

ANALISI PREDITTIVE DEL COMPORTAMENTO IDRO-MECCANICO DI UN MODELLO DI ARGINE FLUVIALE IN CONDIZIONI DI FLUSSO TRANSITORIO

Elena Dodaro¹, Marianna Pirone², Carmine Gerardo Gragnano¹, Roberta Ventini², Daniela Giretti³, Francesco Zarattini⁴, Vincenzo Fioravante⁵, Fabio Gabrieli⁴, Guido Gottardi¹, Claudio Mancuso², Paolo Simonini⁴

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna
elena.dodaro2@unibo.it, carmine.gragnano2@unibo.it, guido.gottardi2@unibo.it

² Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Napoli, Federico II
marianna.pirone@unina.it, roberta.ventini@unina.it, mancuso@unina.it

³ Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate, Università degli Studi di Bergamo
giretti@ismgeo.it

⁴ Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Padova
francesco.zarattini@phd.unipd.it, fabio.gabrieli@unipd.it, paolo.simonini@unipd.it

⁵ Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara
vincenzo.fioravante@unife.it

Sommario

Il frequente manifestarsi di eventi alluvionali per collasso di opere in terra costituisce un problema di particolare rilevanza nella valutazione del rischio idrogeologico e della pianificazione territoriale. In questo contesto risulta cruciale un'accurata stima delle condizioni di stabilità che tenga conto dello stato di parziale saturazione dei terreni costituenti il rilevato. Altrettanto importante è tenere conto delle condizioni di flusso transitorio che si instaurano negli argini e nei terreni di fondazione a seguito delle continue variazioni del livello idrometrico dei corsi d'acqua. Tutto ciò influenza notevolmente la risposta idro-meccanica delle opere in parola. In tale prospettiva la nota illustra uno studio numerico, basato sull'approccio agli elementi finiti e sul metodo dell'Equilibrio Limite, per l'analisi del comportamento di un argine fluviale rappresentativo delle opere di difesa idraulica degli affluenti alpini e appenninici del fiume Po. Lo studio proposto tiene debito conto delle condizioni di parziale saturazione del corpo arginale interessato da un moto di filtrazione in regime transitorio. Le analisi numeriche proposte costituiscono parte integrante della progettazione di una prova in centrifuga geotecnica su un modello fisico in scala ridotta, finalizzata a investigare la vulnerabilità delle infrastrutture arginali nei confronti di eventi di piena.

1. Inquadramento tematico e di contesto

Il ricorrere di eventi alluvionali imputabili alle mutate condizioni climatiche, la progressiva urbanizzazione e la concentrazione delle attività produttive in aree ad elevata pericolosità, hanno riportato all'attenzione il tema della valutazione del rischio idrogeologico associato al collasso delle opere arginali in terra. A livello europeo si stima che a partire dal 2000 le esondazioni dei corsi d'acqua abbiano causato almeno 700 vittime, l'evacuazione di circa mezzo milione di persone e danni economici dell'ordine di 25 miliardi di euro (European Environment Agency, 2018). Il secondo *Rapporto sul dissesto idrogeologico in Italia* elaborato dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), evidenzia che in Italia le aree a pericolosità idraulica elevata si estendono per ben 12.405 km², pari al 4,1% del territorio nazionale (ISPRA, 2018). Nonostante i dati allarmanti, gli investimenti destinati alla manutenzione e al rinforzo delle opere di difesa fluviale sono stati relativamente limitati; inoltre, in molte nazioni europee, non si è ancora provveduto a redigere specifiche normative o

raccomandazioni tecniche che garantiscano un adeguato livello prestazionale di tali strutture, con un drammatico impatto sulla sicurezza dei territori. È in questo contesto che si inquadra il Progetto di Rilevante Interesse Nazionale - PRIN 2017 – RedReef, acronimo di *Risk assessment of Earth Dams and River Embankment to Earthquakes and Floods*, volto a: (i) sviluppare criteri e metodologie atti a valutare le condizioni di sicurezza e vulnerabilità di argini fluviali e dighe in terra nei confronti di eventi sismici e di piena; (ii) supportare le amministrazioni locali nelle azioni di mitigazione del rischio idrogeologico. Lo studio, supportato dall'analisi di casi ben documentati, dall'esecuzione di simulazioni numeriche e da campagne sperimentali avanzate, si avvale, inoltre, di test statici e dinamici in centrifuga geotecnica su modelli fisici in scala ridotta, parzialmente saturi e opportunamente strumentati.

La presente nota illustra i principali risultati di alcune analisi numeriche condotte nella fase preliminare del progetto *RedReef* allo scopo di predire la risposta idro-meccanica di un modello di argine fluviale sottoposto a una serie di picchi idrometrici e investigare contestualmente l'insorgenza di possibili meccanismi di collasso per instabilità delle sponde lato fiume e lato campagna. Diversi studi (Hooke, 1979 e Thorne, 1982) concordano nell'identificare quale causa di innesco del fenomeno di macro-instabilità dei pendii la riduzione della resistenza a taglio dei terreni indotta dalle variazioni delle pressioni interstiziali, causate da processi di infiltrazione d'acqua. La comprensione approfondita di tale fenomeno richiede l'adozione di approcci di calcolo numerico, finalizzati alla determinazione delle caratteristiche di filtrazione in regime transitorio e della resistenza mobilitata sulle superfici potenzialmente instabili.

2. Caso studio di riferimento

Lo schema della sezione e i materiali considerati nell'ambito del presente lavoro sono stati selezionati con riferimento al caso studio delle arginature degli affluenti alpini e appenninici del fiume Po, di recente interessate dalla formazione di alcune catastrofiche breccie; basti pensare alla rotta dell'argine in destra idraulica del Secchia, in località San Matteo (MO), del 19 gennaio 2014 (D'Alpaos et al., 2014), o all'esondazione del fiume Enza, a Lentigione (RE) il 12 dicembre 2017 o, ancora, all'improvviso collasso verificatosi lungo il fiume Panaro, in località Gaggio di Castelfranco Emilia (MO), nel dicembre 2020 (Menduni et al., 2021), Figura 1. Tali opere di difesa idraulica presentano generalmente un'altezza media rispetto al piano campagna compresa fra i 5 e i 10 metri, con sponde inclinate di 35° che in alcuni tratti diventano particolarmente acclivi raggiungendo inclinazioni fino a 50°. Il terreno che costituisce i corpi arginali risulta in prevalenza sabbia limosa o limo sabbioso, con percentuali piuttosto elevate di materiale granulare nei primi 5-6 m di profondità; talvolta si riscontra la presenza di argilla nelle porzioni sommitali dei rilevati. Le unità fondali consistono in depositi alluvionali limosi e argillosi; la frazione fine è ovunque caratterizzata da plasticità bassa o nulla. Il contenuto d'acqua naturale del terreno e il grado di saturazione tendono generalmente ad aumentare con la profondità, ma il corpo arginale risulta parzialmente saturo e presenta livelli di suzione non trascurabili. Viceversa, la maggior parte dei terreni di fondazione risulta satura.



Fig 1. Recenti collassi arginali: (a) San Matteo (MO), fiume Secchia, 2014; (b) Lentigione (RE), fiume Enza, 2017; (c) Castelfranco Emilia (MO), fiume Panaro, 2020.

Con l'intento di riprodurre nel modello di argine la stratigrafia appena richiamata, una miscela costituita dal 70% di *Ticino Sand* (TS) e dal 30% di *Pontida Clay* (PON) è stata selezionata per la realizzazione del modello di rilevato, mentre per la fondazione si è scelto di adottare uno strato omogeneo di *Pontida Clay*. La *Ticino Sand* è una sabbia uniforme da grossolana a media, ben nota in letteratura, costituita da frammenti spigolosi e particelle di forma tondeggianti (Jamiolkowski et al., 1996). La *Pontida Clay* è un limo argilloso a bassa plasticità depositato in ambiente lacustre post-glaciale e reperibile presso una

cava di materiale fine nei pressi di Bergamo.

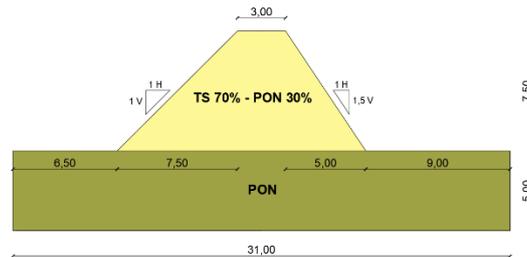


Fig 2. Geometria della sezione arginale analizzata.

La geometria della sezione arginale di riferimento (Figura 2) è stata definita coniugando la necessità di adottare uno schema facilmente replicabile in un modello fisico in scala ridotta e la volontà di investigare le modalità di innesco di un meccanismo di collasso tipico per il caso studio in esame, ovvero l'instabilità delle sponde di monte e/o valle. Assoggettato ad una accelerazione di 50 g prevista nelle prove in centrifuga, il modello adottato riproduce un rilevato di forma trapezoidale, con altezza di 7,5 m rispetto al piano campagna, pendenza dei paramenti pari a 1H:1V dal lato fiume e 1H:1,5V dal lato campagna e una cresta di larghezza di 3 m.

3. Caratterizzazione idro-meccanica dei materiali

Al fine di ricreare in laboratorio condizioni di addensamento simili a quelle dei terreni arginali di sito (tipicamente costipati per migliorarne le proprietà di resistenza), la caratterizzazione idro-meccanica della miscela TS 70% - PON 30% è stata eseguita all'*optimum* Proctor standard (ASTM D698-12, 2021) caratterizzato da un peso secco dell'unità di volume $\gamma_d = 20,3 \text{ kN/m}^3$ e un contenuto d'acqua $w = 8,7\%$. Le indagini sperimentali sulla *Pontida Clay* sono state invece effettuate su provini realizzati a partire da uno *slurry* caratterizzato da un contenuto d'acqua naturale di 1,75 volte il limite liquido ($LL = 23,08\%$). Lo *slurry* è stato poi consolidato sotto una tensione verticale efficace di 200 kPa al fine di simulare lo stato tensionale tipico di un deposito alluvionale.

Il comportamento tensione-deformazione della miscela TS 70% - PON 30% è stato analizzato mediante prove triassiali consolidate drenate (TXCU), applicando differenti tensioni di confinamento ai provini; i parametri di resistenza al taglio di picco ottenuti sono $\varphi' = 42,5^\circ$, $c' = 2,5 \text{ kPa}$. Analogamente le proprietà meccaniche della *Pontida Clay* sono state stimate mediante una serie di prove triassiali consolidate drenate e non drenate (TXCD-TXCU), ottenendo un $\varphi' = 33^\circ$ e una $c' = 2 \text{ kPa}$.

Le proprietà idrauliche e di ritenzione della miscela e del limo argilloso (sintetizzate in Tabella 1) sono state attentamente valutate sulla base di svariati test di evaporazione, la cui procedura è stata introdotta da Wind nel 1966 e successivamente modificata da altri autori (Wendroth et al., 1993). Il fitting dei dati sperimentali è stato eseguito in accordo con il modello idraulico non isteretico di van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980). La permeabilità idraulica satura k_{sat} è stata ottenuta mediante prove in permeametro a carico costante, per quanto concerne la miscela TS 70% - PON 30% e dall'interpretazione di una serie di prove edometriche standard, in funzione dei coefficienti di consolidazione primaria c_v e di compressibilità m_v , nel caso della *Pontida Clay*.

Per ulteriori dettagli sulle modalità di esecuzione delle prove e sulle apparecchiature impiegate nell'ambito della campagna sperimentale si rimanda a Ventini et al., 2021.

Materiale	k_{sat} (m/s)	θ_r (m^3/m^3)	θ_s (m^3/m^3)	α_{VG} (kPa^{-1})	n_{VG} (-)	m_{VG} (-)	l (-)
TS 70% - PON 30%	$1,23 \times 10^{-7}$	0,012	0,211	0,013	1,240	0,193	-3,347
PON	$4,13 \times 10^{-10}$	0,000	0,373	0,007	1,455	0,313	-0,584

Tabella 1. Valori medi delle proprietà idrauliche e di ritenzione dei materiali TS 70% - PON 30% e PON: permeabilità satura (k_{sat}); parametri del modello di van Genuchten - Mualem (θ_r contenuto d'acqua volumetrico residuo; θ_s contenuto d'acqua volumetrico saturo; α_{VG} , n_{VG} , m_{VG} ed l parametri di fitting).

4. Modellazione numerica

4.1 Analisi di filtrazione

Allo scopo di investigare la risposta idraulica del modello di argine oggetto di studio si è impiegato il software FEM SEEP/W, in grado di risolvere problemi di filtrazione sia in mezzi saturi che parzialmente saturi. Gli algoritmi risolutivi di cui si avvale il programma si basano sulla legge di Darcy, originariamente formulata per i mezzi saturi. L'equazione differenziale alle derivate parziali che governa la filtrazione in regime transitorio nei terreni parzialmente saturi è la legge di conservazione della massa di Richards, la quale stabilisce che, considerato un elemento di volume, la differenza fra il flusso entrante ed uscente è pari in ogni istante alla variazione del contenuto d'acqua volumetrico (Richards, 1931). Si riporta di seguito tale equazione, espressa nella forma implementata nel codice SEEP/W:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

dove h è il carico idraulico totale, k_x e k_y sono la permeabilità idraulica rispettivamente nelle direzioni x e y , Q è il flusso, θ il contenuto volumetrico d'acqua e t il tempo. Tale modello assume implicitamente l'ipotesi di scheletro solido rigido, che potrebbe in alcuni casi risultare poco rigorosa; tuttavia, considerando la composizione prevalentemente granulare della miscela TS 70% - PON 30% e l'elevato grado di addensamento, tale assunzione è stata giudicata accettabile. A seguito di una progressiva ottimizzazione, la *mesh* di calcolo, non strutturata, adottata sull'intero dominio, risulta formata da 5637 elementi triangolari e quadrangolari, con una dimensione dei lati approssimativamente pari a 0,20 m.

4.2 Condizioni iniziali e al contorno

La distribuzione iniziale della pressione interstiziale e della suzione rappresenta un aspetto cruciale per l'analisi del fenomeno di filtrazione nel corpo arginale e per la valutazione delle relative condizioni di stabilità. Nel presente studio, per tener conto dello stato iniziale di parziale saturazione del terreno si è assegnata una suzione costante di 4,5 kPa a tutto il corpo arginale, valore sperimentalmente misurato dopo il costipamento della miscela TS 70% - PON 30% all'*optimum* Proctor standard (Ventini et al, 2021). La posizione iniziale della falda è stata fissata al piano di campagna. Assumendo tali condizioni iniziali è stata preliminarmente condotta un'analisi di filtrazione in regime transitorio finalizzata a simulare lo *spin-up* in centrifuga del modello (Figura 4a).

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, tenendo presente che il modello fisico è collocato in un contenitore rigido, i bordi laterali e quello inferiore della fondazione sono stati considerati impermeabili. Alla cresta dell'argine e al paramento lato campagna sono state assegnate condizioni di flusso nullo con '*potential seepage face review*', che assicura per tale contorno un valore di pressione neutra al massimo pari a zero. Infine, per simulare le fluttuazioni del livello idrometrico di un fiume, alla superficie del modello interessata (lato fiume) è stato assegnato un carico idraulico totale variabile nel tempo. La funzione che descrive tale variabilità è stata definita con l'intento di (i) simulare la risposta idraulica di un argine reale in regime di filtrazione transitoria e (ii) ridurre progressivamente le condizioni di stabilità del modello incrementandone i livelli di saturazione, ed è costituita da una serie di tre picchi idrometrici caratterizzati dalle medesime quote massime e velocità di invaso, con livello idrometrico di svaso via via crescente. Le analisi si concludono con un picco idrometrico persistente (25gg) per la simulazione di un regime di filtrazione simile allo stazionario; lo studio ricopre un intervallo temporale complessivo pari a 120 giorni (Figura 4b).

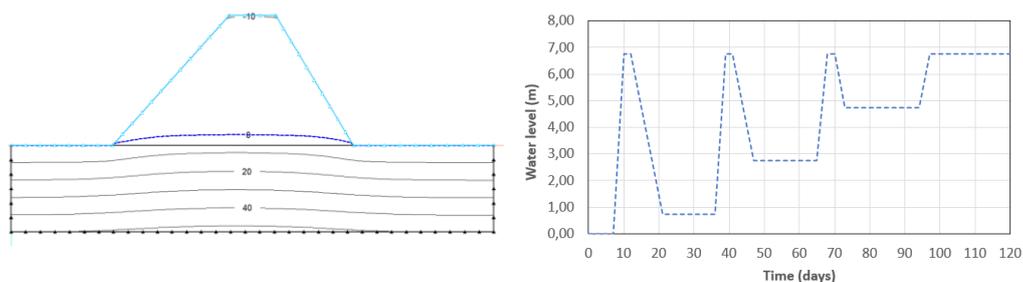


Figura 4. A destra condizioni iniziali determinate mediante lo *spin-up* del modello (intervallo isobare 10 kPa), a sinistra idrogramma di riferimento per l'analisi di filtrazione in regime transitorio.

Nell'ambito della presente modellazione sono stati trascurati gli effetti delle precipitazioni e dei fenomeni evapo-traspirativi.

4.3 Analisi di stabilità

La distribuzione delle pressioni interstiziali ottenuta dall'analisi di filtrazione è stata importata nel codice di calcolo SLOPE/W e assunta quale input per la valutazione delle condizioni di sicurezza di entrambi i paramenti dell'argine. Le analisi di stabilità sono state condotte con il metodo all'Equilibrio Limite di Morgenstern e Price (1965). Le superfici di scorrimento analizzate sono state generate impostando dei vincoli geometrici in corrispondenza della cresta e dei piedi dell'argine ai volumi potenzialmente instabili. Il criterio di resistenza utilizzato è quello di Vanapalli et al., (1996), scelto per tener conto dell'influenza della suzione e del grado di saturazione effettivo sulla resistenza al taglio dei terreni. Il criterio, si può esprimere nella forma:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\varphi' + (u_a - u_w)S_e\tan\varphi'$$

con: τ resistenza al taglio del terreno, σ_n tensione normale totale, u_a pressione interstiziale dell'aria, u_w pressione interstiziale dell'acqua, c' coesione efficace, φ' angolo di resistenza al taglio efficace e S_e grado di saturazione effettivo.

4.4 Risultati e considerazioni

I principali risultati dell'analisi di filtrazione in regime transitorio in termini di pressioni interstiziali sono riportati in Figura 5, con riferimento a tre istanti ritenuti particolarmente significativi.

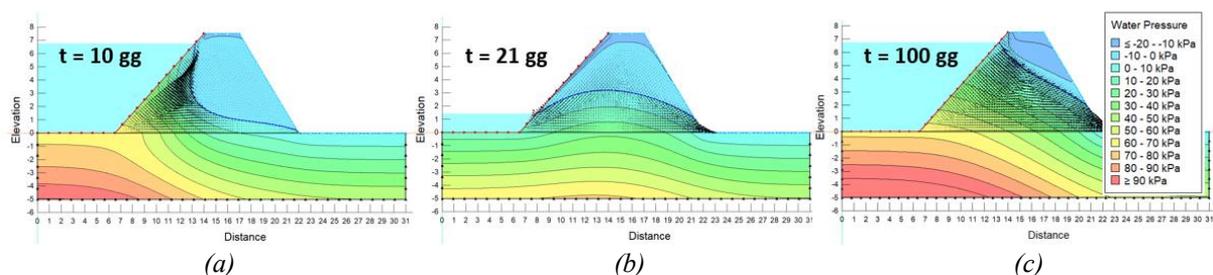


Figura 5. Distribuzione delle pressioni interstiziali nell'ambito dell'analisi di filtrazione in regime transitorio: (a) all'inizio del primo picco idrometrico; (b) al termine del primo svaso; (c) durante la persistenza dell'ultimo picco idrometrico. La linea di saturazione e i vettori velocità di flusso sono rappresentati rispettivamente mediante una linea blu tratteggiata e tramite delle frecce nere.

In base alla concentrazione dei vettori rappresentanti le velocità del flusso idrico, in figura è possibile osservare che il moto di filtrazione si sviluppi principalmente nel corpo arginale a causa della significativa differenza di permeabilità fra tale unità e i terreni di fondazione ($k_{sat}=1,23 \times 10^{-7}$ m/s e $4,13 \times 10^{-10}$ m/s, rispettivamente). Durante il primo evento di piena (Fig. 5a) l'avanzamento del fronte di imbibizione nel rilevato è già significativo, difatti più di un terzo del corpo arginale risulta saturo per effetto delle proprietà idrauliche e di ritenzione della miscela TS 70% - PON 30% e di durata e intensità dell'evento di piena simulato. In seguito al primo svaso (Fig. 5b) la superficie freatica non ritorna nella posizione iniziale, bensì rimane a quota considerevole in corrispondenza del piede lato monte; in questa fase si verifica inoltre un'inversione del moto di filtrazione. Infine, la persistenza del picco idrometrico favorisce l'avanzamento del fronte di imbibizione verso il paramento di valle (Fig. 5c), con un conseguente incremento delle pressioni interstiziali e significativa riduzione della resistenza a taglio, potenzialmente in grado di innescare fenomeni di collasso.

La Figura 6 raggruppa le superfici di scorrimento risultanti dalle analisi di stabilità di entrambi i paramenti dell'argine secondo fasce omogenee di fattori di sicurezza, identificati da bande di diverso colore ('Safety Map', Baker, Leshchinsky, 2001). Dai risultati dello studio numerico si evidenzia il raggiungimento di possibili condizioni di instabilità del paramento di valle solo durante l'ultimo evento di piena, con il fattore di sicurezza critico che scende anche al di sotto dell'unità. Il versante lato fiume, è invece caratterizzato da un coefficiente di sicurezza minimo pari a 1,22 in corrispondenza del primo svaso e risulta dunque stabile durante tutta l'analisi.

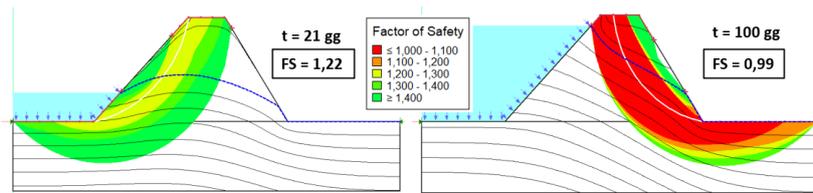


Figura 6. Safety Maps relative ai pendii di monte e valle e distribuzioni delle pressioni interstiziali associate ai seguenti step di analisi: (i) fine primo svaso e (ii) dopo tre giorni di persistenza dell'ultimo picco idrometrico.

5. Conclusioni

In questa nota è stato sinteticamente presentato uno studio numerico, basato su un'accurata caratterizzazione idro-meccanica dei materiali, finalizzato alla valutazione della vulnerabilità delle infrastrutture arginali nei confronti di eventi di piena. Le simulazioni numeriche proposte costituiscono parte integrante della progettazione di successive prove statiche in centrifuga geotecnica. Alcuni aspetti relativi alla definizione dello schema geometrico di riferimento, alla scelta dei materiali e delle condizioni iniziali e al contorno da considerare nell'ambito della modellazione sono stati brevemente discussi. Le analisi di filtrazione e di stabilità, condotte rispettivamente secondo approcci agli Elementi Finiti e all'Equilibrio Limite, hanno evidenziato la possibilità che una serie di picchi idrometrici consecutivi e temporalmente prossimi possano generare un progressivo aumento delle pressioni interstiziali nel corpo arginale e una drastica diminuzione della resistenza al taglio dei terreni, risultando potenzialmente causa dell'innescò di meccanismi di instabilità del corpo arginale stesso.

Fonti di finanziamento

Il presente lavoro è stato realizzato nell'ambito delle attività del Progetto di Rilevante Interesse Nazionale - PRIN 2017 - 'Risk Assessment of Earth Dams and River Embankment to Earthquakes and Floods' (RedReef, prot. 2017YPMBWJ), finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca.

Bibliografia

- ASTM D698-12(2021). "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))", West Conshohocken, PA www.astm.org
- Baker, R.; Leshchinsky, D. (2001). "Spatial distribution of safety factors". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127, 135–145.
- D'Alpaos L., Brath A., Fioravante V., Gottardi G., Mignosa P. and Orlandini S. (2014). "Relazione tecnico-scientifica sulle cause del collasso dell'argine del fiume Secchia avvenuto il giorno 19 Gennaio 2014 presso la frazione San Matteo".
- European Environment Agency. (2018). "Floods". <https://www.eea.europa.eu/archived/archivedcontent-water-topic/water-resources/floods>
- Hooke, J.M. (1979). "An analysis of the processes of river bank erosion". *Journal of Hydrology*. 1979, 42, 39–62.
- ISPRA (2018). "Rapporto sul dissesto idrogeologico in Italia", Seconda edizione, Rapporti 287/2018.
- Jamiolkowski, M., O'Neill, D., Bellotti, R., Lo Presti, D. (1996). "Anisotropy of small strain stiffness in Ticino sand". *Géotechnique*. 46, 1, 115-131.
- Menduni, G., Cocchi, R., Manselli, L., Simonini, P. (2021). "Relazione di dettaglio". Commissione tecnico-scientifica per la valutazione delle cause all'origine della rotta arginale lungo il fiume Panaro in località Gaggio di Castelfranco Emilia.
- Morgenstern, N.R.; Price, V.E. "The analysis of the stability of general slip surfaces". *Géotechnique*, 15, 79-93.
- Richards, L.A. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Int. J. Appl. Phys.* 1931, 1, 318–333.
- Thorne, C. (1982). "Processes and mechanisms of river bank erosion". In *Gravel-Bed Rivers: Fluvial Processes, Engineering and Management*.
- Van Genuchten, M.T. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". *Soil Science Society of America Journal*, 4, 892–898.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E., Clifton, A.W. (1996). "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction." *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 379–392.
- Ventini, R., Dodaro, E., Gragnano, C.G., Giretti, D., Pirone, M. (2021). Experimental and numerical investigations of a river embankment model under transient seepage conditions. *Geosciences*, 11, 192.
- Wendroth O., Ehlers W., Hopmans J., Kage H., Halbertsma J., Wosten, J. (1993). "Reevaluation of the evaporation method for determining hydraulic functions in unsaturated soils", *Soil Science Society of America Journal*, 57, 1436–1443.