



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

FLORE

Repository istituzionale dell'Università degli Studi di Firenze

Stima probabilistica dei cedimenti verticali indotti da scavi meccanizzati

Questa è la Versione finale referata (Post print/Accepted manuscript) della seguente pubblicazione:

Original Citation:

Stima probabilistica dei cedimenti verticali indotti da scavi meccanizzati / M. Uzielli; G. Vannucchi. -
ELETTRONICO. - (2012), pp. 1-6. (IARG 2012 Padova 2-4 luglio).

Availability:

The webpage <https://hdl.handle.net/2158/651625> of the repository was last updated on 2016-09-29T18:02:11Z

Publisher:

Turato Edizioni

Terms of use:

Open Access

La pubblicazione è resa disponibile sotto le norme e i termini della licenza di deposito, secondo quanto stabilito dalla Policy per l'accesso aperto dell'Università degli Studi di Firenze (<https://www.sba.unifi.it/upload/policy-oa-2016-1.pdf>)

Publisher copyright claim:

La data sopra indicata si riferisce all'ultimo aggiornamento della scheda del Repository FloRe - The above-mentioned date refers to the last update of the record in the Institutional Repository FloRe

(Article begins on next page)

STIMA PROBABILISTICA DEI CEDIMENTI VERTICALI INDOTTI DA SCAVI MECCANIZZATI

Marco Uzielli

*Georisk Engineering S.r.l., Firenze
muz@georisk.eu*

Giovanni Vannucchi

*Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze
giovanni.vannucchi@unifi.it*

Sommario

La stima dei cedimenti superficiali indotti da scavi meccanizzati in sottoterraneo presenta notevoli incertezze, derivanti dall'intrinseca complessità dei sistemi terreno-galleria e dell'indeterminazione epistemica connessa alla modellazione del sistema stesso, al modello utilizzato per la stima dei cedimenti e alla definizione dei parametri di ingresso al modello stesso. La presente memoria illustra sinteticamente le procedure e alcuni risultati parziali di un'analisi probabilistica tuttora in corso, volta a definire il bacino dei cedimenti per livelli di affidabilità ritenuti significativi ai fini ingegneristici. La formulazione di semplici modelli analitici consente l'utilizzo speditivo seppure rigoroso dei risultati probabilistici.

1. Introduzione

Le modalità correntemente utilizzate per la definizione del bacino di subsidenza generato dallo scavo meccanizzato di gallerie sono essenzialmente di due tipi: (1) modelli semplificati, basati su relazioni empiriche, confermate da esperienze precedenti e dalla letteratura scientifica di riferimento; e (2) metodi numerici, che permettono di modellare in maniera avanzata il comportamento reologico del terreno e l'interazione con la galleria in corso di scavo.

Il ricorso ai metodi numerici risulta particolarmente oneroso, e nella pratica, si verifica quasi esclusivamente in situazioni di particolare complessità e rilevanza. Risulta quindi auspicabile disporre di metodi semplificati che consentano una stima speditiva, verosimile e utile dal punto di vista ingegneristico, dei cedimenti "in campo libero", ovvero in assenza di costruzioni che ne possano modificare localmente la geometria.

Negli ultimi anni si è osservata, sia a livello di ricerca sia a livello normativo, la crescente consapevolezza della rilevanza delle incertezze presenti nei sistemi geotecnici e nei modelli utilizzati per parametrizzarli, sia ai fini della caratterizzazione, sia della progettazione. Esistono ormai molti studi che evidenziano come la qualità e l'affidabilità dell'analisi geotecnica traggano notevole beneficio dalla modellazione esplicita delle incertezze. Tra i principali vantaggi dell'analisi geotecnica non deterministica (purché, naturalmente, non avulsa da un costante riferimento alla conoscenza e all'esperienza geotecnica) sono: (1) una quantificazione maggiormente oggettiva del livello di rischio e affidabilità relativo a un sistema geotecnico; e (2) l'ottimizzazione prestazioni/costi, conseguente a un dimensionamento progettuale mirato a uno specifico livello di prestazione; (3) una valutazione più completa e realistica del comportamento fisico di un sistema terreno-struttura. Lo studio cui la presente memoria si riferisce, tuttora in corso, affronta la stima probabilistica

dei cedimenti superficiali indotti in campo libero da scavi meccanizzati in sotterraneo. Lo scopo terminale dello studio è l'elaborazione di un metodo di semplice applicabilità ai fini ingegneristici e capace, al contempo, di includere implicitamente gli effetti dell'analisi non deterministica. La struttura operativa dello studio consta delle seguenti fasi: (1) selezione del modello geotecnico; (2) modellazione delle incertezze; (3) analisi probabilistica; (4) elaborazione statistica e analitica dei risultati della fase (3). Nelle sezioni successive, si illustreranno sinteticamente le fasi sopraelencate, presentandone i principali elementi operativi, unitamente ad alcuni risultati esemplificativi.

2. Selezione del modello geotecnico

Nella letteratura tecnica sono riportate molte formulazioni semplificate basate sull'osservazione empirica di case-histories (es. Attewell et al. 1982), per le quali il profilo trasversale di cedimento in campo libero è spesso rappresentato da una curva Gaussiana, nella quale il cedimento S_v a una distanza y dalla verticale dell'asse della galleria è dato da:

$$S_v = S_{v_{\max}} \cdot e^{\left(\frac{-y^2}{2\xi^2}\right)} \quad (1)$$

nel quale ξ rappresenta la distanza del punto di flesso della deformata del terreno dall'asse della galleria. Nell'ipotesi di condizioni non drenate (e, con un maggiore grado di sovracautelatività, anche per condizioni drenate per terreni incoerenti con comportamento dilatante), il cedimento massimo (nella stessa unità di misura di ξ) è dato da:

$$S_{v_{\max}} = \frac{V_p \cdot A_s}{\xi \sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

nella quale V_p è il volume perso (parametro adimensionale che definisce il maggiore volume di terreno asportato rispetto a quanto strettamente necessario per alloggiare il cilindro deformato della galleria) e A_s è la sezione di scavo [unità di misura di S_v e y , al quadrato]. Per la stima di ξ , si definisce il seguente modello adimensionale, nel quale ξ e z_0 sono normalizzati rispetto al diametro della galleria D :

$$\left(\frac{\xi}{D}\right) = k_{eq} \cdot \left(\frac{z_0}{D}\right) \quad (3)$$

e nel quale k_{eq} , calcolato secondo quanto proposto da Selby (1988), costituisce un "parametro di forma equivalente" fa riferimento a una stratigrafia di N strati con spessori h_i e parametri k_i ($i=1, \dots, N$):

$$k_{eq} = \frac{1}{z_0} \sum_{i=1}^N k_i \cdot h_i \quad (4)$$

Ai fini operativi, noti i parametri geometrici z_0 e D , la caratterizzazione quantitativa del bacino di subsidenza richiede quindi la stima di V_p e k_{eq} .

3. Modellazione delle incertezze

Operativamente, le incertezze presenti nei sistemi fisici possono essere categorizzate in: (1) incertezze parametriche; e (2) incertezze dei modelli. Le prime sono relative a indeterminazione epistemica e aleatoria nei parametri in ingresso al modello di riferimento, e conseguenti alla variabilità "reale" dei sistemi stessi, alle incertezze nelle misurazioni del sistema di riferimento (o nell'assegnazione soggettiva di valori quantitativi ai parametri quantitativi) e all'incertezza collegata alla stima statistica dei parametri stessi. Le seconde

derivano dall'approssimazione/semplificazione del sistema fisico che avviene in sede di modellazione teorica, empirica o sperimentale del sistema stesso.

Nel caso in esame, le incertezze parametriche sono riferite a quei parametri di ingresso al modello di riferimento che non possono considerarsi "deterministiche" ai fini ingegneristici. Concettualmente, esse contemplano esplicitamente: (a) l'indeterminazione nella stima del punto di flesso e l'effetto di eventuali alternanze stratigrafiche sul punto di flesso stesso [mediante il parametro k_{eq}]; (c) l'indeterminazione negli effetti dell'interazione terreno-struttura nel corso dello scavo [tramite il volume perso V_p]. La profondità z_0 e il diametro D possono invece considerarsi prive di incertezze significative. La modellazione delle incertezze parametriche consiste nell'assegnazione di una distribuzione di riferimento e nella successiva quantificazione dei parametri caratteristici della distribuzione stessa. Per entrambi le variabili aleatorie nel caso in esame, si ipotizzano distribuzioni Gaussiane, definite completamente da una media e una deviazione standard. Come medie delle distribuzioni si adottano i rispettivi valori "nominali", ovverosia i valori deterministici assunti come valori progettuali. L'assegnazione delle deviazioni standard avviene moltiplicando il valore nominale per un coefficiente di variazione COV. Quest'ultimo parametrizza, nel presente caso in cui l'assegnazione dei parametri Gaussiani è soggettiva, il livello di incertezza presunta associata al valore nominale. Un valore COV=0.10 corrisponde a un livello di incertezza "basso", mentre un valore COV=0.30 parametrizza un'incertezza rilevante.

Per quanto concerne il parametro di forma k , nel presente studio, al fine di definirne i valori di riferimento per vari tipi di terreno, si esaminano i database presentati da Mair & Taylor (1997) e Bilotta et al. (2002). Entrambi i database contengono casi relativi sia a terreni coesivi sia a terreni incoerenti. Mediante regressione lineare si ottiene $k=0.25-0.30$ per sabbie ghiaiose e sabbie addensate e mediamente addensate; $k=0.40$ per sabbie sciolte; $k=0.45$ per sabbie limose e argillose; $k=0.45$ per argille e argille limose. Tali valori sono pienamente compatibili con le raccomandazioni disponibili in letteratura, pur fornendo una categorizzazione più dettagliata, ad esempio in termini del grado di addensamento dei terreni incoerenti. E' da notare che tali valori possono trasparsi direttamente nel parametro di forma equivalente k_{eq} , la cui incertezza comprende anche l'indeterminazione nella parametrizzazione di una stratigrafia complessa, ottenuta mediante l'Eq. (4).

Il volume perso V_p dipende dal comportamento reologico-deformativo dell'ammasso, dal metodo di scavo, e dall'interazione terreno-struttura di rivestimento. I valori tipicamente proposti in letteratura variano da 0.005 per condizioni di scavo ben eseguito in terreni consistenti o addensati, a 0.04 e oltre per scavi di caratterizzati da esecuzione mediocre e localizzati in terreni poco compatti. Anche in questo caso, la modellazione probabilistica si espleta nell'assegnazione di un valore nominale V_{pn} e di un coefficiente di variazione $COV(V_p)$.

V_p e k_{eq} non possono considerarsi correlate da un punto di vista geotecnico; in fase di modellazione probabilistica, si evita quindi il ricorso a distribuzioni multivariate con dipendenza statistica.

L'incertezza nel modello Gaussiano [Eq. (1)] si riferisce concettualmente alla capacità del modello stesso di rappresentare il bacino dei cedimenti per una data combinazione di parametri di ingresso, sia in termini di forma che di magnitudo dei cedimenti stessi. Un'analisi statistica condotta su dati di subsidenza misurati e normalizzati rispetto a previsioni del modello in questione (Collotta et al. 2012) ha rivelato che il "model factor" M_F , ovverosia il rapporto tra valore misurato e valore stimato mediante l'Eq. (1), varia con la distanza dall'asse secondo la relazione

$$M_F = 0.95 + 0.08 \left(\frac{y}{\xi} \right)^{3.55} \quad (5)$$

e che l'incertezza associata a M_F può essere parametrizzata mediante un coefficiente moltiplicativo k_{MF} in forma variabile lognormale con media 1.19 e deviazione standard 0.64. Con riferimento alle equazioni (1), (2) e (5), e notando che per sezioni di scavo circolari $A_s = \pi D^2 / 4$, si ottiene il modello di riferimento per la simulazione Monte Carlo:

$$S_v = k_{MF} \cdot M_F \cdot \frac{V_p \cdot \sqrt{\pi} D^2}{\xi 4 \sqrt{2}} \cdot e^{\left(\frac{-y^2}{2\xi^2} \right)} \quad (6)$$

4. Stima probabilistica mediante simulazione Monte Carlo

A seguito della modellazione delle incertezze nelle variabili aleatorie e della conseguente definizione di campioni di ciascuna variabile aleatoria, si procede alla simulazione Monte Carlo, consistente nella ripetizione iterata del modello definito dall'Eq. (6), con valori dei parametri aleatori in ciascuna iterazione campionati dalle rispettive distribuzioni Gaussiane descritte in precedenza.

Al fine di contemplare una vasta casistica di configurazioni geometriche e geotecniche, sono state generate le possibili combinazioni dei parametri sopra elencati, secondo i seguenti domini di variazione dei parametri stessi: $z_0=5:5:30$; $D=2:0.5:15$; $V_{pn}=[0.005:0.005:0.04]$; $COV(V_p)=[0.15 \ 0.30]$; $k_{eqn}=[0.25:0.05:0.50]$; $COV(k_{eq})=[0.10 \ 0.20 \ 0.30]$. Successivamente, sono state selezionate le combinazioni per le quali $1 \leq z_0/D \leq 8$, ritenute esaustive della realtà progettuale e delle esperienze disponibili in letteratura, ottenendo un totale di 71,424 configurazioni. Per ciascuna configurazione è stata effettuata la stima probabilistica del bacino dei cedimenti adottando 50,000 iterazioni. Tale numero risulta essere sufficiente, in base alla formula proposta da Broding et al. (1964), per stimare con confidenza i quantili di riferimento 0.950 e 0.995 - ritenuti significativi da un punto di vista ingegneristico in termini di affidabilità geotecnica - del campione in uscita.

A titolo di esempio, si illustrano in Fig. 1 gli istogrammi di frequenza relativa per la configurazione con $z_0=15$ m; $D=8$ m; $V_{pn}=0.015$; $COV(V_p)=0.15$; $k_{eqn}=0.30$; $COV(k_{eq})=0.15$: (a) volume perso; (b) parametro di forma equivalente; e (c) distanza del punto di flesso dall'asse della galleria.

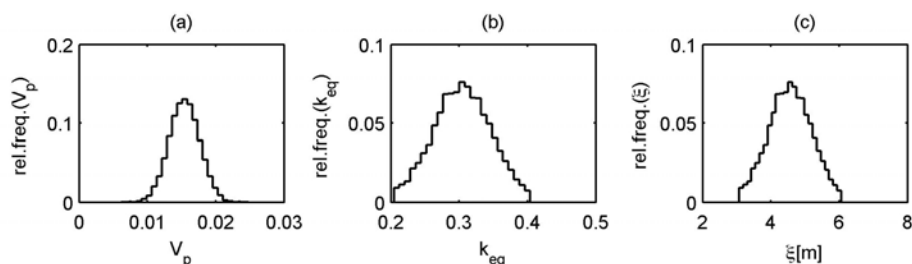


Figura 1. Istogrammi di frequenza relativa di: (a) volume perso; (b) parametro di forma equivalente; e (c) distanza del punto di flesso dall'asse della galleria per la configurazione $z_0=15$ m; $D=8$ m; $V_{pn}=0.015$; $COV(V_p)=0.15$; $k_{eqn}=0.30$; $COV(k_{eq})=0.15$

In Fig. 2 sono riportati graficamente i 50,000 bacini dei cedimenti risultanti dalla simulazione della configurazione di cui sopra, unitamente al profilo del bacino calcolato deterministicamente (linea tratteggiata) e i bacini relativi ai quantili 0.950 e 0.995. Si apprezza la dispersione tra le realizzazioni, a testimonianza della rilevanza delle incertezze nel modello in esame.

5. Elaborazione analitica dei risultati probabilistici

Al fine di esprimere in forma semplificata e utile a scopi ingegneristici i risultati della simulazione Monte Carlo, si definisce il parametro

$$\Delta S_v = \frac{S_{vq} - S_{vdet}}{|y| + 1} \quad (7)$$

(con tutte le grandezze espresse in metri) che quantifica la differenza (normalizzata rispetto alla distanza in metri, aumentata di 1 per consentirne la stima in corrispondenza dell'asse della galleria) tra il quantile q del cedimento S_{vq} e il valore deterministico del cedimento stesso S_{vdet} . In Fig. 3 è tracciato a titolo di esempio, per la combinazione di variabili indipendenti contemplata in precedenza e risultante nelle simulazioni descritte in Fig. 1, l'andamento di ΔS_v in funzione della distanza, per i quantili 0.950 e 0.995 (corrispondenti alle medesime probabilità di non superamento). Riformulando l'Eq. (7) come di seguito, risulta possibile caratterizzare mediante una semplice forma analitica il bacino dei cedimenti riferito a una configurazione geometrica e geotecnica [definita dai parametri z_0 , D , V_{pn} , $COV(V_p)$, k_{eqn} , $COV(k_{eq})$] e a un quantile di riferimento:

$$S_{vq} = S_{vdet} + \Delta S_v \cdot (|y| + 1) \quad (8)$$

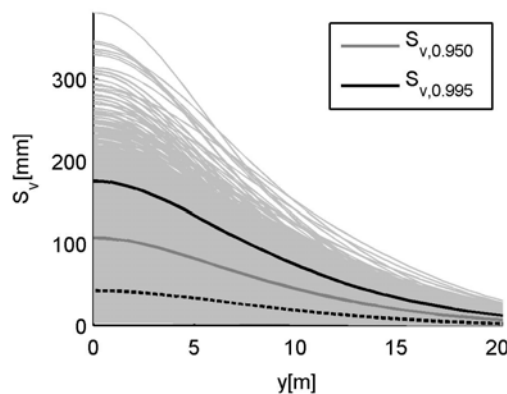


Figura 2. Esempio di risultati della simulazione Monte Carlo: 50,000 realizzazioni del bacino dei cedimenti, bacino "deterministico" e quantili di riferimento

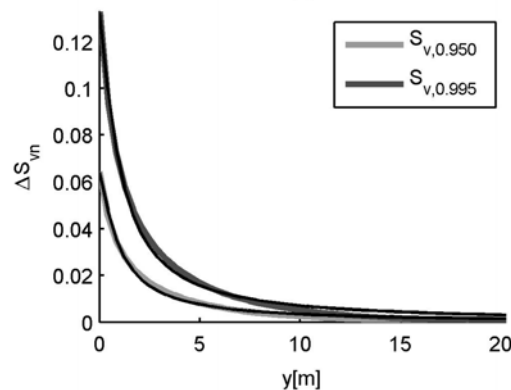


Figura 3. Esempio di andamento del parametro ΔS_v in funzione della distanza dall'asse della galleria, per i quantili 0.950 e 0.995, e adattamento del modello di potenza

Osservando l'andamento di ΔS_v in Fig. 3, si è adattato mediante regressione non lineare, per ciascuna delle 71,424 configurazioni disponibili e per i due quantili di riferimento (0.950 e 0.995) un modello di potenza del tipo:

$$\Delta S_v = p_1 \cdot |y|^{p_2} \quad (9)$$

In Fig. si notano gli alti valori assunti dal parametro ΔS_v , a conferma della rilevanza degli effetti delle incertezze e dell'importanza di quantificare gli effetti stessi, anche in una fase preliminare della progettazione. Si osserva altresì l'eccellente adattamento del modello di potenza ai dati derivanti dalla simulazione Monte Carlo. Tale osservazione si è ripetuta per tutte le configurazioni, con coefficienti di determinazione R^2 identicamente superiori a 0.99. La disponibilità di coppie di parametri (p_1 , p_2) associate a combinazioni dei parametri di ingresso [z_0 , D , V_{pn} , $COV(V_p)$, k_{eqn} , $COV(k_{eq})$] consentono l'avvio di uno studio finalizzato

alla derivazione di funzioni analitiche per esprimere i primi in funzione dei secondi. Tale studio, svolto identificando per tentativi e in fasi sequenziali modelli analitici intermedi, ha portato, per il parametro p_1 , all'elaborazione della seguente espressione, nella quale compaiono i parametri D , k_{eqn} e V_{pn} , nonché alla calibrazione dei coefficienti [da utilizzare nell'equazione stessa in funzione di $COV(V_p)$ e della probabilità di non superamento stabilita dall'utente] riportati in Tabella 1:

$$p_1 = \frac{t_1 k_{eqn}^2 + t_2 k_{eqn} + t_3}{1 + z_0^{u_1 k_{eqn} + u_2}} \cdot V_{pn} \cdot D^2 \quad (10)$$

Tabella 1. Coefficienti da inserire nell'espressione analitica del parametro p_1

quantile	COV(V_p)	t_1	t_2	t_3	u_1	u_2
0.950	0.15	-2.7	0.8	1.3	0.50	0.77
0.950	0.30	-2.0	-0.3	1.7	0.46	0.79
0.995	0.15	-2.0	-1.9	3.7	0.42	0.80
0.995	0.30	-4.9	-0.6	3.9	0.44	0.79

La formulazione analitica comprende tutti i parametri di ingresso alla simulazione probabilistica, a eccezione di $COV(k_{eq})$, che risulta non essere rilevante ai fini del calcolo pseudo-deterministico di ΔS_v . L'analoga elaborazione finalizzata alla formulazione analitica del parametro p_2 è attualmente in corso.

6. Considerazioni riassuntive

Nella presente memoria, sono stati presentati i principali fondamenti concettuali, una sintesi delle fasi operative e alcuni risultati parziali di uno studio finalizzato alla definizione probabilistica del bacino dei cedimenti indotto da scavi meccanizzati in sotterraneo. Mediante simulazione Monte Carlo, si sono ottenute stime quantitative degli effetti di numerosi fattori di incertezza che risultano essere notevolmente significativi nella parametrizzazione dell'interazione terreno-struttura. La disponibilità delle semplici espressioni analitiche proposte e di coefficienti ausiliari sopra tabulati rende immediato l'utilizzo del metodo.

Bibliografia

- Attewell, P.B., Woodman, J.P. (1982). Predicting the Dynamics of Ground Settlement and its Derivatives Caused by Tunnelling in Soil. *Ground Engineering* 15(8), 13-22.
- Bilotta, E., Russo, G., Viggiani, C. (2002). Cedimenti indotti da gallerie superficiali in ambiente urbano. *Atti del XXI Convegno Nazionale di Geotecnica*, 487-494.
- Broding, W.C., Diederich, F.W., Parker, P.S. (1964). Structural optimization and design based on a reliability design criterion. *Journal of Spacecraft* 1(1), 56-61.
- Collotta, T., Barbieri, G., Acerbis, R. (2012). Subsidenza indotta dallo scavo di gallerie superficiali in rocce tenere. Esperienze relative a gallerie di grande sezione. *Rivista Italiana di Geotecnica* 46(1), 35-43.
- Mair, R.N., Taylor, R.J. (1997). Bored tunnelling in the urban environment. State-of-the-art Report and Theme Lecture. *Proceedings of 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, Balkema, Vol. 4, 2353-2385.
- Selby, A.R. (1988). Surface Movements Caused by Tunnelling in Two-layer Soil. *Engineering Geology Of Underground Movements*, Nottingham, 71-77.