



# ACER

Azienda Casa  
EmiliaRomagna  
della Provincia  
Forlì-Cesena

Azienda con Sistema di Gestione certificato in  
conformità alle Norme ISO 9001:2015

Viale G. Matteotti, 44 47121 FORLÌ  
Tel. 0543 451011 Fax 0543 451012  
www. aziendacasa.fc.it e-mail casa@aziendacasa.fc.it  
C.f e P. IVA 00139940407



**Finanziato  
dall'Unione europea**  
NextGenerationEU

## COMUNE di FORLÌ

" PINQuA"

Programma Innovativo Nazionale per la Qualità dell'Abitare  
cod. id. Pinqua 33 - cod. intervento 944

Progetto per la costruzione di un edificio di ERP comprendente  
n. 28 alloggi, in via Autoparco Comune di Forlì.

oggetto:

RELAZIONE GEOTECNICA

COLLABORATORE ALLA PROGETTAZIONE

geom. SANDRA LUCCHI

aggiornamenti :

REVISIONE N.

0

data :

Aprile 2022

scala : varie

tav. n

PROGETTAZIONE

arch. PAOLO SEVERI

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO

ing. PAOLO BERGONZONI

REDATTO DA:

ing. NICOLA CASADEI ROSSI

# GT

## FORLI Via Autoparco\_ NOLIAN- A2.0- GEOTECNICA E FONDAZIONI

Generato mercoledì 1 giugno 2022 alle ore 09:54:39.

All-In-One EWS 51 (05.07.2021) build 8323

© 1984-2020, Softing srl - Licenza 26769

### Indice

[Portanza drenata](#)

[PLATEE](#)

[Portanza non drenata](#)

[PLATEE](#)

[Scorrimento drenato](#)

[PLATEE](#)

[Scorrimento non drenato](#)

[PLATEE](#)

[Cedimenti](#)

[PLATEE](#)

[Verifiche globali](#)

[MASSIMI CEDIMENTI DIFFERENZIALI](#)

[SCORRIMENTO ORIZZONTALE](#)

[Parametri verifica fondazioni](#)

[Stratigrafia](#)

[Pressioni litostatiche](#)

[Combinazioni di carico geotecniche](#)

[Fattori sicurezza parziali](#)

[Cenni teorici sui metodi adottati](#)

### Portanza drenata

#### PLATEE

Indice	x (cm)	y (cm)	Press. agente (kg/cm2)	Press. resist. (kg/cm2)	Comb	Coeff. Sic.
1	168.522	2033.46	1.80522	4.33269	30	2.4001

Il risultato riportato è riferito al punto di coordinate **x** e **y** indicate, ove si è riscontrato il minimo fattore di sicurezza.

### Portanza non drenata

#### PLATEE

Indice	x (cm)	y (cm)	Press. agente (kg/cm2)	Press. resist. (kg/cm2)	Comb	Coeff. Sic.
1	168.522	2033.46	1.80522	0.845787	30	0.468524

Il risultato riportato è riferito al punto di coordinate **x** e **y** indicate, ove si è riscontrato il minimo fattore di sicurezza.

### Scorrimento drenato

#### PLATEE

Indice	Press. agente (kg/cm2)	Press. resist. (kg/cm2)	Comb	Coeff. Sic.
1	123254	1.2139e+006	30	9.84876

Il risultato riportato è riferito all'intera platea di fondazione.

### Scorrimento non drenato

#### PLATEE

Indice	Press. agente (kg/cm2)	Press. resist. (kg/cm2)	Comb	Coeff. Sic.
1	123254	689075	30	5.59071

Il risultato riportato è riferito all'intera platea di fondazione.

Cedimenti								
PLATEE								
Indice	x (cm)	y (cm)	Press. agente (kg/cm2)	Cedimento di calcolo (cm)	Cedimento elastico (cm)	Comb	Cedimento edometrico (cm)	Comb
1	2454.17	2070.94	0.938216	0.187643	0.0509679	9	0.581673	9

Il risultato riportato è riferito al punto di coordinate x e y indicate, ove si è riscontrato il massimo cedimento.

Verifiche globali							
MASSIMI CEDIMENTI DIFFERENZIALI							
t.	x (cm)	y (cm)	Cond.	Cedimento (cm)	Differenza (cm)	Distanza (cm)	Rapporto
minimo	1576.4	131.703	9	0.0763769			
massimo	2453.4	2076.06	9	0.208606	0.13223	2132.99	6.19925e-005
SCORRIMENTO ORIZZONTALE							

Condizione di carico più gravosa	30
Forza orizzontale	123254
Scorrimento resistente	1.2139e+006
Fattore di sicurezza minimo	9.84876
Fattore di sicurezza medio	9.84876

Parametri verifica fondazioni			
Teoria elastica			Boussinesq
Metodo resistenza superficiali grana fina			Brinch-Hansen
Metodo resistenza superficiali grana grossa			Schmertmann
Teoria cinematica per fondazioni superficiali			Nessuna
Tipo palo			Trivellato
Profondità falda	cm		400
Profondità piano di posa	cm		350
Angolo attrito fondazione superficiale	°		20
Angolo attrito palo terreno	°		20
Fattore alfa per i pali			1
Fattore spinta laterale per i pali K		Assunto pari a kp, coeff. spinta passiva	
Tempo per cedimento viscoso	anni		0

Stratigrafia		
Denominazione		Strato #1
Spessore dello strato	cm	1000
Tipo terreno		Grana fina
Angolo attrito interno	°	20
Coesione drenata	kg/cm2	0.1
Coesione non drenata	kg/cm2	0.14
Peso specifico naturale	kg/cm3	0.0018
Peso specifico saturo	kg/cm3	0.0022
Modulo elasticità non drenato Eu	kg/cm2	5000
Coeff. di variazione lineare di Eu	kg/cm3	0
Indice di consolidamento OCR		0.6
Indice dei vuoti al cenro dello strato e0		0.001
Indice di compattazione Cc		0.02
Indice di ricompattazione Cs		0.02
Indice medio di prova Nst		0
Pressione di consolidamento qc	kg/cm2	0
Denominazione		Strato #2
Spessore dello strato	cm	5
Tipo terreno		Grana fina
Angolo attrito interno	°	30
Coesione drenata	kg/cm2	0.1
Coesione non drenata	kg/cm2	0.14
Peso specifico naturale	kg/cm3	0.0019
Peso specifico saturo	kg/cm3	0.0021
Modulo elasticità non drenato Eu	kg/cm2	5000
Coeff. di variazione lineare di Eu	kg/cm3	0
Indice di consolidamento OCR		0.5
Indice dei vuoti al cenro dello strato e0		0.001
Indice di compattazione Cc		0.02
Indice di ricompattazione Cs		0.02

## Pressioni litostatiche

Prof (cm)	Strato	Sv eff (kg/cm2)	So eff (kg/cm2)
50	Strato #1	0.045	0.0296091
100	Strato #1	0.135	0.0888273
150	Strato #1	0.225	0.148045
200	Strato #1	0.315	0.207264
250	Strato #1	0.405	0.266482
300	Strato #1	0.495	0.3257
350	Strato #1	0.585	0.384918
400	Strato #1	0.675	0.444136
450	Strato #1	0.74	0.486905
500	Strato #1	0.78	0.513224
550	Strato #1	0.82	0.539543
600	Strato #1	0.86	0.565863
650	Strato #1	0.9	0.592182
700	Strato #1	0.94	0.618501
750	Strato #1	0.98	0.64482
800	Strato #1	1.02	0.671139
850	Strato #1	1.06	0.697459
900	Strato #1	1.1	0.723778
950	Strato #1	1.14	0.750097
1000	Strato #1	1.18	0.776416
1050	Strato #1	1.2045	0.60225

Prof=profondità media sottostrato; Sv tot=pressione litostatica totale; Hdr=pressione acqua; Sv eff=pressione litostatica efficace; So tot=pressione laterale totale; So eff=pressione laterale efficace

## Combinazioni di carico geotecniche

1	-1.00 * (1) Torrente di piano SLD + -0.30 * (1) Dinamica SLDh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri + -1.00 * (1) Dinamica SLDh X
2	-1.00 * (1) Torrente di piano SLD + -0.30 * (1) Dinamica SLDh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri + 1.00 * (1) Dinamica SLDh X
3	-1.00 * (1) Torrente di piano SLD + 0.30 * (1) Dinamica SLDh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri + -1.00 * (1) Dinamica SLDh X
4	-1.00 * (1) Torrente di piano SLD + 0.30 * (1) Dinamica SLDh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri + 1.00 * (1) Dinamica SLDh X
5	1.00 * (1) Torrente di piano SLD + -0.30 * (1) Dinamica SLDh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri + -1.00 * (1) Dinamica SLDh X
6	1.00 * (1) Torrente di piano SLD + -0.30 * (1) Dinamica SLDh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri + 1.00 * (1) Dinamica SLDh X
7	1.00 * (1) Torrente di piano SLD + 0.30 * (1) Dinamica SLDh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri + -1.00 * (1) Dinamica SLDh X
8	1.00 * (1) Torrente di piano SLD + 0.30 * (1) Dinamica SLDh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri + 1.00 * (1) Dinamica SLDh X
9	-1.00 * (1) Torrente di piano SLD + -0.30 * (1) Dinamica SLDh X + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri + -1.00 * (1) Dinamica SLDh Y
10	-1.00 * (1) Torrente di piano SLD + -0.30 * (1) Dinamica SLDh X + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri + 1.00 * (1) Dinamica SLDh Y
11	-1.00 * (1) Torrente di piano SLD + 0.30 * (1) Dinamica SLDh X + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri + -1.00 * (1) Dinamica SLDh Y
12	-1.00 * (1) Torrente di piano SLD + 0.30 * (1) Dinamica SLDh X + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri + 1.00 * (1) Dinamica SLDh Y
13	1.00 * (1) Torrente di piano SLD + -0.30 * (1) Dinamica SLDh X + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri + -1.00 * (1) Dinamica SLDh Y
14	1.00 * (1) Torrente di piano SLD + -0.30 * (1) Dinamica SLDh X + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri + 1.00 * (1) Dinamica SLDh Y
15	1.00 * (1) Torrente di piano SLD + 0.30 * (1) Dinamica SLDh X + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri + -1.00 * (1) Dinamica SLDh Y
16	1.00 * (1) Torrente di piano SLD + 0.30 * (1) Dinamica SLDh X + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri + 1.00 * (1) Dinamica SLDh Y
17	-1.00 * (1) Torrente di piano SLD + -0.30 * (1) Dinamica SLDh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri + -1.00 * (1) Dinamica SLDh X
18	-1.00 * (1) Torrente di piano SLD + -0.30 * (1) Dinamica SLDh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri + 1.00 * (1) Dinamica SLDh X

[illegible]

4	1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.65 * (1) #4 Accidentale neve + 0.91 * (1) #2 Accidentale cat A + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri
5	1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 0.80 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.80 * (1) #1 Permanenti portati e propri
5	-1.00 * (1) Torcente di piano SLV + -0.30 * (1) Dinamica SLVh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri + -1.00 * (1) Dinamica SLVh X
5	-1.00 * (1) Torcente di piano SLV + -0.30 * (1) Dinamica SLVh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri + 1.00 * (1) Dinamica SLVh X
5	-1.00 * (1) Torcente di piano SLV + 0.30 * (1) Dinamica SLVh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri + -1.00 * (1) Dinamica SLVh X
5	-1.00 * (1) Torcente di piano SLV + 0.30 * (1) Dinamica SLVh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri + 1.00 * (1) Dinamica SLVh X
5	1.00 * (1) Torcente di piano SLV + -0.30 * (1) Dinamica SLVh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri + -1.00 * (1) Dinamica SLVh X
5	1.00 * (1) Torcente di piano SLV + -0.30 * (1) Dinamica SLVh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri + 1.00 * (1) Dinamica SLVh X
5	1.00 * (1) Torcente di piano SLV + 0.30 * (1) Dinamica SLVh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri + -1.00 * (1) Dinamica SLVh X
5	1.00 * (1) Torcente di piano SLV + 0.30 * (1) Dinamica SLVh Y + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri + 1.00 * (1) Dinamica SLVh X
5	-1.00 * (1) Torcente di piano SLV + -0.30 * (1) Dinamica SLVh X + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri + -1.00 * (1) Dinamica SLVh Y
5	-1.00 * (1) Torcente di piano SLV + -0.30 * (1) Dinamica SLVh X + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri + 1.00 * (1) Dinamica SLVh Y
5	-1.00 * (1) Torcente di piano SLV + 0.30 * (1) Dinamica SLVh X + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri + -1.00 * (1) Dinamica SLVh Y
5	-1.00 * (1) Torcente di piano SLV + 0.30 * (1) Dinamica SLVh X + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri + 1.00 * (1) Dinamica SLVh Y
5	1.00 * (1) Torcente di piano SLV + -0.30 * (1) Dinamica SLVh X + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri + -1.00 * (1) Dinamica SLVh Y
5	1.00 * (1) Torcente di piano SLV + 0.30 * (1) Dinamica SLVh X + 1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.20 * (1) #3 Accidentale cat H + 0.30 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri + 1.00 * (1) Dinamica SLVh Y
5	1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 0.65 * (1) #4 Accidentale neve + 0.91 * (1) #2 Accidentale cat A + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri
6	1.00 * (1) #6 spinta delle terre + 1.00 * (1) #5 tamponamenti esterni + 1.00 * (1) #1 Permanenti portati e propri

## Fattori sicurezza parziali

Approccio	1, seconda combinazione: A2+M2+R2
Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno (gruppo 'M')	
Angolo attrito	1.25
Coesione efficace	1.25
Resistenza non drenata	1.4
Densità	1
Coefficienti parziali per le verifiche SLU (gruppo 'R')	
Capacità portante	1.8
Scorrimento	1.1
Coefficienti parziali per i pali (gruppo 'R')	
Resistenza alla base	1.7
Compressione laterale	1.45
Trazione laterale	1.6
Coefficienti parziali per le azioni (gruppo 'A')	
Permanenti	1
Variabili	1.3
Variabili	1.3

## Cenni teorici sui metodi adottati

## Fondazioni superficiali su terreni a grana fine

### Cedimento elastico

La variazione di tensione dovuta al carico nell'ipotesi di semispazio elastico, viene calcolata con il metodo di Boussinesq:

$$\Delta\sigma_z = \frac{3}{2} \frac{P}{PIG} \frac{z^2}{R^5}$$
$$R^2 = r^2 + z^2$$

o di Westergaard:

$$\Delta\sigma_z = \frac{P}{2 PIG z^2} \frac{\sqrt{(1-2\nu)(2-2\nu)}}{\left[ \frac{(1-2\nu)}{(2-2\nu)} + \left(\frac{r}{z}\right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}$$

dove r e z è la posizione del punto desiderato in coordinate cilindriche con origine nel punto di applicazione della forza. Per la valutazione di ν nel caso della espressione di Westergaard vedere più sotto.

Nel caso di plinti o del Laboratorio, viene usato l'integrale su una impronta rettangolare secondo l'espressione:

$$R_1 = L^2 + z^2$$
$$R_2 = B^2 + z^2$$
$$R_3 = \sqrt{L^2 + B^2 + z^2}$$
$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{2 PIG} \left( \arctan\left(\frac{LB}{z R_3}\right) + \frac{LBz}{R_3} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right)$$

Con questa espressione si ottiene la pressione al vertice del rettangolo di lati L e B. La pressione al centro viene calcolata come somma di quattro rettangoli di lati B/2 e L/2.

Nel caso di plinti sui quali agisca un momento, viene considerata una riduzione delle dimensioni:

$$L' = L - 2 e_L$$
$$B' = B - 2 e_B$$

con B ed H dimensioni del plinto ed  $e_b$  e  $e_h$  eccentricità del carico. Si noti che con tale metodo, nel caso di solo momento in assenza di carico assiale, le tensioni sono nulle.

Nel caso di trave o platea, viene eseguita una integrazione considerando i carichi agenti su una serie di areole ove si considera la distanza dal punto ove si vuole ottenere la tensione tramite le sopra riportate espressioni di Boussinesq e Westergaard.

Il cedimento elastico è ottenuto per integrazione su intervalli in profondità tipicamente di 0.25 B dove B è il lato minore della fondazione. Ove sia assegnata una stratificazione, l'integrazione tiene conto della variazione delle caratteristiche del terreno nei diversi strati.

La profondità limite dell'integrazione è quella dove le pressioni si riducono sotto il 5% del carico. Se si supera la profondità massima assegnata con le stratigrafie, si assume che tale strato continui per profondità indefinita.

Per le platee, la larghezza minore B viene calcolata valutando gli assi principali d'inerzia della geometria della platea.

Il cedimento totale è ottenuto per integrazione delle deformazioni di intervalli in profondità come segue:

$$S = \int \Delta\sigma_z \frac{(1-\nu^2)}{E(z)} dz$$

dove i valori di variazione di tensione sono calcolati come sopra.

Il modulo di elasticità si assume variare in ogni singolo strato con la legge lineare:

$$E = E_0 + m z$$

Dove  $E_0$  è il valore al livello superiore dello strato, assegnato nella stratigrafia, ed  $m$  è un coefficiente lineare egualmente assegnato per ogni strato.

Il coefficiente di Poisson  $v$  non è richiesto sia assegnato, ma viene calcolato come segue:

$$k_0 = (1 - \sin(\varphi)) \text{OCR}^{\sin(\varphi)}$$

$$v = k_0 / (1 + k_0)$$

### Cedimento edometrico

Il cedimento edometrico è ottenuto sommando i cedimenti  $\Delta H$  dei singoli strati di spessore  $H$ . L'incremento di pressione  $\Delta\sigma'_v$ , la pressione litostatica  $\sigma'_{v0}$ , vengono calcolati, l'indice dei vuoti  $e_0$  e l'indice di sovraconsolidamento OCR, l'indice di compressione  $C_c$  e di ricomprensione  $C_s$  vengono assegnati. La pressione di consolidazione è calcolata tramite:  $\sigma'_c = \text{OCR} - \Delta\sigma'_v$ .

La tensione dovuta al carico è calcolata come esposto per il cedimento elastico. Anche in questo caso, se si hanno più strati, viene considerata la variazione dei valori in ogni singolo strato.

Se si assegna un valore nullo per  $e_0$ , viene calcolato come segue:

$$e_0 = w * \gamma_{\text{dry}} / \gamma_{\text{wat}}$$

con  $w$  = contenuto d'acqua.

Poiché il valore di  $e_0$  cambia con la profondità, esso viene calcolato alla profondità necessaria assumendo che il valore assegnato sia relativo alla quota centrale dello strato. Se il dato disponibile è a differente profondità va riportato al centro dello strato con la seguente relazione:

$$e_{0i} = e_{0p} - C_c \log_{10} \sigma'_{\text{vai}} / \sigma'_{\text{vop}}$$

con  $i$  e  $p$  rispettivamente valori relativi al punto desiderato ed al punto di rilevamento.

per  $\sigma'_c = \sigma'_{v0}$

$$\Delta H = b C_c \log_{10} a$$

per  $\sigma'_c < \sigma'_{v0}$

$$\Delta H = b C_s \log_{10} a$$

per  $(\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v) > \sigma'_c > \sigma'_{v0}$

$$\Delta H = b \left( C_s \log_{10} \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{v0}} + C_c \log_{10} a \right)$$

dove:

$$a = \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{v0}}$$

$$b = \frac{H}{1 + e_0}$$

Questo metodo è applicato per tutti i tipi di fondazione superficiale. Nel caso di platee, viene applicata una riduzione del fattore  $N_\gamma$ :

$$r_\gamma = 1 - 0.25 \log_{10} B/2 \text{ (B in metri)}$$



Si ricorda che il calcolo procede fino alla profondità dell'ultimo strato assegnato. In questo caso si deve tener presente che la profondità alla quale si considera assegnato il valore di  $e_0$  è sempre il centro dello spessore dell'ultimo strato assegnato.

### Portanza

I valori impiegati in questa valutazione per terreno a strati vengono determinati tramite una media pesata sugli strati. Questa media, per quanto riguarda la valutazione del peso specifico, tiene conto, se in condizioni drenate, della presenza della falda come esposto nel seguito.

Per la portanza si impiega la formula generale:

$$q_{ult} = c N_c s_c d_c i_c + \bar{q} N_q s_q d_q i_q + 0.5 \gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma$$

Per il terreno non drenato ( $\varphi=0$ ), l'espressione assume la forma:

$$q_{ult} = 5.14 c' s_c' d_c' i_c' + \bar{q}$$

dove  $\bar{q}$  è la pressione litostatica sul piano di posa.

I coefficienti impiegati sono quelli delle formulazioni di:

- Hansen
- Brinch-Hansen
- Vesic
- Eurocodice 7

Nel seguito, per tutti i casi si impiegherà:

$$\beta = D/B \text{ per } D < B$$

$$\beta = \arctan D/B \text{ per } D > B$$

e, ove richiesto:

$$m = \sin^2(\theta) \frac{2 + \frac{B}{L}}{1 + \frac{B}{L}} + \cos^2(\theta) \frac{2 + \frac{L}{B}}{1 + \frac{L}{B}}$$

con  $\theta$  angolo di inclinazione della forza orizzontale sul piano

$$k = \frac{B}{L} \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}$$

I coefficienti proposti da Hansen sono i seguenti.

	s	d	i
c	$1 + N_q B / N_c L$	$1 + 0.4 \beta$	$i_q - (1 - i_q) / (N_q - 1)$
q	$1 + B/L \tan \varphi$	$1 + 2 \tan \varphi (1 - \sin \varphi)^2 \beta$	$(1 - 0.5H / (V + A_f c \cot \varphi))^5$
$\gamma$	$1 - 0.4 B/L$	1	$(1 - 0.7H / (V + A_f c \cot \varphi))^5$

$$N_q = \tan^2(45 + \varphi/2) \exp(\pi \tan \varphi)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi$$

$$N_\gamma = 1.5 (N_q - 1) \tan \varphi$$

$$s_c' = 1 + 0.2 B/L$$

$$d_c' = 1 + 0.4 \beta$$

$$i_c' = 0.5 \left( 1 + (1 - H/A_{fcu})^{0.5} \right)$$

I coefficienti proposti da Brinch-Hansen sono i seguenti.

	s	d	i
c	$1 + 0.2 k$	$d_q - (1 - d_q)/(N_c \tan \varphi)$	$i_q - (1 - i_q)/(N_q - 1)$
q	$1 + 0.1 k$	$1 + 2 \tan \varphi (1 - \sin \varphi)^2 \beta$	$(1 - H/(V + A_{fc} \cot \varphi))^m$
$\gamma$	$1 + 0.1 k$	1	$(1 - H/(V + A_{fc} \cot \varphi))^{m+1}$

$$N_q = \tan^2 (45 + \varphi/2) \exp(\pi \tan \varphi)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi$$

$$N_\gamma = 2 (N_q - 1) \tan \varphi$$

$$s_c' = 1 + 0.2 B/L$$

$$d_c' = 1 + 0.4 \beta$$

$$i_c' = 0.5 \left( 1 + (1 - H/A_{fcu})^{0.5} \right)$$

I coefficienti proposti da Vesic sono i seguenti.

	s	d	i
c	$1 + N_q B/N_c L$	$d_q - (1 - d_q)/N_c \tan \varphi$	$i_q - (1 - i_q)/(N_q - 1)$
q	$1 + B/L \tan \varphi$	$1 + 2 \tan \varphi (1 - \sin \varphi)^2 \beta$	$(1 - H/(V + A_{fc} \cot \varphi))^m$
$\gamma$	$1 - 0.4 B/L$	1	$(1 - H/(V + A_{fc} \cot \varphi))^{m+1}$

$$N_q = \tan^2 (45 + \varphi/2) \exp(\pi \tan \varphi)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi$$

$$N_\gamma = 2 (N_q - 1) \tan \varphi$$

$$s_c' = 1 + 0.2 B/L$$

$$d_c' = 1 + 0.4 \beta$$

$$i_c' = 1 - m * H / (B L c_u V)$$

I coefficienti proposti da Eurocodice 7 sono i seguenti.

	s	d	i
c	$s_q (1 - s_q)/(N_q - 1)$	1	$i_q - (1 - i_q)/(N_q - 1)$
q	$1 + \sin(f) B/L$	1	$(1 - 0.7 H/(V + A_{fc} \cot \varphi))^3$
$\gamma$	$1 - 0.3 B/L$	1	$(1 - H/(V + A_{fc} \cot \varphi))^3$

$$N_q = \tan^2 (45 + \varphi/2) \exp(\pi \tan \varphi)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi$$

$$N_\gamma = 2 (N_q - 1) \tan \varphi$$

$$s_c' = 1 + 0.2 B/L$$

$$d_c' = 1$$

$$i_c' = 0.5 \left( 1 + (1 - H/A_{fu})^{0.5} \right)$$

Nel caso la falda idrica interessi il cuneo di fondazione, viene impiegato un peso specifico medio ottenuto come media pesata fino alla profondità  $h_c$  del cuneo:

$$h_c = B/2 \tan(45^\circ + \varphi/2)$$

#### Effetti cinematici

Nel caso si voglia considerare l'effetto del sisma sulla portanza, si possono considerare gli effetti cinematici, costituiti dalle sollecitazioni indotte nel terreno dall'azione sismica. Le azioni inerziali che inducono un aggravio di sollecitazioni trasmesse dalla sovrastruttura al terreno tramite le fondazioni vengono già considerate nell'analisi sismica effettuata sulla struttura.

Si impiegano due metodi, selezionabili, che consentono di determinare tre coefficienti che modificano i termini dell'equazione trinomia come segue.

Il metodo di Paolucci e Pecker prevede le seguenti relazioni:

$$z_c = 1 - 0.36 k_h$$

$$z_q = z_\gamma = 1 - \frac{k_h}{\tan \varphi}$$

dove  $k_h = a_{h,max} / g$  con  $a_{h,max}$  accelerazione spettrale per il periodo del primo modo. Questo valore è automaticamente ricavato dall'analisi e non deve essere assegnato.

Il metodo di Maugeri e Novità prevede le seguenti relazioni.

$$z_c = 1$$

$$z_q = 1 + a_1 k_h^2 + a_2 k_h$$

$$z_g = 1 + a_3 k_h$$

$$a_1 = 43.29 \tan^3(\varphi) - 105.8 \tan^2(\varphi) + 81.09 \tan(\varphi) - 19.91$$

$$a_2 = -2.8 \tan^3(\varphi) + 6.66 \tan^2(\varphi) - 4.61 \tan(\varphi) + 0.35$$

$$a_3 = 7.23 \tan^3(\varphi) - 18.39 \tan^2(\varphi) + 15.22 \tan(\varphi) - 5.39$$

#### Punzonamento

Per determinare il modulo di resistenza a taglio si impiegano le seguenti relazioni:

$$G = E / (2 (1+\nu))$$

$$\nu = k_0 / (1 + k_0)$$

$$k_0 = (1 - \sin(\varphi)) \text{OCR}^{\sin(\varphi)}$$

$$I_r = G / (c' + \sigma' \tan(\varphi))$$

$$I_{r,crit} = \frac{1}{2} \exp\left(\left(3.3 - 0.45 \frac{B}{L}\right) \cotan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)\right)$$

$I_r$  ed  $I_{r,crit}$  sono rispettivamente l'indice di rigidezza e l'indice critico di rigidezza.

$$\psi_\gamma = \psi_q = \exp\left(\left(0.6 \frac{B}{L} - 4.4\right) \tan(\varphi) + \frac{3.07 \sin(f) \log_{10}(2 I_r)}{1 + \sin(\varphi)}\right)$$

$$\psi_c = \psi_q - \frac{1 - \psi_q}{N_c \tan(\varphi)}$$

Per  $\varphi=0$ :

$$\psi_v = \psi_q = 1$$

$$\psi_c = 0.32 + 0.12 B/L + 0.6 \log_{10}(I_r)$$

$$\text{se } I_r > I_{r,\text{crit}} \quad \psi_v = \psi_q = \psi_c = 1$$

I fattori  $\psi_v$ ,  $\psi_q$  e  $\psi_c$  vengono impiegati come moltiplicatori riduttivi dei corrispondenti fattori della formula trinomia.

### Scorrimento

La tensione limite di scorrimento è data dalla relazione:

$$s_{\text{ult}} = c + \sigma_v \tan(\varphi)$$

con  $\sigma_v$  pressione ortogonale al piano di scorrimento.

### Fondazioni superficiali su terreni a grana grossa

#### Metodo di Schmertmann

$$S = \frac{C_1 C_2}{C_3} \Delta p \sum_0^{z_2} \frac{I_z \Delta z}{q_c}$$

dove:

$$C_1 = 1 - 0.5 \frac{\sigma'_{v0}}{\Delta p}$$

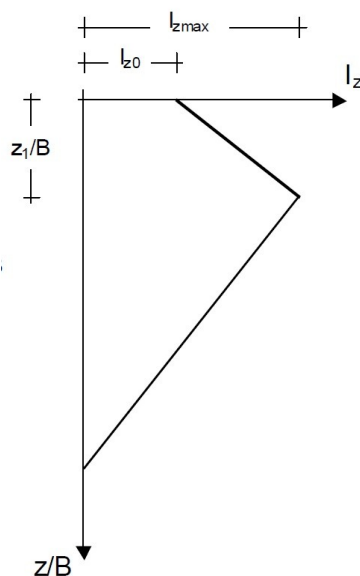
$$C_2 = 1 + 0.2 \log_{10}(10t)$$

$$C_3 = 3.5 B/L$$

con:

t tempo in anni

$\Delta p$  pressione netta applicata dalla fondazione ovvero la pressione trasmessa dalla fondazione decurtata della pressione efficace sul piano di posa.



Il fattore di influenza  $I_z$  ha l'andamento di una spezzata come in figura (la figura è tratta da G. Vannucchi et al., Dispense di geotecnica), con vertice della spezzata a profondità  $z_1$  ed ampiezza  $I_{\text{max}}$  con parametri definiti:

$$I_0 = 0.2 - 0.1 B/L$$

$$z_1 = (1 - 0.5 B/L) B$$

$$z_2 = (4 - 2 B/L) B$$

$$I_{\max} = 0.5 + 0.1 \sqrt{\Delta q / \sigma'_{v0}} > 0.5$$

Pertanto:

$$I_z = I_0 + (I_{\max} - I_0) z / z_1 \quad (\text{per } z < z_1)$$

$$I_z = I_{\max} (z_2 - z) / (z_2 - z_1) \quad (\text{per } z_1 < z < z_2)$$

#### Metodo di J. B. Burland e M. C. Burbridge

Specifichiamo le iniziali in quanto spesso Burbridge è erroneamente riportato come Burbridge.

$$S = f_s f_1 q B^{0.7} I_c$$

dove:

$f_s$ , fattore di forma

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

$f_1$ , fattore di spessore

$$f_1 = \frac{H_s}{z_1} \left( 2 - \frac{H_s}{Z_1} \right)$$

$I_c$ , indice di compressibilità:

$$I_c = 1.71 / \bar{N}^{1.4}$$

con  $\bar{N}$  il valore medio corretto :

per sabbie molto fini o limose sotto falda:

$$N' = 15 + 0.5 (N_{\text{SPT}} - 15)$$

per ghiaie o sabbie ghiaiose:

$$N' = 1.25 N_{\text{SPT}}$$

Per tener conto della viscosità si applica un fattore correttivo:

$$f_1 = 1 + R_3 + R_t \log_{10} t/3$$

Dove si assume che i carichi agiscano staticamente per cui  $R_3 = 0.3$  e  $R_t = 0.2$

#### Fondazioni profonde

##### Portanza

La portanza per aderenza o attrito laterale è data da:

$$Q_s = \pi D \int \tau_s dz$$

Dove  $\tau_s$  viene calcolato con due metodi:

$$\tau_s = \alpha c_u$$

dove  $\alpha$  deve essere assegnato, oppure;

$$\tau_s = K \sigma'_{v0}$$

con  $K$  coefficiente di spinta laterale già trattato.

La portanza alla base del palo è data come segue.

In terreno coesivo ( $c_u > 0.0$ )

$$Q_p = A_p (c_u N_c + \sigma'_{v0,P})$$

dove si assume  $N_c = 9$ .

In terreno non coesivo:

$$Q_p = A_p N_q \sigma'_{v0,P}$$

dove  $N_q$  è il coefficiente di Berezantzev ottenuto in funzione di un  $\phi'$  ridotto. Il valore di  $\phi'$  ridotto può essere assegnato, valido però per tutti gli strati, oppure, ponendo tale valore a zero, viene calcolato come segue:

pali in fissi in acciaio	$\phi' = 20^\circ$
pali infissi in calcestruzzo	$\phi' = 0.75 \phi$
pali trivellati	$\phi' = \phi$
pali elicoidali	$\phi' = \phi$

I coefficienti di Berezantzev non sono espressi in forma chiusa e pertanto sono derivati interpolando una tabella di coefficienti forniti dall'autore.

#### Resistenza laterale

Viene impiegato il metodo di Broms con la modifica, per i terreni a grana grossa, di Brich-Hansen.

Cioè, per i terreni a grana fine:  $p_u = 9.0 c_u D$ , per i terreni a grana grossa:  $p_u = K_p^2 \sigma'_v D$

#### Cedimento

Il cedimento elastico è ottenuto tramite la formulazione rigorosa (nei limiti dell'ipotesi di semispazio elastico) dovuta a Poulos e Davis e basata sulla equazione di Mindlin per il semispazio elastico. Tale formulazione è ottenuta eguagliando gli spostamenti del palo con quelli del suolo e portano ad una espressione matriciale che fornisce le tensioni nel suolo. Ottenute queste si risale agli spostamenti. L'equazione matriciale è la seguente, dove le matrici  $I_p$  e  $I_s$  raccolgono i così detti "coefficienti di influenza" che sono i termini ottenuti per integrazione numerica delle equazioni differenziali che governano il problema ed i altri ambiti vengono chiamati coefficienti della matrice di rigidità o di flessibilità.

$$\rho = (I - k I_p I_s)^{-1} Y$$

con 
$$k = \frac{n^2}{4 \left(\frac{L}{d}\right)^2} \frac{E_p}{E_s}$$

dove  $n$  è il numero degli intervalli di discretizzazione e  $Y$  è il vettore delle azioni esterne.

#### Bibliografia

H.G. Poulos, E. H. Davis, Elastic Solutions for Rock and Soil Mechanics, John Wiley & Son, 1974  
H.G. Poulos, E. H. Davis, Pile Foundation Analysis and Design, Rainbow-Bridge Book. Co.  
R. L. Mosher, W. P. Dawkins, Theoretical Manual for Pile Foundations, U.S Army Corps of Engineers  
F. Azizi, Applied Analysis in Geotechnics, E & FN Spon

J. E. Bowles, Foudation Analysis and Design, Int. Student Edition  
G. Vannuchi et al., Dispense di geotecnica