

## MODELLAZIONE COSTITUTIVA DEL COMPORTAMENTO VISCOSO DI ARGILLE ORGANICHE: UN CASO DI STUDIO

Aldo Madaschi

*DICAM - Università degli Studi di Trento*

*aldo.madaschi@unitn.it*

Alessandro Gajo

*DICAM - Università degli Studi di Trento*

*alessandro.gajo@unitn.it*

### Sommario

Un nuovo modello costitutivo visco-elastoplastico per la simulazione di terreni coesivi in condizioni quasistatiche è stato proposto e validato su un'ampia base sperimentale. In questa nota si presenta l'applicazione del modello alla simulazione della costruzione di un rilevato alto 8 m fondato su un banco di argilla organica di notevole spessore i cui sedimenti hanno raggiunto l'entità di un metro a un anno dall'inizio della costruzione.

### 1. Introduzione

La messa a punto di modelli costitutivi affidabili e direttamente utilizzabili nella progettazione rappresenta tuttora una delle sfide aperte della ricerca in ingegneria geotecnica. In questa nota si presenta l'applicazione di un nuovo modello costitutivo visco-elastoplastico per terreni coesivi al caso pratico della costruzione di un rilevato fondato su uno strato di argilla organica di notevole spessore.

Il modello costitutivo, in questo caso ridotto alla condizione monodimensionale, è basato sulla scomposizione dell'incremento di deformazione in quattro componenti: due istantanee (elastica e plastica) e due viscose (viscoelastica e viscoplastica). L'utilizzo di due meccanismi con diversi tempi caratteristici permette di simulare il comportamento di una grande varietà di terreni, mentre l'ipotesi di un meccanismo istantaneo semplifica l'implementazione, anche se ha alcune limitazioni (Madaschi e Gajo, 2015c). Il modello viscoso è stato implementato nel contesto dei modelli reologici utilizzando le leggi sforzo-deformazione del modello Cam-Clay per descrivere il comportamento elasto-plastico, mentre le leggi di viscosità sono state scelte a partire dalle evidenze sperimentali per terreni di natura molto diversa.

L'approccio costitutivo è stato validato su una solida base sperimentale (Madaschi e Gajo, 2015a) e su evidenze di letteratura ed ha dimostrato la capacità di cogliere differenti aspetti particolari della risposta viscosa di argille inorganiche, argille organiche e torbe (Madaschi e Gajo, 2015b).

In questa nota si presenta l'applicazione del modello costitutivo alla simulazione dei sedimenti di un rilevato stradale fondato su uno strato di argilla organica di notevole spessore. L'infrastruttura si trova in Trentino, nel comune di Pergine Valsugana, ed è stata soggetta a sedimenti dell'ordine di 1 metro dopo un anno dalla fine della costruzione dell'opera.

In questo lavoro, dopo alcuni cenni sulla struttura del modello costitutivo ed una breve descrizione dell'opera e delle caratteristiche del sito, si presenta la calibrazione del modello condotta a partire dalle prove sperimentali eseguite su un campione indisturbato e la sua applicazione al problema *in situ*. Nonostante le approssimazioni introdotte dalla riduzione del problema al caso monodimensionale, i risultati del confronto tra sedimenti misurati e simulati enfatizza la capacità del modello di cogliere il comportamento del rilevato e gli effetti della successione dei carichi sulla risposta globale dell'opera.

## 2. Cenni sul modello costitutivo

Il modello costitutivo è stato sviluppato in condizioni monodimensionali a partire dalle evidenze sperimentali ottenute su un'ampia gamma di terreni argillosi con lo scopo di coglierne la risposta viscosa in condizioni di carico quasistatiche. La scomposizione della deformazione totale è riportata in eq. 1 ed è basata sull'esistenza di due meccanismi con differenti tempi caratteristici e sulla presenza di deformazioni viscose sia in fase elastica che elastoplastica.

$$\varepsilon = \varepsilon_e^i + \varepsilon_e^v + \varepsilon_p^i + \varepsilon_p^v \quad (1)$$

dove gli apici identificano il tipo di meccanismo (istantaneo o viscoso) e i pedici la natura della deformazione (elastica o plastica).

Il modello costitutivo qui presentato è la semplificazione monodimensionale di un modello generale formulato a partire dall'approccio viscoplastico dell'overstress (Perzyna, 1963). Le equazioni fondamentali dell'approccio monoassiale sono riportate in eq. (2).

$$\sigma = \sigma_{e,i} = \sigma_0 \exp\left(\frac{\varepsilon_e^i - \varepsilon_{e0}^i}{\alpha_e \kappa}\right) \quad (2a)$$

$$\sigma = \sigma_{e,v} = \sigma_0 \exp\left(\frac{\varepsilon_e^v - \varepsilon_{e0}^v}{(1 - \alpha_e)\kappa}\right) [1 + \psi_e(\dot{\varepsilon}_e^v, \dot{\varepsilon}_{min}, \Gamma_e)] \quad (2b)$$

$$\sigma = \sigma_{p,i} = \sigma_0 \exp\left(\frac{\varepsilon_p^i - \varepsilon_{p0}^i}{\alpha_p(\lambda - \kappa)}\right) \quad (2c)$$

$$\sigma = \sigma_{p,v} = \sigma_0 \exp\left(\frac{\varepsilon_p^v - \varepsilon_{p0}^v}{(1 - \alpha_p)(\lambda - \kappa)}\right) [1 + \psi_p(\dot{\varepsilon}_p^v, \dot{\varepsilon}_{min}, \Gamma_p)] \quad (2d)$$

I parametri costitutivi che definiscono il comportamento del modello sono 7. Oltre ai classici parametri di deformabilità  $\kappa$  e  $\lambda$  del modello Cam-Clay sono stati introdotti altri 5 parametri ( $\alpha_e$ ,  $\alpha_p$ ,  $\Gamma_e$ ,  $\Gamma_p$  e  $\dot{\varepsilon}_{min}$ ) che permettono di definire il comportamento viscoso in fase elastica e plastica. In particolare il parametro  $\alpha_e$  ( $\alpha_p$ ) ripartisce la deformazione tra il meccanismo istantaneo e quella viscosa della componente elastica (plastica) e può essere valutato a partire dal rapporto tra deformazione istantanea e deformazione totale per un passo di prova edometrica di durata sufficiente ad evidenziare la pendenza della fase secondaria.

I parametri  $\Gamma_e$ ,  $\Gamma_p$  e  $\dot{\varepsilon}_{min}$  invece regolano il decorso dei cedimenti secondari. In Fig. 1 è riportata un'analisi parametrica per valutare l'influenza di  $\Gamma_e$  e  $\dot{\varepsilon}_{min}$  sulla simulazione di un passo di prova edometrica (nel caso in questione si fa riferimento ad un carico in condizioni elastiche ma considerazioni analoghe valgono anche per un carico elastoplastico). È possibile notare come il parametro  $\dot{\varepsilon}_{min}$  influenzi principalmente il tempo in corrispondenza del quale il fenomeno viscoso si esaurisce, mentre il parametro  $\Gamma$  regola la pendenza del tratto secondario della curva tempo-deformazione.

Il modello costitutivo rappresenta la riduzione al caso monodimensionale di un approccio multiassiale con doppia superficie di snervamento (Madaschi e Gajo, 2015c).

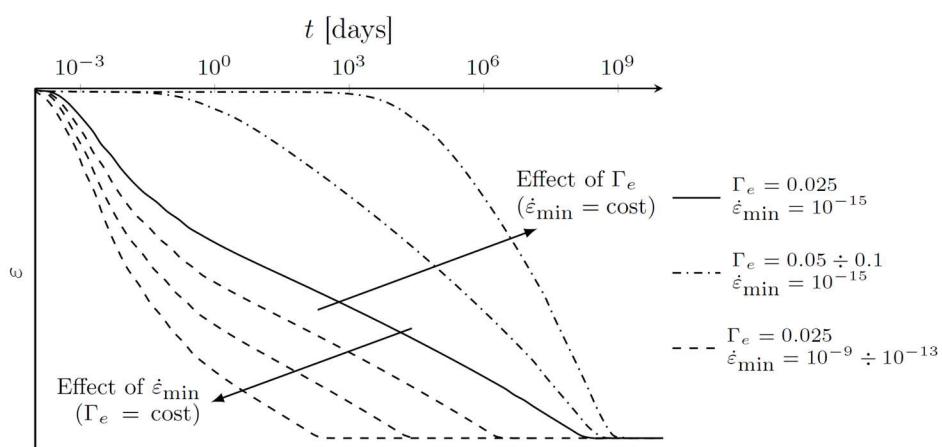


Fig. 1 Analisi parametrica del modello costitutivo: effetto di  $\Gamma$  e  $\dot{\varepsilon}_{min}$  sulla simulazione di un passo di carico in regime elastico di una prova edometrica.

### 3. Rilevato oggetto di studio e caratterizzazione del sottosuolo

Il modello costitutivo proposto è stato utilizzato per la simulazione dei sedimenti di un rilevato realizzato a Torchio (Pergine Valsugana, Trento) nel 2009 per collegare un nuovo ponte stradale alla viabilità esistente. In particolare, il rilevato è costituito da una rotatoria di diametro pari a circa 55 m alla base e da un rilevato trapezoidale che la collega alla spalla del ponte situata a circa 100 m in direzione nord-ovest.

L'altezza del rilevato è di circa 8 m in corrispondenza della rotatoria e 10.5 m alla spalla del ponte mentre la pendenza del paramento è di circa 60° grazie dell'impiego di un rinforzo in gotessile. Il peso specifico del rilevato è di circa 19 kN/m<sup>3</sup>. In prossimità della spalla del ponte la fondazione del rilevato è stata rinforzata con una palificata per la riduzione dei sedimenti.

Prima dell'inizio della costruzione sono stati installati tre assestimetri a piastra per la misura dei sedimenti. In Fig. 2 si riporta la planimetria dell'intervento in cui è evidenziata la posizione degli assestimetri e dei pali di rinforzo della fondazione.

L'analisi dei sedimenti è stata eseguita sulla sezione 4V di Fig. 2 in modo da poter confrontare i risultati delle simulazioni con le misurazioni dell'assestometro P2. In prossimità alla sezione 4V è stato eseguito un sondaggio geotecnico (S11) che ha permesso di determinare la stratigrafia e di eseguire una prova edometrica su campione indisturbato dello strato di argilla.

La stratigrafia del sito ottenuta dal sondaggio S11 è riportata in Fig. 3 ed è composta da uno strato superficiale di limo organico di spessore 1 m, sotto al quale si trova uno strato di sabbia limosa spesso circa 8.3 m; alla profondità di 9.3 m si trova uno strato di circa 1.1 m di torba che giace su uno spesso strato (circa 7.3 m) di argilla limosa organica. In profondità, tra 17.7 e 19.7 m si trova uno strato di ghiaia che appoggia sullo strato roccioso di base. La falda si trova mediamente a 1 m di profondità rispetto al piano campagna.

Dal sondaggio S11 è stato ricavato un provino indisturbato nello strato di argilla ad una profondità di 12.35 m per mezzo di un campionatore aperto. In Fig. 3b sono riportate le proprietà indice ed i parametri di deformabilità ricavati per mezzo delle prove di caratterizzazione e di una prova edometrica eseguiti sul provino S11-SH1.

I terreni incoerenti sono stati sottoposti a prove SPT che hanno permesso una stima del grado di addensamento mentre lo strato torboso non è stato oggetto di alcuna indagine e le sue caratteristiche sono state ipotizzate sulla base di valori tipici di altre torbe della medesima zona (Madaschi e Gajo, 2015a).

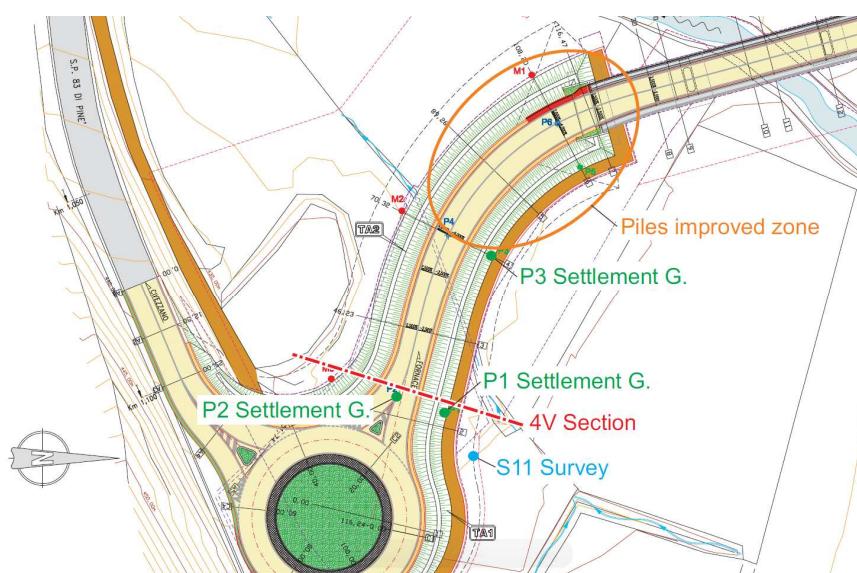


Fig. 2 Planimetria del complesso infrastrutturale con posizione dei punti di misura dei sedimenti (P1, P2 e P3), del sondaggio geotecnico (S11) e della sezione analizzata (4V).

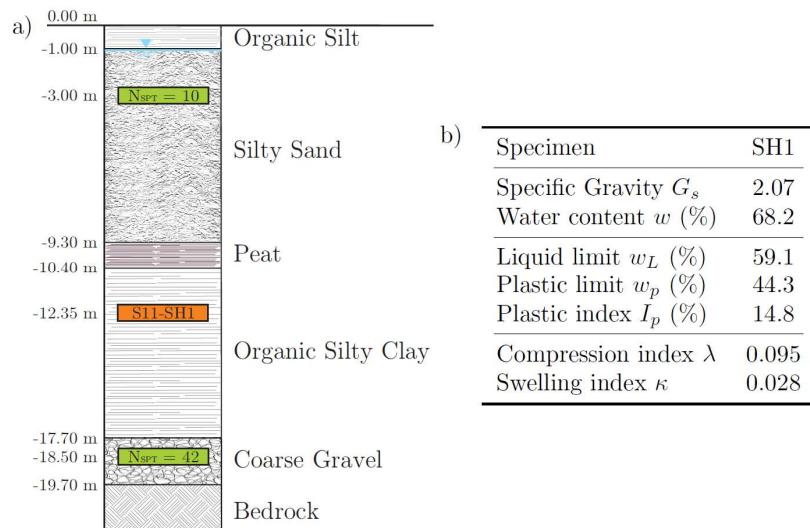


Fig. 3 a) Stratigrafia del sottosuolo del rilevato di Torchio in corrispondenza dal sondaggio S11;  
 b) Proprietà indice del campione indisturbato di argilla limosa S11-SH1 .

### 3. Cedimenti misurati

La misura dei cedimenti è stata eseguita con tre assestimenti a piastra installati all'inizio di giugno del 2009 qualche mese prima dell'inizio della costruzione del rilevato. La realizzazione dell'opera può essere schematizzata in due fasi: la prima fase, della durata di circa 30 giorni da agosto a settembre 2009, consiste nello scavo del metro di argilla organica e nella costruzione del rilevato fino al completamento della terra armata; la seconda parte, corrispondente a circa il 15% del peso totale del rilevato, è stata completata in circa 15 giorni a partire dall'inizio di aprile 2010. L'andamento temporale delle fasi di carico è schematicizzato in Fig. 4a.

In Fig. 4b si riportano le misure dei cedimenti ottenute dagli assestimenti a partire dall'inizio della costruzione dell'opera. E' possibile evidenziare come il cedimento totale in corrispondenza del centro del rilevato all'innesto della rotonda (ass. P2) raggiunga il valore di circa 100 cm dopo un anno dall'inizio della costruzione. Il cedimento misurato al piede del rilevato nel punto P3, dove la fondazione è stata rinforzata con la palificata, nello stesso periodo ammonta a meno di 20 cm.

La presenza dei pali comporta quindi una grande riduzione dei cedimenti e preserva la zona in corrispondenza della spalla del ponte da eccessive deformazioni. E' però necessario sottolineare come il cedimento differenziale a cui è sottoposto il rilevato (confrontando i valori al piede tra gli strumenti P1 e P3 distanti circa 40 m) superi i 60 cm e risulti incompatibile con la funzionalità dell'opera comportando continui e costosi interventi di manutenzione.

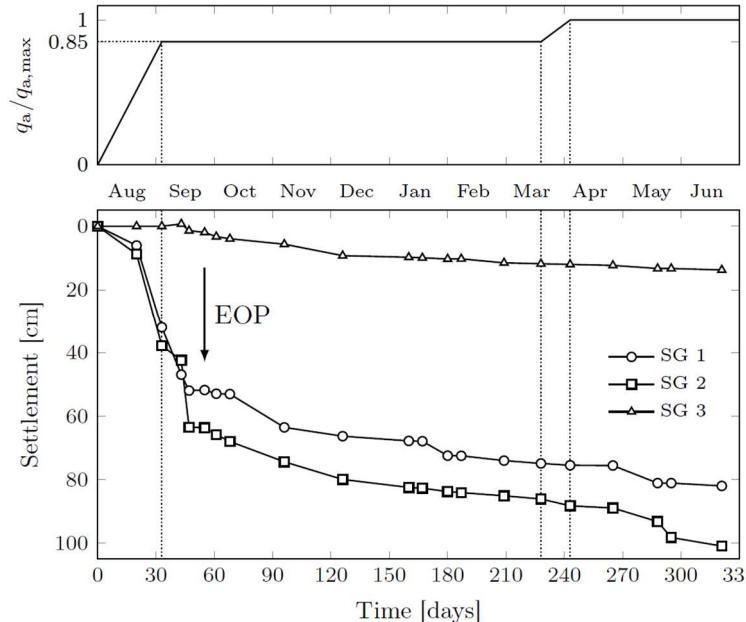


Fig. 4 Esempio risposta per un incremento di carico

#### 4. Simulazione numerica del rilevato

La simulazione numerica del rilevato è stata condotta analizzando il problema semplificato di una colonna di terreno in condizioni monodimensionali. Nonostante le notevoli approssimazioni introdotte da questa semplificazione, queste analisi permettono di valutare l'affidabilità del modello proposto e la capacità dello stesso di cogliere le principali caratteristiche del comportamento viscose degli strati argilosì.

L'analisi è stata condotta ipotizzando che gli strati incoerenti abbiano comportamento elastico lineare con rigidità stimata a partire dai valori di NsPT da correlazioni empiriche di letteratura.

Gli strati di torba ed argilla organica sono invece stati simulati con il modello costitutivo. La calibrazione

dello strato di argilla (dello spessore di circa 7.5 m) è stata ottenuta simulando la prova edometrica condotta sul campione S11-SH1. In Fig. 5 si riporta il confronto tra risultati di laboratorio e simulazioni numeriche per la curva di compressione edometrica e per alcuni passi di carico.

Il problema è stato ridotto da 3D a 1D stimando l'incremento tensionale indotto dalla costruzione del rilevato combinando gli effetti di due analisi FEM elastiche condotte in condizioni di assalsimmetria (per l'analisi della rotatoria) e di deformazione piana (per l'analisi del rilevato). In Fig. 6 sono riportati un esempio della discretizzazione del problema ed il risultato in termini di incremento di tensione

verticale ( $\Delta\sigma_z$ ) confrontato con un calcolo analitico eseguito con la teoria del semispazio elastico. Si sottolinea che l'incremento tensionale stimato con l'analisi numerica porta a risultati inferiori rispetto alla teoria dell'elasticità per gli strati più superficiali (causa della rigidità del rilevato); mentre per gli strati più profondi la presenza della base rigida porta ad un incremento di  $\Delta\sigma_z$  rispetto alla teoria del semispazio elastico.

Le simulazioni sono state ottenute con un coefficiente di permeabilità pari a circa il doppio rispetto a quello ricavato

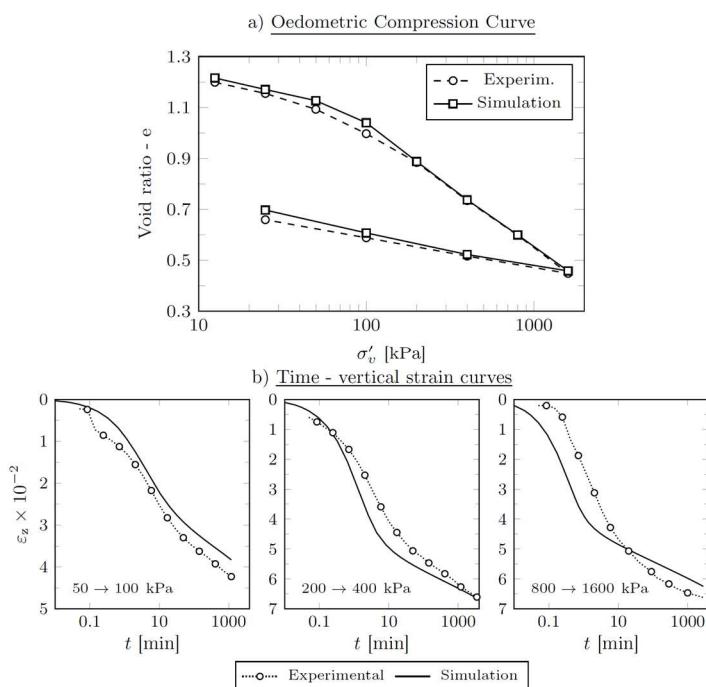


Fig. 5 Calibrazione modello costitutivo per lo strato di argilla organica sulla base della prova edometrica sul campione S11-SH1.

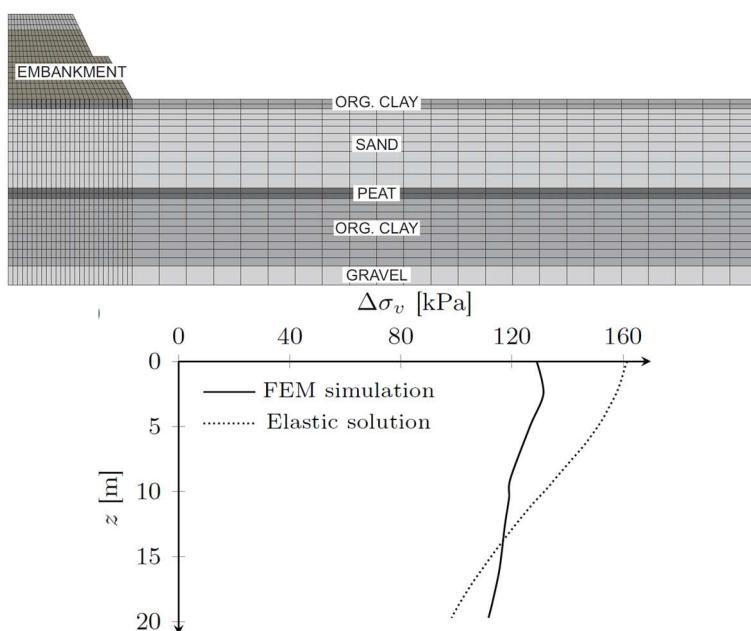


Fig. 6 a) Discretizzazione FEM per la stima dell'incremento tensionale indotto dalla costruzione; b) andamento stimato di  $\Delta\sigma_v$  rispetto alla profondità.

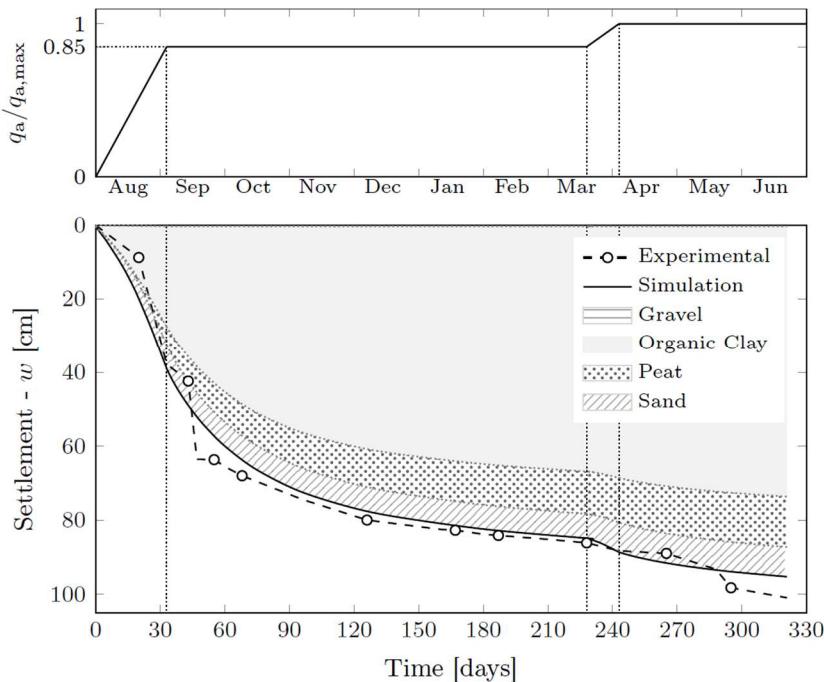


Fig. 7 Confronto tra cedimento misurato e simulazione numerica in corrispondenza dell'assestimetro P2 (Sezione 4V).

in laboratorio da prove edometriche (Burghignoli e Calabresi, 1975).

In Fig. 7 si riporta il confronto tra i sedimenti misurati dall'assestimetro P2 e le simulazioni numeriche. La corrispondenza tra le due curve è ottima sia per quanto riguarda i sedimenti di consolidazione che per i sedimenti secondari. In particolare, il modello riesce a cogliere in maniera molto accurata l'entità del cedimento associata al secondo incremento di carico (che ammonta al 15% del totale). Questo effetto rientra nella tipica risposta dei terreni organici sottoposti a piccoli incrementi tensionali in condizioni di carico vergine (Madaschi e Gajo, 2015a). E' interessante mettere in evidenza come circa il 90% del cedimento totale è legato agli strati di torba e argilla posti ad una profondità compresa tra 9.3 e 17.7 m.

## 5. Conclusioni

Il modello costitutivo visco-elastoplastico proposto da Madaschi e Gajo (2015b) è stato utilizzato per la simulazione del cedimento di un rilevato fondato su uno spesso strato di argilla organica che ha subito sedimenti pari a 1 m dopo un anno dall'inizio della costruzione. Il modello costitutivo è stato calibrato sulla base di una prova edometrica eseguita su un campione indisturbato. La simulazione è stata condotta su un problema monodimensionale semplificato, stimando l'incremento tensionale attraverso delle analisi FEM elastiche del problema. Il confronto tra risultati delle analisi e simulazioni numeriche mostra un ottimo accordo durante tutta la storia della struttura.

## Bibliografia

- Burghignoli, A. and G. Calabresi (1975). "Determinazione del coefficiente di consolidazione di argille tenere su campioni di grandi dimensioni". *XII Convegno Italiano di Geotecnica*, vol. 3.
- Madaschi, A. and A. Gajo (2015a). "One-dimensional response of peaty soils subjected to a wide range of oedometric conditions". *Géotechnique* 65.4, pp. 274–286.
- Madaschi, A. and A. Gajo (2015b). "A one-dimensional viscoplastic constitutive approach for modelling the delayed behavior of clayey and organic soils". *In preparation*.
- Madaschi, A. and A. Gajo (2015c). "A viscoplastic double yield surface constitutive model for geologic materials". *In preparation*.
- Perzyna P. (1966). Fundamental problems in Viscoplasticity. *Advances in Applied Mechanics*, 9, 244-368.