



## STUDIO SPERIMENTALE IN PICCOLA SCALA DEL RIBALTAMENTO DI APPARATI RADICALI SEMPLIFICATI IN CONDIZIONI DI PARZIALE SATURAZIONE

Giacomo Marrazzo

*Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale*  
*giacomo.marrazzo@polimi.it*

Andrea Galli

*Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale*  
*andrea.galli@polimi.it*

### Sommario

La sicurezza nei confronti dei fenomeni di caduta alberi, di particolare interesse specie in ambito urbano, richiede un approccio fortemente interdisciplinare, e l'Ingegneria Geotecnica può dare un significativo contributo allo studio dei fenomeni di interazione meccanica tra radici e terreno, utili allo studio della resistenza al ribaltamento di piante ad alto fusto. In questa ottica, la nota presenta i risultati preliminari di una campagna di prove in piccola scala che, in particolare, studia l'effetto della parziale saturazione sul comportamento ciclico di un prototipo semplificato di apparato radicale. Tali risultati possono, in prospettiva, contribuire a migliorare le tecniche di interpretazione di prove per la valutazione della stabilità di alberi alla scala reale.

### 1. Introduzione

La valutazione della stabilità di alberi rappresenta un aspetto importante nella prevenzione e nella mitigazione del rischio in aree urbane, colpite da eventi meteorologici sempre più intensi e frequenti, indotti dal cambiamento climatico in atto. Nella pratica, la stabilità di alberi è comunemente investigata da professionisti agronomi tramite procedure di Visual Tree Assessment (VTA; Mattheck e Breloer, 1994) o mediante prove non distruttive eseguite direttamente in sito. Tra queste ultime, le più diffuse sono prove di trazione ("pulling tests") che prevedono l'imposizione di una forza suborizzontale  $F$  monotonamente crescente (applicata ad un'altezza  $h$  pari a circa 1/3 di quella dell'albero, tramite una fune e un paranco; Figura 1a), con registrazione delle rotazioni  $\varphi$  indotte alla base del tronco. Al fine di evitare danni alla pianta, la prova è in genere limitata a valori di rotazione pari  $0.25^\circ$  e la stima del valore ultimo  $F_L$  della forza resistente è ottenuto mediante interpolazione dei dati registrati, secondo la procedura proposta da Wessolly e Erb (1998; Figura 1b) calibrata empiricamente su circa 400 prove di trazione condotte fino a completo ribaltamento. Tale procedura non tiene però debitamente in conto la tipologia di pianta, la sua geometria, né le caratteristiche di resistenza e umidità del terreno. Quest'ultimo aspetto, in particolare, non è ancora stato del tutto chiarito nemmeno in ambito scientifico. In Letteratura, infatti, prove su alberi in vera grandezza (eseguite fino a completo ribaltamento) suggeriscono che solo in condizioni di quasi completa saturazione del terreno si ha una sensibile riduzione nella curva di resistenza al ribaltamento (Défossez et al., 2021), mentre alcune esperienze di laboratorio su prototipi di alberi in scala ridotta e modelli semplificati mostrano una certa influenza del grado di saturazione sulla risposta meccanica del sistema (Galpathage et al. 2018; Zhang et al., 2020 e 2022). Il problema certamente richiede un approccio altamente interdisciplinare (Marrazzo et al., 2023), ma la ricerca in

ambito geotecnico può fornire un valido contributo a chiarire alcuni aspetti, in particolare inerenti ai meccanismi di ribaltamento della zolla radicale. Questi possono infatti essere assimilati al collasso per ribaltamento di fondazioni dirette, soggette a una combinazione di forze verticali ( $V$ ), orizzontali ( $H$ ) e momenti ribaltanti ( $M$ ) fortemente eccentrica, ove l'effetto di ancoraggio delle radici nel terreno circostante gioca un ruolo determinante.

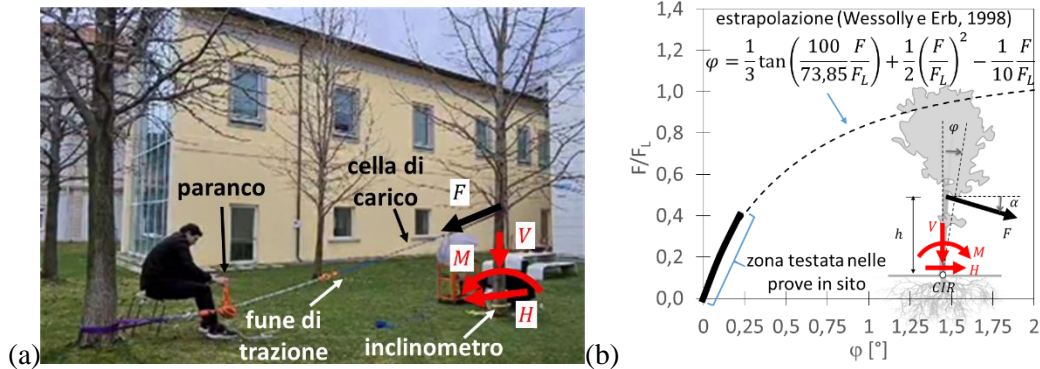


Fig 1. (a) esecuzione di prova di trazione con paranco manuale presso il Politecnico di Milano - Polo Territoriale di LC; (b) schema della prova di trazione e interpretazione mediante la procedura di Wessolly e Erb (1998).

La presente nota, adottando un modello in piccola scala, si propone di studiare sperimentalmente il comportamento a ribaltamento di prototipi semplificati di apparati radicali, investigando in particolare l'influenza del valore di contenuto di acqua nel terreno sulla rigidità della curva di ribaltamento in cicli di carico-scarico. Tale aspetto può essere infatti di particolare importanza per l'interpretazione di prove di trazione alla scala reale. Come schematizzato in Figura 1b, infatti, la porzione della curva usualmente investigata durante prove in sito è molto ridotta (per limitare possibili danni alle piante); l'equazione di Wessolly e Erb (1998), inoltre, introduce come unico parametro di interpolazione il valore limite della forza ribaltante  $F_L$ . Da un punto di vista strettamente meccanico, le usuali prove di trazione appaiono quindi essenzialmente rappresentative dalla rigidità media del sistema.

## 2. Apparato sperimentale e preparazione del prototipo

Il prototipo impiegato è stato concepito con l'obiettivo di riprodurre, seppur in modo semplificato, le caratteristiche essenziali di un apparato radicale sviluppatosi prevalentemente lungo un piano orizzontale (senza cioè significative componenti di radici "a fittone"), dal momento che questa è la geometria che interessa la maggior parte dei casi di ribaltamento osservati. Tali apparati radicali hanno una capacità di resistenza legata per lo più alla rigidità flessionale delle radici principali e allo sfilamento delle radici secondarie. Nel prototipo si è deciso quindi di concentrare il comportamento flessionale in un unico elemento cilindrico in legno (diametro 10 mm e lunghezza 80 mm, su ciascun lato) e simulare la resistenza allo sfilamento fissando a questo una rete in gomma, (area di circa 230 cm<sup>2</sup>, su ciascun lato), perfettamente flessibile e assialmente rigida (si veda anche Marsiglia et al., 2022). L'asta in legno è stata inserita nella mezzera di una trave (32×32×150 mm), che simula l'effetto dell'appoggio della base dell'albero sul terreno e consente la connessione al sistema di carico (Figura 2a). Questo è costituito da due serbatoi (ciascuno con una capacità di 2 litri e inizialmente riempiti con 1 litro di acqua), alloggiati su una piastra in legno ad una distanza di 165 mm dall'asse baricentrale del modello. I due serbatoi sono collegati tra loro mediante una pompa peristaltica; in funzione della differenza dei pesi dell'acqua, controllata dal senso di rotazione della pompa con portata costante pari a circa 1,1 ml/s, è possibile applicare al sistema valori crescenti o decrescenti di momento ribaltante  $M$ , a carico orizzontale  $H$  nullo e carico verticale  $V$  costante (pari alla somma del peso  $P_0 = 1,25$  kg e dell'acqua nei serbatoi  $P_1 + P_2 = 2$  kg). La rotazione del sistema è stata misurata tramite un inclinometro con frequenza di acquisizione pari a 10 Hz. Il modello è stato posizionato su di uno strato uniforme di 120 mm di sabbia del Ticino mediamente addensata ( $D_R \approx 60\%$ ,  $G_S = 2.5$ ;  $n = 39,7\%$ ;  $\gamma_{dry} = 14,8$  kN/m<sup>3</sup>;

$\gamma_{sat}=18,68\text{kN/m}^3$ ), depositato per pluviazione in un contenitore rigido delle dimensioni di  $340\times 150\times 210\text{ mm}$ . Uno strato di copertura di sabbia di  $30\text{ mm}$  viene poi depositato su entrambi i lati del modello, al fine di interrare completamente l'apparato radicale (Figura 2b e c; Galli et al.,2023).

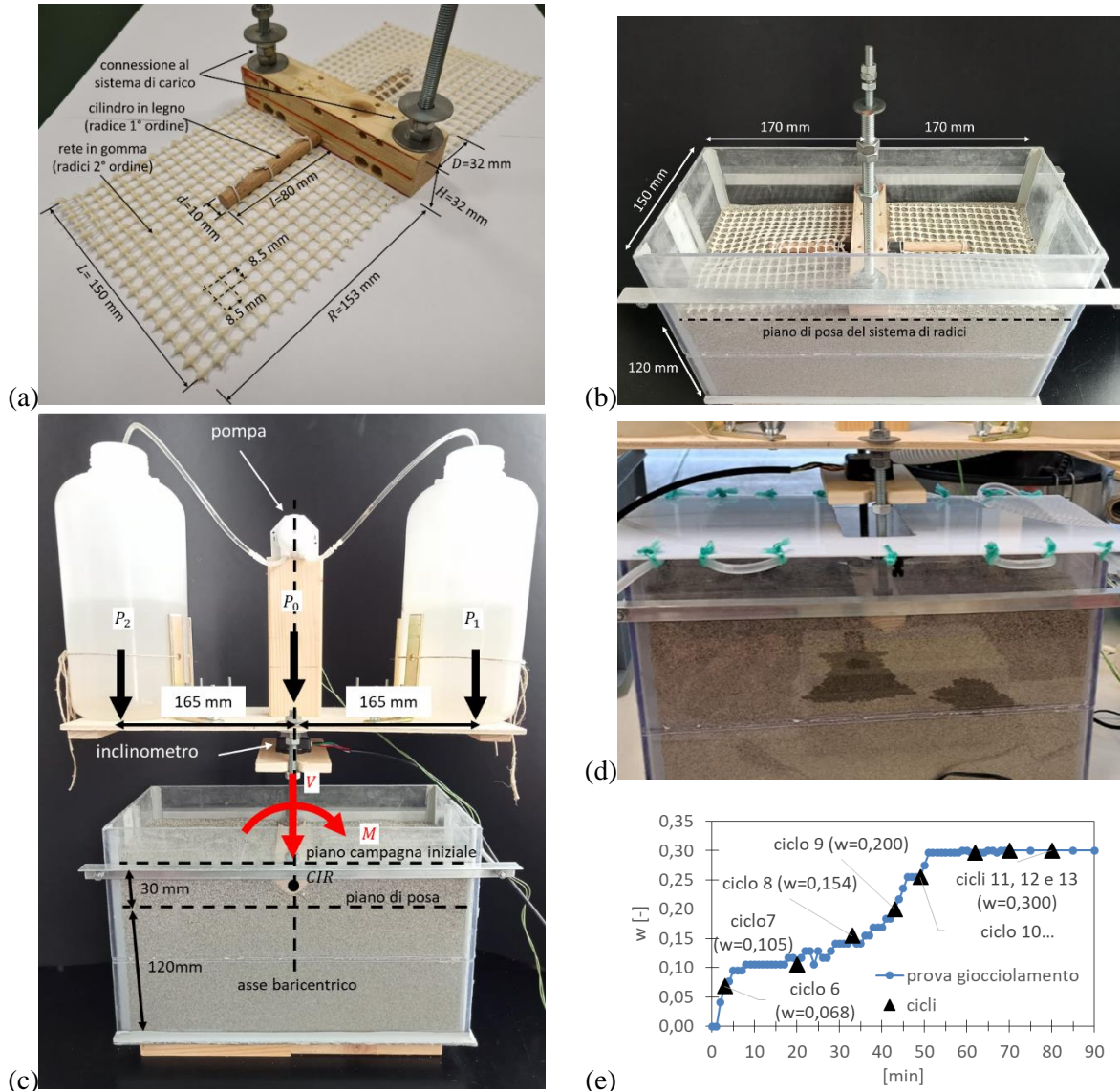


Fig 2. (a) vista del prototipo di apparato radicale (da Galli et al., 2023); (b) posizionamento del prototipo prima del ricoprimento; (c) vista d'insieme del prototipo a inizio prova; (d) dettaglio del sistema di gocciolamento durante la prova di imbibizione; (e) curva di imbibizione per il modello.

Al fine di ricreare condizioni diverse di parziale saturazione, una prova di gocciolamento dall'alto (con portata di acqua pari a circa  $1,2\text{ ml/s}$ , uniformemente distribuita sulla superficie della sabbia; Figura 2d) è stata preliminarmente condotta sul modello, con due sensori di contenuto di acqua, opportunamente installati al di sotto del piano di posa delle radici (non riportati qui per brevità). Questi hanno consentito di determinare una curva di progressiva imbibizione, in funzione del tempo di gocciolamento (Figura 2e), fino al raggiungimento della completa saturazione ( $w_{sat}=30\%$ ), dopo circa 50 minuti. Tale curva è stata impiegata per progettare la prova di carico ciclica descritta nel seguito.

### 3. Descrizione prove

Sono state eseguite quattro prove sperimentali, a velocità di carico sufficientemente bassa da poter essere considerate quasi-statiche: (i) carico monotono in condizioni di materiale completamente secco; (ii)

dieci cicli di carico-scarico in condizioni secche; (iii) cinque cicli di carico-scarico in condizioni secche, seguiti da un carico monotono fino a ribaltamento; (iv) cinque cicli in condizioni secche (cicli 1-5), seguiti da otto cicli umidi (cicli 6-13, rispettivamente a valori di contenuto di acqua pari al 6.8%, 10.5%, 15.4%, 20%, 25.5% e gli ultimi tre al 30%; Figura 2e) eseguiti dopo l'avvio del sistema di gocciolamento. Nel dettaglio, la prova (i) ha consentito di avere una stima preliminare del valore di resistenza massima al ribaltamento e di scegliere l'ampiezza dei cicli nelle successive prove. In particolare, si sono scelti cicli di ampiezza pari a 1/3 del valore di resistenza massima (quindi fattore di sicurezza circa pari a 3), rappresentativi di una condizione usualmente ritenuta di completa sicurezza per l'albero. La prova (ii) è stata invece eseguita per studiare il comportamento ciclico del sistema, verificarne la stabilità e il raggiungimento di una condizione reversibile-pseudoelastica. Si ritiene infatti che ciò sia maggiormente rappresentativo delle condizioni in sito, ove gli alberi, esposti a fenomeni esterni, hanno certamente sperimentato valori di precarico non trascurabili. La prova (iii) è stata eseguita per quantificare l'effetto della fase ciclica sull'addensamento del terreno attorno alle radici e sui valori di resistenza al ribaltamento. Sulla base delle prove precedenti, infine, la prova (iv) è stata progettata per avere una prima fase ciclica che consenta di raggiungere condizioni di comportamento pseudoelastico, per poi attivare il sistema di gocciolamento e verificare come cambiano le caratteristiche dei cicli (in particolare la rigidità) all'aumentare del contenuto di acqua, e il valore di resistenza al ribaltamento una volta raggiunta la completa saturazione. I risultati sono espressi nel seguito in termini di rotazione  $\varphi$  [°] del modello e momento ribaltante  $M$  [Nm/m] applicato dal sistema di carico, espresso per unità di lunghezza fuori piano della trave di appoggio, così da rendere idealmente il sistema assimilabile ad una fondazione nastroforme equivalente, soggetta a un carico fortemente eccentrico. Per tutte prove si è assunto una velocità di carico (o scarico, ove previsto) pari a circa 1,4 Nm/m/min.

#### **4. Risultati sperimentali**

I risultati delle quattro prove sono riassunti in Figura 3a, dove si evidenzia come la prova (i) abbia mostrato un valore di resistenza ultima di poco inferiore a 15 Nm/m. L'ampiezza dei cicli per le prove successive è quindi stata stabilita pari a circa 4,2 Nm/m. La prova (iii), eseguita in condizioni nominalmente identiche, ma prevedendo una fase iniziale di cinque cicli, mostra un comportamento coerente con la precedente, anche se presenta una risposta complessivamente più rigida nella successiva fase di carico monotono e un valore di resistenza massima leggermente superiore a 16 Nm/m. Tali differenze possono essere dovute (in parte) a errori nella preparazione del prototipo, ma anche ad un effetto di progressiva compattazione del terreno dovuto alla iniziale fase ciclica. La prova (iv) mostra un significativo incremento della rotazione accumulata durante la fase ciclica e una marcata riduzione del valore di resistenza ultima in condizioni di completa saturazione, sceso a circa 12 Nm/m (riduzione di quasi il 30% rispetto alle condizioni secche). La Figura 3b mostra un confronto di dettaglio tra la prova (ii) e la parte ciclica della prova (iv), ove si riconosce come in condizioni secche (per i valori di carico qui raggiunti) il comportamento ciclico sia essenzialmente stabile, con una minima tendenza all'accumulo di rotazioni, mentre in condizioni umide (durante il progressivo aumento del contenuto di acqua) si abbia un marcato aumento del valore della rotazione accumulata. Si nota anche che i cicli sono in questo caso caratterizzati da comportamento piuttosto irregolare, con in qualche caso repentini "salti" nel valore delle rotazioni, associati probabilmente a effetti di sprofondamento locale del sistema di radici, indotti da una aumentata fragilità del sistema. Tali effetti locali non erano invece stati osservati nella prova (ii) poiché in condizioni secche la risposta del materiale è in genere caratterizzata da maggior duttilità.

Le figure 3c e d presentano invece il confronto tra singoli cicli delle prove (ii) e (iv). In particolare, la Figura 3c mostra, a titolo di esempio, il terzo ciclo delle due prove (in condizioni nominalmente identiche, poiché la fase di gocciolamento per la prova (iv) inizia solo dal ciclo 8). La buona corrispondenza prova la sostanziale riproducibilità delle condizioni di prova. La Figura 3d mostra infine il confronto tra il ciclo 10 della prova (ii) e il ciclo 13 della prova (iv), ottenuto in condizioni di completa

saturazione. In Figura 3e-f, per completezza, sono mostrate due viste al termine della prova (iii), ove si nota la fuoriuscita della rete e della radice dal terreno nella zona di monte (a significare il completo sfilamento delle radici secondarie e il sollevamento della primaria), con sprofondamento delle radici nella zona di valle. Al fine di quantificare la rigidezza dei cicli (per l'ampiezza  $\Delta M$  imposta durante la fase di carico), per ogni ciclo è stato valutato il valore della massima escursione  $\Delta\phi$  nella rotazione, in modo da definire la rigidezza media come  $K = \Delta M / \Delta\phi$  (Figura 3c).

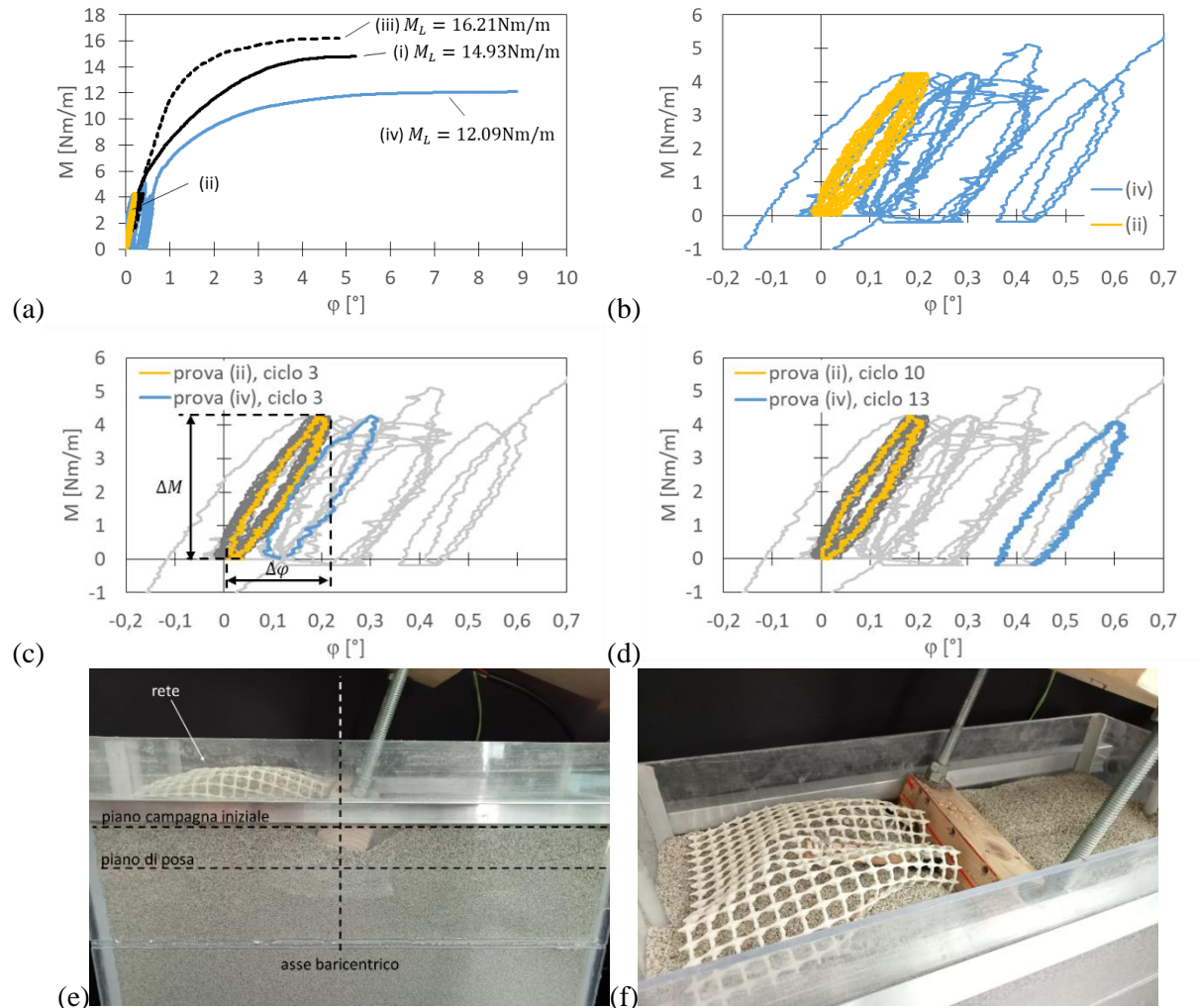


Fig 3. (a) curve  $M - \phi$  per le prove (i), (ii), (iii) e (iv); (b) dettaglio sulla fase ciclica per le prove (ii) e (iv); (c) confronto tra il ciclo 3 per le prove (ii) e (iv); (d) confronto tra il ciclo 10 della prova (ii) e il ciclo 13 della prova (iv); (e-f) viste del prototipo a completo ribaltamento al termine della prova (iii).

## 5. Discussione

I valori di rigidezza così calcolati per i cicli delle prove (ii) e (iv) sono riassunti in Figura 4 insieme, per quest'ultima prova, ai valori di contenuto d'acqua  $w$  rappresentativo di ciascun ciclo. Come già osservato, la fase ciclica della prova (ii) ha consentito di raggiungere una condizione pseudostabile per il modello, con rigidezze che dopo 3-4 cicli si assestano su valori di circa  $20 \text{ Nm/m}^\circ$ . Per questo motivo la prova (iv) ha previsto una fase iniziale di cinque cicli in condizioni secche, così da raggiungere una condizione analoga, con valori di rigidezza simili a quelli della prova (ii). A partire dal quinto ciclo, poi, con la progressiva imbibizione del terreno, i valori di rigidezza mostrano per la prova (iv) un evidente trend decrescente, fino ad attestarsi al decimo ciclo su valori inferiori a  $15 \text{ Nm/m}^\circ$  (con una diminuzione di quasi il 30% rispetto alle condizioni secche). I tre cicli in condizioni di completa saturazione (cicli 11, 12 e 13 della prova (iv)) sembrano infine mostrare una lieve ripresa, probabilmente segno che il

sistema si sta assestando su di una nuova configurazione pseudostabile.

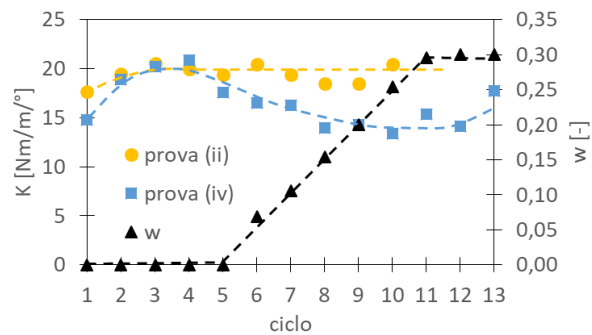


Fig 4. Confronto tra i valori di rigidezza dei cicli per le prove (ii) e (iv); per quest'ultima si riporta anche l'andamento del contenuto d'acqua nel modello.

## 6. Conclusioni

La nota ha mostrato i risultati di una campagna preliminare di prove in piccola scala su un prototipo semplificato di apparati radicali. Si è studiato in particolare l'effetto del contenuto d'acqua sulla rigidezza dei cicli di carico-scarico, considerando ampiezze dei cicli pari 1/3 della resistenza in condizioni secche. I dati mostrano una progressiva riduzione della rigidezza dei cicli (fino a circa il 30%, per il modello qui assunto) al crescere del valore di contenuto di acqua. I cicli paiono anche caratterizzati da una maggior irregolarità, dovuta probabilmente allo sviluppo di una risposta localmente più fragile del terreno. Anche il valore della resistenza ultima a completa saturazione mostra una netta riduzione (circa il 20%) rispetto alle condizioni secche. Questi risultati suggeriscono quindi che variazioni nel contenuto di acqua nel terreno, dovute ad esempio ad effetti stagionali o di improvvise e intense precipitazioni, può portare a significativi errori nella interpretazione di prove di trazione su alberi in vera grandezza.

## Ringraziamenti

Le prove sono state condotte presso il Laboratorio di Analisi e Modellazione Geotecnica (GeoT-LAM) presso il Polo Territoriale di Lecco del Politecnico di Milano. Il lavoro è sviluppato nel quadro di un accordo di collaborazione Scientifica con Università di Milano-Bicocca, University of Dundee e Agro Service s.r.l.

## Bibliografia

- Défossez, P., Veylon, G., Yang, M., Bonnefond, J. M., Garrigou, D., Trichet, P. & Danjon, F. (2021). "Impact of soil water content on the overturning resistance of young Pinus pinaster in sandy soil", *For. Ecol. Manage.* 480, 118614.
- Galli, A., Marrazzo, G., Marsiglia, A., Ezzati, A., Ciantia, M. O., & Castellanza, R. (2023). "Small Scale Toppling Tests on Simplified Tree Root Prototypes", *Proc. CNRIG*, 71-78. Springer Nature Switzerland.
- Galpathage, S. G., Indraratna, B., Heitor, A., & Rujikiatkamjorn, C. (2023). "Pull-out behaviour of simulated tree roots embedded in compacted soil", *Proc. of the Inst. of Civil Engineers-Ground Improvement*, 176(1), 54-64.
- Marrazzo, G., Galli, A., & Raimondi, A. (2023). "Problemi di interazione tra radici e terreno nei meccanismi di ribaltamento di grandi alberi", *Proc. XII Incontro Annuale dei Giovani Ingegneri Geotecnici (IAGIG)*, 103-106.
- Marsiglia, A., Ciantia, M., O., Galli, A., Canepa, D. (2022). "Vertical loading tests on a simplified tree root prototype", *Proc. X ICPMG, Korean Geotechnical Society, Seoul, Korea*, 832-835.
- Mattheck, C., & Breloer, H. (1994). "Field guide for visual tree assessment (VTA)", *Arboricultural Journal*, 18(1), 1-23. <https://doi.org/10.1080/03071375.1994.9746995>
- Wessolly, L., and M. Erb. (1998). *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*. Patzer, Berlin.
- Zhang, X., Knappett, J. A., Leung, A. K., Ciantia, M., O., Liang, T., Nicol, B., C. (2022). "Centrifuge modelling of root-soil interaction of laterally loaded trees under different loading conditions", *Géotechnique*, 1-15.
- Zhang, X., Knappett, J. A., Leung, A. K., Ciantia, M. O., Liang, T., & Danjon, F. (2020). "Small-scale modelling of root-soil interaction of trees under lateral loads", *Plant and Soil*, 456, 289-305.