

Beneficiary

MED INGEGNERIA S.r.l.

Legal Office: Via Otello Putinati, 71/C 44123 Ferrara
Branch Office: Via P. Zangheri, 16 48124 Fornace Zarattini (Ravenna)
Project Manager:
PhD Elisa Ulazzi
manager@lifesediportsil.eu +39 0544 467361
Project Coordinators:
Geol. Paolo Di Paola
coordinator@lifesediportsil.eu + 39 0544 467359
Geol. Luca Magagnini
coordinator2@lifesediportsil.eu + 39 0544 467359

MED INGEGNERIA

Associated Beneficiaries



Università di Ferrara

Earth Sciences Department, via Saragat , 1 44122 Ferrara
Responsible: Prof. Umberto Simeoni
g23@unife.it +39 0532 974744



Università di Bologna

DIEM Department, Viale del Risorgimento, 2 40136 Bologna
Responsible: Prof. Vittorio Colombo
Vittorio.colombo@unibo.it +39 051 2093978



Ente di gestione per i Parchi e la Biodiversità - Delta del Po

Via Mazzini, 200 44022 Comacchio, Ferrara
Responsible: Arch. Lucilla Previati
direttore@parcodeltapo.it +39 0533 81159



ISPRA

Via Vitaliano Brancati, 48 00144 Roma
Responsible: Ing. Francesca Giaime
francesca.giaime@isprambiente.it +39 06 50074688



GeoEcoMar

Str. Dimitrie Onciul 23-25 Sector 2, RO-024053 Bucharest
Responsible: Dr. Adrian Stanica
astanica@geoecomar.ro +40 21 2094986



DIEMME Enologia Spa

Via Bedazzo, 19 48022 Lugo di Romagna, Ravenna
Responsible: Ing. Danilo Bettoli
info@diemme-enologia.com +39 0545 219911



CRSA MED INGEGNERIA S.r.l.

Via Ciro Menotti, 48 48122 Marina di Ravenna, Ravenna
Responsible: Dr. Tiziana Campisi
tcampisi@crsamedingegneria.it +39 0544 536823

Co-Financer



Autorità Portuale di Ravenna

Via Antico Squero, 31 48122 Ravenna
Responsible: Ing. Fabio Maletti
fabio.maletti@port.ravenna.it +39 0544 608811

www.lifesediportsil.eu



With the contribution of the LIFE financial instrument of the European Community



MED INGEGNERIA



SEDIMENT MANAGEMENT GUIDELINES

Recovery of dredged SEDiments of the PORT of Ravenna and SiLicon extraction

Project LIFE09 ENV/IT/000158
LIFE+ Environment Policy and Governance 2009

SEDI.PORT.SIL.

European Commission
ENV.E4 – LIFE Environment and Eco-innovation
BU-9 2/1, B – 1049 Brussels



LIFE+ Environment Policy and Governance

LIFE+ è lo strumento finanziario dell'Unione Europea per la salvaguardia dell'ambiente, entrato in vigore nel 2007, che cofinanzia azioni a favore dell'ambiente negli Stati membri ed in taluni Paesi terzi che si affacciano nel Mediterraneo e nel Baltico, nonché nei paesi dell'Europa centrale e orientale candidati all'ingresso nell'Unione. Esso fa seguito al precedente programma LIFE istituito nel 1992.

Obiettivo generale di LIFE+ è contribuire all'attuazione, all'aggiornamento e allo sviluppo della politica e della normativa comunitarie in materia di ambiente, compresa l'integrazione dell'ambiente in altre politiche, contribuendo in tal modo allo sviluppo sostenibile.

LIFE+ Politica e governance ambientali, nel cui ambito specifico si inserisce il progetto SEDI.PORT.SIL, si prefigge i seguenti obiettivi specifici:

- a) contribuire allo sviluppo e alla dimostrazione di approcci, tecnologie, metodi e strumenti innovativi;
- b) contribuire a consolidare la base delle conoscenze per la formulazione, il monitoraggio e la valutazione della politica e della legislazione di ambiente;
- c) fornire un sostegno alla messa a punto e all'attuazione di approcci per il monitoraggio e la valutazione dello stato dell'ambiente e dei fattori, delle pressioni e delle risposte che esercitano un impatto su di esso;
- d) agevolare l'attuazione della politica comunitaria in materia di ambiente, soprattutto a livello locale e regionale;
- e) fornire un sostegno al miglioramento della governance ambientale, favorendo una maggiore partecipazione dei soggetti interessati, comprese le ONG, al processo di consultazione e all'attuazione delle politiche.

*Think to the sediment as
a resource...
...not a waste!*

INDICE

1	INTRODUZIONE	5
2	SEDIMENTI CONTAMINATI DERIVANTI DA DRAGAGGIO PORTUALE: IL PROBLEMA AMBIENTALE.....	7
2.1	Fonti di inquinanti	8
2.2	Natura degli inquinanti.....	9
3	TRATTAMENTO DEI SEDIMENTI CONTAMINATI: TECNICHE <i>EX SITU</i>	11
3.1	Fase di pre-trattamento	13
3.2	Fase di trattamento.....	14
4	RIUTILIZZO DEI MATERIALI OTTENUTI DAL PROCESSO DI TRATTAMENTO	21
4.1	Riutilizzo a mare	22
4.2	Riutilizzo a terra.....	28
5	LA SOLUZIONE SEDI.PORT.SIL.	31
	Sostenibilità ambientale	35
	Sostenibilità sociale.....	36
	Sostenibilità economica	36
6	CONCLUSIONI.....	37

EXECUTIVE SUMMARY

An assessment undertaken within the SedNet European network demonstrated that the total amount of sediment dredged in Europe reaches 200 million cubic meters per year. That material, together with the dredged water, is usually transferred straight into large fill-in basins and polluted water is drained into waste water systems. Polluted sediments are usually sent to landfill sites, with all issues and environmental risks associated to the management of wastes. It is clear that the sustainability of this process should be improved.

The SEDI.PORT.SIL project is intended to demonstrate the efficiency of consolidated treatment technologies coupled with innovative techniques aimed to the recycle and valorization of port dredged sediments, that can be considered an important resource rather than just a waste.

Within these guidelines, a general overview of the environmental problem of contaminated sediments, the major pollutants and their potential impact on the environment have been presented. Then, a detailed analysis of the problems and prospects of research in the application of treatment techniques and management of contaminated sediments has been carried out.

In the choice of the proposed ex-situ treatment technologies, it is necessary to identify the most appropriate technical solutions applicable to various types of contaminated sediment, taking into account the grain size composition and type of contaminants. Consequently, technical aspects related to the re-use of materials after dredging and reclamation of pollutants have been investigated and described in detail.

These guidelines, then, are focused on the treatment chain verified by the SEDI.PORT.SIL project, an innovative value chain model that allows a virtually complete treatment of very large quantities of polluted sediments dredged from ports.

The value chain model consists of a sequence of processes:

- First, sediments are conferred at a large landfill basin, adequate to host sediments with different level of pollution;
- The material is initially treated with soil washing technologies, that allows to obtain clean sand of different sizes, eventually desalinised, and directly commercialised;
- Polluted silts are filtered, pressed and transferred to a fusion stage where the material is brought up to 1.700°C to transform into a noble Ferrosilicon alloy and a residual that, thank to abrupt cooling techniques, vitrifies into an inert material with some mechanical potential to be used into the building and construction industry (while a significant amount of heat is recovered from the process to be sold to nearby factories resulting in considerable extra-income);
- Remaining silt can be treated into a large landfarming plant where hydrocarbons are “digested” by microbiological assault turning into clean clay.

In the end SEDIPORTSIL chain results to be, on the input side, an effective treatment plant capable of absorbing a really vast amount of polluted sediments, on the output side both a powerful player in the building and construction raw materials industries, a provider of clean sand for beach nourishment and a producer of Ferrosilicon alloys targeted at the steel industry. The SEDIPORTSIL ultimately achieves the objective of transforming 98% of conferred sediments in marketable products in an economic, social and environmental sustainable way.



Figura 1: View of the Port of Ravenna.

1 INTRODUZIONE

Diverse convenzioni in tutto il mondo hanno prodotto linee guida per i materiali derivanti da opere di dragaggio (ad esempio, le Convenzioni di Londra (www.londonconvention.org), di Oslo/Parigi (OSPAR) (www.ospar.org), di Helsinki e di Barcellona). Tali convenzioni suggeriscono l'utilizzo di metodologie diverse basate sulle proprietà fisico-chimiche e biologiche e di approcci alla gestione delle diverse vie di smaltimento e di utilizzo del materiale dragato, con l'obiettivo finale di promuovere l'adozione delle migliori tecniche per la difesa della costa e la tutela dell'ambiente.

Dall'analisi delle numerose Convenzioni emerge la settorialità della disciplina, la quale non offre un quadro regolamentare composito e completo, da cui estrapolare principi e criteri certi ed univoci, ma determina una frammentazione normativa.

Per compensare tale frammentazione, vengono applicati strumenti tecnici e linee guida sulla movimentazione e il riuso dei materiali dragati, i quali forniscono un supporto utile e immediato per la gestione di questi materiali. Gli strumenti principalmente adottati a livello europeo ed italiano sono:

- il D.M.A.F. ovvero *Dredged Material Assessment Framework* (<http://www.sednet.org/download/SpecialSession1-Guidelines-Dredged-Material.pdf>) documento che delinea le linee guida per orientare scelte ed operazioni relative al dragaggio dei porti (Garzia G., 2004);
- le Linee Guida UNEP (2000) sulla gestione dei materiali dragati per il Mediterraneo;
- il *"Manuale per la movimentazione di sedimenti marini"* (ICRAM, APAT, 2007) redatto da ICRAM e APAT (oggi riunite in ISPRA, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) su incarico del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. Il Manuale ha un ruolo cruciale riguardo alla gestione integrata ambientale e socio-economica dei materiali di dragaggio, lo stesso si configura come un punto di riferimento per le Amministrazioni competenti, anche se, di fatto, non costituisce un atto avente forza di legge.

Ulteriori documenti di riferimento per la valutazione della compatibilità ambientale e la gestione dei sedimenti marini da dragaggio sono:

- D.M. 24.01.1996;
- Manuale per la movimentazione dei sedimenti marini, ICRAM-APAT 2007;
- Proposta di allegati tecnici del regolamento emanato in applicazione del D.Lgs. 152/2006, art. 109;
- Quaderno ICRAM n°1, 2002 "Aspetti tecnico-scientifici per la salvaguardia ambientale nelle attività di movimentazione dei fondali marini: Dragaggi Portuali";
- limiti di accettabilità stabiliti dal D.Lgs. 152/2006;
- limiti previsti dal D.M. 260/2010, che fissa gli standard di qualità per le sostanze prioritarie nei sedimenti marini;
- MATT, ICRAM, APAT, 2001 "Programma di monitoraggio per il controllo dell'ambiente marino-costiero (triennio 2001-2003): Metodologie analitiche di riferimento"

Prassi comunemente usata oggi in Italia è quella di stoccare i sedimenti dragati in apposite strutture idonee al ricevimento dei sedimenti classificabili come rifiuti non pericolosi: le casse di colmata. Esse sono strutture a mare o a terra opportunamente impermeabilizzate, atte a contenere temporaneamente il sedimento dragato in attesa di definirne la destinazione finale, in funzione delle loro caratteristiche qualitative.

La gestione dei sedimenti dragati mediante cassa di colmata presenta però notevoli svantaggi:

- richiede notevoli spazi disponibili in funzione della quantità di sedimento da dragare, non sempre disponibili;
- lunghi tempi di permanenza dei sedimenti nella cassa di colmata, e quindi, occupazioni di vaste porzioni di territorio per lunghi periodi;
- costi di gestione e controllo generalmente elevati, e sempre più spesso, poco sostenibili nel tempo;
- possibili ripercussioni ambientali derivanti da:
 - possibili effetti di contaminazione chimica ed eco-tossicologica e la presenza di solidi sospesi nelle acque di efflusso;
 - possibili effetti di contaminazione sulle acque sotterranee laterale e del fondo del bacino, a causa deterioramento o rottura della struttura.

Al fine di ridurre gli impatti ambientali legati alla gestione dei sedimenti di dragaggio e di massimizzare il materiale riutilizzabile, il progetto propone un ciclo integrato da applicare ai sedimenti (ed acque associate) direttamente a seguito delle attività di dragaggio.

Applicando la filiera SEDI.PORT.SIL. i sedimenti contaminati possono essere impiegati come materia prima nel settore infrastrutturale e nell'ingegneria ambientale. Inoltre, il progetto indaga l'uso di sedimenti inquinati come materia prima per l'estrazione di leghe di silicio. Dapprima, alcuni campioni di sedimento dragati dal Porto di Ravenna (Italia) sono stati sottoposti ad una serie di differenti trattamenti, esposti nel seguito, che costituiscono la filiera SEDI.PORT.SIL.. Successivamente è studiata l'applicabilità del processo a scala regionale e valutata la replicabilità in un differente contesto Europeo (porto di Midia, Romania). L'obiettivo finale è dunque la valutazione della fattibilità e sostenibilità per la realizzazione dell'impianto di trattamento nel Porto di Ravenna e lo sviluppo delle presenti linee guida per il trattamento dei sedimenti.

2 SEDIMENTI CONTAMINATI DERIVANTI DA DRAGAGGIO PORTUALE: IL PROBLEMA AMBIENTALE

Il termine "sedimenti" indica i materiali di diversa natura che si depositano sul fondo di un generico corpo idrico, i quali sono costituiti da suoli, sabbie e minerali dilavati dai terreni in genere a seguito di eventi meteorici. In quanto habitat naturale per molte specie acquatiche, i sedimenti sono un importante componente dell'ecosistema marino.

Il problema dei sedimenti contaminati ha assunto una rilevanza crescente negli ultimi anni innanzitutto a seguito dell'individuazione dei siti di interesse nazionale da sottoporre ad interventi di bonifica (leggi L. 426/98, L. 388/2000, L. 179/02 e decreti D.M. 471/99, D.M. 468/01 e ss.mm.ii.). La caratterizzazione di tali siti ha permesso di stimare quantitativi estremamente ingenti di sedimenti che necessitano di interventi di bonifica. Se inoltre si considerano i quantitativi di sedimenti contaminati presenti in siti non identificati tra quelli di interesse nazionale, si comprende come il problema in esame sia di particolare importanza.

Le acque superficiali ricevono apporti puntuali e diffusi rappresentati da reflui liquidi e rifiuti solidi di diversa natura prodotti da attività di natura civile ed industriale, dal dilavamento di suoli in ambito urbano ed agricolo, da sversamenti accidentali, da infiltrazioni, nonché dalle deposizioni umide degli inquinanti atmosferici.

Molti di tali apporti contengono contaminanti, a volte tossici o pericolosi, che si accumulano nei sedimenti, come tali o come sottoprodotti di complesse trasformazioni biotiche e/o abiotiche, e possono persistere nell'ambiente per lunghi periodi, particolarmente nei corpi idrici a debole ricambio. La presenza di contaminanti nei sedimenti può produrre effetti dannosi per la salute umana e per l'ambiente e compromettere la qualità delle risorse idriche.

Le modalità di esposizione degli esseri umani agli inquinanti contenuti in sedimenti contaminati sono legate a meccanismi quali l'infiltrazione all'interno di sorgenti idropotabili, l'accumulo ed il trasferimento nella catena alimentare ed il contatto diretto. Gli organismi bentonici possono inoltre accumulare sostanze tossiche dall'ambiente circostante, e queste ultime possono risultare letali nei loro confronti ed quindi influenzare la catena alimentare di forme di vita superiore.

Dipendentemente dalla loro origine, i sedimenti possono presentare una varietà di composizione chimica e caratteristiche biologiche e eco-tossicologiche. Queste sono di regola il risultato delle interazioni tra le particelle di sedimento ed i diversi contaminanti, l'entità e la natura delle quali dipendono dai materiali componenti i sedimenti (frazione argillosa, sostanza organica, ossidi di ferro e manganese, *etc.*), nonché dalle caratteristiche a questi associate (pH, potenziale redox, salinità, *etc.*).

Del resto, la distribuzione della contaminazione all'interno dei sedimenti dipende dalle caratteristiche fisiche di questi. Generalmente, alla frazione fine dei sedimenti risultano associate maggiori concentrazioni di contaminanti. Le particelle di dimensioni più fini possono rimanere in sospensione all'interno del corpo idrico anche per lunghi periodi, oppure possono venire facilmente risospese a seguito di turbolenza in presenza di forti correnti, piene od eventi meteorici di forte intensità. Ciò ne provoca la migrazione verso zone anche notevolmente lontane dalla fonte di contaminazione.

La presenza di sedimenti contaminati in ambienti marini comporta non solo danni di tipo ecologico ed emergenze igieniche ma anche danni economici di entità rilevante, tra cui:

- danni alla navigazione;
- danni sanitari sull'uso della costa da parte dell'uomo;
- danni economici a causa di mancati introiti per l'industria del turismo;
- danni economici legati alle attività della pesca;
- restrizioni sulle attività di dragaggio a causa dei pericoli che la risospensione degli inquinanti può determinare nella colonna d'acqua;
- costi legati al risanamento dei siti contaminati.

La gestione dei sedimenti non può prescindere dalla conoscenza dei processi e dei meccanismi che si instaurano nella matrice in esame, né può ignorare l'impianto normativo e autorizzativo su cui le fasi della gestione si fondano.

2.1 Fonti di inquinanti

Le principali fonti di inquinamento possono essere raggruppate in due macro categorie: sorgenti puntuali e sorgenti diffuse.

SORGENTI PUNTUALI

- scarichi urbani – Le acque reflue urbane, nei casi in cui il rendimento di depurazione risulti inadeguato o il trattamento sia del tutto assente, possono veicolare batteri e virus patogeni, con possibili rischi di natura igienico-sanitaria. Inoltre, la presenza di sostanza organica e di nutrienti nelle acque di scarico urbane può causare, particolarmente nei tratti di costa a debole ricambio idrico, il rischio di innesco di fenomeni di tipo eutrofico.
- scarichi industriali – Costituiscono la fonte più consistente dell'inquinamento di tipo chimico. L'estrema varietà delle caratteristiche degli inquinanti associati agli scarichi industriali ne rende difficoltose da un lato la caratterizzazione e dall'altro lato la previsione degli effetti ambientali associati.
- trasporto solido e di contaminazione, da terra verso mare, attraverso le foci dei fiumi.

SORGENTI DIFFUSE

- dilavamento dei terreni agricoli, rappresentate essenzialmente da fertilizzanti ed anticrittogamici;
- dilavamento delle aree urbane – A questa categoria appartengono principalmente contaminanti quali idrocarburi e metalli pesanti;
- *fallout* atmosferico – Gli inquinanti di provenienza atmosferica sono costituiti da alcuni metalli pesanti (Pb, Hg, Zn, Cd, Cu), gran parte dei composti organoclorurati (lindano, PCB, DDT/DDE/DDD), gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) ed i composti organici volatili (COV).

ALTRE SORGENTI

- scarichi derivanti dall'esercizio di natanti. L'estensione dei sistemi portuali e l'incremento progressivo del traffico in mare contribuiscono ad incrementare la probabilità di incidenti

marittimi, che possono risultare responsabili di fenomeni di inquinamento marino da sostanze pericolose più o meno gravi.

Secondo fonti dell'International Maritime Organization (IMO) tra le fonti di inquinamento delle acque marine solo il 23% (di cui il 12% associato al trasporto marittimo) è di origine marina, mentre la restante quota parte è dovuta a cause di origine terrestre. Si tratta ovviamente di statistiche che non tengono conto delle operazioni illegali quali il lavaggio delle cisterne in mare aperto o in rada.

2.2 Natura degli inquinanti

Il trasferimento degli inquinanti dalle acque ai sedimenti può avvenire a seguito di una serie di processi di natura fisica, chimica e biologica che governano i fenomeni di competizione tra fase liquida e fase solida. Tra i meccanismi di tipo fisico vanno annoverati i fenomeni di trasporto degli inquinanti in forma solida (essenzialmente avvezione e trasporto turbolento) o in forma disciolta (diffusione). Tra i fenomeni di natura chimica e biochimica, i principali risultano la precipitazione/dissoluzione, l'adsorbimento/de-adsorbimento, lo scambio ionico, la chelazione, il desorbimento, la degradazione per via biologica, ecc. L'entità della ripartizione degli inquinanti tra fase liquida e fase solida rende conto, tra l'altro, della loro biodisponibilità.

I fenomeni di trasferimento degli inquinanti dalla fase liquida ai sedimenti assumono una fondamentale importanza nel caso di sostanze pericolose e persistenti (e.g. pesticidi, composti organoclorurati, metalli pesanti).

Tra le tipologie di inquinanti più comuni all'interno dei sedimenti portuali, si annoverano metalli pesanti e composti organici idrofobici, quali PCB, idrocarburi, IPA, diossine, nonché pesticidi clorurati come dieldrin, aldrin e DDT.

I METALLI PESANTI

La contaminazione dei sedimenti da metalli pesanti è un problema particolarmente rilevante data la natura prettamente conservativa di tali inquinanti e la loro grande persistenza, che può generare fenomeni di bioaccumulo e biomagnificazione.

Si deve inoltre considerare che alcuni metalli in ambiente acquatico possono essere soggetti a variazioni della loro forma chimica che ne comportano la trasformazione in specie caratterizzate da maggiore tossicità e/o biodisponibilità rispetto a quelle originarie. Ad esempio, metalli quali Hg, Pb, Se ed As possono essere soggetti a reazioni di metilazione di natura biologica, le quali sono in grado di incrementarne la mobilità e, nel caso del Hg, anche la potenziale bioconcentrazione. Per alcuni metalli, reazioni chimiche di altra natura quali quelle di ossidazione possono comportare un incremento della solubilità; ad esempio, specie allo stato ridotto quali il solfuro di arsenico possono essere trasformate, a seguito di reazioni di ossidazione di natura biologica, in arseniati, i quali risultano più solubili e dunque maggiormente disponibili.

INQUINANTI ORGANICI

Gli inquinanti organici maggiormente presenti all'interno di sedimenti contaminati sono rappresentati da specie organiche ad elevato peso molecolare, quali IPA, PCB, pesticidi ad elevato

grado di clorurazione, policlorodibenziodiossine e policlorodibenzofurani, e, talvolta, esaclorobenzene e triclorobenzeni.

Le molecole organiche ad elevato peso molecolare sono naturalmente soggette a processi di degradazione, che tuttavia per i sedimenti sono caratterizzati da cinetiche piuttosto lente.

Con riferimento a composti specifici, per quanto riguarda gli IPA le velocità di biodegradazione risultano più elevate in condizioni aerobiche rispetto a quelle anaerobiche, nelle quali alcuni composti possono non subire alcun apprezzabile processo di degradazione biologica. Per tale ragione, nel caso di sedimenti che si trovano in condizioni anossiche o anaerobiche, gli IPA costituiscono in genere inquinanti caratterizzati da una notevole persistenza. La cinetica del processo di degradazione si riduce inoltre all'aumentare del numero di anelli aromatici presenti nella molecola.

Quanto ai composti organici clorurati, i congeneri dei PCB ad elevato grado di clorurazione ed altri contaminanti clorurati possono essere soggetti in condizioni anaerobiche a reazioni naturali di dechlorurazione. I PCB a basso grado di clorurazione ed altre specie organiche parzialmente dechlorurate risultano in genere caratterizzate da capacità di bioaccumulo inferiori rispetto a specie o congeneri ad elevato grado di clorurazione; tuttavia, l'esistenza di condizioni anossiche o anaerobiche ne limita la possibilità di degradazione e dunque ne incrementa la persistenza.

I pesticidi clorurati ed altre specie organiche clorate presenti nei sedimenti possono anch'essi essere soggetti a processi di trasformazione o degradazione parziale. Tuttavia, i prodotti di degradazione possono essere caratterizzati da tossicità e persistenza confrontabili o addirittura superiori rispetto alle specie originarie; ad esempio, il dicloro-difenil-tricloroetano (DDT) può essere trasformato in dicloro-difenil-dicloroetano (DDD) in condizioni anaerobiche o in dicloro-difenil-dicloroetilene (DDE) in condizioni aerobiche. Sebbene tutti e tre i costituenti del DDT possano trovarsi nei sedimenti, il DDE è quello rilevato più comunemente nell'ambiente in quanto maggiormente resistente ad ulteriori reazioni di biotrasformazione.

3 TRATTAMENTO DEI SEDIMENTI CONTAMINATI: TECNICHE *EX SITU*

Le operazioni di dragaggio, applicate in passato al fine esclusivo di raggiungere e mantenere la corretta funzionalità operativa di porti, darsene e canali, hanno recentemente assunto la connotazione aggiuntiva di interventi di risanamento ambientale a causa della frequente presenza di contaminanti di natura organica ed inorganica nei sedimenti.

La presenza di contaminanti nei sedimenti implica l'adozione di particolari cautele nella gestione degli interventi di dragaggio e pone altresì l'esigenza di applicare interventi specifici atti a garantire il raggiungimento di adeguati standard di qualità dell'ambiente acquatico.

Per rendere conto dell'ampiezza del problema, si deve considerare che le quantità di sedimenti dragati tenderanno a crescere in modo significativo nel prossimo futuro, a causa del ricorso sempre più massiccio al trasporto intermodale di beni e merci, ovvero alla combinazione di modalità diverse di trasporto quali navigazione, treni e aerei, volti a sostituire, anche parzialmente, l'ancora preponderante trasporto su strada. L'intensificarsi della domanda di mobilità richiederà pertanto sempre più frequenti interventi di manutenzione e di ampliamento dei porti commerciali, proprio al fine di permettere attracchi agevoli e operazioni di sbarco veloci. È evidente che sia le modalità di applicazione degli interventi di dragaggio sia la gestione ed il destino dei materiali dragati risulteranno fortemente condizionati dall'entità della contaminazione. Quest'ultima renderà inoltre necessari gli interventi di dragaggio anche laddove questi non siano richiesti per scopi legati alla navigazione, bensì per operazioni di bonifica e ripristino di aree marino costiere contaminate.

La gestione dei sedimenti può essere riguardata come la sequenza di diverse fasi (*i.e.* prelievo o dragaggio vero e proprio, trasporto, eventuale trattamento, riutilizzo, o smaltimento, a terra o a mare), ciascuna delle quali assume una rilevanza particolare in funzione delle caratteristiche di qualità dei sedimenti, delle caratteristiche specifiche del sito, delle motivazioni alla base dell'intervento, nonché dagli impatti potenziali sull'ambiente.

Per quanto attiene la fase di trattamento, gli interventi applicati sui sedimenti contaminati possono presentare diversi livelli di complessità, che variano dal confinamento *in situ* mediante ricoprimento con sedimenti non contaminati (*capping*), allo smaltimento in discarica controllata del sedimento dragato, ovvero alla combinazione di operazioni di trattamento e di una successiva fase di recupero/riutilizzo del materiale decontaminato.

Le tecniche di intervento sui sedimenti contaminati possono essere classificate come *in situ* ed *ex situ*. Le tecnologie di intervento *in situ* prevedono il trattamento ovvero il semplice confinamento dei sedimenti senza rimozione di questi dal sito stesso. Di contro, le tecniche di tipo *ex situ* si basano su di un preliminare intervento di dragaggio dei sedimenti, seguito da una eventuale fase di trattamento per la rimozione dei contaminanti in impianto fisso o mobile, e dal successivo avvio dei materiali a riutilizzo ovvero a smaltimento in discarica controllata.

Pertanto, nei trattamenti *in situ* si può procedere attraverso:

- il confinamento dei sedimenti
- l'applicazione di trattamenti di decontaminazione

Per quanto riguarda gli interventi di tipo *ex situ*, questi possono essere realizzati attraverso:

- il dragaggio del materiale e l'avvio a recupero, previo trattamento finalizzato all'ottenimento di un materiale idoneo alla particolare tipologia di riutilizzo ipotizzata;
- il dragaggio del materiale e l'avvio a smaltimento finale in discarica controllata, previo eventuale trattamento per la rimozione ovvero immobilizzazione dei contaminanti.

Ovviamente, tali fasi sono inserite all'interno di uno schema di processo la cui complessità può risultare variabile in funzione delle caratteristiche dell'area, della disponibilità di spazi e risorse, delle caratteristiche quali-quantitative dei sedimenti e della loro destinazione finale.

L'approccio più largamente adottato è quello del dragaggio *ex situ*, sia per consuete attività di dragaggio per manutenzione ordinaria, sia per operazioni di decontaminazione.

L'individuazione del trattamento più idoneo da adottare dipende da numerosi fattori, che vengono valutati attraverso durante la fase di screening preliminare delle diverse opzioni tecnologiche. In accordo a quanto suggerito dall'U.S. EPA, la fase di screening iniziale può essere condotta sulla base dell'efficienza del trattamento verso la rimozione, l'immobilizzazione dei singoli contaminanti e in funzione degli intervalli di variazione (identificati come basso, medio ed elevato) delle principali caratteristiche dei sedimenti.

È evidente che l'applicazione di un trattamento di decontaminazione dei sedimenti ovvero della combinazione di più trattamenti, dà in generale luogo alla produzione di un insieme di flussi residuali dei quali occorre tener conto al fine di individuare le modalità di gestione più idonee volte al contenimento dei costi di processo ed alla massima prevenzione di fenomeni di inquinamento dell'ambiente.

Come in precedenza affermato e sulla base delle considerazioni elaborate, risulta evidente che qualora i sedimenti siano caratterizzati dalla presenza di diverse tipologie di contaminanti, il processo ottimale di trattamento potrebbe nascere dalla combinazione di due o più opzioni tecnologiche, secondo un approccio noto come *treatment train*. Soltanto l'adozione di più fasi sequenziali di trattamento può infatti risultare in grado di ridurre, o immobilizzare, in modo efficace i diversi contaminanti presenti nella matrice solida.

In aggiunta a ciò, ciascuna fase che costituisce il trattamento può essere caratterizzata da una diversa efficienza nei confronti delle singole frazioni presenti nel sedimento stesso. A titolo di esempio, si può osservare che nella maggior parte dei casi i sedimenti provenienti dal dragaggio devono essere sottoposti ad una serie di trattamenti preliminari volti alla riduzione del contenuto d'acqua ed alla eliminazione delle frazioni più grossolane, che risultano generalmente caratterizzate da una modesta contaminazione. Si deve inoltre sottolineare che ciascuna fase del trattamento può dare origine a materiali in uscita la cui gestione deve garantire la riduzione degli impatti potenziali sulle diverse componenti ambientali, prevedono il trattamento dei reflui liquidi, solidi e gassosi prodotti durante tale attività ed il relativo smaltimento.

Per valutare l'efficacia delle diverse tecniche di bonifica, è anzitutto necessario verificare l'effettiva applicabilità dei trattamenti, che dipendono a sua volta dalle caratteristiche chimico, fisiche e biologiche del sedimento dragato, e procedere ad una stima dei tempi e dei costi necessari per il raggiungimento degli obiettivi di riferimento.

Tra le diverse tecnologie esistenti, quelle di tipo *ex situ* vengono applicate a sedimenti per cui è prevista la rimozione ai fini della bonifica e/o del ripristino della profondità dei fondali. In generale, un intervento di bonifica prevede una combinazione di tecnologie che privilegia, nel caso

di rimozione, l'adozione di tecniche di trattamento volte alla decontaminazione dei sedimenti ai fini del loro recupero e riutilizzo, cercando di ridurre al minimo i volumi da inviare a discarica.

Sulla base della caratterizzazione iniziale dei sedimenti, viene individuata la più idonea tecnologia di trattamento *ex situ* applicabile al sedimento contaminato, in considerazione della composizione granulometrica e della tipologia dei contaminanti presenti. Questi aspetti sono fondamentali per determinare l'applicabilità e la durata del trattamento, soprattutto nei casi in cui siano presenti diverse famiglie di inquinanti.

Per individuare le migliori tecnologie di trattamento realmente attuabili in un determinato sito è prioritario valutare l'efficienza di rimozione dei contaminanti presenti e procedere ad una stima dei tempi e dei costi necessari per il raggiungimento degli obiettivi di riferimento, anche attraverso un primo approccio di tipo sperimentale.

A seconda che i sedimenti siano trattati nelle prossimità dell'area di escavo o trasportati in appositi impianti distanti dall'area in esame, si parlerà, rispettivamente, di trattamenti *on site* o *off site*.

Una volta avvenuto il dragaggio del sedimento contaminato il trattamento avviene in due fasi distinte:

1. Pre-trattamento. Questa fase ha due obiettivi principali:

- rendere il materiale omogeneo al fine di ottenere una limitata variabilità delle caratteristiche fisiche (peso specifico, granulometria) tale da non compromettere l'efficienza delle tecnologie di trattamento;
- ridurre i volumi da trasportare, da inviare a futuri trattamenti o da conferire in discarica.

2. Trattamento vero e proprio. Questa fase ha lo scopo di recuperare il sedimento, attraverso la rimozione o riduzione al di sotto dei limiti consentiti degli inquinanti presenti, al fine ultimo di un suo possibile riutilizzo.

3.1 Fase di pre-trattamento

Il pre-trattamento può prevedere la separazione delle diverse classi granulometriche e/o l'eliminazione dell'acqua (disidratazione). A seconda dello scopo che si vuole raggiungere e del tipo di sedimento che si vuole trattare sarà possibile utilizzare una o entrambe le tecniche sopra esposte. Nello specifico:

- la **separazione granulometrica** permette di rimuovere da un sedimento dragato il materiale appartenente ad una certa classe granulometrica (es. sabbia) e di separare il sedimento in due o più frazioni sulla base delle proprietà fisiche. L'esperienza mostra che le caratteristiche del sedimento che influenzano l'adsorbimento di alcuni contaminanti sono l'elevata percentuale di frazione fine e organica. Le particelle fini, presentando una superficie specifica maggiore rispetto alle sabbie ed un'elevata attività superficiale si legano con particolare forza alle specie inquinanti rendendo difficoltose le operazioni di decontaminazione. Le sabbie, al contrario, caratterizzate da una bassa superficie specifica e da una bassa densità di carica superficiale, hanno una scarsa reattività e si legano in modo meno forte ai contaminanti. La separazione

sabbia/limo in un sedimento, potrebbe anche permettere il riutilizzo immediato delle sabbie in esso contenute.

La separazione delle diverse classi granulometriche può portare quindi alla riduzione dei volumi da trattare e ad una maggiore omogeneità del materiale da inviare a successivi trattamenti. In alcuni casi, il processo di separazione, può essere considerato un trattamento vero e proprio: i contaminanti tendono infatti a concentrarsi nella frazione fine dei sedimenti.

- L'eliminazione dell'acqua dal materiale dragato si ottiene attraverso un processo di **disidratazione**, che può essere di 3 tipologie:
 - Disidratazione passiva (casce di colmata, letti di essiccamento): la riduzione del contenuto d'acqua avviene attraverso la sedimentazione, l'evaporazione naturale o attraverso l'impiego di sistemi drenanti.
 - Disidratazione meccanica (nastropresse, filtropresse, centrifugazione): appartengono a questa tipologia tutte quelle tecnologie normalmente applicate alla disidratazione dei fanghi industriali e civili e ai processi dell'industria mineraria. In generale le apparecchiature utilizzate richiedono una certa energia per poter spremere, pressare e quindi disidratare il materiale dragato. Il contenuto di solido in peso può arrivare al 70%.
 - Disidratazione chimica: l'aggiunta di reagenti chimici può facilitare la disidratazione del sedimento con formazione di composti stabili che bloccano i metalli.

L'acqua proveniente dalle operazioni di disidratazione può richiedere trattamenti preliminari per lo scarico nei corpi idrici ricettori o per il riutilizzo all'interno del processo stesso.

3.2 Fase di trattamento

Per la fase di trattamento esistono numerose tecnologie che possono essere impiegate in funzione della natura dei contaminanti presenti e delle caratteristiche fisiche del sedimento. In generale il processo di trattamento si realizza con una combinazione di interventi di natura chimico-fisica. Ad esempio un sedimento che in generale può contenere una miscela di metalli pesanti e sostanze organiche, può essere trattato rimuovendo, concentrando e recuperando i metalli pesanti in una prima fase e degradando successivamente, o distruggendo (termicamente), la sostanza organica, in un secondo momento.

Nel seguito viene fornita una breve descrizione delle principali tipologie di trattamento dei sedimenti contaminati.

TRATTAMENTI BIOLOGICI

I trattamenti biologici si basano sulla biodegradazione, cioè sulla ossidazione biologica della sostanza organica biodegradabile da parte di particolari microrganismi. Tale tecnologia sfrutta la capacità di funghi e batteri di degradare composti organici complessi in forme più semplici: è un processo che avviene naturalmente nei terreni e nei sedimenti contaminati in presenza di inquinanti organici (biorisanamento naturale), ma può anche essere indotto somministrando appositamente i microrganismi necessari (es. batteri).

Il trattamento biologico di sedimenti marini in generale risulta molto meno efficiente, data la presenza dei sali nel materiale dragato e per questo occorre effettuare un pre-trattamento (lavaggio).

Tra i processi di biodegradazione troviamo:

Landfarming. Consiste nella realizzazione di un bacino di trattamento confinato e provvisto di fondo drenante. L'umidità del suolo viene mantenuta costante irrigando in modo controllato il sedimento; la velocità di degradazione dei contaminanti può variare fortemente a seconda della stagione, importante è l'attività dissodativa dello strato di sedimento contaminato che usualmente viene realizzata con cadenza giornaliera e che ha un effetto favorevole sulla biodegradazione aerobica. Questa tecnica è applicabile con successo ai sedimenti contaminati da idrocarburi e oli minerali degradabili con percentuale di rimozione maggiore dell'80% e con tempi di bonifica dell'ordine dei mesi.

Bio-pile. Il principio di funzionamento di una bio-pila per il trattamento dei sedimenti contaminati è del tutto analogo a quello del landfarming, sebbene richieda minori spazi. La differenza sostanziale è costituita dal metodo di trasferimento dell'ossigeno. Nella preparazione di una bio-pila il materiale viene disposto in strati sovrapposti intervallati con tubi forati per la distribuzione, nella massa di materiale da trattare, di aria e soluzioni contenenti i nutrienti necessari alla crescita dei microrganismi. L'aerazione che avviene per aspirazione permette inoltre di controllare le emissioni in atmosfera.

Compostaggio. Il trattamento biologico di compostaggio è realizzato in fase solida e consente di conseguire la degradazione dei contaminanti organici grazie all'attività biologica di microrganismi aerobici. Il processo di compostaggio può essere condotto mediante l'adozione di diverse configurazioni impiantistiche (compostaggio a cumuli rivoltati, compostaggio ad aerazione forzata).

Bioreattori Bioslurry. I trattamenti biologici in sospensione prevedono il trattamento dei sedimenti in reattori biologici. Nel reattore vengono garantiti la corretta miscelazione ed il contatto tra i microrganismi ed i composti che devono essere degradati, e sono mantenute le condizioni operative ottimali per l'attività biologica. Un vantaggio dei trattamenti biologici in fase sospesa è rappresentato dalla possibilità di trattare un ampio numero di contaminanti, quali pesticidi, benzine, policlorofenoli, alcuni composti alogenati organici.

Trattamenti di fitorisanamento. Il fitorisanamento è una tecnologia per il trattamento dei suoli e dei sedimenti contaminati che sfrutta la capacità delle piante di degradare, rimuovere o concentrare i contaminanti. In particolare, alcune specie vegetali sono in grado sia di mineralizzare e trasferire negli apparati radicali i composti organici tossici, sia di accumulare e concentrare i composti inorganici nella parte aerea. Sebbene allo stato attuale tale tecnica di trattamento risulti scarsamente applicata, essa presenta alcuni vantaggi, tra i quali il modesto impatto ambientale. I trattamenti di fitorisanamento possono essere applicati *in situ*, con piante autoctone, in aree prospicienti la costa, caratterizzate da batimetrie ridotte e da uno scarso idrodinamismo, per esempio per ripristinare aree di costa erose o ambienti umidi; tale tecnologia può anche essere utilizzata *ex situ* sul materiale dragato, eventualmente sottoposto a lavaggio per abbassare

il grado di salinità, e conferito in bacini di lagunaggio, utilizzando piante selezionate appositamente in base al tipo di contaminazione da rimuovere.

Sulla base del meccanismo responsabile della decontaminazione del sedimento, i trattamenti di fitorisanamento possono essere distinti in

- fitoestrazione: viene operata da piante cosiddette iper-accumulatrici, caratterizzate da una elevata capacità di estrazione dei metalli, dei radionuclidi e di alcuni composti organici dal suolo e dai sedimenti, con conseguente concentrazione dei contaminanti negli apparati radicali e nella porzione epigea; quest'ultima può essere rimossa ed avviata ad opportuno trattamento al raggiungimento delle condizioni di equilibrio tra pianta e substrato esterno, in corrispondenza delle quali cessa l'assorbimento dei contaminanti da parte della pianta stessa;
- rizofiltrazione: sebbene tale processo rivesta un ruolo fondamentale nei trattamenti di fitodepurazione delle acque, esso può essere sfruttato anche per il trattamento delle acque di dilavamento dei sedimenti contaminati; la rizofiltrazione viene operata da piante iper-accumulatrici ad apparato radicale particolarmente diffuso, in grado di assorbire e concentrare i metalli nelle radici nonché di promuoverne la precipitazione a seguito di processi di essudazione di fosfati;
- fitodegradazione: consiste nella decomposizione delle molecole organiche complesse in molecole semplici e nell'eventuale trasferimento dei cataboliti non tossici nei tessuti vegetali;
- fitostabilizzazione: viene operata da piante in grado di tollerare la presenza di quantità elevate di metalli nei sedimenti e di produrre composti chimici che immobilizzano i contaminanti all'interfaccia radici-suolo, attraverso fenomeni di assorbimento, precipitazione chimica e complessazione;
- fitostimolazione o biodegradazione rizosfera-dipendente: consiste nella stimolazione della biodegradazione dei composti organici complessi a seguito del rilascio di essudati contenenti carbonio organico ed enzimi nella rizosfera da parte delle piante;
- fitovolatilizzazione: viene così indicata la trasformazione di alcuni metalli e di alcune sostanze organiche contaminanti (es. composti clorurati) in forme chimiche volatili, che vengono quindi rilasciate in atmosfera; l'applicazione di un trattamento di fitorisanamento basato su tale meccanismo di rimozione dei contaminanti richiede una attenta valutazione degli effetti indotti sul comparto atmosferico.

Le piante iperaccumulatrici risultano in grado di immagazzinare i metalli pesanti in quantità tali per cui la loro concentrazione finale nella pianta risulta pari ad alcune unità percentuali.

Sperimentazioni condotte sul fitorisanamento hanno mostrato che tale tipo di trattamento è potenzialmente applicabile per la rimozione di: metalli pesanti, radionuclidi, solventi clorurati, BTEX, PCB, IPA, pesticidi clorurati, pesticidi organici fosforiti, esplosivi, nutrienti, tensioattivi.

TRATTAMENTI CHIMICO-FISICI

I trattamenti chimico-fisici sono differenziabili in processi di natura fisica, in cui viene favorito il trasferimento di fase dei contaminanti o comunque la loro separazione dalla matrice solida del sedimento, e processi di natura chimica, in cui viene modificata la struttura chimica dei

contaminanti con formazione di composti meno tossici o più facilmente separabili dalla matrice del sedimento e infine processi di natura elettrochimica e chimico-fisica. I processi di tipo chimico includono: neutralizzazione, precipitazione, ossidazione e dealogenazione.

Lavaggio del sedimento. Il *sediment washing* è un processo di trattamento di tipo fisico-chimico, tipicamente realizzato ex situ, nel quale il materiale contaminato viene sottoposto a lavaggio con agenti estraenti allo scopo di creare condizioni idonee alla mobilitazione degli agenti inquinanti.

I contaminanti vengono trasferiti in una frazione liquida acquosa, eventualmente addizionata con opportuni reagenti. Il processo avviene per effetto di due meccanismi: la dissoluzione e la dispersione dei contaminanti nel liquido di estrazione sotto forma di particelle sospese.

Il tipo di agenti estraenti utilizzati nei trattamenti di lavaggio varia in funzione della natura della contaminazione nonché delle modalità con le quali i diversi contaminanti si trovano legati al materiale solido. È noto infatti come il comportamento dei contaminanti all'interno della matrice di un suolo o di un sedimento sia strettamente connesso a fattori quali la composizione mineralogica, la granulometria, la presenza di sostanza organica (la quale può dar luogo a fenomeni di complessazione dei contaminanti), il pH, le condizioni redox, le condizioni di *ageing*, etc.

Gli agenti estraenti più utilizzati consistono in soluzioni acquose, acidi, basi, tensioattivi, solventi, agenti chelanti, agenti riducenti. L'estrazione dei contaminanti consiste nel promuovere meccanismi opposti a quelli che ne hanno comportato l'immobilizzazione all'interno della matrice del suolo o del sedimento. Pertanto, l'estrazione delle specie ioniche trattenute da forze di natura elettrostatica richiede l'utilizzo di soluzioni ad elevata forza ionica, mentre quella delle specie ioniche trattenute a mezzo di legami covalenti richiede l'applicazione di forti agenti complessanti; per la rimozione di specie metalliche presenti nella forma di fasi solide risulta invece necessario l'impiego di agenti chimici in grado di modificare il pH del materiale (nel caso ad esempio di specie presenti sotto forma di ossidi o carbonati) o le condizioni redox (nel caso ad esempio di specie presenti sotto forma di solfuri o legate agli ossidi di ferro e manganese).

Tra gli inquinanti per la rimozione dei quali possono essere applicati i trattamenti di lavaggio si annoverano metalli pesanti, solventi alogenati, composti aromatici, policlorobifenili (PCB), fenoli, pesticidi, gasolio ed oli.

Ossidazione. Questo trattamento prevede la degradazione ossidativa dei contaminanti presenti nel sedimento da parte di sostanze con potenziale redox maggiore. I sedimenti più adatti per questo tipo di decontaminazione sono quelli argillosi, inquinati da sostanze organiche a basso potenziale redox. I reattivi utilizzati sono ozono, acqua ossigenata e biossido di cloro.

Decontaminazione elettrocinetica. È un processo in cui una corrente elettrica (continua) viene applicata al sedimento attraverso due elettrodi che inducono un flusso migratorio di ioni, ad esempio metallici, in soluzione acquosa, i quali vengono eliminati insieme all'acqua.

Estrazione con solventi. Vengono utilizzati solventi organici come agenti estraenti. Alla fase di estrazione segue una fase di separazione in cui i contaminanti organici vengono separati dal solvente estraente mediante un cambiamento di temperatura o di pressione. Questo processo si utilizza con successo nel trattamento dei sedimenti contaminati da PCB, composti organici ad elevato peso molecolare e pesticidi. Tra i solventi utilizzati industrialmente ci sono idrocarburi clorurati (CHCl₂, CHCl₃), chetoni (acetone), idrocarburi aromatici e altre sostanze come esano, etanolo ecc.

Estrazione per flottazione. Basato sulla coagulazione selettiva su bolle d'aria dei contaminanti e/o particelle di sedimento. I contaminanti che vengono rimossi più facilmente sono gli oli minerali, gli IPA, i cianuri e in parte alcuni metalli pesanti come piombo e rame; l'efficienza più elevata si ottiene nei sedimenti prevalentemente sabbioso-limosi.

Riduzione. E' la trasformazione riduttiva dei contaminanti a prodotti di minore tossicità e/o mobilità da parte di sostanze riducenti inorganiche o metalliche. E' un processo impiegato per decontaminare siti inquinati da sostanze organiche insature o da metalli riducibili come il Cr VI; la reazione di riduzione sviluppa idrogeno.

Chelazione. Processo che avviene tra un catione di metallo e un legante (agente chelante) con formazione di un complesso stabile (chelato). Il catione di metallo, una volta legato, non è più disponibile per ulteriori reazioni con altri reagenti in sistemi chimici o biologici. Il pH è uno dei parametri che maggiormente influenza il processo di trattamento. L'efficienza varia in funzione dell'agente chelante e del dosaggio.

Solidificazione/stabilizzazione (inertizzazione). Con questi processi viene ridotta la mobilità dei contaminanti, limitandone il trasferimento all'ambiente circostante. Ciò si ottiene riducendo la superficie disponibile per il dilavamento con la creazione di una matrice solida compatta (solidificazione) e/o legando chimicamente il contaminante alla matrice solida (stabilizzazione). Il sedimento viene miscelato con leganti o con altri agenti chimici sia di natura inorganica sia di natura organica (cemento, calce, argilla, sostanze termoplastiche, polimeri organici e composti macro-incapsulanti). I contaminanti che possono essere efficacemente immobilizzati sono quelli di natura inorganica. Tale tecnologia di trattamento, non riducendo il contenuto di contaminanti presenti nel sedimento tal quale e determinando solo una riduzione della mobilità dei contaminanti stessi, può eventualmente essere utilizzata per un intervento di messa in sicurezza di emergenza in attesa della successiva bonifica o per il declassamento del sedimento ai fini del conferimento in discarica o per l'eventuale riutilizzo a terra del materiale nel campo delle opere civili, ove la normativa vigente lo permettesse (per esempio nella costruzione di strade).

TRATTAMENTI TERMICI

I trattamenti termici consentono di rimuovere, distruggere o immobilizzare un'ampia gamma di contaminanti organici ed inorganici presenti nei sedimenti; in generale si parla di desorbimento termico e di trattamenti di termodistruzione quando le temperature di trattamento sono rispettivamente inferiori a 550 °C – 650 °C e comprese tra 600 °C e 2000 °C.

Durante l'applicazione di un trattamento termico, i diversi contaminanti presenti nei sedimenti possono prendere parte ad una o più delle seguenti reazioni:

- volatilizzazione delle specie caratterizzate da elevata tensione di vapore;
- completa ossidazione o trasformazione in forme meno pericolose;
- intrappolamento all'interno della massa fluida.

Un trattamento termico deve essere completato con sistemi per il contenimento, il controllo ed il trattamento delle emissioni gassose e per l'estrazione e la gestione dei residui solidi.

In funzione della temperatura di processo, i trattamenti termici possono essere classificati in:

- trattamenti di separazione dei contaminanti (desorbimento);
- trattamento di termodistruzione dei contaminanti organici ed immobilizzazione dei contaminanti inorganici, ai fini del riutilizzo del materiale trattato;
- trattamenti di termodistruzione (incenerimento, pirolisi, gassificazione, ossidazione ad alta pressione);
- trattamenti di immobilizzazione dei contaminanti (vetrificazione, termodistruzione al plasma).

Nei trattamenti di desorbimento termico si ottiene la vaporizzazione dei contaminanti organici volatili e semivolatili del sedimento. Tra questi processi troviamo:

Desorbimento termico. Questo processo consiste nella vaporizzazione dei contaminanti organici allontanati dal sedimento tramite un fluido di trasporto (ad esempio aria, gas di combustione, gas inerte). Si raggiungono temperature intorno ai 300 °C, con un tempo di residenza minimo di circa 30 minuti, il riscaldamento può essere diretto (es. essiccatore a letto fluido) o indiretto (tamburo rotante a pareti riscaldate). Vengono rimossi contaminanti organici tra cui PCB e in minor misura i metalli maggiormente volatili come mercurio e arsenico;

Estrazione con vapore. Viene iniettato del vapore a temperature variabili tra 150 °C e 230 °C che provoca la volatilizzazione dei contaminanti i quali vengono captati ed estratti dal sedimento. Questa tecnica è applicata per la rimozione di contaminanti come IPA, oli minerali, idrocarburi alogenati, *etc.*

Tra i processi di termodistruzione ed immobilizzazione troviamo:

Vetrificazione. Consiste nel riscaldamento del sedimento ad una temperatura compresa tra i 1600-2000 °C, che comporta l'iniziale fusione del sedimento, seguita da un rapido raffreddamento che porta alla formazione di un monolite amorfo e non cristallino in cui rimangono intrappolati i contaminanti inorganici non volatili. Il prodotto vetrificato così ottenuto può essere impiegato nel settore dell'edilizia;

Incenerimento. E' il metodo per eliminare i contaminanti organici, i cianuri complessi e, in parte, alcuni metalli come arsenico, mercurio e piombo. Esistono diverse tecnologie impiantistiche adottabili e generalmente le temperature di incenerimento variano tra 1000-1200 °C;

Termodistruzione al plasma. Il plasma è un gas ionizzato elettricamente. La ionizzazione avviene tramite il passaggio del gas (in genere aria) attraverso un arco elettrico generato da una “torcia ad arco-plasma” (Figura 2). L’energia trasferita al sedimento sotto forma di calore (1600-2000 °C) permette la distruzione dei contaminanti organici e l’intrappolamento dei metalli nell’ammasso vetroso;

Pirolisi. E’ un processo di decomposizione termochimica di materiali organici in componenti gassose, applicando una temperatura compresa tra i 400-800°C in completa assenza di un agente ossidante o in presenza di una ridottissima quantità di ossigeno (parziale gassificazione);

Processi combinati di termodistruzione ed immobilizzazione. Sono processi in cui le temperature di esercizio sono comprese fra i 600 °C ed i 1400 °C, ai fini del riutilizzo dei materiali trattati per la produzione di mattoni, cementi o in generale materiali stabilizzati per l’utilizzo nel campo delle opere civili.



Figura 2: Trattamento termico mediante torcia al plasma.

4 RIUTILIZZO DEI MATERIALI OTTENUTI DAL PROCESSO DI TRATTAMENTO

In funzione dello stato di qualità chimico-fisico e microbiologico, oltre che delle proprietà ecotossicologiche, i sedimenti e le loro frazioni granulometriche possono essere recuperati per il riutilizzo in diverse forme di ripristino ambientale. In particolare, è possibile distinguere tra le seguenti tipologie di gestione:

- (i). Riutilizzo in forme di ripristino ambientale a mare:
 - utilizzo per riprofilare porzioni della morfometria del fondale;
 - reimmissione in aree marine non costiere;
 - ripascimento di arenili emersi e sommersi.
- (ii). Riutilizzo a terra
 - riempimento di cave dismesse;
 - esecuzione di terrapieni e arginature;
 - rilevati e sottofondi stradali e ferroviari;
 - produzione di materiali da costruzione.

Va sottolineato che il riutilizzo dei sedimenti recuperati, dipende fortemente dalle caratteristiche stesse del sedimento, in primis della loro granulometria e della qualità chimico-fisica che deve risultare compatibile con il sito di destinazione finale.

Un processo di trattamento che permetta una classificazione dimensionale agevola notevolmente la gestione dei sedimenti, in quanto permette un recupero selettivo delle diverse frazioni dimensionali ottenute e, nei casi in cui è stata riscontrata una situazione ambientalmente compromessa, permette di isolare i contaminanti presenti nelle frazioni più fini del sedimento, da sottoporre a sua volta a trattamenti mirati di decontaminazione.

Come detto in precedenza, la separazione granulometrica è un processo fisico-meccanico che permette la formazione di diverse frazioni di materiale, omogenee per dimensioni, a partire da un insieme unico. Nel caso dei sedimenti, le frazioni ottenute si distinguono, in funzione del diametro medio delle particelle solide, tra ghiaia, sabbia grossolana, sabbia fine, limo e argilla. Ai fini gestionali, le classi granulometriche possono essere ridotte, come ad esempio:

- frazione grossolana (sabbia) caratterizzata da un diametro delle particelle $\geq 63 \mu\text{m}$;
- frazione fine (pelite) caratterizzata da un diametro delle particelle $\leq 63 \mu\text{m}$.

In particolare, la frazione grossolana sabbiosa può essere riutilizzata per opere di ripascimento di arenili emersi e sommersi, mentre la frazione fine può essere riutilizzata per la realizzazione di terreni costieri, o per rilevati e sottofondi stradali. L' idoneità al recupero con tali finalità dipende dalle qualità chimico-fisiche, mineralogiche, microbiologiche ed ecotossicologiche e, nel caso di opere di ripascimento, dalla compatibilità con il sito di destinazione dei materiali gestiti.

Va sottolineato che, laddove non applicabili modalità alternative di riutilizzo, i sedimenti possono essere gestiti come rifiuti e conferiti in discarica di opportuna categoria, in funzione delle loro caratteristiche. La maggiore criticità deriva dalla presenza di una discarica di opportuna categoria a distanza relativamente ridotta dal sito di stoccaggio provvisorio dei sedimenti, o, comunque, dall'area di dragaggio. In particolare, il conferimento a discarica rappresenta spesso la soluzione più sostenibile per i sedimenti classificabili come materiali pericolosi ai sensi della normativa

vigente. Infatti, per tale tipologia di materiali non è consentito il recupero per il riutilizzo a mare o a terra, né il refluimento in casse di colmata.

E' anche vietato refluire in colmata sedimenti sottoposti ad un processo di stabilizzazione dei contaminanti, che risultino quindi inerti e non biodisponibili, ma comunque al disopra dei limiti di concentrazione che li classificano come materiali pericolosi.

4.1 Riutilizzo a mare

INTERVENTI DI RIPASCIMENTO

Il ripascimento artificiale, mediante versamenti sedimentari di opportuna granulometria, protetti o meno da barriere idonee a controllare le inevitabili perdite di materiale, è il sistema più attuale cui si fa ricorso per combattere l'erosione delle spiagge. Oggi quasi tutti gli interventi di difesa costiera si basano su consistenti ripascimenti. Tra le opere di difesa di tipo morbido (*soft solutions*), il ripascimento artificiale dei litorali rappresenta una soluzione di intervento a basso impatto ambientale, purché supportato da un'adeguata fase conoscitivo - progettuale ed eseguito nel rispetto delle caratteristiche morfo-sedimentologiche dei vari tratti costieri (Figura 6).

Oltre a produrre una immediata espansione dell'arenile, un altro dei vantaggi di questa metodologia di difesa, consiste nel fatto che essa non comporta gravi modificazioni nell'assetto morfologico e paesaggistico del litorale. In considerazione delle complesse dinamiche che agiscono sul litorale, gli aspetti da considerare in fase progettuale e, in seguito, durante il monitoraggio, sono molteplici. Il monitoraggio permette di valutare l'efficacia dell'intervento e pianificare correttamente la gestione futura del litorale.

Le eventuali ripercussioni sfavorevoli che i ripascimenti possono produrre devono essere attentamente valutate in fase progettuale. Innanzitutto devono essere impiegati sufficienti volumi di sedimento per una concreta efficacia dell'intervento; inoltre, è necessario, per ottenere una migliore stabilità della spiaggia, valutare le caratteristiche tessiturali dei sedimenti introdotti. Per evitare un potenziamento della capacità di trasporto del moto ondoso, comportante frequenti e costosi interventi di manutenzione, è preferibile utilizzare materiale di granulometria superiore a quella presente sulla spiaggia emersa. Gli obiettivi generali di interventi di ripascimenti sono in genere:

- mantenimento della linea di costa (in caso sia presente erosione);
- formazione / ripristino di spiaggia;
- bonifica dei terreni;
- rafforzamento o ricostruzione di dune;
- protezione delle strutture costiere (dighe, i pennelli, etc.);
- riempimento / chiusura canali o canali di marea vicino a riva.

Dall'esperienza della Regione Emilia-Romagna emerge che “[...] L'adozione della tecnica del ripascimento in alternativa alle scogliere ha prodotto, pur con tutti i limiti derivanti dall'applicazione pratica di questa nuova tipologia, la stabilizzazione dei litorali protetti, senza indurre effetti negativi sulle spiagge limitrofe e senza produrre modificazioni di sorta su fondali, qualità dell'acqua e aspetti paesaggistici” (Regione Emilia - Romagna, 2007).

L'intervento di ripascimento può essere effettuato in vari punti del profilo di spiaggia. Le opzioni di intervento sono le seguenti:

- **Zona di spiaggia sommersa:** ripascimenti *nearshore*, terrapieni o tumuli costruiti con materiale dragato. Questi tipi di ripascimenti hanno le seguenti funzioni:
 1. *Berme di alimentazione:* posizionamento di materiale in acque poco profonde allo scopo di creare una barra artificiale *longshore* e di promuovere l'alimentazione dei sedimenti della spiaggia attraverso processi *onshore*; se le barre sono già presenti il ripascimento in genere è effettuato sul fianco mare della barra più offshore;
 2. *Berme reef:* posizionamento di sedimenti al largo ed in corrispondenza della profondità di chiusura della spiaggia sommersa, in modo da agire come un *reeftype Wave Filter* per le onde di tempesta;

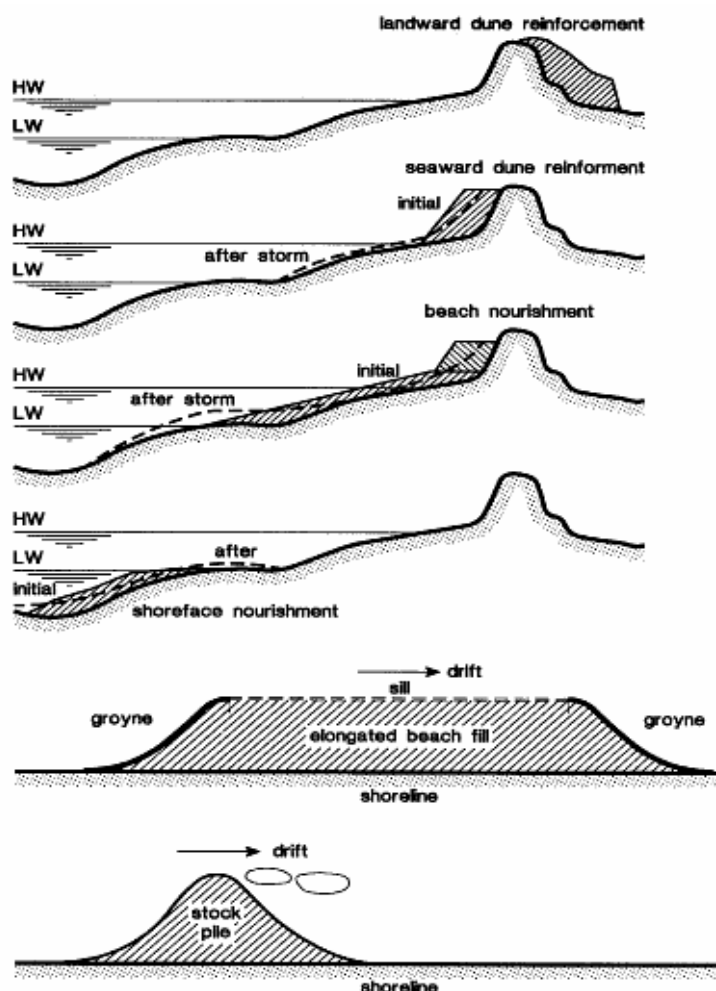


Figura 3: Ripascimenti in zone di duna, spiaggia emersa e sommersa (van Rijn and Walstra, 2004)

- **Zona di spiaggia emersa:** la sabbia viene scaricata nella zona di spiaggia in modo da ottenere una combinazione morbido-rigida con eventuali barriere e pennelli, e lo sversamento può essere fatto come:

1. *Ripascimento di sabbia* longitudinale alla spiaggia (collocamento diretto sulla spiaggia con funzione di protezione di una struttura o in un ambiente con dominante trasporto offshore);
2. *Zona di duna* (al di sopra del livello top dune): la duna viene rafforzata / protetta contro il *run - up* durante le mareggiate.

Il ripascimento in sabbia può essere visto come una perturbazione del sistema litorale, sia in pianta che in profilo, con conseguente:

- aumento della ripidità del profilo di spiaggia iniziale e erosione d'onda maggiore e conseguenti perdite iniziali massicce, con esponenziale adattamento al profilo originale;
- generazione e crescita di barre in mare aperto a causa della deposizione di sabbia erosa dalla zona ripasciuta, con riduzione dell'energia dell'onda *nearshore*;
- redistribuzione *longshore* della sabbia.

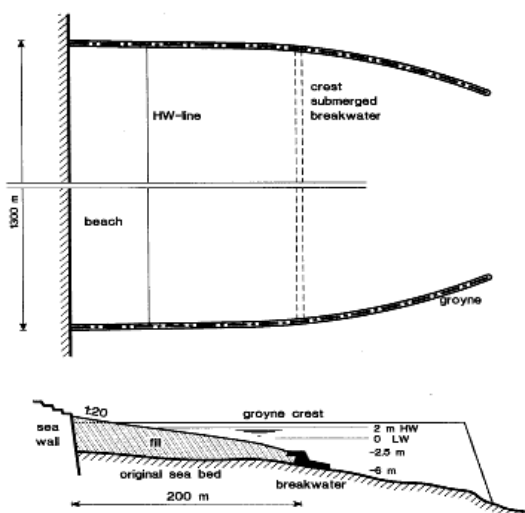


Figura 4: Ripascimento della spiaggia sommersa a supporto di interventi rigidi (in questo caso di pennelli trasversali alla linea di riva) (van Rijn and Walstra, 2004)

Un'altra tecnica ormai sempre più consolidata di ripascimento, consiste nella realizzazione di barre sommerse nella spiaggia sottomarina. Le barre sommerse possono essere progettate come corpi di sabbia in forme *'stabili'* o *'attive'*.

In forma stabile significa che il riporto di sabbia ha solo un effetto idrodinamico e funge da dissipatore dell'energia delle onde più alte, creando un'area protetta a ridosso del lato interno della barra. La maggior parte del volume originale di una barra stabile viene mantenuto e la barra generalmente rimane nel sito di inserimento in acque profonde (profondità dell'acqua > 10 a 15 m) per anni.

Una barra di alimentazione attiva è posta in un sito prossimo alla costa in acque relativamente poco profonde (profondità dei fondali < 8 m), con una dispersione notevole di sedimento in pochi mesi o anni, agendo da alimentazione di sabbia per le spiagge adiacenti. Una regolare

manutenzione della barra di alimentazione è necessaria per garantire un flusso continuo di sedimenti alle spiagge.

Le caratteristiche fondamentali di questi interventi morbidi sono le seguenti:

- dissipazione di energia delle onde agendo come filtro, in quanto verranno dissipate onde alte mentre le onde basse possono passare senza ostacoli;
- riduzione delle correnti d'onda *longshore* a ridosso della barra di sabbia;
- generazione di correnti di uscita nelle estremità delle barre;
- generazione di onde a bassa frequenza a ridosso della barra di sabbia;
- flusso di sedimenti verso la spiaggia emersa.

Le barre sommerse devono essere progettate:

- parallele alla linea di riva con una lunghezza di almeno 10 volte la lunghezza d'onda locale;
- la larghezza della cresta dovrebbe essere di circa 0,5-1 volte la lunghezza d'onda locale (circa 5 a 10 volte le profondità dell'acqua locale);
- i pendii laterali dovrebbero essere in proporzione di circa 1 a 30/50;
- i pendii finali dovrebbero essere dolci (in proporzione di circa di circa 1 a 100) per ridurre gli effetti delle onde di rifrazione;
- la posizione della barra dovrebbe essere relativamente lontana da canali o flussi (canali di navigazione profonda, lagune ecc.).

Gli effetti morfologici di barre di alimentazione correttamente progettate può essere schematizzato come segue:

- 1) *longshore*: il ripascimento della spiaggia sottomarina causa la dissipazione delle onde (*Wave Filter*) e una riduzione della corrente *longshore* e quindi della capacità di trasporto litoraneo. Il ripascimento della spiaggia sottomarina agisce con conseguente:
 - riduzione del trasporto *longshore*;
 - *updrift* sedimentario;
 - erosione sottoflutto (figura 3 A).
- 2) *cross-shore*: le onde più alte frangono sul lato verso mare della barra, generando un trasporto *onshore* del sedimento; le onde più basse a ridosso del lato interno della barra generano a loro volta onde di ritorno verso mare (correnti *cross-shore*). Ciò si traduce in:
 - un aumento del trasporto solido *onshore*;
 - una riduzione del trasporto solido in mare aperto (figura 3 B).

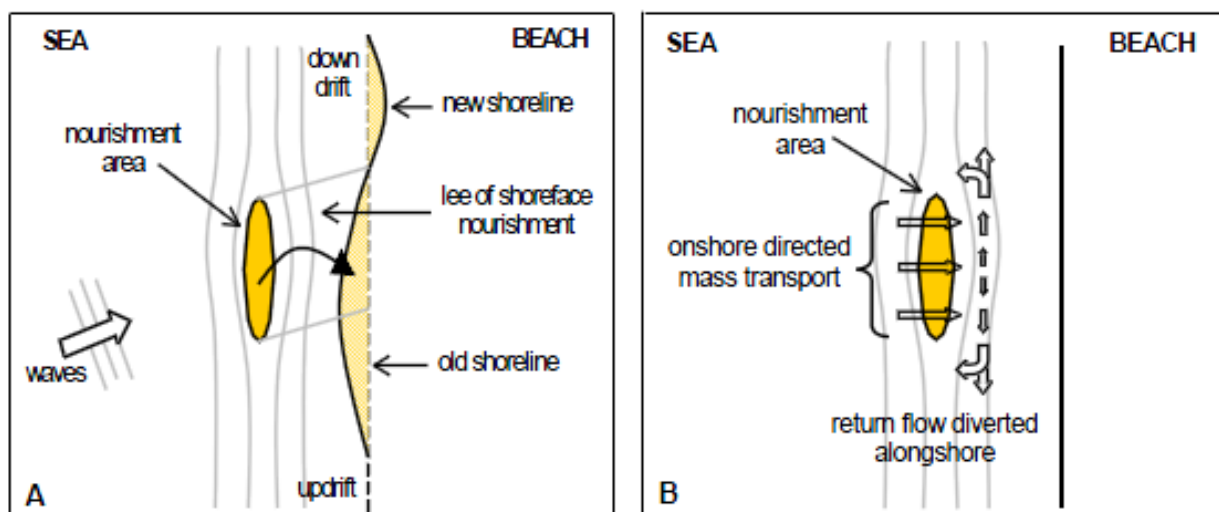


Figura 5: Effetti del ripascimento *offshore*: A- ripascimento *longshore*, B- ripascimento *cross-shore* (van Rijn and Walstra, 2004)

La realizzazione di un ripascimento prevede, al di là della messa in posto vera e propria del sedimento, una serie di attività correlate, quali:

- La caratterizzazione del sito di prelievo da un punto di vista fisico, chimico, microbiologico, eco-tossicologico e biocenotico;
- La caratterizzazione del sito di deposizione e della zona circostante approfondendone le caratteristiche meteomarine, idrologiche, fisiche, chimiche, microbiologiche, eco-tossicologiche e biocenotiche;
- La pianificazione di un monitoraggio prima, durante e dopo l'intervento sia nella zona di prelievo, sia in quella di deposizione ed in quella circostante, sia lungo le direttrici di trasporto del materiale in ambiente marino;

Da un punto di vista amministrativo, saranno da presentarsi:

- Istanza sottoscritta dal Sindaco del Comune interessato alla Provincia;
- Parere e/o proposta della Capitaneria di Porto;
- Parere Ufficio del Genio Civile Opere Marittime.

REIMMISSIONE IN AREE MARINE NON COSTIERE

L'immersione deliberata in mare di materiale di escavo dei fondali e dei terreni litoranei emersi, nonché la movimentazione dei fondali marini derivante da attività di posa di cavi e condotte, disciplinato dall'articolo 35 del D.lgs 152/99, è oggi normata dall'articolo 109 della legge 152/2006. Per quanto concerne la problematica dello smaltimento dei materiali dragati, fino a tempi abbastanza recenti, la metodologia privilegiata è stata quella dell'immersione in mare in siti specifici oltre le 3 miglia nautiche dalla costa. Successivamente, l'indicazione fornita dall'articolo 35 del D.Lgs. 152/99, che riprende quanto indicato dalla Convenzione di Londra del 1972 (in particolare nella risoluzione di approvazione del D.M.A.F. - "*Dredged material assessment*

framework”), è stata quella di considerare il materiale di risulta una “risorsa” da recuperare, piuttosto che un materiale di rifiuto. In considerazione di ciò, dunque, un’alternativa da preferire allo scarico in mare è l’utilizzo benefico dei materiali dragati con o senza specifici trattamenti, anche perché è ormai chiaro che il fondo del mare non può essere usato come una discarica in quanto non possiede una capacità illimitata di assimilazione e smaltimento. Sul piano internazionale è fiorente la presenza di convenzioni internazionali inerenti lo scarico in mare dei materiali: in particolare possiamo citare la Convenzione di Londra (protocollo 96) del 1972, la Convenzione di Barcellona (protocollo Dumping del 1995) per quanto riguarda l’area Mediterranea e la Convenzione OSPAR del 1992 (entrata in vigore nel febbraio 1999) per l’area del Nord-Est Atlantico, che sostituisce la Convenzione di Oslo del 1972 e la Convenzione di Parigi del 1974.

Tutte confermano i seguenti principi essenziali:

- il principio precauzionale: possono essere scaricate in mare solo determinate sostanze con un percorso specifico scaturito dalla caratterizzazione dei sedimenti, dall’ipotesi di impatto e dal successivo monitoraggio;
- il principio “chi inquina paga”: si attribuisce al soggetto che introduce sostanze inquinanti nell’ambiente, la responsabilità di sostenere i costi per le misure di riduzione dell’inquinamento prodotto;
- il principio di gestione integrata delle zone costiere: ogni intervento in questa fascia di territorio deve essere contestualizzato nell’ambito di una gestione “integrata”, che contempli tutti gli aspetti socio-economici, oltre che prettamente ambientali.

La scelta del sito idoneo dipende dalle caratteristiche dinamiche della massa d’acqua (onde e correnti), delle caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche della colonna d’acqua, nonché delle caratteristiche del fondale (morfologia, batimetria, granulometria e caratteristiche chimiche dei sedimenti) e delle principali biocenosi bentoniche, popolazioni ittiche esistenti, aree di nursery e di alimentazione presenti nel sito di destinazione finale. Vanno inoltre valutate le sinergie con il territorio circostante, e quindi la presenza nelle zone limitrofe di aree interdette allo scarico o la presenza di altre aree di scarico o di fonti inquinanti.

La superficie del sito di immersione deve essere sufficientemente estesa in rapporto alla quantità dei materiali da scaricare. Il ricoprimento teorico medio del fondale non deve essere superiore a 5 cm, spessore che risulta generalmente compatibile con i processi di ricolonizzazione da parte degli organismi bentonici. Si raccomanda l’individuazione di più siti di immersione al fine di poter disporre di alternative in caso di «saturazione» del primo sito selezionato. L’area del sito di immersione deve essere definita secondo forme geometriche regolari (quadrati o rettangoli), suddivisibili in subaree unitarie di 1 mn x 1 mn nelle quali differenziare temporalmente i volumi di materiale da scaricare. Devono essere individuate, inoltre, almeno due aree di controllo (di almeno 1 mn x 1 mn) che abbiano le stesse caratteristiche del sito e che non siano influenzate da attività di origine antropica e presumibilmente anche da quelle di scarico.

Dovrà essere verificato che il sito non risulti di tipo dispersivo, ovvero che sussistano le condizioni idrodinamiche e sedimentarie per cui la quasi totalità del materiale rimanga sul fondale all’interno del sito stesso. Va inteso che a seguito della reimmissione in mare il sito deve essere tenuto monitorato nel tempo e nello spazio.

Le principali tecniche di immersione sono lo scarico diretto da *hopper* e da *betta*. Le tubazioni alimentate da draghe idrauliche non devono essere utilizzate in quanto tendono a formare estese

nuvole di sedimenti fini in sospensione. Le perdite di materiale per dispersione dovrebbero essere stimate attraverso l'impiego di idonei modelli numerici di simulazione. Durante il trasporto, prima e dopo l'operazione di sversamento, dovranno essere esclusi, con opportuni metodi di contenimento, rilasci accidentali o perdite di materiale in navigazione. Dovranno inoltre essere allestiti opportuni sistemi per il monitoraggio in tempo reale delle rotte seguite durante il trasporto e per la registrazione delle stesse per successive verifiche.



Figura 6: Intervento di ripascimento di un tratto di spiaggia emersa.

4.2 Riutilizzo a terra

INTERVENTI DI TOMBAMENTO E RIPRISTINO DI CAVE

La sistemazione finale dell'area di cava deve riportare l'uso del suolo allo stato precedente l'inizio della coltivazione, oppure migliorare dal punto di vista ambientale l'area di escavazione attraverso interventi che producano un assetto finale equilibrato dal punto di vista ecosistemico e paesaggistico.

Per opere di recupero si intendono sia le attività tese al ripristino dello stato iniziale dei luoghi che gli interventi finalizzati ad una nuova destinazione d'uso del territorio di tipo: naturalistico, produttivo agricolo o forestale, urbanistico, idraulico-fluviale. Ove il PAE (Piano delle Attività Estrattive) non preveda il tombamento totale del vuoto di cava, i progetti dovranno essere

orientati alla costruzione di forme morfologiche esistenti in natura e riconoscibili nel territorio provinciale. Le modalità del recupero dovranno favorire di regola assetti che prevedano la ricostruzione di manti vegetali, utilizzando per quanto possibile tecniche di ingegneria naturalistica, e comunque cercando di utilizzare e accelerare i processi naturali stessi.

Le proposte progettuali dovranno tener conto delle "Indicazioni preliminari per il recupero delle cave a cielo aperto e delle discariche di inerti di risulta" redatte, per conto del Ministero dell'Ambiente dalla Commissione per la VIA (Valutazione di Impatto Ambientale). I progetti di recupero devono seguire i criteri tecnici contenuti della DGR 1854 del 29/12/2003 "Linee guida per la progettazione e gestione sostenibile delle attività estrattive e delle discariche per rifiuti inerti", redatte ai sensi dell'art. 16 della legge regionale n. 38 del 30 dicembre 1998 "Disciplina della Valutazione di Impatto ambientale" per gli aspetti inerenti le attività di cava a cielo aperto ed in sotterraneo, nonché le discariche connesse.

Nel Programma di coltivazione possono essere previste diverse soluzioni per il recupero del sito al termine dell'attività di coltivazione. Tali soluzioni devono essere compatibili e coerenti con l'intorno paesaggistico, ambientale e urbanistico, e sono sostanzialmente riconducibili al rimodellamento dei versanti, anche mediante riempimento, tendendo ove possibile alla ricostituzione della morfologia originaria. In questo caso, nel Progetto di cava, devono essere esplicitate le quantità e la tipologia dei materiali da utilizzare nonché le modalità di realizzazione delle opere e di collocazione dei materiali, sulla base delle loro caratteristiche geotecniche e fisico-chimiche.

I caratteri dei materiali da porre in opera si misurano quantitativamente attraverso verifiche standard da eseguirsi in cantiere per accertarne l'idoneità.

L'utilizzazione di materiali classificati come "rifiuti" (ai sensi del Decreto del Ministero Ambiente del 5 febbraio 1998 e successive modifiche ed integrazioni), ma che risultano idonei per attività di recupero ambientale, (ai sensi ed alle condizioni di cui all'Art. 5 e all'Allegato 1 suballegato 1 al predetto decreto), previo eventuale trattamento e comunque subordinatamente allo svolgimento del test di cessione ove prescritto, potrà essere autorizzato verificando quantità e modalità per l'utilizzo di tali materiali alla luce delle condizioni di seguito riassunte. Sono esclusi dal possibile riutilizzo esclusivamente finalizzato alla ricomposizione di aree di cava le seguenti tipologie di rifiuto: (rif. Allegato 1 suballegato 1 DM 5.02.98 e ss.mm.ii.) 7.14 "detriti di perforazione", 7.15 "fanghi di perforazione", 13.6 e 13.7 "gessi chimici", 13.11 "silicato bicalcico", in ragione delle caratteristiche chimico-fisiche predominanti degli stessi.

I materiali utilizzati per la ricomposizione ambientale devono essere indicati e quantificati a progetto e devono presentare nell'insieme caratteristiche qualitative tali da garantire:

- a) compatibilità con le caratteristiche chimico-fisiche, idrogeologiche e geomorfologiche delle aree da recuperare;
- b) conformità del contenuto di inquinanti a quanto previsto dalla legislazione vigente in materia di messa in sicurezza, bonifica e ripristino ambientale dei siti inquinati, in funzione della specifica destinazione d'uso del sito;
- c) stabilità di comportamento: il materiale deve dimostrare una scarsa sensibilità all'acqua, ai cicli di imbibizione ed essiccamento. Ciò si ottiene garantendo basse percentuali di materiale fine e comunque una scarsa sensibilità del fine all'acqua rispetto a fenomeni di plasticità e compressibilità;

- d) elevata resistenza di attrito interno: lo scheletro litico deve assicurare un efficace incastro tra i grani grossi. Ciò si ottiene adottando un buon assortimento granulometrico, una adeguata spigolosità dei grani e un elevato addensamento dei grani stessi;
- e) assenza di cedimenti per carichi ripetuti: l'assenza di cedimenti è garantita da una adeguata posa in opera tesa, attraverso un opportuno costipamento, a realizzare il massimo addensamento in fase di costruzione,
- f) idoneità alla ricolonizzazione di specie e habitat naturali, in particolare nel caso di cave situate in aree Rete Natura 2000.

Nei restanti casi, per i materiali classificati come "rifiuti", non riconducibili alle tipologie sopra indicate, l'abbancamento potrà essere autorizzato dalla Provincia, fatte salve ove prescritte le procedure di VIA.

Tra le modalità di intervento per la sistemazione finale viene menzionato il miglioramento delle condizioni di intervento che va ricercato sia nelle modifiche della morfologia (abbattimento delle pendenze) che del substrato (riporto di terreno vegetale e di inerti a granulometria fine limo e argilla con percentuali superiori al 20%).

ESECUZIONE DI TERRAPIENI E ARGINATURE, REALIZZAZIONE E SOPRALZO DI TERRENI COSTIERI

In tutti quegli ambiti territoriali in cui sia necessario realizzare opere in prossimità del litorale, quali terrapieni e arginature, è possibile utilizzare i sedimenti dragati dal fondale marino, purché risultino conformi a tale scopo dal punto di vista ambientale e strutturale.

Analogamente, tali materiali possono essere sfruttati per la ricostruzione e il sopralzo di terreni costieri, in particolar modo laddove sussista la necessità di ripristinare aree salmastre per l'insediamento di specie animali e vegetali caratteristiche di habitat palustri. Quest'ultima ipotesi appare essere una delle più sostenibili, considerata la natura del materiale gestito e la non necessità di sottoporlo ad alcun tipo di trattamento, nel caso in cui presenti un buono stato di qualità dal punto di vista chimico, microbiologico e eco-tossicologico.

L'uso della frazione sabbiosa, opportunamente dissalata, per il ripristino di un terreno costiero può conferire elevata permeabilità, favorendo la coltivazione di quelle colture che soffrono di un eccessivo ristagno dell'acqua, quali meloni, angurie e certi tipi di viti.

RILEVATI E SOTTOFONDI STRADALI E FERROVIARI

I sedimenti marini, a valle di un processo di dissalazione, possono essere utilizzati per la realizzazione di rilevati e sottofondi stradali o ferroviari. Questo tipo di opere richiede però un elevato grado di stabilità dei materiali dal punto di vista strutturale, per assicurare la tenuta sotto alti carichi. A tal fine, i sedimenti che non presentano naturalmente le caratteristiche meccaniche richieste devono essere sottoposti a un processo di stabilizzazione meccanica, mediante miscelazione con appositi agenti stabilizzanti, quali calce o cemento, in idonee condizioni. In particolare, la frazione argillosa, una volta stabilizzata, può essere posta come strato di base su cui disporre una sequenza di materiali diversi, con la funzione di sottofondo stradale.

5 LA SOLUZIONE SEDI.PORT.SIL.

Applicando la filiera SEDI.PORT.SIL. i sedimenti contaminati possono essere impiegati come materia prima nel settore infrastrutturale e nell'ingegneria ambientale. Inoltre, il progetto indaga l'uso di sedimenti inquinati come materia prima per l'estrazione di leghe di silicio.

Dapprima, alcuni campioni di sedimento dragati dal Porto di Ravenna (Italia) sono stati sottoposti ad una serie di differenti trattamenti, esposti nel seguito, che costituiscono la filiera SEDI.PORT.SIL..

Il processo di decontaminazione è stato applicato sui sedimenti portuali campionati suddivisi in tre classi di contaminazione, sulla base della caratterizzazione preliminare dell'area portuale: "rosso", sedimenti molto inquinati (concentrazione di inquinanti oltre la Tab.1, colonna B dell'Allegato 5 al D.Lgs. 152/06); "giallo" sedimenti contaminati (concentrazione di inquinanti tra le colonne A e B del D.Lgs. 152/06); "verde", sedimenti non contaminati (concentrazione di inquinanti sotto la Colonna A del D.Lgs. 152/06).

Superata una fase di sperimentazione a livello di laboratorio, sono state accoppiate tra loro alcune delle tecniche esposte in precedenza.

- In primo luogo è stato progettato e costruito un impianto prototipo, realizzato esclusivamente per il progetto SEDI.PORT.SIL. al fine di testare diversi cicli di trattamento "soil-washing" sui sedimenti campionati dal Porto di Ravenna (Figura 7). L'impianto pilota ha in entrata il sedimento misto acqua (detta torbida) che, grazie ad una forte turbolenza, viene risospeso. La torbida è fatta passare per un filtro a rete con maglia di 2 mm per la prima separazione granulometrica ed il passante viene rilanciato mediante pompa nell'idrociclone ed in celle di attrizione, che restituiscono la frazione più grossolana pulita e pronta a essere riutilizzata.

La frazione a granulometria fine ($<75 \mu\text{m}$), è costituita da un fango maggiormente diluito rispetto allo stato iniziale, portato poi a concentrazione di 500 g/l grazie ad elettroliti. A questo punto viene separata la parte solida da quella liquida tramite un filtro-pressa, nella quale la prima sedimenta su piastre, mentre la seconda fuoriesce grazie a pareti semi-permeabili.

Le acque provenienti dall'impianto di trattamento e dalla disidratazione dei sedimenti fini sono trattate mediante processo di depurazione.

- La frazione a granulometria, a valle del soil-washing, è stata processata tramite digestione batterica (landfarming). Il trattamento consente di ridurre significativamente la concentrazione di composti organici. La differenza tra i diversi tassi di degradazione nei tre test su sedimento fine dipendono dalla iniziale concentrazione e composizione degli idrocarburi presenti, raggiungendo riduzioni percentuali importanti e variabili tra il 44% ed il 70%.
- Una ultima fase del processo di valorizzazione dei sedimenti mediante fusione al plasma, mai testata prima sui sedimenti portuali, verte sulla loro inertizzazione e sull'estrazione finale di silicio metallico. La fase sperimentale, effettuata a scale differenti, ha confermato che:

- Il trattamento termico non è esclusivamente in funzione della granulometria, poiché anche le frazioni limoso-argillose diventano un'importante fonte di silicio;
- La lega di ferrosilicio (FeSi) estratto rappresenta una risorsa dall'elevato valore di mercato;
- Dopo il trattamento al plasma, i sedimenti rimanenti (scorie di fusione) sono inerti e non presentano nessuna traccia di contaminanti.

A partire dai risultati delle sperimentazioni è quindi stato strutturato e dimensionata l'intera filiera a scala industriale: il sedimento viene conferito all'impianto direttamente da chi opera nelle attività di dragaggio, che riverserà il sedimento all'interno della cassa di colmata. L'elevata dimensione della casa di colmata è fondamentale visto che il dragaggio avviene con tempi e modi non facilmente controllabili da parte del gestore dell'impianto e costituisce dunque un importante "polmone" operativo per accogliere i flussi in ingresso. La sua concezione, divisa in due aree distinte, è atta a permettere una migliore gestione dei sedimenti soprattutto dovendo gestire in modo diverso frazioni più o meno inquinate.

La prima operazione di trattamento viene effettuata tramite tecnologie di soil-washing che porterà come descritto sopra, ad ottenere:

- Una modesta quantità di detriti, conchiglie e materiali grossolani (legno, alghe, etc) che possono essere destinati a smaltimento come rifiuti non pericolosi;
- Una prima frazione di sabbia a grana grossa (>2mm), ripulita dagli inquinanti, ancora salata, che si presta ad essere re-immessa sul mercato come materiale ideale per ripascimenti;
- Una seconda frazione di sabbia più fine, che sarà ulteriormente trattata con acqua dolce industriale per dissalarla, che rappresenta un materiale adeguato a tombamenti e/o utilizzi nel mercato edile;
- Un'ultima frazione di argille in cui si saranno accumulate le sostane inquinanti, che verrà inviata agli stadi successivi del processo.

In uscita dal soil-washing le argille inquinate saranno sottoposte ad una separazione solido-liquida mediante filtropresse. Il risultato finale sono una serie di panetti argillosi di dimensioni di qualche metro di lato e pochi centimetri di spessore.

Le acque provenienti dall'impianto di trattamento e dalla disidratazione dei sedimenti fini sono trattate mediante processo di depurazione, al fine di diminuire i contaminanti presenti e permetterne lo scarico nel rispetto della normativa vigente in materia.

A questo punto il flusso di sedimento a regime subirà una suddivisione in due direzioni.

Nella prima, una certa quantità di argilla inquinata filtropressata sarà convogliata, tramite nastri trasportatori, verso l'impianto di fusione, dove i panetti argillosi saranno stoccati per far perdere umidità residua, eventualmente ulteriormente essiccati, per essere poi immessi nella vasca di fusione da cui usciranno infine leghe di Ferro-Silicio (FeSi), lega metallica di pregio, e scorie che, grazie ad un processo di vetrificazione ottenuto tramite un rapido raffreddamento, costituiscono un materiale inerte (cioè in grado di non rilasciare nell'ambiente circostante sostanze dannose).

Un sottoprodotto del processo di fusione è una significativa produzione di fumi ad alta temperatura. Questi saranno trattati da un impianto che si occuperà di:

- Depurare tali fumi da sostanze inquinanti, evitando la produzione di diossina, per assicurare che le emissioni in atmosfera abbiano concentrazioni di inquinanti entro i limiti di legge e non rappresentino un rischio per l'ambiente.
- Effettuare un recupero energetico da tali fumi (che hanno un'elevata temperatura, visto che la fusione avviene a 1700°C), con produzione di energia elettrica e calore, il cui sottoprodotto sono una certa quantità di ceneri da fusione (oggetto di un successivo smaltimento come rifiuti speciali).

Il materiale eccedente la capacità di ingresso del forno fusorio sarà invece avviato alla successiva fase di bonifica tramite l'impianto di landfarming. In quest'ultima sede, alla luce della specifica natura dell'inquinamento dei fanghi (che è costituito prevalentemente da idrocarburi), grazie all'aggiunta di microrganismi specializzati nella digestione di queste sostanze si giungerà alla produzione di argille finalmente prive di inquinanti in concentrazioni pericolose.



Figura 7: Vista del prototipo realizzato per di testare diversi cicli di trattamento "soil-washing" sui sedimenti campionati dal Porto di Ravenna (sopra).

A lato, il materiale argilloso in uscita dalla filtropressa.



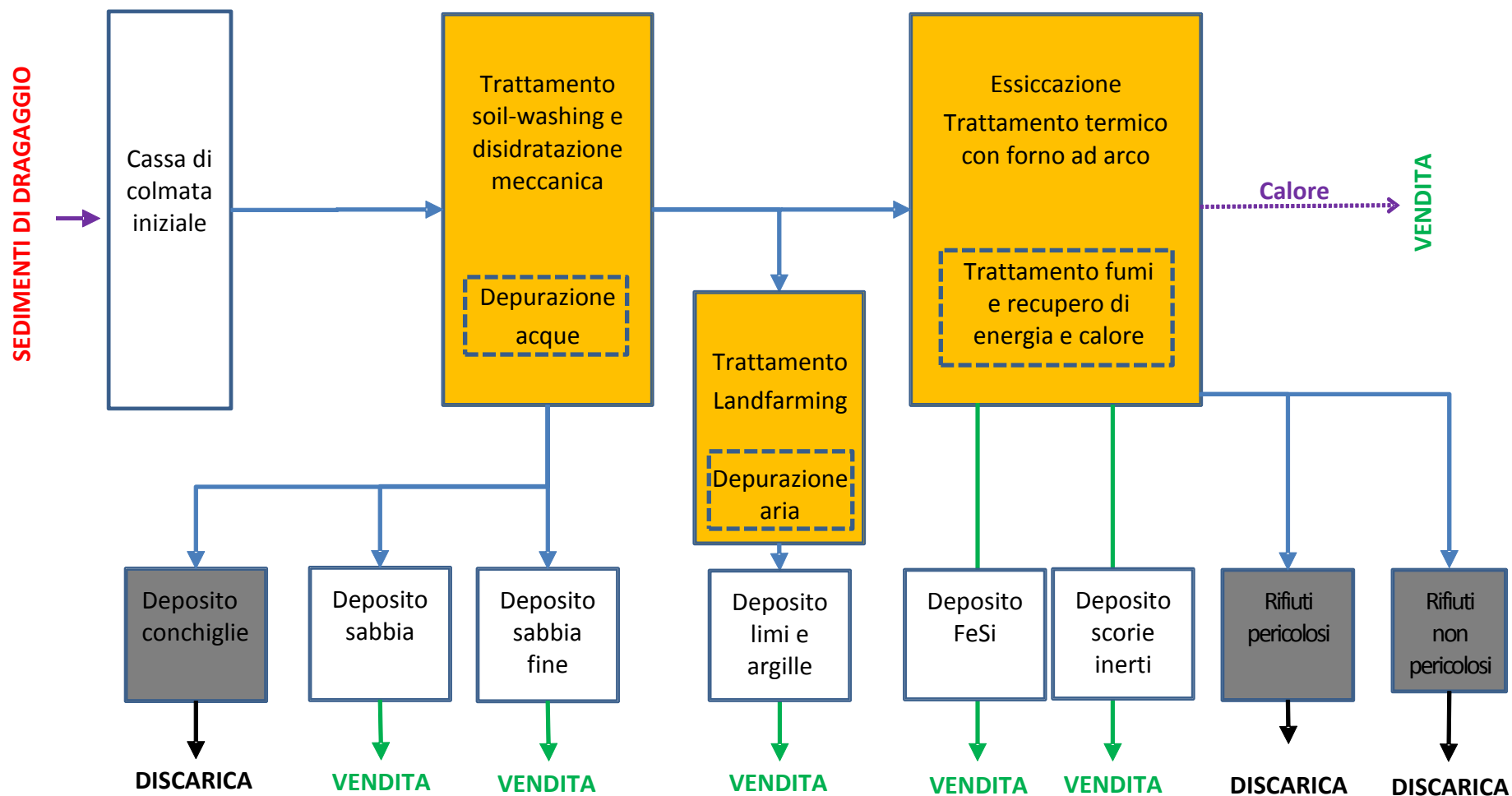


Figura 8: Schema semplificato della filiera SEDI.PORT.SIL.

In definitiva, il bilanciamento complessivo della filiera prevede:

- La ricezione di sedimenti da dragaggio inquinati.
- La restituzione di materiali NON inquinati da destinare a diversi mercati:
 - Sabbie grosse per ripascimenti;
 - Sabbie fini dissalate adatte a tombamento altri utilizzi edili;
 - Leghe di Ferro-Silicio con Percentuale di Silicio indicativamente intorno al 50%, che rappresentano invece un importante elemento per l'industria siderurgica;
 - Inerti vetrificati, output dei processi di fusione, che hanno caratteristiche meccaniche per una destinazione come materiali edili (o tombamenti) di bassa qualità;
 - Argille non inquinate che escono dal processo di landfarming, che possono essere vendute tal quali, ovvero affinate ulteriormente tramite l'aggiunta di calce per diventare uno stabilizzato di qualità tale da essere utilizzato in sottofondi stradali o fondazioni stradali;
 - Calore, sotto forma di acqua a 90°C che può essere rivenduta tramite reti di teleriscaldamento a impianti industriali circostanti che possano beneficiare di questo apporto energetico (alternativamente si potrebbe usare il calore per produrre del fresco, veicolato tramite reti di tele-raffrescamento, normalmente ricercato da aziende con impianti refrigeranti industriali, che è facile immaginare possano essere presenti quando sarà stato ultimato il futuro Terminal Container).
- Una serie di materiali di scarto:
 - Detriti, materiali organici, conchiglie etc..., assimilabili ai rifiuti raccolti sulle spiagge, da destinare a smaltimento come CER 191212;
 - Ceneri da trattamento fumi CER 190402* (ceneri leggere ed altri rifiuti dal trattamento dei fumi).

Sostenibilità ambientale

L'impianto riesce, grazie alla combinazione di diversi processi produttivi tra di loro per molti versi complementari, a immettere sul mercato materie prime seconde per la quasi totalità dei volumi in gioco, neutralizzando interamente l'inquinamento in ingresso, tra l'altro con la produzione di alcune frazioni (la lega Ferro Silicio) di grande pregio (il cui effetto indiretto è la diminuzione di fabbisogno ad un altro settore con effetti ambientali devastanti quali l'industria estrattiva).

Il punto debole dell'impianto può essere ricondotto alla sua natura fortemente energivora, ed eventualmente all'aspetto delle emissioni. A tal proposito si evidenzia che un quarto del valore dell'investimento della fusione sia dedicato alla sezione di trattamento dei fumi e recupero energetico, per assicurare che i rischi di emissione fumi nocivi siano ridotti al minimo e per spingere l'efficienza del recupero energetico al massimo.

Sostenibilità sociale

Si richiamano alcuni aspetti per cui la valenza sociale dell'impianto sia tutt'altro che trascurabile: in primis la valenza occupazionale. Una attività produttiva che assorba oltre 20 persone (e che genererà necessariamente un indotto) è un aspetto di grande interesse per il territorio.

Le attività di dragaggio previste porteranno allo sviluppo del porto in termini di capacità ad ospitare navi di dimensioni maggiori rispetto a quanto avviene finora e nuove presumibili attività economiche verranno indotte dall'opera e legate allo sviluppo dell'intera area industriale e portuale.

È molto significativa inoltre la valenza innovativa dell'impianto: il fatto che questo modello di business sia proposto e lanciato sul mercato da una cordata di eccellenze Italiane rappresenta un fattore capace di rafforzare il posizionamento del territorio come all'avanguardia per quanto riguarda competenze e imprese avanzate nel campo del trattamento dei rifiuti e dei servizi ambientali in genere.

Sostenibilità economica

L'impianto nel suo complesso presenta un bilancio economico ampiamente positivo considerando un ciclo di vita dell'impianto di circa vent'anni, capace di resistere a sollecitazioni anche abbastanza significative sui driver di costo e di ricavo.

Un primo aspetto di carattere generale riguarda la scala e approvvigionamento dell'impianto. Il tema del trattamento dei fanghi inquinati provenienti dal dragaggio dei porti è piuttosto comune, con diversi esempi anche attuali in siti che affacciano sul mare Adriatico, che mette al riparo da rischi tangibili di fermi di produzione connessi alla scarsità di sedimento. Al contrario, vista la flessibilità dell'impianto, esistono diverse opportunità di ulteriore aumento della produttività, soprattutto in presenza di sedimenti con contenuti di sabbie relativamente elevati che rappresenta una promettente opportunità per migliorare il conto economico.

Il conto economico dell'impianto si regge anche sul fatto di considerare un valore di conferimento del sedimento nell'impianto, comunque più basso del valore del costo di smaltimento di rifiuti inerti e molto inferiore a valori di mercato per sedimenti portuali inquinati.

Il valore del FeSi è l'altra macro-voce di ricavo dell'impianto. In questo caso la presenza di diversi fattori (andamento del mercato delle materie prime, cambio €/\$,...) rende più difficile indicare con sicurezza andamenti nei prossimi 20 anni.

Relativamente alla possibilità dell'impianto di generare inerti di diversa tipologia e qualità rende il SEDI.PORT.SIL una filiera che avrà un impatto molto significativo nel rappresentare il ruolo di leader su questo mercato, con la possibilità di "ingegnerizzare" prodotti di valore. La prossimità al mare (anzi, ad un porto commerciale in espansione) estende il bacino di utenza ben oltre la provincia di Ravenna, ipoteticamente guardando all'intero bacino Adriatico senza che l'impatto dei costi logistici debba rappresentare un ostacolo significativo.

6 CONCLUSIONI

Il Porto di Ravenna ha in previsione un piano straordinario di dragaggio, connesso alla costruzione di un nuovo Terminal Container, che produrrà oltre 11 milioni di mc di sedimenti, di cui 5,5 milioni di mc di sedimenti inquinati da avviare a smaltimento. In aggiunta le normali attività di manutenzione del fondo del porto producono circa 100-150.000 mc di sedimenti/anno. Se si pensa che 100.000 mc/anno significa ricoprire l'estensione di un campo da calcio per uno spessore di oltre 13 metri, ci si rende conto dell'impatto di assoluto rilievo di queste operazioni, anche senza dover prendere in considerazione l'afflusso di sedimenti dragati in altri siti.

Il problema della gestione di tali volumi rappresenta una sfida logistica anche qualora si trattasse di materiali inerti, visto che si giunge molto velocemente alla saturazione di eventuali discariche atte alla ricezione di questi materiali. Il problema è tanto più significativo se si considera che tali sedimenti sono (a) salati, e come tali non immediatamente utilizzabili come normali materiali da cava; (b) inquinati in modo da richiederne un trattamento come rifiuti, che restringe le possibili destinazioni e comporta un aggravio di costi estremamente ingente.

Trovare una destinazione di mercato ai sedimenti significa, all'interno del progetto SEDI PORTSIL:

- Trasformare il sedimento inquinato in materie prime-seconde non inquinate;
- Vendere tali materie prime-seconde costruendone una proposta di valore con una effettiva attrattività commerciale, a supporto della sostenibilità economica dell'impianto;
- Eliminare questi enormi volumi di sedimenti attraverso il loro riutilizzo in attività produttive, dove essi siano effettivamente richiesti.

Il SEDI PORTSIL realizza tale disegno configurandosi come una completa filiera di trattamento di sedimenti (portuali e non) che include soil-washing, landfarming e trattamento termico per l'estrazione di Silicio.

La filiera SEDI.PORT.SIL. garantisce un recupero pressoché totale del sedimento (efficienza di circa il 98%) e la creazione di materie prime secondarie che possono trovare una loro collocazione nel mercato italiano, europeo e internazionale.

L'alta flessibilità dell'impianto e la continua esigenza di gestione dei sedimenti portuali rendono l'impianto non solo sostenibile nel tempo, ma fanno intravedere diverse opportunità di ulteriore aumento della produttività e della redditività dell'impianto.

BIBLIOGRAFIA

- Argese E., Rigo C., Gamper U., Bedini S., Simion M., Gobbo L., Sburlino G., 2005. Studio sul bioaccumulo di metalli pesanti in specie vegetali di un sito contaminato. XV Congresso della Società Italiana di Ecologia.
- Atlas e Bartha, 1993 *Microbial ecology: fundamentals and applications*
- Bhattacharya A., Routh J., Jacks G., Bhattacharya P., Mörtz M., 2006. Environmental assessment of abandoned mine tailings in Adak, Västerbotten district (northern Sweden). *Applied geochemistry* 21,
- Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Jambor, J.L., Weisener C.G., 2004. Geochemistry of acid mine drainage. In: Sherwood Lollar, B. (Ed.), *Treatise on Geochemistry – Environmental Geochemistry*, 9, 149–204
- Bortone G., Palumbo L., 2007. *Sustainable Management of Sediment Resources. Volume II – Sediment and dredged material treatment*, Elsevier, Oxford.
- Calace N., Petronio B. M., Picciolo M., Pietroletti M., 2002. Heavy metal uptake by barley growing in polluted soils: relationship with heavy metal speciation in soils
- Carobene L. e Brambati A., 1975 – “Metodo per l’analisi quantitativa morfologica delle spiagge” – *Boll. Soc. Geol. It.*, 94, pp. 479-793.
- Eccles H. 1999, “Treatment of metal-contaminated wastes: Why select a biological process?”, *Trends Biotechnol.*, 17, 462–465.
- EPA, (2009) *Sediment Assessment and Remediation Report Guidance for In-Situ Subaqueous Capping of Contaminated Sediments*
- EPA, U.S., 2007. *Demonstration of the AquaBlok® Sediment Capping Technology Innovative Technology - Evaluation Report*
- EPA U.S., 2001. *Method 3051, Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soil and oils.*
- Ernst W.H.O., 2005. Phytoextraction of mine wastes – Options and impossibilities. *Chemie der Erde* 65, 2005.
- Garcia G., 2004 - Il regime giuridico delle attività e dei materiali di dragaggio dei fondali in aree portuali
- Hall M., Alperin E., Shealy S., Jones K., 1997. Treatment of Dredged Harbor Sediments by Thermal Desorption, in *Proceedings of National Conference on Management and Treatment of Contaminated Sediments, Cincinnati (OH)*, EPA/625/R-98/001
- ICRAM- APAT, 2007 - *Manuale per la movimentazione dei sedimenti marini*
- Kabata-Pendias A., Pendias H., 1992. *Trace elements in soils and plants*. Boca Raton, FL: CRC Press Inc.
- Kulman, M.I., Geenfield, T.M., 1999. *J. Hazard. Mater.*, 66, 31-45
- Licht L.A., Isebrands J.G., 2005. Linking phytoremediated pollutant removal to biomass economic opportunities. *Biomass and bioenergy* 28
- Madalinski K., 2008. “Innovation In Situ Technologies for the Remediation of Contaminated Sediments” – EPA, *Federal Remediation Technologies Roundtable Meeting*
- Marchiol L., Contin M., Perosa D., 2003. Approccio biologico alla bonifica di scorie industriali: il caso delle ceneri di pirite, *Siti contaminati n. 4*
- Marchiol L., Fellet G., Zerbi G., Perosa D., Simeoni P., 2004. Fitoestrazione di metalli pesanti in situ nel sito di interesse nazionale “Laguna di Grado e Marano”, *Siti contaminati n. 3*
- Marchiol L., Fellet G., Zerbi G., Simeoni P., Perosa D., 2005. Fitorisanamento di aree inquinate da ceneri di pirite: la sperimentazione in situ di Torviscosa, *Siti contaminati n. 3*
- Mc Bride, M.B., 1994. *Environmental chemistry of soils*, Oxford University Press, Inc., New York, N.J.
- Ministero dell’Ambiente, 2000, “L’ambiente marino e costiero”
- Moreno F.N., Anderson C.W.N., Stewart R.B., Robinson B.H., 2005. Mercury volatilisation and phytoextraction from base-metal mine tailings. *Environmental pollution* 136
- Mulligan Catherine N., et al. 2010 *Sediments Contamination and Sustainable Remediation* CRC Press Pages 135–167 Print ISBN: 978-1-4200-6223-6

- OSPAR COMMISSION, 1992 - Convenzione per la prevenzione dell'ambiente marino del Nord-Est Atlantico. (http://www.ospar.org/eng/doc/OSPAR_Convention.zip)
- Papassiopi, N., Tambouris, S., Kontopoulos, A. (1999), Water Air Soil Pollut., 109, 1-15.
- Paterson, S., D. Mackay, D. Tam, and W. Y. Shiu. 1990. Uptake of organic chemicals by plants: a review of processes, correlations and models. Chemosphere. 21:297- 331. Citato in EPA, 2000.
- Pellegrini D., F. Onorati, C. Lamberti, G. Merico, M. Gabellini, A. Ausili, "Aspetti tecnico scientifici per la salvaguardia ambientale nelle attività di movimentazione dei fondali marini: dragaggi portuali", Quaderni ICRAM, Gennaio 2002.
- Peters, R.W. (1999), J. Hazard. Mater., 66, 151-210.
- Regione Emilia-Romagna, 2007, Progetto di piano per la difesa dal mare e la riqualificazione ambientale del litorale della Regione Emilia-Romagna. Reible et al., 1993. Efficiency of capping contaminated sediments in situ. 2. Mathematics of diffusion-adsorption in the capping layer
- Renoldi F., Lietti L., Milani A. (2005) Desorbimento termico, in Bonifica di siti contaminati, McGraw-Hill, Milano.
- Rienks J. (1998) Comparison of results for chemical and thermal treatment of contaminated dredged sediments, Wat. Sci. Tech. Vol. 37 n° 6-7, pp. 355-362.
- Singh, O.V., Labana, S., Pandey, G., Budhiraja, R., Jain, R.K., 2003. Phytoremediation: an overview of metallic ion decontamination from soil. Appl. Microbiol. Biotechnol. 61, 405-4 12. Citato in Fischerová et al., 2005.
- Stortelder P. B. M., "The management of contaminated sediment, an overview", in European Water Pollution Control, vol. 5, n. 5, pp. 8-15, 1995.
- Teggi S. – Biorisanamento- Facoltà di Ingegneria di Modena – A.A. 2006-07
- Turbante D., Scarpelli M., Sorrentino D., Ammoscato I., Spagnoli G., 2005, Valutazione Preliminare Sul Materiale Per Il Ripascimento In Aree Portuali, Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro (ISPESL), Centro Ricerche Lamezia Terme.
- Vagliasindi F., 2006. Applicazioni ingegneristiche dei Trattamenti biologici di siti inquinati da idrocarburi BIOTECNOLOGIE PER IL RECUPERO DI AREE MARINE CONTAMINATE DA PETROLIO: aspetti scientifici, industriali e normativi.
- Visoottivisetha P., Francesconi K., Sridokchana W., 2002. The potential of Thai indigenous plant species for the phytoremediation of arsenic contaminated land. Environmental Pollution 118
- www.Londonconvention.org
- www.coast-best.it
- www.ospar.org
- <http://www.coastal.ca.gov/sediment/sdindex.html>
- http://www.disat.unimib.it/cfa/didattica/scienze_tecnologie_ambiente_territorio/processi_impianiti_trattamento_disinquinamento/Ch2-ChimFis_Fig.pdf
- http://www.enviroklean.com/files/thermal_desorption_navy_report.pdf