

## **PROVE DI TAGLIO DIRETTO CON CONTROLLO DI TEMPERATURA: PRIMI RISULTATI SU CAMPIONI DI TERRENO RICOSTITUITI**

Arianna Lupattelli

*Università degli Studi di Perugia – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale*  
*arianna.lupattelli@studenti.unipg.it*

Benedetta Brunelli

*Università degli Studi di Perugia - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale*  
*benedetta.brunelli@studenti.unipg.it*

Elisabetta Cattoni

*Università eCampus*  
*elisabetta.cattoni@uniecampus.it*

Diana Salciarini

*Università degli Studi di Perugia - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale*  
*diana.salciarini@unipg.it*

### **Sommario**

Nel presente lavoro è stato indagato il comportamento termomeccanico di campioni di terreno ricostituiti in laboratorio tramite delle prove di taglio diretto. È stato utilizzato un nuovo prototipo di scatola di taglio diretto, che, rispetto al classico dispositivo, è implementato con l'introduzione di un elemento riscaldante ed un sistema di controllo di temperatura. Lo scopo è quello di confrontare i risultati tra prove di taglio diretto classiche e quelle condotte a temperatura controllata e costante su provini ricostituiti di sabbia asciutta. I risultati mostrano che, in condizioni di riscaldamento, l'effetto termico sulle caratteristiche di resistenza del materiale non è del tutto trascurabile e consiste in un incremento della coesione e una diminuzione dell'angolo di attrito.

### **1. Introduzione**

Il comportamento termomeccanico dei terreni è stato oggetto di numerosi studi nel corso degli ultimi due decenni ed è correlato alla promozione e allo sviluppo di nuove strutture geotecniche soggette a variazioni termiche, tra le quali le geo-strutture energetiche (Brandl 2006, Abuel-Naga et al. 2007; Hueckel et al. 2009).

Gli effetti della temperatura sulla resistenza al taglio dei terreni, ampiamente analizzati mediante prove triassiali a temperatura controllata (Campanella e Mitchell, 1968; Burghignoli et al., 2000; Graham et al., 2001; Hueckel et al., 2009; Laloui et al., 2014), hanno mostrato una dipendenza dalla storia termica, dalla storia tensionale e dalle condizioni di drenaggio del terreno stesso. In condizioni drenate e di riscaldamento, la resistenza al taglio di argille sature normalmente consolidate e leggermente sovraconsolidate aumenta (Cekerevac e Laloui, 2004; Yavari et al. 2016). In condizioni non drenate, invece, l'espansione delle componenti del terreno e le sovrappressioni interstiziali termo-indotte portano ad una riduzione della resistenza al taglio (Campanella e Mitchell, 1968; Mitchell e Soga, 2005; Hueckel et al., 2011; Fuentes et al., 2016).

Mentre diversi studi si sono focalizzati sul comportamento termomeccanico di terreni a grana fine, in letteratura si hanno meno informazioni sull'effetto termico in terreni a grana grossa. Le prove di consolidazione a controllo di temperatura eseguite da Recordon (1993) su sabbia fine nell'intervallo 2°C - 40°C mostrano che i parametri di compressibilità (indice di compressione,

modulo di Young e rapporto di sovraconsolidazione) sono indipendenti dalla temperatura. La stessa osservazione è stata fatta da Saix et al. (2000) su sabbie argillose limose nell'intervallo 30°C-70°C e da Yavari et al. (2016).

In questa memoria sono presentati i primi test svolti nell'ambito di un programma di sperimentazione più ampio, finalizzato a studiare sia il comportamento dei terreni sottoposti a carichi termici (sia costanti che ciclici).

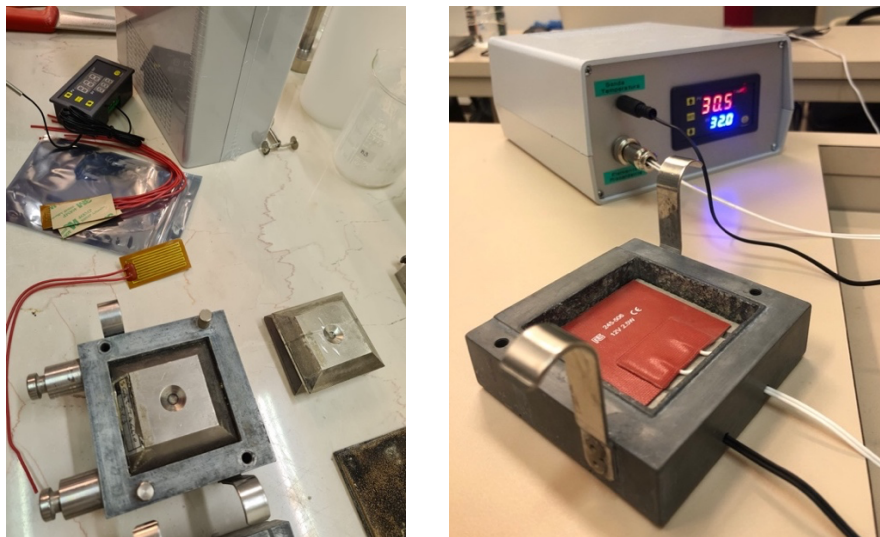
Dopo aver presentato il nuovo prototipo di scatola di taglio con controllo di temperatura, si mostrano i risultati dei primi test termomeccanici su terreni sabbiosi asciutti, sottoposti a condizioni di riscaldamento costante.

## **2. Setup sperimentale**

Di seguito viene descritto il setup sperimentale, sviluppato ad-hoc per gli scopi di questa indagine di laboratorio. All'illustrazione del nuovo prototipo di scatola di taglio e alla caratterizzazione del materiale utilizzato per i test seguono i dettagli sul programma di prove effettuato. La risposta di campioni di terreno ricostituiti in laboratorio, sottoposti a prove di taglio diretto classiche e con riscaldamento a temperatura costante, viene analizzata per comprendere e confrontare il loro comportamento, caratterizzandone i diversi parametri di resistenza.

### *2.1 Scatola di taglio con controllo di temperatura*

Per valutare la risposta termo-meccanica di terreni riscaldati, è stato sviluppato un prototipo sperimentale presso il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università degli Studi di Perugia. Una classica scatola di taglio è stata implementata con una resistenza termica per svolgere prove di resistenza che prevedono il riscaldamento del terreno ed il pieno controllo della temperatura nel corso della sperimentazione (Figura 1).



*Figura 1. Foto del nuovo prototipo di scatola di taglio con controllo di temperatura.*

La composizione della scatola di taglio, assemblata per la prova tradizionale, è illustrata in Figura 2. Alla piastrina di base se ne sovrappongono due con costole, al di sopra delle quali viene posto il campione di terreno per uno spessore pari a  $s_t=24.8$  mm e un'ulteriore piastrina sulla base superiore (Figura 2a). Il terreno, dopo essere stato inserito nella scatola viene accuratamente compattato mediante la ripetuta caduta di un maglio. Il nuovo prototipo di scatola di taglio differisce essenzialmente per l'assenza delle piastrine con costole alla base della prima semiscatola e lo spessore del campione di terreno che si riduce a  $s_t^*=20.6$  mm, compattato

ancora con l'utilizzo del maglio. La parte innovativa consiste nel posizionamento alla base del provino di una piastra scaldante realizzata in malta di cemento e spessore  $s_c=9$  mm sulla quale è integrata sia una resistenza termica per l'applicazione del carico termico che una sonda di temperatura per il controllo in continuo della temperatura. Il dispositivo è collegato ad una scatola di comando, con rilevatore e regolazione di temperatura (Figura 2b).

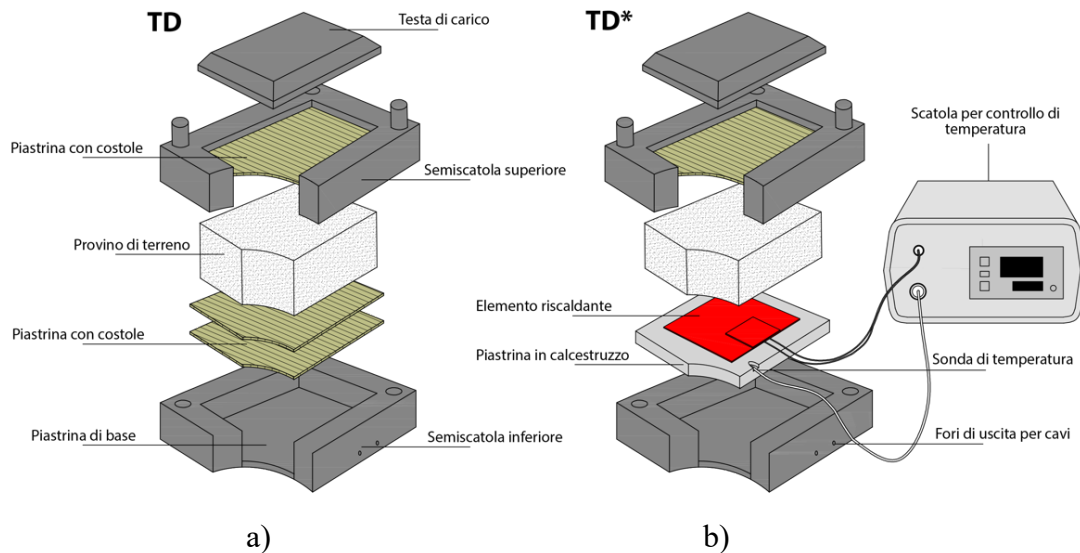


Figura 2. Schema a) della scatola di taglio tradizionale TD e b) del nuovo prototipo con piastrina riscaldante TD\*.

## 2.2 Materiale testato

Per preparare i campioni da sottoporre alle prove di taglio diretto, il terreno è stato pestellato con un mortaio ed essiccato in forno. Un'analisi granulometrica preliminare (Figura 3), tramite l'utilizzo di n°11 setacci (diametro da  $d_1=2$  mm a  $d_{11}=0.063$  mm), ha permesso di classificare il materiale a disposizione per i test come sabbia limosa (85.28% di sabbia e 14.72% di limo).

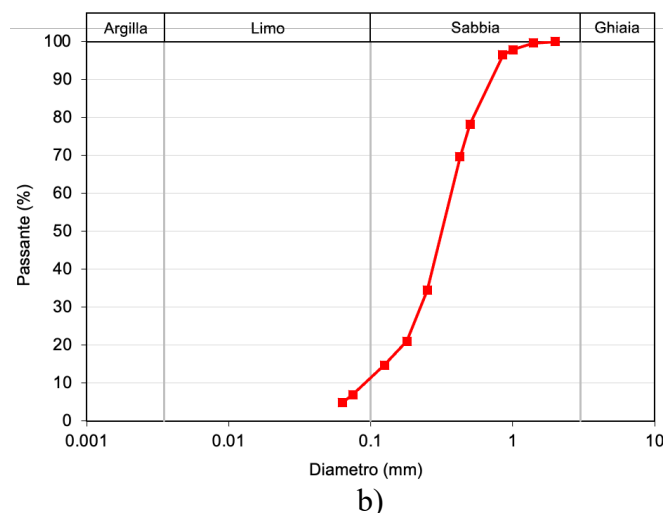
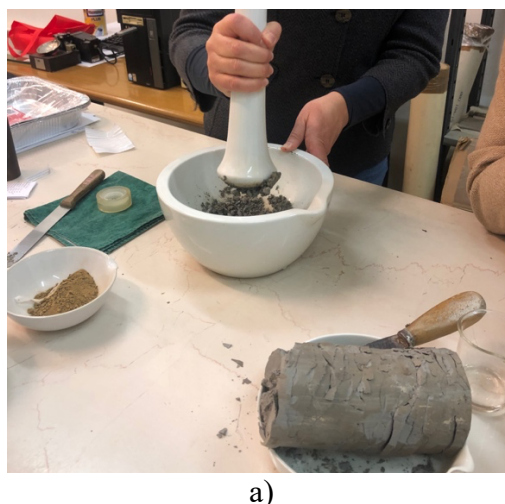


Figura 3. a) Preparazione del materiale ricostituito; b) Curva granulometrica del terreno oggetto delle prove.

I parametri caratteristici dei sei provini misurati (*peso specifico relativo*  $G_s$ , *altezza*  $h$ , *volume*  $V$ , *peso specifico secco*  $\gamma_d$  e *indice dei vuoti*  $e$ ) sono riportati nella Tabella 1.

Tabella 1. Caratterizzazione dei sei provini di sabbia limosa per le prove di taglio diretto

N°	G <sub>s</sub>	h (mm)	V (cm <sup>3</sup> )	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	e
1	2.6	30.8	110.880	15.923	0.601
2	2.6	30.8	110.880	15.985	0.595
3	2.6	31.3	112.680	15.969	0.597
4	2.6	26.6	95.760	15.938	0.600
5	2.6	26.6	95.760	15.912	0.602
6	2.6	26.6	95.760	15.955	0.598

### 2.3 Programma di prove

Sono state condotte sei prove di taglio diretto su provini di terreno asciutto ricostituiti, delle quali tre (TD) eseguite secondo la classica procedura del taglio diretto e tre (TD\*) con la nuova apparecchiatura. Le condizioni di ciascuna prova sono riassunte nella Tabella 2. Per ogni prova, una volta assemblate le due semiscatole nella macchina di taglio, la prima fase di consolidazione (Fase<sub>1</sub>) è stata eseguita con l'applicazione di tre tensioni verticali diverse pari a q<sub>1</sub>=100, q<sub>2</sub>=200 e q<sub>3</sub>=400 kPa ed è stata interrotta nel momento in cui non venivano più registrati cedimenti verticali apprezzabili, con intervalli di lettura di 60 secondi. La successiva fase di taglio (Fase<sub>2</sub>) è stata eseguita con una velocità pari a v=0.060 mm/min, fino al raggiungimento di uno spostamento orizzontale pari a circa s<sub>h</sub>= 7-7.5 mm con intervalli di lettura di 10 secondi. Nel caso delle prove TD\* è stata impostata nel sistema di acquisizione, prima della fase di consolidazione, una temperatura nella piastrina scaldante di calcestruzzo pari a 32.5°C, mantenuta circa costante durante il corso della prova, con decrementi ritenuti ininfluenti compresi tra il 4% e il 7% (T<sub>Fase1</sub> e T<sub>Fase2</sub>).

Tabella 2. Elenco e descrizione delle prove di taglio diretto eseguite sui campioni ricostituiti di terreno.

N°	Tipologia	Tensione verticale (kPa)	T <sub>Fase1</sub> (°C)	T <sub>Fase2</sub> (°C)
1	TD	100	T <sub>amb</sub>	T <sub>amb</sub>
2	TD	200	T <sub>amb</sub>	T <sub>amb</sub>
3	TD	400	T <sub>amb</sub>	T <sub>amb</sub>
4	TD*	100	32.4	32.5
5	TD*	200	31.2	31.3
6	TD*	400	30.0	31.1

### 3. Risultati sperimentali

I risultati ottenuti sono illustrati in Figura 4, confrontando le sei prove (TD-n e TD\*-n), per verificare la variabilità della risposta del terreno in funzione del riscaldamento.

In Figura 4a, come atteso, le curve mostrano i valori di tensione tangenziali più elevati per le prove sottoposte ad una maggiore tensione assiale, con valori massimi rispettivamente di 277 e 255 kPa per le prove 3-TD e 6-TD\*. Si osserva che confrontando i valori delle tensioni tangenziali per le coppie di prove svolte alla stessa tensione verticale, i valori massimi non hanno un trend uniforme. Infatti, per valori bassi della tensione di assiale, i provini riscaldati mostrano tensioni tangenziali leggermente più alte di quelle osservate per i provini a T<sub>amb</sub> (curve TD-1 e TD\*-4). Per valori elevati della tensione di assiale, il comportamento è opposto e i provini scaldati mostrano tensioni tangenziali più basse di quelle osservate per i provini a T<sub>amb</sub> (curve TD-3 e TD\*-6). Per gli spostamenti verticali, dall'andamento rappresentato durante la fase di taglio (Figura 4b), è osservabile come in tutte e sei i test, i provini di terreno dilatano e quelli riscaldati mostrano un comportamento più dilatante rispetto a quelli a T<sub>amb</sub>.

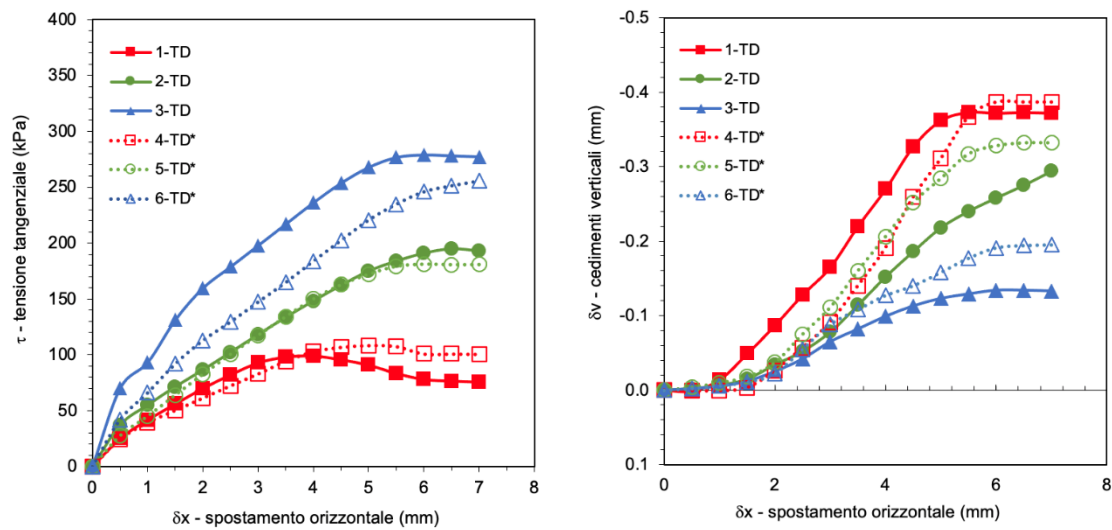


Figura 4. Risultati sperimentali delle prove TD e TD\* (35°C) per campioni di sabbia: a) Tensione di taglio-Spostamenti orizzontali; b) Spostamenti verticali-Spostamenti orizzontali.

Nel piano di Mohr a rottura (Figura 5a) si ricavano parametri di resistenza pari a  $\phi=38.6^\circ$  e  $c=5$  kPa, nel caso delle prove TD e di  $\phi^*=35^\circ$  e  $c^*=15$  kPa nel caso delle prove TD\*.

Nelle prove con controllo di temperatura si calcola dunque una diminuzione pari al 10% in termini di angolo di attrito ed un aumento pari circa al 33% in termini di coesione rispetto alle prove tradizionali a temperatura ambiente.

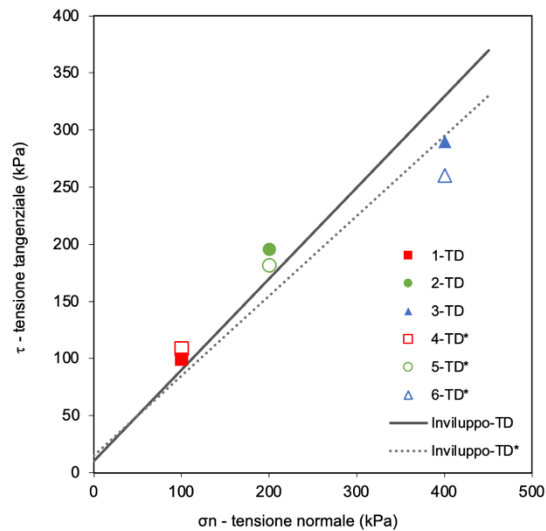


Figura 5. Risultati sperimentali delle prove TD e TD\* (35°C) per campioni di sabbia: Involuppo di rottura a taglio.

#### 4. Conclusioni

È stato presentato un nuovo prototipo di scatola di taglio per lo svolgimento di prove con controllo di temperatura e sono stati descritti i primi test condotti su provini di sabbia limosa asciutta ricostituiti in laboratorio, confrontando i risultati con quelli di prove di taglio diretto tradizionali. Dai risultati sperimentali possono essere ricavate le seguenti conclusioni:

- Dal confronto dei risultati delle prove, condotte su provini a temperatura ambiente e su provini riscaldati, in termini di tensioni tangenziali massime si osserva una dipendenza dalla tensione verticale applicata: in corrispondenza dei carichi assiali più elevati ( $\sigma_v=400-200$  kPa) i valori massimi delle tensioni tangenziali sono maggiori per le prove a temperatura ambiente rispetto alle prove con provini riscaldati, mentre nel caso del carico assiale più basso (100 kPa) il provino riscaldato esibisce valori delle tensioni tangenziali più alti rispetto a quelle del provino a temperatura ambiente.
- L'effetto termico sui campioni di questo tipo di terreno non è del tutto trascurabile, in quanto ad una temperatura più elevata si rileva un aumento significativo della coesione ed una modesta riduzione dell'angolo di attrito. Questo comportamento è in linea con altri risultati di letteratura che riguardano le variazioni dei parametri di resistenza del terreno (ad esempio, Yavari et al. 2016).

Ricerche future saranno dedicate ad investigare il comportamento degli stessi provini sottoposti a carichi termici di tipo ciclico anziché costante e all'esame del comportamento dei terreni all'interfaccia con diversi materiali da costruzione.

### Bibliografia

- Abuel-Naga H.M., Bergado D.T., Bouzza A., Ramana G.V. (2007). "Volume change behaviour of saturated clays under drained heating conditions: experimental results and constitutive modeling", *Canadian Geotechnical Journal*, 44 (8), 942–956.
- Brandl H. (2006). "Energy foundations and other geothermal ground structures", *Geotechnique*, 56 (2), 81–122.
- Burghignoli A., Desideri A., Miliziano S. (2000). "A laboratory study on the thermomechanical behaviour of clayey soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 37 (4), 764–780.
- Campanella R.G., Mitchell J.K. (1968). "Influence of temperature variations on soil behavior", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94 (3), 709–734.
- Cekerevac C., Laloui L. (2004). "Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28(3), 209–228.
- Fuentes R., Pinyol N., Alonso E. (2016). "Effect of temperature induced excess porewater pressures on the shaft bearing capacity of geothermal piles", *Geomechanics for Energy and the Environment*, 8, 30–37.
- Graham J., Tanaka N., Crilly T. (2001). "Modified cam-clay modeling of temperature effects in clays", *Canadian Geotechnical Journal*, 38 (3), 608–621.
- Hueckel T., Francois B., Laloui L. (2009). "Explaining thermal failure in saturated clays", *Geotechnique*, 59 (3), 197–212.
- Hueckel T., Francois B., Laloui L. (2011). "Temperature-dependent internal friction of clay in a cylindrical heat source problem", *Geotechnique*, 61 (10), 831–844.
- Laloui L., Olgun C.G., Sutman M., McCartney J.S., Coccia C.J., Abuel-Naga H.M., Bowers G.A. (2014). "Issues involved with thermoactive geotechnical systems: characterization of thermomechanical soil behavior and soil-structure interface behavior", *The Journal of Deep Foundations Institute*, 108–120.
- Mitchell J.K., Soga K. (2005). "Fundamental of Soil Behaviour", *Third ed. John Wiley & Sons Inc.*, New Jersey.
- Recordon E. (1993). "Déformabilité des sols non saturés à diverses températures", *Revue Française de Géotechnique*, 65, 37–56.
- Saix C., Devillers P., El Youssoufi M.S. (2000). "Élément de couplage thermomécanique dans la consolidation de sols non saturés", *Geotechnique*, 37, 308–317.
- Yavari N., Tang A.M., Pereira J.M. and Hassen G. (2016). "Effect of temperature on the shear strength of soils and soil/structure interface", *Canadian Geotechnical Journal*, 53 (7), 1186–1194.