

Maurizio Tanzini

MICROPALI E PALI DI PICCOLO DIAMETRO

ASPETTI PROGETTUALI E TECNOLOGICI

*Progettazione di fondazioni profonde su micropali
e pali di piccolo diametro secondo le nuove NTC*

*Progettazione di opere di sostegno flessibili
di micropali secondo le nuove NTC*

Micropali per le fondazioni di opere in terra

Stabilizzazione di pendii con reticoli di micropali

Prove di carico

SECONDA EDIZIONE



Dario Flaccovio Editore

INDICE

Capitolo 1 – Introduzione

	pag.	
1.1. Caratteristiche e definizioni	9	
1.2. Classificazione dei micropali	13	
1.3. Campi di applicazione dei micropali	17	»
1.3.1. Introduzione	17	»
1.3.2. Applicazioni strutturali dei micropali.....	19	»
1.3.3. Applicazioni dei micropali come elementi di rinforzo del terreno	21	»
1.3.4. Applicazioni dei micropali nelle opere in sotterraneo	23	»
1.3.5. Fattori che influenzano la scelta dei micropali.....	24	»
1.4. Pali trivellati	24	»
1.4.1. Sostegno mediante tubi.....	25	»
1.4.2. Sostegno con fanghi bentonitici	26	»
1.4.3. Perforazione non rivestita.....	27	»
1.5. Pali infissi	28	»
1.5.1. Pali infissi prefabbricati	28	»
1.5.1.1. Pali in acciaio	28	»
1.5.1.2. Pali infissi prefabbricati in c.a. e c.a.p.....	28	»
1.5.2. Pali infissi gettati in opera	29	»
1.5.2.1. Il palo Franki.....	30	»
1.5.2.2. Il palo simplex	30	»
1.5.2.3. Il palo duplex e il palo pressato	31	»
1.5.2.4. Pali infissi con cassaforma non recuperabile: pali Raymond.....	31	»
1.6. Criteri per la scelta dei tipi da adottare.....	31	»
1.7. Riferimenti bibliografici	32	»

Capitolo 2 – Aspetti tecnologici

2.1. Micropali	»	35
2.1.1. Perforazione	»	35
2.1.2. Getto ed iniezione	»	36
2.1.3. Impianto d'iniezione	»	39
2.1.4. Tecniche di iniezione	»	39
2.1.5. Armatura del micropalo	»	45
2.1.6. Costruzione del micropalo radice.....	»	49
2.1.7. Costruzione del micropalo Tubfix	»	49
2.1.8. Esempio di specifica di esecuzione	»	52
2.1.8.1. Soggezioni geotecniche ed ambientali	»	52
2.1.8.2. Prove tecnologiche preliminari.....	»	53
2.1.8.3. Tolleranze	»	53
2.1.8.4. Materiali	»	53
2.1.8.5. Modalità esecutive	»	55
2.1.9. Impiego dei micropali nelle opere in sotterraneo.....	»	57
2.2. Pali trivellati	»	59
2.2.1. Esecuzione del foro	»	59
2.2.1.1. Generalità e avvertenze.....	»	59
2.2.1.2. Perforazione con sistema a percussione	»	59
2.2.1.3. Perforazione con sistema a rotazione	»	60
2.2.1.4. Idroperforazione	»	60
2.2.1.5. Rotoperforazione	»	60
2.2.2. Metodi per la stabilizzazione del foro	»	60
2.2.2.1. Perforazione senza rivestimento né fango bentonitico.....	»	60
2.2.2.2. Perforazione senza rivestimento ma in presenza di fango bentonitico	»	60
2.2.2.3. Perforazione all'interno di tubazioni di rivestimento.....	»	61
2.2.3. Messa in opera della gabbia d'armatura.....	»	61
2.2.4. Getto del calcestruzzo.....	»	61
2.2.4.1. Getto all'asciutto.....	»	62
2.2.4.2. Getto in presenza di acqua e di fango bentonitico	»	62
2.2.5. Armatura metallica	»	63
2.2.6. Calcestruzzo	»	63
2.3. Pali infissi	»	63
2.3.1. Tipi di pali e caratteristiche geometriche	»	63
2.3.2. Tolleranze	»	64
2.3.3. Infissione.....	»	64
2.3.3.1. Generalità	»	64
2.3.3.2. Mezzi di infissione	»	64
2.3.4. Messa in opera della gabbia	»	65
2.3.5. Getto del calcestruzzo.....	»	65
2.3.6. Armature metalliche	»	65
2.3.7. Calcestruzzo	»	65
2.4. Riferimenti bibliografici	»	65

Capitolo 3 – Calcolo della capacità portante

3.1. Considerazioni generali	»	67
3.2. Micropali	»	67
3.3. Considerazioni generali sul calcolo della capacità portante dei pali	»	82
3.3.1. Valutazione pratica della capacità portante dei pali nei terreni coesivi	»	87
3.3.1.1. Portata unitaria limite di base	»	88
3.3.1.2. Resistenza unitaria laterale limite	»	88
3.3.2. Valutazione pratica della capacità portante dei pali nei terreni non coesivi	»	95
3.3.2.1. Portata unitaria limite di base	»	95
3.3.2.2. Resistenza unitaria laterale limite	»	99
3.3.3. Valutazione pratica della capacità portante dei pali in roccia	»	103
3.3.4. Valutazione pratica della capacità portante dei pali sulla base dei risultati delle prove SPT	»	105
3.3.4.1. Portata unitaria limite di base	»	105
3.3.4.2. Resistenza unitaria laterale limite	»	107
3.3.5. Valutazione pratica della capacità portante dei pali sulla base dei risultati delle prove CPT	»	107
3.3.5.1. Metodo di Bustamante e Gianselli (1982)	»	108
3.3.5.2. Metodo di De Ruyter e Beringen (1979)	»	109
3.3.5.3. Metodo di Almeida et al. (1996)	»	110
3.3.6. Il metodo ICP per i pali infissi	»	112
3.3.7. Portata di base in presenza di un terreno stratificato	»	122
3.3.8. Formule dinamiche	»	122
3.3.9. Portata ammissibile	»	125
3.3.10. Pali in gruppo	»	125
3.4. Riferimenti bibliografici	»	127

Capitolo 4 – Progettazione strutturale dei micropali

4.1. Generalità	»	131
4.2. Stabilità dell'equilibrio elastico	»	135
4.3. Comportamento nei confronti degli sforzi di flessione e taglio	»	138
4.4. Ancoraggio alle strutture superiori	»	140
4.5. Precompressione dei micropali	»	142
4.6. Riferimenti bibliografici	»	143

Capitolo 5 – Valutazione dei cedimenti

5.1. Valutazione del cedimento di un micropalo/palo isolato	»	145
5.2. Cedimento di micropali/pali in gruppo	»	159
5.3. Riferimenti bibliografici	»	164

Capitolo 6 – Micropali soggetti a carichi orizzontali

6.1. Introduzione	»	167
6.2. Derivazione delle equazioni risolutive e metodi di soluzione	»	169
6.3. Valutazione della resistenza laterale limite di un palo	»	188
6.4. Valutazione dei parametri geotecnici necessari per l'analisi	»	191
6.4.1. Determinazione del modulo di reazione orizzontale del terreno	»	191
6.4.2. Determinazione delle curve $p - y$	»	193
6.4.2.1. Curve $p - y$ per sabbie al di sotto e al di sopra della falda	»	193
6.4.2.2. Curve $p - y$ per terreni argillosi	»	196
6.5. Riferimenti bibliografici	»	202

Capitolo 7 – Analisi di una palificata sottoposta a carichi inclinati ed eccentrici

7.1. Ripartizione del carico fra i pali di una palificata	»	203
7.2. Analisi di interazione tra plinto di fondazione, pali e terreno	»	218
7.3. Riferimenti bibliografici	»	225

Capitolo 8 – Stabilizzazione di pendii con reticoli di micropali

8.1. Introduzione	»	227
8.2. Considerazioni generali sulla schematizzazione di calcolo	»	227
8.3. Curve $p - y$ nel caso della presenza di un pendio	»	231
8.3.1. Equazioni per la determinazione della resistenza ultima nel caso di argille	»	231
8.3.2. Equazioni per la determinazione della resistenza ultima nel caso di sabbie	»	232
8.4. Il metodo di Ito e Matsui per valutare l'entità della forza laterale agente su micropali/pali impiegati per la stabilizzazione di un pendio	»	233
8.5. Soluzione di Brinch Hansen per determinare la resistenza ultima di un palo sottoposto ad una forza trasversale	»	245
8.6. Metodo proposto da Cai e Ugai (2003)	»	246
8.7. Soluzione fornita da Chen e Poulos (1997)	»	250
8.8. Soluzione riportata dal NAVFAC	»	253
8.9. Riferimenti bibliografici	»	260

Capitolo 9 – Attrito negativo e sollecitazioni sui pali in presenza di terreni rigonfianti	
9.1. Introduzione.....	» 261
9.2. Metodi semplificati proposti in letteratura per valutare l'attrito negativo	» 269
9.3. Effetti causati dal rigonfiamento dei terreni sui pali di fondazione	» 272
9.4. Esempi di programmi di calcolo per analizzare l'interazione di micropali o pali sottoposti ad attrito negativo o a terreni rigonfianti	» 275
9.5. Riferimenti bibliografici	» 293
Capitolo 10 – Opere di sostegno flessibili con micropali	
10.1. Introduzione.....	» 295
10.2. Valutazione della spinta attiva e della resistenza passiva	» 295
10.2.1. Introduzione	» 295
10.2.2. Spinta delle terre in condizioni non drenate.....	» 299
10.2.3. Spinta delle terre in condizioni drenate	» 301
10.2.4. Relazione fra i movimenti della paratia e la spinta delle terre.....	» 307
10.2.5. Spinta delle terre in presenza di sisma	» 310
10.2.6. Angolo di attrito fra terreno ed opera di sostegno	» 314
10.2.7. Spinta delle terre in presenza di compattazione del riempimento	» 315
10.2.8. Scelta del coefficiente di spinta	» 319
10.2.9. Pressione equivalente di un fluido	» 319
10.3. Spinta prodotta dai sovraccarichi	» 320
10.4. Determinazione della spinta dell'acqua sull'opera di sostegno	» 322
10.5. Dimensionamento dell'opera di sostegno	» 324
10.6. Metodi derivati dal modello di Winkler	» 343
10.7. Presenza di berme all'interno dello scavo	» 357
10.8. Lunghezza dei tiranti per le paratie di micropali	» 358
10.9. Stabilità del fondo scavo	» 361
10.10. Riferimenti bibliografici	» 363
Capitolo 11 – Prove di carico	
11.1. Generalità	» 367
11.2. Dispositivi di prova.....	» 368
11.3. Metodi di prova.....	» 370
11.4. Diagrammi carichi-cedimenti	» 371
11.5. Interpretazione dei diagrammi carichi-cedimenti	» 372
11.5.1. Determinazione del carico limite in base all'entità del cedimento	» 373
11.5.2. Criteri di definizione del carico limite come carico asintotico	» 374
11.6. Prove di carico su pali strumentati	» 384
11.7. Analisi di una prova di carico usando i risultati forniti da un "tell-tale"	» 384
11.8. Prove di carico orizzontale	» 387
11.9. Esempi di prove di carico su micropali	» 389
11.10. Riferimenti bibliografici	» 402
Capitolo 12 – Impiego dei micropali per la fondazione di opere in terra	
12.1. Introduzione.....	» 405
12.2. Criteri progettuali	» 406
12.2.1. Principali caratteristiche di comportamento di un rilevato	» 406
12.2.2. Analisi di stabilità dei rilevati con i metodi dell'equilibrio limite globale	» 409
12.2.3. Analisi deformazionale.....	» 410
12.2.4. Calcolo dei cedimenti	» 411
12.2.4.1. Terreni granulari	» 412
12.2.4.2. Terreni argillosi	» 412
12.2.5. Andamento nel tempo dei cedimenti in presenza di dreni verticali	» 417
12.3. Problemi di interazione rilevato-fondazione struttura	» 419
12.3.1. Spostamenti laterali indotti da un rilevato	» 419
12.3.2. Analisi di fondazioni su pali per carichi e cedimenti esterni.....	» 422
12.3.3. Programma di calcolo SLAP per la valutazione delle sollecitazioni causate sui pali di fondazione della spalla di un viadotto per effetto della presenza del rilevato.....	» 425
12.4. L'impiego dei geosintetici nei rilevati.....	» 430
12.4.1. Proprietà dei geotessili e delle geogriglie.....	» 430
12.4.2. Capacità portante	» 431
12.4.3. Stabilità globale dell'insieme rilevato-fondazione.....	» 432
12.4.4. Rottura laterale del rilevato	» 433
12.4.5. Ripartizione dei carichi del rilevato nel caso di geogriglie poste in sommità a colonne di terreno trattato o a pali	» 434
12.5. Preconsolidazione dei terreni coesivi mediante sovraccarico e dreni	» 435
12.5.1. La tecnica del sovraccarico	» 435
12.5.2. Carico variabile nel tempo	» 449

12.5.3. Modello reologico di Zeevaert	»	453
12.6. Dimensionamento dei micropali e pali di piccolo diametro per la fondazione di rilevati	»	459
12.7. Riferimenti bibliografici	»	461

Capitolo 13 – Esempi applicativi

13.1. Fondazione su micropali	»	463
13.1.1. Indagini in sito	»	463
13.1.2. Prove di laboratorio	»	463
13.1.3. Risultati delle indagini e caratteristiche geotecniche del terreno di fondazione	»	463
13.1.4. Caratterizzazione geotecnica dei materiali	»	464
13.1.5. Carichi agenti	»	465
13.1.6. Dimensionamento e verifica delle fondazioni	»	465
13.1.6.1. Fondazione diretta	»	465
13.1.6.2. Fondazione su pali	»	466
13.1.6.3. Fondazioni su micropali	»	467
13.1.7. Conclusioni	»	468
13.2. Paratia di micropali o “berlinese”	»	469
13.2.1. Condizioni geotecniche del sito	»	469
13.2.2. Parametri per l’analisi delle paratie	»	469
13.2.3. Risultati delle elaborazioni	»	470
13.2.3.1. Programma di calcolo utilizzato	»	470
13.2.3.2. Risultati	»	472
13.2.3.3. Verifica tiranti di ancoraggio	»	478
13.2.3.4. Analisi di stabilità dell’insieme paratia-pendio	»	478
13.2.3.5. Verifiche strutturali e particolari costruttivi	»	479

Capitolo 14 – Eurocodice 7 e nuove norme tecniche per le costruzioni

14.1. Eurocodice 7	»	487
14.1.1. Brevi note storiche	»	487
14.1.2. Principi di base dell’Eurocodice 7	»	488
14.1.3. Definizioni utili per la comprensione dell’EN 1997-Parte 1	»	495
14.1.4. Valori caratteristici dei parametri geotecnici nel contesto dell’Eurocodice 7	»	495
14.1.5. Stati limite ultimi	»	512
14.1.5.1. Perdita di equilibrio globale (EQU)	»	513
14.1.5.2. Superamento della resistenza limite o eccesso di deformazione nel terreno (GEO) o negli elementi strutturali (STR)	»	514
14.1.5.3. Effetti delle azioni di progetto	»	514
14.1.5.4. Resistenze di progetto	»	515
14.1.5.5. Approcci progettuali	»	516
14.1.5.5.1. Approccio progettuale 1	»	517
14.1.5.5.1.1. Combinazione 1	»	517
14.1.5.5.1.2. Combinazione 2	»	517
14.1.5.5.2. Approccio progettuale 2	»	518
14.1.5.5.3. Approccio progettuale 3	»	519
14.2. Le nuove norme tecniche per le costruzioni	»	520
14.2.1. Premessa	»	520
14.2.2. Pali – micropali di fondazione	»	521
14.2.2.1. Verifiche agli stati limite ultimi	»	522
14.2.2.1.1. Resistenze di pali soggetti a carichi assiali	»	523
14.2.2.1.2. Resistenze di pali soggetti a carichi trasversali	»	525
14.2.2.2. Verifiche agli stati limite di esercizio (SLE)	»	525
14.2.2.3. Verifiche agli stati limite ultimi (SLU) delle fondazioni miste	»	525
14.2.2.4. Verifiche agli stati limite di esercizio (SLE) delle fondazioni miste	»	526
14.2.2.5. Aspetti costruttivi	»	526
14.2.2.6. Controlli d’integrità dei pali	»	526
14.2.2.7. Prove di carico	»	526
14.2.2.7.1. Prove di progetto su pali pilota	»	526
14.2.2.7.2. Prove di verifica in corso d’opera	»	527
14.2.2.8. Esempi di applicazione delle norme tecniche per le costruzioni	»	527
14.2.2.8.1. Esempio n. 1: pali in calcestruzzo infissi in argille e sabbie	»	527
14.2.2.8.2. Esempio n. 2: verifica allo stato limite ultimo di tipo geotecnico (GEO) sulla base di prove di carico statico	»	531
14.2.2.8.3. Esempio n. 3: progettazione di pali a elica continua sulla base di prove penetrometriche statiche	»	534
14.2.2.8.4. Esempio n. 4: progetto di un palo trivellato su formulazioni teoriche ed empiriche	»	537
14.2.3. Pali – micropali per paratie	»	541
14.2.3.1. Paratia a sbalzo	»	541
14.2.3.2. Paratia con un ordine di ancoraggi	»	546
14.2.3.3. Esempio di analisi sismica semplificata di un’opera di sostegno flessibile	»	551
14.3. Riferimenti bibliografici	»	557