

Premessa

Ceroni, Eugenio <1936>

# MICROPALI PALI DI FONDAZIONE

1.1 micropali

1.1. Panoramica del campo di applicazione	19
1.1.1. Tipi di micropali	19
1.1.2. Costruzione dei pali radice	20
1.1.3. Costruzione del micropalo Tubfix (IRS)	22
1.1.4. Problemi connessi alla costruzione dei micropali	22
1.1.4.1. Problemi di perforazione	22
1.1.4.2. Problemi connessi al getto e alla formazione della guaina	23
1.1.4.3. Problemi connessi con il getto in pressione e l'irrigazione	23
1.1.4.4. Problemi connessi alla verticalità	24
1.1.4.5. Problemi connessi alla costipazione	25
1.1.4.6. Controlli di qualità	25
1.1.4.7. Organizzazione del cantiere, rendimenti	27
1.1.4.7.1. Rendimenti	27
1.1.4.7.2. Costi	28
1.2. Verifica dell'instabilità del palo immerso nel terreno a verifica a carico di punta	28
1.3. Calcolo a compressione	34
1.3.1. Premessa	34
1.3.2. Stato tensionale del calcestruzzo e del tubo	36
1.4. Carico limite di un micropalo interferente col terreno	38
1.4.1. Metodo storico	38
1.4.2. Metodo di Bustamante e Doix	39
1.4.2.1. Terreni coesivi	39
1.4.2.2. Terreni non coesivi	39
1.4.3. Ulteriori problemi di calcolo	39
1.4.4. Considerazioni generali finali	39



# Indice

1.7.1.2. Resistenza caratteristica da prove su pali pilota	»	50
1.7.2. Calcolo della resistenza mediante metodi di calcolo analitici	»	59
1.7.3. Calcolo della resistenza mediante prove dimminuite ad alto livello	»	59
1.7.3.1. Resistenza caratteristica da prove dimminuite	»	60
1.7.4. Valori di progetto della resistenza di un palo soggetto a sforzo assiale	»	79
1.7.5. Valori di progetto della resistenza di un palo soggetto ad azioni trasversali	»	79
1.7.6. Combinazione del coefficienti caratteristici	»	82
1.7.6.1. Verifiche da effettuare	»	89
1.7.6.2. Prescrizioni normative	»	90
1.7.6.3. Verifiche in condizioni sismiche	»	92
<b>Premessa</b>		
<b>1. I micropali</b>		
1.1. Panoramica del campo di applicazione dei micropali e loro descrizione	»	15
1.1.1. Tipi di micropali	»	19
1.1.2. Costruzione dei pali radice	»	19
1.1.3. Costruzione del micropalo Tubfix (IRS)	»	20
1.1.4. Problemi connessi alla costruzione dei micropali	»	22
1.1.4.1. Problemi di perforazione	»	22
1.1.4.2. Problemi connessi al getto e alla formazione della guaina	»	23
1.1.4.3. Problemi connessi con il getto in pressione e l'iniezione	»	23
1.1.4.4. Problemi connessi alla verticalità	»	24
1.1.4.5. Problemi connessi alla corrosione	»	25
1.1.4.6. Controlli di qualità	»	25
1.1.4.7. Organizzazione del cantiere, rendimenti e costi	»	27
1.1.4.7.1. Rendimenti	»	27
1.1.4.7.2. Costi	»	28
1.2. Verifica dell'instabilità del palo immerso nel terreno o verifica a carico di punta	»	28
1.3. Calcolo a compressione	»	34
1.3.1. Premessa	»	34
1.3.2. Stato tensionale del calcestruzzo e del tubo	»	36
1.4. Carico limite di un micropalo interferente col terreno	»	38
1.4.1. Metodo storico	»	38
1.4.2. Metodo di Bustamante e Doix	»	39
1.4.2.1. Terreni coesivi	»	39
1.4.2.2. Terreni non coesivi	»	40
1.4.3. Ulteriori metodi di calcolo	»	41
1.5. Analisi dell'ancoraggio alle strutture superiori	»	41
1.6. Considerazioni generali finali	»	48
1.7. Fondazioni su pali secondo le NTC 2008	»	49
1.7.1. Calcolo della resistenza mediante prove su pali pilota	»	50
1.7.1.1. Prove di carico su pali pilota	»	50

1.7.1.2.	Resistenza caratteristica da prove su pali pilota.....	»	51
1.7.2.	Calcolo della resistenza mediante metodi di calcolo analitici.....	»	52
1.7.2.1.	Resistenza caratteristica da calcoli analitici.....	»	52
1.7.3.	Calcolo della resistenza mediante prove dinamiche ad alto livello di deformazione.....	»	53
1.7.3.1.	Resistenza caratteristica da prove dinamiche.....	»	53
1.7.4.	Valori di progetto della resistenza di un palo soggetto a sforzo assiale.....	»	54
1.7.5.	Valori di progetto della resistenza di un palo soggetto ad azioni trasversali.....	»	55
1.7.6.	Combinazione dei coefficienti parziali.....	»	55
1.7.6.1.	Verifiche da effettuare.....	»	55
1.7.6.2.	Prescrizioni normative.....	»	56
1.7.6.3.	Verifica in condizioni sismiche.....	»	57
1.7.7.	Dettagli costruttivi.....	»	57
<b>2. Pali di fondazione di grande diametro</b>			
2.1.	Premessa.....	»	77
2.2.	Pali infissi prefabbricati in c.a. e c.a.p.: aspetti tecnologici.....	»	79
2.2.1.	Considerazioni generali.....	»	79
2.2.2.	Pali in cemento armato vibrato.....	»	80
2.2.2.1.	Tecnologia del calcestruzzo.....	»	80
2.2.2.2.	Forme e vibrazione.....	»	81
2.2.2.3.	Dimensioni e armature.....	»	81
2.2.3.	Pali in cemento armato centrifugato (pilotti).....	»	83
2.2.3.1.	Centrifugazione.....	»	83
2.2.3.2.	Forme e dimensioni usuali.....	»	83
2.2.3.3.	Armatura.....	»	84
2.2.3.4.	Puntazze.....	»	84
2.2.3.5.	Tecnologia della centrifugazione.....	»	85
2.2.3.6.	Stagionatura.....	»	86
2.2.4.	Pali in cemento armato precompresso.....	»	86
2.2.4.1.	Precompressione a fili aderenti e a cavi scorrevoli.....	»	86
2.2.4.2.	Costruzione di pali precompressi vibrati.....	»	87
2.2.4.3.	Pali precompressi centrifugati.....	»	87
2.2.5.	Pali giuntati in opera.....	»	87
2.2.6.	Infissione.....	»	88
2.2.6.1.	Tipi di battipalo.....	»	88
2.2.6.2.	Iniezioni d'acqua.....	»	89
2.2.6.3.	Cuffie.....	»	90
2.2.6.4.	Mazze e infissione.....	»	90
2.2.6.5.	Difficoltà di infissione.....	»	91
2.2.6.6.	Difetti dell'infissione.....	»	92
2.2.7.	Sollecitazione nei pali.....	»	93

2.2.8.	Rotture e difetti di infissione .....	»	93
2.3.	Pali trivellati.....	»	95
2.3.1.	Dimensioni correnti, diametro effettivo, diametro nominale, portate tipiche.....	»	95
2.3.2.	Scelta del tipo di tecnologia di perforazione in funzione della natura del terreno.....	»	96
2.3.3.	Tecnologie di perforazione.....	»	97
2.3.3.1.	Perforazione tubata.....	»	97
2.3.3.1.1.	Infissione del tubo forma mediante battitura .....	»	97
2.3.3.1.2.	Infissione del tubo forma con morsa oscillante e scavo del terreno con benna a valve bifune o monofune .....	»	98
2.3.3.1.3.	Infissione del tubo forma con vibroinfissore e scavo del terreno sia con benna a valve o con trivella a elica o secchione scavante.....	»	99
2.3.3.2.	Perforazione non rivestita ma protetta.....	»	101
2.3.3.2.1.	Principio del sostentamento delle pareti di scavo con l'impiego di fanghi bentonitici.....	»	101
2.3.3.2.2.	Composizione e caratteristiche dei fanghi .....	»	102
2.3.3.2.3.	Tecnologia per la formazione e controlli dei fanghi.....	»	103
2.3.3.2.4.	Scavo a circolazione rovescia .....	»	104
2.3.3.2.5.	Scavo in ambiente di fanghi bentonitici.....	»	104
2.3.3.3.	Perforazione non rivestita.....	»	106
2.3.3.3.1.	Impiego del sistema a rotazione con trivella a elica.....	»	106
2.3.3.3.2.	Impiego di benne mordenti a fune.....	»	106
2.3.3.4.	Perforazioni miste.....	»	106
2.3.3.5.	Modalità di getto e importanza dell'operazione.....	»	107
2.3.3.6.	Cenni sulle particolarità esecutive dei pali di grande diametro da galleggianti o piattaforme a fiume e a mare .....	»	109
2.3.3.7.	Alcune note sul lamierino.....	»	110
2.3.3.8.	Inconvenienti e controindicazioni .....	»	111
2.4.	Pali trivellati a elica continua (CFA) .....	»	111
2.4.1.	Fasi di esecuzione.....	»	112
2.4.2.	Prescrizioni esecutive.....	»	113
2.4.3.	Vantaggi dei pali CFA .....	»	113
2.5.	Pali infissi gettati in opera.....	»	113
2.5.1.	Dimensioni normali nominali ed effettive.....	»	113
2.5.2.	Portate tipiche.....	»	114
2.5.3.	Infissione del tubo .....	»	114
2.5.4.	Formazione della base.....	»	115
2.5.5.	Getto del fusto .....	»	115
2.5.6.	Calcestruzzo .....	»	117
2.5.7.	Gabbie di armatura.....	»	117

2.5.8.	Lunghezza dei pali .....	» 119
2.5.9.	Inconvenienti e controindicazioni .....	» 120
2.5.10.	Controlli durante l'esecuzione del palo.....	» 122
2.5.10.1.	Controllo del terreno.....	» 122
2.5.10.2.	Controllo della portata del palo .....	» 122
2.5.10.3.	Controllo della base .....	» 123
2.5.10.4.	Controllo del fusto.....	» 123
2.5.10.5.	Controllo del diametro.....	» 124
2.5.10.6.	Controllo dell'armatura .....	» 124
2.6.	Approccio teorico e approccio empirico ai problemi di tecnica delle fondazioni .....	» 125
2.6.1.	Effetti delle principali tecnologie esecutive su alcuni terreni tipici nei riguardi della capacità portante .....	» 126
2.6.1.1.	Generalità .....	» 126
2.6.1.2.	Modifiche dello stato di tensione naturale.....	» 127
2.6.1.3.	Modifiche degli altri parametri del terreno.....	» 130
2.6.2.	Pali metallici infissi .....	» 132
2.6.3.	Parametri che influenzano la scelta e criteri per la scelta.....	» 133
2.7.	Calcolo limite di pali di medio e grande diametro .....	» 134
2.7.1.	Formule statiche .....	» 134
2.7.1.1.	Portanza laterale .....	» 136
2.7.1.2.	Portanza di punta o di base .....	» 141
2.7.2.	Formule riassuntive .....	» 146
2.7.3.	Note complementari.....	» 149
2.7.3.1.	Determinazione delle portate dei pali singoli in terreni coesivi.....	» 150
2.7.3.1.1.	Palo singolo in terreno coesivo .....	» 150
2.7.3.1.2.	Valutazione della portata di base (risultati recenti).....	» 152
2.7.3.1.3.	Valutazione della portata per connessione laterale .....	» 155
2.7.3.1.4.	Approccio in termini di tensioni totali .....	» 156
2.7.3.1.5.	Approccio in termini di tensioni efficaci.....	» 159
2.7.3.1.6.	Altri metodi .....	» 160
2.7.3.2.	Palo singolo in terreno non coesivo.....	» 162
2.7.3.2.1.	Valutazione della portata di base .....	» 163
2.7.3.2.2.	Valutazione di $q_{ub}$ .....	» 163
2.7.3.2.3.	Valutazione di $q_{b,crit}$ .....	» 165
2.7.3.2.4.	Valutazione della portata per connessione laterale .....	» 166
2.7.3.3.	Pali infissi .....	» 167
2.7.3.4.	Pali trivellati .....	» 167
2.8.	Calcolo della distribuzione del carico trasmesso dalla platea ai pali di fondazione.....	» 168
2.8.1.	Osservazioni circa la (2.31).....	» 171

2.8.2.	Ripartizione della flessione fra i pali.....	» 173
2.8.2.1.	Rigidità alla rotazione della fondazione.....	» 173
2.8.2.2.	Rigidità alla rotazione dei pali.....	» 174
2.8.2.3.	Coefficiente di ripartizione.....	» 175
2.8.3.	Capacità portante dei pali in gruppo.....	» 176
2.8.3.1.	Considerazioni.....	» 177
2.8.4.	Sforzi orizzontali e pali inclinati.....	» 177
2.9.	Calcolo dei cedimenti di palificate.....	» 179
2.9.1.	Rotazione della platea.....	» 179
2.9.2.	Analisi del cedimento del palo.....	» 180
2.9.3.	Valutazione dei cedimenti. Influenza della non linearità di comportamento.....	» 181
2.9.4.	Conclusioni.....	» 182
2.10.	Procedura di calcolo del cedimento.....	» 183
2.10.1.	Deformazioni del terreno.....	» 183
2.10.2.	Deformazioni del palo.....	» 184
2.10.2.1.	Palo reagente solo sulla base.....	» 188
2.10.2.2.	Palo reagente per attrito laterale con resistenza di attrito $f_s$ costante lungo il fusto.....	» 188
2.10.2.3.	Palo reagente per attrito laterale con resistenza di attrito $f_s = k \cdot z$ variabile linearmente lungo il fusto.....	» 190
2.10.2.4.	Palo reagente per metà sulla base e per metà per attrito laterale con resistenza di attrito $f_s$ costante.....	» 191
2.10.3.	Considerazioni finali.....	» 192
2.11.	Schemi semplificati per calcolo dei pali soggetti a forze orizzontali e momenti flettenti in testa immersi in terreno elastico.....	» 192
2.11.1.	Premessa.....	» 192
2.11.2.	Soluzione teorica per coefficiente di sottofondo costante (considerando il palo di lunghezza indefinita).....	» 192
2.11.3.	Palo libero soggetto a forza orizzontale $H$ in testa.....	» 196
2.11.4.	Palo libero soggetto a momento flettente $M$ in testa.....	» 198
2.11.5.	Palo con testa incastrata soggetto a forza orizzontale $H$ in testa....	» 201
2.11.6.	Palo con testa incastrata a un'altezza $h$ dal piano di campagna e soggetto a forza orizzontale $H$ .....	» 202
2.11.7.	Palo a testa libera soggetto a forza orizzontale $H$ a un'altezza $h$ dal terreno.....	» 205
2.11.8.	Palo a testa libera soggetto a forza orizzontale $H$ e un momento $M$ a distanza $h$ dal piano di campagna.....	» 206
2.11.9.	Plinto soggetto a forza orizzontale $T$ , collegante $n$ pali inclinati, disposti simmetricamente, aventi diametro $d$ e lunghezza $l$ .....	» 207
2.11.10.	Plinto collegante $n$ pali verticali, soggetto a spinta orizzontale $T$ , immerso in terreno reagente.....	» 209
2.12.	Pali armati di sezione circolare sottoposti a flessione composta.....	» 211
2.12.1.	Considerazioni di carattere tecnico e teorico.....	» 211
2.12.2.	Ausilio delle tabelle e loro uso.....	» 213

2.13.	Teoria di Broms (1964) per azioni trasversali .....	»	221
2.13.1.	Pali impediti di ruotare in testa .....	»	223
2.13.1.1.	Condizioni non drenate, palo impedito di ruotare in testa .....	»	223
2.13.1.2.	Condizioni drenate, palo impedito di ruotare in testa.....	»	225
2.13.2.	Pali liberi di ruotare in testa .....	»	227
2.13.2.1.	Condizioni non drenate, palo libero di ruotare in testa ...	»	227
2.13.2.2.	Condizioni drenate, palo libero di ruotare in testa .....	»	228
2.14.	Dispositivi di prova.....	»	230
2.14.1.	Dispositivi per l'applicazione e la misura del carico .....	»	230
2.14.2.	Carico massimo di prova.....	»	230
2.14.3.	Incrementi di carico.....	»	231
2.14.4.	Notizie e bibliografie utili .....	»	231
2.14.5.	Sondaggi.....	»	232
2.15.	Uso dei pali per la riduzione dei cedimenti .....	»	232
2.15.1.	Sommario .....	»	232
2.15.1.1.	Introduzione.....	»	233
2.15.1.2.	Metodi per la previsione dei cedimenti delle fondazioni su pali.....	»	234
2.15.1.2.1.	Generalità .....	»	234
2.15.1.2.2.	Metodi empirici .....	»	235
2.15.1.2.3.	Metodi delle equivalenze .....	»	237
2.15.1.2.4.	Metodi razionali .....	»	238
2.16.	Formule riassuntive.....	»	242
2.16.1.	Portata limite di base .....	»	243
2.16.1.1.	Terreni non coesivi .....	»	243
2.16.1.1.1.	Pali infissi .....	»	243
2.16.1.1.1.1.	Dimensionamento in base a modelli teorici (metodo Vesic) .....	»	243
2.16.1.1.1.2.	Dimensionamento in base a prove penetrometriche (metodo prove SPT) .....	»	244
2.16.1.1.2.	Pali trivellati (metodo Jamiolkowski e Lancellotta).....	»	245
2.16.1.2.	Terreni coesivi .....	»	246
2.16.1.3.	Roccia .....	»	247
2.17.	Portata limite per attrito laterale .....	»	247
2.17.1.	Terreni non coesivi .....	»	247
2.17.1.1.	Pali infissi .....	»	248
2.17.1.1.1.	Dimensionamento in base a modelli teorici (metodo generale).....	»	248
2.17.1.1.2.	Dimensionamento in base a prove penetrometriche (metodo Meyerhof) .....	»	248
2.17.1.2.	Pali trivellati .....	»	249
2.17.1.2.1.	Dimensionamento in base a modelli teorici .....	»	249
2.17.1.2.2.	Dimensionamento in base a prove penetrometriche (metodo Meyerhof) .....	»	250

2.17.1.3. Terreni coesivi .....	» 250
2.17.1.3.1. Pali infissi .....	» 250
2.17.1.3.1.1. Metodo $\alpha$ (in termini di tensioni totali) .....	» 250
2.17.1.3.1.2. Metodo $\beta$ (in termini di tensioni efficaci).....	» 251
2.17.1.3.2. Pali trivellati .....	» 251
2.17.1.3.2.1. Metodo $\alpha$ (in termini di tensioni totali) .....	» 251
2.17.1.3.2.2. Metodo $\beta$ (in termini di tensioni efficaci).....	» 252
2.18. Roccia .....	» 252

### 3. Comportamento sismico dei pali

3.1. Premessa .....	» 269
3.2. Comportamento sismico .....	» 269
3.3. Interazione sismica palo-terreno .....	» 271
3.4. Interazione inerziale.....	» 272
3.4.1. Palo singolo .....	» 272
3.4.2. Gruppo di pali.....	» 274
3.4.3. Effetti non lineari.....	» 275
3.4.4. Pali inclinati.....	» 276
3.5. Interazione cinematica .....	» 277
3.6. Influenza dell'interazione sismica palo-terreno-struttura .....	» 278
3.7. Conclusioni .....	» 280

### 4. La pratica tecnico-legale

4.1. Introduzione.....	» 283
4.2. Tipologia della denuncia.....	» 283
4.3. Periodo dell'indagine.....	» 284
4.4. Prove sui pali .....	» 285
4.5. Prove su pali di fondazione mediante impiego di tecniche non distruttive .....	» 286
4.5.1. Generalità .....	» 286
4.5.2. Modalità di esecuzione.....	» 288
4.5.3. Risultati delle prove in cantiere.....	» 289
4.6. Conclusioni .....	» 290

<b>Bibliografia</b> .....	» 293
---------------------------	-------