

## SPOSTAMENTI INDOTTI DALLE OSCILLAZIONI DI FALDA NEI RIPORTI DEL CENTRO STORICO DI ROMA

Gorizia D'Alessio

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Roma Tor Vergata*  
*gorizia.d.alessio@uniroma2.it*

Francesca Casini

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Roma Tor Vergata*  
*francesca.casini@uniroma2.it*

Giulia Guida

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Roma Tor Vergata*  
*giulia.guida@uniroma2.it*

### Sommario

Questa nota presenta uno studio il cui obiettivo è la valutazione degli effetti dell'oscillazione di falda indotta dalla variazione di portata del fiume Tevere nei terreni di riporto del centro storico di Roma. Tali effetti sono stati analizzati in termini di spostamento cumulato conducendo analisi numeriche con un modello idro-meccanico accoppiato su colonne rappresentative i terreni di riporto della zona di interesse. Il modello costitutivo adottato è il Barcelona Basic Model (BBM) (*Alonso et al, 1990*), un modello elasto-plastico inelastico adatto a descrivere il comportamento di terreni parzialmente saturi.

### 1. Introduzione

In ambiente urbano, la comunità scientifica si è dedicata alla mappatura e al monitoraggio temporale dei cedimenti del terreno, creando mappe come quella di Fig. 1 (*Scifoni et al, 2016*). In contesti come quelli della città di Roma, considerando l'importanza storico-culturale del costruito in ambiente urbano, risulta di fondamentale importanza studiare gli effetti di tali cedimenti su edifici e strutture e comprenderne le possibili cause al fine di effettuare una corretta previsione delle aree suscettibili a questo tipo di fenomeno. Le variazioni stagionali di portata del fiume Tevere determinano, nei terreni limitrofi (quali quelli del centro storico di Roma), oscillazioni della falda superficiale inducendo cicli di imbibizione-essiccamento che possono causare cedimenti al piano di posa delle fondazioni, potenzialmente tali da indurre danni alle strutture. Inoltre, variazioni del livello della falda si traducono in variazioni di spinte esercitate dal terreno sulle strutture arginali del fiume (*Casini et al, 2022*). La Fig. 1 mostra come effettivamente i cedimenti di entità maggiore si abbiano in corrispondenza delle zone in prossimità del fiume raggiungendo valori dell'ordine di 80-100 mm. Questo lavoro si inquadra nell'ambito del progetto Tiber'S (Le strutture di inalveazione del Tevere e la sicurezza delle aree del centro di Roma: analisi geotecnica, monitoraggio satellitare, indagine storica) che ha come fine ultimo la messa a punto di una procedura, innovativa e multidisciplinare, per il monitoraggio del patrimonio infrastrutturale ed edilizio compreso nel tratto urbano del Tevere e la valutazione predittiva dei rischi legati alle variazioni delle oscillazioni di falda e ai loro effetti sui terreni delle aree limitrofe al fiume (Gruppi di Ricerca 2020,

Regione Lazio).

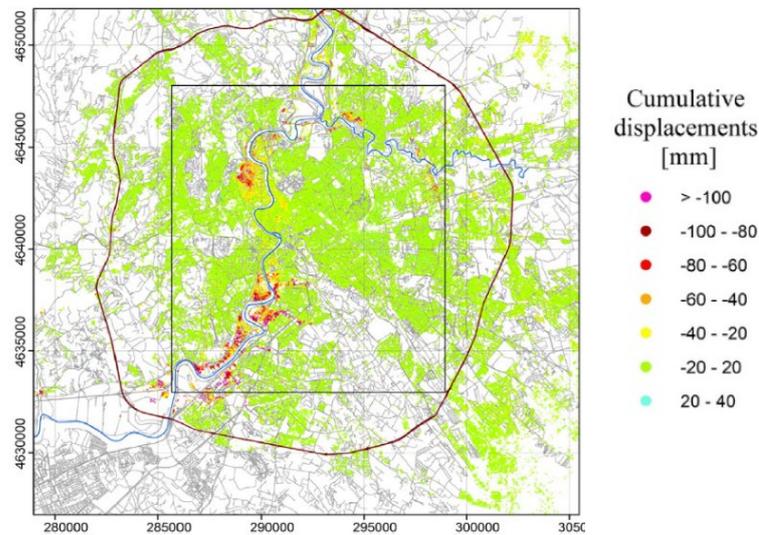


Figura 1: Mappa dello spostamento cumulativo, pertinente all'analisi ERS-ENVISAT SBAS-DInSAR (1992-2010), sovrapposto a una mappa dell'area urbana di Roma (Italia) [Scifoni S. et al, 2016]

## 2. Comportamento idro-meccanico dei terreni parzialmente saturi

Gli spostamenti indotti dalle oscillazioni di falda possono essere correttamente valutati soltanto prendendo in considerazione lo stato di parziale saturazione dei terreni al di sopra della falda. Un terreno parzialmente saturo è un mezzo trifase, costituito da fase solida (grani), fase liquida (acqua) e gassosa (aria). Per la corretta descrizione del comportamento meccanico di un mezzo composto da  $n$  fasi, sono necessarie  $n-1$  variabili tensionali: nei terreni bifase (completamente saturi o asciutti) la tensione efficace di Terzaghi è sufficiente a tale scopo; nei terreni parzialmente saturi, invece, per la descrizione del comportamento meccanico saranno necessarie due variabili tensionali indipendenti, che siano combinazione della pressione dell'acqua  $p_w$ , dell'aria  $p_a$  e delle tensioni totali  $p$ . Il Barcelona Basic Model (BBM) (Alonso et al, 1990) è un modello costitutivo allo stato critico elasto-plastico incrudente che descrive il comportamento meccanico dei terreni insaturi in termini di tensione media netta ( $p_n = p - p_a$ ) e suzione ( $s = p_a - p_w$ ). Tale modello presenta un dominio elastico tridimensionale nello spazio  $(p, q, s)$ : nello specifico, nel piano degli invarianti di tensione  $(p, q)$  la superficie di snervamento è di forma ellittica analoga a quella del Modified Cam-Clay Model, mentre nel piano  $(p, s)$  introduce due nuove superfici di snervamento: la Suction Increase (SI, Eq. 2.1), e la Loading-Collapse (LC, Eq. 2.2). La SI è delineata dal massimo valore di suzione che il terreno abbia mai avuto e superato il quale il terreno manifesta deformazioni irreversibili, mentre la LC, oltre a descrivere l'evoluzione della tensione di preconsolidazione con la suzione, descrive la risposta volumetrica del materiale (Fig. 2). Tali superfici di snervamento hanno equazioni:

$$s = s_0 \quad (2.1)$$

$$\frac{p_0}{p_{ref}} = \left( \frac{p_0^*}{p_{ref}} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}} \quad (2.2)$$

In cui  $p_0$  è la tensione di preconsolidazione ad un dato valore di suzione  $s$ ,  $p_{ref}$  è la tensione di riferimento del modello,  $p_0^*$  è la tensione di preconsolidazione per  $s = 0$ ,  $\lambda(0)$  e  $\lambda(s)$  sono le pendenze della retta NCL nel piano  $(\ln p_n, v)$  rispettivamente per  $s = 0$  e  $s \neq 0$ , saturazione e  $\kappa$  è la pendenza della retta URL nel medesimo piano.

A seguito di un processo di imbibizione, il terreno può, in funzione del suo stato iniziale, dilatare (comportamento elastico) o contrarre (collasso per saturazione, comportamento elasto-plastico). In Fig.2 sono mostrate tre diverse risposte del materiale per processi di imbibizione condotti a  $p_n = cost$ . Fin tanto che il punto rimane all'interno del dominio elastico, esso manifesta deformazioni volumetriche reversibili di espansione (punto A e punto B fin quando la suzione è tale da avere  $p_n \leq p_0$ ), una volta intercettata la LC si manifestano deformazioni volumetriche plastiche di compressione dovute al collasso per saturazione (punto B e punto C). Tali deformazioni determinano l'incrudimento di  $p_0^*$  che si traduce in un'espansione del dominio elastico con conseguente spostamento della LC. Al contrario, durante un processo di essiccamento (aumento di suzione a  $p_n = cost$ ) si ha sempre una contrazione volumetrica.

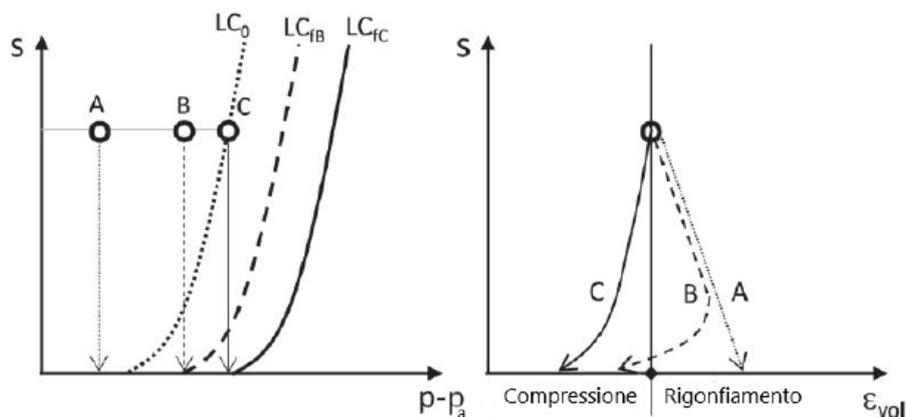


Figura 2: Percorsi di carico qualitativi previsti dal BBM in imbibizione [Casini F., 2021]

Nei terreni parzialmente saturi, la relazione che intercorre tra il quantitativo di acqua presente (e.g. grado di saturazione  $S_r$ ) e la suzione  $s$  è descritta dalla cosiddetta curva di ritenzione idrica (WRC). In letteratura sono disponibili numerose formulazioni matematiche per la rappresentazione di essa, tra le quali si riporta quella proposta da van Genuchten (1980) (Eq. 2.3):

$$S_r(s) = S_{res} + (1 - S_{res}) \left( 1 + \left( \frac{s}{P} \right)^N \right)^{-M} \quad (2.3)$$

In cui  $S_{res}$  è il grado di saturazione residuo dipendente dal tipo di terreno considerato,  $P$  è il valore di ingresso d'aria, ovvero il valore di suzione per il quale iniziano a formarsi le prime bolle d'aria nei pori,  $s$  è la suzione corrente e  $M, N$  parametri della curva, funzione anch'essi del tipo di terreno.

La presenza di aria nel terreno influisce anche sulla conducibilità idraulica del mezzo, in quanto l'acqua defluisce solo nello spazio dei pori occupato dalla fase liquida. Per la definizione della velocità di filtrazione continua a valere la Legge di Darcy (Eq. 2.4):

$$v = k(S_r) \cdot i \quad (2.4)$$

Dove la conducibilità idraulica  $k(S_r)$  è definita in funzione del grado di saturazione del terreno e.g. per mezzo di Eq. 2.5 e  $i$  è il gradiente idraulico.

$$k(S_r) = K_{sat} \cdot k_{rel}(S_r) \quad (2.5)$$

$$k_{rel}(S_r) = \sqrt{S_e} \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{M}} \right)^M \right]^2 \quad \text{con } S_e = \frac{S_r - S_{res}}{1 - S_{res}}$$

### 3. Caso studio

Il caso studio in esame valuta la suscettibilità agli spostamenti degli strati di riporto della zona di Trastevere, per la quale si avevano a disposizione i risultati di una recente caratterizzazione geotecnica lungo due verticali. Data l'estrema eterogeneità della coltre dei riporti, come mostrato dalle carte disponibili in letteratura (Fig.3) [Ventriglia U., 1971], pertanto sono state considerate tre possibili altezze dello strato: 8 m, 10m e 12m. Per ognuna di esse, a partire dalla posizione iniziale della falda ( $z_w = 12$  m dal piano campagna), si sono valutati gli effetti prodotti da un innalzamento di 2 m ( $z_w = 10$  m) della stessa, in accordo con le oscillazioni medie annuali. Ulteriori analisi per possibili eventi estremi sono state svolte ipotizzando un innalzamento della falda rispetto alla condizione iniziale di 4 m e 7 m. Gli spostamenti sono stati valutati al piano campagna e al piano di posa di un ipotetico edificio tipico del panorama edilizio della zona, posto a 5 m di profondità.

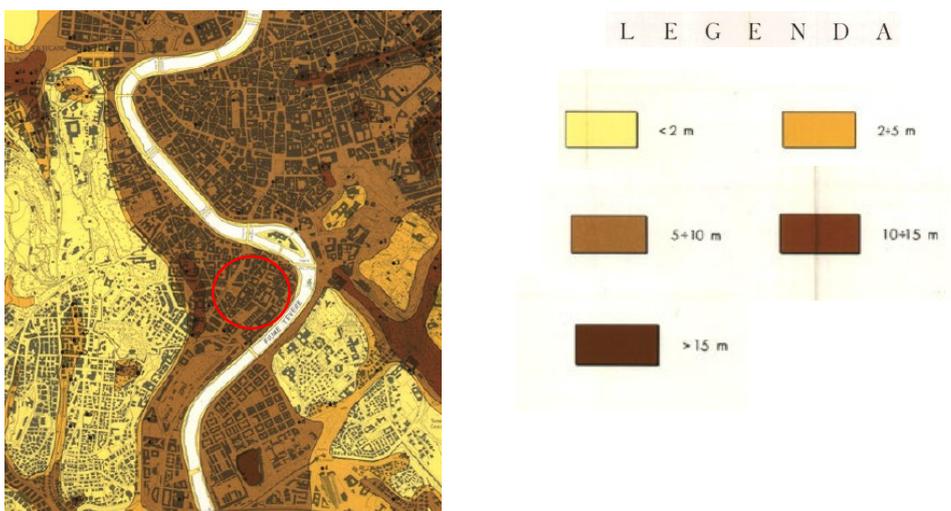


Figura 3: Stralcio della carta geologica dello spessore della coltre dei terreni di riporto della città di Roma [Ventriglia U., 1971]

#### 3.1 Analisi numeriche 1D preliminari

Le analisi numeriche sono state condotte con COMSOL Multiphysics, utilizzando un modello numerico idro-meccanico accoppiato che risolve contemporaneamente l'equazione di equilibrio (Eq. 3.1), in cui tensioni e deformazioni sono legate per mezzo del modello costitutivo adottato (BBM) e l'equazione di bilancio della massa d'acqua (Eq. 3.2):

$$\nabla \cdot \sigma + f = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{d}{dt}(nS_r\rho_w) + \nabla \cdot (\rho_w v) = 0 \quad (3.2)$$

In cui  $\sigma$  è il tensore degli sforzi,  $f$  il vettore delle forze esterne,  $n$  è la porosità,  $S_r$  è il grado di saturazione,  $\rho_w$  è la densità dell'acqua e  $v$  il campo di moto descritto dalla legge di Darcy (Eq. 2.4). Sviluppando la derivata temporale dell'Eq.3.2 è possibile esplicitare in tutti i termini l'eventuale dipendenza dalla pressione dell'acqua  $p_w$ , la quale regola l'evoluzione della suzione, che interviene nella parte meccanica del problema, ottenendo (Eq. 3.3):

$$\frac{dp_w}{dt}(nC_p\rho_w) + \nabla \cdot (\rho_w v) = -S_r\rho_w \frac{dn}{dt} \quad (3.3)$$

Così come la suzione, anche il termine che interessa la variazione nel tempo della porosità è un ulteriore termine di accoppiamento, che lega il modello idraulico alla parte meccanica. Inoltre, la porosità  $n$  è una grandezza variabile legata all'evoluzione dell'indice dei vuoti ( $n = e/(1 + e)$ ).

### 3.1.1 Condizioni iniziali e al contorno

Le analisi numeriche sono state eseguite su un modello 2D-assialsimmetrico di altezza diversa per i tre casi analizzati. Le simulazioni iniziano da una condizione indeformata e ferma, con un profilo delle pressioni interstiziali pari a quello di risalita per capillarità a partire dalla posizione iniziale della falda. Dal punto di vista meccanico si impongono vincoli di tipo "carrello" sulla base e lateralmente. Superiormente si applica un carico di 30 kPa per le analisi riferite al piano di posa delle fondazioni, mentre è lasciato libero per quelle riferite al piano campagna. Per riprodurre le condizioni litostatiche che si hanno in sito si esegue dapprima una fase in condizioni stazionarie nella quale si applica la gravità. L'oscillazione della falda si applica imponendo delle condizioni al contorno sulla pressione dell'acqua coerenti con la posizione della falda. Superiormente si assume un contorno impermeabile.

### 3.1.2 Parametri adottati

I parametri di ritenzione sono stati desunti da letteratura, adottando dei metodi empirici che legano la granulometria alle caratteristiche di ritenzione (Arya & Paris, 1981), mentre per i parametri meccanici è stata eseguita una calibrazione su prove di laboratorio condotte su provini di sabbia con limo estratti dallo strato dei riporti.

Parametri fisici		WRC		BBM			
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	19.60	$S_{res}$ [-]	0.20	$p_0^*$ [kPa]	15	$r$ [-]	0.15
$K_{sat}$ [m/s]	5e-4	$P$ [kPa]	19.90	$p_c$ [kPa]	3	$\beta$ [MPa <sup>-1</sup> ]	15
$\varphi$ [°]	32	$n$ [-]	1.44	$\lambda(0)$ [-]	0.01	$\lambda_s$ [-]	0.002
$G$ [MPa]	1.4	$m$ [-]	0.30	$\kappa$ [-]	0.0016	$\kappa_s$ [-]	0.0012

Tabella 1: Parametri fisici e parametri utilizzati per la curva di ritenzione idrica (WRC) e per il modello costitutivo (BBM)

## 4. Risultati

In Fig.4 sono riportati i profili delle deformazioni e degli spostamenti con la profondità relativi al caso più significativo (altezza dello strato dei riporti 12 m). L'innalzamento della falda provoca un incremento di contenuto d'acqua all'interno del banco con conseguente aumento di pressione interstiziale  $p_w$  e riduzione di suzione  $s$ . Si osserva che negli strati più superficiali, in cui la tensione media agente  $p_n$  è di bassa entità, la variazione di suzione è tale da non indurre effetti significativi.

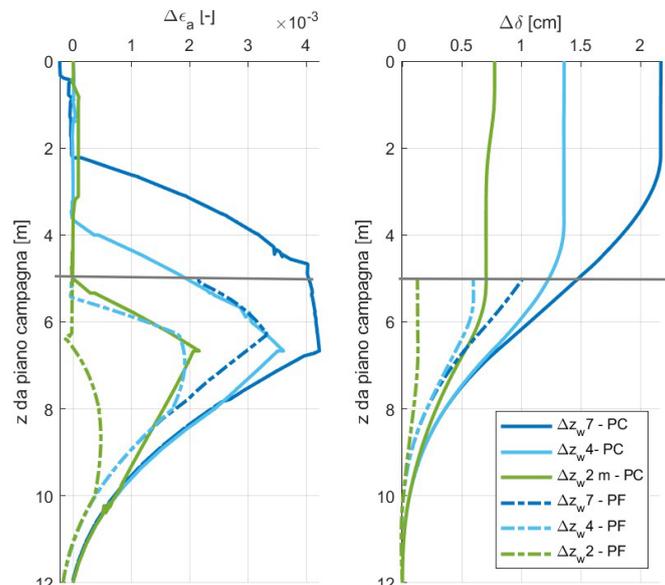


Figura 4: Profili di a) deformazione, b) spostamento relativi ad un'altezza dello strato dei riporti pari a 12m

Gli strati intermedi sono invece quelli più suscettibili al collasso per saturazione, manifestando, a seguito dell'imbibizione, deformazioni volumetriche di compressione maggiori. Riferendo le analisi al piano di posa delle fondazioni, si osserva che la sovraconsolidazione prodotta dallo scavo induce deformazioni minori. Il profilo degli spostamenti è in accordo con quello delle deformazioni, con cedimenti al piano campagna compresi tra 2.5 cm e 0.70 cm e al piano delle fondazioni compresi tra 1 cm e 0.15 cm. La Fig. 5 mostra un riassunto, in termini di spostamento in funzione dell'altezza dello strato dei riporti, dei risultati delle analisi svolte. Si osserva che una riduzione dello spessore dei riporti comporta una riduzione dello strato suscettibile al collasso per saturazione, con conseguente riduzione di cedimenti.

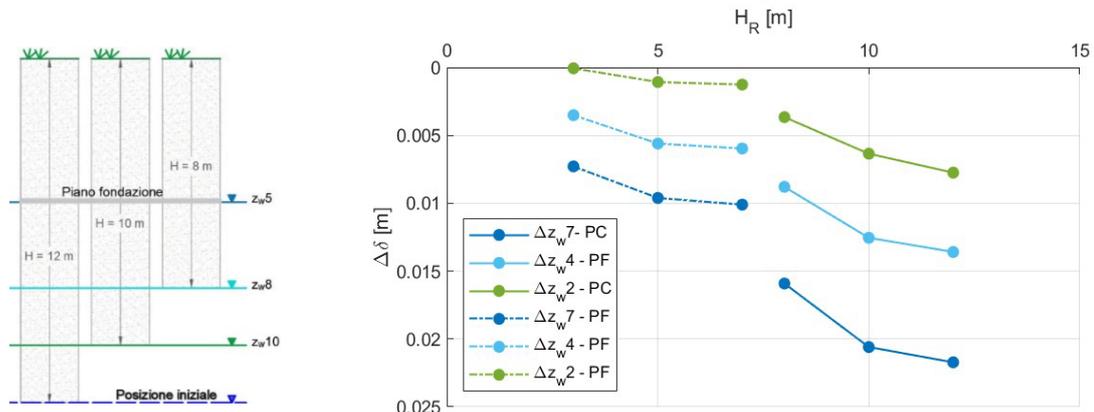


Figura 5: Cedimenti previsti al variare dello spessore dello strato dei riporti

## 5. Conclusioni

I risultati ottenuti mostrano come, ad un innalzamento della falda, lo strato di riporto sia suscettibile al collasso per saturazione manifestando cedimenti al piano campagna dell'ordine dei cm. I profili di deformazione assiale sono simili nella forma ma variano in entità al variare dello spessore dei riporti e della posizione della falda. Questo studio ha posto le basi per lo sviluppo di una sezione stratigrafica completa che possa valutare, a partire dai dati storici dell'altezza idrica del fiume Tevere, come evolve l'oscillazione di falda nei terreni di riporto e quali effetti produce in termini di cedimenti.

## Ringraziamenti

Il primo e il secondo autore ringraziano il progetto Tiber's (Le strutture di inalveazione del Tevere e la sicurezza delle aree del centro di Roma: analisi geotecnica, monitoraggio satellitare, indagine storica), progetto di ricerca finanziato dalla Regione Lazio (A0375-2020-36632) per il sostegno ricevuto.

## Bibliografia

- Alonso E.E., Gens A., Josa A. (1990) - "A constitutive model for partially saturated soils" – Geotechnique 40, No.3, 405-430;
- Arya L.M., Paris J.F. (1981) - "A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle size distribution and bulk density data" - Soil Sci. Soc. Am. J. 45 (6), 510-519;
- Casini F., Pucci A., Giannetti I., Guida G. (2022) – "Geotechnical and historical aspects on the collapse of the Tiber embankment walls in the centre of Rome (1970-1900)" – Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III, CRC Press, 1206-1214;
- Casini F. (2021), "Multiphase Soil Mechanics for Landscape Protection: From Testing to Modelling". - Rivista Italiana di Geotecnica No.2, 5-34;
- Scifoni S., Bonano M., Marsella M., Sonnessa A., Tagliaferro V., Mannuta M., Lanari R., Ojhna C., Sciotti M., (2016) – "On the joint exploitation of long-term DInSAR time series and geological information for the investigation of ground settlements in the town of Roma (Italy) - Remote Sensing of Environment 182, 113–127;
- "Tiber's: Le strutture di inalveazione del Tevere e la sicurezza delle aree del centro di Roma: analisi geotecnica, monitoraggio satellitare, indagine storica" - Progetto di ricerca finanziato dalla Regione Lazio (A0375-2020-36632)