

## CEDIMENTI DI PALI ENERGETICI SOGGETTI A VARIAZIONI CICLICHE DI TEMPERATURA

Chiara Iodice (chiara.iodice@unicampania.it), Raffaele Di Laora (raffaele.dilaora@unicampania.it)

*Università della Campania 'Luigi Vanvitelli', Aversa, Italy*

Claudio Tamagnini (claudio.tamagnini@unipg.it)

*Università di Perugia, Perugia, Italy*

Giulia MB Viggiani (gv278@cam.ac.uk)

*University of Cambridge, Cambridge, UK*

Alessandro Mandolini (alessandro.mandolini@unicampania.it)

*Università della Campania 'Luigi Vanvitelli', Aversa, Italy*

**ABSTRACT.** Il presente lavoro ha lo scopo di studiare l'effetto del collasso volumetrico, indotto da variazioni di temperatura in argille normalmente consolidate, sul comportamento di un palo energetico singolo. A tal fine, sono state condotte delle analisi numeriche agli elementi finiti impiegando il software commerciale ABAQUS, in cui un palo singolo è soggetto alla contemporanea applicazione di carico assiale e di variazioni cicliche di temperatura. Il comportamento del terreno è stato descritto mediante l'impiego di due modelli costitutivi ipoplastici avanzati uno dei quali è in grado di riprodurre il collasso volumetrico utilizzando un algoritmo ad-hoc sviluppato dagli autori. Entrambi i modelli prevedono accumulo ciclico di cedimenti e di sovrappressione interstiziale, soprattutto nel caso in cui si consideri l'effetto del collasso termico. I risultati ottenuti sono in accordo con dati sperimentali reperiti in letteratura, indicando che il modello numerico sviluppato può essere utilizzato per studiare i complessi processi di interazione terreno/palo/struttura che si verificano in fondazioni con pali energetici.

### 1. INTRODUZIONE

Le fondazioni su pali hanno lo scopo di trasferire i carichi strutturali al terreno sottostante. Se i pali sono equipaggiati con tubicini in materiale plastico all'interno dei quali scorre un fluido termovettore, questi possono essere impiegati anche con la funzione di scambiatori di calore con il terreno circostante, prendendo il nome di pali energetici (Brandl, 2006). I pali energetici consentono di poter soddisfare il fabbisogno energetico di un edificio grazie alla possibilità di assorbire e/o cedere calore al terreno in funzione della domanda stagionale. Tali sistemi sono quindi soggetti a variazioni cicliche di temperature e, pertanto, nella loro progettazione bisogna prestare attenzione (i) allo sforzo assiale indotto dalla variazione di temperatura, che si somma a quello preesistente dovuto ai carichi strutturali, nonché (ii) allo spostamento permanente della testa del palo causato dalla natura ciclica dei carichi. Inoltre, con riferimento ai depositi argillosi, una delle principali caratteristiche del comportamento termomeccanico è la forte dipendenza della risposta volumetrica dalla precedente storia di carico (si vedano, ad esempio, Campanella & Mitchell, 1968; Cekerevac & Laloui, 2004; Vega & McCartney, 2014). In particolare, contrariamente alle argille fortemente sovraconsolidate, OC, che dilatano con l'aumentare della temperatura, le argille normalmente consolidate, NC, e debolmente OC subiscono una contrazione volumetrica quando riscaldate in condizioni drenate, a causa di una diminuzione della resistenza al taglio dei singoli contatti interparticellari che si traduce in un parziale collasso del struttura del terreno e, di conseguenza, in una diminuzione dell'indice dei vuoti con accumulo di deformazioni irreversibili. Tale contrazione tende a stabilizzarsi entro pochi cicli grazie alla formazione di nuovi contatti tra le particelle. Riguardo le condizioni non drenate, Campanella & Mitchell (1968) mostrano che la relazione pressione interstiziale - temperatura tende ad essere isteretica fin dai primi cicli termici. È ragionevole aspettarsi che le prestazioni delle fondazioni energetiche siano influenzate dal comportamento termico delle argille NC soprattutto in termini di cedimento (Ng et al., 2014; Wu et al., 2018).

Rispetto alle sollecitazioni causate dai carichi termici (si vedano, ad esempio, Laloui et al., 2006; Bourne-Webb et al., 2009; Sutman et al., 2019; Iodice et al., 2023), il problema dei cedimenti è stato meno studiato, anche a causa delle difficoltà che si incontrano nell'effettuare analisi numeriche e/o test di laboratorio o in vera grandezza. Il presente lavoro si propone di fornire un contributo alla migliore comprensione dei principali fenomeni che controllano il comportamento ciclico dei pali energetici installati in argille tenere in termini di cedimenti. A tal fine, sono state eseguite simulazioni numeriche termo-idromeccaniche accoppiate non lineari, su un palo energetico ideale installato in argilla NC, modellata impiegando due modelli ipoplastici avanzati, uno dei quali permette di cogliere il fenomeno del collasso volumetrico.

## 2. MODELLAZIONE NUMERICA E COSTITUTIVA

Il palo modellato nelle analisi numeriche, avente lunghezza  $L = 25$  m e diametro  $d = 0,5$  m, è inizialmente soggetto ad un carico meccanico pari al 30% della sua capacità portante valutata con formule analitiche,  $R_t$ , e, successivamente, a 50 cicli termici (Figura 1).

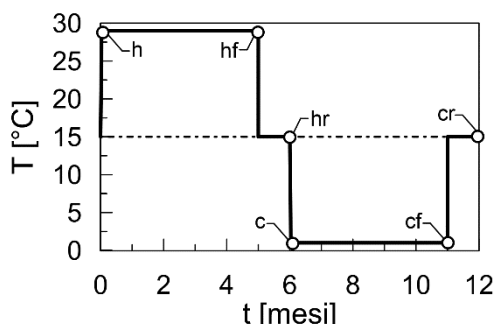


Figura 1. Variazione di temperatura alla testa del palo riferita a 1 anno (h: riscaldamento; hf: riscaldamento continuo; hr: riposo dopo il riscaldamento; c: raffreddamento; cf: raffreddamento continuo; cr: riposo dopo il raffreddamento).

Il comportamento del terreno, che è soggetto anche a carico ciclico, è stato descritto utilizzando la teoria dell'ipoplasticità con variabili di stato interne (Kolymbas, 1991; Tamagnini et al., 2000; Mašín, 2019), che si configura come un approccio alternativo alle ben note teorie dell'incrudimento cinematico e della plasticità con Bounding Surface. A tal proposito, è stata impiegata un'equazione costitutiva in forma incrementale per terreni a grana fine (Mašín, 2019) con incorporate le caratteristiche principali della Meccanica dello Stato Critico (Schofield & Wroth, 1968) ed il concetto di intergranular strain (Niemunis & Herle, 1997). In tale modello, nel seguito denominato "Hypo", l'espansione/contrazione termica delle sole particelle solide non induce alcun cambiamento di volume nello scheletro solido. Recentemente, Ma et al. (2017) hanno ampliato il costitutivo ipoplastico per consentire l'accumulo di deformazioni volumetriche irreversibili per argille NC; anche tale modello è stato usato nelle analisi e, nel seguito, è denominato "Hypo-T".

I modelli Hypo e l'Hypo-T possono essere implementati in Abaqus definendo un algoritmo coerente con le equazioni di evoluzione fornite dai modelli costitutivi e incorporato nel codice attraverso una routine UMAT, ovvero un'interfaccia per modelli costitutivi definiti dall'utente. Mentre per la versione isoterma è stato possibile utilizzare una routine UMAT scaricabile dal sito SoilModels.com, per il modello termo-ipoplastico l'UMAT è stata modificata dagli autori per tenere conto del più alto livello di accoppiamento termomeccanico esistente nelle equazioni costitutive. L'implementazione del modello è stata validata positivamente rispetto alle previsioni fatte da Ma et al. (2017) considerando una prova drenata eseguita su un provino NC ricostituito e soggetto a consolidamento isotropo e a cicli di temperatura (Campanella e Mitchell, 1968).

Tutti i dettagli relativi alla geometria del problema ed alla selezione dei parametri per i modelli costitutivi sono inclusi in Iodice et al. (2021).

## 3. PRINCIPALI RISULTATI

In Figura 2 sono riportati i risultati delle simulazioni per un numero totale di 50 cicli termici con riferimento a condizioni di esercizio (carico esterno applicato pari a 30%  $R_t$ ). Si può notare che l'accumulo di cedimenti progredisce senza stabilizzarsi. In particolare, i cedimenti previsti utilizzando il modello Hypo continuano ad aumentare con incremento pari a circa 0,3%/anno. Al contrario, l'incremento di spostamento ottenuto utilizzando il modello Hypo-T è inizialmente pari a circa 0,6%/anno (primi 5 cicli) e poi si riduce progressivamente fino ad attestarsi attorno a 0,4%/anno dopo 15 cicli. L'effetto del collasso termico è responsabile delle differenze osservate, nonché del diverso valore assunto dal cedimento dopo 50 anni di esercizio.

È interessante notare che, durante il primo ciclo, la risposta prevista con i due modelli è pressoché identica. Per comprendere questo risultato è utile chiarire alcuni aspetti fondamentali del comportamento di un terreno saturo sottoposto ad un aumento di temperatura. In assenza di collasso volumetrico, lo scheletro solido esibisce incremento di volume e, poiché il coefficiente di espansione termica dell'acqua è maggiore di quello dei grani (cioè  $\alpha_w > \alpha_s$ ), l'acqua espande in misura maggiore rispetto all'espansione che interessa il volume dei vuoti per stesso incremento di temperatura. Ne segue che, mentre in condizioni drenate si ha un flusso d'acqua in uscita dal volume di terreno

riscaldato, in condizioni non drenate la maggiore tendenza ad espandersi dell'acqua si traduce in un aumento della pressione interstiziale, necessario a garantire la compatibilità delle deformazioni volumetriche tra le due fasi, proporzionale a  $\alpha_w - \alpha_s$ . In presenza di collasso volumetrico, lo scheletro solido si contrae per un aumento positivo della temperatura. Ne segue che, in condizioni drenate, il volume di acqua espulso dalla porzione di terreno riscaldata sarà maggiore rispetto al caso in cui non si verifica collasso; analogamente, in condizioni non drenate, si svilupperà una maggiore pressione interstiziale. Siccome nelle simulazioni numeriche la permeabilità è tale da avere condizioni non drenate ( $k = 10^{-10}$  m/s), questo comportamento è chiaramente deducibile dall'osservazione dell'evoluzione nel tempo della sovrappressione interstiziale (Figura 3), che risulta essere più elevata quando si impiega il modello Hypo-T. In particolare, all'interfaccia, entrambi i modelli prevedono un progressivo accumulo che si attenua notevolmente dopo circa 3 cicli (alla base del palo la relazione pressione interstiziale-temperatura è isteretica fin dal primo ciclo, non riportato per mancanza di spazio). Da notare che l'intero processo è accompagnato da consolidazione con dissipazione delle sovrappressioni interstiziali sviluppatesi nelle fasi di riscaldamento e, di conseguenza, da cedimenti di consolidazione.

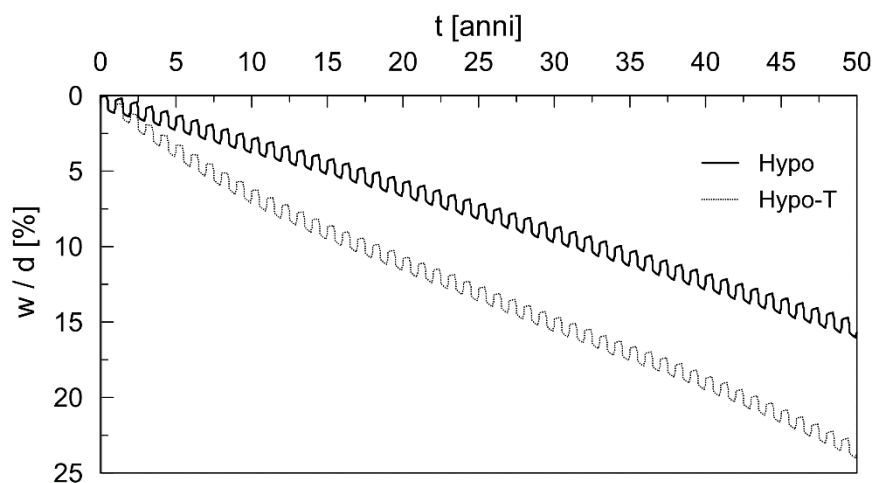


Figura 2. Cedimenti globali adimensionali dopo 50 cicli termici.

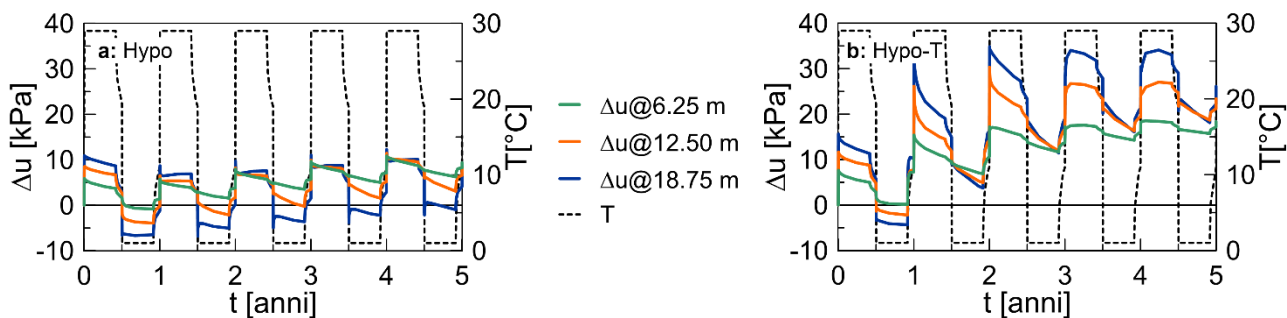


Figura 3. Evoluzione delle sovrappressioni neutre per 5 cicli termici.

Per valutare quale modello catturi meglio il comportamento reale dei pali energetici, sarebbero necessari dati relativi a test di lunga durata in scala reale o di laboratorio. Sfortunatamente, a causa delle difficoltà nell'effettuare esperimenti che coinvolgano molti cicli termici, la maggior parte dei dati disponibili sono relativi a pochi anni di funzionamento. Le previsioni numeriche risultano in buon accordo qualitativo con i dati sperimentali, relativi a 5 cicli termici, mostrati da Wu et al. (2018).

#### 4. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Il principale risultato emerso dalle analisi numeriche è lo sviluppo di cedimenti e sovrappressioni interstiziali per entrambi i modelli costitutivi. In particolare, l'accumulo di spostamenti irreversibili procede senza stabilizzazione con valori maggiori nel caso di utilizzo del modello Hypo-T (circa 25% d) rispetto al modello Hypo (circa 15% d). Con riferimento alle sovrappressioni interstiziali, invece, il maggiore valore delle stesse nel caso di impiego del modello Hypo-T rispetto al modello Hypo, è imputabile al fatto che il collasso volumetrico in fase di

riscaldamento è inibito a causa della bassa permeabilità del terreno. È importante evidenziare che, se utilizzato per simulare i risultati delle prove di laboratorio su provini di argilla sottoposti a cicli termici in condizioni drenate, il modello Hypo-T prevede deformazioni volumetriche che tendono a stabilizzarsi dopo alcuni cicli, mentre, in condizioni non drenate, lo stesso modello prevede un iniziale accumulo di sovrappressione interstiziale seguito da stabilizzazione. Questi comportamenti sono in accordo con quanto mostrato da Campanella & Mitchell (1968) che, ad esempio, per le condizioni drenate, prevedono stabilizzazione dopo circa 3 cicli. I risultati nelle analisi numeriche, invece, si discostano da tale comportamento e, tale differenza, può essere attribuita a due fattori. Da un lato, tutta la fase di carico termico è interessata da dissipazione della sovrappressione interstiziale dovuta al processo di consolidazione concomitante che, quindi, genera deformazioni del terreno e cedimenti della testa del palo; dall'altro, gli elementi che si trovano all'interfaccia palo-terreno sono soggetti ad uno stato di sollecitazione, figlio del complesso processo di interazione, ben diverso da quello imposto in cella triassiale nelle condizioni controllate di laboratorio. Tuttavia, i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche appaiono qualitativamente confrontabili con le osservazioni sperimentali di Wu et al. (2018) relative a modelli in piccola scala di pali energetici soggetti a carico ciclico termico. Si può concludere che il modello numerico sviluppato può essere utilizzato per studiare i complessi processi di interazione terreno/palo/struttura che si verificano in fondazioni con pali energetici

Vale la pena di notare che le analisi effettuate nel presente studio si riferiscono ad un palo singolo il cui comportamento può essere assimilato a quello di un gruppo in cui tutti i pali sono stati attivati termicamente; la presenza di pali inattivi, collegati alla stessa platea, può ridurre significativamente l'entità degli spostamenti irreversibili. In conseguenza di quanto sopra e di precedenti studi di letteratura, quest'ultima configurazione è l'unica opzione progettuale quando i cedimenti dovuti alle variazioni cicliche di temperatura minacciano la funzionalità della struttura portante. In questo caso è necessaria un'attenta progettazione della fondazione per soddisfare i requisiti di sicurezza previsti dalle norme tecniche.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- Bourne-Webb P.J., Amatya B., Soga K., Amis T., Davidson C., Payne P. (2009). Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Geotechnique*, 59(3), 237–248.
- Brandl H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*, 56(2):81–122.
- Campanella R.G., Mitchell J.K. (1968). Influence of temperature variations on soil behaviour. *J. Soil Mech. Found. Div.*, 94(3), 709–734.
- Cekerevac C., Laloui L. (2004). Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 28(3), 209–228.
- Dassault Systemes (2014). *Abaqus Analysis User Guide v6.14*. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- Iodice C., Di Laora R., Mandolini A. (2023). A practical method to design thermally stressed piles. *Geotechnique*, 73(1), 30–43.
- Kolymbas D. (1991). An outline of hypoplasticity. *Arch. Appl. Mech.*, 61(3), 143–151.
- Laloui L., Nuth M., Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 30(8), 763–781.
- Ma Q.J., Ng C.W.W., Mašin D., Zhou C. (2017). An approach for modelling volume change of fine-grained soil subjected to thermal cycles. *Can. Geotech. J.*, 54(6), 896–901.
- Mašin D. (2019). *Modelling of Soil Behaviour with Hypoplasticity: Another Approach to Soil Constitutive Modelling*. Springer.
- Ng C.W.W., Shi C., Gunawan A., Laloui L. (2014). Centrifuge modelling of energy piles subjected to heating and cooling cycles in clay. *Geotech. Lett.*, 4(4), 310–316.
- Niemunis A., Herle I. (1997). Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mech. Cohes. Frict. Mat.*, 2(4), 279–299.
- Schofield A.N., Wroth P. (1968). *Critical state soil mechanics*. McGraw-Hill, European Civil Engineering series, London.
- Sutman M., Olgun C.G., Laloui L. (2019). Cyclic load–transfer approach for the analysis of energy piles. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng. - ASCE*, 145(1), 04018101.
- Tamagnini C., Viggiani G., Chambon R. (2000). A review of two different approaches to hypoplasticity. *Constitutive modelling of granular materials*, 107–145.
- Vega A., McCartney J.S. (2014). Cyclic heating effects on thermal volume change of silt. *Environ. Geotech.*, 2(5), 257–268.
- Wu D., Liu H.L., Kong G.Q., Ng C.W.W., and Cheng, X. H. (2018). Displacement response of an energy pile in saturated clay. *Proc. Inst. Civ. Eng.: Geotech. Eng.*, 171(4), 285–294.