

PROBLEMI DI INTERAZIONE TRA RADICI E TERRENO NEI MECCANISMI DI RIBALTAMENTO DI GRANDI ALBERI

Giacomo Marrazzo (giacomo.marrazzo@polimi.it)
Politecnico di Milano

Andrea Galli (andrea.galli@polimi.it)
Politecnico di Milano

Anita Raimondi (anita.raimondi@polimi.it)
Politecnico di Milano

ABSTRACT

La valutazione della stabilità al ribaltamento di grandi alberi ha un ruolo fondamentale nella gestione e mitigazione dei rischi, specialmente in ambito urbano. I meccanismi di ribaltamento sono fortemente dipendenti dall'interazione tra radici e terreno, dalle loro proprietà meccaniche e dalla presenza di acqua nel sottosuolo. Ciò comporta la necessità di investigare anche l'impatto degli alberi sul bilancio idrologico locale (nell'intorno della zolla radicale) per valutare il contenuto idrico presente nel terreno. Nelle aree urbane, inoltre, gli aspetti idraulici e idrologici sono di particolare interesse poiché gli alberi costituiscono un possibile sistema di drenaggio urbano sostenibile. L'Ingegneria Geotecnica può fornire un valido contributo nello studio di questi aspetti mediante approcci sia sperimentali che numerici.

1. INTRODUZIONE

Il collasso di grandi alberi (Figura 1a) rappresenta, in area urbana, un importante fattore di rischio per strutture, infrastrutture e beni, e per l'incolumità delle persone. Proteggere il patrimonio arboreo, inoltre, contribuisce anche alla mitigazione del rischio di allagamenti, in quanto gli alberi contribuiscono al riequilibrio del ciclo idrologico e rappresentano un valido sistema sostenibile di drenaggio per la riduzione dei deflussi meteorici, soprattutto se accoppiati con sistemi di infiltrazione installati alla loro base (Berland et al., 2017). I cambiamenti climatici osservati negli ultimi anni, con l'intensificarsi degli eventi meteorologici estremi, hanno aggravato la problematica della caduta di alberi. La valutazione della loro stabilità è perciò ormai parte integrante delle metodologie di gestione e mitigazione dei rischi, e richiede un approccio multidisciplinare che combina competenze botaniche, agronomiche e ingegneristiche. L'Ingegneria Geotecnica può fornire un valido contributo, in particolare quando l'attenzione è rivolta ai meccanismi di collasso per ribaltamento della zolla radicale. Questa può infatti essere assimilata alla "fondazione" dell'albero, inteso come struttura snella soggetta ad una complessa combinazione di carichi. Nella nota si presenta uno studio di inquadramento del problema, integrando aspetti geotecnici e idraulici, che risultano necessariamente essere interdipendenti. La presenza dell'albero modifica infatti il bilancio idrologico locale (nell'intorno della zolla) che, d'altra parte, governa la quantità di acqua presente nel terreno e, indirettamente, la resistenza al ribaltamento della pianta.

2. ASPETTI GEOTECNICI E IDRAULICI

La resistenza al ribaltamento di un albero è fortemente governata dall'interazione tra le radici e il terreno circostante. Questo aspetto è stato oggetto di numerosi studi teorici e sperimentali volti per lo più ad investigare il miglioramento della resistenza del terreno dovuto alla presenza delle radici (Mickovski e Beek, 2009). Tuttavia, per valutare la resistenza al ribaltamento l'attenzione deve essere volta allo studio della capacità di ancoraggio delle radici e della loro resistenza alle azioni verticale (V), orizzontale (H) e ribaltante (M) dovute al peso proprio della pianta (W) e all'azione orizzontale (F) del vento (Figura 1b). Si possono riconoscere comportamenti diversi a seconda delle proprietà delle radici (dimensione e caratteristiche meccaniche): idealmente, le radici di maggior diametro contribuiscono alla resistenza al ribaltamento grazie alla loro rigidità flessionale, mentre quelle più sottili essenzialmente in base alla resistenza allo sfilamento. Come ricordato, l'albero può essere assimilato ad una struttura snella ad un grado di libertà, rappresentato dalla rotazione φ del colletto; appare allora importante

determinare la curva momento-rotazione del sistema e valutarne la resistenza ultima. Nella pratica agronomica tale stima viene principalmente effettuata mediante prove di trazione non distruttive (“pulling test”, si veda il successivo §3). Altri ricercatori (James et al. 2006) hanno invece investigato la risposta dinamica di alberi soggetti al carico variabile del vento; recentemente, Bejo et al. (2022) hanno anche proposto approcci statistici per l’analisi della relazione tra velocità del vento e inclinazione dell’albero.

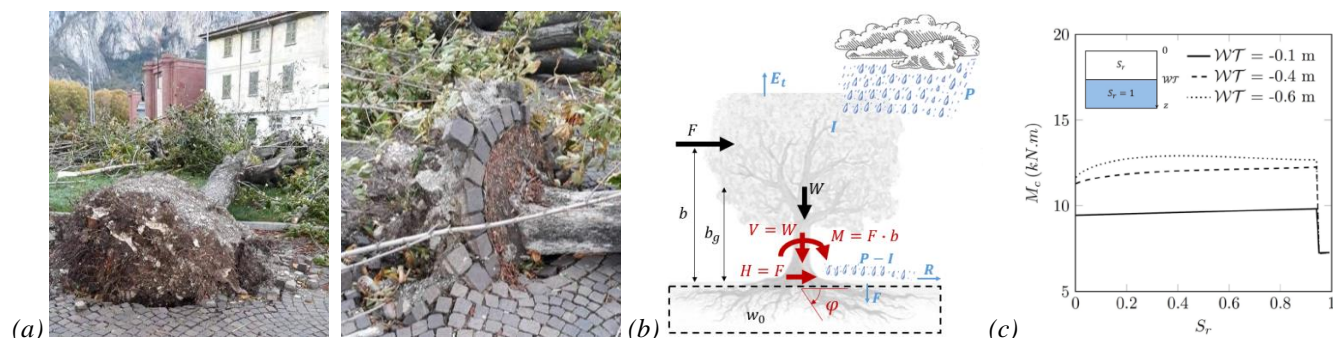


Figura 1. (a) Collasso di alberi per ribaltamento; (b) Azioni agenti; (c) Resistenza al ribaltamento (M_c) in funzione del grado di saturazione del terreno (S_r) per differenti valori della profondità della falda (WT); (da Défossez et al., 2021)

Gli approcci attualmente in uso in ambito professionale non tengono tuttavia debitamente in conto gli aspetti geometrici, meccanici e idraulici che caratterizzano il problema. A tale proposito, risulta importante studiare l’influenza del contenuto d’acqua (w_0) nel terreno entro la zolla radicale (tratteggiato in figura 1b), da cui dipende evidentemente il valore di suzione e della resistenza del terreno. Tale aspetto non è ancora stato del tutto chiarito in Letteratura; alcune esperienze di laboratorio su prototipi di alberi in scala ridotta e modelli semplificati mostrano infatti una certa influenza del valore w_0 sulla resistenza (Galpathage et al. 2018; Zhang et al., 2020 e 2022), mentre alcuni risultati di prove di trazione su alberi in vera grandezza (eseguite fino a ribaltamento) suggeriscono che solo in caso di completa saturazione si ha una sensibile riduzione della resistenza ultima (Défossez et al., 2021; Figura 1c). Tale differenza potrebbe essere dovuta all’azione delle radici che mantengono localmente il terreno in condizioni di parziale saturazione anche per elevati valori del contenuto di acqua w_0 . In quest’ottica appare allora importante descrivere il bilancio idrologico del sistema, al fine di valutare la quantità di acqua presente nel terreno. Il ciclo idrologico locale (Figura 1b) è infatti influenzato dalla presenza di alberi, soprattutto attraverso i processi di intercettazione (I) ed evapotraspirazione (E_t). Durante gli eventi meteorici una frazione (I) di pioggia (P) viene intercettata dalla chioma, dal tronco e dai rami di un albero mentre la rimanente quota parte ($P - I$) arriva a terra e può infiltrarsi (F) nel terreno a seconda delle caratteristiche di permeabilità dello stesso. Parte di quest’acqua viene assorbita dalle radici e restituita in atmosfera attraverso traspirazione dalle foglie. Qualora siano presenti pavimentazioni poco permeabili o il terreno sia in condizioni di completa saturazione, si genera un deflusso superficiale (R), che in caso di insufficienza delle reti di drenaggio e/o in condizioni di depressioni superficiali, dà luogo ad allagamenti localizzati. In quest’ottica, quindi, la presenza di alberi può costituire anche un importante fattore di regolazione delle acque di deflusso superficiale e un efficace sistema di drenaggio urbano sostenibile, soprattutto se integrati con sistemi di infiltrazione installati alla loro base, quali le pavimentazioni permeabili (Berland et al., 2017). Si sottolinea infine come un adeguato contenuto d’acqua garantisca anche il corretto accrescimento della pianta e il mantenimento della resistenza meccanica delle fibre legnose.

Da questa breve analisi si riconoscono quindi almeno tre campi di influenza per il valore w_0 : influenza sulla resistenza al ribaltamento (aspetto meccanico), sulla ritenzione delle acque meteoriche (aspetto idrologico) e sullo stato di salute della pianta (aspetto botanico). È allora evidente la necessità di determinare range ottimali per il valore di contenuto di acqua, tenendo conto di ciascuno dei tre aspetti. Per la valutazione dell’aspetto idrologico è possibile fare riferimento ad un approccio analitico-probabilistico (Raimondi et al., 2021; 2022; 2023) che, a partire da un bilancio idrologico locale e tenendo conto del contenuto d’acqua w_0 , consente di stimare, per una data serie temporale di pioggia e per assegnate capacità di infiltrazione, la probabilità che il deflusso superficiale superi un certo valore soglia. Tale modello tiene conto della possibilità che il volume di ritenzione sia pre-riempito da eventi di pioggia precedenti, come spesso accade nei sistemi a basso rilascio come i terreni naturali.

3. ATTIVITA' SPERIMENTALE E MODELLAZIONE NUMERICA

Numerose ricerche sono state svolte negli ultimi decenni con l'obiettivo di definire modelli predittivi accurati per la stima della resistenza degli alberi al ribaltamento, sia basati su descrizioni semplificate della geometria delle radici e delle loro proprietà (Blackwell et al. 1990; Schwarz et al. 2010), sia su modellazioni numeriche con approcci ad elementi finiti (Figura 2b, Dupuy et al. 2005; Yang et al. 2014). Dal punto di vista sperimentale, i primi lavori hanno cercato di legare empiricamente la resistenza al ribaltamento alle proprietà della chioma (Guitard and Castera 1995; Sellier and Fourcaud 2009); recentemente, modelli di alberi in piccola scala sono stati testati in galleria del vento e in centrifuga (Gromke e Ruck, 2008; Cao et al., 2012; Zhang et al., 2020 e 2022a).

Alcuni aspetti, tuttavia, non sono ancora stati del tutto chiariti e, a parere degli autori, la ricerca in Ingegneria Geotecnica può contribuire a migliorare lo stato dell'arte. Ad esempio, in ambito agronomico l'esecuzione di prove di trazione (pulling test) prevede l'applicazione ad una altezza H da terra di una forza suborizzontale T monotonamente crescente (Figura 2a). Al fine di evitare danni alla pianta, la prova è limitata a valori di rotazione non superiori a $0,2^\circ$ e il valore della resistenza ultima viene ottenuto per estrapolazione dei dati sperimentali, indipendentemente dal tipo di terreno, dalla dimensione e dalla specie della pianta (Wessolly e Erb, 1998). Recentemente, Marsiglia et al. (2023) hanno proposto l'esecuzione di prove seguendo percorsi di carico e scarico e testando il sistema anche secondo direzioni mutuamente ortogonali (indicate in Figura 2a con le sigle NE e SE). I risultati mostrano irreversibilità già per bassi valori della rotazione, e una certa differenza tra le direzioni di carico.

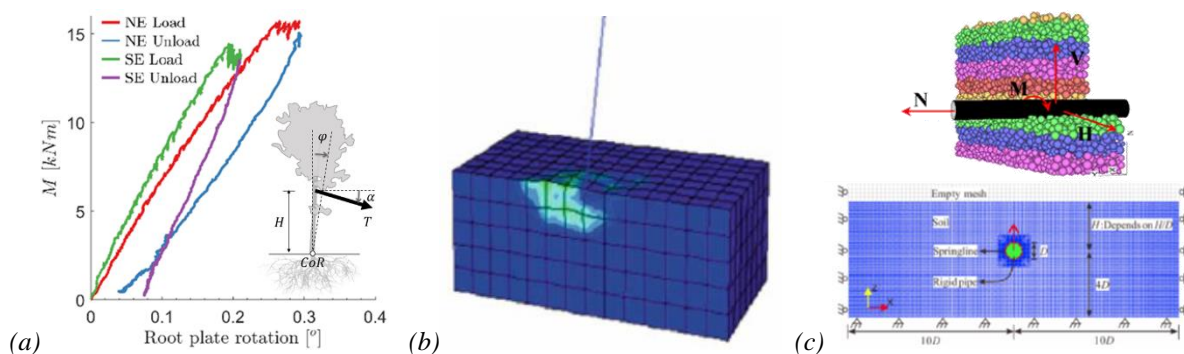


Figura 2. (a) Pulling test su albero a scala reale (da Marsiglia et al., 2023); (b) Esempio di modellazione numerica di un pulling test (Dupuy et al., 2005); (c) Applicazioni di metodi DEM (sopra) e MPM (sotto; Zhang et al., 2022b).

Galli et al. (2023), da risultati di prove sperimentali su modelli semplificati di radici in piccola scala, hanno mostrato che la geometria dell'apparato radicale gioca un ruolo primario nella definizione della resistenza al ribaltamento, mentre la dimensione della base ha un'influenza sempre meno marcata al crescere della comprimibilità del terreno. Tale aspetto è di particolare rilevanza dal momento che, in genere, l'apparato radicale degli alberi raggiunge profondità limitate e che, di conseguenza, valori tipici della pressione di confinamento per il terreno sono dell'ordine della decina di kPa. Si apre quindi la necessità di avere caratterizzazioni meccaniche di terreni vegetati ad elevata comprimibilità, per basse (o bassissime) pressioni di confinamento. Dal punto di vista della modellazione numerica, i lavori disponibili in letteratura (Dupuy et al., 2005, Yang et al., 2014) fanno per lo più uso di modelli costitutivi di tipo elastico-perfettamente plastico per il terreno. Tali modelli, mancando di meccanismi di incrudimento, non riescono a cogliere la progressiva plasticizzazione del terreno per condizioni di carico lontane dal collasso (come invece si ha nei pulling test). Infine, come messo sperimentalmente in luce su modelli semplificati (Marsiglia et al., 2022), l'interazione meccanica tra radici e terreno è fortemente influenzata da effetti del secondo ordine, legati allo sprofondamento delle radici di maggiore diametro (dotate di rigidità flessionale) e allo sfilamento di quelle di minor diametro (assimilabili ad inclusioni assialmente rigide, ma prive di rigidità flessionale). Tali effetti possono essere colti solo adottando approcci in grado di seguire l'evoluzione della geometria del sistema (approcci in grandi spostamenti), basati ad esempio su Metodi del Punto Materiale (MPM) o agli Elementi Distinti (DEM), come suggerito in Figura 2c per problemi di interazione tra terreno e condotte interrato.

4. CONCLUSIONI

La nota inquadra il problema del ribaltamento di alberi da un punto di vista geotecnico e idraulico, mettendo in luce la necessità di approfondire la ricerca su vari aspetti, quali la caratterizzazione del comportamento

meccanico dei terreni a bassa pressione di confinamento, l'adozione di modelli costitutivi avanzati per il comportamento del terreno e l'impiego di approcci numerici in grandi spostamenti. Sotto l'aspetto idraulico, è importante definire l'impatto dell'albero sul ciclo idrologico e sul contenuto d'acqua nel terreno, che può influenzare la resistenza al ribaltamento della pianta.

5. RINGRAZIAMENTI

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.

6. BIBLIOGRAFIA

Bejo L., F. Sumegi I. & Divos F. (2022). Dynamic tree stability: improved testing methodology and indications of reliability. *Proc. 22nd NDTE Symposium*. Quebec City, Canada. 175-183.

Berland. A., Shiflett. S. A., Shuster. W. D., Garmestani. A. S., Goddard. H. C., Herrmann. D. L., & Hopton. M. E. (2017). The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and urban planning*, 162, 167-177.

Blackwell PG, Rennolls K, Coutts MP (1990) A root anchorage model for shallowly rooted Sitka spruce. *Forestry*, 63,73-91.

Cao J, Tamura Y, Yoshida A (2012) Wind tunnel study on aerodynamic characteristics of shrubby specimens of three tree species. *Urban For Urban Green* 11:465-476.

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.

Dupuy L, Fourcaud T, Stokes A. (2005) A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. *Plant Soil* 278:119-134.

Galli A., Marrazzo G., Marsiglia A., Ezzati A., Ciantia M.O., Castellanza R. (2023). Small scale toppling tests on simplified tree root prototypes. *Proc. VIII Convegno Nazionale Ricercatori di Ingegneria Geotecnica*. Palermo, 5-7 Luglio.

Galpathage, S. G., Indraratna, B., Heitor, A., & Rujikiatkamjorn, C. (2023). Pull-out behaviour of simulated tree roots embedded in compacted soil. *Proc. of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 176(1), 54-64.

Gromke C, Ruck B (2008) Aerodynamic modelling of trees for small-scale wind tunnel studies. *Forestry* 81:243-258.

Guitard DGE, Castera P (1995) Experimental analysis and mechanical modelling of windinduced tree sways. In: *Coutts MP, Grace J (eds) Wind and trees*: 182-194.

James K. R., Haritos N., Ades P.K. (2006). Mechanical stability of trees under dynamic loads. *American Journal of Botany*, 93(10), 1522-1530.

Marsiglia A., Galli A., Marrazzo G., Castellanza R., Ciantia M.O. (2023). Uprooting safety factor of trees from static pulling tests and dynamic monitoring. *VIII Convegno Nazionale Ricercatori di Ingegneria Geotecnica*. Palermo, 5-7 Luglio.

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.

Mickovski, S., B., van Beek., L., P., H. (2009). Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (*Vetiveria zizanioides*) plants grown in semi-arid climate. *Plant Soil*, 324, 43-56.

Raimondi, A., Di Chiano, M.G., Marchioni, M., Sanfilippo, U. and Becciu, G. (2022). Probabilistic modeling of sustainable urban drainage systems. *Urban Ecosyst*, 1-10.

Raimondi, A., Marchioni, M., Sanfilippo, U. and Becciu, G. (2021). Vegetation Survival in Green Roofs without Irrigation. *Water* 13(2), 136.

Raimondi, A., Sanfilippo, U., Marchioni, M., Di Chiano, M.G. and Becciu G. (2023). Influence of climatic parameters on the probabilistic design of green roofs. *Science of The Total Environment* 865, 161291.

Schwarz M, Cohen D, Or D (2010) Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles. *J Geophys Res Earth Surf* 115:1-19.

Sellier D, Fourcaud T (2009) Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds. *Am J Bot* 96:885-896.

Wessolly, L, and M. Erb. (1998). *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*. Patzer, Berlin.

Yang, M., Défossez, P., Danjon, F., Fourcaud, T. (2014). Tree stability under wind: simulating uprooting with root breakage using a finite element method. *Ann Bot* 114, 695-709.

Zhang CX, Zhu HH, Zhang W, Li HJ, Liu W. (2022b). Modeling uplift failure of pipes buried in sand using material point method. *Tunn Undergr Space Technol* 2022; 119:104203.

Zhang, X., Knappet, J., A., Leung, A., K., Ciantia, M., O., Liang, T., Nicol, B., C. (2022a). 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. et al. (2020). Small-scale modelling of root-soil interaction of trees under lateral loads. *Plant Soil*, 456, 289-305.