

**MISURE DI TEMPERATURA CON FIBRA OTTICA E SENSORI
TRADIZIONALI PER MODELLARE IL REGIME DI FILTRAZIONE
ARGINALE: IL CASO STUDIO DEL FIUME GORZONE**

Giorgia Dalla Santa
Università degli Studi di Padova
giorgia.dallasanta@unipd.it

Nicola Fabbian
Università degli Studi di Padova
nicola.fabbian@phd.unipd.it

Luca Schenato
CNR – IRPI
luca.schenato@irpi.cnr.it

Giacomo Tedesco
CNR – IRPI
giacomo.tedesco@irpi.cnr.it

Simonetta Cola
Università degli Studi di Padova
simonetta.cola@unipd.it

Sommario

Il buon funzionamento dei rilevati arginali e il loro monitoraggio sono un elemento fondamentale per la gestione e la protezione dei territori di pianura, non solo in occasione di eventi di piena ma anche nelle condizioni di deflusso normale. Essendo strutture longitudinali, caratterizzate da notevole estensione lineare e da una certa variabilità spaziale dei terreni costituenti il corpo arginale e la fondazione, il monitoraggio della funzionalità arginale risulta complesso.

Recentemente si sono sviluppate tecniche di monitoraggio arginale che sperimentano l'uso di sensori in fibra ottica per misurare temperatura o deformazioni in modo distribuito nello spazio e ad alta frequenza temporale. Viene qui presentata un'esperienza di monitoraggio in cui sensori tradizionali di pressione e temperatura sono affiancati da sensori a fibra ottica al fine di monitorare le variazioni di temperatura nel tempo in corrispondenza di 3 diverse verticali. I dati rilevati in campo in diverse condizioni idrauliche sono stati poi utilizzati per realizzare, calibrare e validare un modello FEM della sezione arginale sviluppato con un codice capace di simulare il trasporto di massa e calore nel mezzo poroso. Lo scopo è quello di testare l'efficienza della misura di temperatura come indicatore significativo per analizzare il regime di filtrazione nel terreno di fondazione di un argine interessato da fontanazzi.

1. Inquadramento

Nella frazione Boscochiario di Cavarzere (Ve) un problema di filtrazione interessa da molti anni entrambi gli argini del fiume Gorzone. Questo, a circa 10 km dalla foce, scorre per un lungo tratto parallelamente e a una distanza inferiore a 50m dal fiume Adige. Il contesto è tipico della bassa pianura Padana dove il sottosuolo è caratterizzato da una alternanza continua di depositi alluvionali sabbiosi e limoso-argillosi che ospitano un acquifero multistrato e con la prima falda in prossimità del piano campagna. In regime di deflusso normale il Gorzone presenta il pelo libero ad una quota molto

prossima a quella del piano campagna laterale, anche se in alcune tratti il fiume può risultare pensile rispetto alla campagna circostante.

In tutta l'area, lungo entrambi gli argini destro e sinistro sono abbondanti le venute d'acqua e le filtrazioni al piede del rilevato arginale, sia durante i periodi di piena ma anche nel periodo estivo quando, allo scopo di mantenere il livello del fiume sufficientemente elevato per garantire l'alimentazione dei canali di irrigazione, viene sollevato il sostegno di fondo presente 2km più a valle in località Buoro.

Nel corso degli anni, il Genio Civile della Regione Veneto ha svolto diversi interventi, per contrastare il fenomeno con risultati a volte solo parziali.

Da molti anni, la misurazione della temperatura all'interno degli argini viene studiata come strumento per identificare flussi di filtrazione anomali attraverso il corpo arginale e i terreni di fondazione. Il principio di base consiste nell'assumere che, in regime di flusso normale, le fluttuazioni di temperatura all'interno del corpo arginale sono determinate dallo scambio di calore tra l'aria e i terreni di fondazione principalmente per conduzione su base stagionale. Al contrario, la presenza di flussi di filtrazione anomali potrebbe essere rilevata attraverso un'aumentata fluttuazione di temperatura dovuta ad un aumentato locale dello scambio termico con contributi advettivi (Bossi et al., 2018; Cola et al., 2021).

Al fine di comprendere maggiormente il regime di filtrazione e studiare ulteriori interventi, il Genio Civile in collaborazione con il dipartimento ICEA dell'Università di Padova ha deciso di installare un sistema misto di monitoraggio della filtrazione sub-arginale. Il sistema è costituito da una sistema di sensori distribuiti in fibra ottica (Distributed Fiber Optic Sensor, DFOS) disposti su alcune verticali, accoppiati con sensori di temperatura e di pressione inseriti nei livelli più permeabili. I dati raccolti, uniti alle informazioni ricavate da una precedente campagna geotecnica, sono poi stati utilizzati per realizzare e calibrare un modello agli elementi finiti del sottosuolo, grazie al quale eseguire delle analisi accoppiate di filtrazione e diffusione termica con il codice FEFLOW (prodotto da DHI). Il modello è stato tarato e validato utilizzando diversi set di dati misurati, in modo da poterlo poi utilizzare come strumento predittivo in condizioni di piena.

Obiettivo dello studio è quello di analizzare le particolari condizioni di filtrazione nella zona arginale indagata, verificare la significatività della misura di temperatura come indicatore della filtrazione, oltre che per indagare l'influenza delle acque profonde sulla formazione dei fontanazzi e valutare i futuri interventi di controllo delle venute d'acqua. Lo stesso sistema servirà successivamente per valutare l'effetto indotto dagli interventi sul regime di filtrazione.

1.1 Sensori in fibra ottica per la misura di temperatura negli argini

Negli ultimi 30 anni i sensori in fibra ottica hanno avuto un notevole sviluppo e diffusione in campo ingegneristico, principalmente per le maggiori opportunità di utilizzo che questa tecnologia offre rispetto alla sensoristica tradizionale. La fibra ottica agisce da sensore distribuito capace di rilevare variazioni dell'ambiente esterno con continuità spaziale: essa viene sollecitata iniettando un segnale tramite un apposito interrogatore che poi riceve e analizza il segnale retrodiffuso generatosi lungo tutta la lunghezza della fibra. A seconda del segnale retrodiffuso analizzato (Stokes o anti-Stokes, componente Raman, Brillouin o Rayleigh), è possibile misurare temperature o deformazioni del mezzo attraversato dalla fibra ottica lungo tutta la sua lunghezza (Schenato, 2017). Le misure con fibra ottica possono quindi fornire dati ad altissima frequenza spaziale, ma anche numerosi nel tempo nel caso l'interrogatore sia utilizzato in modo continuativo; la risoluzione spaziale e temporale sono funzione della tecnica di interrogazione implementata e generalmente, risoluzione spaziale, risoluzione temporale e lunghezza misurabile sono parametri mutualmente correlati e non massimizzabili contemporaneamente (Schenato, 2017).

Nel sito in esame, è stato implementato un sistema di monitoraggio integrato: nella sezione considerata in questo studio (sez. 1 in Figura 1) ai piedi dell'argine dal lato campagna, tra dicembre

2020 e gennaio 2021, sono state installate 3 verticali di cavo in fibra ottica per misure termometriche profonde circa 20m ciascuna, oltre a 2 trasduttori di pressione e 2 di temperatura, installati rispettivamente a 10 m e 18 m da p.c. (corrispondente al piede dell'argine). Inoltre, in prossimità del ponte (sez. 2 in Figura 1) è stato installato un sensore combinato di pressione e temperatura del tipo Diver per l'acquisizione in continuo del livello e della temperatura dell'acqua nel fiume.

Particolare attenzione è stata posta nel metodo di installazione del cavo in fibra ottica, infisso utilizzando un penetrometro statico da 20 t, equipaggiato con una punta a perdere, appositamente progettata e realizzata per trascinare in profondità il cavo, proteggendolo durante la posa. Questa metodologia è stata studiata per ottenere un buon contatto tra fibra e terreno con il minimo disturbo del terreno, caratteristiche fondamentali per ottenere una misura attendibile di temperatura del terreno interessato da filtrazione. Le tre verticali sono in serie: il cavo è infatti unico e presenta in ogni verticale un tratto ascendente e uno discendente, mentre al fondo del foro il cavo è curvato a 180° con un raggio di curvatura compatibile con le specifiche del produttore. I tratti di collegamento tra i fori sono invece interrati in una trincea di circa 0.4 m appositamente scavata (Fabbian et al., 2021). La fibra installata è del tipo BRUsens DTS STL specifica per misure di temperatura. Essa è interrogata in modalità Raman con uno strumento Oryx SR DTS della Sensornet, ottenendo così una risoluzione spaziale di 2 m e un'accuratezza della misura di temperatura migliore di 0.5°C su una lunghezza massima di cavo di circa 2 km e con un tempo di acquisizione di circa 2 minuti. La campagna di misura viene svolta con una frequenza circa mensile.



Fig 1. Posizione della sezione allo studio (sezione 1) con la traccia delle verticali di monitoraggio (punti arancioni) lungo l'argine sinistro del fiume Gorzone, nel comune di Cavarzere; il punto blu rappresenta la posizione del diver per l'acquisizione del livello dell'acqua nel fiume.

2. Risultati sperimentali

Fino ad ora sono state acquisite 5 misure di temperatura lungo le tre verticali di cavo termometrico. Le misure sono state acquisite in diverse condizioni idrauliche del fiume Gorzone: le prime 3 sono state effettuate il 12/01/2021, il 25/01/2021 e il 2/3/2021 quando il livello del fiume era basso in relazione al regime naturale di deflusso; nelle successive misure (1/4/2021 e 28/4/2021), invece, il livello era alto, dato che in data 11/3/2021 lo stesso era stato alzato di circa 1 m mediante l'attivazione del manufatto di regolazione di Buoro. In occasione di tale innalzamento presso le postazioni di monitoraggio sono apparse numerose e abbondanti venute d'acqua. Per tutto il periodo sono inoltre stati acquisiti i valori della pressione e della temperatura negli strati profondi, il livello e la temperatura dell'acqua nel fiume Gorzone e il livello nel fiume Adige.

Dai dati misurati si può osservare che le altezze piezometriche rilevate in profondità (Figura 2a) rimangono sempre negative, fatto che indica che le falde profonde non hanno una pressione sufficiente a spingere l'acqua al di sopra del piano campagna e quindi a generare le venute d'acqua in superficie

(Fabbian et al., 2021). Inoltre, l'altezza piezometrica determinata a 18m di profondità rimane sempre inferiore a quella rilevata a 10m di circa 80-120 cm, a testimoniare o che esiste una separazione idraulica tra le due profondità o che esistono moti di filtrazione che alterano la distribuzione delle pressioni rispetto quella idrostatica.

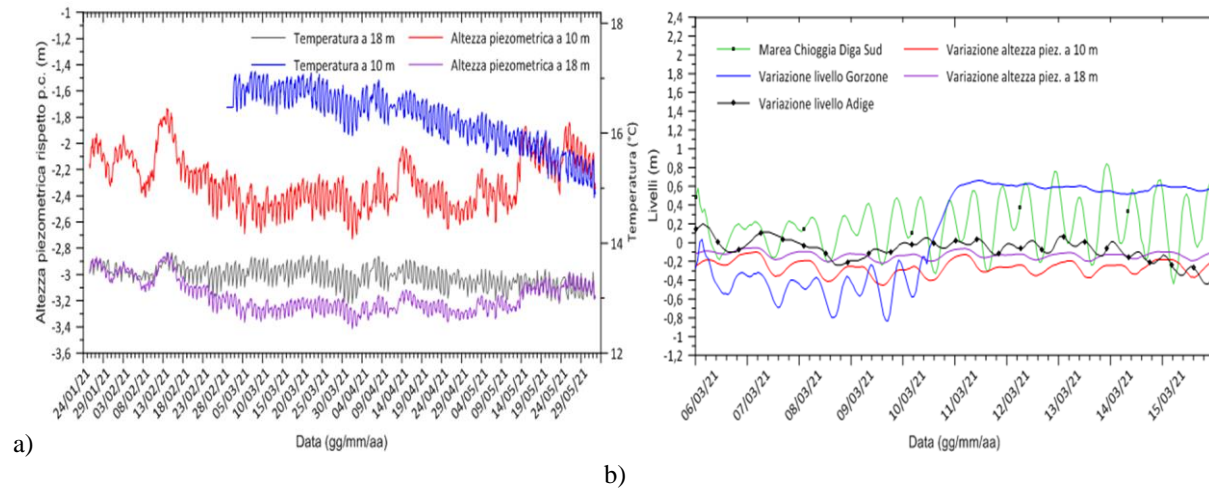


Figura 2. a) Altezze piezometriche (valutate rispetto al p.c.) e temperature rilevate dalle termocoppie; b) Confronto tra la marea di Chioggia-Diga Sud e le variazioni del livello del fiume e della pressione misurate rispetto la data del 1/3/2021.

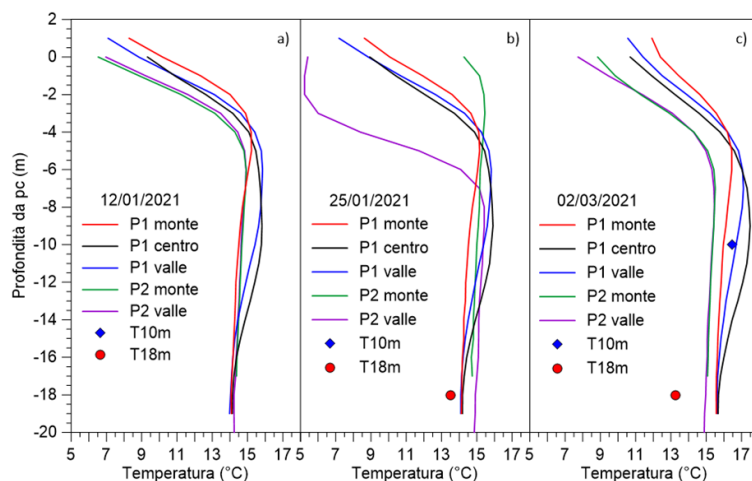


Figura 3. Profilo di temperatura nelle diverse verticali (un grafico per verticale) nelle prime 3 giornate di interrogazione, e confronto con i sensori di misura.

Fatto significativo che emerge dal confronto di Figura 2b è che gli strati di sabbia presenti in profondità nella sezione di misura non sono in stretta comunicazione idraulica con il fiume Gorzone, non avendo registrato alcuna variazione importante delle pressioni interstiziali conseguentemente all'innalzamento del livello idrometrico del fiume in data 11/3/2021.

Ulteriore conferma dell'assenza di connessione tra fiume e pressioni negli strati di sabbia profondi sembra essere data dall'incoerenza tra le temperature dell'acqua del fiume e quelle rilevate dalle due termocoppie a 18 e 10m di profondità. Mentre l'acqua del fiume aumenta di temperatura di circa 4°C nel periodo osservato, la temperatura a 10m è praticamente costante attorno ai 16.8°C nel mese di marzo, mentre da aprile in poi presenta una progressiva diminuzione fino a raggiungere i 15.2°C (Fabbian et al., 2021). Anche la temperatura a 18 m scende nel periodo primaverile, anche se la sua variazione complessiva è inferiore a 1°C. Le misure collezionate dalle fibre testimoniano invece una sostanziale stabilità della temperatura in profondità (Figura 3).

3. Risultati ottenuti con l'analisi idro-termica

Per verificare le ipotesi supportate dai dati sperimentali, sia in termini di temperatura che in termini di filtrazione, è stato realizzato un modello agli elementi finiti che riproduce la sezione arginale, in corrispondenza delle installazioni di misura. La Figura 4 mostra la sezione schematizzata nel modello, con indicate le posizioni dei trasduttori di temperatura e pressione (punti bianchi) e la verticale di fibra ottica (in azzurro).

La stratigrafia del sito è stata ricavata da precedenti sondaggi e indagini geotecniche, ed è riportata in Tabella 1. Ad ogni livello sono stati inizialmente attribuiti valori dei parametri idraulici (permeabilità e porosità) e termici (conducibilità e diffusività termica) desunti dai risultati di prove in sito o da valori tabellati (Dalla Santa et al., 2020). Gli stessi parametri sono stati poi modificati al fine di calibrare il modello sulla base delle misure effettuate il 25/01: in Tabella 1 sono riportati i parametri al termine della calibrazione. La conducibilità e la diffusività termica dell'acqua filtrante sono state assunte rispettivamente pari a $0,65 \text{ W/(m K)}$ e $4,2 \text{ MJ/(m}^3 \text{ K)}$.

Tabella 1. Caratteristiche idrauliche e termiche attribuite ai vari livelli (permeabilità, porosità, conducibilità e diffusività termica).

(da sommità arginale)			k	n	λ	α
[m]	[m]		[m/s]		[W/(m K)]	[MJ/(m ³ K)]
0	4,5	Argilla 1	$7,5 \times 10^{-7}$	0,474	1,9	1,1
4,5	5,5	Limo argilloso	$7,1 \times 10^{-7}$	0,412	2,1	1,62
5,5	10,3	Argilla 2	$3,6 \times 10^{-7}$	0,412	1,9	1,1
10,3	15,5	Sabbia 1	$5,7 \times 10^{-6}$	0,474	2,6	1,85
15,5	20,5	Limo sabbioso	$1,0 \times 10^{-7}$	0,444	2,25	2,5
20,5	fondo	Sabbia 2	$2,5 \times 10^{-5}$	0,474	2,6	1,85

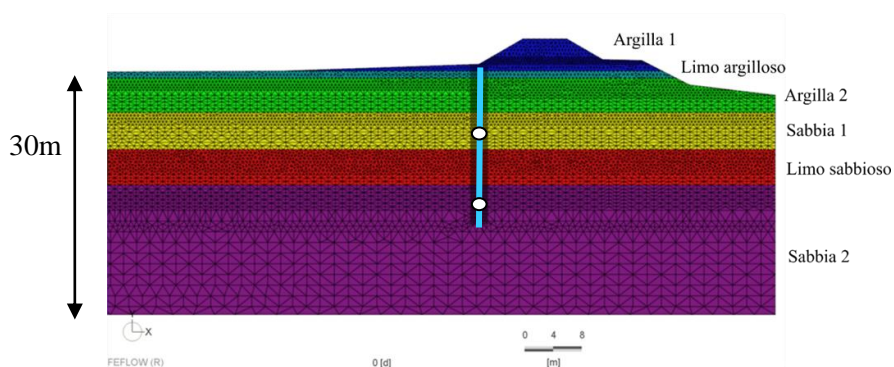


Figura 4. Mesh di calcolo per il modello numerico della sezione.

Le misure del periodo successivo compreso tra il 2/3/2021 e il 1/4/2021, cioè a cavallo dell'attivazione del manufatto di Buoro, sono state utilizzate per la validazione del modello. Le analisi di filtrazione sono state condotte riproducendo le condizioni di temperatura e livello realmente osservate nel fiume. Dal lato campagna il livello di falda a grande distanza dall'argine è stato assunto congruente con il livello dell'acqua nei fossati. La temperatura al p.c. è stata assegnata in base alle temperature dell'aria registrate alla stazione ARPAV di Cavarzere, posta a qualche chilometro di distanza dal sito.

Alla luce delle precedenti osservazioni sui dati di pressione e temperatura misurati in profondità e la formazione di venute d'acqua e fontanazzi avvenuta con la movimentazione del manufatto, si può ipotizzare che la comparsa dei fontanazzi dopo il 11/3/2021 non sia direttamente collegata alla filtrazione che interessa gli strati di limo e sabbia in profondità. È invece ragionevole ipotizzare che i fontanazzi si verifichino come conseguenza di un collegamento più superficiale tra il fiume e il lato campagna, probabilmente dovuto a un sottile strato di sabbia presente alla base del rilevato arginale, strato quasi non osservabile nei sondaggi ma rilevato mediante alcune tomografie elettriche

recentemente eseguite (febbraio 2021). Questa ipotesi è stata verificata tramite le simulazioni: il modello geotecnico del sottosuolo, inizialmente costruito sulla base delle indagini, è stato aggiustato inserendo uno strato di elevata permeabilità a piccola profondità caratterizzata da $k=1,0 \times 10^{-4}$, $\lambda=2,6$ W/(m K) e $\alpha=1,85$ MJ/(m³ K), verificando la corrispondenza degli output forniti con i dati registrati (Figura 5 a e b), e che venisse rappresentato correttamente il fenomeno delle venute d'acqua osservate (Figura 5c).

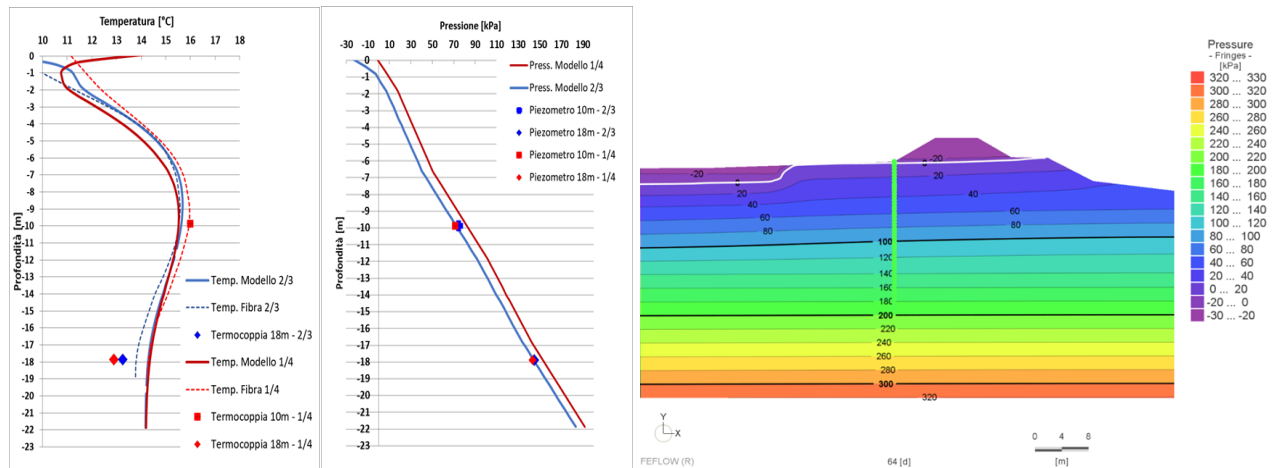


Figura 5: Profili di temperatura a) e pressione interstiziale b) determinati con il modello, a confronto con i dati ottenuti con il monitoraggio e c) distribuzione delle pressioni interstiziali ottenuta in data 01/4/2021 (diversi giorni dopo l'innalzamento del livello a valle).

4. Conclusioni

I risultati ottenuti fino ad ora, seppur preliminari, mostrano che le misure di temperatura sia puntuale che distribuita eseguite in sito hanno fornito informazioni importanti sul regime di filtrazione indicando l'esistenza di percorsi di filtrazione superficiali piuttosto che attraverso le falde profonde, confermando così le supposizioni emerse dalle osservazioni delle misure di pressione, e supportando la modellazione termo-idraulica del fenomeno allo studio.

Per comprendere meglio il fenomeno allo studio allo scopo di indirizzare gli interventi di arresto dei fontanazzi, però, emerge sia dai dati misurati che dagli output modellistici, la necessità di ulteriori sviluppi condotti con uno sguardo più ampio, che comprenda anche il vicino fiume Adige.

Bibliografia

- Bossi G., Bersan S., Cola S., Schenato L., De Polo F., Menegazzo C., Boaga J., Cassiani G., Donini F., Simonini P. (2018, September). "Multidisciplinary analysis and modelling of a river embankment affected by piping". In *European Working Group on Internal Erosion* 234-244. Springer, Cham.
- Cola S., Girardi V., Bersan S., Simonini P., Schenato L., De Polo F. (2021). "An optical fiber-based monitoring system to study the seepage flow below the landside toe of a river levee". *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(3), 691-705. <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00475-y>.
- Dalla Santa G., Galgaro A., Sassi R., Cultrera M., Scotton P., Mueller J., ..., Bernardi, A. (2020). "An updated ground thermal properties database for GSHP applications". *Geothermics*, 85, 101758.
- Fabbian N., Cola S., Dalla Santa G., Schenato L., Tedesco G., Tessarollo A. (2021) "Analisi della risposta idro-termica dell'argine del fiume Gorzone e dei terreni sottostanti mediante utilizzo di fibre ottiche e sensori tradizionali". *IAGIG* - 3-4 settembre 2021.
- Schenato L. (2017). "A review of distributed fibre optic sensors for geo-hydrological applications". *Appl. Sci.*, 7, 1-42.