

SVILUPPO DI UN APPROCCIO INTEGRATO PER IL TRATTAMENTO E IL RIUTILIZZO DEI SEDIMENTI DI DRAGAGGIO DA PICCOLI PORTI

A. POLETTINI¹, A. MUNTONI², R. POMI¹, G. DE GIOANNIS², B. VILLANI³, E. ROMANO⁴, G. MONTRESORI⁷, A. PIETERS⁵, A. RIZZI⁶, C. CORSI⁸, A. ZUCCA⁹, M. MORELLI³, S. DASTOLI⁴, S. RANIA⁸, A. SERCI², M. SUNSERI⁷, R. PERETTI⁹, GUBIANI, F.⁶

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza", ² Dipartimento di Geoingegneria e Tecnologie Ambientali dell'Università degli Studi di Cagliari, ³ Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente (ARPA) dell'Emilia Romagna, ⁴ Istituto per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), ⁵ ENVISAN NV, ⁶ I.C.O.P. S.p.A., ⁷ Labelab srl, ⁸ SOGESID S.p.A., ⁹ Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del CNR

(¹DICEA, Via Eudossiana 18, 00184 Roma)
alessandra.poletini@uniroma1.it

ABSTRACT

Gli interventi di dragaggio dei sedimenti portuali e marino-costieri, originariamente eseguiti al solo fine di ottenere o ripristinare adeguate condizioni di navigabilità, hanno progressivamente assunto una connotazione di carattere ambientale in ragione della presenza di livelli di contaminazione da inquinanti organici e inorganici che ne complicano la gestione. L'applicazione di processi di decontaminazione dei sedimenti inquinati ai fini del riutilizzo o dello smaltimento finale, tuttavia, trova ad oggi il principale ostacolo nei costi elevati delle tecnologie e nell'assenza di un mercato per i materiali recuperati. Il presente progetto, finanziato nell'ambito della call europea Life+08, si propone di individuare una strategia per la gestione degli interventi di dragaggio nei piccoli porti attraverso la creazione di una rete di interconnessione "orizzontale" e la integrazione verticale delle attività (caratterizzazione del sito, dragaggio, trattamento, gestione dei prodotti e dei residui, coinvolgimento degli attori istituzionali e privati).

Key words: sedimenti inquinati, dragaggio ambientale, separazione fisico-meccanica, vagliatura, idrociclonatura, separazione a spirale

1. INTRODUZIONE

I sedimenti rappresentano la matrice ambientale nella quale possono accumularsi i contaminanti organici e inorganici veicolati al sistema delle acque superficiali e sotterranee da fonti puntuali e diffuse di diversa natura [1]. L'entità dell'accumulo risulta dipendente, oltre che dalle caratteristiche specifiche dei sedimenti (quali dimensione delle particelle, superficie specifica, contenuto di sostanza organica, composizione chimica e mineralogica) anche dall'insieme delle condizioni chimiche, fisiche e biologiche che caratterizzano lo specifico comparto acquatico considerato e l'interfaccia solido/liquido, tra cui assumono particolare importanza il pH, il potenziale redox e la salinità [2]. Per effetto di fenomeni quali la variazione delle condizioni ambientali che ne hanno prodotto

l'accumulo, la risospensione o la movimentazione dei sedimenti, l'adsorbimento da parte delle specie acquatiche ed il successivo trasferimento nella catena alimentare, i contaminanti accumulatisi nei sedimenti possono essere nuovamente mobilizzati e resi disponibili nella colonna d'acqua, con effetti indesiderati che possono estendersi ben oltre la scala locale [3, 4].

Ciò implica che, al fine di preservare la qualità dell'ambiente acquatico e di prevenire tali effetti indesiderati sull'ambiente, si deve provvedere oltre che alla rimozione dei sedimenti inquinati, anche alla adozione di sistemi di dragaggio che ne limitino la risospensione nonché di appropriate opzioni di gestione dei materiali dragati [2, 5].

L'opzione della messa in sicurezza dei sedimenti inquinati attraverso copertura con materiali a bassa permeabilità, ovvero di applicazione di trattamenti di decontaminazione *in situ*, rappresenta una soluzione, alternativa al dragaggio, adottabile soltanto nelle aree in cui non esistono vincoli alle condizioni batimetriche imposte da esigenze di navigabilità. Di frequente, l'esistenza di tali vincoli rende invece necessari interventi di dragaggio e movimentazione di sedimenti inquinati, la cui successiva gestione non può evidentemente basarsi sulla semplice integrazione delle fasi di disidratazione e successivo riutilizzo a terra o a mare, come tipicamente avviene per il dragaggio di sedimenti non inquinati [5, 6].

Ai fini della gestione della quota parte di sedimenti caratterizzata da contaminazione, gli enormi quantitativi attesi pongono l'esigenza di individuare soluzioni che privilegino il riutilizzo dei materiali dragati, eventualmente previo trattamento, rispetto al confinamento in discarica controllata ovvero in casse di colmata. Lo schema di trattamento più appropriato, basato su un singolo stadio di processo ovvero sulla combinazione di più stadi, dovrebbe consentire di rimuovere, ovvero immobilizzare, a costi sostenibili, sia gli inquinanti organici (IPA, PCB, Idrocarburi pesanti,...) che i contaminanti inorganici (metalli e metalloidi, sali solubili), così da ottenere frazioni valorizzabili nel campo dell'ingegneria civile e naturalistica (sabbie e argille per ripascimento e ripristini ambientali) nel rispetto di criteri di protezione della qualità dell'ambiente naturale e della salute dell'uomo.

Tuttavia, nonostante il gran numero di ricerche condotte sino ad oggi, non sono noti esempi di applicazione in piena scala di processi di trattamento di sedimenti di dragaggio. Le cause di un tale insuccesso sono da ricondursi alla elevata complessità della contaminazione, alla elevata presenza di frazione fine (limo-argillosa) di difficile trattamento e per la quale è più complicato individuare opzioni di riutilizzo, al contenuto di specie interferenti, nonché alla presenza di ostacoli alla creazione di un mercato per i sedimenti trattati che renda sostenibili i costi associati al trattamento. I numerosi processi studiati a scala di laboratorio o pilota (elettrocinesi, sediment washing, ossidazione (elettro)chimica, rimozione biologica, ...), non risultano pertanto ad oggi ancora applicati in piena scala.

L'individuazione di un adeguato sistema di gestione risulta enormemente più complessa nei porti di piccole dimensioni ricadenti in aree a spiccata vocazione agricola e industriale e interessati da intense attività nautiche, nei quali le volumetrie da dragare e le caratteristiche specifiche delle aree, rendono difficoltosa la collocazione dei sedimenti in discarica controllata o in casse di colmata, ma al contempo vincoli di natura finanziaria rendono non sostenibili gli elevati costi dei trattamenti di decontaminazione, ciò anche per l'assenza di un mercato per i materiali di dragaggio.

Obiettivo del progetto è lo sviluppo di un sistema che integri le diverse fasi della gestione dei sedimenti (caratterizzazione, dragaggio, trattamento e valorizzazione) nella rete dei

piccoli porti della Regione Emilia-Romagna, con la finalità di separare, attraverso una adeguata combinazione di processi fisico-meccanici a ridotta complessità tecnologica, le frazioni sabbiose utilizzabili per il ripristino morfologico delle linee di costa.

Il progetto, sostenuto finanziariamente dalla Unione Europea attraverso lo strumento LIFE+08 e co-finanziato dalla Regione Emilia-Romagna, è coordinato dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza" e ha come partner il Dipartimento di Geoingegneria e Tecnologie Ambientali dell'Università degli Studi di Cagliari, l'Istituto per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), l'Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente (ARPA) dell'Emilia Romagna, ENVISAN NV, I.C.O.P. S.p.A. LabeLab srl, SOGESID S.p.A., e come sub-contraente l'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

2. DESCRIZIONE DELL'AREA DI STUDIO

L'area di studio ricade nella porzione marino-costiera della Regione Emilia-Romagna e comprende nove porti canale di piccole dimensioni: Goro, Porto Garibaldi, Cervia, Cesenatico, Bellaria, Rimini, Riccione, Porto Verde, Cattolica (cfr. Figura 1). Il porto di Ravenna che, per estensione e rilevanza, è annoverato tra i siti di rilevanza nazionale, è per questa ragione stato escluso dal presente studio. I nove piccoli porti canale in oggetto risultano prevalentemente dedicati all'ormeggio di pescherecci e alle attività connesse alla nautica di diporto. A causa della direzione prevalente delle correnti e dall'entità del trasporto solido, i porti canale sono di frequente interessati da fenomeni di interrimento che, per la presenza di pennelli e opere di protezione a mare, sono essenzialmente dovuti alla sedimentazione di particolato dilavato dalla regione appenninica e trasportato dai corsi d'acqua verso la foce. Di contro, il trasporto solido dal mare verso i porti canale interessa prevalentemente i due canali di Porto Garibaldi e Goro.

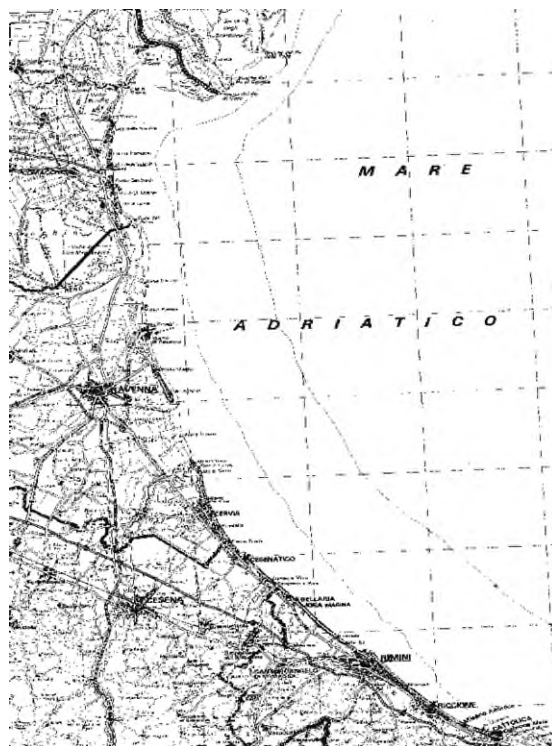


Figura 1: Rappresentazione dell'area di studio.

Se fino a metà degli anni 90 dello scorso secolo, i sedimenti dragati per garantire la navigabilità dei porti canale venivano smaltiti a mare, con l'entrata in vigore del D.M.

24/01/1996 [7], che ha introdotto vincoli restrittivi alla gestione dei sedimenti, sono stati resi possibili il riuso laddove la qualità dei sedimenti rispondesse a requisiti minimi e, parallelamente, la collocazione a mare in aree opportunamente individuate dalla Regione.

I risultati della analisi delle informazioni disponibili, sistematizzate in un database sviluppato *ad hoc* utilizzando i due software di progettazione “VISIO” e “ArcGIS Diagrammer”, e sarà reso consultabile all'indirizzo <http://www.coast-best.eu>, evidenziano la presenza di contenuti in sabbia notevolmente variabili (compresi tra il 10 e il 90% in peso per i diversi campioni prelevati) e una contaminazione mista da composti organici (TBT, PCB, IPA, idrocarburi pesanti e leggeri) e contaminanti inorganici (As, Cd, Cu, Pb, Zn), con una distribuzione delle caratteristiche granulometriche e di contaminazione non omogenea tra i diversi porti canale e lungo l'asta di ciascuno di essi.

3. ARTICOLAZIONE DEL PROGETTO

In aggiunta alla fase di inquadramento del sito e di acquisizione delle informazioni esistenti, descritta al punto 2, il progetto prevede l'esecuzione delle seguenti attività:

1. Sviluppo di un piano operativo *ad hoc* per la caratterizzazione dei piccoli porti canale, al fine di individuare la distribuzione verticale e orizzontale della contaminazione; messa a punto di un manuale per la esecuzione della campagna di prelievo e caratterizzazione dei sedimenti.
2. Esecuzione della campagna di prelievo e caratterizzazione dei sedimenti in accordo alle procedure messe a punto.
3. Esecuzione di prove a scala di laboratorio per la separazione delle frazioni pulite da avviare a riutilizzo e di eventuali frazioni contaminate da avviare a smaltimento; successivo trasferimento a scala pilota della campagna sperimentale;
4. Studio ed identificazione di opzioni per il riutilizzo sostenibile dei sedimenti
5. Sviluppo e avvio di campagne di comunicazione e sensibilizzazione dirette alla popolazione, alle istituzioni e ai potenziali soggetti interessati.

Il piano di caratterizzazione e l'insieme delle procedure adottate per il prelievo e la caratterizzazione dei sedimenti saranno consultabili all'indirizzo <http://www.coast-best.eu>. Lo schema di campionamento prevede una distribuzione delle stazioni di campionamento secondo maglie con dimensioni variabili, secondo la vicinanza o meno a potenziali sorgenti di contaminazione, ovverosia la realizzazione di maglie 50x50 m a ridosso di strutture portuali quali banchine, dighe foranee, ecc. e di maglie 100x100 m (fino ad un massimo di 200x200 m) all'aumentare della distanza dalle stesse. Per ogni maglia è previsto il prelievo di una carota, la cui lunghezza è funzione dello spessore di dragaggio previsto. La distribuzione delle maglie risulta in questo modo uniforme e le stazioni posizionate in base a tale criterio forniscono un quadro completo sulla qualità dei sedimenti funzionale anche alla successiva fase di gestione. Dalle carote saranno, quindi, prelevate ed analizzate le sezioni corrispondenti ai seguenti livelli, partendo dalla superficie: 0-50 cm, 50-100 cm, 100-150 cm, 150-200 cm per carote di lunghezza fino a 2 m; 0-50 cm, 50-100 cm, 100-150 cm, 150-200 cm e un ulteriore livello di spessore pari a 50 cm rappresentativo di ogni successivo intervallo per carote di lunghezza superiore ai 2 m.

La restituzione grafica del piano operativo di dragaggio per uno dei porti oggetto dell'indagine (Porto Garibaldi), contenente altresì indicazioni relativamente alla priorità relativa delle diverse stazioni di campionamento è mostrata in Figura 2.



Figura 2. Restituzione grafica del piano operativo di caratterizzazione

4. CARATTERIZZAZIONE DEI SEDIMENTI

In tabella 1 viene presentato in modo sintetico l'elenco dei soli parametri di base acquisiti nel corso della caratterizzazione preliminari e le relative metodiche analitiche utilizzate.

Tabella 1

Parametro		Metodica
Distribuzione granulometrica	$\Phi > 63 \mu\text{m}$	Vagliatura (serie di setacci standard ASTM)
	$\Phi < 63 \mu\text{m}$	Granulometria laser
Contenuto di metalli		Dissoluzione del campione mediante fusione alcalina + spettrofotometria ad assorbimento atomico
Contenuto di composti organici	PCB	metodi EPA 3550, 3620, 3660, 3665 e 8082 modificati
	IPA	metodi EPA 8310 e 3550 modificati
	Idrocarburi C > 12	metodi EPA 8270c e 8440 modificati

L'analisi dei campioni di sedimento prelevati in corrispondenza di due stazioni di campionamento nel caso dei porti di Bellaria e Cesenatico, e di una singola stazione nel caso di porto Garibaldi, ha permesso di acquisire alcune informazioni preliminari di notevole importanza ai fini della individuazione di massima di possibili schemi di trattamento. In particolare, i porti canale di Bellaria, Cesenatico e Garibaldi risultano caratterizzati dalla presenza di sedimenti con una distribuzione granulometrica piuttosto disomogenea; nel caso del porto di Bellaria, essi risultano pressoché interamente costituiti da frazione pelitica ($\Phi < 63 \mu\text{m}$), pari al 97,7 e 98,2% in peso, rispettivamente, dei campioni prelevati lungo l'asta del canale, con un contenuto di limo variabile e pari rispettivamente a 44,5 e 52,3%. Anche i campioni prelevati nel porto canale di Cesenatico risultano caratterizzati da un contenuto piuttosto modesto di sabbie ($\Phi > 63 \mu\text{m}$), che ammontano a circa il 20% in peso del campione, per entrambi le stazioni di prelievo; la frazione grossolana risulta peraltro priva di ghiaia, mentre per la frazione fine si ha una significativa prevalenza di limo rispetto alla argilla; in particolare, le particelle con diametro $\Phi < 10 \mu\text{m}$ e $\Phi < 5 \mu\text{m}$ rappresentano, rispettivamente, l'80 ed il 60% della frazione $\Phi < 20 \mu\text{m}$. Appare dunque evidente che nel caso di Porto Cesenatico e Bellaria, i modesti contenuti di frazione grossolana rendono non applicabile un recupero della frazione sabbiosa, mentre appare interessante la possibilità di isolare le frazioni contaminate da quelle pulite. Di contro, la frazione sabbiosa risulta prevalente nei sedimenti di Porto Garibaldi, i quali presentano un contenuto in sabbia pari a circa il 98%

in peso dei campioni, e potrebbero pertanto essere avviati a riutilizzo senza necessità di specifici trattamenti. Nell'ottica dello sviluppo di un sistema di gestione integrata dei sedimenti nella rete dei piccoli porti del litorale Romagnolo, la valorizzazione delle sabbie in applicazioni dell'ingegneria civile e naturalistica potrebbe concorrere a rendere sostenibile, dal punto di vista economico ed ambientale, il trattamento volto al riutilizzo delle frazioni più fini contaminate.

Dalla analisi dei risultati della caratterizzazione (cfr. Tabella 2, parte a e seguenti), si può osservare come il livello di contaminazione dei fondali dei tre porti considerati risulti piuttosto modesto in relazione a quanto prescritto nel D.Lgs.152/06 per la destinazione d'uso dei suoli [8]; tuttavia, nel caso del porto di Cesenatico, i due campioni analizzati presentano un contenuto di Zn rispettivamente pari a 269 e 227 mg/kg, entrambi superiori al valore limite per siti ad uso residenziale, verde pubblico e privato previsti dal suddetto decreto [8]; nei campioni prelevati nel porto di Bellaria, la concentrazione di Zn è prossima a tale valore limite mentre la concentrazione di Cd, pari a 8 mg/kg, risulta largamente superiore al valore limite (2 mg/kg). La concentrazione di Pb, infine, risulta più elevata nelle frazioni $20 < \Phi < 53 \mu\text{m}$ e $53 < \Phi < 125 \mu\text{m}$ dei campioni prelevati rispettivamente nelle stazioni n.1 e n.2. Per quanto attiene ai composti organici, la concentrazione di IPA e PCB risulta inferiore ai limiti per suoli ad uso residenziale, verde, pubblico e privato per tutti i campioni considerati, mentre gli idrocarburi con $C > 12$ risultano concentrati nella frazione $\Phi < 20 \mu\text{m}$. Alcune indagini preliminari sembrano suggerire che la classe granulometrica più contaminata sia quella con particelle di diametro inferiore a $10 \mu\text{m}$, il che suggerisce l'adozione di uno stadio di separazione basato sull'impiego di un idrociclone e l'avvio a trattamento o smaltimento di quantitativi piuttosto ridotti.

Tabella 2.a Contenuto di metalli nelle stazioni di prelievo n.1

(mg/kg)	Bellaria				Cesenatico			Garibaldi		
	tal quale	-250+53 μm	-53+20 μm	-20 μm	tal quale	-53 +20 μm	< 20 μm	tal quale	-500 +63 μm	<63 μm
As	15.15	12.07	13.55	15.54	20,40	10,46	23,67	7,3	6,7	14,4
Cd	7.98	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	3,99	0,7	0,1	0,2
Cr	51.83	51.93	53.95	41.94	48,00	49,70	47,89	90,6	66,6	133,2
Ni	59.80	65.93	49.95	71.90	66,00	81,53	77,82	74,6	50,6	98,6
Pb	25.91	47.95	47.96	37.94	76,00	107,34	87,81	25,9	28,3	33,2
Zn	160.08	191.75	215.18	132.81	269,20	243,95	263,64	127,7	77,3	171,4
Mo	---	---	---	---	---	---	---	80,0	79,9	79,9

n.r. valore inferiore al limite di rilevabilità

Tabella 2.b Contenuto di composti organici nelle stazioni di prelievo n.1

(mg/kg)	Bellaria				Cesenatico			Garibaldi		
	tal quale	-250+53 μm	-53+20 μm	-20 μm	tal quale	-53 +20 μm	< 20 μm	tal quale	-500 +63 μm	<63 μm
Dibenzoantracene	0.002	0.001	0.001	0.001	0,013	n.r.	0,002	0.001	n.r.	0.001
Indenopirene	0.009	0.006	0.005	0.003	0,056	0,007	0,003	0.006	0.001	0.010
Pirene	0.045	0.024	0.023	0.017	0,208	0,053	0,044	0.030	0.010	0.041
IPA totali	0.367	0.215	0.259	0.371	1,649	0,393	0,326	0.165	0.056	0.229
PCB totali	0.0019	0.0023	0.0025	0.0033	0,012	0,006	0,0095	0.006	0.005	0.017

n.r. valore inferiore al limite di rilevabilità

Tabella 2.c Contenuto di metalli nelle stazioni di prelievo n.2

(mg/kg)	Bellaria				Cesenatico			
	tal quale	-125+53 μ m	-53+20 μ m	< 20 μ m	tal quale	-125+53 μ m	-53 + 20 μ m	<20 μ m
As	13.10	15.15	13.34	14.21	33.42	14.38	14.13	24.07
Cd	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	5.99	n.r.	5.99
Cr	41.94	43.96	43.95	45.91	49.91	49.91	43.91	43.91
Ni	69.90	57.95	61.93	71.86	71.87	77.84	65.86	69.86
Pb	29.97	59.95	51.94	33.93	57.89	61.89	71.85	75.85
Zn	136.60	105.90	118.26	132.54	227.17	282.67	179.42	210.58
Mo	---	---	---	---	---	---	---	---

n.r. valore inferiore al limite di rilevabilità

Tabella 2.d Contenuto di composti organici nelle stazioni di prelievo n.2

	Bellaria				Cesenatico			
	tal quale	-125+53 μ m	-53+20 μ m	< 20 μ m	tal quale	-0,125+0,05 mm	-0,05 +0,063 mm	<0,02 mm
Dibenzoantracene	0.002	n.r.	0.002	0.001	0.030	0.011	0.003	0.002
Indenopirene	0.005	n.r.	0.007	0.004	0.069	0.061	0.017	0.003
Pirene	0.021	n.r.	0.030	0.022	0.472	0.192	0.047	0.032
IPA totali	0.212	n.r.	0.254	0.199	3.28	1.35	0.355	0.268
PCB	0.0026	n.r.	0.0033	0.0037	0.010	0.013	0.0073	0.0079

n.r. valore inferiore al limite di rilevabilità

5. PROVE PRELIMINARI DI SEPARAZIONE

Le prove preliminari di separazione fisico-meccanica dei sedimenti e la successiva caratterizzazione di ciascuna delle frazioni separate hanno permesso di formulare una prima ipotesi di schema di trattamento dei sedimenti ad elevato contenuto di fini (prelevati dai porti di Bellaria e Cesenatico) e dei sedimenti sabbiosi (da porto Garibaldi); la finalità degli schemi proposti è pertanto la eliminazione delle particelle fini dalle sabbie e/o la separazione delle frazioni fini non contaminate da quelle caratterizzate dalla presenza, seppur relativamente modesta, di inquinanti. A tal fine, gli schemi proposti integrano i processi di vagliatura ad umido ed idrociclonatura, così come mostrato nel layout di impianto rappresentato in Figura 3, contenente anche i bilanci di massa ottenuti dalla elaborazione dei risultati di alcune prove di separazione.

Queste hanno previsto la separazione mediante idrociclone del campione prelevato presso la stazione n.2 proveniente da porto Cesenatico, condotte impiegando un idrociclone Mozley da laboratorio operante a 2.5 bar e dotato di sistema di ricircolo dell'underflow. Si è ottenuta una corrente di overflow pari al 37% dell'alimentazione, quasi interamente costituita da particelle con diametro $\Phi < 10 \mu\text{m}$, che ne rappresentano circa il 96,5%. Tuttavia, le particelle con diametro $\Phi < 10 \mu\text{m}$ risultano abbondanti (circa pari al 72%) anche nella corrente di underflow, la quale rappresenta il 62% dell'alimentazione. Al fine di incrementare le rese di separazione delle frazioni più fini, lo schema di trattamento proposto si basa sulla integrazione di quattro unità: 1) vagliatura per la separazione delle particelle con $\Phi > 4 \text{ mm}$, in prevalenza costituite da conchiglie, pietrisco, alghe e miche (si noti che tale frazione, trascurabile ai fini del sistema di gestione dei sedimenti, non verrà considerata per la esecuzione dei bilanci di massa del trattamento di separazione; 2) classificazione con separatore a spirale per la separazione delle frazioni $0.063 \mu\text{m} < \Phi < 4 \text{ mm}$ (costituita da sabbie, materiale organico e miche) e $< 0.063 \mu\text{m}$; 3) primo stadio di idrociclonatura per la separazione della frazione $20 < \Phi < 63 \mu\text{m}$ (corrente di underflow, pari a 26% dell'alimentazione) e della frazione $\Phi < 20 \mu\text{m}$ (corrente di overflow, pari al

42% dell'alimentazione); 3) secondo stadio di idrociclonatura, alimentato con la corrente di overflow dello stadio precedente, per la separazione della frazione $10 < \Phi < 20 \mu\text{m}$ (underflow, pari al 9%) dalla frazione $\Phi < 10 \mu\text{m}$ (overflow, pari al 33%) nella quale si ritiene dovrebbe essere concentrata la contaminazione (da idrocarburi C>12 per il porto di Cesenatico e da Zn per il porto di Bellaria).

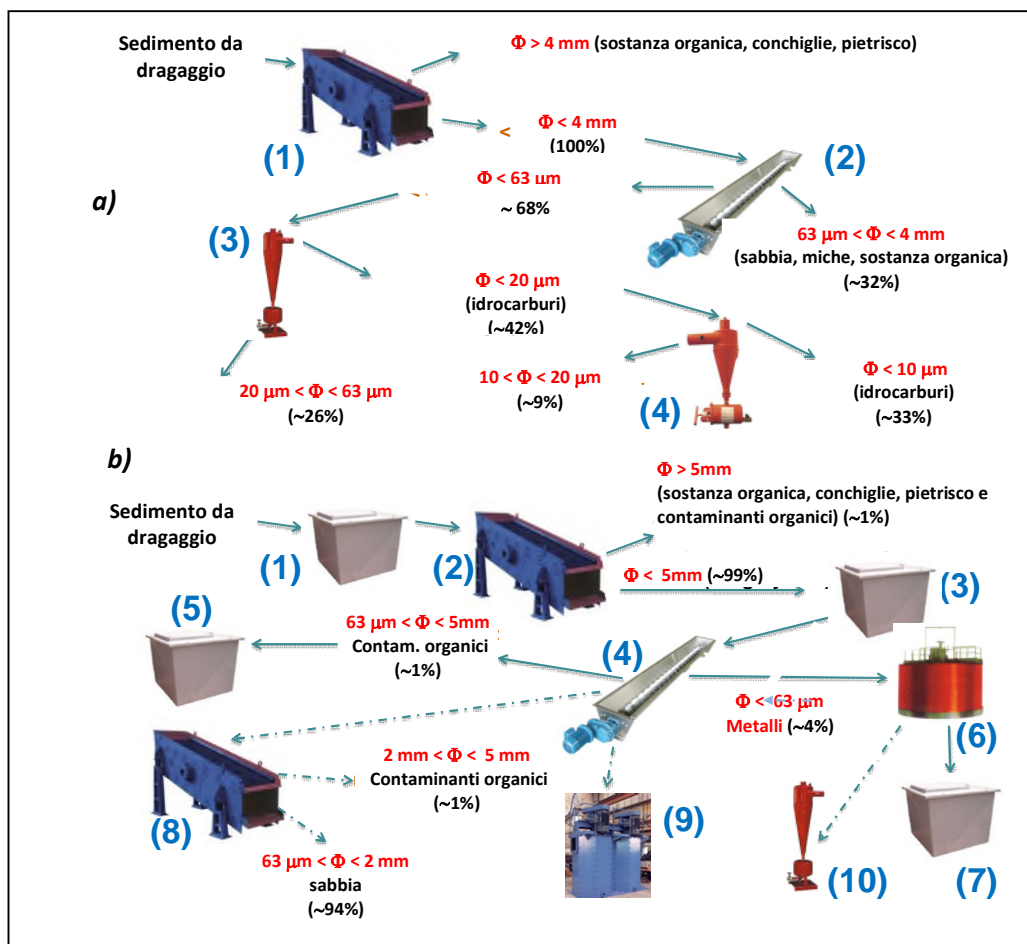


Figura 3. Schema di trattamento di sedimenti a) a prevalente contenuto di fini (i.e., sedimenti da Bellaria e Cesenatico) e b) a prevalente contenuto di sabbie (i.e., sedimenti da Porto Garibaldi). Parte a): 1) Vagliatura grossolana; 2) classificazione a spirale; 3) idrociclonatura; 4) idrociclonatura; Parte b): 1) stoccaggio; 2) vagliatura grossolana; 3) stoccaggio intermedio; 4) classificazione a spirale; 5) stoccaggio delle sabbie; 6) sedimentazione; 7) stoccaggio fini; 8) vagliatura raffinazione sabbie (eventuale); 9) trattamento per attrizione (eventuale); 10) idrociclonatura frazione fine. Linee tratteggiate: stadi di processo opzionali.

Per quanto attiene ai campioni di sedimento prelevati da Porto Garibaldi, la distribuzione granulometrica del campione (costituito per circa il 92% dalla frazione $63 \mu\text{m} < \Phi < 5 \text{ mm}$, rende particolarmente interessante la possibilità di recuperarne la componente sabbiosa. Le prove di separazione preliminari hanno consentito di valutare tipo e livello di contaminazione delle singole frazioni (cfr. Tabella 2, parte a e seguenti). Nonostante la contaminazione risulti piuttosto modesta, si può osservare un arricchimento dei contaminanti nelle frazioni più fini, con un contenuto di Zn pari a 171 mg/kg e superiore al limite per siti ad uso residenziale nella frazione $< 63 \mu\text{m}$. Di contro, per quanto attiene alla distribuzione degli inquinanti organici nelle diverse frazioni, si può osservare un arricchimento nella classe $> 500 \mu\text{m}$, probabilmente a causa della elevata affinità di tali specie per la sostanza organica particolarmente abbondante nella frazione più grossolana.

Sulla base delle precedenti considerazioni, lo schema di processo proposto per i sedimenti provenienti da porto Garibaldi, ottenuto apportando alcune modifiche a quanto previsto per il trattamento dei porti di Bellaria e Cesenatico, prevede i seguenti stadi, volti alla raffinazione delle sabbie: 1) vagliatura iniziale per la eliminazione delle particelle di dimensioni > 5 mm, caratterizzate da un contenuto elevato di contaminanti, 2) classificazione mediante sistema a spirale, 3) eventuale idrociclonatura, solo per sedimenti caratterizzati da un contenuto di fini superiore ai campioni analizzati nella campagna preliminare.

5. CONCLUSIONI

Le attività condotte sino ad oggi hanno consentito di elaborare, per la rete di piccoli porti della regione Emilia Romagna, un metodo organico e riproducibile in realtà simili che, integrando tra loro gli interventi di caratterizzazione del sito, di dragaggio e di trattamento, nonché le relative metodiche e procedure, consentirà di valutare i possibili scenari per il riutilizzo dei materiali; obiettivo principale sarà quello della riduzione dello smaltimento in discarica, ovvero in casse di colmata, dei sedimenti di dragaggio e l'individuazione di un insieme di soluzioni progettuali e gestionali degli interventi che rendano sostenibili i costi di implementazione e gestione da parte delle piccole realtà portuali interessate.

In particolare, i risultati ottenuti hanno consentito di eseguire il dimensionamento, la realizzazione e la progettazione di un impianto a scala pilota su cui proseguire la campagna di caratterizzazione per la stima delle rese di trattamento, dimensionato con una logica modulare che ne renda il funzionamento compatibile con le diverse esigenze di processo connesse alla variabilità orizzontale e verticale delle caratteristiche fisiche e di contaminazione dei sedimenti.

Nel corso della seconda metà del progetto, le diverse alternative di organizzazione del sistema verranno confrontate attraverso un approccio modellistico basato sull'analisi delle performance ambientali ed economiche.

RINGRAZIAMENTI: Il presente lavoro si inserisce nell'ambito del progetti di ricerca Life08 Coast-Best "CO-ordinated Approach for Sediment Treatment and BEneficial reuse in Small harbours neTworks" finanziato nell'ambito dei Progetti Life ENV della Unione Europea. Si ringraziano per il contributo: Dr. C. Albertazzi, Ing. W. Bambara, Ing. S. Carecchio, Dr. M. Ljung, Dr. C. Magno, Ing. S. Mariotti, Dr. G. Sesta

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Barcelo D, Petrovic M (eds) (2007) Sustainable management of sediment resources - Sediment quality and impact assessment of pollutants. 1st edn. ELSEVIER, Amsterdam, NL
2. Rulkens W (2005) Introduction to the treatment of polluted sediments. Rev Environ Sci Biotechnol 4:213-221
3. Bordas, F., Bourg A.C.M., 1998. Effect of complexing agents (EDTA and ATMP) on the remobilization of heavy metals from a polluted river sediment. Aquat. Geochem. 4, 201-214.
4. Nowack, B., Kari, F.G., Krüger, H.G., 2001. The remobilization of metals from iron oxides and sediments by metal-EDTA complexes. Water Air Soil Poll. 125, 243-257
5. USEPA (2007) In situ remediation of contaminated marine sediments. United States Environmental Protection Agency, Electrochemical Remediation Technologies (ECRTs), Report EPA/540/R-04/507, June
6. Andreottola G, Bonomo L, De Gioannis G, Ferrarese E, Lavagnolo MC, Muntoni A, Poletti A, Pomi R, Saponaro S (2008) Marine, lagoon, and river sediment remediation. Inter Symp on Sediment Management, pp 29-37
7. D.M. 24/01/1996, D.M. 24/01/1996, G.U. n.31, 7/2/1996
8. D.Lgs. 152/06, Suppl. Ord. n. 96 G.U. n. 88 14/4/2006, Parte V, Annex 5, Tab. 1B