



DICATAM
Università degli Studi
di Brescia



DICAR
Università degli Studi
di Catania



DICEA
Sapienza, Università
di Roma

SiCon 2022

***Workshop su: Siti Contaminati. Esperienze negli
interventi di risanamento***

9-11 Febbraio 2022

Capping di sedimenti contaminati con geocompositi attivi

Ing. Alberto Simini
HUESKER Srl
Piazza della Libertà 3, 34132 Trieste, Italy
a.simini@HUESKER.it

Dr.-Ing. Stefan Niewerth
HUESKER Synthetic GmbH
Fabrikstraße 13-15, 48712 Gescher, Germany
niewerth@HUESKER.de

CAPPING DI SEDIMENTI CONTAMINATI CON GEOCOMPOSITI ATTIVI

Alberto Simini

HUESKER Srl, Piazza della Libertà 3, 34132 Trieste, Italy,

a.simini@HUESKER.it

Stefan Niewerth

HUESKER Synthetic GmbH, Fabrikstraße 13-15, 48712 Gescher, Germany,

niewerth@HUESKER.de

Sommario. I sedimenti contaminati sono un problema per l'ambiente e, di conseguenza, anche per la salute umana. Per l'abbattimento del rischio di diffusione dei contaminanti dai sedimenti, la soluzione ad oggi più utilizzata è quella della loro rimozione mediante operazioni di dragaggio e smaltimento in discarica (o combustione), previa disidratazione. Una soluzione alternativa che attualmente viene usata con successo soprattutto in Nord America e in Scandinavia, è la realizzazione di un capping attivo dei sedimenti. Con questa soluzione le sostanze inquinanti vengono isolate chimicamente in modo permanente e separate fisicamente dalle acque superficiali in modo che non possa avvenire alcuna migrazione degli inquinanti né nelle acque né negli organismi bentonici e acquatici che vi abitano. Attraverso processi naturali, gli inquinanti vengono decomposti biologicamente o resi innocui nel tempo. Grazie all'utilizzo di geocompositi attivi, le sostanze adsorbenti presenti al loro interno possono essere posate in modo uniforme e controllato direttamente sul fondo del corpo idrico al di sopra dei sedimenti contaminati. Questo metodo riduce i rischi connessi alle operazioni di bonifica e inoltre si eliminano i costi, economici e ambientali, di trasporto e smaltimento necessari per la rimozione dei sedimenti contaminati.

1. PREMESSA

Le acque interne e i mari, e soprattutto i porti, sono stati utilizzati fin dall'inizio dell'industrializzazione come punti di trasbordo e vie di comunicazione per il trasporto di materie prime, merci e combustibili. L'acqua invece era, ed è tutt'oggi usata, anche come acqua di raffreddamento e di processo e, a seguito del suo utilizzo, viene immessa nuovamente nel corpo idrico alterandone l'equilibrio. I

numerosi vantaggi garantiti dai corpi idrici hanno portato all'insediamento di industrie manifatturiere lungo i corsi d'acqua fin dall'inizio del XIX secolo e, in epoche successive, anche di centrali elettriche.

Fino alla metà del secolo scorso, non esistevano norme severe sulla protezione dei corpi idrici così come le conosciamo oggi. Infatti, la prima direttiva europea in tal senso, la 76/464/CEE, è del 1976 e per la prima volta ha regolato a livello europeo l'inquinamento derivante dallo scarico di sostanze pericolose nei corpi idrici. L'ultimo suo aggiornamento è del 2006 ed identifica una lista di contaminanti che sono di particolare rilevanza per il controllo dell'inquinamento dell'acqua. In alcuni stati europei, come la Germania, la bonifica dei sedimenti inquinati è stata in gran parte regolata dalla direttiva quadro UE sulle acque solamente a partire dagli anni 2000 (Förstner, 2013). Per molti decenni quindi, l'uso della risorsa idrica non è stato né regolamentato né controllato dal punto di vista della protezione della colonna d'acqua (acque e sedimenti). Questo vale non solo per la Germania, ma per la maggior parte dei paesi industrializzati.

La contaminazione delle acque di superficie comporta una doppia azione di risanamento: la riduzione delle concentrazioni di contaminanti allo scarico e un'azione di bonifica mirata dei sedimenti. Oggi la sfida è rivolta soprattutto alla bonifica dei sedimenti. Il dragaggio non può essere più la soluzione per ovvi motivi di gestione del materiale dragato che viene molto spesso gestito off site, al suolo come rifiuto e solo raramente movimentato nell'ambito degli stessi corsi d'acqua. In entrambi i casi gli impatti non sono però trascurabili così come non lo sono i relativi costi, senza poi considerare il problema che in molti casi la movimentazione del sedimento e la gestione off site comportano la perdita di una risorsa come il sedimento. Si pensi alla bonifica delle aree lagunari come quelle di Grado Marano, di Venezia, di Orbetello dove il sedimento rappresenta una risorsa da tutelare per preservare la sopravvivenza dell'ambiente lagunare stesso.

Un metodo alternativo di bonifica, già largamente utilizzato in Nord America e in Australia, ma anche nei Paesi Bassi e in Scandinavia, è l'isolamento chimico permanente degli inquinanti dalle acque di superficie. Con questa metodologia, il fondale contaminato viene coperto con materiali sciolti per impedire il trasporto di inquinanti nell'acqua. Gli inquinanti vengono così isolati dalle acque superficiali per un periodo di diversi decenni, durante il quale vengono decomposti dai processi biologici e chimici naturali che avvengono al di sotto dello strato isolante. Un capping convenzionale consiste nell'applicare uno spesso strato di sabbia sui sedimenti inquinati per evitare il trasporto di sostanze inquinanti. È anche possibile aumentare l'effetto dell'isolamento utilizzando sostanze attive per assorbire gli inquinanti; in questo modo mediante l'impiego di piccole quantità di tali sostanze si può garantire anche un migliore isolamento chimico. L'utilizzo di geotessili incrementa ulteriormente i vantaggi: semplifica la posa delle sostanze attive, garantisce uno spessore costante dello strato attivo e ne facilita la posa anche su fondali in pendenza. La combinazione tra geotessili e sostanze attive

viene chiamata geocomposito attivo.

2. GEOCOMPOSITI ATTIVI

2.1. Componenti geotessili

Il termine “geocomposito attivo” descrive la combinazione di almeno due strati di geotessili con all’interno un materiale attivo. Lo strato inferiore portante e lo strato superiore di copertura, realizzati con geotessili tessuti o nontessuti, sono fissati meccanicamente mediante agugliatura o cucitura.

Questi geosintetici con all’interno sostanze granulari o in polvere distribuite in modo uniforme, sono stati utilizzati nella costruzione di discariche già a metà degli anni ‘80 (Egloffstein 2014). In queste prime applicazioni, il materiale interposto tra i due geotessili era bentonite con elevata capacità di rigonfiamento, con lo scopo di garantire la realizzazione di uno strato impermeabile equivalente dal punto di vista idraulico ad uno di argilla di spessore molto maggiore (Rollin et al., 1998).

Al contrario di questi materiali compositi, noti con il nome di geocompositi bentonitici, i geocompositi attivi hanno invece una permeabilità molto elevata ($k \geq 1 \cdot 10^{-5}$ m/s). Questo aspetto è di vitale importanza in modo da garantire che il mezzo inquinato, acqua o gas che sia, possa diffondersi attraverso il geocomposito. La sostanza da trattare non viene quindi bloccata e il flusso naturale dell’acqua rimane inalterato.

Nell’applicazione di capping di sedimenti, i geotessili non servono solo come elementi di confinamento delle sostanze attive, ma garantiscono anche ulteriori proprietà vantaggiose per la specifica applicazione:

- **Rinforzo:** la resistenza alla trazione dei geotessili contribuisce al miglioramento della capacità portante dei sedimenti.
- **Separazione:** impediscono il mescolamento tra due terreni adiacenti.
- **Filtrazione:** trattengono le particelle di terreno ma consentono il libero passaggio di fluidi (acqua o gas).

Oltre alle proprietà fisiche, anche la durata dei materiali è importante in quanto le sostanze inquinanti devono essere isolate chimicamente fino alla loro decomposizione naturale, un processo che può durare anche diversi decenni. Al fine di simulare in laboratorio l’invecchiamento dei componenti geotessili per determinare la loro vita utile in esercizio possono essere utilizzati test di ossidazione. Un’aspettativa di vita di 100 anni è considerata normale per i geotessili installati correttamente ed esposti alle condizioni naturali.

2.2. Sostanze attive e loro funzionamento

Per filtrare le sostanze inquinanti dai sedimenti o dall'acqua dei pori, si utilizzano sostanze attive a cui le sostanze inquinanti possono aderire. Questo meccanismo d'azione è chiamato adsorbimento e le sostanze attive sono quindi anche chiamate adsorbenti.

Per la scelta del principio attivo adatto, l'inquinante deve essere attentamente caratterizzato e analizzato, distinguendo la presenza di inquinanti organici e/o di inquinanti inorganici. Gli inquinanti organici in acqua sono prevalentemente composti di idrocarburi che formano catene o composti aromatici. Alcuni esempi di inquinanti organici presenti nei sedimenti delle acque superficiali sono gli idrocarburi policiclici aromatici (PAH), i bifenili policlorurati (PCB), il tributilstagno (TBT) e le diossine/furani (PCDD/PCDF).

Gli inquinanti inorganici sono composti molecolari simili al sale e sono, ad esempio, dei (semi)metalli come l'arsenico, il mercurio, il nichel o il piombo. Alcune di queste sostanze rappresentano un rischio per l'ambiente e la salute anche a basse concentrazioni. Le sostanze si accumulano per un lungo periodo di tempo nei tessuti degli organismi viventi (recettori). Per questo motivo, si parla anche di tossine di tipo cumulativo.

A seconda delle proprietà dei diversi inquinanti, vengono utilizzate diverse sostanze attive per "immobilizzarli". Una delle sostanze attive più versatili per il trattamento dell'acqua è il carbone attivo. Grazie alla sua struttura micro e mesoporosa, i granuli hanno una superficie specifica molto elevata. Per esempio, 10 g di carbone attivo derivato da gusci di noci di cocco hanno una superficie specifica pari a quella di un campo di calcio e, come è facilmente intuibile, maggiore è la superficie, più inquinanti possono essere adsorbiti. A causa della struttura molto fine dei pori del carbone attivo derivato dalle noci di cocco, esso è adatto per gli inquinanti organici con molecole piuttosto piccole, come gli IPA o i PCB più piccoli. Al contrario il carbone attivo con pori più grandi, derivato spesso dal carbone fossile, viene usato per i composti con una massa molecolare più grande, come i PFC a catena lunga o i pesticidi e gli erbicidi.

In caso di contaminazione con liquidi in fase non acquosa (NAPL) come petrolio, benzina, creosoto, catrame, ecc., vengono spesso usate le bentoniti organofile, minerali argillosi che vengono trattati chimicamente per renderli oleofili e idrofobici. Invece di assorbire acqua, rigonfiano quando sono a contatto con NAPL (1 g di argilla organofila adsorbe mediamente circa 0,5 g di NAPL). Dopo la completa saturazione, la loro permeabilità è significativamente ridotta, il che riduce notevolmente la migrazione di ulteriori NAPL attraverso la sostanza attiva.

Gli inquinanti inorganici sono adsorbiti solo in piccola parte da sostanze organiche attive come il carbone attivo e pertanto per l'adsorbimento di metalli pesanti, devono essere usate sostanze attive aventi capacità di scambio cationico. Tali adsorbenti cationici si legano ai metalli disciolti nell'acqua, come arsenico,

piombo o cromo, rilasciando un catione e scambiandolo con il metallo. Un adsorbente naturale per i metalli pesanti è, per esempio, la zeolite. La quantità di inquinanti che vengono rimossi dipende da vari parametri del corpo idrico come, ad esempio, il valore di pH o la temperatura, che spesso influenzano la capacità di adsorbimento.

3. BONIFICA DEI SEDIMENTI NELLE ACQUE SUPERFICIALI

3.1. Siti contaminati nelle acque superficiali

Il successo di una bonifica di sedimenti richiede un'indagine completa del sito contaminato. In particolare, deve essere valutata la concentrazione di inquinanti al confine tra il sedimento e il corpo idrico (indicato come "fondo del corpo idrico" nella Figura 1). A questo scopo, vengono prelevati campioni di acqua e sedimenti, ma anche campioni di tessuti di organismi acquatici (tipicamente pesci) presenti in zona. Solo dopo aver analizzato questi dati, è possibile proseguire con la procedura e l'identificazione dell'intervento di bonifica.

Di seguito vengono analizzate tre diverse metodologie di intervento:

- Recupero naturale monitorato (MNR).
- Dragaggio dei sedimenti.
- Copertura attiva dei sedimenti.

Per la scelta del metodo di bonifica più adatto, bisogna valutare la tipologia e la concentrazione degli inquinanti. Se la concentrazione misurata è al di sotto di un valore limite ammissibile o se è prevedibile che il valore limite sarà raggiunto entro un certo periodo di tempo, la bonifica può essere lasciata ai processi naturali. La copertura dei sedimenti può essere applicata se la concentrazione sul fondo del corpo idrico può essere mantenuta al di sotto di un valore limite finché gli inquinanti sono resi innocui dai processi naturali. La concentrazione diminuisce a seguito della decomposizione degli inquinanti da parte dei batteri, a condizione che non si verifichi una nuova contaminazione. Se il rispetto del valore limite non può essere garantito con sufficiente certezza mediante un capping, ad oggi, la rimozione dei sedimenti è l'unica soluzione percorribile. Uno schema semplice per questo processo decisionale è mostrato nella Figura 1.

La sfida, o forse sarebbe meglio dire il coraggio, sarebbe quella di proporre il capping attivo anche in quest'ultima situazione, in cui la movimentazione e la gestione dei sedimenti off site risulti una soluzione più costosa e più rischiosa, facilitando così la biodisponibilità dei contaminanti. In altri termini il capping attivo potrebbe diventare l'equivalente della messa in sicurezza operativa che si applica nei siti a terra.

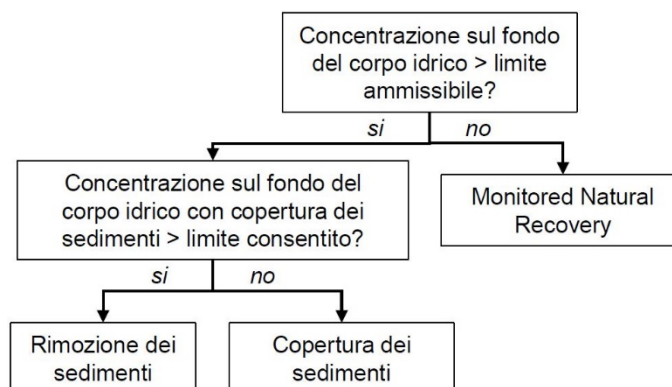


Figura 1. Procedura di risanamento in funzione della concentrazione di inquinanti.

Nei capitoli 3.2. e 3.3. vengono discussi i metodi di bonifica illustrati nella Figura 1.

3.2. Metodi convenzionali

3.2.1. Monitored Natural Recovery

La maggior parte degli inquinanti organici si decompone lentamente ma costantemente, mediante processi fisici, chimici e biologici naturali. Attraverso una Monitored Natural Recovery (MNR), la degradazione degli inquinanti è lasciata a questi processi naturali durante i quali gli inquinanti vengono trasformati, immobilizzati, isolati o distrutti. A questo scopo, i sedimenti contaminati sono lasciati sul posto durante la MNR e le concentrazioni degli inquinanti vengono continuamente monitorate. Il processo si basa sulla riduzione della biodisponibilità o della tossicità delle sostanze chimiche anche a seguito della deposizione di nuovi sedimenti non contaminati. In questa metodologia il monitoraggio della degradazione degli inquinanti è di fondamentale importanza, motivo per cui la concentrazione delle sostanze nell'acqua e nei recettori viene continuamente controllata; non vengono comunque effettuati ulteriori processi di bonifica a meno che la concentrazione non si trovi a superare un limite definito.

L'uso della MNR per la bonifica di sedimenti contaminati richiede una conoscenza approfondita delle fonti inquinanti e dei possibili recettori, ovvero dell'intero ecosistema. È inoltre necessario riuscire a garantire che le concentrazioni di inquinanti scendano sotto il valore limite entro uno specifico periodo di tempo. Se tutto ciò non viene garantito, la MNR non è la soluzione adatta come metodologia di bonifica. La modellazione numerica delle concentrazioni di inquinanti nei sedimenti e nei tessuti viventi sono quindi strumenti importanti per definire

obiettivi tempestivi e verificare l'efficacia del MNR (Suter et al. 2000).

3.2.2. Rimozione e disidratazione (dewatering) di sedimenti

Nel caso in cui la concentrazione di inquinanti sia particolarmente elevata, l'unica soluzione percorribile è la rimozione dei sedimenti. Per eliminare il pericolo per l'ambiente, i sedimenti inquinati vengono rimossi dal fondo del corpo idrico mediante draghe aspiranti (Wilke et al. 2011). I sedimenti così rimossi devono poi essere disidratati con processi meccanici, utilizzando filtropresse a camera, filtropresse a nastro o centrifughe.

Una valida alternativa a tali soluzioni è l'utilizzo di geotessili tubolari; il fango viene condizionato aggiungendo un flocculante e successivamente pompato nei tubi di grandi dimensioni, dove avviene la separazione tra fase solida e fase liquida. La struttura filtrante del geotessile assicura che la parte solida del fango venga trattenuta all'interno, mentre l'acqua viene lasciata uscire liberamente dal tubo. A seguito del processo di disidratazione, i sedimenti possono essere conferiti in discarica, portati in un termovalorizzatore o riutilizzati altrove, ad esempio come strato di ricoltivazione (Wilke 2012). Il funzionamento di questo processo è mostrato schematicamente nella figura 2.



Figura 2. Schema del processo di rimozione dei sedimenti e della loro disidratazione utilizzando geotessili tubolari.

3.3. Copertura (capping) di sedimenti

3.3.1. Metodo tradizionale di copertura di sedimenti

Il metodo tradizionale per la copertura di sedimenti inquinati prevede la posa di uno strato di materiale inerte non contaminato sul letto del corpo idrico contaminato. Viene di solito utilizzata la sabbia per questioni logistiche ed economiche anche se la sua capacità di isolamento chimico è piuttosto limitata.

Se la si paragonasse all'isolamento termico dell'involucro di un edificio, la copertura in sabbia potrebbe essere assimilata a uno spesso muro di pietra di un edificio storico, come mostrato nella Figura 3. La pietra ha una bassa capacità di isolamento termico e di conseguenza è necessario uno spessore elevato per ottenere un buon isolamento termico. Lo stesso vale per la sabbia nei confronti dell'isolamento chimico degli inquinanti. Uno strato di sabbia molto spesso è necessario per ridurre la concentrazione di inquinanti nell'acqua dei pori.

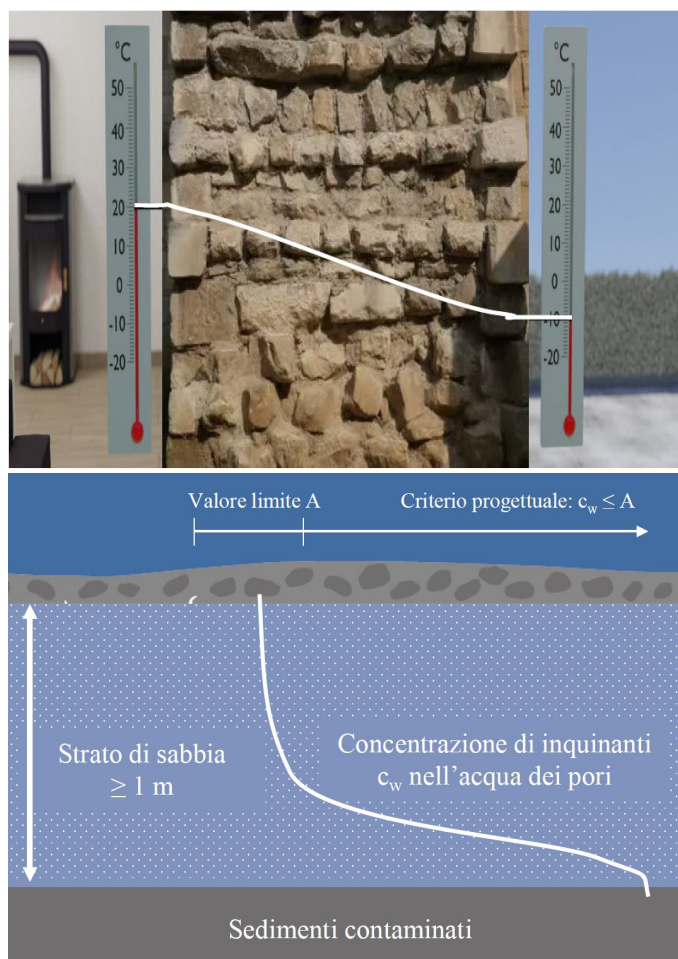


Figura 3. Strato di sabbia per l'isolamento di sedimenti contaminati.

Dallo schema della copertura di sedimenti nella figura 3 si può vedere che il raggiungimento del valore limite della concentrazione degli inquinanti viene

fissato ad un'altezza di circa il 40% dello spessore complessivo dello strato di sabbia.

Diverse influenze esterne nell'ambiente acquatico portano a incertezze durante le fasi di posa e nel corso dell'intera vita di una copertura di sedimenti con materiali sciolti: turbolenze dovute ai natanti o alle correnti oppure presenza di organismi bentonici (bioturbazione) sono causa di miscelazione degli strati superiori di una copertura di sabbia. Oltre a queste influenze che il capping subisce "dall'alto", ce ne sono altre che lo influenzano "dal basso": tra sedimenti puliti e inquinati può avvenire una miscelazione a causa, per esempio, dell'afflusso di acqua freatica, della formazione di gas nei sedimenti ricchi di materiale organico o dal consolidamento dei sedimenti. La miscelazione con i sedimenti inquinati si verifica anche durante le fasi di posa dello strato di sabbia.

La figura 4 illustra quale sia l'aumento di spessore necessario a causa di tutte le incertezze che possono essere presenti.

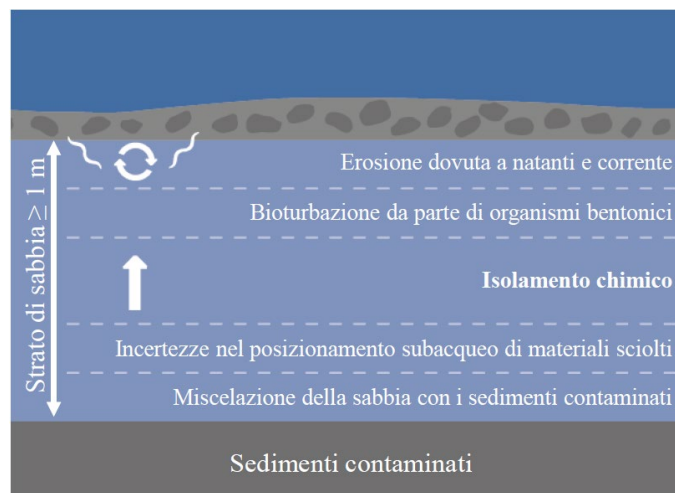


Figura 4. Incertezze sullo spessore di un capping tradizionale in sabbia (Reible ed Eek 2016).

Come si vede, solo una piccola parte dello spesso strato di sabbia è necessaria per l'isolamento chimico degli inquinanti: a tal proposito Reible ed Eek (2016) hanno dimostrato che le diverse influenze nell'ambiente acquatico fanno sì che lo spessore totale dello strato di un capping di sabbia debba essere significativamente superiore allo spessore dello strato effettivo di isolamento chimico. Una illustrazione esaustiva dei principi di calcolo di un capping in sabbia può essere trovata ad esempio in Reible (2014). Secondo Reible ed Eek (2016), lo spessore dello strato di sabbia (h_{cap}) risulta infine dalla somma di tutti gli spessori necessari

per contrastare le influenze esterne.

$$h_{\text{cap}} = h_{\text{erosione}} + h_{\text{bioturbazione}} + h_{\text{isolamento}} + h_{\text{incertezza di posa}} + h_{\text{miscelazione}}$$

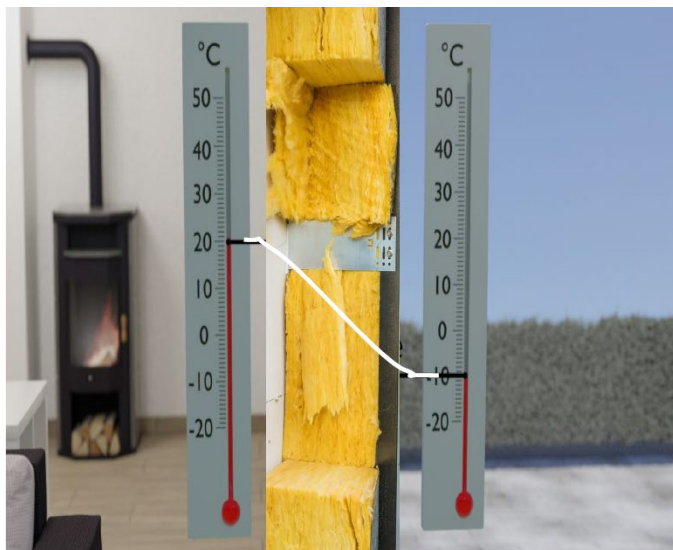
Le incertezze derivanti dalla miscelazione degli strati e dalla posa subacquea non sono relative solo al caso di un capping in sabbia ma sono presenti anche in caso di utilizzo di altri materiali sciolti. Se ad esempio si optasse per la posa di un materiale attivo granulare sciolto, dovrebbero essere presi in considerazione anche i relativi fattori di sicurezza: ad esempio nel caso di posa di carbone attivo la sua lentezza nel precipitare, combinata a eventuali correnti o pendenze del fondale, rendono particolarmente difficile la realizzazione di uno strato di spessore omogeneo.

I geotessili annullano questi effetti in quanto stabilizzano meccanicamente il mezzo adsorbente e garantiscono la realizzazione di uno strato di isolamento chimico di spessore costante, anche in caso di posa in pendenza.

3.3.2. Copertura di sedimenti con geocompositi attivi

Così come accade con l'applicazione di un capping tradizionale, anche nel caso di utilizzo di materiali attivi, l'obiettivo è quello di isolare gli inquinanti dall'acqua libera. In questo caso l'effetto di isolamento chimico è ottenuto grazie a processi di adsorbimento nel materiale attivo e non dallo spessore di uno strato di materiale inerte. La riduzione della concentrazione di inquinanti si ottiene quindi mediante una quantità di materiale significativamente inferiore rispetto alla sabbia.

Di conseguenza, la stessa prestazione isolante può essere ottenuta con uno strato molto più sottile, così come illustrato in figura 5.



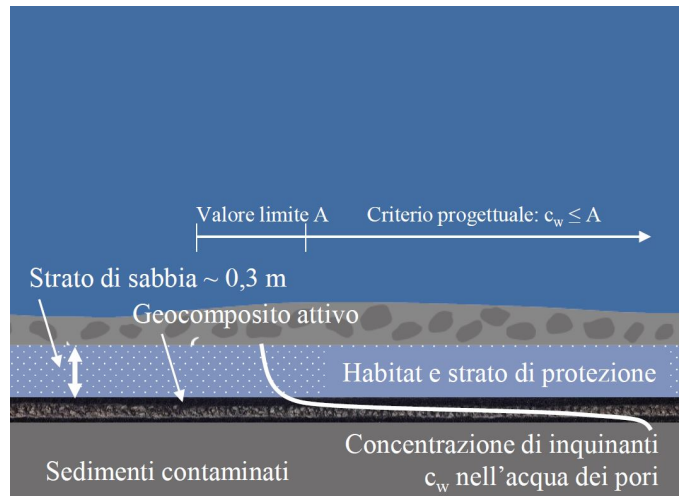


Figura 5. Capping attivo per l'isolamento di sedimenti contaminati.

Riproponendo l'analogia con l'isolamento termico degli edifici, le sostanze attive si comportano come un materiale isolante moderno. In entrambi i casi, materiali ad alte prestazioni hanno migliori proprietà di isolamento rispetto alle soluzioni tradizionali in sabbia o pietra. L'uso di materiali attivi porta quindi a un'ottimizzazione dell'isolamento chimico in termini di quantità di materiale richiesto. Questo fatto a sua volta ha dei vantaggi in termini di riduzione del consumo di risorse naturali, ma anche in termini di funzionalità del corpo idrico, come la profondità navigabile o il volume massimo invasabile durante gli eventi di piena.

I due geotessili del geocomposito attivo permettono di eliminare le varie incertezze sullo spessore che un capping tradizionale con materiale sciolto inevitabilmente porta con sé; la realizzazione di uno spessore costante e uniforme dello strato di isolamento chimico è garantita dalla presenza dei geotessili che inoltre impediscono la miscelazione tra sedimenti contaminati, materiale attivo e strato di sabbia.

A seconda delle specifiche esigenze progettuali e delle condizioni del sito, la posa dei geocompositi attivi può richiedere l'utilizzo di specifiche attrezzature o di sommozzatori. Fino a che i pori delle sostanze attive non sono saturi, i geocompositi hanno una densità inferiore a quella dell'acqua, ovvero galleggiano sulla superficie. Di conseguenza devono eventualmente essere utilizzate soluzioni specifiche per accelerare il processo di affondamento qualora le esigenze progettuali lo richiedano. Il progetto descritto di seguito propone una possibile soluzione.

Al di sopra dello strato di isolamento realizzato con il geocomposito attivo, è necessario uno strato di sabbia di spessore minimo 30 cm al fine di realizzare il nuovo letto incontaminato del corpo idrico e consentire l'insediamento di organismi bentonici. Tale strato di sabbia fornisce inoltre una protezione meccanica dello strato attivo da influenze esterne, come ad esempio le ancore delle imbarcazioni.

4. KENDALL BAY, SYDNEY, AUSTRALIA, 2020

Kendall Bay si trova a circa 10 km dal centro di Sydney, lungo il fiume Parramatta. Il fiume collega importanti aree industriali della città con l'Oceano Pacifico. Sulle sponde della baia ha operato un impianto di produzione di gas dal 1880 fino agli anni '80 del secolo scorso e a seguito della sua demolizione, sull'area è stato realizzato un moderno complesso residenziale. Il carbone e le altre materie prime venivano trasportate all'impianto via nave attraverso il fiume Parramatta e trasbordati nella baia.

Più di un secolo di funzionamento dell'impianto ha portato ad alti livelli di IPA e idrocarburi nei sedimenti. La Environmental Protection Agency dello stato del Nuovo Galles del Sud (EPA-NSW) ha quindi nel 2004 dichiarato l'area come un sito contaminato da bonificare.

Per la bonifica dei sedimenti, l'EPA-NSW ha diviso l'intera baia in diverse aree in base al livello di concentrazione degli inquinanti. Nelle aree con le concentrazioni più alte (fino a 120 mg/kg di IPA), la soluzione adottata ha previsto più fasi lavorative: come prima cosa è stata effettuata una stabilizzazione a cemento del terreno in profondità, è stata poi eseguita la rimozione dello strato superiore di terreno contaminato e infine realizzato un capping mediante il geocomposito attivo Tektoseal Active AC 3400 con un riempimento di 3,4 kg/m² di carbone attivo e uno strato di circa 30 cm di sabbia al di sopra.

I lavori sono stati eseguiti in prossimità della linea di costa e la zona di intervento è stata rinchiusa all'interno di palancole e barriere anti-inquinamento in geosintetici (silt-curtains), come mostrato nella figura 6.

La barriera anti-inquinamento ha impedito la potenziale diffusione di sedimenti inquinati nella baia durante le fasi realizzative.



Figura 6. Vista dall'alto del sito di Kendall Bay.

I geocompositi attivi sono stati fissati alla linea di costa con un ballast e srotolati da un apposito dispositivo installato su un pontone galleggiante. Per assicurare l'affondamento controllato e lo zavorramento del geocomposito è stato utilizzato uno speciale telaio senza fondo; una gru lo ha posizionato direttamente sul geocomposito e lo ha spinto sotto la superficie dell'acqua, così come mostrato nella Figura 7. Il telaio ha potuto poi essere riempito di sabbia usando un escavatore a braccio lungo, consentendo un posizionamento facile ma controllato dello strato di sabbia.



Figura 7. Posa del geocomposito attivo.

Capping di sedimenti contaminati con geocompositi attivi

I rotoli lunghi 45,00 m e larghi 5,10 m sono stati posati con una sovrapposizione laterale di 0,50 m, come mostrato nella Figura 8. In questo modo è stato possibile posare sull'intera area uno strato uniforme e costante di isolamento chimico. L'area interessata era di circa 5.000 m² e il lavoro è stato eseguito in cinque settimane da luglio ad agosto 2020. La facilità e la velocità di posa è stata confermata da tutte le aziende coinvolte nel progetto.

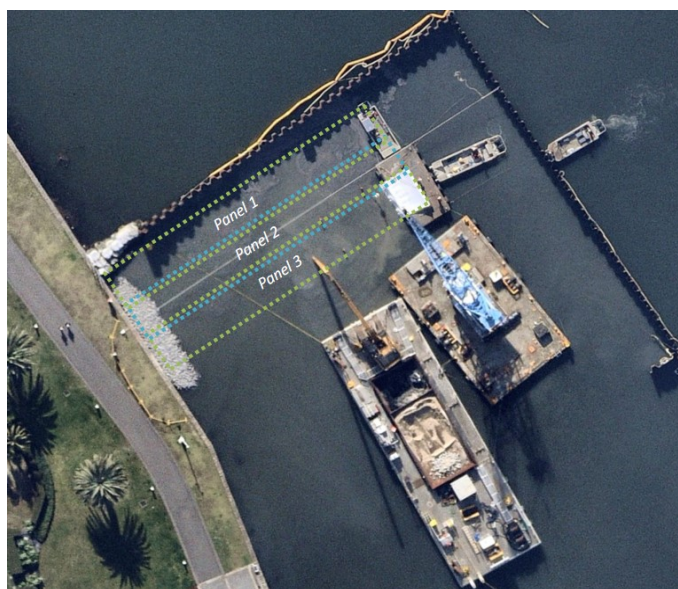


Figura 8. Installazione dei vari pannelli di geocomposito attivo.

Questo delicato progetto dimostra che i sedimenti contaminati non devono essere per forza rimossi e smaltiti. La copertura attiva dei sedimenti mantiene isolate le sostanze inquinanti in modo sicuro fino a quando non vengono naturalmente degradate dai processi chimici e biologici.

5. CONCLUSIONI

Il capping attivo dei sedimenti è un metodo moderno per la bonifica dei sedimenti inquinati che è stato implementato con successo in Nord America, in Scandinavia e in altri paesi del mondo. È stato dimostrato che fornisce una protezione immediata per gli organismi bentonici e acquatici contro le sostanze inquinanti e, impedendo ad esse di entrare nella catena alimentare, contribuisce attivamente alla protezione non solo dell'ambiente ma anche degli esseri umani. Le misurazioni

della concentrazione di inquinanti nei pesci mostrano che una riduzione degli inquinanti assorbiti nella struttura cellulare degli animali avviene immediatamente dopo la posa della copertura dei sedimenti. Il dragaggio dei sedimenti può portare a una mobilitazione temporanea degli inquinanti nel corpo idrico e una possibile conseguenza di ciò è l'aumento della concentrazione di contaminanti all'interno dei tessuti dei pesci, come si può vedere nella Figura 9 (Patmont et al. 2014).

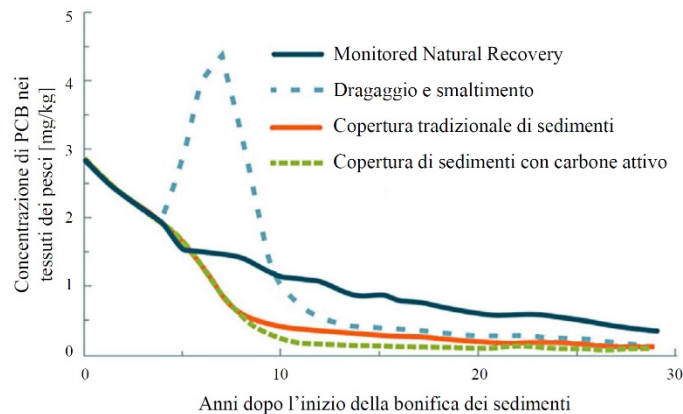


Figura 8. Concentrazione di inquinanti nei tessuti dei pesci con diversi metodi.

Il capping attivo dei sedimenti non solo contribuisce a un miglioramento a breve termine della contaminazione, ma ha anche un'elevata efficienza per quanto riguarda gli effetti a lungo termine. La determinazione precisa degli inquinanti così come le informazioni sulle loro concentrazioni e l'afflusso delle acque sotterranee sono dati di fondamentale importanza al fine di pianificare un intervento di successo a lungo termine.

Uno svantaggio di questa metodologia di intervento è la sua novità nell'area europea. La mancanza di linee guida e normative o regolamenti tecnici europei rende più complessa la pianificazione e l'approvazione degli interventi. Una possibile soluzione per superare questa difficoltà è fare riferimento a raccomandazioni estere (come Eggen et al. (2017) per la Norvegia) oppure a normative estere (Stati Uniti, dove sono già in vigore normative di settore - Palermo et al. 1998). Soprattutto nel caso di recupero di ex aree industriali situate lungo le coste (sia acque interne che a mare) sono però necessari nuovi approcci per una bonifica sostenibile anche dei siti contaminati all'interno di corpi idrici.

Il capping attivo dei sedimenti, grazie alla sua sostenibilità e ai più recenti sviluppi tecnici, rappresenta certamente una valida soluzione.

BIBLIOGRAFIA

- Ardone, V.A.; Simini, A. (2021). *Copertura di sedimenti contaminati con geocompositi attivi*, Atti del XXXI Convegno Nazionale Geosintetici, Bari.
- Eggen, T.; Myhre, L.P.; Amundsen, C.E. et al. (2017). *Test program for capping materials – Contaminated seabed*, M-411, Norwegian Environment Agency, Trondheim.
- Egloffstein, T. (2014). *Entwicklung der geosynthetischen Tondichtungsbahn über die DIBt-Zulassung zum LAGA Eignungsnachweis*, 30. Fachtagung „Die sichere Deponie – Geokunststoffe im Umweltschutz“, Berlin.
- Förster, U. (2013). *Von der Greiferprobe bis zur In-situ-Sanierung - 50 Jahre Forschung an kontaminierten Gewässersedimenten*, in: Vom Wasser 111 (3), 67-114.
- Palermo, M. R.; Maynard, S.; Miller, J.; Reible, D. D. (1998). *Assessment and Remediation of contaminated sediments (ARCS) Program – Guidance for in-situ subaqueous capping of contaminated sediments*, United States Environmental Protection Agency, Great Lakes National Program Office, Chicago.
- Patmont, C.R.; Ghosh, U.; LaRosa, P.; et al. (2014). *In Situ Sediment Treatment Using Activated Carbon: A Demonstrated Sediment Cleanup Technology*. in: *Integrated Environmental Assessment and Management* 11(2), 195–207.
- Suter, G. W.; Efroymson, R. A.; Sample, B. E.; Jones, D. S. (2000). *Ecological Risk Assessment for Contaminated Sites*, First edition. CRC Press, Boca Raton.
- Reible, D. D. (2014). *Processes, Assessment and Remediation of Contaminated Sediments. SERDP and ESTCP Remediation Technology Monograph Series*, Springer Science and Business Media, New York.
- Reible, D. D.; Eek, E. (2016). *Capping Design – Short Course, Part 2, Ninth International Conference on Remediation and Management of Contaminated Sediments*, January 9-12, 2017, New Orleans, Louisiana.
- Rollin, A., Mlynarek, J., Cazzuffi, D. (1998). *Geosynthetic clay liners: European, Canadian and American landfill regulations*, Proceedings of the International Conference "Geo-Bento 98", Paris, 194-221.
- Wilke, M.; Adameit, J.; Cantré, S. (2011). *Mobile Baggergut-Entwässerung mit geotextilen Schläuchen – Verdener Großversuch*. in: Ziegler, M. (Hrsg.): 12. Informations- und Vortragstagung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, 03.03.2011, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Gutenbergstraße 43, 45128 Essen.
- Wilke, M. (2012). *Geotextile Container und Schläuche zur Entwässerung von Schlammern: Funktionsprinzip – Abdichtungsmaßnahmen* -

Capping di sedimenti contaminati con geocompositi attivi

Anwendungsmöglichkeiten. in: 22. Karlsruher Deponie und Altlastenseminar 2012 „Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten“, Arbeitskreis Grundwasserschutz e.V. (AK GWS) Überwachungsgemeinschaft Bauen für den Umweltschutz e.V., 17./18.10.2012, Karlsruhe.