

ANALISI DELLA RISPOSTA IDRO-TERMICA DEI TERRENI DI FONDAZIONE DELL'ARGINE DEL FIUME GORZONE MEDIANTE SENSORI TRADIZIONALI E IN FIBRA OTTICA

Nicola Fabbian (nicola.fabbian@phd.unipd.it)

Università degli studi di Padova, dipartimento ICEA

Simonetta Cola (simonetta.cola@unipd.it)

Università degli studi di Padova, dipartimento ICEA

Giorgia Dalla Santa (giorgia.dallasanta@unipd.it)

Università degli studi di Padova, dipartimento ICEA

Luca Schenato (luca.schenato@irpi.cnr.it)

CNR-IRPI Padova

Giacomo Tedesco (giacomo.tedesco@irpi.cnr.it)

CNR-IRPI Padova

Alessandra Tessarollo (alessandra.tessarollo@regione.veneto.it)

Genio Civile di Padova – Regione Veneto

ABSTRACT. Malgrado il grande sviluppo dell'ingegneria geotecnica e idraulica avuto negli ultimi 40 anni, ancor oggi, i collassi di argini fluviali indotti da filtrazione sono eventi che si verificano periodicamente. Al fine di migliorare la valutazione delle condizioni di sicurezza di una struttura arginale, si rende necessario incrementare la conoscenza sulle strutture esistenti, mediante attività di indagine e/o di monitoraggio. In questo campo, recentemente si sono fatti grandi progressi sia nelle tecniche di indagine tradizionali, sia nello sviluppo di tecniche innovative, quali le analisi termometriche di superficie e l'utilizzo di sensori distribuiti in fibra ottica. Quest'ultime richiamano maggiormente l'interesse dei ricercatori e dei gestori del territorio perché permettono misure distribuite nello spazio. Il presente intervento presenta il caso studio dell'argine sinistro del Gorzone, dove sensori distribuiti in fibra ottica sono stati installati in diverse verticali al fine di monitorare le variazioni di temperatura indotte dai moti di filtrazione nel terreno di fondazione dell'argine interessato da fontanazzi.

1. INTRODUZIONE

Nella frazione Boscochiario di Cavarzere (Ve) da molti anni un problema di filtrazione interessa entrambi gli argini del fiume Gorzone. La situazione risulta piuttosto singolare poiché in tutta l'area, sia nell'argine sinistro che in quello destro, si osservano venute d'acqua e filtrazioni al piede del rilevato arginale non solo durante i periodi di piena ma anche durante le semplici regolazioni di un manufatto idraulico presente a valle, il quale ha lo scopo di alzare il livello del fiume per garantire l'immissione dell'acqua nei canali di irrigazione.

Al fine di comprendere maggiormente il fenomeno e trovare la soluzione con il miglior rapporto costi-benefici, il Genio Civile in collaborazione con il dipartimento ICEA dell'Università di Padova ha deciso di installare un sistema di monitoraggio della filtrazione sub-arginale. Il sistema è costituito da una serie di sensori distribuiti in fibra ottica (Distributed Fiber Optic Sensor, DFOS) disposti su alcune verticali e accoppiati con sensori di temperatura e di pressione inseriti negli strati più permeabili. I dati raccolti, uniti alle informazioni ricavate da una campagna geotecnica precedentemente eseguita, sono utilizzati per realizzare e calibrare un modello geotecnico del sottosuolo, grazie al quale eseguire delle analisi accoppiate di filtrazione e diffusione termica con il codice FEFLOW (DHI). Obiettivo dello studio è quindi analizzare le particolari condizioni di filtrazione nella zona arginale indagata e verificare l'eventuale influenza delle acque profonde sulla formazione dei fontanazzi per poi ottimizzare i futuri interventi di controllo delle venute. Lo stesso sistema servirà successivamente per valutare l'effetto indotto dagli interventi sul regime di filtrazione.

2. LA FIBRA OTTICA COME SENSORE DI TEMPERATURA

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. Oltre a essere uno strumento per la trasmissione di informazioni, le fibre ottiche si

prestano a misurare con precisione le variazioni termiche del terreno indotte dalla filtrazione a seguito di innalzamenti del livello del fiume. Il funzionamento delle fibre come strumento di misura è basato sulla comparazione dell'onda luminosa retrodiffusa con l'onda luminosa sorgente immessa nel cavo ottico. In questo modo, nota la velocità della luce nel mezzo, è possibile determinare la posizione lungo il cavo ottico alla quale si genera la diffusione ottica per effetto di deformazioni termiche del cavo stesso (Schenato, 2017). Esistono diverse tipologie di interrogazione della fibra ottica e questo permette di avere fibre adatte a diverse applicazioni ed esigenze e sistemi di misura con risoluzione spaziale variabile da qualche mm a qualche metro, entro campi di misura variabili da circa un metro a oltre 100 km (Palmieri et al., 2013).

3. SISTEMA DI MONITORAGGIO DELL'ARGINE DI STUDIO

Il sistema di monitoraggio progettato, e installato tra dicembre 2020 e gennaio 2021, risulta in grado di misurare le pressioni interstiziali e le temperature nei terreni di fondazione dell'argine. Gli strumenti installati in 3 diverse postazioni lungo il rilevato arginale (figura 1a) sono:

1. Postazione 1 ai piedi dell'argine sul lato campagna: 3 verticali di fibre ottiche per il monitoraggio distribuito della temperatura nel terreno, oltre a 2 sensori di pressione e temperatura, posti rispettivamente a 10m (TPA e TTA) e 18m (TPB e TTB) da p.c. (figura 1b), in uno strato di sabbia presente a 7.2m dal piano campagna.
2. Postazione 2 ai piedi dell'argine dal lato campagna: 2 verticali di fibre ottiche per il monitoraggio della temperatura.
3. Postazione 3 sulla sponda del fiume: 1 sensore combinato di pressione e temperatura del tipo Diver per l'acquisizione in continuo del livello e della temperatura dell'acqua nel fiume.

L'idea è quella di affiancare sensori comunemente utilizzati in ambito geotecnico e sensori innovativi come le fibre ottiche, al fine di ricercare delle correlazioni. La particolarità del lavoro sta nella metodologia con cui le fibre sono state installate nel terreno: infatti, sono state inserite utilizzando un penetrometro statico da 20 t, equipaggiato con una punta a perdere (figura 2a), appositamente realizzata per trascinare in profondità e proteggere allo stesso tempo la fibra. Dato che il cavo ottico utilizzato è unico, in ogni verticale la fibra presenta due tratti, uno in discesa e uno in salita (figura 1b). In fondo al foro la fibra compie una curva di 180° (figura 2a) con un raggio di curvatura compatibile con la rigidità flessionale della fibra stessa ($r=5$ cm): questa curvatura serve anche a garantire una corretta misura, cioè che non vi sia un'eccessiva dispersione del segnale sorgente emesso dall'interrogatore. La fibra che scorre da una verticale all'altra è stata inserita in una trincea fonda circa 0.4 m appositamente scavata al fine di proteggerla dal passaggio di eventuali mezzi. I capi della fibra sono stati posizionati all'interno di due pozzetti, ad essi è necessario collegarsi per poter eseguire le misure.

La metodologia di installazione adottata assicura un buon contatto tra fibre e terreno (assenza di intasamento), un disturbo minimo del terreno e risulta essere più speditiva rispetto ad altre installazioni (Cola et al. 2021): l'infissione della fibra su 5 verticali di 20 m ciascuna ha richiesto un solo giorno. In alternativa all'installazione tramite penetrometro si potrebbe fare l'inserimento della stessa all'interno di un sondaggio, ma quest'ultima soluzione presenta diversi svantaggi: tempistiche e costi più elevati, utilizzo di tubo in pvc per supporto, difficoltà nell'estrazione dei rivestimenti, maggiori possibilità di urtare e danneggiare la fibra, giunture delle fibre necessarie per la creazione di un unico circuito, intasamento con materiale di caratteristiche diverse da quelle del terreno indagato.

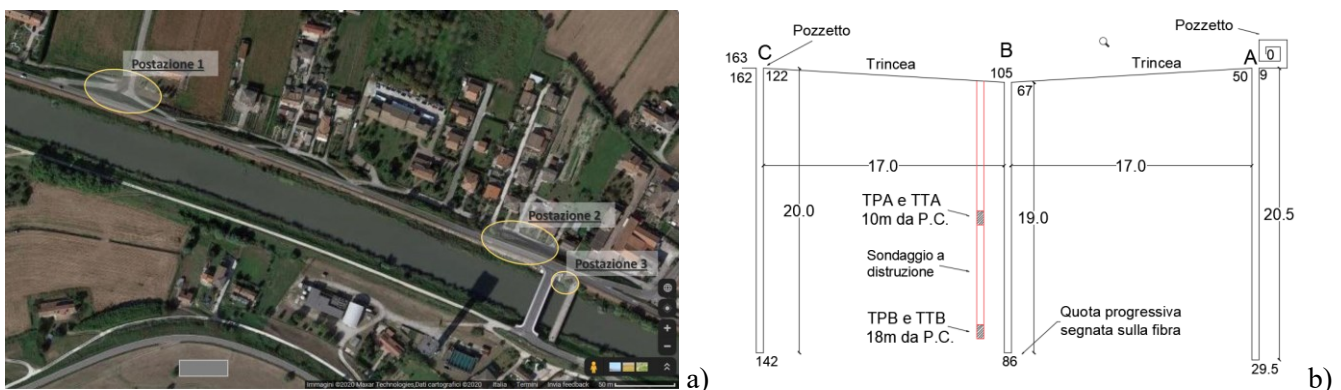


Figura 1. a) Locazione delle posizioni di monitoraggio; b) Schema di installazione della fibra presso postazione 1.

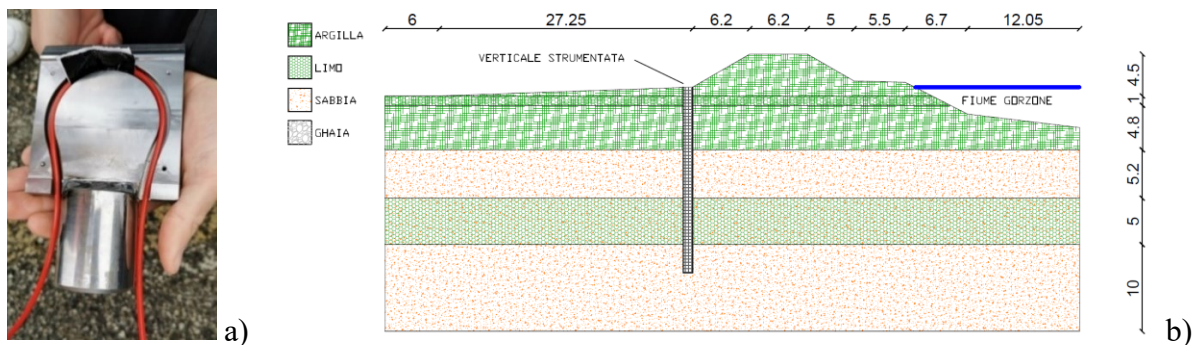


Figura 2. a) Particolare della punta a perdere con alloggiamento per la fibra; b) Sezione trasversale postazione 1.

La fibra installata è del tipo BRUsens DTS STL specifica per misure di temperatura. E' interrogata in modalità Raman con strumento Oryx SR DTS della SensorNet, che permette di acquisire un dato con risoluzione spaziale di 1 m e accuratezza della misura di temperatura di 0.5°C su una lunghezza massima di cavo di circa 2 km e con un tempo di acquisizione di circa 2 s. La frequenza di interrogazione è fissata in base alle condizioni climatiche e meteorologiche cercando di fare almeno una lettura al mese.

4. ANALISI DEI DATI ACQUISITI

In Figura 2b è riportata una sezione trasversale dell'argine in corrispondenza alla postazione 1, ottenuta sulla base delle indagini pregresse e dei nuovi dati acquisiti. In Figura 3a sono riportati gli andamenti delle altezze piezometriche, calcolate rispetto il piano campagna, e le temperature registrate dai sensori dal 25/01/2021 al 01/06/2021. La Figura 3b mostra invece un confronto tra le variazioni dell'altezza di marea a Chioggia Diga Sud (posta a 15km dal sito), del livello dell'acqua nel fiume rilevato dal diver e delle altezze piezometriche rilevate da TPA e TPB, essendo le variazioni valutate rispetto ai valori registrati al 1/3/2021. Infine, la Figura 4a mostra i profili delle temperature rilevate sulla verticale centrale della postazione 1 (verticale B in Figura 1b) alle date del 2/3/2021 e 1/4/2021.

Si può osservare come il fiume Gorzone fosse influenzato dall'andamento di marea fino alla data del 11/3/2021, quando, a seguito dell'attivazione del manufatto di regolazione di Buoro posto 2 km più a valle, il livello dell'acqua si è alzato di circa 1 m e presso le postazioni 1 e 2 sono apparse numerose e abbondanti venute d'acqua.

Le altezze piezometriche rilevate in TPA e TPB (figura 3a) sono sempre negative, fatto che indica che le falde profonde non hanno una pressione sufficiente a spingere l'acqua al di sopra del piano campagna. Inoltre l'altezza piezometrica determinata da TPB rimane sempre inferiore a quella rilevata da TPA di circa 80-120 cm, a testimoniare o che esiste una separazione idraulica tra le posizioni dei due sensori o che la distribuzione delle pressioni non è idrostatica per effetto del moto di filtrazione indotto dal fiume. Fatto significativo che emerge dagli andamenti di Figura 3b è che gli strati di sabbia presenti in profondità nella postazione 1 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 da TTA e TTB. Mentre l'acqua del fiume aumenta la sua temperatura di circa 4°C nel periodo osservato, la temperatura a 10 m 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. Anche la temperatura a 18 m scende nel periodo primaverile, anche se la sua variazione complessiva è inferiore a 1°C. Le fibre testimoniano invece una sostanziale stabilità della temperatura in profondità.

Le misure fino ad ora ottenute, anche se certamente necessitano di ulteriori valutazioni sulla base dei dati che saranno acquisiti in futuro, permettono di ipotizzare che non vi sia connessione diretta del fiume con le acque profonde e che la filtrazione che interessa gli strati di limo e sabbia in profondità non sia collegata alla comparsa dei fontanazzi dopo il 11/3/2021. È ragionevole ipotizzare, dunque, 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 a piccola profondità, quasi non osservabile nei sondaggi e rilevato mediante le prospezioni di tomografie elettriche eseguite a gennaio 2021 (non riportate qui per brevità).

Le analisi di filtrazione con il modello termo-idraulico sono state condotte in regime transitorio, partendo dalle condizioni di temperatura e livello nel fiume realmente misurate al 2/3/2021 e terminando la condizione

termo-idraulica alla data del 1/4/2021, cioè a una data successiva all'attivazione del manufatto di Buoro. Il livello di falda a grande distanza dall'argine dal lato compagna 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 di Cavarzere, posta a qualche chilometro di distanza dal sito. Il modello geotecnico del sottosuolo (figura 2b), costruito sulla base delle precedenti indagini eseguite nell'area (Bertaggia, 2014), è stato successivamente aggiustato al fine di meglio rappresentare i dati registrati dai sensori di pressione. Inoltre, è stato inserito un sottile strato di sabbia con permeabilità pari 10^{-3} m/s all'interfaccia tra argine e terreno di fondazione, al fine di poter rappresentare correttamente le venute d'acqua osservate in sito (Figura 4b).

La Figura 4a confronta gli andamenti di temperatura misurati al 1/04/2021 con quelli ottenuti con il modello. Si nota come i risultati numerici siano abbastanza coerenti con le temperature rilevate nella verticale B. Seppure i risultati ottenuti fino ad ora, e qui sommariamente riportati, costituiscano una buona base per indirizzare gli interventi di arresto dei fontanazzi, ulteriori analisi saranno eseguite nel prossimo futuro al fine di meglio calibrare il modello numerico e capire le potenzialità della fibra ottica.

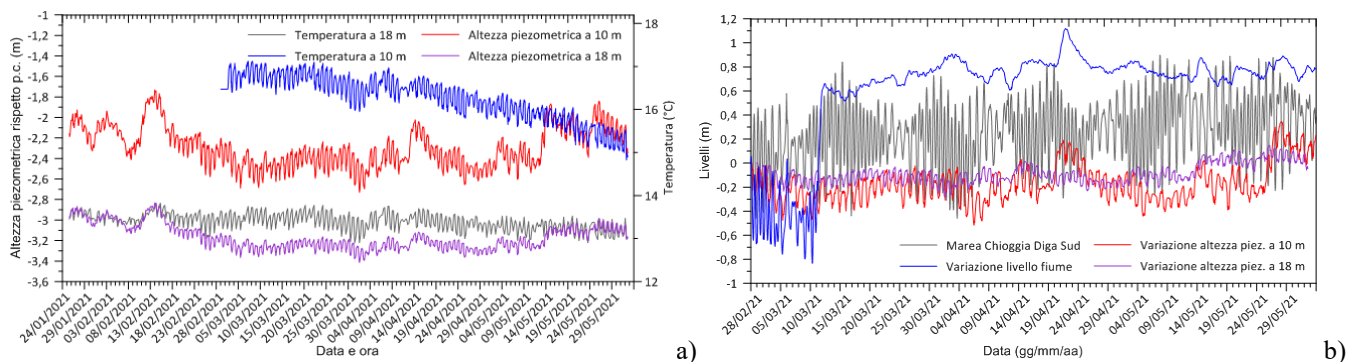


Figura 3. a) Altezze piezometriche (valutate rispetto al p.c.) e temperature rilevate dalle termocoppie; b) Confronto tra la marea di Chioggia-Diga Sud e le variazioni di livello del fiume e di pressione misurate rispetto la data del 1/3/2021.

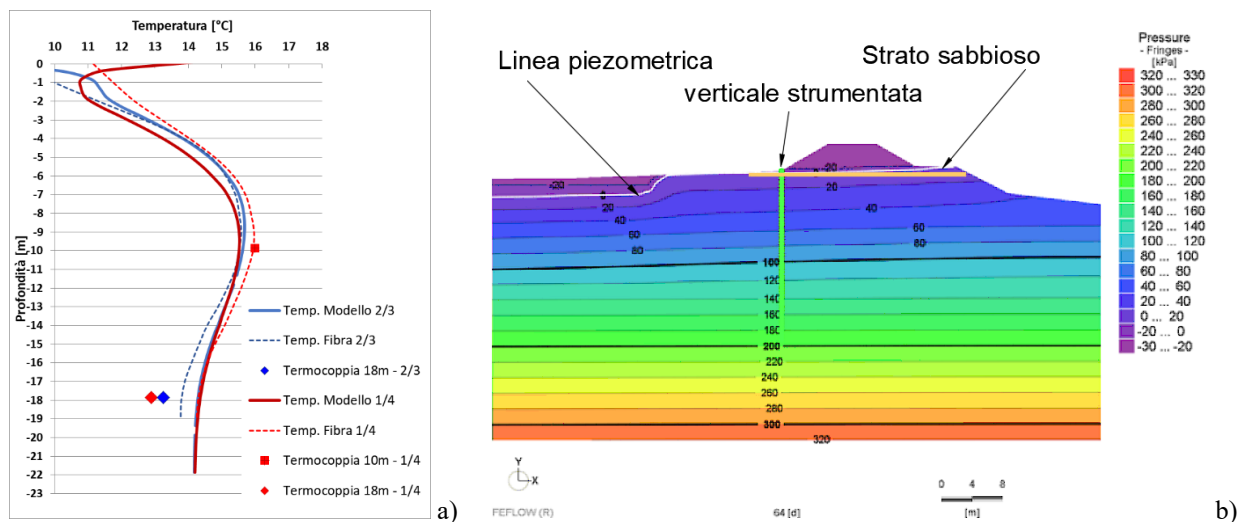


Figura 4. a) Confronto tra temperature misurate e modello numerico; b) Ricostruzione delle altezze piezometriche con le analisi numeriche alle date del 2/3/2021 e 1/4/2021.

5. BIBLIOGRAFIA

- Palmieri L., Schenato L. (2013). Distributed Optical Fiber Sensing Based on Rayleigh Scattering. *The Open Optics Journal*, 7, (Suppl-1, M7) 104-127.
- Schenato L. (2017). A review of distributed fiber optic sensors for geo-hydrological applications. *Appl. Sci.*, 7, 1-42.
- Cola S. et al., (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*. <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00475-y>.
- Bertaggia G., (2014). Analisi degli interventi di ripristino della stabilità dell'argine del fiume Gorzone in località Boscochiario (Venezia). Tesi Magistrale, Università degli studi di Padova, DICEA.