

INDAGINI GEOTECNICHE E ANALISI DI STABILITÀ DEGLI ARGINI DEL FIUME SERCHIO DOPO L'ALLUVIONE DEL DICEMBRE 2009

Barbara Cosanti

*Università di Pisa – Dipartimento di Ingegneria Civile
barbara.cosanti@for.unipi.it*

Nunziante Squeglia

*Università di Pisa – Dipartimento di Ingegneria Civile
squeglia@ing.unipi.it*

Diego Carlo Lo Presti

*Università di Pisa – Dipartimento di Ingegneria Civile
d.lopresti@ing.unipi.it*

Sommario

Nell'ultima decade del dicembre 2009 il fiume Serchio ha visto aumentare a dismisura la propria portata, a causa dello scioglimento delle nevi provocato da un innalzamento delle temperature e di un periodo ininterrotto di pioggia.

La notte del 25 dicembre l'eccessivo flusso idrico ha provocato il cedimento di un tratto di argine sia nella frazione di Santa Maria a Colle (comune di Lucca) che tra le frazioni di Nodica e Migliarino (comune di Vecchiano) causando una grave alluvione nei territori circostanti, allagati da acqua mista a fango, alta fino a 2 metri, che ha provocato ingenti danni sia alle infrastrutture presenti sul territorio che alle abitazioni. Il vicino tratto dell'autostrada A12, all'altezza dell'uscita Pisa Nord e dello svincolo con l'autostrada A11, è stato chiuso in quanto sormontato dall'ondata di piena e per pericolo di smottamenti, e le acque hanno raggiunto il vicino lago di Massaciuccoli ingrossandolo notevolmente oltre il livello di guardia.

A seguito di tale evento è stato condotto uno studio con l'obiettivo di definire lo stato dell'arginatura, individuare le possibili cause di rottura e definire delle soluzioni progettuali di massima della nuova sezione arginale.

È stata programmata una campagna di indagini, per pervenire ad una caratterizzazione geotecnica dei materiali costituenti il corpo arginale ed il terreno di fondazione e, allo scopo di giungere alla comprensione del funzionamento del tratto arginale in questione in occasione delle piene ed alla possibile spiegazione dei fenomeni che hanno portato alle rotte, sono state effettuate delle analisi numeriche con i codici di calcolo PLAXIS V9 e PLAXFLOW. L'esame della risposta strutturale calcolata ha consentito di individuare i possibili meccanismi di collasso degli argini e successivamente di individuare le possibili misure da adottare per incrementare i margini di sicurezza dell'opera. Questa attività si colloca nell'ambito di un dottorato di ricerca che ha come obiettivo finale la definizione di linee guida per il progetto, la verifica in corso d'opera, il controllo nel tempo ed il monitoraggio degli argini fluviali.

I rilevati arginali

Gli argini in terra sono rilevati di altezza generalmente inferiore ai 10 ÷ 15 m con compiti di tenuta d'acqua. Essi differiscono dalle dighe in terra sia per la loro costituzione (sono spesso realizzati con materiali recuperati nelle zone circostanti su terreni di fondazione poveri) che per le azioni a cui sono sottoposti (sono eventualmente saturi solo per periodi limitati), pertanto non possono essere progettati con gli stessi criteri utilizzati per queste ultime e attualmente non esistono linee guida adeguate alla loro progettazione, verifica e controllo nel

tempo, recepite dalla Normativa nazionale. Alcuni contributi interessanti, seppure parziali, in termini di linee guida sono rappresentati dai lavori dell'AIPO (2004 e 2007) e dell'US Army Corps of Engineers.

Gli argini in terra sono soggetti a fenomeni di collasso principalmente per le seguenti cause:

- erosione esterna, per gli argini in frodo, che può avvenire in seguito a:
 - sormonto (overtopping);
 - erosione del piede dell'argine lato fiume.
- erosione interna (seepage, piping);
- sifonamento;
- rottura meccanica, la quale, a sua volta può avvenire per:
 - instabilità;
 - cedimenti.
- azioni accidentali, come urti di natanti, nel caso di corsi d'acqua navigabili.

Nel caso esaminato, trattandosi di argini costituiti ai margini delle zone di golena e per le condizioni verificatesi durante l'evento del 25 dicembre 2009, le possibili cause di rottura sono da ricercare tra l'erosione interna, il sifonamento e la rottura meccanica.



Figura 1. Immagine della rotta.

Campagna di indagini

Lo studio effettuato aveva i seguenti obiettivi:

- Descrivere lo stato dell'arginatura in corrispondenza delle zone in cui si sono verificate le rotte;
- Individuare le possibili cause di rottura;
- Giungere ad una definizione di massima delle soluzioni progettuali della nuova sezione arginale.

A tal scopo è stata programmata una campagna di indagini, per pervenire ad una caratterizzazione geotecnica dei materiali costituenti il corpo arginale ed il relativo terreno di fondazione, che ha compreso:

- 4 sondaggi a carotaggio continuo del diametro di almeno 101 mm e lunghezza di 15 m, con prelievo di quattro campioni indisturbati mediante campionatore tipo Shelby di cui due nel corpo arginale e due nei terreni di fondazione dell'argine;
- 15 prove penetrometriche CPTU, circa una ogni 200 m, della lunghezza di 10 m a partire dalla cresta dell'argine. Ogni prova penetrometrica ha previsto una o due prove di dissipazione nei terreni di fondazione del rilevato per la definizione della permeabilità e della pressione neutra di equilibrio. Quattro prove penetrometriche sono state eseguite nella stesse sezioni in cui sono stati effettuati i sondaggi;
- 15 verticali eseguite mediante l'uso di campionatore microstratigrafico inguainante AF SHALLOW CORE SYSTEM (Principe et al. 1997) spinte fino ad una profondità di 4 m, del diametro di 38 mm con misura della compattazione del campione effettuata ogni 50 cm, eseguite nelle stesse sezioni in cui sono state effettuate le prove penetrometriche.

Le prove di laboratorio sono consistite in:

- Classificazione geotecnica del materiale mediante l'esecuzione di granulometria, aerometria e determinazione dei limiti di Atterberg su tutti i campioni indisturbati;
- Esecuzione di sette prove triassiali consolidate non drenate su sette campioni indisturbati previa verifica della saturazione del materiale;
- Esecuzione di sette prove di permeabilità mediante permeometro a pareti flessibili;
- Esecuzione di 65 determinazioni della curva granulometrica sui materiali provenienti dalle 15 verticali recuperate mediante il campionatore autoinguainante.

Modellazione geotecnica

Modello stratigrafico

La definizione del modello stratigrafico è stata ottenuta combinando le informazioni ottenute mediante i sondaggi, le prove CPTU e l'adozione del campionatore autoinguainante. Le sole prove CPTU non sarebbero state sufficienti per la ricostruzione stratigrafica in quanto esse attribuivano ai terreni esaminati proprietà coesive, palesemente in contrasto con l'evidenza.

La determinazione delle curve granulometriche ha consentito di raggruppare i materiali che costituiscono l'argine in cinque gruppi, in funzione della quantità di fine, in termini di passante allo 0.075 mm, contenuta nel materiale. I risultati mostrano che più del 90% dei terreni costituenti l'argine appartengono ai gruppi denominati "limo sabbioso", "sabbia limosa" e "sabbia grossa - ghiaia".

Peso dell'unità di volume

Il peso dell'unità di volume è stato ricavato sia mediante l'utilizzo delle colonne di terreno estratte con il campionatore autoinguainante, attraverso misure di compattazione eseguite durante l'avanzamento dello stesso da cui si è potuto risalire all'accorciamento della carota estratta, che impiegando i campioni "indisturbati".

I dati provenienti dalle due diverse fonti non si rivelano in accordo tra loro: i valori di γ determinati impiegando i campioni indisturbati sono sensibilmente maggiori.

Una possibile spiegazione di queste differenze risiede nel tipo di campionamento effettuato: nelle verticali CP la compattazione dovuta all'inserimento del campionatore era continuamente monitorata (gli accorciamenti misurati sulla colonna di circa 5 metri sono spesso intorno al metro con un massimo rilevato di 1.44 metri), mentre, la stessa operazione non era possibile durante il campionamento mediante campionatore Shelby che pertanto potrebbe aver compattato il materiale durante il prelievo, senza che l'operatore abbia avuto l'opportunità di accorgersi del fenomeno.

A supporto di questa ipotesi vi è il fatto che i valori di densità relativa ricavabili dall'elaborazione delle prove penetrometriche statiche sono generalmente bassi (spesso inferiori al 10%) e che per i materiali sottoposti ad una prova di compattazione di tipo Proctor, i valori misurati di γ_d sono molto minori di quelli ottenibili mediante compattazione a conferma che il materiale è effettivamente poco addensato.

Pertanto si ritiene di poter caratterizzare i materiali costituenti il corpo arginale con i valori ricavati mediante l'utilizzo delle colonne di terreno estratte con il campionatore autoinguinante: rispettivamente 12.8 kN/m³ per il limo sabbioso, 12.3 kN/m³ per la sabbia limosa e 17.7 kN/m³ per la sabbia grossa.

Parametri di resistenza

Per la determinazione dei parametri di resistenza ci si è avvalsi delle prove triassiali effettuate sui campioni prelevati nei sondaggi e delle prove penetrometriche.

Gli angoli di resistenza al taglio sono stati ricavati dalla resistenza alla punta q_c , mediante il calcolo della densità relativa (Jamiolkowski et al. 1985), ricorrendo successivamente alle correlazioni empiriche di Schmertmann (1978). I valori ottenuti nelle prove di laboratorio, che manifestano sistematicamente un comportamento dilatante, sono maggiori di quelli derivati dalle prove in sito coerentemente con quanto discusso al paragrafo precedente.

Per le ragioni esposte, si è ritenuto plausibile l'utilizzo dei parametri di resistenza ricavati dalle prove penetrometriche.

Permeabilità

La permeabilità è stata ricavata dalle prove di dissipazione effettuate durante il corso delle prove penetrometriche e dalle prove di permeabilità effettuate in laboratorio sui campioni prelevati nei fori di sondaggio.

I valori delle permeabilità derivati dalle prove di laboratorio risultano mediamente più elevati di quelli riscontrati in sito: ciò non sorprende in quanto l'operatore nello scegliere il punto in cui effettuare la dissipazione "cerca" la sovrappressione maggiore che, però, è associabile ad un maggior contenuto di fine, per tale ragione si ritengono più appropriati i valori dedotti dalle prove di laboratorio.

Per i terreni più permeabili, del gruppo 4, rinvenibili essenzialmente alla base degli strati precedenti, ad una profondità di 10 – 12 m dalla cresta dell'argine, si è assunta una permeabilità di un ordine di grandezza superiore a quella dei terreni del gruppo 3.

Altri parametri

La posizione della falda, durante la campagna di indagine, è stata rinvenuta alla profondità di circa 8 metri dalla cresta dell'argine. Con tutta probabilità il livello della falda è variabile e legato alle oscillazioni del pelo libero dell'acqua nel fiume.

Infine la rigidezza E_{ref} , assunta dal materiale per una tensione di confinamento di 100 kPa, ricavata dalle prove penetrometriche, può essere assunta pari a 5 Mpa per il limo sabbioso e 3 Mpa per la sabbia limosa.

Gruppo	Classificazione	γ [kN/m ³]	φ' [°]	k [m/s]	E_{ref} [MPa]
2	Limo Sabbioso	12.8	32.3	$4.2 \cdot 10^{-7}$	5
3	Sabbia Limosa	12.3	33.9	$1.7 \cdot 10^{-6}$	3
4	Sabbia Grossa	17.7	38.5	10^{-5}	

Tabella 1. Modellazione geotecnica

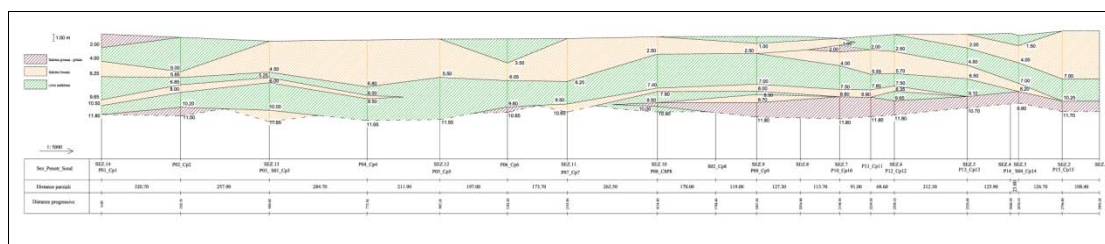


Figura 1. Sezione stratigrafica

Analisi

Il caso è stato esaminato mediante modellazione numerica agli elementi finiti mediante il software PLAXFLOW e PLAXIS V9. Le analisi erano volte alla determinazione della lunghezza ottimale delle palancole da installare in modo da ottenere la massima efficienza dell'intervento con il minimo costo. Poiché la presenza delle palancole riduceva praticamente a zero il rischio di erosione interna, lo studio è stato concentrato sulla lunghezza delle stesse. Diverse analisi in moto vario sono state effettuate simulando le onde di piena del fiume sia in assenza di alcuna opera di rinforzo dell'argine, sia in presenza del palancolato metallico con diverse lunghezze. In assenza del palancolato metallico si è verificata la possibilità di una instabilizzazione dell'argine qualora questo venga a contatto con l'acqua in modo prolungato, mentre le analisi effettuate inserendo il palancolato metallico hanno dato come indicazione ottimale la lunghezza di sette metri. In realtà tale lunghezza ottimale è stata fortemente influenzata dalla presenza di uno strato più permeabile posto a circa sei metri di profondità e presumibilmente in collegamento idraulico con il corso d'acqua.

Considerazioni conclusive

Il primo risultato di rilievo riguarda i valori del peso dell'unità di volume: questi, in particolar modo per il corpo arginale, sono particolarmente bassi ed indicativi di uno scarso addensamento del materiale. Sebbene non vi siano altre indicazioni, tale evidenza sperimentale supporta lo scenario di un cedimento del corpo arginale causato da erosione interna (piping).

Tale scenario è supportato anche dalla possibilità emersa dalle analisi che una prolungata esposizione del corpo arginale all'acqua, sia proveniente dalla golena sia dovuta alle eventuali precipitazioni, produca una saturazione del corpo arginale con comparsa della linea di saturazione sul paramento lato campagna.

Le analisi effettuate hanno messo in evidenza la necessità della installazione di un setto impermeabile che protegga il corpo del rilevato da un eccessivo incremento del grado di saturazione. L'installazione di una tale protezione ha permesso di incrementare la sicurezza nei confronti delle rotture meccaniche e ridurre la possibilità che si verifichi il fenomeno di erosione interna, tale soluzione non garantisce per il fenomeno del sifonamento. Le lunghezze dei setti sono state determinate imponendo una penetrazione del setto per circa un metro nei materiali meno permeabili.

È stata infine installata una palanca metallica prototipo la quale è sottoposta a monitoraggio per valutarne la corrosione nel tempo.

Attualmente è in corso una campagna di indagini relativa agli argini del Serchio nelle Province di Lucca e Pisa. I risultati attualmente disponibili, in zone differenti da quelle in cui si sono verificate le rotture, danno indicazioni molto diverse in termini di resistenza e grado di addensamento.

Bibliografia

- A.I.P.O. (2007). *Integrazioni delle linee guida per l'esecuzione degli interventi di adeguamento delle arginature del Po sia in corso di esecuzione che di progettazione*. 15 Novembre 2007, Parma.
- A.I.P.O. (2004) e Università degli Studi di Brescia, Università degli Studi di Parma, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" e Università degli Studi di Napoli "Federico II", (2004). *Rapporto Finale: Convenzione per lo studio delle condizioni di stabilità degli argini fluviali e per la definizione di una metodologia progettuale*.
- Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T. & Lancellotta, R., 1985. *New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils*. Theme Lecture, Proc. XI ICSMFE, San Francisco, CA.
- Principe C., Malfatti A., Rosi M., Ambrosio M. Fagioli M.T. 1997. *Metodologia innovativa di carotaggio microstratigrafico: esempio di applicazione alla tefrostratigrafia di prodotti vulcanici distali*. *Geologia Tecnica Ambientale* Vol 39, 4/97. In Italian.
- Schmertmann J.H. (1978). *Guidelines for cone penetration test performance and design*. US Dept. of Transportation, FHWA, R.78-209. Washington D.C.
- U.S. Army Corps of Engineers. *Engineering and Design. Design and construction of levees*. EM 1110-2-1913. 30 Aprile 2000. Washington D.C.