

MECCANISMI DI ROTTURA DI UNA FONDAZIONE SUPERFICIALE POSTA SU UN BANCO DI TERRENO CHE INCLUDE UNO STRATO DEBOLE

Marco Rosone (marco.rosone@unipa.it)

Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Palermo

Maurizio Ziccarelli (maurizio.ziccarelli@unipa.it)

Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Palermo

Rosario Indelicato (rosario.indelicato@community.unipa.it)

Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Palermo

ABSTRACT. Nel campo delle applicazioni geotecniche, la presenza di particolari dettagli costitutivi dei terreni, come strati, anche molto sottili, con caratteristiche meccaniche più scadenti rispetto a quelle dell'ammasso circostante, è una evenienza più frequente di quanto si pensi. L'effetto che uno strato debole orizzontale può avere sul comportamento meccanico di strutture di fondazione superficiali è stato analizzato in modo parametrico attraverso una modellazione numerica agli elementi finiti. Le analisi effettuate hanno evidenziato che la presenza dello strato debole modifica la forma del meccanismo di rottura, riducendone il volume interessato con conseguente riduzione significativa del carico limite. Tale effetto è significativo per profondità dello strato debole dell'ordine di 4-5 volte la larghezza della fondazione. A profondità maggiori esso diventa trascurabile. I risultati ottenuti dalle analisi numeriche evidenziano che la caratterizzazione di dettaglio del volume geotecnicamente significativo è fondamentale anche per valutare il comportamento meccanico di opere semplici quali le fondazioni dirette.

1. INTRODUZIONE

I terreni di fondazione presentano, non di rado, dettagli di costituzione come, ad esempio, strati sottili con caratteristiche anche parecchio differenti da quelle del terreno circostante. In particolare, tali strati possono differire sia per caratteristiche costitutive (natura mineralogica, proprietà indici) che per caratteristiche idro-meccaniche (resistenza a taglio, conducibilità idraulica in condizioni sature, pressioni interstiziali, ecc.). Nel caso in cui le caratteristiche meccaniche di questi dettagli costitutivi del terreno siano minori rispetto a quelle del terreno di fondazione, si può parlare della presenza di strato debole. Tale condizione, specie per strati deboli particolarmente sottili, è spesso di difficile individuazione (Terzaghi, 1929; Terzaghi, 1943) mediante indagini geotecniche sia dirette che indirette; non è inusuale, infatti, che tale particolare situazione geotecnica passi inosservata. L'influenza della presenza di uno strato debole è stata oggetto di studi su modelli fisici a scala ridotta, 1g (Valore et al., 2017) o in centrifuga geotecnica (Ziccarelli et al., 2017). Nel presente lavoro si presentano i risultati di una serie di analisi numeriche agli elementi finiti, volte ad investigare gli effetti della presenza di uno strato debole nel terreno di fondazione sul comportamento meccanico, e in particolare sui meccanismi di rottura, del complesso fondazione-terreni di fondazione. L'analisi è stata condotta in maniera parametrica facendo variare alcuni parametri geotecnici e geometrici del modello in un ampio range di valori di interesse ingegneristico. Sono stati valutati gli effetti della profondità dello strato debole e dell'angolo di resistenza a taglio del terreno costituente l'ammasso. L'analisi dei risultati si è concentrata sulle caratteristiche del meccanismo di rottura, evidenziandone l'influenza sul carico limite, per le combinazioni delle variabili prescelte.

2. POSIZIONE DEL PROBLEMA: SCHEMA E METODO DI CALCOLO

Lo schema geotecnico analizzato è quello di una fondazione superficiale nastriforme poggiate, per semplicità, su un banco di terreno granulare, asciutto con estradosso orizzontale, all'interno del quale è presente un sottile strato tenero orizzontale. Il modello bidimensionale investigato (Fig. 1) ha larghezza (L) pari a 50 m e altezza (H) pari a 20 m; lo strato debole ha spessore (t) pari a 0,2 m. La fondazione ha larghezza B unitaria ed è posta sul piano campagna, mentre lo strato debole è ubicato a profondità z . Il terreno di fondazione è caratterizzato da un angolo di resistenza a taglio pari a φ'_1 , mentre quello dello strato debole è indicato con φ'_2 . L'angolo di dilatanza

dello strato debole (Ψ'_2) è sempre stato posto pari a zero, mentre quello del terreno di fondazione (Ψ'_1) è stato posto sempre pari all'angolo di resistenza a taglio. La coesione intercetta c' è nulla sia per lo strato debole che per il terreno di fondazione.

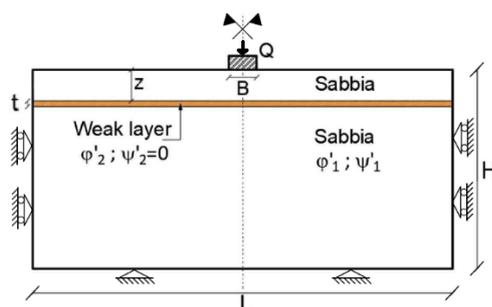


Figura 1. Schema geometrico del modello geotecnico investigato.

Le modellazioni numeriche sono state condotte mediante un codice di calcolo agli elementi finiti (Plaxis 2D). Tenuto conto della geometria, si è studiato il sistema in condizioni di deformazione piane. Considerato che il modello presenta un asse di simmetria centrale verticale, è stato modellata solo la metà destra del semispazio rappresentante il terreno nel modello (Fig. 2a). Per simulare la presenza di una fondazione rigida con contatto scabro si è applicato un campo di spostamento uniforme unitario sulla superficie di impronta della fondazione stessa. Il modello è stato discretizzato mediante una *mesh* non strutturata a maglie triangolari; si è scelto di infittire la *mesh* solo nelle zone in cui si prevedeva la concentrazione degli sforzi, mentre si è mantenuta meno fitta nel resto del sistema, così da coniugare l'accuratezza con un limitato onere computazionale (Fig. 2b). Per simulare il comportamento del terreno si è utilizzato un modello costitutivo tipo elasto-plastico alla Mohr–Coulomb con legge di flusso associato. I parametri geotecnici impiegati nelle simulazioni sono sintetizzati in Tabella 1. La profondità dello strato debole è stata fatta variare tra 0 e 5 m ($z/B = 0\div5$).

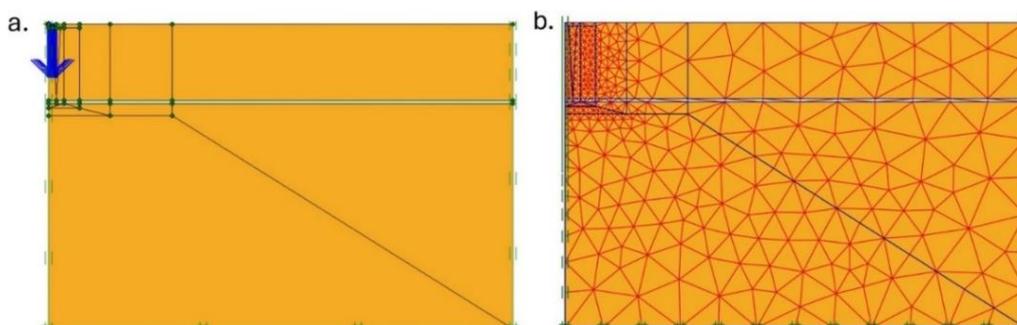


Figura 2. Modello realizzato mediante Plaxis 2D con campo di spostamento unitario imposto (a); *mesh* utilizzata per la discretizzazione del modello (b).

Tabella 1. Parametri geotecnici utilizzati nelle modellazioni (γ_a peso secco dell'unità di volume, E' modulo di Young, ν' coefficiente di Poisson, c' coesione intercetta, ϕ' angolo di resistenza a taglio, Ψ' angolo di dilatanza).

	γ_a [kN/m ³]	E' [MPa]	ν' [-]	c' [kPa]	ϕ' [°]	Ψ' [°]
Terreno di fondazione	16	20	0,36	0,1	25÷50	25÷50
Strato debole	16	2	0,36	0,1	15	0

La profondità z dello strato debole può essere adimensionalizzata rispetto alla larghezza B della fondazione (z/B), come dimostrato da Zicarelli & Rosone (2021) che hanno evidenziato come l'impiego di tale rapporto consenta di estendere i risultati ottenuti, mantenendone la validità. Nello stesso articolo si individua un range di valori per lo spessore dello strato debole ($s = 0,1\div0,6$ m) entro il quale non vi sono differenze considerevoli nei risultati numerici; pertanto, si è scelto, in ogni analisi numerica eseguita, di impiegare il medesimo spessore dello strato soffice, scegliendo un valore che ricadesse all'interno di tale range ($s = 0,2$ m).

3. ANALISI DEI RISULTATI

L'analisi delle simulazioni condotte ha permesso di valutare l'influenza della presenza dello strato debole, per le diverse profondità indagate, sulla forma e sull'estensione del meccanismo di rottura. A titolo di esempio, sono riportati in Fig. 3 le mappe degli incrementi delle deformazioni di taglio ottenute, in corrispondenza del raggiungimento della rottura. Nei quattro casi riportati, è stato fatto variare l'affondamento z dello strato debole, mentre sono stati mantenuti costanti gli altri parametri. Le zone nelle quali si addensano particolarmente le deformazioni di taglio si possono ritenere utili per interpretare e tracciare (in tratteggio rosso) i meccanismi di rottura che si sviluppano nel terreno (Fig. 3).

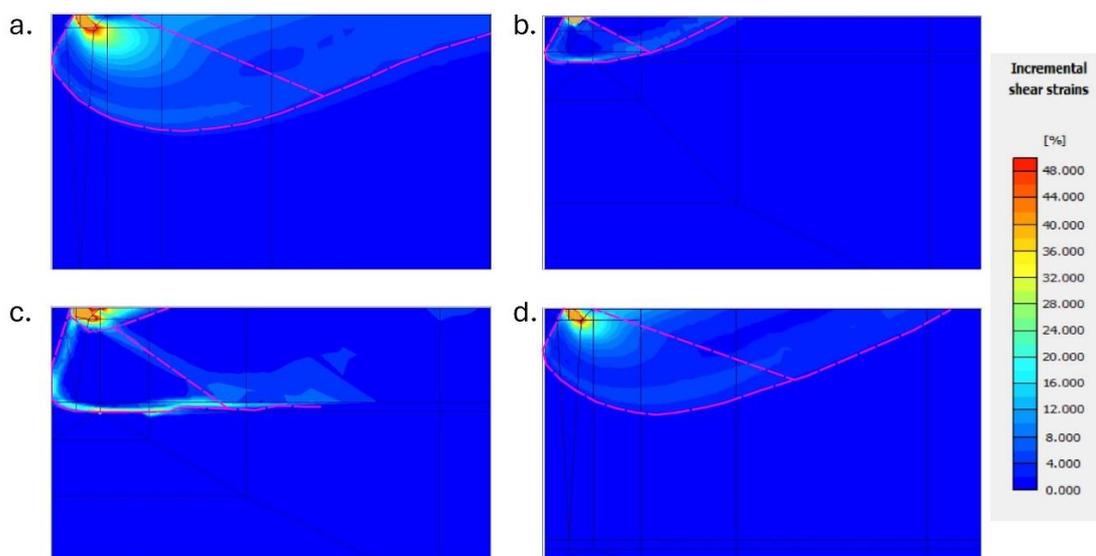


Figura 3. Meccanismo di rottura nel caso di: terreno omogeneo con $\varphi'_1=47^\circ$ (a); terreno caratterizzato da $\varphi'_1=47^\circ$, $\varphi'_2=15^\circ$, $z/B=0,75$ (b); terreno caratterizzato da $\varphi'_1=47^\circ$, $\varphi'_2=15^\circ$, $z/B=2$ (c); terreno caratterizzato da $\varphi'_1=47^\circ$, $\varphi'_2=15^\circ$, $z/B=5$ (d).

Nel caso di terreno omogeneo (Fig. 3a) il meccanismo di rottura che si forma sotto la fondazione è riconducibile a quello classico proposto da Prandtl (1920). Nel caso di strato debole poco profondo ($z/B = 0.75$ in Fig. 3b) si nota come lo sviluppo del meccanismo di rottura sia limitato dalla discontinuità dallo strato di terreno debole; in particolare, si osserva una parte della superficie di rottura sub-orizzontale all'interno del volume dello strato debole stesso e poi una rapida risalita verso il piano campagna. Nel caso di strato debole di media profondità ($z/B = 2$ in Fig. 3c) è visibile un meccanismo mistilineo, intermedio tra il caso omogeneo e quello limitato dallo strato debole poco profondo, già illustrato. Difatti, si osservano delle concentrazioni di deformazioni di taglio sia nella zona superficiale che in corrispondenza dello strato debole. Infine, nel caso in cui lo strato debole è molto profondo ($z/B = 5$ in Fig. 3d), non si osserva una influenza sul meccanismo di rottura, che torna ad avere una forma molto simile a quella del caso omogeneo riportato in Fig. 3a. Pertanto, per il range dell'angolo a resistenza a taglio del terreno (φ'_1) studiato, la profondità massima entro cui è atteso un effetto dello strato debole sul comportamento meccanico della fondazione superficiale è pari a 4-5 B .

La presenza dello strato debole influenza in modo significativo anche il carico limite della fondazione, proprio a causa delle modifiche che vengono apportate allo sviluppo del meccanismo di rottura, oltre ovviamente alla ridotta resistenza a taglio disponibile nei tratti in cui il meccanismo di rottura interessa lo strato debole. In maniera sintetica, è possibile rappresentare la variazione del carico limite in termini di coefficiente di carico limite N_γ , al variare degli altri parametri del modello. Difatti, considerate le ipotesi del modello di calcolo (coesione intercetta $c' = 0$; sovraccarico ai lati della fondazione $q = 0$; larghezza della fondazione $B = 1$), la nota formula trinomia del carico limite di una fondazione diretta nastriforme si può riscrivere come relazione diretta tra N_γ e il carico limite ($N_\gamma = 2 q_{lim} / \gamma$). Pertanto, in Fig. 4 si riportano i valori del coefficiente N_γ , ricavato numericamente per un fissato angolo di resistenza a taglio dello strato debole ($\varphi'_2 = 15^\circ$), in funzione dell'angolo di resistenza a taglio del terreno di fondazione φ'_1 . I diversi andamenti tracciati, rappresentano i valori di N_γ per il caso omogeneo e per z/B variabile tra 0,2 e 5. I risultati evidenziano come l'andamento del coefficiente N_γ sia crescente all'aumentare dei valori dell'angolo a resistenza a taglio del terreno di fondazione (φ'_1) e del rapporto (z/B), tanto che, per affondamenti

molto grandi dello strato debole, le curve tendono ad avvicinarsi a quella del caso di terreno omogeneo. Ciò risulta in accordo con quanto osservato con riferimento ai meccanismi di rottura.

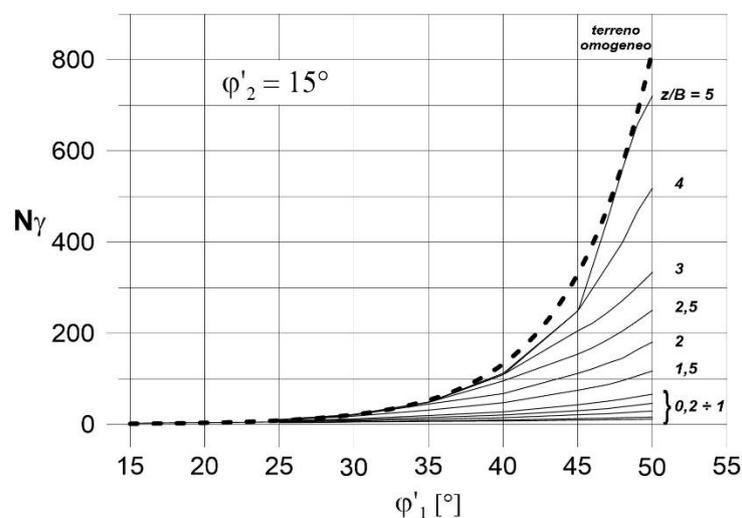


Figura 4. Andamento del coefficiente $N\gamma$ al variare di ϕ'_1 e z/B per fissato valore di ϕ'_2 pari a 15° .

4. CONCLUSIONI

Lo studio ha analizzato gli effetti sul comportamento di una fondazione superficiale derivanti dalla presenza di uno strato debole orizzontale, di limitato spessore, presente nel terreno ad essa sottostante. In particolare, si sono analizzati gli effetti dello strato debole sul meccanismo di rottura e, di conseguenza, sul carico limite del complesso fondazione-terreno. Per indagare tali aspetti è stata condotta un'analisi numerica agli elementi finiti su un gran numero di modelli che differivano tra loro per alcuni parametri geotecnici e geometrici, fatti variare in un ampio range di valori di interesse ingegneristico. I risultati hanno evidenziato che lo strato debole, qualora sia posto a profondità che non ecceda 4 o 5 volte la larghezza della fondazione, limita lo sviluppo del meccanismo di rottura, modificandone la forma e riducendone il volume. Esso infatti è di tipo mistilineo e si sviluppa in parte all'interno dello strato debole. Per affondamenti dello strato debole superiori a tale valore, il meccanismo di rottura torna ad avere forme e volumi paragonabili a quelli del caso di terreno omogeneo. Come conseguenza dell'influenza dello strato debole col meccanismo di rottura, il carico limite della fondazione diretta diminuisce, talvolta in modo considerevole rispetto al caso di terreno di fondazione omogeneo. I risultati numerici raccolti hanno consentito di rappresentare l'andamento del coefficiente di carico limite $N\gamma$ al variare dell'angolo di resistenza a taglio del terreno e dell'affondamento dello strato debole. Tali risultati hanno forte interesse applicativo, in quanto tale rappresentazione consente di estendere l'analisi anche a casi che, pur presentando uno strato debole di spessore limitato, si discostano dallo schema ipotizzato in questo studio.

5. BIBLIOGRAFIA

- Plaxis, Plaxis 2D, Version 8.6. 2008. Available online: <http://www.plaxis.nl/> (accessed on 18 October 2020).
- Prandtl L. (1920) Über die Härte plastischer Körper. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, 74–85.
- Terzaghi K (1929) Effects of minor geologic details on the safety of dams. In *Geology and Engineering for Dams and Reservoirs*. Reprinted in Terzaghi K (1960) *From Theory to Practice in Soil Mechanics: Selection from the writings of Karl Terzaghi*. Wiley, Hoboken, NJ, USA, pp. 119–132.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Valore C, Zicarelli M, Muscolino SR. (2017). The bearing capacity of footings on sand with a weak layer. *Geotech Res*, 4: 12-29.
- Zicarelli, M., Valore, C., Muscolino, S.R. & Fioravante V., 2017. Centrifuge tests on strip footings on sand with a weak layer. *Geotechnical Research*, 4(1), 47-64.
- Zicarelli M., Rosone M. (2021). Influence of a Thin Horizontal Weak Layer on the Mechanical Behaviour of Shallow Foundations Resting on Sand, *Geosciences*, 11(9), 392.