



**MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO**  
**DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE**  
**UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI**

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102008901662578
Data Deposito	26/09/2008
Data Pubblicazione	26/03/2010

Classifiche IPC

Titolo

BIODRENI PER LA BONIFICA DI SITI CONTAMINATI REALIZZATI CON FIBRE NATURALI  
LIBERIANE AD ELEVATO SVILUPPO SUPERFICIALE

## **BIODRENI PER LA BONIFICA DI SITI CONTAMINATI REALIZZATI CON FIBRE NATURALI LIBERIANE AD ELEVATO SVILUPPO SUPERFICIALE**

### **Campo della tecnica**

L'invenzione consiste in un biodreno, costituito da fibre naturali liberiane ad elevato sviluppo superficiale, ovvero con diametro preferibilmente inferiore a 20 micron, utilizzato nelle barriere permeabili reattive (PRB) per la bonifica di siti contaminati. Rientra pertanto nel campo delle tecnologie di bonifica *in situ* di acque di falda contaminate.

### **Stato dell'arte**

#### La bonifica dei siti

Esistono diverse tecnologie per la bonifica *in situ* di acque di falda contaminate, alcune tradizionali, altre più innovative, applicabili in base al tipo di inquinante obiettivo del trattamento.

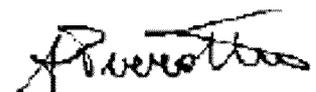
In molte zone industriali in Europa il collocamento inadeguato di rifiuti, infiltrazioni e danni bellici hanno portato alla contaminazione della superficie del terreno e delle falde con vari tipi di contaminanti. Numerosi contaminanti sono molto persistenti sulla superficie ambientale, ciò significa che restano ancora presenti in alte concentrazioni anche dopo decine di anni dal momento in cui si è effettivamente verificata la contaminazione.

Una bonifica rapida di tali zone contaminate è possibile solo con estrazione e trattamento del suolo contaminato. Questo però vale solo per zone poco profonde ed è poco conveniente a causa degli alti costi di smaltimento e di trattamento del materiale contaminato. E' inoltre necessario conoscere nei dettagli la localizzazione e l'estensione della superficie contaminata, il che non è sempre possibile se si tratta di siti industriali estesi e abbandonati.

Diversamente rispetto alle tecnologie "attive", la cui principale attenzione va alla fonte della contaminazione, quelle passive sono caratterizzate da un basso o addirittura virtuale impiego di energia durante le misure di bonifica. Questo è realizzabile con la tecnica delle barriere permeabili reattive.

#### Le Barriere Permeabili Reattive (PRB)

Le PRB (Permeable Reactive Barrier) costituiscono una tecnologia di bonifica innovativa che ha generato, negli ultimi anni, un notevole interesse. Il principio su cui si basano è relativamente



semplice: del materiale reattivo viene posto all'interno del sistema acquifero, in modo da essere attraversato dall'acqua contaminata che si muove per effetto del gradiente naturale. L'azione della barriera permeabile consente di degradare il contaminante nella fase di attraversamento. Sono diverse le possibili configurazioni di una barriera reattiva, ma l'installazione più comune consiste nell'escavazione di una trincea riempita con un materiale granulare permeabile.

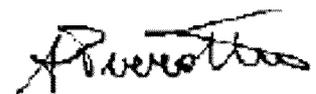
Le PRB costituiscono di fatto dei sistemi passivi di trattamento, che possono rimanere *in situ* operativi per anni con dei costi di gestione molto limitati. In tutte le soluzioni progettuali è necessario che la permeabilità del materiale reattivo non sia inferiore alla permeabilità dell'acquifero, onde evitare la diversione delle linee di flusso attorno alla barriera permeabile. Le barriere permeabili continue hanno un impatto relativamente modesto sul flusso delle acque di falda (Frega G., Troisi S., Straface S. (2004). "Idraulica Ambientale". Collana Universitas, Ed. Librare, San Giovanni in Fiore (CS)).

Nella zona di trattamento si realizzano processi che rimuovono, distruggono o attenuano la migrazione dei contaminanti dalla sorgente; questi possono essere:

- reazioni chimiche;
- separazione fisica;
- degradazione biologica;
- adsorbimento.

I principali vantaggi delle barriere permeabili reattive possono essere riassunti nei seguenti concetti:

- assenza di sistemi di pompaggio delle acque sotterranee e dei loro impianti di trattamento;
- assenza di impianti e attrezzature in superficie: il cantiere di bonifica si può pressoché ritenere terminato una volta che è stata completata la barriera;
- il materiale reagente conserva una resa di degradazione che è sufficiente nella maggior parte dei casi a garantire il trattamento per parecchi anni;
- intervento ambientalmente compatibile;
- costi di manutenzione e di esercizio contenuti e pressoché limitati ai costi di monitoraggio;
- la contaminazione rimane confinata nel sottosuolo senza che via sia contatto con altre matrici ambientali;
- assenza di materiali di scarto o di rifiuti da smaltire, se non i terreni contaminati dello scavo necessario per la realizzazione della trincea;
- nessun pericolo di miscelazione di acqua contaminata con acqua non contaminata;
- si basa su principi chimici, fisici e biologici ormai profondamente noti; pertanto, nonostante non si possa considerare ancora una tecnologia convenzionale, i rischi di insuccesso sono molto ridotti se viene correttamente progettata.



I materiali maggiormente utilizzati come riempimento di una PRB, sono: metalli zero valenti, ferro granulare con agenti correttivi, carboni attivi, zeoliti, sistemi bimetallici, ditionite di sodio, barriere di precipitazione, metalli innovativi, fibre naturali. In figura 1 è rappresentato un esempio di barriera permeabile reattiva.

Da un'analisi accurata della letteratura disponibile sono emerse una serie di informazioni circa le caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche delle fibre naturali, di seguito riportate.

Uno studio condotto da Beom-Goo Lee e R. M. Rowel (Beom-Goo Lee and Roger M. Rowell. (2004). *“Removal of heavy metal ions from aqueous solutions using lignocellulosic fibers”*. Journal of Natural Fibers, Vol. 1(1) 2004, 97-108), ha indagato la capacità di adsorbimento di alcune fibre lignocellulosiche nei confronti di metalli pesanti presenti in soluzione acquosa. Le fibre oggetto dello studio sono state: kenaf (*Hibiscus Cannabinus*), canna da zucchero, cotone, noce di cocco e abete. I metalli pesanti considerati sono stati: rame, nichel e zinco. Da tale ricerca è emerso che tutte le fibre analizzate contenevano, in quantitativi diversi, lignina e che tutte manifestavano una certa capacità di adsorbimento nei confronti degli ioni metallici considerati. La fibra con il più alto grado di adsorbimento è risultata il kenaf, che tuttavia possiede un basso contenuto di lignina; da ciò, e dai risulti ottenuti rappresentati nel grafico di figura 3, si deduce che la lignina svolge un ruolo chiave nel processo di adsorbimento dei metalli pesanti, ma che tale adsorbimento non è correlabile al contenuto di lignina.

D'altra parte anche l'esperienza condotta da M. B. Šćiban e M. T. Klašnja (Šćiban Marina B. and Mile T. Klašnja. (2003). *“Removal of Heavy Metals from Wastewaters by Adsorption onto Wood Sawdust”*. CEJOEM, Vol. 9. No.4.: 337–343), riguardante l'adsorbimento tra segatura di pioppo e di abete con i metalli pesanti, cadmio e rame, fece dedurre che la maggior parte dei siti di legame, responsabili dell'adsorbimento dei cationi metallici, fosse localizzata nella lignina.

Si ritiene che tali siti di legame siano i gruppi ossidrilici ( $\text{OH}^-$ ) presenti all'interno della struttura della lignina. L'adsorbimento dei metalli sulla lignina dipende sia dal tempo di contatto che dalla concentrazione di ioni metallici in soluzione (Acemioglu B. and M. H. Alma (2001). *“Equilibrium studies on the adsorption of Cu(II) from aqueous solution onto cellulose”*. Colloid Interf. Sci., 243:81).

Molti altri studi riguardanti l'interazione tra metalli pesanti e fibre naturali, hanno confermato come la lignina, contenuta in tali fibre, svolga un ruolo importante nel processo di adsorbimento dei cationi metallici.

Diversi documenti brevettuali riguardano l'utilizzo di fibra vegetale nella bonifica di acque contaminate si citano in particolare il brevetto JP11104698 che descrive un metodo per il

trattamento di acque contaminate che prevede l'uso di fibre naturali come barriera reattiva, ossia una bio-membrana,; il brevetto JP2268889 che riguarda una colonna costituita da fibra vegetale impacchettata finalizzata al trattamento di acque contaminate in funzione del contatto della acqua con la barriera; il brevetto JP2007098195 in cui è descritta la capacità e l'efficienza delle fibre naturali di trattenere contaminanti in funzione del contatto.

Tuttavia nessuno dei biodreni descritti nei documenti citati utilizza esclusivamente fibre naturali liberiane trattate con metodo chimico-fisico in cui viene separata tutta la parte fibrosa dalla cuticola esterna e una porzione della parte legnosa interna, lasciando una quantità di lignina compreso tra il 3 e il 15% come descritto nell'idea proposta.

## **Descrizione**

### La metodologia proposta

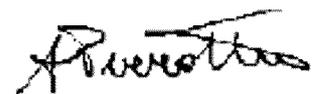
L'invenzione quindi, con riferimento alla tecnologia delle PRB, sia attive che passive, consiste nella realizzazione di "biodreni" in fibre naturali ad elevato sviluppo superficiale da impiegare nella bonifica delle acque di falda contaminate. Tali biodreni possono essere utilizzati sia in PRB passive, ovvero barriere permeabili reattive che intercettano il contaminante senza modificarne il percorso, sia in PRB attive, ovvero barriere permeabili reattive che, forzando il moto della falda tramite emungimento in modo da costringere il contaminante ad attraversare le PRB, lo catturano.

Tale ultima situazione può risultare particolarmente conveniente nel caso in cui il sito contaminato da bonificare presenti degli Hot-Spot, ovvero delle zone in cui le concentrazioni sono molto elevate rispetto al resto del sito; infatti, in tal caso una strategia di bonifica cost-effective potrebbe essere quella di inserire nel baricentro degli Hot-Spot delle PRB anulari attive, con al centro un pozzo, emungendo dal quale si possa indurre moto radiale dell'acqua di falda verso il pozzo stesso, con attraversamento della barriera e cattura del contaminante.

L'acqua depurata dalla PRB anulare attiva, nel rispetto dei limiti imposti dalla normativa dello stato in cui si opera, può essere scaricata in un qualsiasi corpo idrico ricettore. Qualora i suddetti limiti non fossero rispettati si potrebbe imporre un riciclo dell'acqua stessa, reimmettendola a monte, ossia al di fuori del cilindro della barriera, in modo da farle riattraversare nuovamente tale filtro.

Nella figura 2 si descrive lo schema della PRB anulare attiva con biodreni.

In particolare i "biodreni" sono costituiti da fibre vegetali (cellulosiche), contenute nei vasi liberiani di piante a rapido ciclo riproduttivo, estratte mediante processi chimico e/o fisici tali da garantire u



elevato sviluppo superficiale delle fibre, ovvero un diametro delle fibrille preferibilmente inferiori a 20 micron.

In generale l'estrazione delle fibre cellulosiche dalle piante liberiane (lino, canapa, ginestra, kenaf, juta, ecc.) presenta notevoli difficoltà per il fatto che i fasci fibrosi sono tenacemente saldati ai tessuti corticali esterni e sono d'altra parte strettamente interconnessi tra loro (Chidichimo G., Gabriele B., Salerno G., Alampi C., Cerchiara T., Vetere M.. *"Processo chimico-fisico per la produzione di fibre vegetali"*. Brevetto depositato dall'Università della Calabria. CZ2006A00006 del 06/03/2006).

L'estrazione della fibra cellulosica implica pertanto:

- la separazione della cuticola esterna;
- il distacco delle fibre dalla parte legnosa interna;
- la purificazione della fibra da una serie di sostanze incrostanti.

Le principali sostanze presenti nelle piante liberiane sono le cellulose e le sostanze incrostanti quali: sostanze pectiche, lignine, sostanze resinose, cutina e amido (Chidichimo G., Gabriele B., Salerno G., Alampi C., Cerchiara T., Vetere M.. *"Processo chimico-fisico per la produzione di fibre vegetali"*. Brevetto depositato dall'Università della Calabria. CZ2006A00006 del 06/03/2006).

Il processo da utilizzare per ottenere la fibra liberiana, essenzialmente abbina ad uno stadio chimico, nel quale la parte fibrosa viene separata sia dalla cuticola esterna sia dalla parte legnosa interna, un successivo stadio fisico capace di separare le singole fibre.

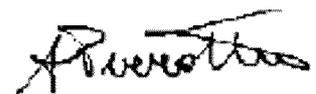
La fibra così ottenuta, "impacchettata" in pannelli modulari o utilizzata in maniera "sfusa", può essere introdotta nelle trincee opportunamente scavate nel terreno da bonificare, costituendo così il materiale reattivo della PRB. La sua azione consiste in una reazione di tipo chimico-fisico con il contaminante trasportato dall'acqua sotterranea, determinando così la bonifica della falda.

#### Aspetti chimico-fisici e meccanici della fibra naturale

La lignina è un polimero naturale la cui struttura, molto complessa, presenta ramificazioni tridimensionali e numerosi gruppi ossidrilici. Tale struttura non è ancora del tutto definita e ci sono numerosi modelli che la descrivono. Si è anche ipotizzato che la lignina possa assumere strutture diverse a secondo della posizione che occupa all'interno della fibra. Nella figura 4 viene riportato un modello indicativo della struttura della lignina.

In particolare, da studi condotti sulla fibra di ginestra (*spartium junceum*) è risultato che tale fibra è costituita da fibre elementari, legate tra di loro mediante lignina in fasci fibrosi con diametro di circa 50 µm.

Le fibre elementari hanno generalmente lunghezza variabile tra 5 e 20 mm, mentre il fascio fibroso presenta lunghezze comprese tra 75 e 90 cm, ed un peso specifico di 1,45 g/cm<sup>3</sup>.



La fibra elementare di ginestra è paragonabile per lunghezza e diametro alle fibre elementari di canapa, lino e dei cotone indiani, è più corta degli altri tipi di cotone, più lunga e più sottile della iuta.

Uno studio effettuato sulla fibra di ginestra (Cerchiara T., Chidichimo G., Gallucci M. C., Vetere M. “*Morphology and properties of natural cellulose fibers from Spanish Broom (Spartium junceum L.)*” NanoItalTex 2007 , Milano, 21-22 novembre 2007), ottenuta dalle vermene mediante processo chimico-fisico, ha evidenziato che la superficie delle fibre di ginestra si presenta libera da sostanze pectiche, liscia e con le scanalature tipiche delle fibre naturali; il diametro delle fibre varia tra 4-12  $\mu\text{m}$  (Figure 5 e 6). Le fibre comunque continuano a mantenere una percentuale di lignina dell'ordine del 3-5%.

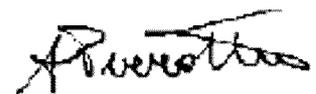
Alla luce di tutte queste informazioni, il ricorso alle fibre naturali, estratte dalle piante liberiane mediante processi chimico-fisici che garantiscono un elevato sviluppo superficiale, per la costituzione del materiale reattivo (biodreni) nelle barriere permeabili reattive è scaturito dalle seguenti motivazioni:

- le fibre naturali liberiane contengono lignina e questa in qualche modo determina un adsorbimento di inquinanti (quali i metalli pesanti);
- il processo chimico-fisico per l'estrazione della fibra dalle piante liberiane risulta essere il migliore in assoluto, sia per le caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche della fibra ottenuta (superiori a quelle di fibre ottenute da qualsiasi altro metodo di estrazione), sia per l'economicità del metodo in se stesso.

In particolare, le fibre naturali, estratte con processo chimico-fisico, hanno uno spessore dell'ordine di pochi micron, e ciò ne fa aumentare notevolmente la superficie di reazione per l'abbattimento degli inquinanti (rispetto alle fibre estratte con altri metodi). Inoltre, le buone proprietà meccaniche delle fibre ne rendono possibile l'impiego nella realizzazione di dreni da inserire nel sottosuolo (la resistenza della fibra aumenta allo stato umido e immersa in acqua non si altera né perde le sue caratteristiche). Infine, il ricorso alla fibra naturale è giustificato da una riduzione dei costi, dovuti all'economicità del materiale (rispetto ai materiali classici utilizzati nelle PRB) e all'assenza del recupero della barriera in quanto degradabile nel lungo periodo.

Sulla base di queste informazioni, sono state effettuate una serie di prove di laboratorio allo scopo di verificare l'efficienza depurativa della fibra naturale ad elevato sviluppo superficiale nei confronti degli inquinanti.

Di seguito si riportano i risultati sperimentali di due prove di laboratorio effettuate su colonna. La prima effettuata con vermene di ginestra semplicemente lavata ed essiccata. La seconda con fibra di



ginestra estratta mediante il particolare processo chimico-fisico “DICODE” (Domanda di brevetto N. IT-CZ2006A0006 UNICAL-CRF Progetto di Ricerca). Dall’analisi dei risultati, in particolare dal confronto tra le due prove, si evince come l’incremento di efficienza, in termini di abbattimento dell’inquinante che si ha nel passare dalla prima alla seconda prova, è tale da giustificare l’utilizzo della fibra ad elevato sviluppo superficiale piuttosto che della fibra a basso sviluppo superficiale con diametri dell’ordine di centinaia di micron.

#### Prove in colonna

Le prove in colonna consentono di determinare i parametri di processo in condizioni dinamiche di flusso e perciò in maniera realistica; inoltre, mediante tali prove si è inteso caratterizzare idraulicamente il dreno in fibra, ossia individuarne struttura e tessitura tali da garantire il deflusso dell’acqua sotterranea contaminata e un tempo di contatto adeguato allo svolgimento dei processi di trattenimento e degradazione del contaminante.

Sostanzialmente le prove con l’inquinante sono consistite nel lasciare attraversare una colonna in plexiglas, lunga 60 cm e riempita di ginestra, da una soluzione di inquinante a concentrazione nota di metalli pesanti (in particolare cadmio, piombo e zinco) e misurare in uscita le relative concentrazioni. Si è potuto in tal modo stimare un grado di abbattimento dell’inquinante.

In una prima prova è stata utilizzata ginestra sottoposta solo a lavaggio ed essiccazione, ma non completamente privata della parte legnosa. Mentre l’inquinante in ingresso era costituito da una soluzione contenente i metalli pesanti cadmio, piombo e zinco nelle seguenti concentrazioni:

Cd = 150 µg/l

Pb = 340 µg/l

Zn = 72800 µg/l

tali concentrazioni superano per più di 20 volte i limiti stabiliti dal D.M. 471/99 (Decreto Ministeriale del 25 ottobre 1999, n. 471. “Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati”).

Nella seguente tabella sono mostrati i risultati delle analisi effettuate. Per ogni campione vengono indicate le concentrazioni relative ai 3 metalli pesanti indagati.

Campione	Cd (µg/l)	Pb (µg/l)	Zn (µg/l)	
I1	150	340	72800	Ingresso
U1	5	220	9740	Uscita

Tabella 1 – Concentrazioni dei metalli pesanti nei campioni prelevati (prima prova).

Da una prima sommaria analisi di tali risultati si può evincere come nel passare dal campione in ingresso a quello in uscita ci sia stata in generale una buona percentuale di abbattimento di inquinante, soprattutto per il cadmio e lo zinco. In particolare per i tre metalli in questione la suddetta percentuale assume i valori:

$$\text{Cd} = 96,7\% \qquad \text{Pb} = 35,2\% \qquad \text{Zn} = 86,6\%$$

In una seconda prova si è utilizzata, invece, la fibra di ginestra estratta con processo chimico-fisico DICODE ed una soluzione di inquinante con le seguenti concentrazioni relative ai tre metalli:

$$\text{Cd} = 102 \mu\text{g/l} \qquad \text{Pb} = 163 \mu\text{g/l} \qquad \text{Zn} = 53400 \mu\text{g/l}$$

tali concentrazioni superano per circa 20 volte i limiti stabiliti dal già citato D.M. 471/99 (Decreto Ministeriale del 25 ottobre 1999, n. 471. "Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati").

Nella seguente tabella sono mostrati i risultati delle analisi effettuate.

Campione	Cd ( $\mu\text{g/l}$ )	Pb ( $\mu\text{g/l}$ )	Zn ( $\mu\text{g/l}$ )	
I1	102	163	53400	Ingresso
U1	1	1	708	Uscita

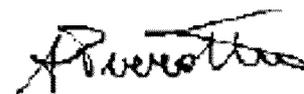
Tabella 2 – Concentrazioni dei metalli pesanti nei campioni prelevati (seconda prova).

Le percentuali di abbattimento in questa seconda prova, nel passare dal campione in ingresso a quello in uscita, si sono rivelate abbastanza buone per tutti e tre i metalli pesanti, ottenendo una eliminazione quasi completa dell'inquinante. Ovvero:

$$\text{Cd} = 99,0\% \qquad \text{Pb} = 99,4\% \qquad \text{Zn} = 98,7\%$$

### Conclusioni

Nel passare dalla ginestra semplicemente lavata ed essiccata (prima prova) alla fibra di ginestra ottenuta con processo chimico-fisico DICODE (seconda prova), si è avuto un buon incremento di efficienza in termini di abbattimento dell'inquinante; infatti l'eliminazione dell'inquinante nella seconda prova è risultata quasi completa. Tale miglioramento, quindi, conferma appieno le ottime caratteristiche in termini di efficienza depurativa della fibra oggetto della presente invenzione e ne



giustifica l'utilizzo come biodreno nelle barriere permeabili reattive (PRB) per la bonifica di siti inquinati.

### **Esempi di realizzazione di una barriera permeabile reattiva**

#### Esempio 1

Il sito contaminato da bonificare è stato riprodotto in laboratorio, all'interno di un vascone con pareti di cemento armato, di larghezza 7 m, lunghezza 12 m e altezza 3 m (fig. 7), con possibilità di drenaggio e campionamento in uscita. All'interno di tale vascone è stato posto del materiale sabbioso con le seguenti caratteristiche granulometriche: 75% di sabbia, 20% di limo e 5% di argilla. Successivamente è stata scavata una trincea in cui alloggiare il biodreno, in direzione normale alla direzione di flusso imposta e in maniera tale da intercettare interamente il flusso idrico; la larghezza di tale trincea è stata posta pari a 50 cm, in modo che il biodreno non apporti alterazioni alla conducibilità del terreno. All'interno della trincea è stata immessa fibra vegetale di ginestra, sottoposta preliminarmente a opportuno lavaggio, essiccazione e trattamento chimico-fisico tale da separare la parte fibrosa dalla cuticola esterna e dalla parte legnosa interna e ottenere le singole fibre naturali, che presentano uno spessore inferiore a 20 micron, facendone aumentare notevolmente la superficie di reazione per l'abbattimento degli inquinanti. La massa vegetale è stata immessa in trincea in maniera sfusa, con un grado di compattazione tale da non alterare il valore della conducibilità idraulica del terreno, ossia pari a circa  $10^{-5}$  m/s.

Nella figura 8 è rappresentato uno schema in pianta in cui si vede da un lato il "plume" di inquinante che attraversa la barriera, e dall'altro l'acqua di falda che ne viene fuori depurata.

Gli inquinanti immessi in ingresso sono stati i metalli pesanti cadmio, piombo e zinco nelle seguenti concentrazioni:

Cd = 137 µg/l

Pb = 283 µg/l

Zn = 63200 µg/l

che superano per più di 20 volte i limiti stabiliti dal D.M. 471/99 (Decreto Ministeriale del 25 ottobre 1999, n. 471. "Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati").

Le concentrazioni rilevate in uscita, a valle del biodreno rispetto alla direzione del flusso sono state le seguenti:

Cd = 2 µg/l

Pb = 5 µg/l

Zn = 980 µg/l

con una percentuali di abbattimento pari a:

$$\text{Cd} = 98,5\% \quad \text{Pb} = 98,2\% \quad \text{Zn} = 98,4\%$$

### Esempio 2

Il tutto come nell'esempio 1, ma con la massa vegetale costituente il biodreno costituita da juta sottoposta a trattamento chimico-fisico tale da ottenere fibre vegetali della dimensione inferiore a 20  $\mu\text{m}$ .

Le percentuali di abbattimento sono state pari a:

$$\text{Cd} = 98,1\% \quad \text{Pb} = 98,0\% \quad \text{Zn} = 98,4\%$$

### Esempio 3

Il tutto come nell'esempio 1, ma con la massa vegetale costituente il biodreno costituita da cotone sottoposta a trattamento chimico-fisico tale da ottenere fibre vegetali della dimensione inferiore a 20  $\mu\text{m}$ .

Le percentuali di abbattimento sono state pari a:

$$\text{Cd} = 99,1\% \quad \text{Pb} = 98,4\% \quad \text{Zn} = 98,8\%$$

### Esempio 4

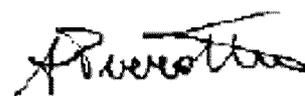
Il tutto come nell'esempio 1, ma con la massa vegetale costituente il biodreno costituita da lino sottoposta a trattamento chimico-fisico tale da ottenere fibre vegetali della dimensione inferiore a 20  $\mu\text{m}$ .

Le percentuali di abbattimento sono state pari a:

$$\text{Cd} = 98,9\% \quad \text{Pb} = 98,1\% \quad \text{Zn} = 97,9\%$$

### Esempio 5

Lo scavo è stato realizzato con le stesse modalità dell'esempio 1; anche le fibre vegetali del biodreno sono state prodotte come nell'esempio 1. Successivamente queste sono state impaccettate in moduli prismatici di dimensioni 15 cm x 30 cm x 50 cm e grado di compattazione tale da non



alterare il valore della conducibilità idraulica del terreno (circa  $10^{-5}$  m/s) e immessi nella trincea fino a completo riempimento.

Le percentuali di abbattimento sono state pari a:

$$\text{Cd} = 99,3\% \quad \text{Pb} = 97,9\% \quad \text{Zn} = 98,1\%$$

#### Esempio 6

Lo scavo è stato realizzato con le stesse modalità dell'esempio 1; anche le fibre vegetali sono state prodotte come nell'esempio 1. Successivamente queste sono state lavorate in modo tale da ottenere dei pannelli di fibra presentante ciascuno uno spessore minimo di 10 cm e conducibilità idraulica pari a quella del terreno; n. 5 di questi pannelli sono stati affiancati l'un l'altro modularmente, in modo tale da coprire l'intero fronte dello scavo.

Le percentuali di abbattimento sono state pari a:

$$\text{Cd} = 99,3\% \quad \text{Pb} = 98,1\% \quad \text{Zn} = 98,4\%$$

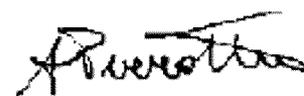
#### Esempio 7

Sempre all'interno del vascone considerato nell'esempio 1, lo scavo è stato realizzato seguendo lo schema *funnel and gate*<sup>TD</sup> rappresentato nella figura 9, costituito essenzialmente da una barriera a bassa permeabilità a forma di imbuto (funnel) utilizzata per indirizzare il flusso di acqua, dalla regione contaminata, alla zona di trattamento (gate) (Frega G., Troisi S., Straface S. (2004). "*Idraulica Ambientale*". Collana Universitas, Ed. Librare, San Giovanni in Fiore (CS)). Il pannello a bassa permeabilità è stato realizzato utilizzando n. 3 strati di guaina bituminosa dello spessore di 0,4 mm; la parte relativa alla zona di flusso è stata riempita con un'opportuna massa di fibra vegetale di ginestra, sottoposta preliminarmente a opportuno lavaggio, essiccazione e trattamento chimico-fisico, immessa in maniera sfusa, con un grado di compattazione tale da non alterare il valore della conducibilità idraulica del terreno, come nell'esempio 1.

Le percentuali di abbattimento sono state pari a:

$$\text{Cd} = 98,8\% \quad \text{Pb} = 99,3\% \quad \text{Zn} = 98,3\%$$

#### Esempio 8



Il tutto come nell'esempio 7, con lo scavo realizzato seguendo lo schema *funnel and gate*<sup>TD</sup>, ma con la massa vegetale costituente il biodreno costituita da juta sottoposta a trattamento chimico-fisico tale da ottenere fibre vegetali della dimensione inferiore a 20 µm.

Le percentuali di abbattimento sono state pari a:

$$\text{Cd} = 97,8\% \quad \text{Pb} = 98,2\% \quad \text{Zn} = 98,4\%$$

#### Esempio 9

Il tutto come nell'esempio 7, con lo scavo realizzato seguendo lo schema *funnel and gate*<sup>TD</sup>, ma con la massa vegetale costituente il biodreno costituita da cotone sottoposta a trattamento chimico-fisico tale da ottenere fibre vegetali della dimensione inferiore a 20 µm.

Le percentuali di abbattimento sono state pari a:

$$\text{Cd} = 97,8\% \quad \text{Pb} = 98,3\% \quad \text{Zn} = 98,5\%$$

#### Esempio 10

Il tutto come nell'esempio 7, con lo scavo realizzato seguendo lo schema *funnel and gate*<sup>TD</sup>, ma con la massa vegetale costituente il biodreno costituita da lino sottoposta a trattamento chimico-fisico tale da ottenere fibre vegetali della dimensione inferiore a 20 µm.

Le percentuali di abbattimento sono state pari a:

$$\text{Cd} = 98,7\% \quad \text{Pb} = 98,8\% \quad \text{Zn} = 99,2\%$$

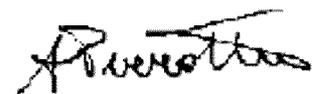
#### Esempio 11

Lo scavo è stato realizzato seguendo lo schema *funnel and gate*<sup>TD</sup> come per l'esempio 7. Le fibre vegetali di ginestra sono state, però, impacchettate in moduli prismatici di dimensioni 15 cm x 30 cm x 50 cm e grado di compattazione tale da non alterare il valore della conducibilità idraulica del terreno (circa  $10^{-5}$  m/s) e immessi nella trincea fino a completo riempimento come nell'esempio 5.

Le percentuali di abbattimento sono state pari a:

$$\text{Cd} = 99,2\% \quad \text{Pb} = 99,0\% \quad \text{Zn} = 98,9\%$$

#### Esempio 12



Lo scavo viene realizzato seguendo lo schema *funnel and gate*<sup>TD</sup> come per l'esempio 7. Successivamente le fibre vegetali sono state lavorate in modo tale da ottenere dei pannelli di fibra presentanti ciascuno uno spessore minimo di 10 cm e conducibilità idraulica pari a quella del terreno; n. 5 di questi pannelli sono stati affiancati l'un l'altro modularmente come nell'esempio 6. Le percentuali di abbattimento sono state pari a:

$$\text{Cd} = 98,6\% \qquad \text{Pb} = 98,4\% \qquad \text{Zn} = 99,1\%$$

### Esempio13

All'interno del vascone in esame, realizzato in laboratorio, in cui si è riprodotto il sito contaminato da bonificare, si è creato un *Hot-Spot*, ovvero una zona in cui le concentrazioni sono molto elevate rispetto al resto del sito. In tal caso si è realizzato un pozzo di emungimento a completa penetrazione nel baricentro del suddetto Hot-Spot, in modo da forzare il moto dell'acqua radialmente verso il pozzo stesso; nel contempo si è scavata intorno al pozzo una trincea, con profondità tale da intercettare l'acquifero per tutto il suo spessore e di larghezza pari a 50 cm, e la si è riempita di fibre vegetali di ginestra, prodotte come visto nell'esempio 1 e messe in opera in maniera sfusa nello scavo, in modo da costituire una barriera PRB cilindrica.

L'acqua depurata dalla PRB anulare attiva, che, nel rispetto dei limiti imposti dalla normativa dello stato in cui si opera, può essere scaricata in un qualsiasi corpo idrico ricettore, nel caso dell'esempio in esame è stata ricircolata più volte, sversandola a monte della barriera, ossia al di fuori del cilindro da questa costituito e concentrico al pozzo, in modo che, per effetto del richiamo dovuto all'emungimento, è stata costretta ad attraversare più volte la barriera stessa. Tale tecnica può essere molto utile qualora, a causa o dell'elevata concentrazione del contaminante o della bassa solubilità dello stesso, l'acqua emunta non rispetta i limiti imposti dalla normativa.

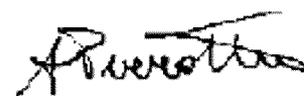
Le percentuali di abbattimento sono state pari a:

$$\text{Cd} = 99,2\% \qquad \text{Pb} = 98,7\% \qquad \text{Zn} = 98,4\%$$

### Esempio n. 14

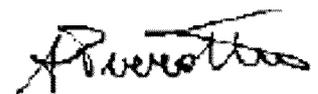
Il tutto è stato realizzato come nell'esempio 13. Le fibre vegetali di ginestra sono state, però, impacchettate in moduli prismatici di dimensioni 15 cm x 30 cm x 50 cm e grado di compattazione tale da non alterare il valore della conducibilità idraulica del terreno (circa  $10^{-5}$  m/s) e immessi nella trincea cilindrica fino a completo riempimento come nell'esempio 5.

Le percentuali di abbattimento sono state pari a:



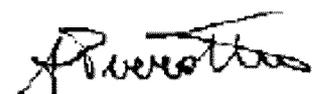
$Cd = 97,8\%$  $Pb = 98,1\%$  $Zn = 98,5\%$ Esempio n. 15

Il tutto è stato realizzato come per l'esempio 13. Le fibre vegetali sono state lavorate, però, in modo tale da ottenere dei pannelli cilindrici di fibra presentante ciascuno uno spessore minimo di 10 cm e conducibilità idraulica pari a quella del terreno; n. 5 di questi pannelli sono stati inseriti l'un l'altro concentricamente. Le percentuali di abbattimento sono state pari a:

 $Cd = 98,4\%$  $Pb = 98,5\%$  $Zn = 99,2\%$ 

## Rivendicazioni

1. Barriera permeabile reattiva (PRB) il cui materiale reattivo è costituito da fibre naturali di piante liberiane per la bonifica delle acque di falda contaminate caratterizzata dal fatto che la parte fibrosa delle fibre naturali è separata dalla cuticola esterna e dalla parte legnosa interna, che il quantitativo di lignina residua presente all'interno delle fibre è compreso tra il 3 e il 15% .
2. Barriera permeabile reattiva (PRB) il cui materiale reattivo è costituito da fibre naturali di piante liberiane per la bonifica delle acque di falda contaminate secondo la rivendicazione 1 caratterizzata dal fatto che il diametro delle singole fibre è compreso tra 1 e 20 micron.
3. Barriera permeabile reattiva (PRB) il cui materiale reattivo è costituito da fibre naturali di piante liberiane per la bonifica delle acque di falda contaminate secondo la rivendicazione 1 e 2 caratterizzata dal fatto che la separazione della parte fibrosa dalla cuticola esterna avviene mediante una separazione di tipo chimico-fisico.
4. Barriera permeabile reattiva (PRB) il cui materiale reattivo è costituito da fibre naturali di piante liberiane per la bonifica delle acque di falda contaminate secondo la rivendicazione 1 caratterizzata dal fatto che la disposizione della fibra nelle trincee, scavate nel terreno da bonificare, può avvenire in maniera sfusa o impacchettata.
5. Barriera permeabile reattiva (PRB) il cui materiale reattivo è costituito da fibre naturali di piante liberiane per la bonifica delle acque di falda contaminate secondo la rivendicazione 4 caratterizzata dal fatto che la disposizione della fibra nelle trincee in maniera impacchettata può essere in pannelli modulari od in blocchi di qualunque forma e dimensione.
6. Barriera permeabile reattiva (PRB) consistente in biodreni di fibra naturale da impiegare nella bonifica delle acque di falda contaminate secondo la rivendicazione 1 caratterizzata dal fatto che la barriera permeabile reattiva può essere sia attiva, ossia barriera che intercetta il contaminante senza modificarne il percorso, sia passiva ossia barriera che, forzando il moto della falda tramite emungimento costringe il contaminante ad attraversare la barriera stessa.



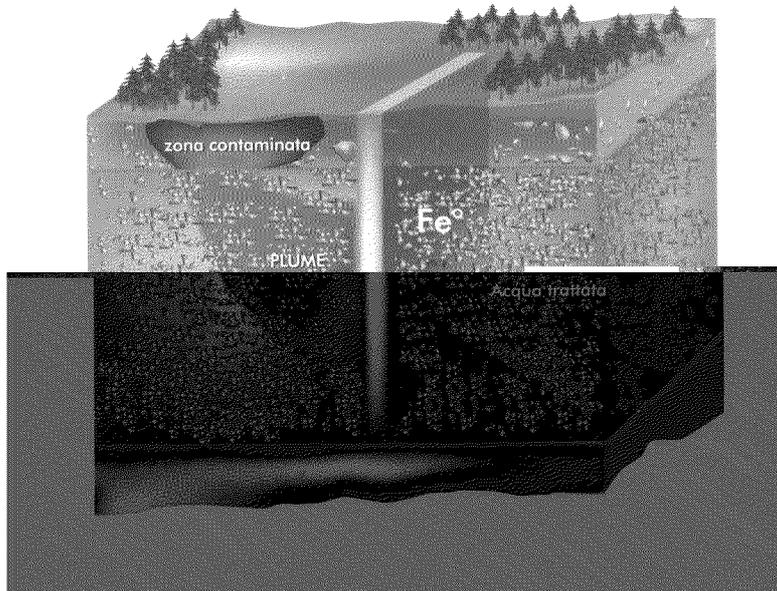


Figura 1 – Barriera permeabile reattiva di tipo continuo (Frega G., Troisi S., Straface S. (2004). "Idraulica Ambientale". Collana Universitas, Ed. Librare, San Giovanni in Fiore (CS))

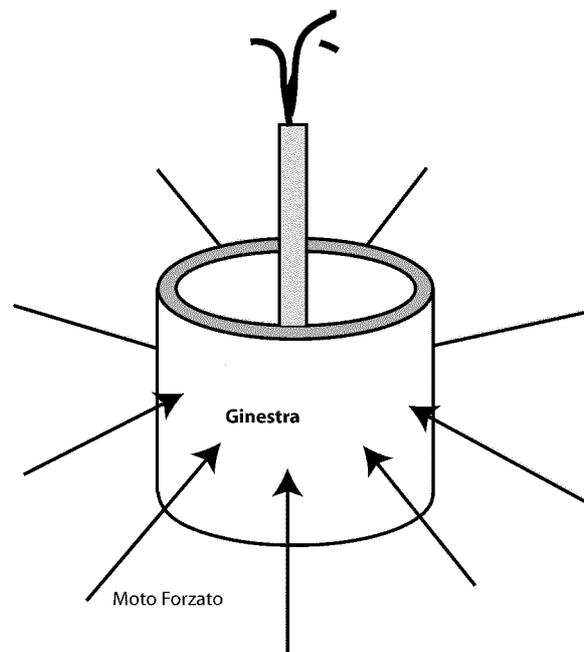


Figura 2: Schema di barriera reattiva per moto forzato

*Arverotta*

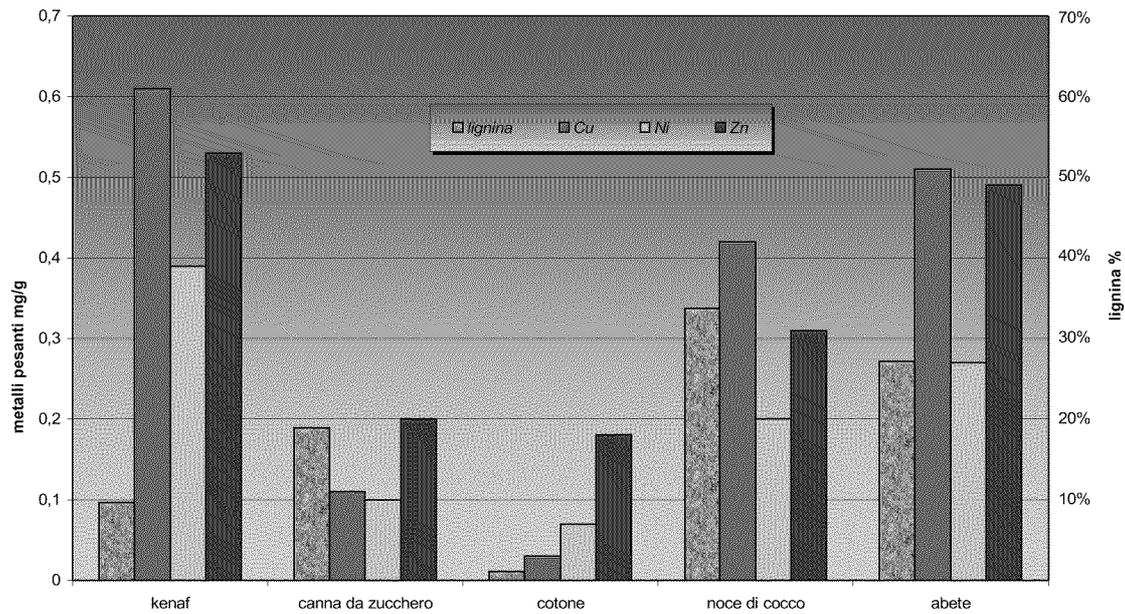


Figura 3 – Confronto tra contenuto di lignina e quantità di metalli adsorbiti (Beom-Goo Lee and Roger M. Rowell. (2004). "Removal of heavy metal ions from aqueous solutions using lignocellulosic fibers". *Journal of Natural Fibers*, Vol. 1(1) 2004, 97-108).

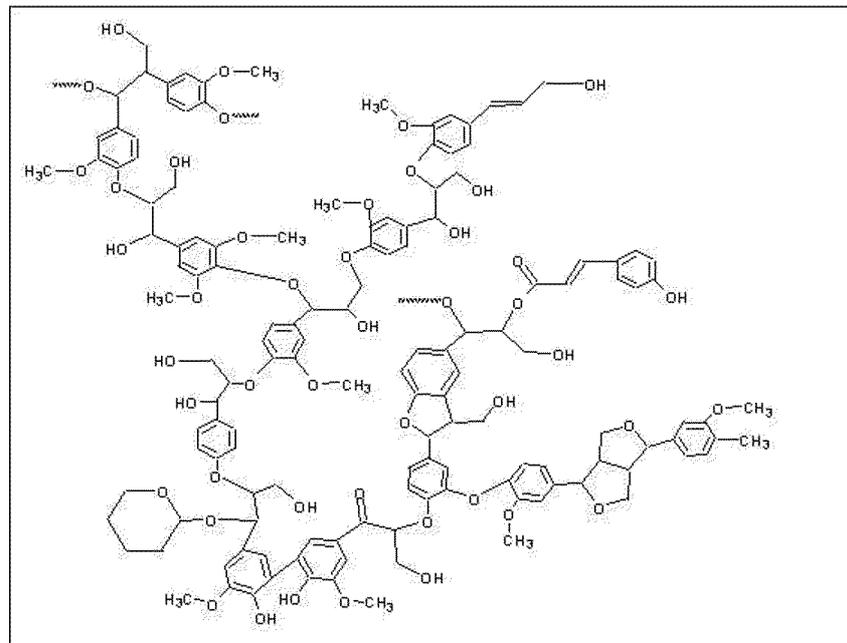


Figura 4 – Modello della struttura molecolare della lignina (Casey J. (1980). "Pulp and Paper". *Chemistry and Chemical Technology*. Volume 1. John Wiley and Sons.)

*Arverotta*

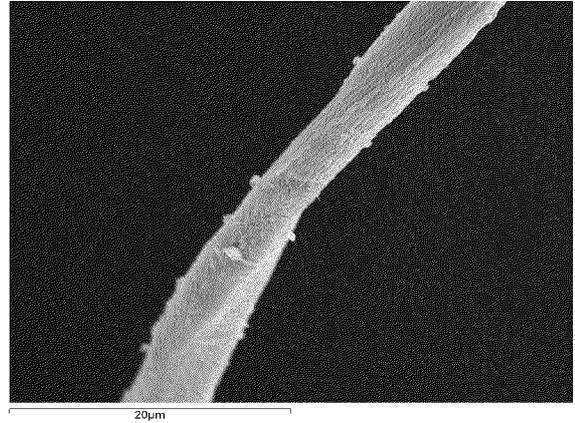
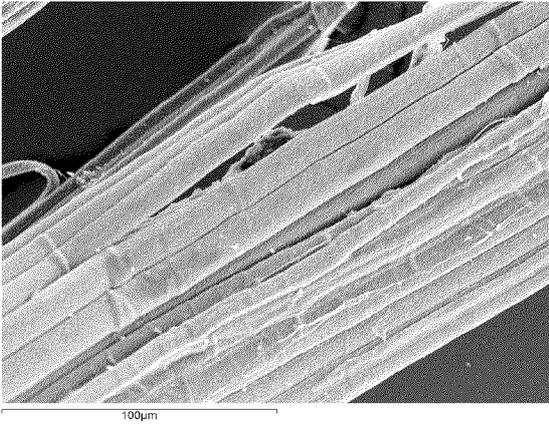


Figure 5 e 6 – Fascio di fibre e singola fibra estratte con processo chimico-fisico( Cerchiara T., Chidichimo G., Gallucci M. C., Vetere M. “Morphology and properties of natural cellulose fibers from Spanish Broom (*Spartium junceum* L.)” *NanoItalTex* 2007 , Milano, 21-22 novembre 2007).

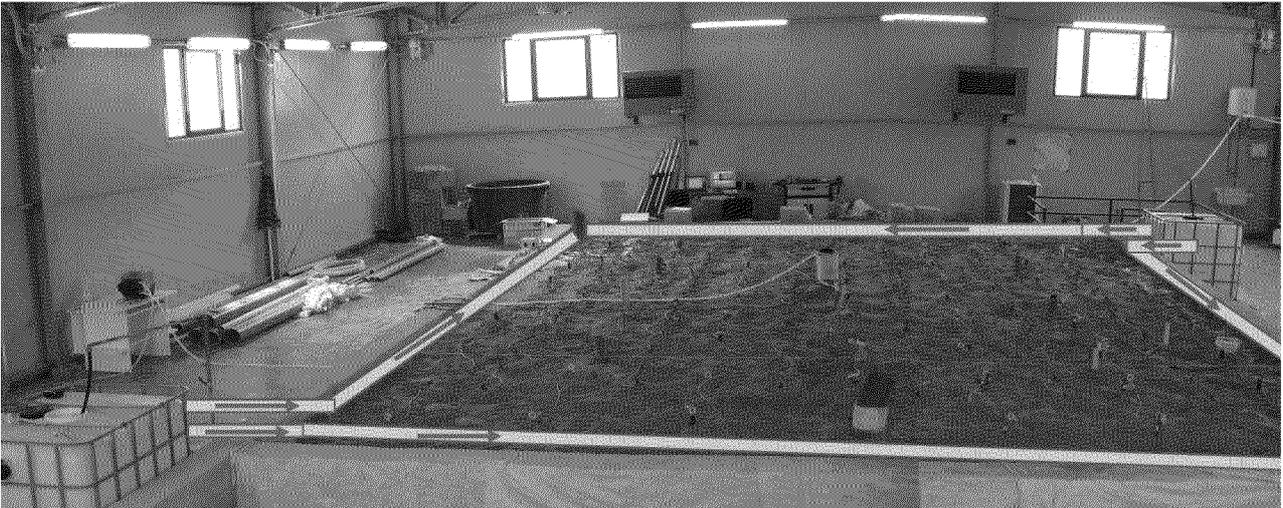


Figura 7 – Vista di insieme dell'apparato sperimentale

*P. Verotta*

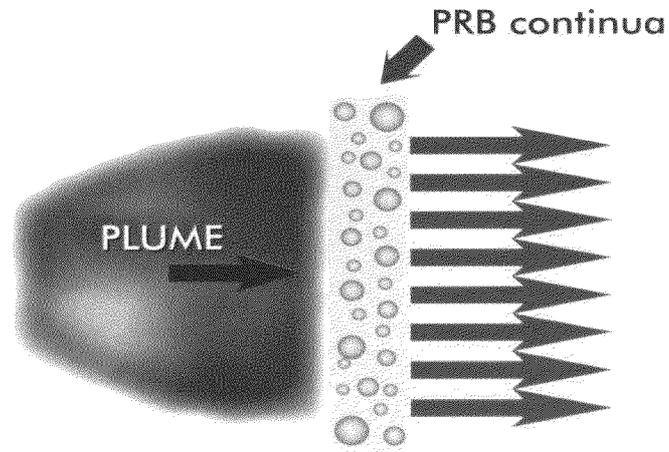


Figura 8 – Schema di una PRB continua (Frega G., Troisi S., Straface S. (2004). “Idraulica Ambientale”. Collana Universitas, Ed. Librare, San Giovanni in Fiore

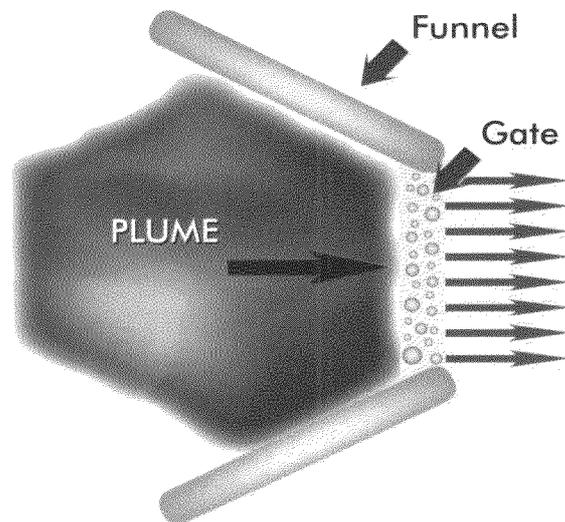


Figura 9 – Schema di una PRB “funnel and gate<sup>TD</sup>” (Frega G., Troisi S., Straface S. (2004). “Idraulica Ambientale”. Collana Universitas, Ed. Librare, San Giovanni in Fiore (CS)).

*F. Averatto*