
Verifica dei cedimenti

La verifica dei cedimenti risponde all'esigenza di assicurare che le deformazioni conseguenti all'assestamento del terreno di fondazione per effetto dei carichi di esercizio della costruzione stessa o di altre vicine possano considerarsi accettabili ai fini della fruibilità dell'opera e non producano sollecitazioni incompatibili con la sicurezza strutturale.

Cenni sul metodo di calcolo dei cedimenti

Il cedimento è uno spostamento verticale di una fondazione superficiale o profonda o di un'opera in terra, per effetto delle deformazioni del terreno sottostante dovute ad una variazione dello stato tensionale, ad esempio per effetto del carico trasmesso dalla stessa fondazione o da fondazioni vicine, o per una variazione delle pressioni neutre interstiziali.

In linea generale il cedimento S si compone di tre aliquote:

$$S = S_i + S_c + S_s$$

S_i cedimento immediato,

S_c cedimento di consolidazione,

S_s cedimento viscoso.

Cedimento immediato

Il cedimento immediato si verifica subito dopo l'applicazione di un carico esterno; pur essendo dovuto a deformazioni di natura sia elastica (reversibile qualora il carico venga rimosso) sia plastica (irreversibile), può essere calcolato ricorrendo alla teoria dell'elasticità, ipotizzando il terreno come un mezzo omogeneo elastico ed isotropo, anche se in alternativa sono disponibili formulazioni empiriche di uso più agevole.

Il cedimento immediato coincide pressoché con il cedimento totale nei terreni granulari (ghiaie, sabbie e mescolanze di ghiaia e sabbia), mentre è generalmente una parte trascurabile del cedimento totale nel caso di terreni coesivi (argille e limi).

Il cedimento immediato si manifesta via via che viene applicato il carico durante la costruzione dell'opera geotecnica, e pertanto spesso è poco temibile, sia perché può essere recuperato riportando in quota la struttura, sia perché normalmente precede la messa in opera delle parti più vulnerabili (pavimentazioni, rivestimenti, finiture).

Cedimento di consolidazione

Il cedimento di consolidazione primaria è dovuto all'espulsione di una parte dell'acqua interstiziale con conseguente riduzione della pressione neutra e corrispondente aumento della pressione efficace. Nei terreni coesivi inorganici costituisce generalmente la parte più rilevante del cedimento e si sviluppa più o meno lentamente nel tempo, per effetto della bassa permeabilità di questi terreni.

Cedimento viscoso

Il cedimento viscoso o di compressione secondaria è dovuto a fenomeni di natura viscosa, a scorrimenti interparticellari ed alla riorientazione dei grani; è caratteristico dei terreni coesivi organici e dei terreni torbosi. Si sviluppa a tensione verticale efficace costante ed è indipendente dal processo di consolidazione primaria.

Rigonfiamento

Di direzione opposta al cedimento è il rigonfiamento, dovuto ad un eventuale scarico tensionale conseguente allo scavo fino al piano di fondazione.

Metodo del semispazio elastico

Il metodo assume che per il terreno valga la teoria dell'elasticità e quindi sia applicabile la soluzione di Boussinesq (1885) che consente di ottenere la tensione verticale in un punto qualsiasi del semispazio elastico per una forza applicata in superficie. In genere la soluzione è considerata accettabile ai fini tecnici anche in presenza di terreni stratificati.

In letteratura esistono anche soluzioni derivate per integrazione da quella di Boussinesq, per trattare i casi di carico distribuito su superficie di una data forma.

Una volta nota la distribuzione delle tensioni nel mezzo, si può ottenere il cedimento in un punto integrando le deformazioni verticali lungo la verticale passante per il punto, fino ad una profondità significativa, che in genere è commisurata alla dimensioni dell'area caricata superficiale o delimitata dal raggiungimento di uno strato compatto:

$$s = \int_0^H \frac{\sigma}{E} dz$$

in cui:

- s cedimento,
- σ tensione verticale nel terreno variabile con la profondità,
- H profondità del volume significativo o zona attiva,
- E modulo elastico del terreno.

Ai fini pratici la procedura viene eseguita discretizzando il terreno in un certo numero di strisce orizzontali e valutando l'integrale come sommatoria dei contributi delle singole strisce.

Cedimenti in terreni coesivi

In condizioni edometriche, ovvero in condizioni di espansione laterale impedita, con filtrazione e deformazioni solo in direzione verticale, se il terreno è saturo il cedimento istantaneo è zero e l'incremento di pressione interstiziale Δu è pari all'incremento di tensione verticale totale applicato in superficie $\Delta \sigma$. Tuttavia le condizioni edometriche non sono sempre riscontrabili e il cedimento di consolidazione di una fondazione superficiale su argilla satura dovrebbe essere calcolato tenendo conto delle effettive condizioni al contorno.

Tuttavia per motivi di semplicità la stima del cedimento di consolidazione di fondazioni superficiali su terreni a grana fine è abitualmente ottenuta con un metodo di calcolo semplificato (metodo di Terzaghi) che si basa sulle ipotesi di consolidazione edometrica, modificando eventualmente il risultato ottenuto con un fattore correttivo empirico per tenere conto delle approssimazioni introdotte.

Cedimenti in terreni granulari

Il comportamento meccanico dei terreni granulari (sabbie, ghiaie) ai fini del calcolo dei cedimenti si differenzia sostanzialmente da quello dei terreni a grana fine (limi e argille), in quanto l'elevata permeabilità dei terreni granulari consente di dissipare in tempi brevi le sovrappressioni dell'acqua interstiziale (ad esempio per incrementi rapidi dei carichi). Questo permette di ritenere trascurabile il cedimento di consolidazione o comunque di inglobarne gli effetti in quello immediato.

Si tenga presente inoltre che i cedimenti di fondazioni su sabbia non destano in linea generale preoccupazione, sia per l'entità in se che è in genere modesta (raramente superiore a 5 cm), sia perché (per quanto detto prima) si esauriscono nell'arco temporale della costruzione, a meno di casi particolari in cui il carico accidentale applicato a posteriori sia molto maggiore del carico permanente.

Oltre al metodo del semispazio elastico, che comunque richiede una affidabile valutazione dei parametri meccanici che intervengono, quali il modulo di Poisson e il modulo elastico alle varie profondità, sono stati proposti svariati metodi per la stima dei cedimenti di fondazioni superficiali su sabbia di tipo empirico o semi-empirico, basati cioè sull'osservazione di un certo numero di casi reali. Dalla comparazione di questi metodi emerge però un quadro poco soddisfacente, per una eccessiva dispersione dei risultati.

I metodi empirici attualmente più accreditati sono il metodo di Schmertmann (1970-1978) che utilizza i risultati di prove penetrometriche statiche, CPT, e il metodo di Burland e Burbridge (1985) che utilizza i risultati di prove penetrometriche dinamiche, SPT, utilizzato nel presente

lavoro e su cui daremo qualche cenno al paragrafo seguente.

Metodo di Burland e Burbridge

La peculiarità di questo metodo sta nel fatto che è basato sui risultati di una indagine statistica di oltre 200 casi reali, tramite un indice di compressibilità correlato al risultato di prove penetrometriche dinamiche.

L'espressione del cedimento è la seguente:

$$s = f_s f_h f_t B^{0.7} I_c (q' - 2\sigma'_{vo}/3) \quad [\text{mm}]$$

in cui:

$$f_s = \left(\frac{1.25 L/B}{L/B + 0.25} \right)^2$$

fattore correttivo per la forma della fondazione,

$$f_h = \frac{H_s}{H_i} \left(2 - \frac{H_s}{H_i} \right)$$

fattore correttivo per lo spessore dello strato compressibile,

$$f_t = 1 + R_3 + R \log \frac{t}{3}$$

fattore per la componente viscosa, in cui:

t tempo espresso in anni,

R₃ costante pari a 0.3 per carichi statici e 0.7 per carichi pulsanti,

R costante pari a 0.2 per carichi statici e 0.8 per carichi pulsanti,

B larghezza della fondazione, in metri,

L lunghezza della fondazione, in metri,

H_s spessore dello strato compressibile sotto la fondazione,

H_i = B^{0.763} spessore di influenza,

q pressione verticale efficace trasmessa dalla fondazione, in kPa,

σ'_{co} pressione verticale efficace litostatica alla quota del piano di posa, in kPa,

I_c = 1.7/N^{1.4} indice di compressibilità,

essendo

N valore medio degli indici N_{SPT} corretti (N'_{SPT}), calcolati nella profondità:

H_i se i valori N_{SPT} crescono o sono pressoché costanti con la profondità,

2B se i valori N_{SPT} decrescono con la profondità.

Per l'ottenimento dei valori N_{SPT} corretti possono essere adottate le indicazioni di Terzaghi e Peck (1948), riportate di seguito:

N'_{SPT} = 15 + 0.5 (N_{SPT} - 15) per sabbie limose in presenza di falda,

N'_{SPT} = 1.25 N_{SPT} per sabbie e ghiaie.

Punti di calcolo dei cedimenti

Se si calcolano i cedimenti in corrispondenza di almeno due punti della fondazione si possono ricavare i cedimenti differenziali δ e le distorsioni angolari δ/L lungo le congiungenti i punti considerati, posti a distanza L

In questo modo è possibile dare un giudizio sulla compatibilità delle distorsioni angolari in relazione alla fruibilità dell'opera ed alla sicurezza strutturale, facendo riferimento anche a tabelle di letteratura che riportano i valori limite associati ad un determinato fenomeno, come indicato nella seguente tabella.

Distorsioni angolari limite secondo Bjerrum (1963)

Categoria di danno potenziale	Distorsione angolare
Limite per macchinari sensibili ai cedimenti	1/750
Limite di pericolo per strutture reticolari	1/600
Limite di sicurezza per edifici in cui non si ammettono fessurazioni	1/500
Limite di comparsa delle prime fessure nei muri di tamponamento e nei muri portanti	1/300
Limite di funzionamento dei carri ponte	1/300
Limite oltre il quale possono essere visibili inclinazioni di edifici alti	1/250
Notevoli fessure in muri di tamponamento e muri portanti in laterizio.	1/250 - 1/150
Limite di sicurezza per muri portanti in laterizio con $h/L < 1/4$.	1/150
Limite oltre il quale si devono temere danni strutturali negli edifici.	1/150