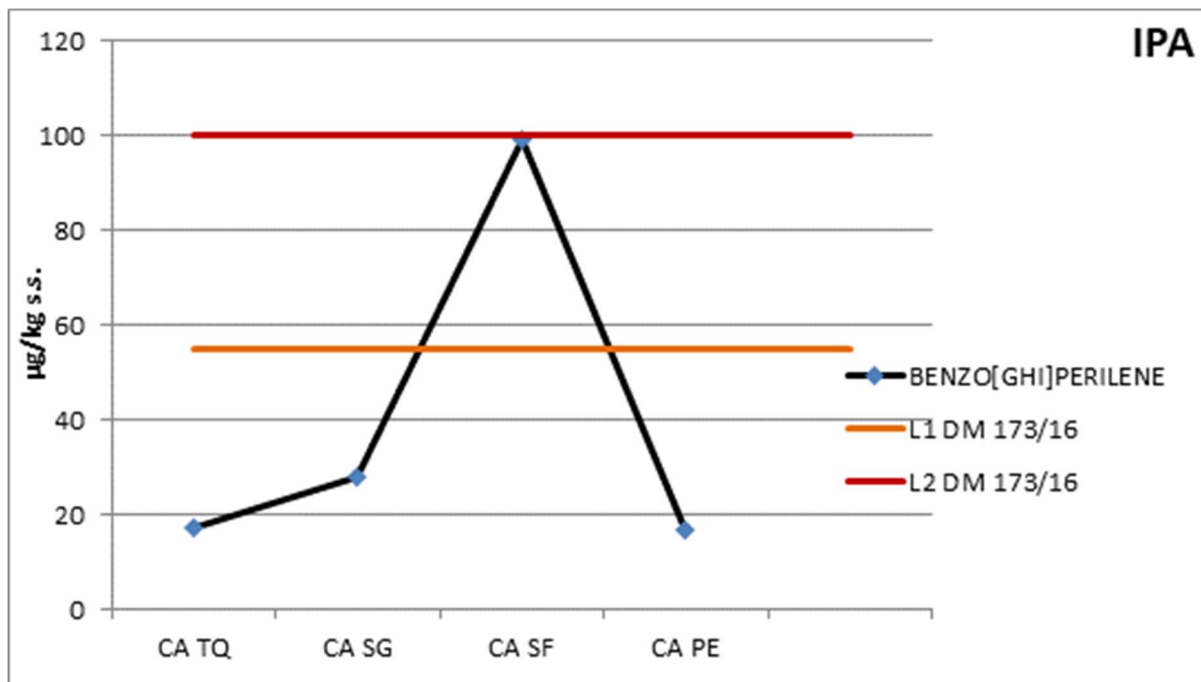


Fig. 5.22 – Évolution du benzo [GHI] pérylène (sédiments Cagliari)

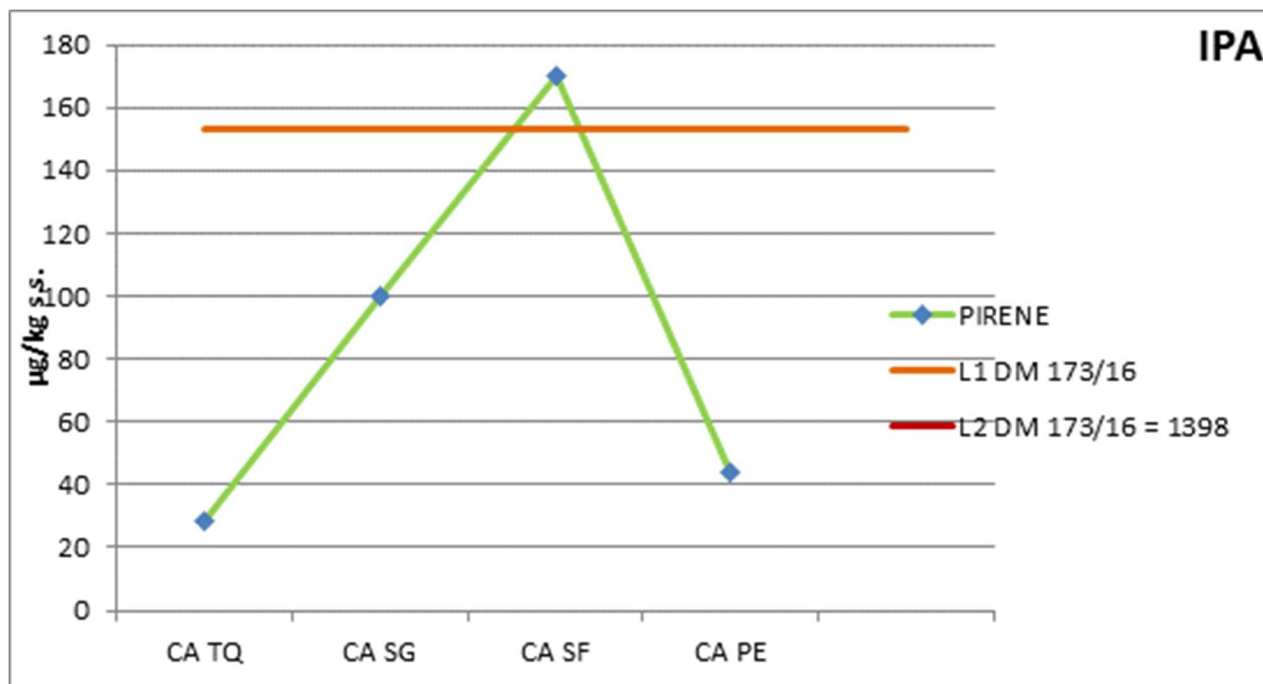


Fig. 5.23 – Évolution du pyrène (sédiments Cagliari)

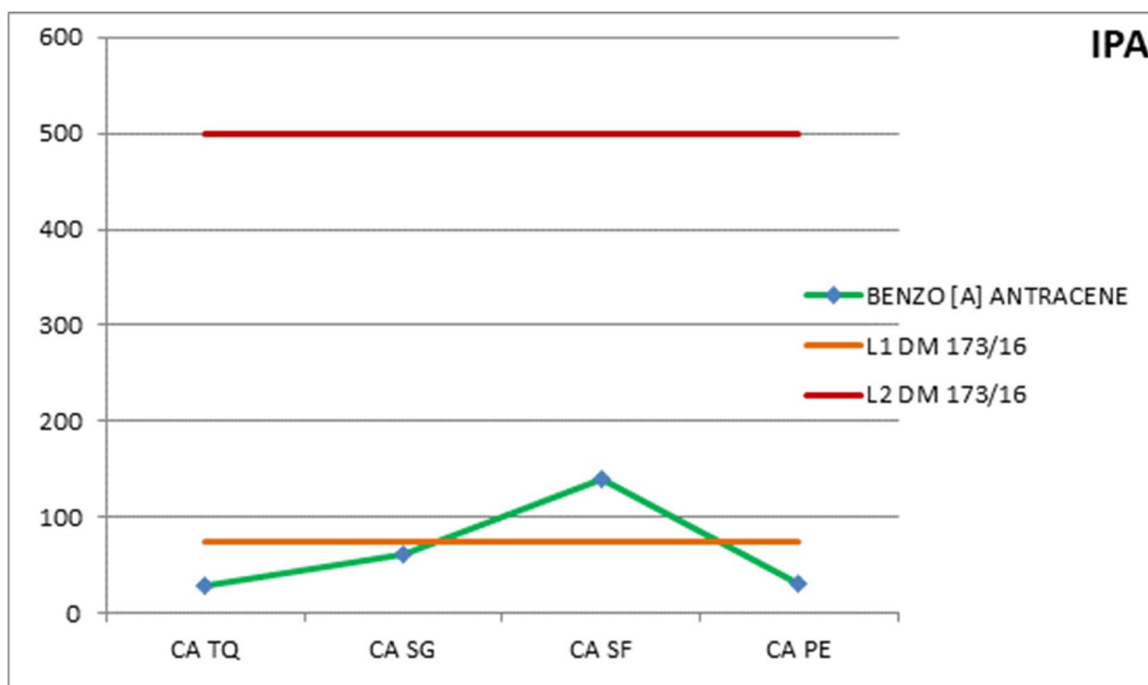


Fig. 5.24 – Évolution du benzo [A] anthracène (sédiments Cagliari)

PARAMETRO	L1	L2
Elementi in tracce	[mg kg⁻¹] p.s.	
Arsenico	12	20
Cadmio	0,3	0,80
Cromo	50	150
Cr VI	2	2
Rame	40	52
Mercurio	0,3	0,80
Nichel	30	75
Piombo	30	70
Zinco	100	150
Contaminanti organici	[µg kg⁻¹] p.s.	
Composti organostannici	5 ⁽¹⁾	72 ⁽²⁾
Σ PCB ⁽³⁾	8	60
Σ DDD ⁽⁴⁾	0,8	7,8
Σ DDE ⁽⁴⁾	1,8	3,7
Σ DDT ⁽⁴⁾	1,0	4,8
Clordano	2,3	4,8
Aldrin	0,2	10 ⁷
Dieldrin	0,7	4,3
Endrin	2,7	10

PARAMETRO	L1	L2
α-HCH	0,2	10 ⁷
β-HCH	0,2	10 ⁷
γ-HCH (Lindano)	0,2	1,0
Eptacloro epossido	0,6	2,7
HCB	0,4	50 ⁷
Idrocarburi C>12	Non disponibile	50000
Σ IPA(16) ⁽⁵⁾	900	4000
Antracene	24	245
Benzo[a]antracene	75	500
Benzo[a]pirene	30	100
Benzo[b]fluorantene	40	500 ⁷
Benzo[k]fluorantene	20	500 ⁷
Benzo[g,h,i]perilene	55	100 ⁷
Crisene	108	846
Indenopirene	70	100 ⁷
Fenantrene	87	544
Fluorene	21	144
Fluorantene	110	1494
Naftalene	35	391
Pirene	153	1398
Σ T.E. PCDD,PCDF ⁽⁶⁾ (Diossine e Furani) e PCB diossina simili	2 x 10 ⁻³	1 x 10 ^{-2*}

Fig. 5.25 – Valeurs de référence « L1 » et « L2 » établies par l'A. min. 173/2016

4.6) COMPOSANTE ÉCONOMIQUE

Les principaux postes de dépense des essais de traitement des sédiments par le processus de *soil washing* peuvent être répartis dans les catégories suivantes :

Postes de dépense	Euro (€)
Préparation d'une zone équipée et achat de matériaux et composants pour l'adaptation de l'installation et des équipements, par le biais de contrats de sous-traitance conclus avec des entreprises externes à ISPRA :	
<ul style="list-style-type: none"> • Achat de modules et amélioration de l'installation existante • Révision de l'installation électrique et hydraulique, sécurité • Maintenance ordinaire et extraordinaire des éléments mécaniques existants • Nettoyage de la zone 	<p>35 000</p> <p>2 200</p> <p>3 700</p> <p>500</p>
Frais relatifs aux opérations de prélèvement, transport et apport de sédiments entre le lieu du prélèvement et l'installation :	
Livourne :	750
Cagliari :	2 500
Missions de conseil et engagement d'ouvriers et techniciens spécialisés pour la préparation des opérations de traitement :	4 900
Assistance, contrôle et activité de surveillance environnementale (ARPAT) :	14 500
Frais administratifs et d'assurance (caution) :	650
Location pelleteuse et générateur :	750
Frais d'expédition de matériaux et échantillons :	150
Élimination des déchets solides et matrices liquides :	3 500
Consommation d'eau (environ 20 m ³) :	30
Carburant pour groupe électrogène 30 KVA (50 litres environ) :	75
Personnel technique ISPRA (gestion de l'installation, exécution des traitements et analyses chimiques, physiques et écotoxicologiques) :	1 500 heures/homme

4.7) CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les principales considérations résultant des procédures techniques et administratives qui ont mené à l'exécution des essais de traitement des sédiments pollués par « soil washing » peuvent être résumées comme suit :

Le *soil washing* (lavage du sol) exploite la tendance des polluants à se concentrer dans la fraction fine, en raison de sa plus grande surface spécifique, donc plus soumise aux phénomènes d'adsorption concernant à la fois la substance organique que les contaminants eux-mêmes.

Par rapport à la matrice sableuse, principalement composée de silice et de carbonates, la fraction limoneuse-argileuse est essentiellement caractérisée par des minéraux argileux, des oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium et des matières organiques, toutes des espèces chimiques très actives dans les processus d'échange ionique et de complexation.

Le traitement de *soil washing* a permis d'obtenir un sable de bonne qualité environnementale, adapté aux opérations de réutilisation indiquées par les autres partenaires du projet SEDITERRA, et une fraction fine principale destinatrice pour la migration des polluants.

La réalisation de tests de rejet menés sur les eaux de traitement et sur les éluats des sédiments a été jugée utile pour analyser la mobilité des polluants dans des matrices complexes comme les sédiments marins afin de comprendre les modalités de variation de la libération de ces éléments dans l'environnement marin côtier et lors de la réutilisation à terre.

En plus de l'évaluation qualitative des sédiments, ces tests ont également été utiles pour évaluer la capacité de transfert des contaminants des sédiments vers l'eau de traitement, en simulant les impacts potentiels que différentes options de gestion et de réutilisation (par exemple, matériaux de route, engraissement des plages, matériaux de construction, etc.) pourraient avoir sur l'environnement.

Outre la concentration de départ des éléments chimiques recherchés dans les sédiments et la grande variabilité environnementale du site de prélèvement des sédiments traités, un certain nombre de facteurs physico-chimiques (tels que le pH, le potentiel Redox, la solubilité, la température, les concentrations d'Oxygène et de Carbone Organique), en interagissant entre eux, peuvent avoir un impact sur les processus de mobilité des polluants, et complexifient l'évaluation qualitative des différents paramètres examinés et donc du processus de traitement utilisé. Par conséquent, du processus de traitement appliqué. Ces facteurs d'interférence devraient être étudiés plus en détail lors d'expériences ultérieures.

Le « *rapport final sur les activités de surveillance* » confiées à ARPAT contient les conclusions formulées par ARPAT qui – en résumé – indiquent dans les eaux de process « *une tendance générale à la migration des polluants surveillés, avec une augmentation de leur concentration* » et dans les fractions solides récupérées « *une augmentation générale de la concentration des polluants surveillés dans les fractions fines par rapport aux fractions sableuses* ».

La comparaison avec les valeurs chimiques de référence (L1 et L2) pour les zones limitrophes à faible contamination présentant une fraction fine comparable a fait ressortir une situation de départ (TQ – Tel Quel) relativement peu compromise.

L'application du procédé de séparation mécanique montre une concentration de métaux dans les fractions les plus fines (PE) en faveur des sables grossiers (SG), qui ne sont pratiquement plus contaminés et donc réutilisables : les valeurs trouvées sont généralement inférieures à L1, à l'exception du cadmium pour lequel, cependant, il n'y a pas d'association évidente avec la composition granulométrique.

Afin de réutiliser les matériaux récupérés, il convient d'examiner les processus de transfert et de solubilisation de certains éléments chimiques, car les essais réalisés ont fait ressortir une augmentation de la concentration de certains métaux dans les eaux de traitement par rapport aux eaux en entrée, preuve du passage de certains métaux du sédiment à l'eau.

L'évaluation des concentrations en composés organostanniques fait ressortir des valeurs différentes entre Livourne et Cagliari. En particulier pour Livourne : en partant de niveaux sur brut supérieurs à L1, on parvient à des valeurs supérieures à L2 dans les fines, mais dans tous les cas, des fractions sableuses SG et SF réutilisables, grâce à l'abattement de cette pollution.

En ce qui concerne la pollution aux hydrocarbures, l'attention est attirée uniquement sur les concentrations d'hydrocarbures lourds (C>12) qui sont supérieures à la valeur "L2" dans toutes les fractions mais avec des valeurs négligeables dans les sables grossiers. Il n'y a aucune preuve de transfert des sédiments vers l'eau de traitement.

Pour les HAP de Cagliari, bien que l'analyse des eaux de traitement ne fasse ressortir aucune augmentation spécifique de la concentration des congénères présentant les concentrations les plus élevées, s'agissant toutefois, de substances dangereuses prioritaires, il convient de consacrer une attention particulière à la gestion des fractions sableuses, malgré l'excellente efficacité d'abattement de l'installation pilote pour d'autres polluants.

Les hydrocarbures lourds ne suscitent aucune inquiétude, même en tenant compte du fait que, s'agissant d'une pollution non-spécifique, il conviendrait de procéder à des analyses supplémentaires afin de déterminer quels sont les composés réellement responsables de la teneur élevée.

Les recherches relatives aux teneurs en PCB font ressortir une concentration de ces substances dans les fractions fines et une libération négligeable entre le sédiment brut (TQ) et l'eau.

L'usine pilote a rempli avec efficacité et précision sa fonction de séparation mécanique des sédiments selon les différentes classes granulométriques qui les composent.

Les résultats obtenus indiquent que les sédiments portuaires traités par l'installation pilote peuvent fournir des matériaux appropriés de bonne qualité physico-chimique : la réutilisation des fractions de sable SG récupérées est donc possible.

À partir d'un matériau initial (TQ) de bonne qualité environnementale, même la fraction sableuse fine (SF) pourrait être également valorisée ; la fraction fine résiduelle (<63µm) représente un volume plus réduit de sédiments à éliminer par rapport aux sédiments bruts, ce qui apporte des avantages économiques et environnementaux.

D'autres expériences similaires à celles menées dans le cadre du projet Sediterra sont nécessaires et souhaitables, afin de mettre en œuvre et de promouvoir la récupération et l'utilisation des matériaux traités dans le cadre de travaux de réemplois bénéfiques.

Il convient de continuer à approfondir les expérimentations menées, y compris par le développement et l'application de nouvelles techniques intégrées et innovantes, appliquées à des sédiments marins présentant des niveaux de contamination plus élevés que ceux testés dans le cadre de ce projet.

4.8) RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES et NORMES DE RÉFÉRENCE

- DIRECTIVE 2000/60/CE octobre 2000
- DIRECTIVE 2008/56/CE juin 2008
- Règlement (CE) n° 1013/2006 14 juin 2006
- Règlement (CE) n° 660/2014 15 mai 2014
- Décret-loi n° 152/2006
- Arrêté ministériel n° 172/2016
- Arrêté ministériel n° 173/2016
- Cahier ICRAM « Aspetti tecnico-scientifici per la salvaguardia ambientale nelle attività di movimentazione dei fondali marini: dragaggi portuali » [Aspects techniques et scientifiques pour la protection de l'environnement dans le cadre des activités de manutention des fonds marins]. Janvier 2002
- Manuel de manutention des sédiments marins ; 2006, APAT-ICRAM.
- Lignes directrices SNPA 18/2018. Analisi granulometriche dei sedimenti marini [Analyses granulométriques des sédiments marins] Romano E., Ausili A., Bergamin L., Celia Magno M., Pierfranceschi G., Venti F., 2018.

4.9) ANNEXE

ANNEXE : MÉTHODES ET RÉSULTATS D'ANALYSE (cf. page 66)

V. ALLEGATI : METODICHE E RISULTATI ANALITICI

METODICHE E RISULTATI ANALITICI

RELATIVI AI CAMPIONI DI SEDIMENTO TRATTATO E ALLE ACQUE DI PROCESSO

3.1 METODICHE

3.2 RISULTATI ANALITICI

3.1 METODICHE

Metodiche utilizzate per le determinazioni delle concentrazioni degli elementi ricercati nei sedimenti e nelle acque di processo, compresi i test di cessione:

Analisi chimiche:

EPA 3051A 2007 EPA 6020B 2014 EPA 6010D 2014
EPA3545A 2007 EPA8270E 2018
UNI EN 12457-2:2004 EPA3510C 1996 EPA8270E 2018
UNI EN 12457-2:2004 EPA5021A 2014 EPA8260D 2018

Residuo secco:

DM 13/09/1999 SO n°185 GU n°248 21/10/1999 Met. II.2

Fluoruri, Solfati e Cloruri:

EPA 300.0 1993

Test cessione:

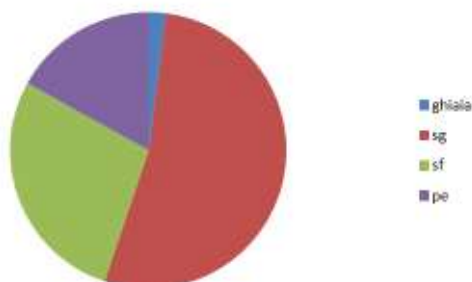
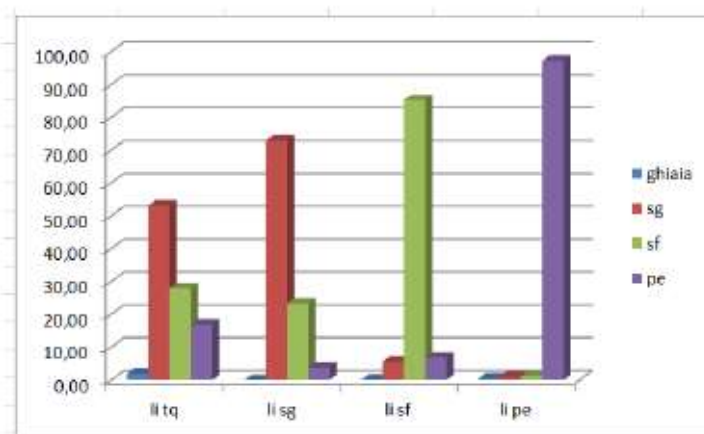
UNI EN 12457 – 2 : 2004
APHA Standard methods for examination of water and wastewater ed.22st 2012, 3125
UNI EN ISO 17294-2.2016
UNI EN ISO 10304-1 :2009

3.2 RISULTATI ANALITICI

Risultati trattamento sedimento di Livorno

Composizione granulometrica in percentuale del sedimento di Livorno

Campione	GHIAIE	SABBIE					PELITI
	2000 µm	1000µm	500µm	250µm	125µm	63µm	<63µm
LI_TQ 1	1,41	2,28	6,50	19,51	43,59	11,07	15,64
LI_SG1	1,75	6,47	19,58	34,27	29,90	4,72	3,32
LI_SF1	0,00	0,56	5,77	30,54	49,91	6,33	6,89
LI_PE1	0,00	0,88	3,28	15,54	41,36	14,22	24,73



Concentrazione dei parametri chimici rilevati nel sedimento di Livorno

Sedimento Livorno				
Campione:	TQ	SG	SF	PE
METALLI (mg/kg s.s.)				
Alluminio	7688,9	4137	4613,4	26999
Antimonio	6,7	1,1	1,7	6,2
Arsenico	7,7	4,45	5,3	17,8
Bario	19,4	9,8	9,5	113,8
Berilio	0,567	-	0,395	0,859
Boro	-	-	-	87
Cadmio	0,11	0,06	0,06	1,07
Cobalto	-	8,1	-	25
Cromo Totale	53,3	30,1	38,7	201,8
Cromo IV	-	0,3	-	-
Ferro	14842	8884	9872	43229
Manganese	483,1	488	455	1031
Mercurio	-	0,03	0,028	0,09
Molibdeno	23	-	-	3,9
Nichel	36,1	29,4	34	101,9
Piombo	8,8	7,55	9,8	55,1
Rame	14,9	7,4	9,65	81,3
Selenio	2,65	-	0,86	6,7
Stagno	-	-	-	3,95
Tallio	-	-	-	-
Vanadio	16,5	14,8	19,6	53,15
Zinco	52,1	32,4	43	202,8
COMPOSTI ORGANOSTANNICI (ng/g s.s.)				
ng TBT g-1 s.s.	11,0	1,7	3,1	54,4
TBT ng Sn g-1 s.s.	4,5	0,7	1,3	22,2
ng DBT g-1 s.s.	14,1	1,5	3,1	67,0
DBT ng Sn g-1 s.s.	7,2	0,8	1,6	34,2
ng MBT g-1 s.s.	16,0	3,4	5,2	90,5
MBT ng Sn g-1 s.s.	10,8	2,3	3,5	61,1

<i>IDROCARBURI POLICICLICI AROMATICI (µg/kg s.s.)</i>				
	TQ	SG	SF	PE
IDROCARBURI C6-C10	250,0	500	2725	500
IDROCARBURI C10-C40	217400	22000	72100	1000000
BENZENE		5	0,34	5
TOLUENE		5	1,700	5
XILENI		5	0,340	5
ETILBENZENE		5	1,700	5
STIRENE		0,005	1,700	5
ACENAFTENE		5	0,120	5
ACENAFTILENE		5	0,970	5
ANTRACENE		5	3,200	5
BENZO [A] ANTRACENE	50,0	5	2,325	13
BENZO [A] PIRENE	50,0	5	3,175	15
BENZO[B]FLUORANTENE	50,0	5	2,275	21
BENZO[E]PIRENE		5		15
BENZO[GHI]PERILENE	50,0	5	3,225	5
BENZO[J]FLUORANTENE		5		5
BENZO[K]FLUORANTENE	50,0	5	2,075	10
CRISENE	50,0	5	2,925	19
DIBENZO [A,H] ANTRACENE	50,0	5	0,085	5
FENANTRENE		5	2,100	5
FLUORENE		5	0,760	5
FLUORANTENE		5	8,000	23
INDENO[1,2,3-CD]PIRENE	50,0	5	3,125	11
NAFTALENE		5	1,400	5
PIRENE	17,0	5	3,475	23
<i>PCB TOTALI (µg/kg s.s.)</i>				
PCB TOTALI (WHO-TEQ)	50	0,0097		4,7700
2,4,4'-TRICLOROBIFENILE (PCB-28)		0,059	0,050	2,0100
2,2',5,5'-TETRACLOROBIFENILE (PCB-52)	17	0,1	0,140	4,6100
3,3',4,4'-TETRACLOROBIFENILE (PCB-77)	0,5	0,0005	0,050	0,3500
3,4,4',5-TETRACLOROBIFENILE (PCB-81)		0,0005	0,050	0,0005
2,2',4,5,5'-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-101)		0,19	0,260	7,8900
2,3,3',4,4'-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-105)		0,067		2,3000
2,3,4,4',5-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-114)		0,0005		0,0970
2,3',4,4',5-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-118)		0,22	0,190	8,1000

118)				
2',3,4,4',5- PENTACLOROBIFENILE (PCB- 123)		0,0005		0,1100
3,3',4,4',5- PENTACLOROBIFENILE (PCB- 126)		0,0005	0,050	0,0430
2,2',3,3',4,4'-ESACLOROBIFENILE (PCB-128)		0,045	0,050	1,9400
2,2',3,4,4',5'- ESACLOROBIFENILE (PCB-138)		0,24	0,370	10,7100
2,2',4,4',5,5'-ESACLOROBIFENILE (PCB-153)		0,25	0,210	10,6700
2,3,3',4,4',5-ESACLOROBIFENILE (PCB-156)		0,021	0,050	0,9400
2,3,3',4,4',5'- ESACLOROBIFENILE (PCB-157)		0,005		0,2500
2,3',4,4',5,5'-ESACLOROBIFENILE (PCB-167)		0,012		0,5500
3,3',4,4',5,5'-ESACLOROBIFENILE (PCB-169)		0,0005	0,050	0,0010
2,2',3,4,4',5,5'- EPTACLOROBIFENILE (PCB-180)		0,12	0,110	5,0500
2,3,3',4,4',5,5'- EPTACLOROBIFENILE (PCB-189)		0,0005		0,0930
CARBONIO ORGANICO TOTALE (TOC)	1 % p/p	5 mg/Kg	0,71 % p/p	18,2 mg/Kg
RESIDUO SECCO A 105°C % P/P	87	82	83	
CLORURI MG/KG	1300		240	
FLUORURI MG/KG	3,4		3,1	
SOLFATI MG/KG	3100		2400	

Concentrazione dei parametri chimici rilevati nel sedimento di Livorno (test di cessione)

Test di cessione Sedimento Livorno				
Campione:	TQ	SG	SF	PE
METALLI (mg/L)				
Antimonio	0,00025	0,200	0,00025	0,6
Arsenico	0,0005	0,500	0,00050	0,5
Bario	0,025	4,200	0,02500	41
Cadmio	0,00025	0,025	0,00025	0,025
Cromo Totale	0,0025	0,500	0,00250	1,9
Mercurio	0,00005	0,500	0,00005	0,05
Molibdeno	0,01	3,100	0,01000	14
Nichel	0,001	0,500	0,00100	2,7
Piombo	0,0005	0,500	0,00050	0,5
Rame	0,0025	0,500	0,00250	4,5
Selenio	0,0005	0,100	0,00050	0,1
Zinco	0,01	1,300	0,01000	2,3
IDROCARBURI POLICICLICI AROMATICI (µg/L)				
	TQ	SG	SF	PE
IDROCARBURI C6-C10		120	120	130
IDROCARBURI C10-C40		120	120	130
BENZENE		0,05	0,05	0,05000
TOLUENE		0,25	0,25	0,25000
XILENI		0,5	0,5	0,50000
ETILBENZENE		0,25	0,25	0,25000
STIRENE		0,25	0,25	0,25000
ACENAFTENE		0,00028	0,00028	0,00028
ACENAFTILENE		0,00028	0,00028	0,00028
ANTRACENE		0,00028	0,00028	0,02800
BENZO [A] ANTRACENE		0,00028	0,00028	0,00028
BENZO [A] PIRENE		0,00007	0,00007	0,00007
BENZO[B]FLUORANTENE		0,00028	0,00028	0,00028
BENZO[E]PIRENE				

BENZO[GHI]PERILENE		0,00028	0,00028	0,00028
BENZO[J]FLUORANTENE				
BENZO[K]FLUORANTENE		0,00028	0,00028	0,00028
CRISENE		0,00028	0,00028	0,00028
DIBENZO [A,H] ANTRACENE			0,00028	0,00028
FENANTRENE		0,00028	0,00028	0,00028
FLUORENE		0,00028	0,00028	0,00028
FLUORANTENE		0,00028	0,00028	0,00028
INDENO[1,2,3-CD]PIRENE		0,00028	0,00028	0,00028
NAFTALENE		0,00028	0,00028	0,00310
PIRENE		0,00028	0,00028	0,00028
<i>PCB (µg/L)</i>				
2,4,4'-TRICLOROBIFENILE (PCB 28)		0,00028	0,00028	0,00028
2,2',5,5'-TETRACLOROBIFENILE (PCB-52)		0,00028	0,00028	0,00028
3,3',4,4'-TETRACLOROBIFENILE (PCB-77)		0,00028	0,00028	0,00028
3,4,4',5-TETRACLOROBIFENILE (PCB-81)		0,00028	0,00028	0,00028
2,2',4,5,5'-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-101)		0,00028	0,00028	0,00028
2,3',4,4',5-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-118)		0,00028	0,00028	0,00028
3,3',4,4',5-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-126)		0,00028	0,00028	0,00028
2,2',3,3',4,4'-ESA CLOROBIFENILE (PCB-128)		0,00028	0,00028	0,00028
2,2',3,4,4',5'-ESA CLOROBIFENILE (PCB-138)		0,00028	0,00028	0,00028
2,2',4,4',5,5'-ESA CLOROBIFENILE (PCB-153)		0,00028	0,00028	0,00028
2,3,3',4,4',5-ESA CLOROBIFENILE (PCB-156)		0,00028	0,00028	0,00028
3,3',4,4',5,5'-ESA CLOROBIFENILE		0,00028	0,00028	0,00028

(PCB-169)				
2,2',3,4,4',5,5'-EPTACLOROBIFENILE (PCB-180)		0,00028	0,00028	0,00028
2,3,3',4,4',5,5'-EPTACLOROBIFENILE (PCB-189)			0,00028	
INDICE FENOLO		5	5	5

*Concentrazione dei parametri chimici rilevati nelle acque di processo
utilizzate per il trattamento dei sedimenti di Livorno*

Acque di processo Livorno		
	Acque in Entrata	Acque in Uscita
METALLI (µg/L)		
Argento	0,5	0,5
Alluminio	12,5	12,5
Arsenico	0,5	0,5
Bario	47	42
Cadmio	0,09	0,11
Cobalto	0,5	0,5
Cromo Totale	0,5	0,5
Cromo IV	0,15	0,15
Rame	2,8	12
Ferro	38	52
Mercurio	0,005	0,013
Manganese	5,4	14
Nichel	0,5	8,3
Piombo	2,6	2,4
Antimonio	0,2	0,4
Selenio	0,3	0,7

Stagno	0,25	0,25
Tallio	0,025	0,025
Vanadio	0,5	0,5
Zinco	61	62
Boro	254	466
<i>ORGANOSTANNICI (µG/L)</i>		
TBT	0,014	0,0009
<i>IDROCARBURI POLICICLICI AROMATICI (µG/L)</i>		
IDROCARBURI C6-C10	25	25
IDROCARBURI C10-C40	25	25
BENZENE	0,05	0,05
TOLUENE	0,05	0,05
ORTO-XILENE	0,05	0,05
META-XILENE + PARA-XILENE	0,1	0,1
ETILBENZENE	0,05	0,05
STIRENE	0,05	0,05
ANTRACENE	0,002	0,0005
BENZO[A]ANTRACENE	0,0005	0,0005
BENZO[A]PIRENE	0,0005	0,001
BENZO[B]FLUORANTENE	0,0005	0,001
BENZO[E]PIRENE	0,0005	0,001
BENZO[GHI]PERILENE	0,0005	0,001
BENZO[J]FLUORANTENE	0,0005	0,0005
BENZO[K]FLUORANTENE	0,0005	0,0005
CRISENE	0,0005	0,002
DIBENZO[AH]ANTRACENE	0,0005	0,0005
FENANTRENE	0,004	0,0005
FLUORANTENE	0,001	0,002
INDENO[1,2,3-CD]PIRENE	0,0005	0,0005
PIRENE	0,0005	0,003

<i>PCB (µg/L)</i>		
PCB TOTALI	0	0,00049
PCB TOTALI (WHO-TEQ)	0	0,00001
2,4,4'-TRICLOROBIFENILE (PCB 28)	0,000005	0,00001
2,2',5,5'-TETRACLOROBIFENILE (PCB-52)	0,000005	0,00004
3,3',4,4'-TETRACLOROBIFENILE (PCB-77)	0,000005	0,000005
3,4,4',5-TETRACLOROBIFENILE (PCB-81)	0,000005	0,000005
2,2',4,5,5'-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-101)	0,000005	0,00008
2,3,3',4,4'-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-105)	0,000005	0,00003
2,3,4,4',5-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-114)	0,000005	0,000005
2,3',4,4',5-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-118)	0,00003	0,00007
2',3,4,4',5-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-123)	0,000005	0,000005
3,3',4,4',5-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-126)	0,000005	0,000005
2,2',3,3',4,4'-ESA CLOROBIFENILE (PCB-128)	0,000005	0,00001
2,2',3,4,4',5'-ESA CLOROBIFENILE (PCB-138)	0,000005	0,00011
2,2',4,4',5,5'-ESA CLOROBIFENILE (PCB-153)	0,000005	0,0001
2,3,3',4,4',5-ESA CLOROBIFENILE (PCB-156)	0,000005	0,000005
2,3,3',4,4',5'-ESA CLOROBIFENILE (PCB-157)	0,000005	0,000005
2,3',4,4',5,5'-ESA CLOROBIFENILE (PCB-167)	0,000005	0,000005
3,3',4,4',5,5'-ESA CLOROBIFENILE (PCB-169)	0,000005	0,000005
2,2',3,4,4',5,5'-EPTA CLOROBIFENILE (PCB-180)	0,000005	0,00005
2,3,3',4,4',5,5'-EPTA CLOROBIFENILE (PCB-189)	0,000005	0,000005
<i>CARBONIO ORGANICO TOT mg/L</i>	5,3	8,9
<i>CONDUCIBILITÀ µS/CM A 20°C</i>	631	1768
<i>pH</i>	8,3	7,9
<i>SOLIDI SOSPESI TOTALI mg/L</i>	34	13,6

Risultati trattamento sedimenti di Cagliari

Concentrazione dei parametri chimici rilevati nel sedimento di Cagliari

Sedimento Cagliari				
Campione:	TQ	SG	SF	PE
METALLI (mg/kg s.s.)				
Alluminio	4988	2168	3114	6979
Antimonio	3,4	-	1,6	1,6
Arsenico	12,2	4,34	8,53	14
Bario	208,6	76,4	122	524
Cadmio	1,9	0,55	1,15	1,6
Cobalto	-	1,4	-	3,5
Cromo Totale	7,6	11,7	9,5	21,8
Ferro	7439,7	3618,6	4730	8911
Manganese	80,7	114,4	33,4	125
Mercurio	-	0,06	0,32	0,25
Molibdeno	5,7	-	2,7	2,7
Nichel	3,1	4,1	4,7	10,4
Piombo	194,2	32,4	81,9	106,8
Rame	39	7,8	20,8	24,5
Selenio	1,3	-	0,87	0,87
Stagno	-	-	-	4,6
Vanadio	-	5,9	16	-
Zinco	385,9	88,4	182,9	322,9
COMPOSTI ORGANOSTANNICI				
ng TBT g-1 s.s.	2,3	< 1,5	2,9	8,6
TBT ng Sn g-1 s.s.	0,9	< 0,6	1,2	3,5
ng DBT g-1 s.s.	3,3	1,3	3,2	8,8
DBT ng Sn g-1 s.s.	1,7	0,7	1,6	4,5
ng MBT g-1 s.s.	< 3,0	< 3,0	< 3,0	10,2
MBT ng Sn g-1 s.s.	< 2,0	< 2,0	< 2,0	6,9

<i>IDROCARBURI POLICICLICI AROMATICI (µg/kg s.s.)</i>				
	TQ	SG	SF	PE
IDROCARBURI C6-C10	160	500,0000	16000,00	500
IDROCARBURI C10-C40	70490	39000,0000	16000,00	110000,0000
IPA TOTALI			1200,00	
BENZENE		5,0000	0,39	5,0000
TOLUENE		5,0000	1,95	5,0000
XILENI		5,0000		5,0000
ETILBENZENE		5,0000	3,90	5,0000
STIRENE		5,0000	3,90	5,0000
ACENAFTENE	0,5	5,0000	0,65	5,0000
ACENAFTILENE	0,5	5,0000	22,00	5,0000
ANTRACENE	4,93	13,0000	46,00	5,0000
BENZO [A] ANTRACENE	28,27	62,0000	140,00	30,0000
BENZO [A] PIRENE	20,25	58,0000	120,00	30,0000
BENZO[B]FLUORANTENE	26,17	66,0000	140,00	35,0000
BENZO[E]PIRENE		50,0000		27,0000
BENZO[GHI]PERILENE	17,24	28,0000	99,00	17,0000
BENZO[J]FLUORANTENE		25,0000		13,0000
BENZO[K]FLUORANTENE	27,23	31,0000	70,00	16,0000
CRISENE	23,52	66,0000	100,00	32,0000
DIBENZO [A,H] ANTRACENE	6,98	5,0000	0,65	5,0000
FENANTRENE	0,25	84,0000	38,00	18,0000
FLUORENE	6,25	5,0000	5,30	5,0000
FLUORANTENE	42,67	120,0000	180,00	46,0000
INDENO[1,2,3-CD]PIRENE	14,44	36,0000	100,00	19,0000
NAFTALENE	0,5	5,0000	10,00	5,0000
PIRENE	28,25	100,0000	170,00	44,0000
<i>PCB (µg/kg s.s.)</i>				
PCB TOTALI		2,9700	5,00	10,8600
PCB TOTALI (WHO-TEQ)		0,0170		0,0810
2,4,4'-TRICLOROBIFENILE (PCB 28)	2,5	0,0260	0,05	0,1000
2,2',5,5'-TETRACLOROBIFENILE (PCB-52)	2,5	0,5400	0,05	0,7700
3,3',4,4'-TETRACLOROBIFENILE (PCB-77)		0,0005	0,05	0,0170
3,4,4',5-TETRACLOROBIFENILE (PCB-81)		0,0005	0,05	0,0005
2,2',4,5,5'-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-101)	2,5	0,4000	0,99	1,5600
2,3,3',4,4'-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-105)		0,1100		0,2300
2,3,4,4',5-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-114)		0,0005		0,0170

2,3',4,4',5-PENTACLOROBIFENILE (PCB-118)	2,5	0,3600	0,65	1,8100
2',3,4,4',5-PENTACLOROBIFENILE (PCB-123)		0,0005		0,0005
3,3',4,4',5-PENTACLOROBIFENILE (PCB-126)		0,0005	0,05	0,0010
2,2',3,3',4,4'-ESACLOROBIFENILE (PCB-128)		0,1100	0,28	0,4200
2,2',3,4,4',5'-ESACLOROBIFENILE (PCB-138)	2,5	0,5400	1,90	2,1600
2,2',4,4',5,5'-ESACLOROBIFENILE (PCB-153)	2,5	0,4800	0,96	2,2000
2,3,3',4,4',5-ESACLOROBIFENILE (PCB-156)		0,0520	0,05	0,1800
2,3,3',4,4',5'-ESACLOROBIFENILE (PCB-157)		0,0094		0,0370
2,3',4,4',5,5'-ESACLOROBIFENILE (PCB-167)		0,0190		0,0850
3,3',4,4',5,5'-ESACLOROBIFENILE (PCB-169)		0,0005	0,05	0,0005
2,2',3,4,4',5,5'-EPTACLOROBIFENILE (PCB-180)	2,5	0,3300	0,05	1,6300
2,3,3',4,4',5,5'-EPTACLOROBIFENILE (PCB-189)		0,0005		0,0270
CARBONIO ORGANICO TOTALE (TOC)	2,8 % p/p	11 mg/kg	-	11 mg/kg
RESIDUO SECCO A 105°C % P/P	82	-	88 % p/p	-
CLORURI MG/KG	4600	-	3,3	-
FLUORURI MG/KG	4	-	940	-
SOLFATI MG/KG	3400	-	3100	-

Concentrazione dei parametri chimici rilevati nel sedimento di Cagliari (test di cessione)

Test di cessione Sedimento Cagliari				
Campione:	TQ	SG	SF	PE
METALLI (mg/L)				
Antimonio	0,004	1,5	0,0026	3,1
Arsenico	0,0028	1,1	0,0013	1,7
Bario	0,025	28	0,0250	41
Cadmio	0,00025			
Cromo Totale	0,00025	0,06	0,0003	0,17
Manganese	0,0025	0,5	0,0025	0,5
Mercurio	0,00005			
Molibdeno	0,085			
Nichel	0,0037			
Piombo	0,0005	0,05	0,0001	0,05
Rame	0,0098	18	0,0300	41
Selenio	0,0005	1	0,0010	3,4
Stagno		0,5	0,0005	0,5
Vanadio		2,5	0,0025	6,7
Zinco	0,048	0,1	0,0005	0,3
IDROCARBURI POLICICLICI AROMATICI (µG/L)				
IDROCARBURI C6-C10		91	90	110
IDROCARBURI C10-C40		91	90	110
BENZENE		0,05		0,05
TOLUENE		0,25	0,25	0,25
XILENI		0,5	0,5	0,5
ETILBENZENE		0,25	0,25	0,25
STIRENE		0,25	0,25	0,25
ACENAFTENE		0,00028	0,00028	0,00028
ACENAFTILENE		0,00028	0,00028	0,00028
ANTRACENE		0,0034		0,018
BENZO [A] ANTRACENE		0,00028	0,00028	0,00028
BENZO [A] PIRENE		0,00007	0,00007	0,00028
BENZO[B]FLUORANTENE		0,00028	0,00028	0,00028
BENZO[GHI]PERILENE		0,00028	0,00028	0,00028
BENZO[K]FLUORANTENE		0,00028	0,00028	0,00028

CRISENE		0,00028	0,00028	0,00028
DIBENZO [A,H] ANTRACENE		0,00028	0,00028	0,00028
FENANTRENE		0,00028	0,00028	0,00028
FLUORENE		0,00028	0,00028	0,00028
FLUORANTENE		0,00028	0,00028	0,00028
INDENO[1,2,3-CD]PIRENE		0,00028	0,00028	0,00028
NAFTALENE		0,00028	0,00028	0,00028
PIRENE		0,00028	0,00028	0,00028
2,4,4'-TRICLOROBIFENILE (PCB 28)		0,00028	0,00028	0,00028
2,2',5,5'-TETRACLOROBIFENILE (PCB-52)		0,00028	0,00028	0,00028
3,3',4,4'-TETRACLOROBIFENILE (PCB-77)		0,00028	0,00028	0,00028
3,4,4',5-TETRACLOROBIFENILE (PCB-81)		0,00028	0,00028	0,00028
2,2',4,5,5'-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-101)		0,00028	0,00028	0,00028
2,3',4,4',5-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-118)		0,00028	0,00028	0,00028
3,3',4,4',5-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-126)		0,00028	0,00028	0,00028
2,2',3,3',4,4'-ESA CLOROBIFENILE (PCB-128)		0,00028	0,00028	0,00028
2,2',3,4,4',5'-ESA CLOROBIFENILE (PCB-138)		0,00028	0,00028	0,00028
2,2',4,4',5,5'-ESA CLOROBIFENILE (PCB-153)		0,00028	0,00028	0,00028
2,3,3',4,4',5-ESA CLOROBIFENILE (PCB-156)		0,00028	0,00028	0,00028
3,3',4,4',5,5'-ESA CLOROBIFENILE (PCB-169)		0,00028	0,00028	0,00028
2,2',3,4,4',5,5'-EPTA CLOROBIFENILE (PCB-180)		0,00028	0,00028	0,00028
INDICE FENOLO		5	5	5

*Concentrazione dei parametri chimici rilevati nelle acque di processo
 utilizzate per il trattamento dei sedimenti di Cagliari*

Acque di processo Cagliari		
	Acque in Entrata	Acque in Uscita
METALLI (µg/L)		
Argento	1	0,5
Alluminio	12,5	12,5
Arsenico	0,5	3,6
Bario	41	38
Cadmio	0,11	1,7
Cobalto	0,5	0,5
Cromo Totale	0,5	0,5
Cromo IV	0,15	0,15
Rame	5,5	17
Ferro	49	17
Mercurio	0,005	0,074
Manganese	5,6	5,6
Nichel	2,1	8,1
Piombo	1,1	1,2
Antimonio	0,2	5
Selenio	0,1	1,2
Stagno	0,25	0,25
Tallio	0,025	0,025
Vanadio	0,5	2,4
Zinco	82	94
Boro	107	2010
ORGANOSTANNICI (µg/L)		
TBT	0,00005	0,0014

<i>IDROCARBURI POLICICLICI AROMATICI (µg/L)</i>		
IDROCARBURI C6-C10	25	25
IDROCARBURI C10-C40	25	25
BENZENE	0,05	0,05
TOLUENE	0,05	0,05
ORTO-XILENE	0,05	0,05
META-XILENE + PARA-XILENE	0,1	0,1
ETILBENZENE	0,05	0,05
STIRENE	0,05	0,05
ANTRACENE	0,011	0,003
BENZO[A]ANTRACENE	0,003	0,008
BENZO[A]PIRENE	0,0005	0,008
BENZO[B]FLUORANTENE	0,0005	0,007
BENZO[E]PIRENE	0,0005	0,007
BENZO[GHI]PERILENE	0,0005	0,007
BENZO[J]FLUORANTENE	0,0005	0,004
BENZO[K]FLUORANTENE	0,0005	0,004
CRISENE	0,006	0,007
DIBENZO[AH]ANTRACENE	0,0005	0,002
FENANTRENE	0,063	0,002
FLUORANTENE	0,05	0,01
INDENO[1,2,3-CD]PIRENE	0,0005	0,005
PIRENE	0,037	0,013
<i>PCB (µg/L)</i>		
PCB TOTALI	0	0,0012
PCB TOTALI (WHO-TEQ)	0	0,00003
2,4,4'-TRICLOROBIFENILE (PCB 28)	0,000005	0,00003
2,2',5,5'-TETRACLOROBIFENILE (PCB-52)	0,000005	0,00008
3,3',4,4'-TETRACLOROBIFENILE (PCB-77)	0,000005	0,000005
3,4,4',5-TETRACLOROBIFENILE (PCB-81)	0,000005	0,000005
2,2',4,5,5'-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-101)	0,000005	0,00017
2,3,3',4,4'-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-105)	0,000005	0,000005
2,3,4,4',5-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-114)	0,000005	0,000005
2,3',4,4',5-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-118)	0,000003	0,00015
2',3,4,4',5-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-123)	0,000005	0,000005
3,3',4,4',5-PENTA CLOROBIFENILE (PCB-126)	0,000005	0,000005
2,2',3,3',4,4'-ESA CLOROBIFENILE (PCB-128)	0,000005	0,00002

2,2',3,4,4',5'-ESACLOROBIFENILE (PCB-138)	0,000005	0,0003
2,2',4,4',5,5'-ESACLOROBIFENILE (PCB-153)	0,000005	0,00027
2,3,3',4,4',5-ESACLOROBIFENILE (PCB-156)	0,000005	0,000005
2,3,3',4,4',5'-ESACLOROBIFENILE (PCB-157)	0,000005	0,000005
2,3',4,4',5,5'-ESACLOROBIFENILE (PCB-167)	0,000005	0,000005
3,3',4,4',5,5'-ESACLOROBIFENILE (PCB-169)	0,000005	0,000005
2,2',3,4,4',5,5'-EPTACLOROBIFENILE (PCB-180)	0,000005	0,00014
2,3,3',4,4',5,5'-EPTACLOROBIFENILE (PCB-189)	0,000005	0,000005
<i>CARBONIO ORGANICO TOT mg/L</i>	2,5	13
<i>CONDUCIBILITÀ μS/CM A 20°C</i>	1016	9850
<i>pH</i>	7,2	7,7
<i>SOLIDI SOSPESI TOTALI mg/L</i>	1,25	82