

ANALISI NUMERICA DI DIAFRAMMI PLASTICI DOTATI DI DISPOSITIVI PER IL MONITORAGGIO E LA PREVENZIONE DELL'INQUINAMENTO AMBIENTALE

Giulia Scelsi (giulia.scelsi@polimi.it)

Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Gabriele Della Vecchia (gabriele.dellavecchia@polimi.it)

Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Gianluigi Sanetti (gianluigi.sanetti@mise.gov.it)

Ministero dello Sviluppo Economico – DGS-UNMIG

ABSTRACT. I diaframmi plastici costituiti da miscele di cemento e bentonite rappresentano una soluzione interessante e vantaggiosa in interventi di tutela e salvaguardia ambientale. Scopo dei diaframmi plastici in tale ambito è isolare e ridurre il più possibile la dispersione nell'ambiente di fluidi contaminanti; pertanto i loro requisiti principali sono una conducibilità idraulica molto bassa e una elevata durabilità. Questo implica la necessità di una valutazione sempre più accurata dell'efficienza dell'opera. A questo scopo, l'uso di specifici ed innovativi dispositivi inseriti durante la realizzazione stessa del diaframma evoluto si è dimostrato particolarmente adatto ad intercettare i fluidi potenzialmente contaminanti prima che fuoriescano dalla barriera e contaminino l'ambiente. In questa nota si presentano i risultati preliminari di uno studio numerico svolto con l'obiettivo di suggerire criteri di installazione di questi dispositivi, frutto di un accordo di collaborazione promosso dalla Direzione Generale per la Sicurezza anche Ambientale delle Attività Minerarie ed Energetiche del Ministero dello Sviluppo Economico con il Politecnico di Milano.

1. INTRODUZIONE

I diaframmi plastici sono barriere realizzate allo scopo di trattenere o limitare il più possibile la circolazione/fuoriuscita di fluidi inquinanti nel sottosuolo. Per assolvere tale funzione, la miscela che costituisce la barriera deve avere una conducibilità idraulica molto bassa, generalmente minore di 10^{-9} m/s (ICE, 1999). In origine, i diaframmi plastici erano utilizzati prevalentemente per opere provvisorie. Nel corso del tempo, hanno cominciato a essere utilizzati anche per interventi di bonifiche ambientali, richiedendo prestazioni sempre migliori sia in termini di tenuta idraulica che di durabilità. Tuttavia il contaminante, una volta sversato nel terreno e raggiunta la barriera, potrebbe riuscire ad attraversarla nel corso del tempo. Nell'ambito dei materiali utilizzati per la realizzazione di tali barriere, una possibilità molto diffusa è quella dei diaframmi plastici cemento-bentonite monofase: si impiega un'unica miscela che inizialmente ha il compito di sostenere lo scavo e successivamente, una volta indurita/maturata, quello di costituire la barriera stessa.

Ciò permette di installare dispositivi per verifiche, monitoraggi ed intervento nella miscela ancora fluida, evitando il danneggiamento della barriera dovuto a operazioni di perforazione del materiale solido (Sanetti, 2000). Tali dispositivi (brevettati) consentono quindi di controllare i fluidi in transito prima che essi abbiano attraversato la barriera e contaminato l'ambiente circostante, permettendo la creazione di reti di monitoraggio e intervento attivo. Le caratteristiche dei dispositivi e la loro collocazione entro lo spessore del diaframma consentono infatti la captazione, l'estrazione e quindi l'analisi dei fluidi in transito prima che questi fuoriescano a valle dello stesso. Si riportano nel seguito alcuni risultati di analisi numeriche agli elementi finiti, svolte utilizzando il software COMSOL Multiphysics®, allo scopo di valutare quantitativamente il funzionamento dei diaframmi con dispositivo e di fornire strumenti utili alla loro collocazione e al loro dimensionamento.

2. IL MODELLO NUMERICO

Uno schema del diaframma con dispositivo è mostrato in Figura 1 (a): esso è costituito in prima approssimazione da un elemento cilindrico completamente finestrato, all'interno del quale può essere imposto il carico idraulico desiderato. Il sistema è quindi descritto da tre grandezze geometriche, di cui una caratterizzante il diaframma plastico, ovvero il suo spessore t , e due caratterizzanti i dispositivi, ovvero il loro diametro d e la loro

spaziatura s . Si considera che la contaminazione sia costituita da idrocarburi leggeri, che quindi tendono a giacere immediatamente al di sopra del livello di falda. Essendo il moto di questi contaminanti, una volta raggiunta la falda, prevalentemente orizzontale, le simulazioni sono state condotte attraverso uno schema geometrico bidimensionale, come riportato in Figura 1 (b).

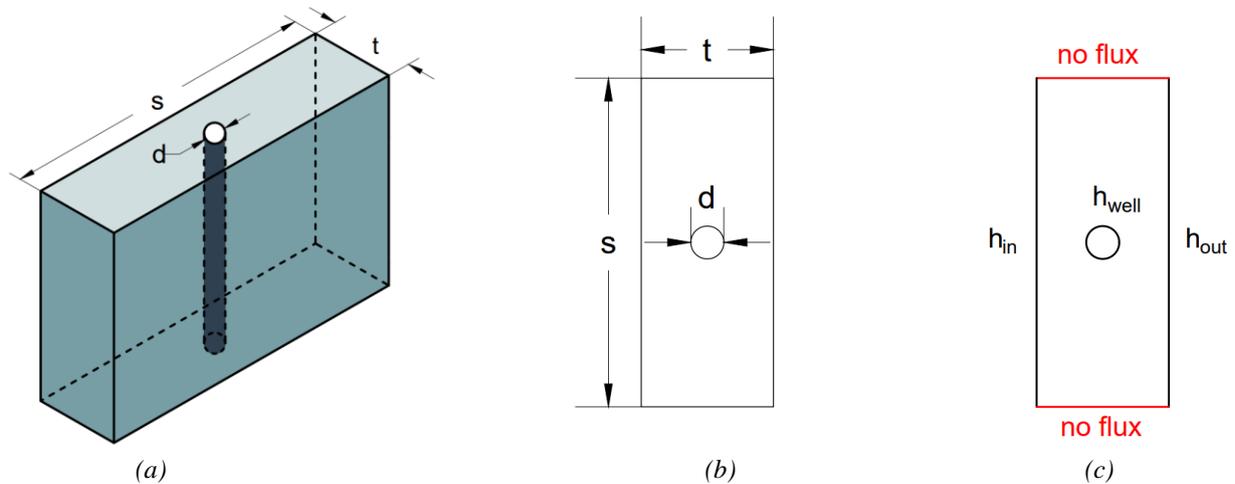


Figura 1. (a) Definizione delle variabili geometriche del problema. (b) Geometria bidimensionale del problema e (c) condizioni al contorno.

Considerando il terreno omogeneo, per la simmetria dei flussi in gioco è possibile studiare il problema simulando solo una parte di diaframma, di lunghezza s , centrata nel dispositivo. Tale lunghezza coincide con l'interasse tra i dispositivi. Nelle simulazioni si considerano tutte le possibili combinazioni geometriche dello schema rappresentato, variando quindi la spaziatura e il diametro del dispositivo, per un fissato spessore della barriera.

Per uno studio preliminare dell'efficacia dal punto di vista idraulico del sistema barriera-dispositivo, si analizza il solo flusso d'acqua all'interno della barriera, considerata satura, trascurando la presenza di contaminanti. Assumendo che la portata per unità di superficie del mezzo poroso u e il gradiente del carico idraulico h siano legate linearmente dalla legge di Darcy attraverso la conducibilità idraulica K e che il materiale costituente la barriera sia isotropo e omogeneo dal punto di vista idraulico, il problema è governato dall'equazione di Laplace:

$$\nabla^2 h = 0. \quad (1)$$

Per essere risolta, tale equazione necessita di condizioni al contorno sul carico idraulico e/o sui flussi. Per il problema in esame, si immagina di conoscere il carico a monte del diaframma h_{in} (ovvero nella zona contaminata) e il carico a valle del diaframma h_{out} , con $h_{in} > h_{out}$ (si veda la Figura 1(c)). La differenza di carico idraulico tra monte e valle è ipotizzata costante e pari a 1 m in tutte le analisi. Nel dispositivo posto all'interno della barriera si impone un carico costante h_{well} , compreso tra h_{in} e h_{out} . Per la simmetria del problema, i bordi destro e sinistro sono considerati impermeabili.

Allo scopo di generalizzare il problema rispetto alle dimensioni geometriche e ai carichi idraulici applicati, il modello è stato formulato in termini di grandezze adimensionali. In particolare si sono identificati i seguenti gruppi adimensionali: s/t , spaziatura tra dispositivi normalizzata rispetto allo spessore del diaframma; d/t , diametro del dispositivo normalizzato rispetto allo spessore del diaframma; $h^* = (h_{well} - h_{out}) / (h_{in} - h_{out})$ carico idraulico normalizzato nel dispositivo, variabile tra 1 (quando il carico nel dispositivo coincide con il carico di monte, $h_{well} = h_{in}$) e 0 (quando il carico nel dispositivo coincide con il carico di valle, $h_{well} = h_{out}$).

Nel seguito, quando si farà riferimento a grandezze non normalizzate, si mostreranno i risultati ottenuti per un diaframma plastico di spessore di 0.4 m, una conducibilità idraulica della miscela costituente la barriera di 10^{-9} m/s e una densità del fluido interstiziale di 1000 kg/m^3 . I rimanenti dati, ovvero il carico idraulico al dispositivo, la spaziatura tra dispositivi e il loro diametro, sono fatti variare per ottimizzare il sistema.

3. RISULTATI DELLE ANALISI

Si mostrano nel seguito i risultati di alcune simulazioni, con lo scopo di mettere in evidenza l'influenza delle grandezze geometriche e idrauliche sul funzionamento della barriera. Per ogni simulazione sono stati calcolati il flusso uscente dalla barriera lato valle, q_{out} , e il flusso uscente dal sistema attraverso il pozzetto, q_{well} . I flussi sono espressi per unità di profondità (L^2/T). Da questi risultati si sono calcolate le seguenti variabili:

- la conducibilità idraulica equivalente del sistema con dispositivo: $K_{eq} = q_{out}/s \cdot t/\Delta h$, dove Δh è la differenza tra il carico idraulico a monte e a valle del diaframma plastico;
- l'efficienza del sistema in termini di riduzione di conducibilità idraulica equivalente: $Eff = (K_b - K_{eq})/K_b$, dove K_b è la conducibilità idraulica del materiale costituente la barriera.

È bene mettere in evidenza che un sistema funzionale, ovvero avente un flusso in uscita minore di quello della barriera senza dispositivo, debba essere caratterizzato da un valore di efficienza maggiore di 0. Come atteso, per diametro del dispositivo tendente a zero, l'efficienza nulla è raggiunta in corrispondenza di $h^* = 0.5$. A titolo di esempio, in Figura 2(a) sono mostrati i risultati per carico idraulico nel dispositivo pari a $h^* = 0.1$, corrispondente a efficienza positiva: si nota come il flusso d'acqua sia entrante nel dispositivo. In Figura 2(b) sono invece rappresentati i risultati relativi a carico idraulico nel dispositivo $h^* = 0.8$, tali da generare efficienza negativa e flusso d'acqua uscente dal dispositivo. Entrambe le simulazioni sono state effettuate mantenendo costante e pari a 1 m la differenza di carico tra monte e valle del diaframma, così come la spaziatura tra dispositivi ($s = 0.8$ m). Alla luce delle osservazioni riportate, nel seguito si considereranno solo i casi di interesse pratico, ovvero quelli caratterizzati da un'efficienza maggiore di 0.

In Figura 3 sono riportati i risultati di numerose analisi a elementi finiti svolte per mettere in evidenza il ruolo della spaziatura e del diametro del dispositivo sull'efficienza idraulica del sistema. L'efficienza del sistema cresce sempre al diminuire della spaziatura e del carico idraulico h^* . Un aspetto che merita più attenzione è invece l'influenza del diametro del dispositivo, valutata facendo variare il rapporto adimensionale d/t , fissato il carico idraulico nel dispositivo. Dalla Figura 3(a) si può evincere che, per $h^* = 0$, l'efficienza aumenta sempre all'aumentare del diametro del dispositivo, con efficienze maggiori per spaziature piccole. Per carichi idraulici nel dispositivo maggiori di zero (Figura 3(b)), l'efficienza mostra un andamento non monotono. Infatti, per grandi diametri la perdita di carico tra il dispositivo e il lato di valle della barriera avviene in una distanza molto piccola: aumenta quindi il gradiente idraulico tra dispositivo e barriera e conseguentemente la portata uscente dal lato di valle della barriera. Rimane tuttavia valida l'osservazione, confermata dal grafico in Figura 3(a), che il sistema funzioni meglio se il carico imposto nel dispositivo è basso. Per fornire uno strumento utile alla progettazione, dai grafici precedenti è stato individuato il valore del diametro del dispositivo corrispondente all'efficienza massima, per ciascun valore del carico idraulico nel dispositivo e di spaziatura. Operativamente, ciò equivale a trovare il massimo di ogni curva analoga a quelle riportate in Figura 3. I risultati sono riportati in un abaco riassuntivo (Figura 4) che, per ogni carico idraulico, permette di individuare la geometria ottimale (d/t e s/t) e visualizzare l'efficienza corrispondente (nell'etichetta di fianco a ciascun punto).

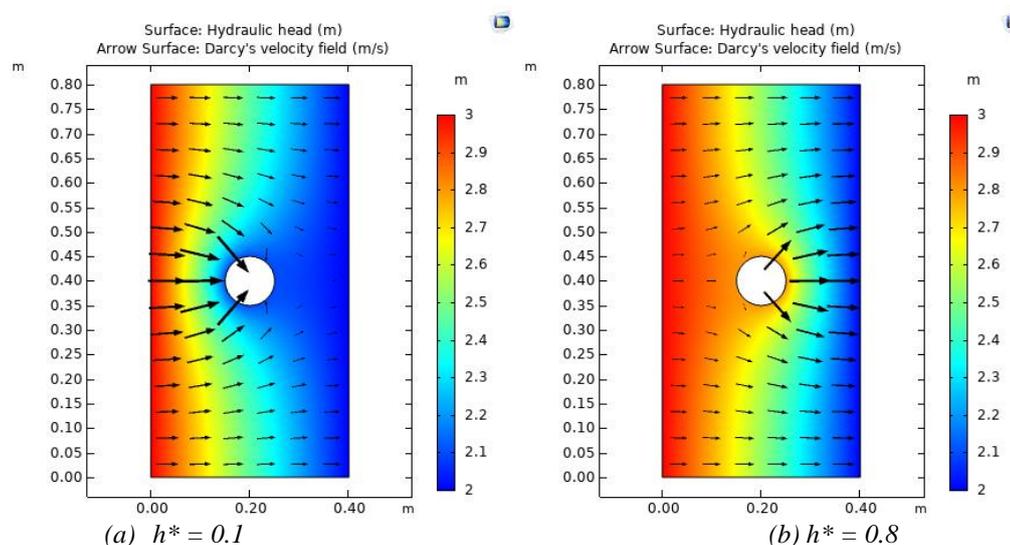


Figura 2. Ruolo del carico idraulico nel dispositivo; la superficie colorata indica il carico idraulico, le linee di flusso indicano i vettori velocità.

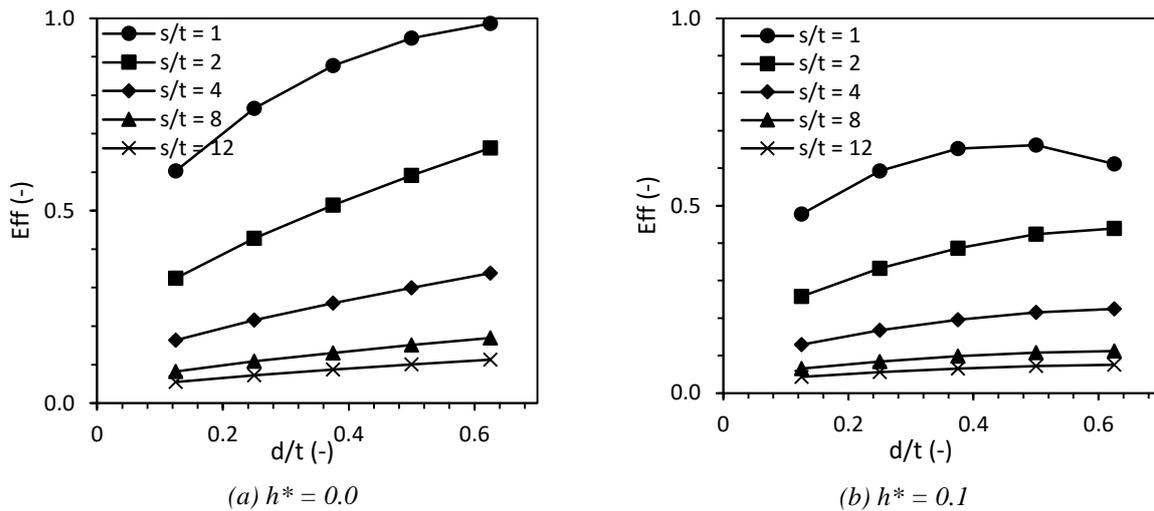


Figura 3. Andamento dell'efficienza con il diametro normalizzato rispetto allo spessore della barriera, per vari valori della lunghezza della barriera.

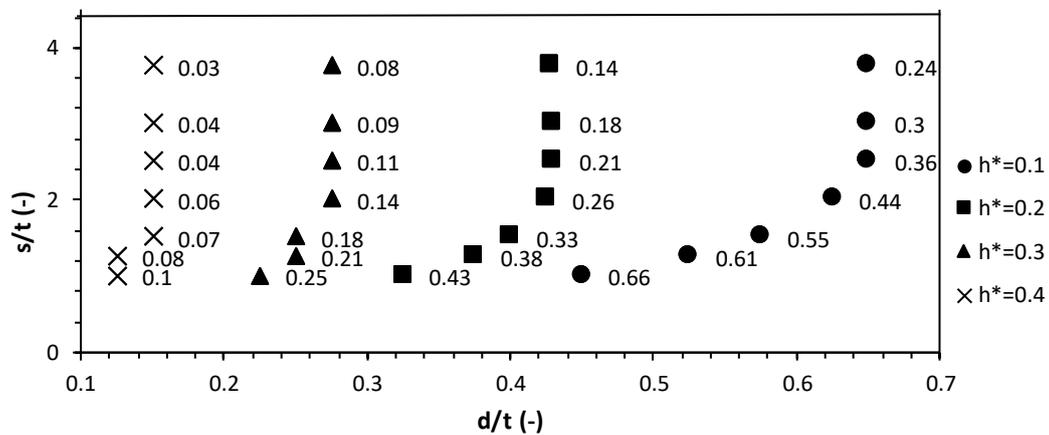


Figura 4. Configurazione geometrica ottimale al variare del carico idraulico del dispositivo, con indicazione dell'efficienza corrispondente.

4. CONCLUSIONI

Il comportamento idraulico di diaframmi plastici evoluti, ovvero dotati di dispositivi (brevettati) θ per la captazione di inquinanti è stato simulato attraverso analisi numeriche agli elementi finiti. In particolare si è analizzata la filtrazione dell'acqua nella barriera ipotizzata satura, trascurando in via preliminare la presenza di contaminanti. Si sono studiate le configurazioni del sistema, allo scopo di individuare quella ottimale, variando lo spessore della barriera, la spaziatura tra dispositivi e il carico idraulico al loro interno. Come atteso, la condizione ottimale dal punto di vista idraulico corrisponde ad un dispositivo con carico idraulico uguale a quello di valle. In questo caso, l'efficienza aumenta sempre al diminuire della spaziatura e al crescere del diametro del dispositivo. In caso contrario, è necessario individuare il diametro ottimale del dispositivo attraverso analisi numeriche dedicate. Per facilitare l'utilizzo nella pratica progettuale, è stato presentato un abaco per il dimensionamento del sistema in funzione di sole grandezze adimensionali.

5. BIBLIOGRAFIA

Sanetti G. (2000). Diaframmi plastici: evoluzione e nuovi sistemi di controllo post-operam. *Quarry and Construction*, Dicembre, 105-109.
 ICE (1999). Specification for the construction of slurry trench cut-off walls as barriers to pollution migration. *Thomas Telford*.