

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*

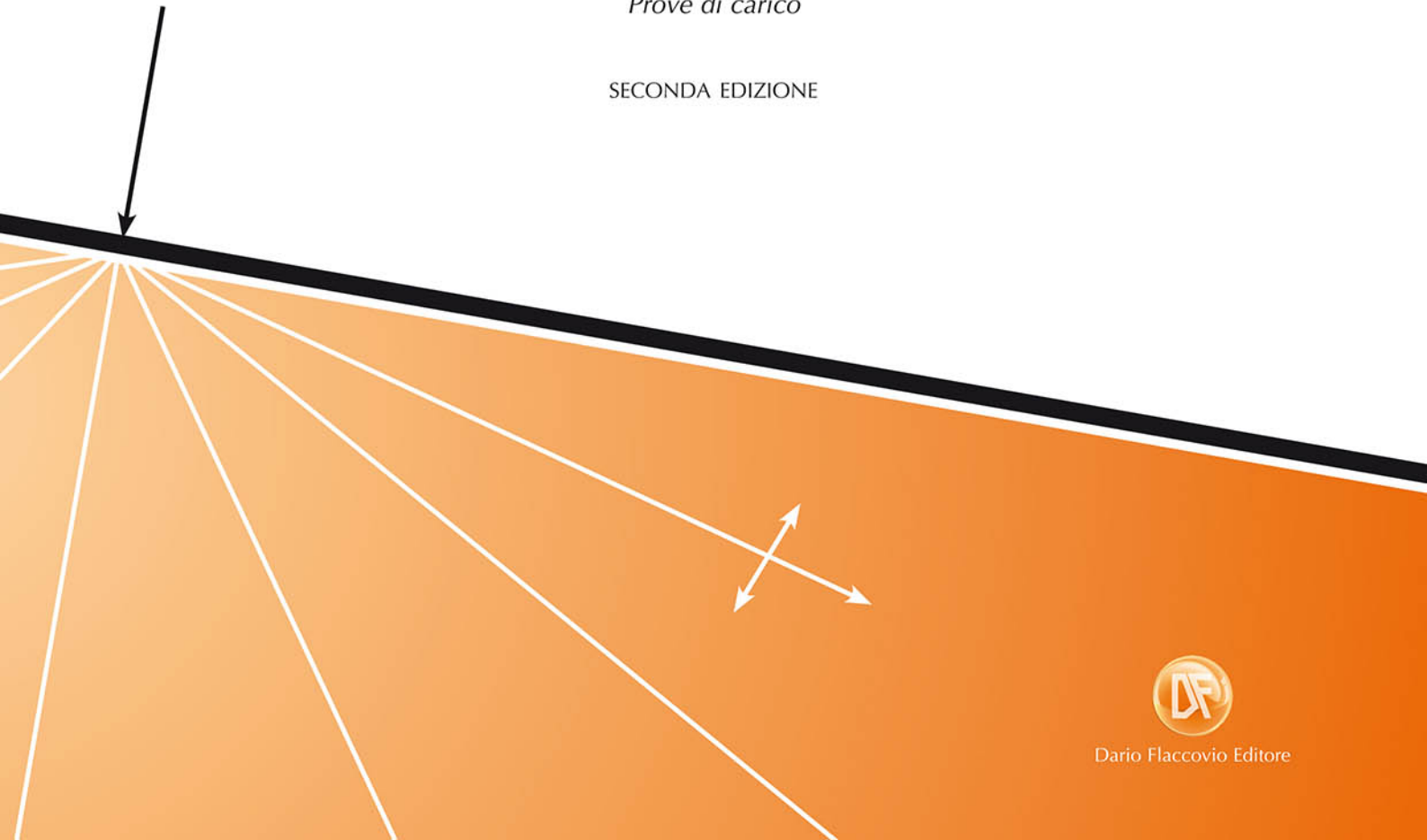
*Progettazione di opere di sostegno flessibili  
di micropali secondo le nuove NTC*

*Micropali per le fondazioni di opere in terra*

*Stabilizzazione di pendii con reticoli di micropali*

*Prove di carico*

SECONDA EDIZIONE



Dario Flaccovio Editore

MAURIZIO TANZINI

# MICROPALI

E PALI DI PICCOLO DIAMETRO

---

Aspetti progettuali e tecnologici



Dario Flaccovio Editore

*A mio padre Walter che m'insegnò  
la passione per lo studio della Geotecnica  
e l'importanza del rigore morale e professionale*

Maurizio Tanzini

MICROPALI E PALI DI PICCOLO DIAMETRO – ASPETTI PROGETTUALI E TECNOLOGICI

ISBN 978-88-579-0074-2

Seconda edizione marzo 2011

© 2004 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686 - fax 091525738

[www.darioflaccovio.it](http://www.darioflaccovio.it) e-mail [info@darioflaccovio.it](mailto:info@darioflaccovio.it)

Tanzini, Maurizio <1955>

Micropali e pali di piccolo diametro : aspetti progettuali e tecnologici / Maurizio Tanzini. -

2. ed. - Palermo : D. Flaccovio, 2011.

ISBN 978-88-579-0074-2.

1. Pali da fondazione.

624.154 CDD-22

SBN Pal0232647

*CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"*

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

#### SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

- filodiretto con gli autori
- le risposte degli autori a quesiti precedenti
- files di aggiornamento al testo e/o possibilità di inserire il proprio commento al libro.

## INDICE

**Capitolo 1 – Introduzione**

|                                                                               |      |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|------|----|
| 1.1. Caratteristiche e definizioni .....                                      | pag. | 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. Rotopercussione .....                                                     | » | 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 Gianeselli (1982) .....                                                    | » | 108 |
| 3.3.5.2. Metodo di De Ruiter 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 |



## CAPITOLO 1

### INTRODUZIONE

#### 1.1. CARATTERISTICHE E DEFINIZIONI

I pali possono essere classificati secondo diversi criteri di seguito elencati.

- a) Modalità di messa in opera: pali battuti, pali gettati in opera, pali prefabbricati, pali trivellati, ecc.
- b) Materiale che costituisce il palo: legno, acciaio, c.a., c.a.p., materiali misti, sabbia, ecc.
- c) Meccanismo di trasferimento del carico al terreno: pali che lavorano prevalentemente di punta (point bearing piles), pali che lavorano prevalentemente per attrito laterale (friction piles).
- d) Caratteristiche dei carichi cui i pali sono soggetti: pali compressi, pali tesi, pali caricati orizzontalmente.
- e) Influenza che le modalità d'installazione hanno sul terreno: piccoli spostamenti, grandi spostamenti, assenza di spostamenti.

Considerando le differenti metodologie esecutive (Fleming et al., 1985) si può operare la seguente distinzione.

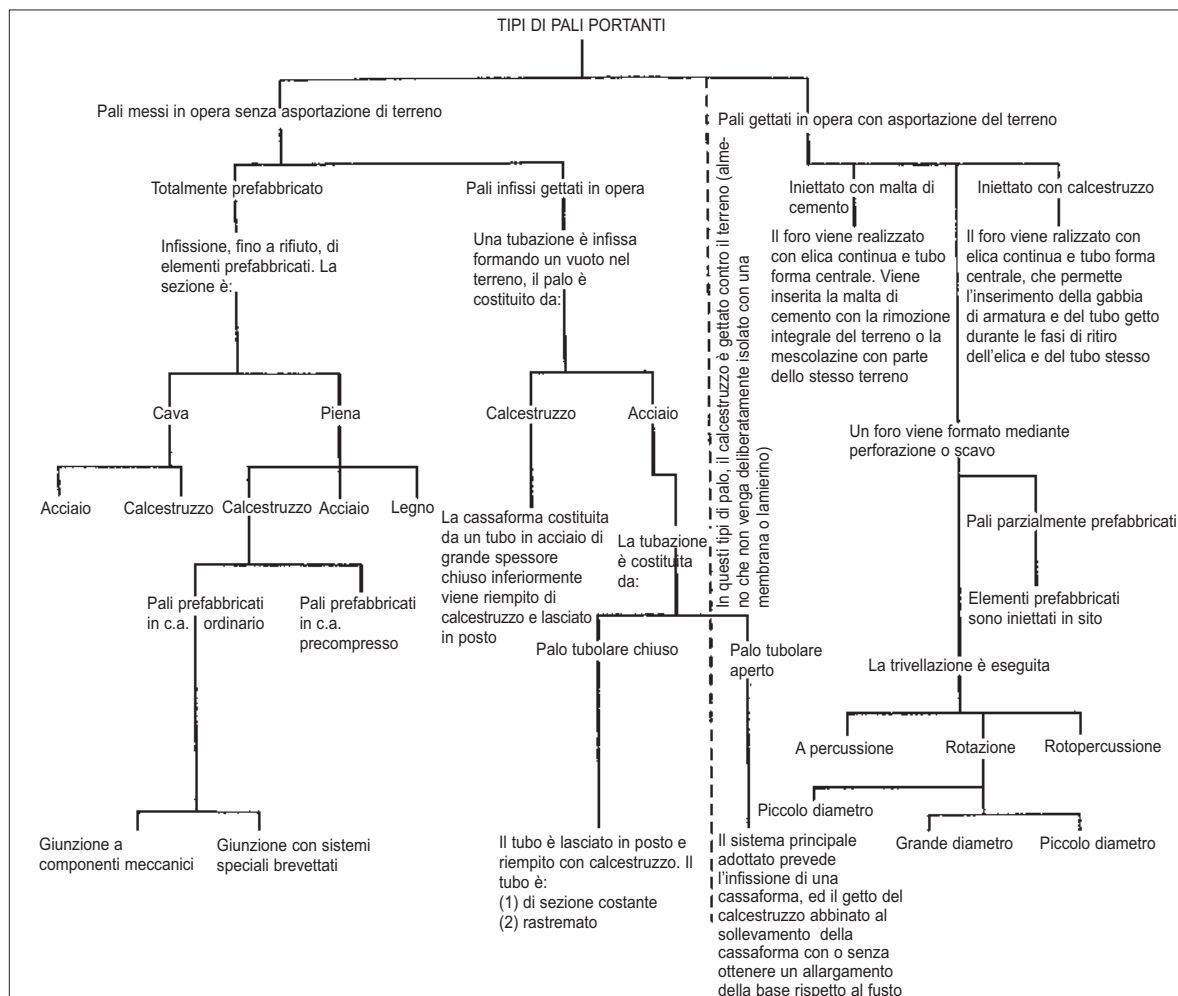
- Pali messi in opera senza asportazione del terreno, indicati anche come pali infissi o pali “a spostamento” (displacement piles), che possono essere totalmente o parzialmente prefabbricati o gettati in opera.
- Pali gettati in opera con asportazione del terreno, indicati anche come pali trivellati o pali “a sostituzione” (replacement piles).

Oltre a queste due categorie, si hanno anche i pali realizzati con elica continua e tubo forma centrale, che permette l'inserimento della gabbia d'armatura e del tubo getto durante le fasi di ritiro dell'elica e del tubo stesso. Il comportamento dei pali realizzati con tale tecnologia è intermedio fra quello dei pali “a spostamento” e dei pali “a sostituzione”. Il volume di terreno che è rimosso è, infatti, minore di quello del palo a causa, soprattutto, della presenza del tubo forma centrale, del meccanismo di penetrazione dell'elica e della sua forma.

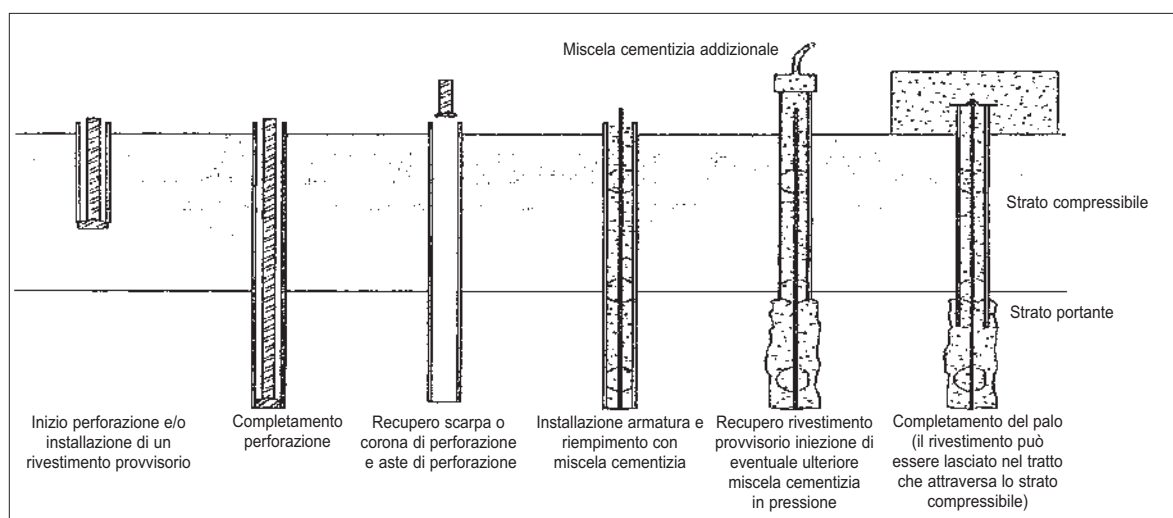
Conseguentemente, si ha una compressione del terreno circostante il palo e lo stato tensionale può essere intermedio rispetto a quello relativo all'esecuzione di un palo infisso o di un palo trivellato. La *figura 1.1* mostra la classificazione dei pali effettuata sulla base delle modalità costruttive. Da notare che per tale classificazione, proposta da Fleming et al. (1985), sono considerati pali di piccolo diametro quelli con diametro minore o uguale a 600 mm e, conseguentemente, pali di grande diametro quelli superiori a 600 mm.

I micropali sono pali trivellati di diametro inferiore a 300 mm, gettati con modalità diverse da quelle comunemente adottate per i pali di diametro maggiore. Un micropalo è realizzato mediante la perforazione, eseguita con una particolare attrezzatura a rotazione, introducendo progressivamente nel terreno un tubo forma munito all'estremità di una corona tagliente di tipo adeguato alla natura del terreno, la messa in opera di un'armatura metallica, costituita da profilati o tubi metallici, e l'esecuzione di un'iniezione con miscela cementizia, come illustrato in *figura 1.2*.

I micropali, possono sostenere carichi assiali o laterali ed il loro ridotto diametro ne favorisce l'applicazione come pali di sottofondazione, quando il disturbo causato al terreno o alle strutture durante l'esecuzione di pali normali non è ritenuto tollerabile oppure quando le condizioni ambientali del cantiere sono difficili.



**Figura 1.1.** Classificazione dei pali sulla base delle differenti metodologie costruttive. Da notare che sono considerati pali di piccolo diametro quelli con diametro  $\leq 600$  mm, pali di grande diametro quelli con diametro superiore a 600 mm (Fleming et al., 1985)



**Figura 1.2.** Fasi esecutive di un micropalo

I micropali sono realizzati mediante attrezzature di ingombro ridotto che provocano un modesto disturbo sia al terreno sia alle strutture. Essi possono essere eseguiti in luoghi anche difficilmente accessibili ed in ogni tipo di terreno risultando, inoltre, particolarmente idonei in tutti i casi nei quali

si debbano attraversare murature, strati cementati o blocchi e trovanti rocciosi, che renderebbero assai difficoltosa o addirittura impossibile la trivellazione con le modalità proprie dei diametri maggiori.

I micropali possono, inoltre, essere installati con qualsiasi angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale utilizzando le medesime attrezzature comunemente impiegate per la messa in opera dei tiranti o per l'esecuzione delle iniezioni.

La maggior parte dei carichi applicati a pali convenzionali trivellati è sostenuta dalla resistenza del calcestruzzo armato; per aumentare la resistenza del palo occorre

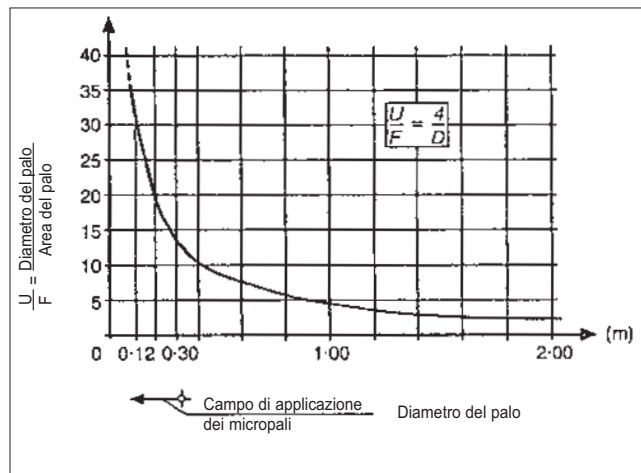


Figura 1.3. Rapporto fra diametro e area del palo

aumentare la sezione resistente del palo e, conseguentemente, i pali di piccolo diametro sono meno resistenti. Nel caso dei micropali, invece, grazie alle particolari modalità di perforazione, getto e iniezione che ne migliorano la capacità portante per attrito o adesione laterale in confronto ai comuni pali trivellati, è possibile ottenere resistenze specifiche mobilitabili superiori, e quindi portate ammissibili, in rapporto al diametro, più favorevoli di quelle dei comuni pali trivellati. Per sfruttare ulteriormente tale potenziale vantaggio, nel micropalo è installata, per almeno il 50% dell'intera lunghezza del foro di perforazione, un'armatura in acciaio di elevate caratteristiche meccaniche in grado di costituire l'elemento resistente, assegnando alla miscela cementizia il solo compito di trasferire per attrito o adesione il carico applicato dall'armatura al terreno.

A causa del piccolo diametro dei micropali (vedi *figura 1.3*), la capacità portante della base dei micropali è normalmente trascurata.

Oltre all'adozione di corretti criteri progettuali e di dimensionamento dei micropali assume fondamentale importanza la definizione, per ogni progetto, di dettagliate ed esaurienti specifiche tecniche che garantiscano un'esecuzione appropriata, soprattutto per quanto concerne le operazioni che maggiormente influiscono sulla capacità portante (modalità di perforazione, getto ed iniezione).

I micropali sono stati ideati in Italia agli inizi degli anni 50, inizialmente come tecnologia innovativa per i problemi di sottofondazione di edifici e monumenti che erano stati danneggiati dai bombardamenti durante la seconda guerra mondiale. Un efficace sistema di pali di sottofondazione era necessario per sostenere i carichi strutturali, minimizzando il disturbo arrecato al terreno e alle strutture esistenti ed eseguito utilizzando attrezzature di ingombro ridotto a causa del limitato spazio disponibile. Proprio un'impresa italiana, specializzata in opere di fondazione, chiamata Fondedile ed il suo direttore tecnico dott. Fernando Lizzi, circa 50 anni fa, misero a punto il "palo radice" per impieghi in sottofondazione. Il palo radice è un palo di piccolo diametro gettato in sito a bassa pressione, non più di 6 bar. Una tipica disposizione dei pali radice è mostrata in *figura 1.4*.

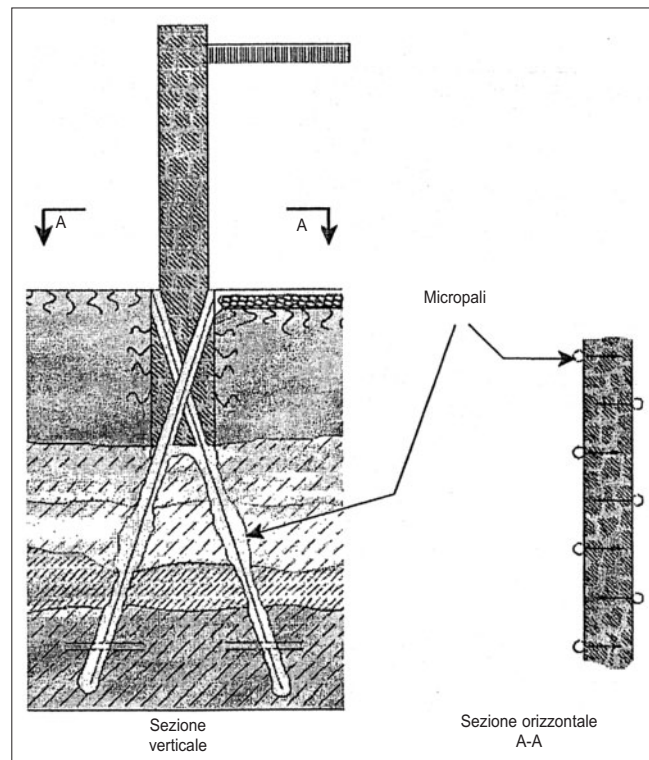
Sebbene nel dopoguerra in Europa non era semplice l'approvvigionamento dell'acciaio, il costo della mano d'opera era basso, disponibile in quantità e spesso con elevato grado di specializzazione. Tali condizioni hanno contribuito allo sviluppo dei micropali ad anima metallica gettati in sito, progettati ed installati da imprese specializzate.

Prove di carico eseguite sui pali radice indicano valori di portata ammissibile di 400 kN, sebbene la portata ammissibile di progetto valutata sulla base di metodologie convenzionalmente adottate per i pali trivellati portano a valori ammissibili notevolmente inferiori, dell'ordine di 100 kN.

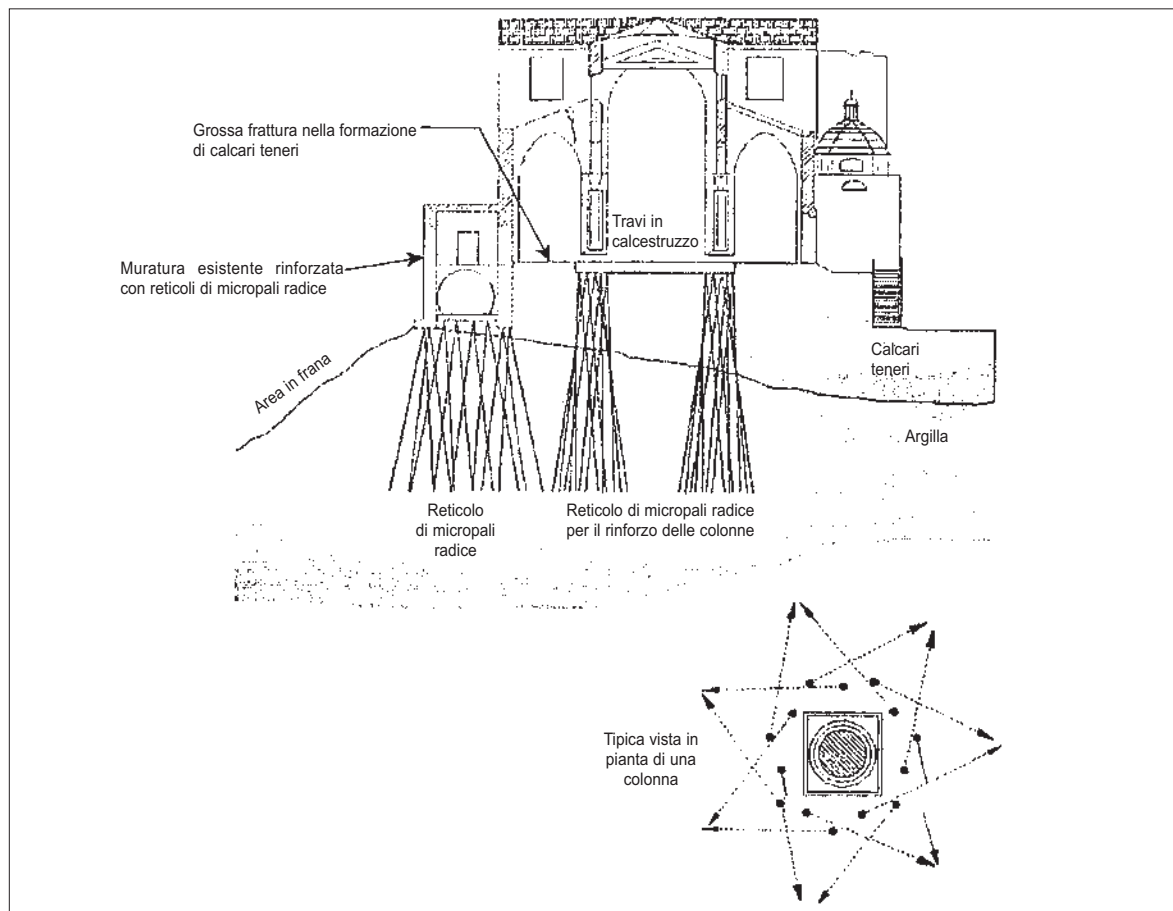
Numerose prove di carico sono state effettuate permettendo l'acquisizione e la pubblicazione di molti utili dati al riguardo. Durante tali prime prove di carico non si sono mai registrate rotture al contatto fra la miscela cementizia ed il terreno.

L'impiego dei pali radice è notevolmente cresciuto in Italia dagli anni 50. Successivamente Fondedile ha introdotto la tecnologia in Inghilterra nel 1962 per le sottofondazioni di numerose strutture di monumenti storici, nel 1965 in Germania, per applicazioni prevalentemente legate a lavori sotterra-

nei in ambiente urbano, ed, infine, nel 1973, nel Nord America. Per ragioni legate al brevetto Fondedile, il termine “micropali” ha sostituito quello di “pali radice”. Inizialmente, l’impiego principale dei micropali è stato per sottofondazioni in ambiente urbano. A partire dal 1957, l’ulteriore diffusione e richiesta ha portato all’introduzione dei “reticoli di pali radice”. Tali applicazioni comprendono un sistema di micropali verticali ed inclinati disposti in maniera tale da costituire un rinforzo del terreno, mediante la formazione di un reticolo; per l’efficacia di tale struttura composita terreno – micropali è essenziale il contatto continuo tra i pali e il terreno circostante. Esempi di reticoli di micropali sono mostrati in *figura 1.5*. Tipiche applicazioni dei reticoli di micropali si sono avute per la stabilizzazione di pendii, il rinforzo di banchine, la protezione di scavi e per particolari applicazioni di supporto e rinforzo dei terreni e delle strutture.



**Figura 1.4.** Classica disposizione dei pali radice per l’impiego nelle sottofondazioni



**Figura 1.5.** Tipici esempi di reticoli di micropali

## 1.2. CLASSIFICAZIONE DEI MICROPALI

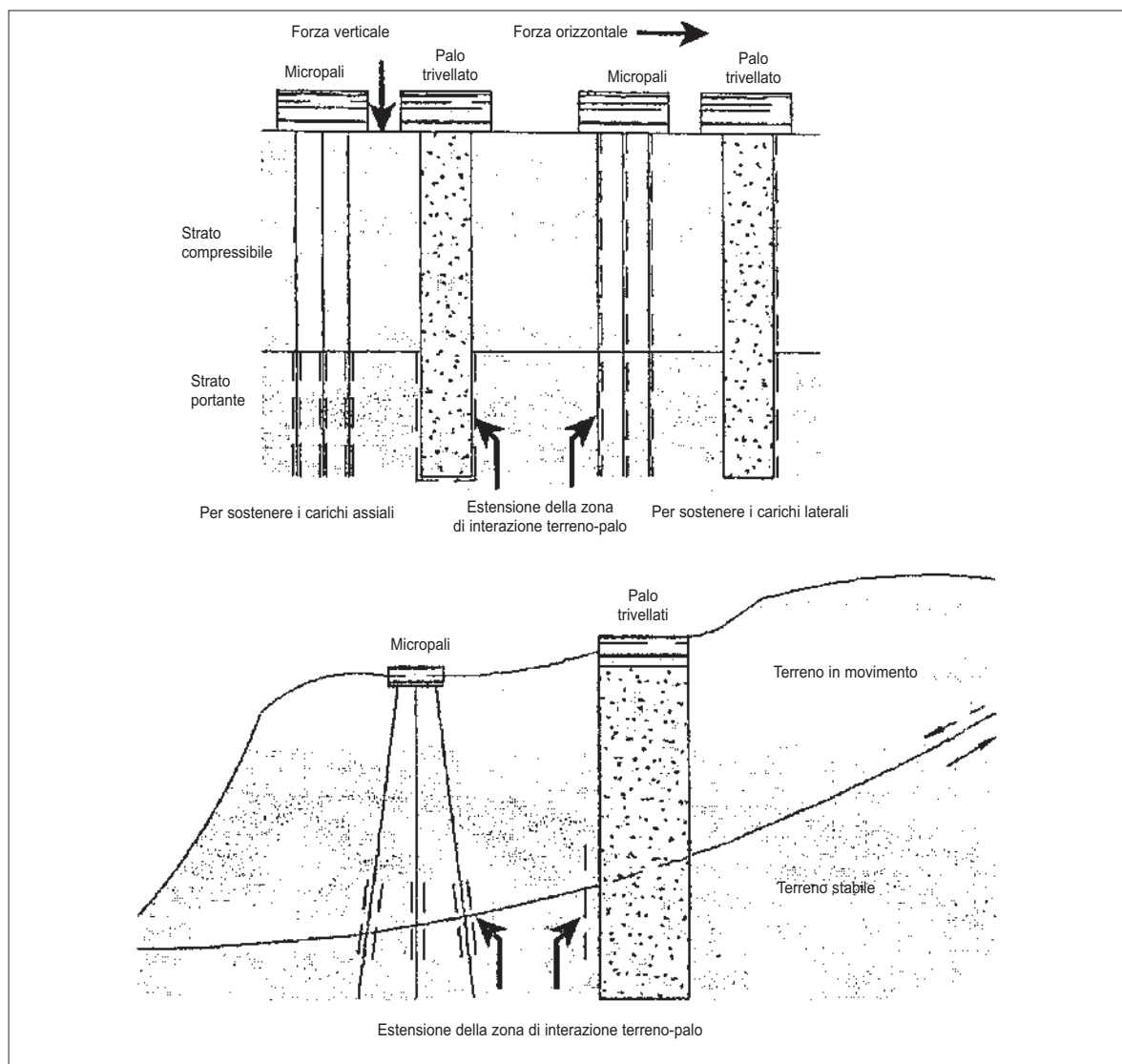
Sulla base dell'attuale stato dell'arte sulla progettazione e costruzione dei micropali, il sistema di classificazione dei micropali è fondato su due criteri: il primo di tipo progettuale legato alle modalità di utilizzo e comportamento in esercizio dei micropali, il secondo di tipo costruttivo fondamentalmente legato alle modalità di getto ed iniezione adottate.

Il metodo di getto ed iniezione determina l'entità della aderenza continua con il terreno e, conseguentemente, la capacità portante del micropalo per attrito o adesione laterale. Il sistema di classificazione di seguito presentato è basato sui risultati di una ricerca effettuata dalla Federal Highway Administration (FHWA) negli Stati Uniti e consiste nell'assegnare un numero che indica il comportamento del micropalo (aspetto progettuale) ed una lettera che consente di individuare le modalità di getto ed iniezione (aspetto costruttivo).

### 1. Classificazione basata sull'applicazione progettuale

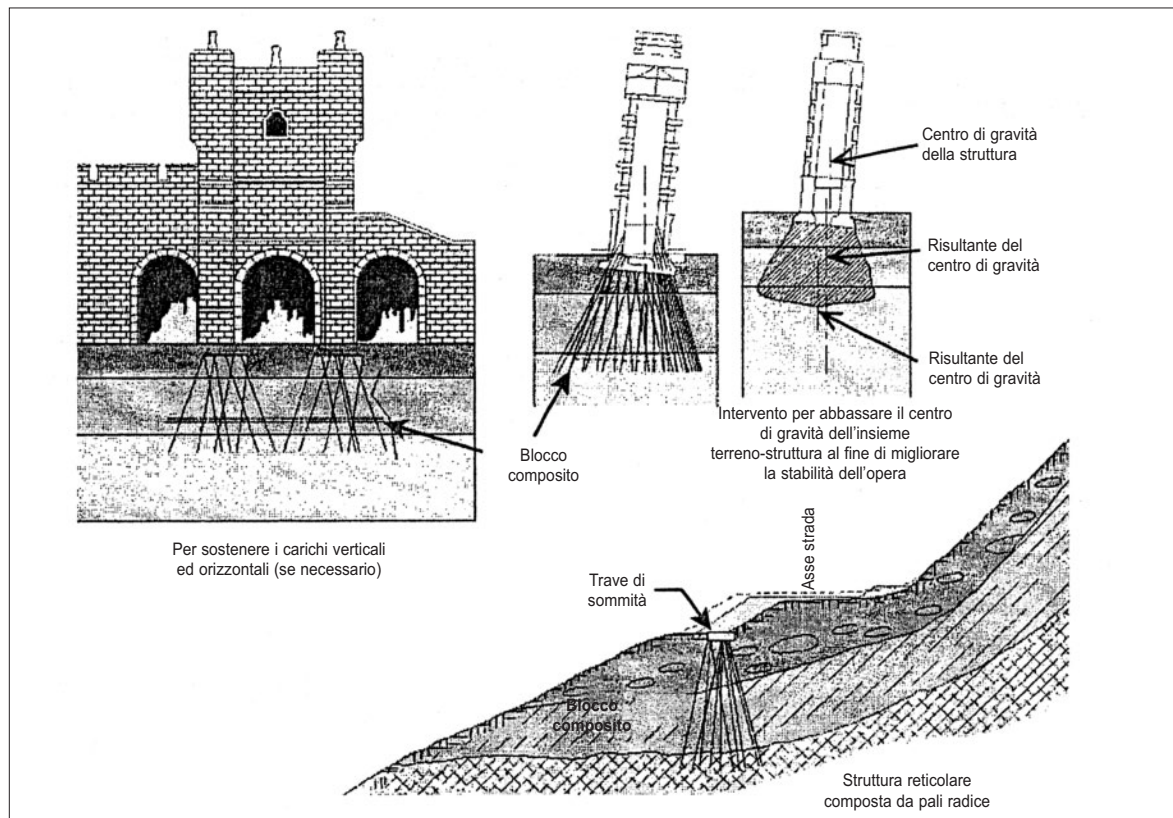
La progettazione di micropali singoli o in gruppo differisce notevolmente da quella relativa ad un reticolo di micropali comprendente un considerevole numero di micropali variamente inclinati e posti a modesti interassi. A questo riguardo si hanno, pertanto, due differenti casi.

*Caso 1:* nel quale i micropali sono caricati direttamente e dove l'armatura è in grado di resistere alla maggior parte del carico applicato (vedi figura 1.6).



**Figura 1.6.** Caso 1: micropali con funzione strutturale, caricati direttamente

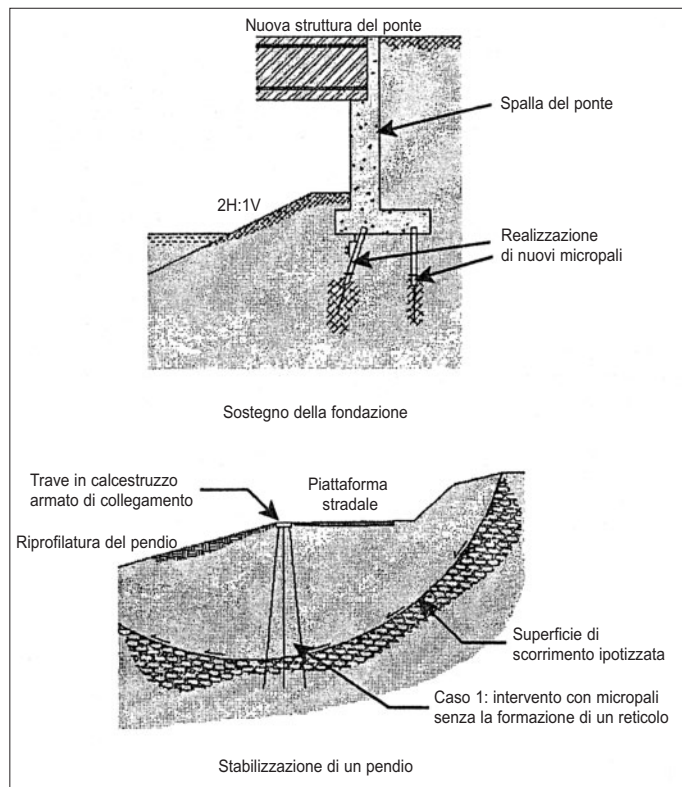




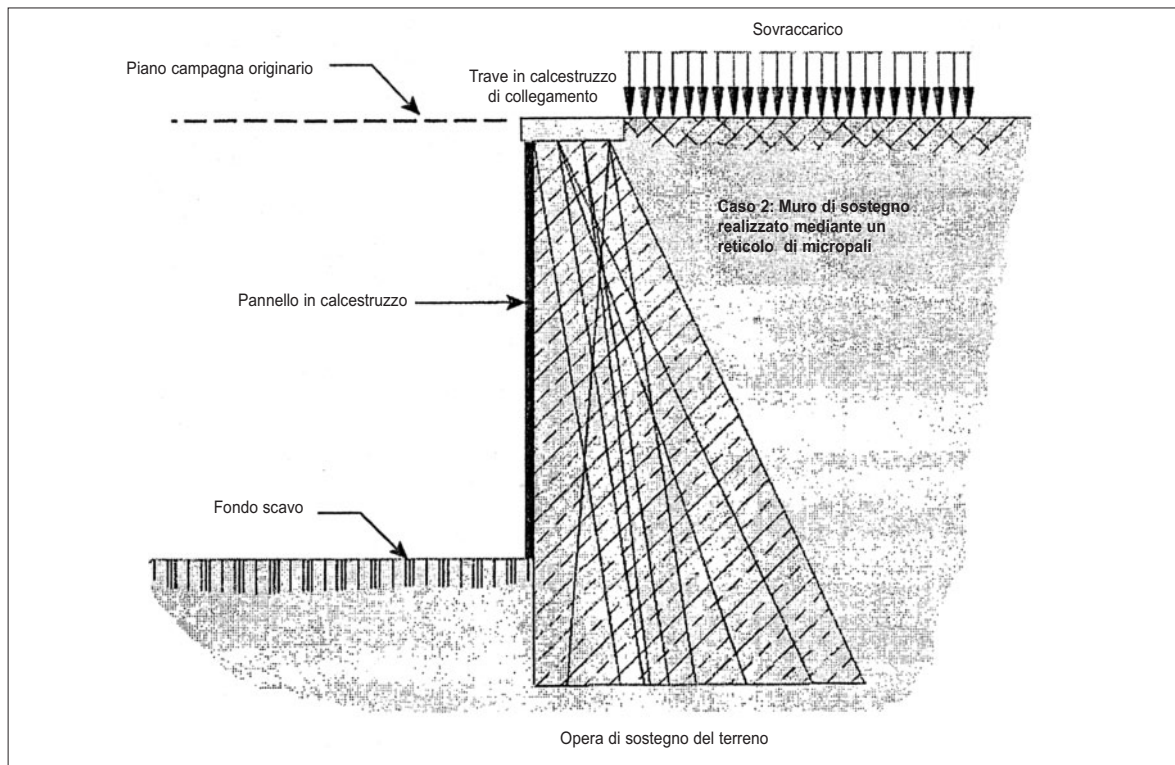
**Figura 1.7.** Caso 2: reticoli di micropali e terreno rinforzato in grado di sostenere i carichi applicati

*Caso 2:* nel quale i micropali costituiscono degli elementi di rinforzo del terreno per ottenere un terreno composito rinforzato in grado di resistere ai carichi esterni applicati (vedi *figura 1.7*).

Nel caso 1, i micropali possono essere utilizzati come alternativa ai pali convenzionali per trasferire i carichi strutturali in profondità a strati più competenti o stabili. Tali pali caricati direttamente, da forze assiali o laterali, costituiscono delle applicazioni che rientrano nel caso 1. In questo caso il carico è sostenuto strutturalmente dall'armatura in acciaio e dal punto di vista geotecnico dalla zona di contatto fra la miscela cementizia ed il terreno. Almeno il 90% delle applicazioni dei micropali hanno finora riguardato il caso 1. In tale caso i micropali sono progettati per sostenere le sollecitazioni individualmente anche se possono essere installati in gruppi. La *figura 1.8* mostra delle tipiche applicazioni dei micropali che rientrano, per la filosofia progettuale adottata, nel caso 1. Le applicazioni dei micropali relative al caso 2, riguardano l'impiego di reticoli di micropali con la finalità di costituire gli elementi di rinforzo del terreno. I carichi strutturali sono applicati all'intera massa



**Figura 1.8.** Caso 1: esempi di impiego dei micropali

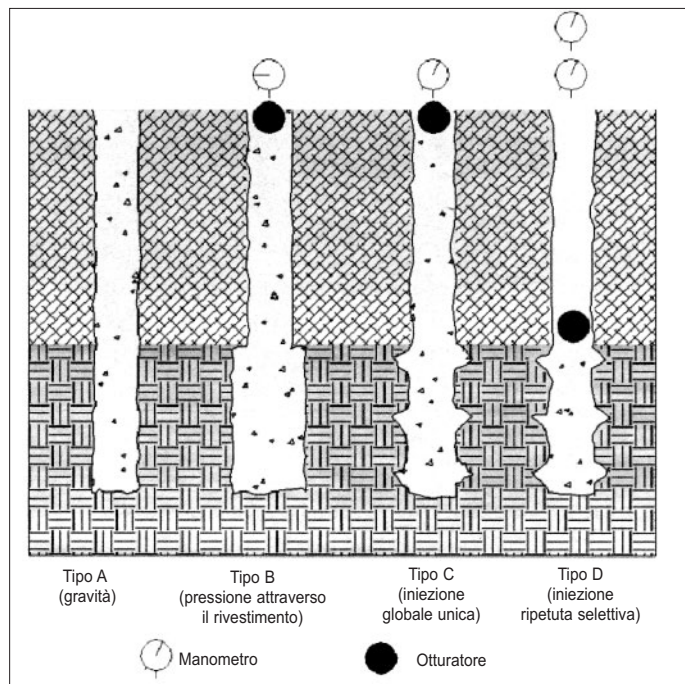


**Figura 1.9.** Caso 2: esempi di impiego dei micropali

di terreno rinforzato. In tale caso i micropali possono essere debolmente armati poiché essi non sono individualmente sollecitati, come per i pali appartenenti al caso 1. Essi sono impiegati per circoscrivere e rinforzare internamente il terreno interessato dall'intervento. Una tipica realizzazione di un reticolo di micropali è mostrata in *figura 1.9*. La progettazione di dettaglio dei micropali, per applicazioni relative sia al caso 1 sia al caso 2, sarà illustrata nei successivi capitoli.

## 2. Classificazione basata sulle modalità esecutive

Il metodo di iniezione costituisce generalmente l'aspetto più critico per la capacità portante del palo che si sviluppa prevalentemente per attrito o adesione laterale. La capacità del legame fra la miscela cementizia ed il terreno dipende direttamente dal metodo di iniezione della miscela cementizia. La seconda parte del sistema di classificazione dei micropali consiste, pertanto, nell'assegnare una lettera (dalla lettera A alla lettera D), sulla base, principalmente, del metodo utilizzato per la messa in opera della miscela e dell'entità della pressione di iniezione adottata. L'impiego del rivestimento e dell'armatura definiscono una sotto classificazione. La classificazione è mostrata schematicamente in *figura 1.10*. Con riferimento alle differenti modalità esecutive mostrate in *figura* si hanno le seguenti tipologie.



**Figura 1.10.** Classificazione dei micropali basata sulle modalità esecutive

**TIPO A.** Il micropalo di tipo A è ottenuto mediante semplice colatura della malta per gravità. Possono essere utilizzate malte o paste cementizie.

**TIPO B.** Il tipo B indica che la miscela cementizia è iniettata a pressione come il rivestimento provvisorio del foro viene sollevato. Le pressioni di iniezione variano tipicamente da 0.5 a 1 MPa, e vengono limitate per evitare l'idrofratturazione del terreno circostante, un assorbimento eccessivo di miscela cementizia, e per mantenere una sigillatura intorno al rivestimento durante il suo sollevamento, dove possibile.

**TIPO C.** Il tipo C indica che il processo di iniezione avviene in due fasi: (1) il foro viene dapprima riempito mediante semplice colatura della malta per gravità come nel tipo A, (2) prima che la miscela indurisca (approssimativamente dopo un tempo compreso fra 15 e 25 minuti), viene iniettata una miscela simile mediante tubi a valvole senza l'uso di otturatori ad una pressione di almeno 1 MPa. Questo tipo di palo può essere designato anche con la sigla IGU (iniezione globale unica).

**TIPO D.** Tale tipologia indica un processo in due fasi, simile al tipo C, con delle modifiche alla seconda fase. Nella prima fase la miscela cementizia viene colata a gravità come nei casi tipo A e C o iniettata a debole pressione come nel tipo B, allo scopo di sigillare il foro. Dopo che la miscela ha fatto presa, viene iniettata una miscela addizionale, attraverso tubi valvolati, con pressioni comprese fra 2 e 8 MPa e con volumi controllati. Un otturatore può essere utilizzato all'interno del tubo di iniezione al fine di procedere a fasi ulteriori di iniezione (iniezioni ripetute) in corrispondenza di specifici livelli stratigrafici. Per l'iniezione possono essere utilizzati tubi con valvole di non ritorno disposte lungo il tratto connesso. Questo tipo di micropalo, molto diffuso, è designato con la sigla IRS (iniezione ripetuta selettiva).

**Tabella 1.1. Sistema di classificazione dei micropali basato sulle modalità di iniezione**

| Tipo di micropalo e metodo di iniezione                                                                                                                                                                                                                           | Sottotipo | Rivestimento della perforazione                                                                     | Armatura                                                                                                                                 | Miscela                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TIPO A<br>ottenuto mediante semplice colatura                                                                                                                                                                                                                     | A1        | Provvisorio o assente                                                                               | Nessuna, una o più barre di acciaio ad aderenza migliorata, gabbia d'armatura, tubo od elementi profilati in acciaio                     | Sabbia / malte di cemento, miscele cementizie immesse nel foro mediante un tubo getto calato sul fondo senza applicare aria in pressione                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                   | A2        | Permanente sull'intera lunghezza                                                                    | Rivestimento stesso della perforazione                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                   | A3        | Permanente, solamente nel primo tratto                                                              | Rivestimento della perforazione nel primo tratto, barre o tubo in acciaio nella restante parte (può essere esteso sull'intera lunghezza) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| TIPO B<br>iniettato a pressione attraverso il rivestimento                                                                                                                                                                                                        | B1        | Provvisorio o assente                                                                               | Una o più barre o tubo in acciaio (l'impiego di gabbie d'armatura è più raro a causa della più bassa resistenza strutturale)             | La miscela cementizia viene immessa attraverso la batteria di perforazione sino alla completa sostituzione del fluido di circolazione ponendo quindi in opera l'armatura oppure si pone in opera il tubo armatura e si procede quindi all'iniezione della miscela cementizia dall'interno del tubo. La pressione di iniezione tipicamente è di circa 1 MPa.                                                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                   | B2        | Permanente sull'intera lunghezza                                                                    | Rivestimento stesso della perforazione                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                   | B3        | Permanente, solamente nel primo tratto                                                              | Rivestimento della perforazione nel primo tratto, barre o tubo in acciaio nella restante parte (può essere esteso sull'intera lunghezza) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| TIPO C<br>iniezione in due fasi: nella prima fase messa in opera della miscela cementizia per semplice colatura a gravità, nella seconda fase iniezione a pressione                                                                                               | C1        | Provvisorio o assente                                                                               | Una o più barre o tubo in acciaio (l'impiego di gabbie d'armatura è più raro a causa della più bassa resistenza strutturale)             | La miscela cementizia viene immessa nel foro attraverso un tubo getto calato sul fondo. Dopo 15 ÷ 25 minuti viene iniettata una miscela delle medesime caratteristiche all'interno del tubo con una pressione superiore ad 1 MPa                                                                                                                                                                                                    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                   | C2        | Non realizzato                                                                                      | —                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                   | C3        | Non realizzato                                                                                      | —                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| TIPO D<br>iniezione in due fasi: nella prima fase la miscela cementizia viene colata a gravità come nel tipo A o iniettata a debole pressione come nel tipo B allo scopo di sigillare il foro, nella seconda fase vengono eseguite iniezioni ripetute a pressione | D1        | Provvisorio o assente                                                                               | Una o più barre o tubo in acciaio (l'impiego di gabbie d'armatura è più raro a causa della più bassa resistenza strutturale)             | La miscela cementizia è dapprima immessa nel foro attraverso un tubo getto calato sul fondo (tipo A) e/o iniettata a pressione dall'interno del tubo. Dopo alcune ore, una miscela delle medesime caratteristiche viene iniettata dal tubo valvolato attraverso speciali pistoncini di iniezione. La procedura di iniezione può essere ripetuta più volte fino al raggiungimento della pressione massima di iniezione dell'impianto |
|                                                                                                                                                                                                                                                                   | D2        | Possibile solamente se il tubo per le iniezioni ripetute è posizionato al di fuori del rivestimento | Rivestimento stesso della perforazione                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                   | D3        | Permanente, solamente nel primo tratto                                                              | Rivestimento della perforazione nel primo tratto, barre o tubo in acciaio nella restante parte (può essere esteso sull'intera lunghezza) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |



### 1.3. CAMPI DI APPLICAZIONE DEI MICROPALI

#### 1.3.1. INTRODUZIONE

I micropali sono correntemente impiegati in due principali applicazioni: come elementi strutturali e, meno frequentemente, come elementi di consolidamento e rinforzo dei terreni (vedi *figura 1.11*). L'impiego dei micropali come elementi strutturali comprende nuove fondazioni, pali di sottofondazione, miglioramenti statici di vecchie strutture situate in zona sismica ed opere di sostegno dei terreni.

Come elementi di consolidamento dei terreni, i micropali sono utilizzati per la stabilizzazione dei versanti, come elementi di riduzione dei cedimenti e per migliorare la stabilità strutturale di manufatti. La seguente *tabella 1.2* riporta la classificazione dei micropali basata sia sul tipo di applicazione progettuale sia sulle modalità di getto ed iniezione.

Per l'impiego come elementi strutturali, i micropali possono essere utilizzati come pali di piccolo diametro in alternativa ai pali convenzionali.

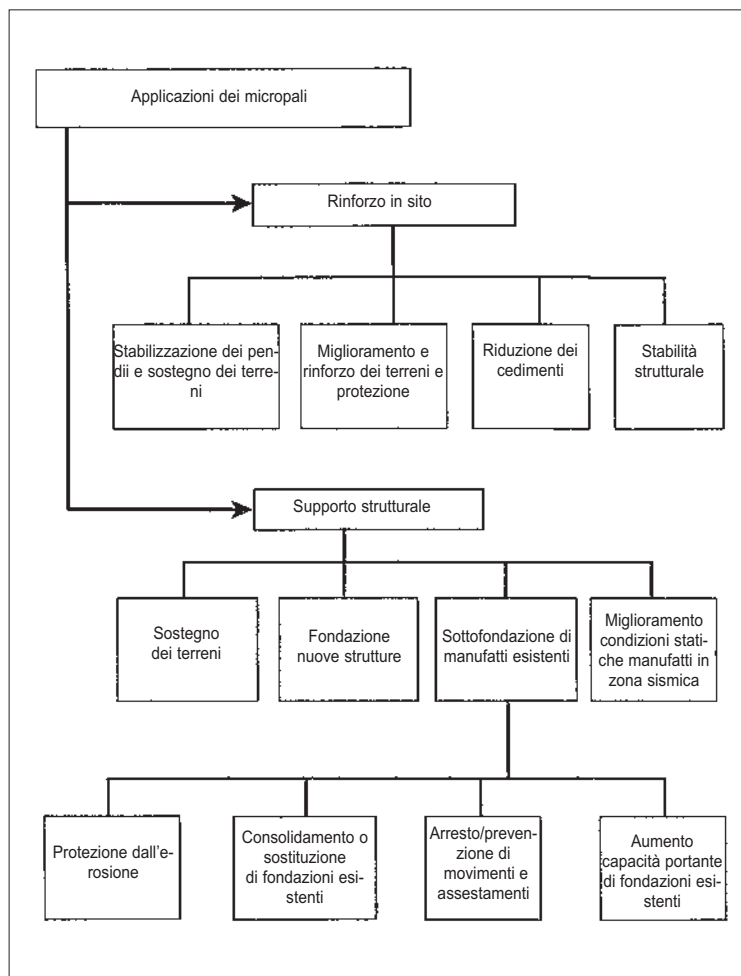
I micropali impiegati come elementi strutturali sono usualmente direttamente sollecitati e perciò viene adottata come filosofia progettuale quella relativa al Caso 1. I micropali tipicamente impiegati per queste applicazioni includono il tipo A (pali iniettati a gravità e connessi al terreno e alla roccia), il tipo B (micropali iniettati in pressione), ed il tipo D (micropali realizzati con iniezioni ripetute). Questi tipi di pali possono garantire elevate capacità individuali come quelle tipicamente necessarie per i manufatti che vengono realizzati per le infrastrutture.

È importante notare che le applicazioni di rinforzo dei terreni per la stabilizzazione dei pendii e per il contenimento dei terreni per opere di scavo possono interessare entrambi i casi 1 e 2, per quanto

concerne l'approccio progettuale.

I micropali usati per queste applicazioni sono tipicamente pali di tipo A (pali iniettati a gravità e resi completamente solidali al terreno o roccia circostante), in quanto non sono necessarie elevate resistenze, individualmente da ciascun micropalo, dovendo costituire un rinforzo del terreno.

L'approccio progettuale appartiene pertanto al caso 2. Recenti esperienze (Pearlman et al., 1992) suggeriscono, tuttavia, che in certe condizioni e per alcuni casi specifici di disposizione planimetrica dei micropali, essi risultano direttamente e localmente sottoposti ad elevate forze di taglio e a momenti flettenti, in modo particolare in prossimità della superficie di scorrimento di una frana. Queste sollecitazioni di tipo diretto sui micropali, per definizione appartengono all'approccio progettuale indicato come caso 1. I micropali in queste condizioni sono molto armati e appartengono, dal punto di vista delle modalità costruttive, al tipo A o B.



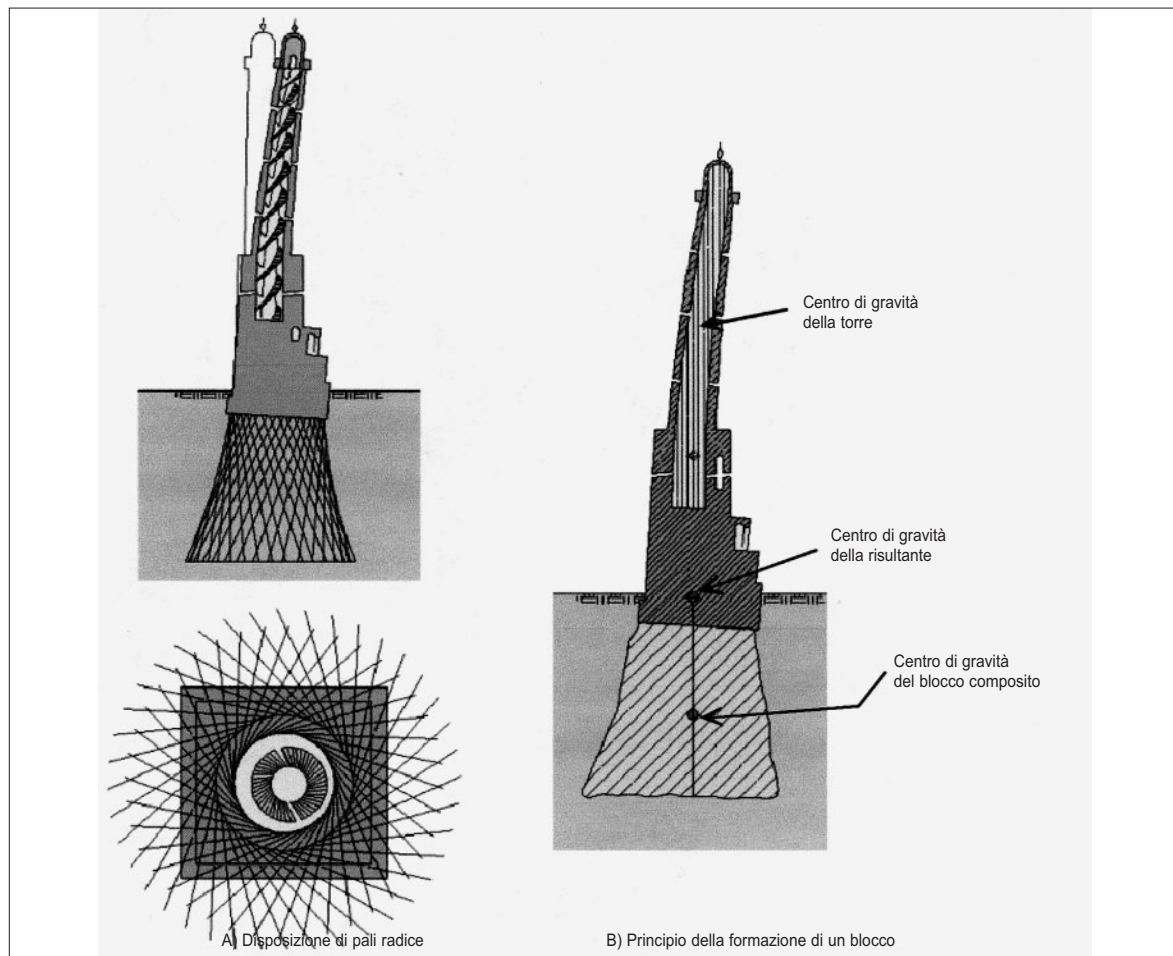
**Figura 1.11.** Classificazione dei micropali sulla base delle differenti applicazioni

**Tabella 1.2. Relazione tra l'applicazione dei micropali, l'approccio progettuale ed il tipo di modalità costruttive**

|                                           | Supporto strutturale                                                                                | Rinforzo del terreno                          |                            |        |                    |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|--------|--------------------|
| Applicazione                              | Sottofondazioni di edifici esistenti, nuove fondazioni, consolidamento di strutture in zona sismica | Stabilizzazione di frane ed opere di sostegno | Consolidamento del terreno | Caso 2 | Caso 2             |
| Applicazione progettuale                  | Caso 1                                                                                              | Caso 1 e Caso 2 con transizione               | Caso 2 ed anche caso 1     | Caso 2 | Caso 2             |
| Modalità esecutive                        | Tipo A (con tratto di connessione in roccia o argille dure), Tipo B, C e D nei terreni              | Tipo A e Tipo B nei terreni                   |                            | Tipo A | Tipo A nei terreni |
| Stima delle relative attuali applicazioni | Probabilmente il 95% delle intere applicazioni in tutto il mondo                                    | Dallo 0 al 5%                                 |                            |        |                    |

Altre applicazioni di rinforzo dei terreni utilizzano come filosofia progettuale il caso 2.

Per quanto riguarda la potenzialità delle applicazioni relative al caso 2, di fatto, le principali realizzazioni che si sono registrate non vanno al di là degli interventi di stabilizzazione di torri in monumenti storici. A questo riguardo in *figura 1.12* è mostrato lo schema di intervento adottato per migliorare il grado di stabilità di una torre a Mosul in Iraq (Lizzi, 1982). Come si può notare dalla figura tale applicazione appartiene da un punto di vista progettuale al caso 2, avendo il reticolo di micropali provveduto a rinforzare un volume consistente di terreno al di sotto della fondazione della struttura producendo come effetto l'abbassamento del centro di gravità dell'insieme combinato struttura/terreno con il conseguente miglioramento della stabilità dell'opera.

**Figura 1.12. Schema di messa in sicurezza per la torre del minareto di Al Hadba (Lizzi, 1982)**

### 1.3.2. APPLICAZIONI STRUTTURALI DEI MICROPALI

Le applicazioni dei micropali come elementi strutturali comprendono le fondazioni per nuove strutture, le sottofondazioni di strutture esistenti, la protezione nei confronti dell'erosione, il consolidamento di vecchie strutture in zona sismica. Molte di queste applicazioni trovano frequente impiego nella realizzazione delle infrastrutture.

I micropali possono essere impiegati nella costruzione di nuovi ponti in aree che richiedono come alternativa l'adozione di fondazioni profonde in terreni difficili (con presenza ad esempio di blocchi o ciottoli anche di grandi dimensioni), dove l'installazione di pali convenzionali è molto difficile ed anche costosa.

Un esempio riportato in letteratura (Bruce, 1988) si riferisce alle fondazioni di un ponte autostradale per l'attraversamento del fiume Delaware negli Stati Uniti fra la Pensilvania ed il New Jersey. Tutte le pile del ponte furono fondate sia su fondazioni profonde su pali battuti sia su fondazioni dirette impostate direttamente sulla roccia di base ad eccezione della pila E-6. In corrispondenza di tale pila, la roccia di base venne incontrata al di sotto della quota attesa e con caratteristiche estremamente variabili. Vennero proposte come soluzioni alternative, per ovviare ai problemi geologici incontrati, l'esecuzione sia dei micropali sia dei pali trivellati, e alla fine vennero scelti i micropali sulla base del costo, dei tempi di installazione necessari e dei risultati ottenuti durante delle prove di carico preliminari.

La sostituzione delle fondazioni delle spalle di un ponte a doppia campata a Mahoning Creek nella Contea di Armstrong in Pensilvania mostra un altro interessante esempio (vedi *figura 1.13*). Le fondazioni originarie in pietra delle spalle erano state costruite mediante l'impiego di ture ed erano state fondate su terreni facilmente erodibili situati al di sopra della roccia di base costituita da arenarie. I micropali sono stati impiegati come fondazioni delle nuove spalle realizzandoli attraverso le fondazioni esistenti in pietra fino a raggiungere la sottostante roccia costituita da arenarie (Pearlman et al., 1992).

Nuovi viadotti possono essere costruiti in aree con notevoli limitazioni operative, in adiacenza a strade per le quali si deve garantire la regolarità del flusso di traffico. In tale caso l'impiego di micropali per le fondazioni di nuovi viadotti e delle rampe di accesso può risultare ottimale. Tra i fattori più importanti per l'impiego di micropali si può annoverare la relativa assenza di vibrazioni durante la loro messa in opera in confronto, soprattutto, ai pali infissi che potrebbero causare danni a strutture adiacenti vecchie e particolarmente sensibili, e la necessità di non imporre restrizioni al flusso di traffico nell'area interessata dalla costruzione dell'opera.

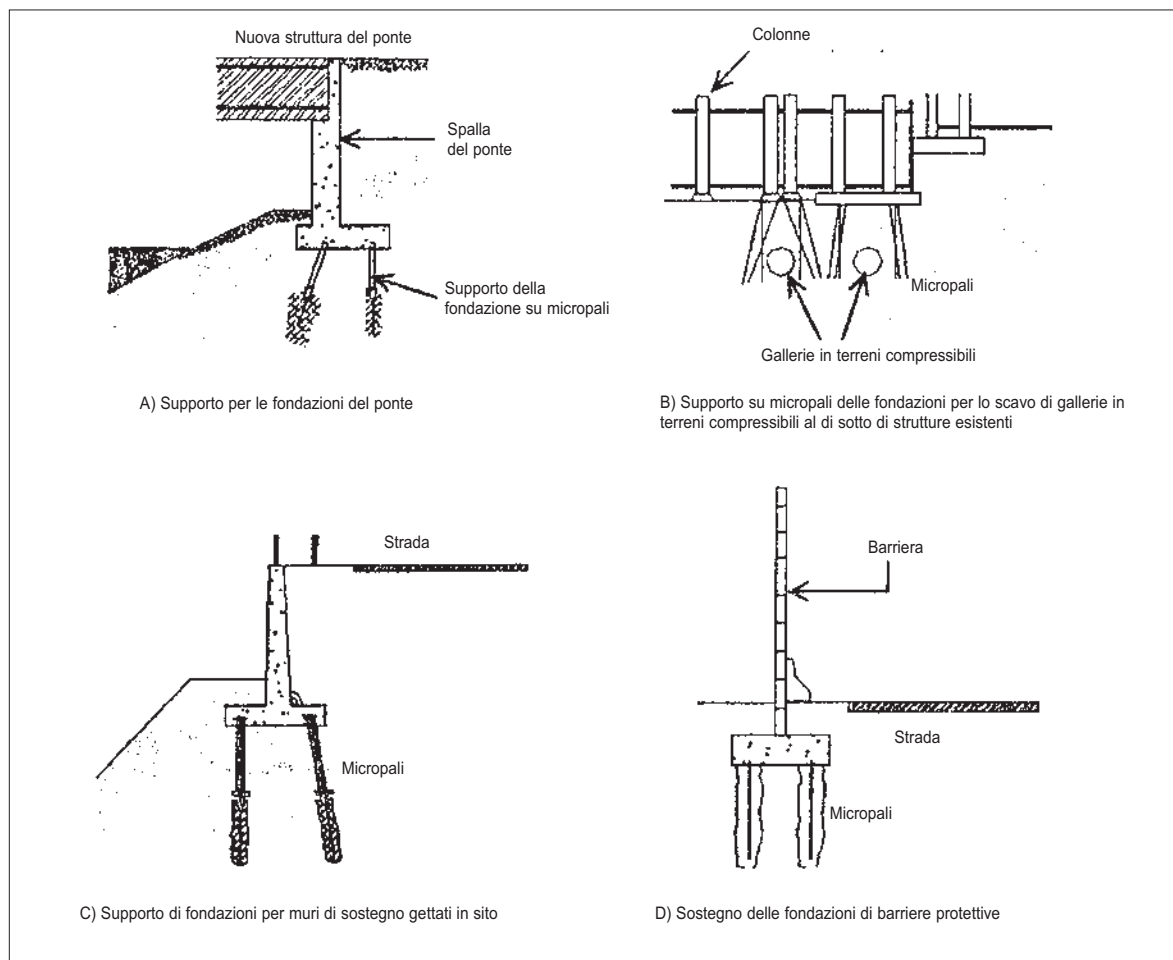
Altri impieghi dei micropali come elementi strutturali comprendono le fondazioni di edifici, le opere di sostegno e le fondazioni di muri di sostegno. La *figura 1.14* mostra delle tipiche applicazioni dei micropali per le usuali opere necessarie per la costruzione di un'infrastruttura.



**Figura 1.13.** Micropali del diametro di 175 mm utilizzati al di sotto delle nuove fondazioni delle spalle del ponte di Mahoning Creek nella Contea di Armstrong (Pearlman e Wolosick, 1992)

Come già indicato, i micropali sono stati originariamente ideati per le sottofondazioni di strutture esistenti. Le sottofondazioni di strutture esistenti possono essere realizzate per diverse finalità:

- Arrestare o prevenire movimenti nelle strutture.
- Aumentare la capacità portante di strutture esistenti.
- Riparare o sostituire fondazioni deteriorate o inadeguate.
- Fornire una protezione nei confronti dell'erosione nel caso di terreni di fondazione particolarmente sensibili ai fenomeni di erosione.



**Figura 1.14.** Micropali per fondazioni di opere nel campo delle infrastrutture

- Per produrre il sollevamento di fondazioni che hanno ceduto permettendo di ripristinare il loro livello originario.
- Per trasferire i carichi a degli strati più profondi.

I micropali possono essere installati, e solidarizzati, attraverso delle strutture esistenti, fornendo un diretto collegamento con i sottostanti strati competenti senza la necessità di realizzare dei nuovi plinti e, nello stesso tempo, fornendo un rinforzo all'interno della stessa struttura.

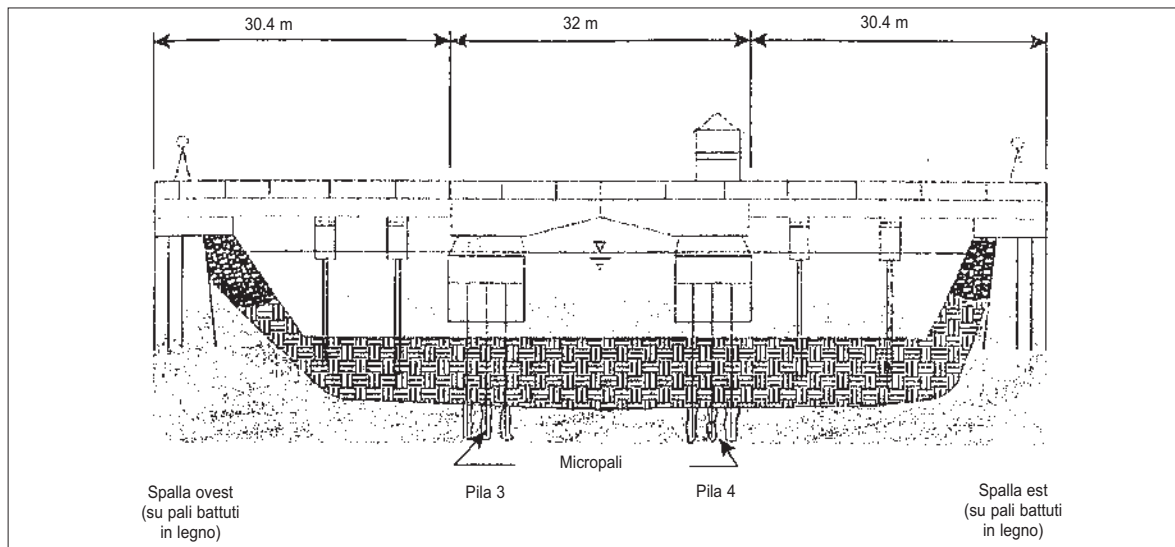
La costruzione può essere eseguita senza ridurre la capacità della fondazione esistente.

Cedimenti delle strutture possono essere causati da molteplici fattori quali la presenza di terreni compressibili, emungimenti della falda, oscillazioni della falda, deterioramento delle fondazioni esistenti, realizzazione in adiacenza di scavi profondi quale, ad esempio, la scavo di una galleria.

I micropali possono mitigare questi movimenti strutturali permettendo di trasferire, in profondità a strati più competenti e portanti, i carichi strutturali.

L'aumento della capacità portante di una fondazione esistente può inoltre essere necessaria per diverse ragioni. Nel caso dell'ampliamento di una struttura esistente si possono avere dei carichi addizionali verticali, orizzontali o vibranti applicati alla fondazione, che possono rendere necessario un intervento di consolidamento per mantenere adeguati coefficienti di sicurezza del manufatto.

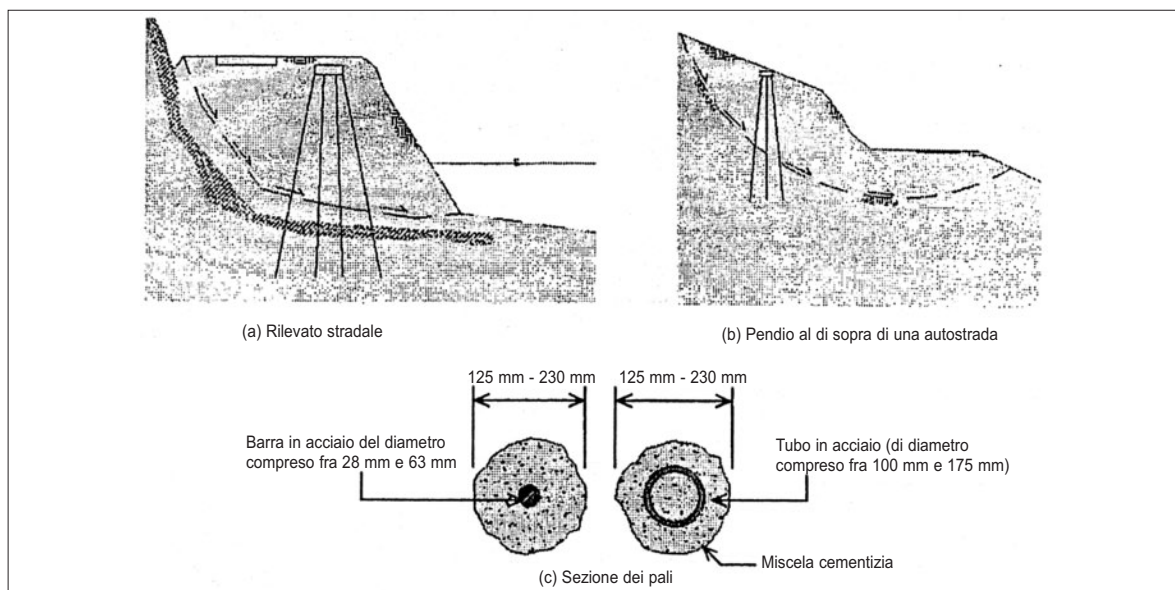
Ad esempio, il vecchio ponte sul fiume Pocomoke nel Maryland dopo 75 anni dalla sua costruzione dovette essere riabilitato quando la capacità degli originali pali in legno venne compromessa dall'erosione operata dalle acque del fiume durante un'alluvione (Bruce et al., 1990). In *figura 1.15* è mostrato il sistema di sottofondazione adottato. Questi micropali sono stati installati attraverso la fondazione esistente e sono stati precompressi per garantire un supporto senza al tempo stesso causare un cedimento addizionale ad una struttura così delicata.



**Figura 1.15.** Distribuzione dei micropali per la sottofondazione del ponte sul fiume Pocomoke nel Maryland (Bruce et al., 1990)

### 1.3.3. APPLICAZIONI DEI MICROPALI COME ELEMENTI DI RINFORZO DEL TERRENO

Il reticolo di micropali (caso 2) comprende un'opportuna distribuzione planimetrica dei micropali, sia verticali sia inclinati, in grado di costituire un efficace rinforzo del terreno interessato dall'intervento. Una tipica applicazione dei reticoli di micropali è quella relativa alla stabilizzazione dei pendii. Per tale tipo di applicazione i micropali devono garantire la formazione di un blocco stabile di terreno rinforzato in grado di comportarsi come una sorta di opera di sostegno in grado di stabilizzare la parte superiore della frana fornendo, nello stesso tempo, una resistenza al taglio in corrispondenza della superficie di scivolamento. Tale tipo di applicazione è perciò un caso intermedio tra il caso 1 ed il caso 2. Ricerche condotte da Pearlman et al. (1992) e Palmerton (1984) suggeriscono che micropali in gruppo inclinati permettono di collegare la zona in movimento (al di sopra della superficie di scorrimento) alla zona stabile al di sotto di detta superficie. Questi pali forniscono una reazione in grado di resistere alle forze di taglio che si sviluppano lungo la superficie di scorrimento e, dal punto di vista progettuale, appartengono al caso 1. In *figura 1.16* sono mostrate delle tipiche configurazioni di micropali inclinati non appartenenti ad un reticolo.

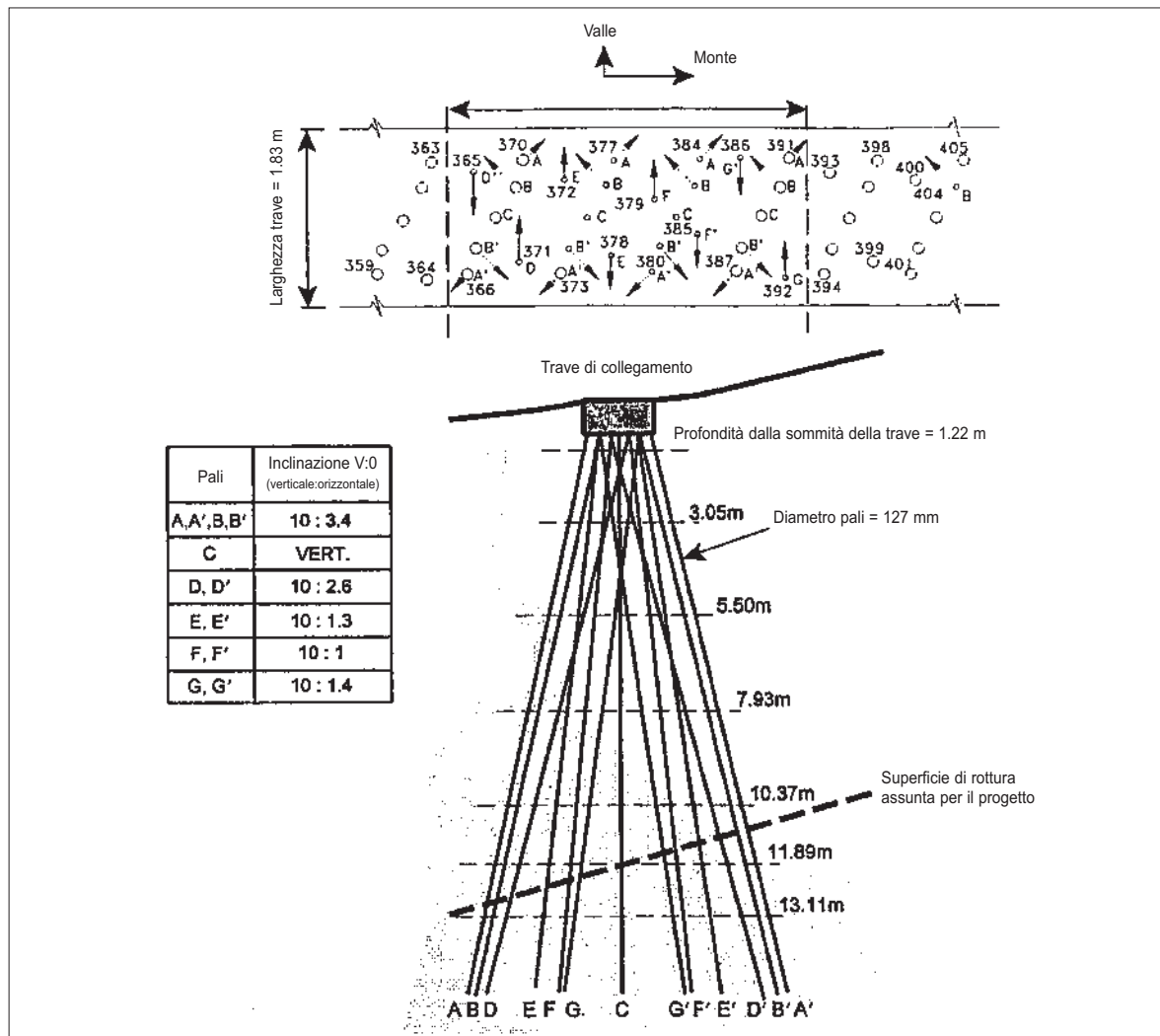


**Figura 1.16.** Tipiche configurazioni di micropali inclinati









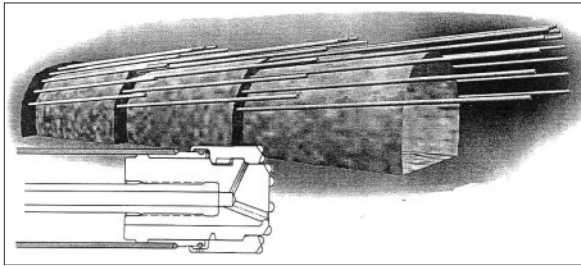
**Figura 1.19.** Esempio di stabilizzazione di una frana (caso 2) lungo l'autostrada FH-7 nella foresta nazionale di Mendocino in California

un periodo di forti precipitazioni. L'intervento ha interessato un tratto di 94 m realizzando un reticolo di micropali per rinforzare il terreno (caso 2) e fornire una resistenza al taglio addizionale. È interessante evidenziare come la densità di micropali per metro lineare nell'esempio di figura 1.17 e in quello di figura 1.19 sono completamente differenti avendosi, rispettivamente, una densità per metro lineare compresa fra 2.9 e 4.1 per l'esempio di figura 1.17 e di 7.4 per l'esempio di figura 1.19. Entrambe le realizzazioni hanno fornito in esercizio un comportamento soddisfacente (Pearlman, et al., 1992).

#### 1.3.4. APPLICAZIONI DEI MICROPALI NELLE OPERE IN SOTTERRANEO

Le applicazioni dei micropali allo scavo delle gallerie rientrano nel termine più generale di infilaggi con il quale si intendono tutte le tecnologie esecutive atte al sostegno di terreni, rocce o manufatti, in anticipo agli scavi, ottenuto tramite armature comunque inclinate cementate al terreno circostante la galleria ovvero retrostante il fronte di scavo (vedi figura 1.20).

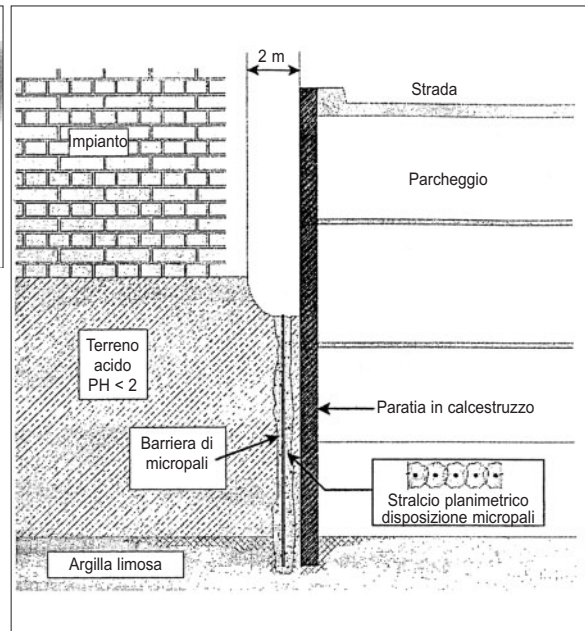
Indipendentemente dalla funzione degli infilaggi, che possono essere realizzati per il precontenimento provvisorio del fronte di scavo ovvero per il sostegno della calotta e dei piedritti in anticipo agli scavi, gli infilaggi vengono classificati e distinti sulla base delle seguenti caratteristiche:



**Figura 1.20.** Esempio di impiego di micropali nelle opere in sotterraneo

- diametro, lunghezza ed interasse della perforazione;
- caratteristiche dell'armatura, in acciaio o in vetroresina;
- eventuale sovrapposizione delle armature in direzione longitudinale;
- tipo di miscela cementante.

Nel capitolo 2 verranno illustrate in dettaglio le modalità esecutive con un esempio di specifica tecnica.



**Figura 1.21.** Protezione di un diaframma in calcestruzzo esistente mediante uno schermo di micropali, realizzato con malte resistenti alle sostanze corrosive

### 1.3.5. FATTORI CHE INFLUENZANO LA SCELTA DEI MICROPALI

Numerosi fattori influenzano la scelta dei micropali per le fondazioni di strutture e per la stabilizzazione di pendii:

- Considerazioni fisiche quali l'accesso difficoltoso al cantiere, la vicinanza con opere esistenti.
- Condizioni particolari del sottosuolo quali condizioni geologiche difficili, suscettibilità del terreno alla liquefazione durante l'infissione dei pali.
- Condizioni ambientali quali sensibilità alle vibrazioni e al rumore, presenza di terreni pericolosi e contaminati.
- Adattamento alle strutture esistenti.
- Limitazioni dei micropali.
- Aspetti economici.

Per quanto riguarda la possibilità di installare i micropali in terreni pericolosi o contaminati, la *figura 1.21* mostra un'interessante applicazione. In tale caso è stato realizzato uno schermo di micropali secanti, ubicati in adiacenza ad un esistente diaframma in calcestruzzo di un parcheggio sotterraneo a Barcellona in Spagna (Bachy, 1992). Il muro esistente si era fisicamente deteriorato a causa della estrema aggressività delle acque presenti nel sottosuolo (cloriti, solfati con valori di pH inferiori a 1.7) a causa della preesistente presenza di un impianto metallurgico. Successivamente alla realizzazione dello schermo di micropali vennero prelevati dei campioni nel diaframma senza riscontrare tracce di acido. Per tale applicazione occorre, inoltre, ricordare che possono essere messe a punto delle miscele cementizie in grado di resistere a sostanze chimiche aggressive presenti nelle acque di falda o nei terreni. Inoltre speciali additivi possono essere inclusi nel progetto della miscela per ridurre o evitare il deterioramento in ambiente acido e corrosivo.

## 1.4. PALI TRIVELLATI

I pali trivellati sono realizzati mediante l'asportazione del terreno e la sostituzione con calcestruzzo e rappresentano i pali più diffusi e versatili. Infatti, le moderne tecnologie ne permettono l'esecu-

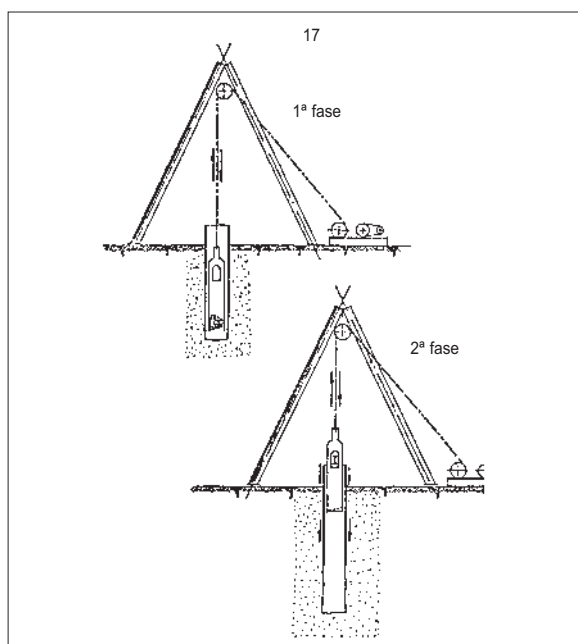
zione in ogni tipo di terreno. Terreni argillosi e limosi compatti oppure sabbio-ghiaiosi in assenza di falda non richiedono, in fase di perforazione, alcun sostegno delle pareti del foro; terreni dotati di scarsa coesione o totalmente privi quali sabbie e ghiaie in presenza di falda, necessitano il sostegno delle pareti dello scavo mediante tubazione o con fanghi bentonitici.

#### 1.4.1. SOSTEGNO MEDIANTE TUBI

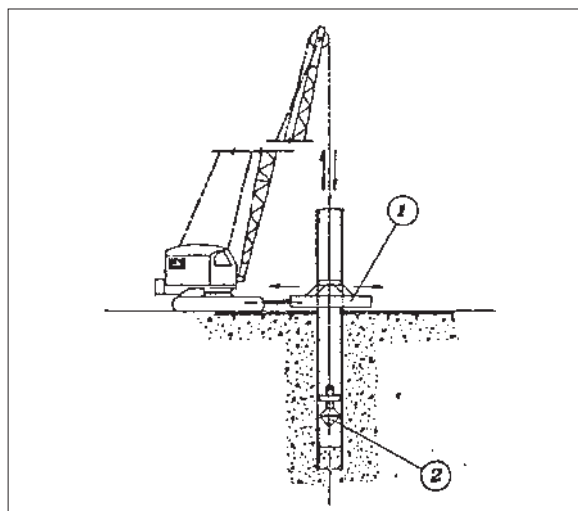
Rapidità ed economicità dell'infissione della camicia metallica sono condizionate dall'attrito laterale che si sviluppa tra tubo e terreno; si è così passati dalla primitiva infissione per battitura all'infissione con morsa oscillante e alla vibroinfissione.

L'abbandono dell'infissione per battitura (vedi *figura 1.22*) è legato all'evenienza, non remota, di non avere la tubazione in avanzamento rispetto alla trivellazione. Ne consegue una decompressione del terreno aggravata, soprattutto in presenza di acqua e sabbie fini, dall'azione di risucchio della

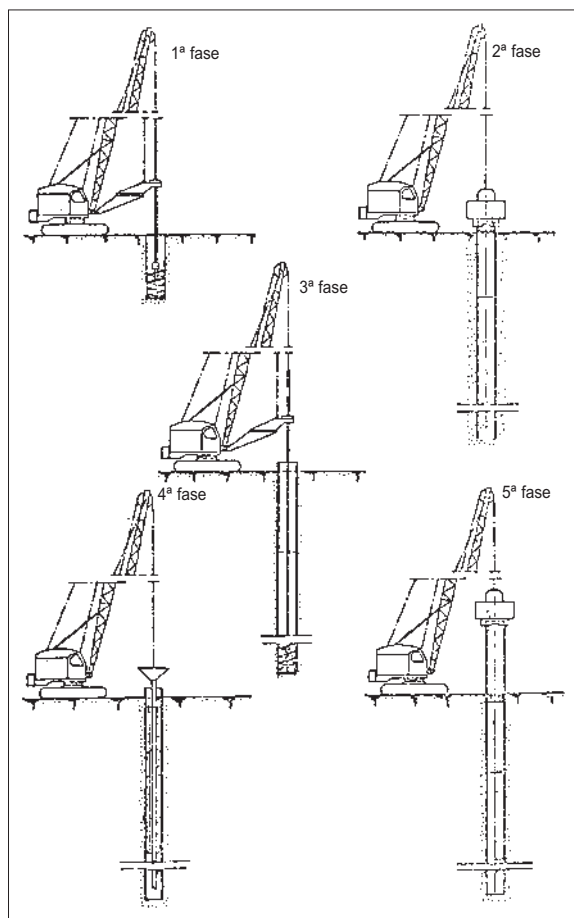
sonda (con valvola a ciabatta) usato per l'asportazione del terreno. L'infissione mediante morsa oscillante e vibroinfissione (vedi *figure 1.23 e 1.24*) utilizzano lo stesso principio di funzionamento. L'oscillazione del tubo lungo il proprio asse riduce l'attrito laterale così che il palo entra nel terreno sotto l'azione del peso proprio, della morsa oscillante o del vibratore (vedasi la seconda fase di *figura 1.24*).



**Figura 1.22.** Infissione del tubo forma mediante battitura



**Figura 1.23.** Infissione del tubo forma con morsa oscillante e scavo del terreno con benna a valve: (1) morsa oscillante, (2) benna mordente a valve



**Figura 1.24.** Infissione del tubo forma con vibroinfissione e scavo del terreno con trivella ad elica

Qualora le caratteristiche del terreno permettano l'alternativa fra i due metodi, la vibroinfissione è da preferire. Infatti, oltre alla rapidità di infissione presenta il vantaggio di non disturbare il terreno circostante in quanto, a differenza degli altri due metodi, l'asportazione del terreno avviene solo a infissione ultimata, tramite benna a valve o trivella ad elica (vedasi la terza fase di *figura 1.24*). L'immissione del calcestruzzo, contemporanea alla vibroestrazione della camicia metallica garantisce la continuità del getto (quinta fase di *figura 1.24*).

#### 1.4.2. SOSTEGNO CON FANGHI BENTONITICI

La trivellazione è eseguita per rotazione, percussione o rotopercussione (vedi *figure 1.25 ÷ 27*). L'azione di sostegno delle pareti dello scavo si esplica tramite la pressione idrostatica della colonna di fango. Tuttavia, affinché tale azione possa utilmente esercitarsi, devono verificarsi due condizioni: che la pressione idrostatica del fango sia maggiore, per ovvi motivi, di quella delle acque di falda o interstiziali; che granulometria e permeabilità del terreno siano tali da evitare la diffusione del fango in larghe fasce di terreno.

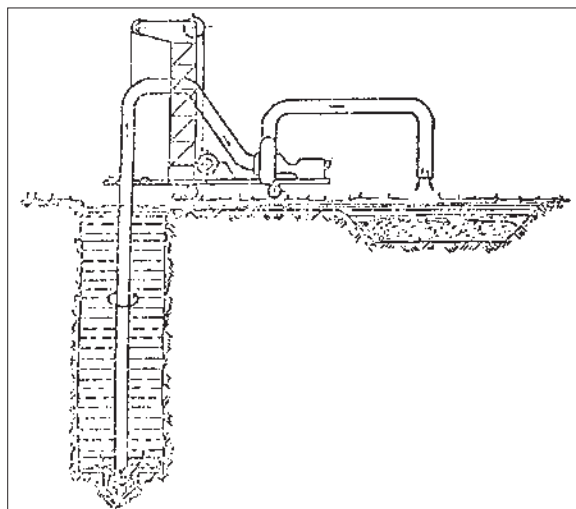
In tali condizioni la diffusione del fango viene ben presto arrestata dall'azione filtrante del terreno.

Si forma così, grazie anche alle proprietà tixotropiche del fango, un sottile strato gelatinoso e impermeabile sul quale si esercita la pressione della colonna di fango. Lo spessore dello strato gelatinoso deve essere tuttavia contenuto per evitare che l'azione lubrificante del fango riduca la portata laterale del terreno.

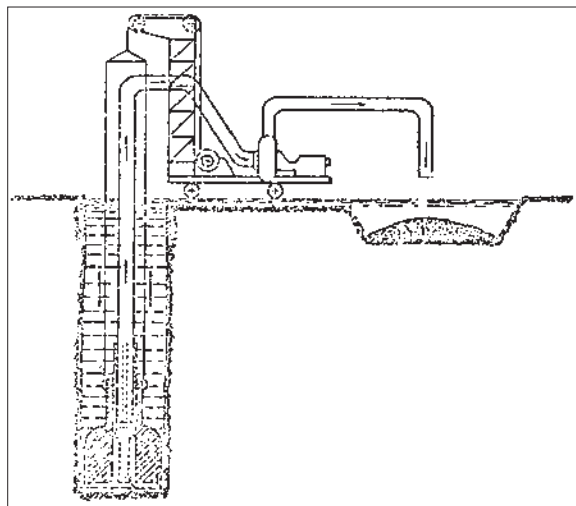
L'azione dei fanghi non si limita peraltro al sostegno delle pareti dello scavo, ma rende possibile l'asportazione dei detriti. Infatti, i fanghi vengono immessi nello scavo attraverso le aste cave che azionano l'attrezzo di perforazione e trascinano i detriti per effetto della forte velocità di risalita attraverso l'intercapedine asta – terreno (circolazione diretta come mostrato in *figura 1.28*).

Nel caso di perforazioni di grosso diametro, il senso di circolazione viene invertito (circolazione rovescia mostrata in *figura 1.29*) aspirando i fanghi attraverso le aste porta – attrezzo.

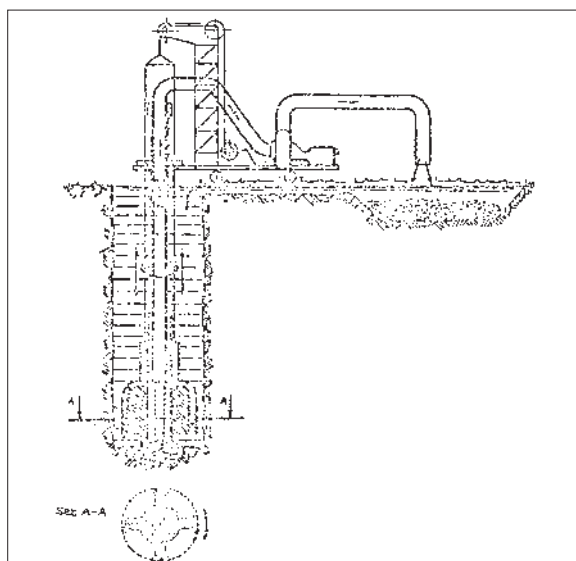
Il getto del calcestruzzo avviene, come nel caso della perforazione con tubazione di sostegno, mediante tubo convogliatore munito in sommità



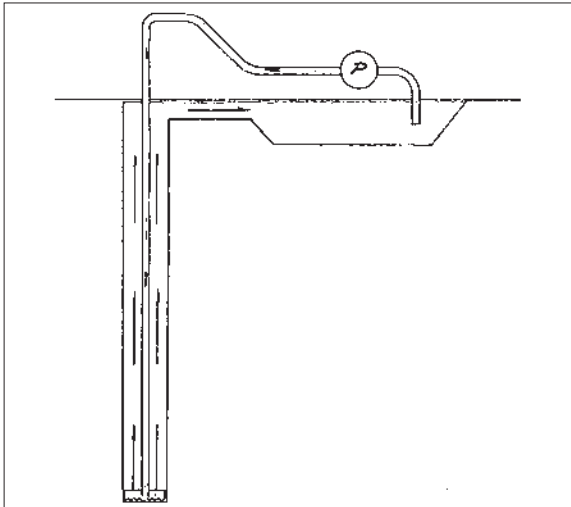
**Figura 1.25.** Pali trivellati con sostegno delle pareti di scavo con fanghi bentonitici, sistema a rotazione



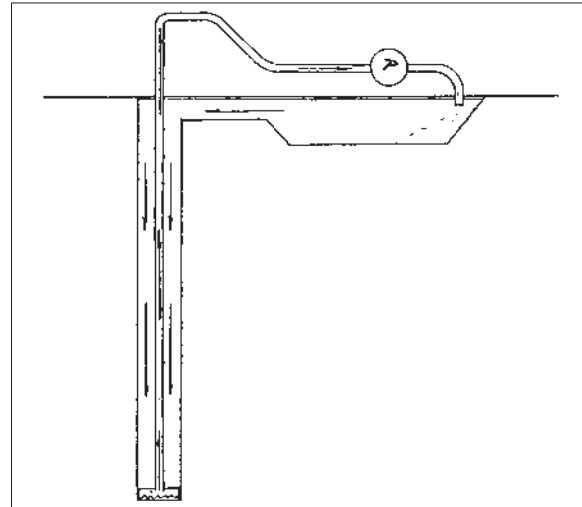
**Figura 1.26.** Pali trivellati con sostegno delle pareti di scavo con fanghi bentonitici, sistema a percussione



**Figura 1.27.** Pali trivellati con sostegno delle pareti di scavo con fanghi bentonitici, sistema a rotopercussione



**Figura 1.28.** Pali trivellati con sostegno delle pareti di scavo con fanghi bentonitici, circolazione diretta



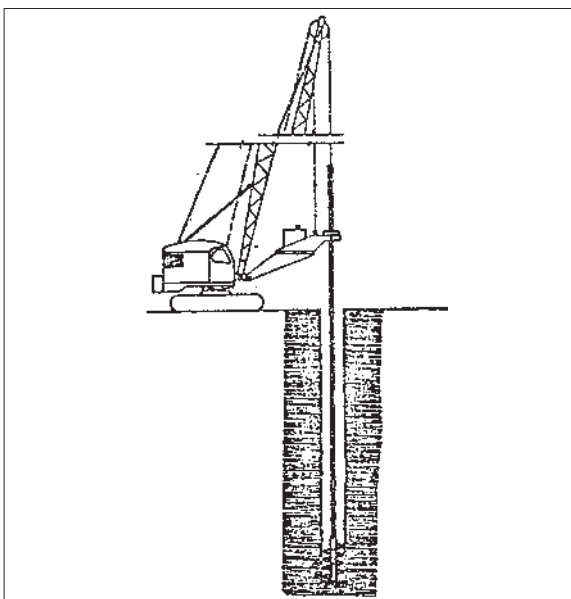
**Figura 1.29.** Pali trivellati con sostegno delle pareti di scavo con fanghi bentonitici, circolazione rovescia

di una tramoggia d'alimentazione. La bocca di scarico deve essere sempre immersa ( $2 \div 6$  m) nel calcestruzzo già gettato in modo da evitare discontinuità di getto.

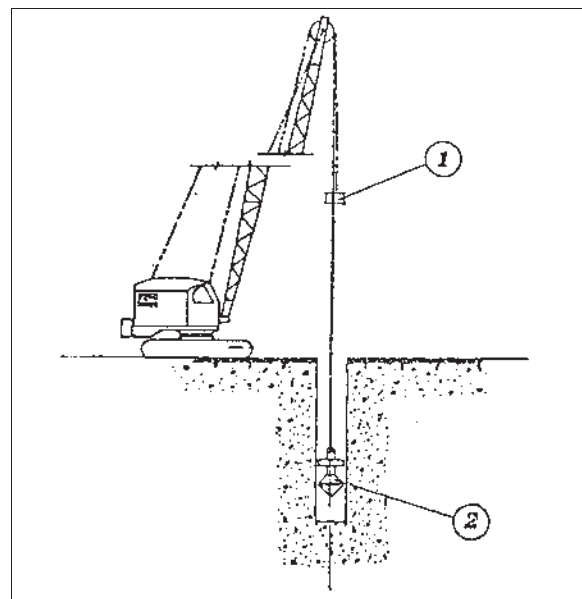
Particolare attenzione va fatta a causa della presenza nel foro dei fanghi o, eventualmente, di acqua. In tal caso il primo calcestruzzo introdotto deve essere protetto da un tampone di carta o, più spesso, costituito da palline di polistirolo espanso, posto al fondo del tubo in modo da impedire il dilavamento.

#### 1.4.3. PERFORAZIONE NON RIVESTITA

Pali trivellati a secco vengono convenientemente eseguiti in terreni coesivi compatti e terreni sciolti in assenza di falda. Le maggiori velocità di scavo si ottengono mediante il sistema a rotazione con trivella a elica (auger) come mostrato in *figura 1.30*. Ormai in disuso è l'impiego di benne mordeni a fune (vedi *figura 1.31*). Il getto del calcestruzzo è eseguito tramite tubo convogliatore.



**Figura 1.30.** Impiego del sistema a rotazione con trivella ad elica



**Figura 1.31.** Impiego di benne mordeni a fune. (1) Apparecchiatura per l'apertura automatica della benna, (2) Benna mordente a valve



## 1.5. PALI INFISSI

### 1.5.1. PALI INFISSI PREFABBRICATI

#### 1.5.1.1. Pali in acciaio

Le caratteristiche meccaniche e la facilità di ottenere pali molto lunghi (tramite saldatura) ne giustificano l'impiego qualora sia necessario trasmettere al terreno carichi elevatissimi (dell'ordine del migliaio di tonnellate), oppure quando si debbano raggiungere strati portanti posti a notevole profondità. Attuale è l'impiego in opere marittime su alti fondali (ad esempio nelle piattaforme off-shore).

La gamma dei profili adottabili è molto vasta, la preferenza è data a pali circolari, poligonali o con profilo ad H ad ala larga.

Qualora la portata sia dovuta essenzialmente all'attrito palo – terreno che si sviluppa sulla superficie laterale del fusto è utile aumentare la superficie d'attrito saldando, sulle ali dei profili ad H o sui lati dei pali ottagonali, profili ad H di dimensioni più ridotte, come mostrato in *figura 1.32*. Valori orientativi sull'entità di aumento di portata sono posti in evidenza nel diagramma mostrato in *figura 1.32*.

Nella scelta degli spessori, in genere mai inferiori ai  $10 \div 12$  mm, deve essere tenuto presente il pericolo di corrosione aumentando gli spessori previsti dal calcolo di  $1 \div 2$  mm, oppure adottando, in presenza di acqua marina, un ricoprimento in malta di cemento dello spessore di  $7 \div 8$  cm.

L'infissione avviene solitamente tramite battitura, può essere tuttavia preceduta o accompagnata da trivellazione (o da getti d'acqua in pressione) nel caso in cui i pali debbano attraversare strati cementati.

#### 1.5.1.2. Pali infissi prefabbricati in c.a. e c.a.p.

Sono costruiti in stabilimento o in cantiere, si differenziano dai pali gettati in opera, di diametro corrispondente, per la forte armatura.

Quest'ultima viene, infatti, dimensionata in modo da assorbire sia gli sforzi dovuti al carico statico e alla battitura, sia gli sforzi che nascono durante il sollevamento, lo stoccaggio e il trasporto.

Proprio tali sforzi ne condizionano e limitano la lunghezza che comunemente oscilla tra i  $10 \div 20$  m e, raramente, raggiunge i 30 m.

Particolare attenzione va quindi data al numero e alle distanze fra gli appoggi, distanze che vengono determinate col criterio di minimizzare i valori dei momenti massimi come mostrato in *figura 1.33*.

Le sezioni più comunemente adottate sono quelle circolare (piena o cava), rettangolare o comunque poligonale, con dimensioni trasversali minime di  $30 \div 40$  cm.

Il fusto può essere cilindrico o tronco-conico con rastremazione dell'1.5%.

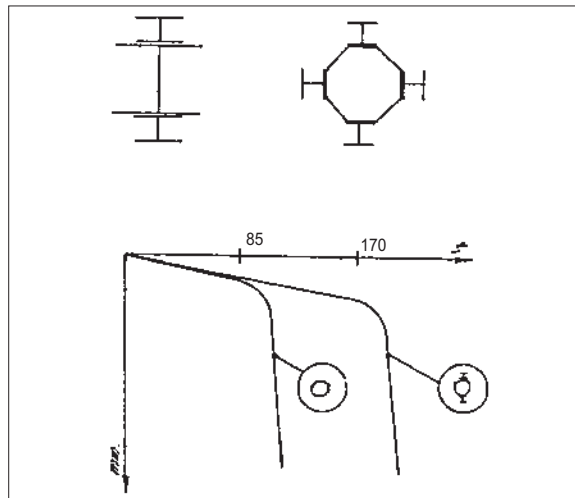


Figura 1.32. Esempi di profili per pali in ferro

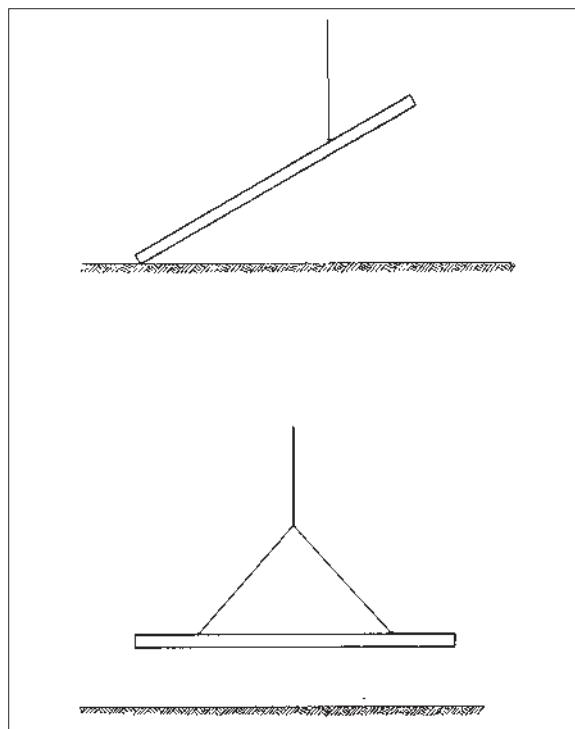
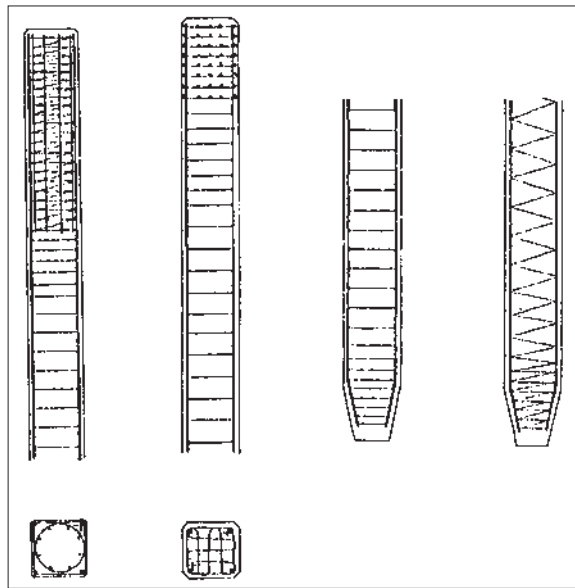
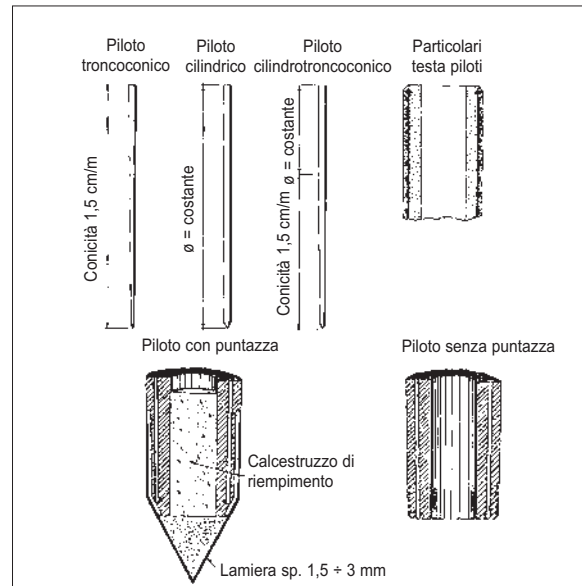


Figura 1.33. Pali in calcestruzzo prefabbricati, sollevamento, stoccaggio e trasporto



**Figura 1.34.** Pali prefabbricati in calcestruzzo, esempi di disposizioni costruttive dell'armatura



**Figura 1.35.** Esempio di palo centrifugato

Calcolo e disposizioni costruttive delle armature ricalcano le prescrizioni regolamentari sui pilastri in c.a.

In particolare, deve essere disposta un'armatura longitudinale di sezione non inferiore all'1% della sezione del palo. L'armatura trasversale formata da staffe o da spirali presenta interassi o passi molto ridotti alle due estremità (vedi *figura 1.34*). Ciò nonostante è utile l'uso dei cuscinetti di protezione in fase di battitura. Il getto del calcestruzzo ad alta resistenza ( $40 \div 50$  MPa), viene effettuato in casseforme metalliche. La compattazione può essere migliorata mediante vibratori (pali vibrati) ad alta frequenza ( $100 \div 200$  HZ) posti sulla cassaforma oppure appoggiando quest'ultima su cavalletti vibranti.

Un altro tipo di palo prefabbricato è il palo centrifugato, cilindrico o più generalmente troncoconico ( $1.5$  cm/m), che è caratterizzato dalla sezione anulare, con spessore dell'anello variabile fra  $1/6 \div 1/4$  del diametro esterno e dalle particolari modalità esecutive del getto.

La cassaforma metallica è costituita da due gusci cilindrici semicircolari: posta l'armatura (vedi disposizioni costruttive prima citate) e il calcestruzzo nella parte inferiore di uno dei due gusci si chiude la cassaforma e la si immette nella centrifuga.

Per effetto della elevata velocità di rotazione e dell'accelerazione centrifuga il calcestruzzo si dispone sul perimetro della cassaforma e si compatta. La compattazione è resa migliore dalla migrazione dell'acqua di impasto verso l'interno del palo, per effetto del minor peso specifico rispetto al cemento e agli inerti.

Il tempo di centrifugazione, dell'ordine di 10 minuti, è funzione della velocità di rotazione (circa 500 giri al minuto), dello spessore dell'anello da ottenere e della qualità del calcestruzzo. Terminata l'operazione si lascia stagionare il palo per 24 ore nella cassaforma oppure si accelera il processo adottando la stagionatura a vapore. La *figura 1.35* mostra un esempio di palo centrifugato.

Infine come ultima tipologia di palo prefabbricato in calcestruzzo si hanno i pali precompressi, che vengono adottati quando si temono formazioni di fessure, sia per effetto delle operazioni di trasporto, sia a causa di sforzi di trazione permanenti, in modo particolare qualora i pali siano posti in opera in ambienti aggressivi. La precompressione, dell'ordine di  $4 \div 5$  MPa, è ottenuta con i classici metodi: fili aderenti o cavi scorrevoli.

### 1.5.2. PALI INFISSI GETTATI IN OPERA

Sono pali ottenuti senza asportazione di terreno mediante l'infissione per battitura di una cassaforma metallica (recuperabile o no) con punta a perdere, in metallo o calcestruzzo.

### 1.5.2.1. Il palo Franki

Il palo Franki è un palo gettato in opera entro cassaforma infissa con espansione alla base. Posto il tubo forma in verticale sul piano campagna si introduce uno strato di sabbia e ghiaia o di calcestruzzo magro, per un'altezza di tre volte il diametro interno (vedi *figura 1.36*).

L'azione del maglio e la reazione del terreno sottostante permettono la formazione di un tappo compatto e impermeabile che aderisce perfettamente al tubo.

L'infissione avviene quindi tramite l'azione di trascinamento del tappo soggetto ai colpi di maglio. Raggiunta la profondità desiderata si solleva il tubo e lo si fissa alla macchina in modo da impedirne la discesa, quindi si espelle parzialmente il tappo sotto l'azione del maglio.

L'altezza del tappo che rimane nel tubo deve essere sufficiente ad evitare infiltrazioni di acqua o di fango, ma non tanto da poter nuovamente trascinare il tubo per aderenza. Il controllo dello spessore è effettuato mediante linee di riferimento tracciate sulle funi che portano il tubo e su quella a cui è appeso il maglio.

Si inizia quindi il getto del bulbo di base immettendo e battendo volta per volta piccole quantità di calcestruzzo magro. Il basso valore del rapporto acqua – cemento è inteso a evitare che il maglio (diametro di 20 ÷ 40 cm) affondi nel calcestruzzo anziché costringerlo a uscire dal tubo. La quantità di calcestruzzo introdotta varia dai 10 ÷ 20 litri per ogni colpo di maglio e viene mano a mano ridotta finché siano necessari 2-3 colpi di maglio per l'espulsione di una sola carica.

Il getto del fusto si esegue normalmente per gradi e per battitura. Si immette del calcestruzzo asciutto e si solleva parzialmente (20 ÷ 50 cm) il tubo tenendo premuto il calcestruzzo con il maglio.

La quantità di calcestruzzo introdotta di volta in volta è tale che, sollevato il tubo, il volume residuo (nel tubo) sia ridotto in modo che l'azione del maglio si risenta soprattutto nel calcestruzzo fuori del tubo e non in quello interno; si evita in tal modo che l'energia di battitura anziché compattare il primo, compatti il calcestruzzo nel tubo e si disperda in lavoro di deformazione del tubo.

In altri casi, il getto del fusto avviene introducendo direttamente tutto il calcestruzzo necessario per la formazione del palo. La consistenza del calcestruzzo deve essere fluido – plastica in modo da evitare discontinuità di getto e poter fare affidamento ai più alti valori di pressione che competono a una colonna di calcestruzzo completamente fluida.

Particolare attenzione va fatta ai pericoli di danneggiamento e taglio durante il getto del fusto del palo. Questi pericoli aumentano con la profondità, tanto più in presenza di terreni poco permeabili. In questi ultimi, infatti, le pressioni dovute all'infissione del tubo si tramutano in incremento della pressione interstiziale e, in definitiva, in un aumento della pressione "esterna" sul calcestruzzo.

La presenza dell'armatura metallica, a ridosso della superficie interna del tubo, riduce di molto l'entità del fenomeno impedendo l'azione di trascinamento del tubo in fase di risalita. La battitura seguente annulla l'effetto della spinta del terreno e permette l'espansione del calcestruzzo.

### 1.5.2.2. Il palo simplex

L'infissione della cassaforma metallica (recuperabile) avviene mediante battitura alla testa del palo. L'avanzamento è facilitato dalla presenza di una punta metallica che, raggiunta la profondità voluta, viene aperta in modo da consentire il getto del calcestruzzo ed il recupero della cassaforma.

In altri casi la punta metallica è sostituita da una puntazza a perdere in calcestruzzo. Il fusto del palo si esegue immettendo direttamente nello scavo tutto il calcestruzzo, di consistenza fluido – plastica, necessario per l'esecuzione del palo.

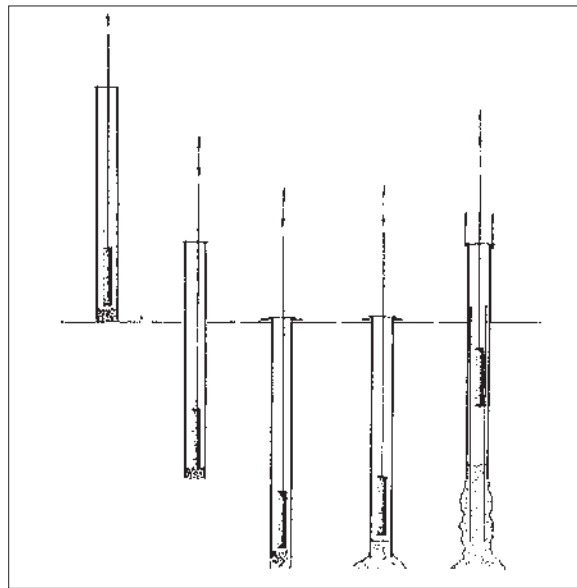
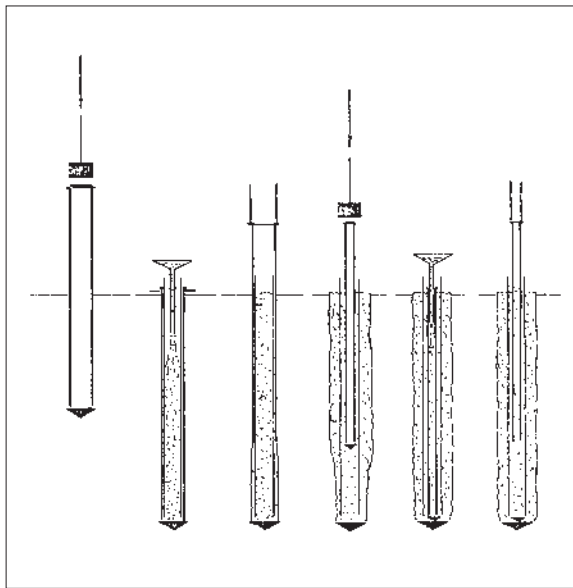


Figura 1.36. Fasi esecutive del palo Franki



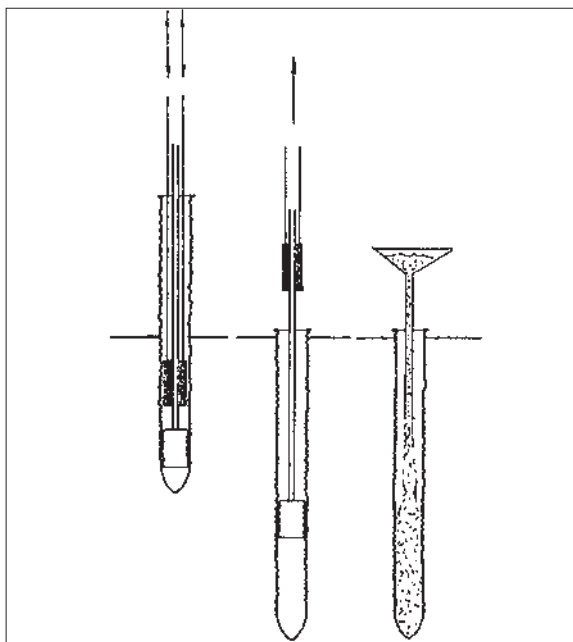
**Figura 1.37.** Fasi esecutive di un palo duplex

Durante il getto è necessario vibrare il calcestruzzo e battere la cassaforma per evitare discontinuità di getto.

#### 1.5.2.3. Il palo duplex e il palo pressato

Si procede come per l'esecuzione del palo simplex. A getto ultimato si infigge una cassaforma di dimensioni ridotte spingendo sotto e sui lati il calcestruzzo fresco già presente. Quindi, si esegue il getto del fusto (vedi figura 1.37). Si ottiene così un palo di maggior diametro e di maggior portata anche in considerazione della maggior compattazione del terreno.

Qualora il terreno resistente sia solo alla base del palo, l'esecuzione dei pali duplex non porta ovviamente grossi vantaggi. Si preferisce, in tal caso, ricorrere ai pali pressati, ovvero pali di tipo simplex con espansione alla base.



**Figura 1.38.** Fasi esecutive del palo Raymond

#### 1.5.2.4. Pali infissi con cassaforma non recuperabile: pali Raymond

I pali Raymond vengono eseguiti per battitura al fondo di un tubo ondulato in lamiera sottile. L'infissione avviene agendo col maglio su un mandrino espandibile sagomato (vedi figura 1.38).

Raggiunta la profondità voluta, si chiude il mandrino, si estrae e si esegue il getto.

La presenza del tubo in opera, oltre a collaborare alla resistenza, si rivela utile qualora si temano dilavamenti dovuti a forti correnti d'acqua.

Pali simili nella concezione al palo Raymond sono il palo Multiton (con rivestimento definitivo in acciaio a due sezioni) ed il palo Lacor (con lamierino corrugato e fondello in acciaio battuto tramite mandrino, analogamente al palo Raymond).

## 1.6. CRITERI PER LA SCELTA DEI TIPI DA ADOTTARE

Per la scelta del tipo di palo, un aspetto fondamentale da tenere presente sono le modificazioni che il palo induce nel terreno.

Le condizioni stratigrafiche del sito sono pertanto determinanti nella scelta del palo, quali ad esempio la presenza o meno di strati portanti e la loro profondità la presenza o meno di trovanti e di falde artesiane.

Un altro aspetto di fondamentale importanza è il tipo di sovrastruttura, che in funzione dei carichi unitari applicati determina la capacità portante richiesta al singolo palo, in modo che si evitino, nei limiti del possibile:

- I plinti con molti pali;

- lo scarso utilizzo del materiale dei pali (tenendo conto che di norma la resistenza ammissibile del calcestruzzo deve essere non superiore a 5 MPa);
- una eccessiva variazione di diametri e profondità per adeguare la palificata alla variabilità dei carichi.

La presenza di sforzi taglienti e/o flettenti secondo direzioni particolari può consigliare l'adozione di sezioni rette di forma non circolare che possono ottenersi solo con pali trivellati a fango.

Le soggezioni esecutive possono essere le più disparate. Per le opere in mare su alti fondali i pali che meglio si eseguono da pontone sono quelli prefabbricati infissi, obbligatoriamente d'acciaio per i forti carichi trasversali e assiali.

Nei cantieri con pochi pali o in siti urbani, la trivellazione a fango può essere controindicata rispetto ad altre soluzioni, per gli oneri di installazione o per la difficoltà di allontanare detriti fangosi.

I tipi infissi per battitura sono controindicati in adiacenza a strutture sensibili alle vibrazioni e dove non sia sopportabile il rumore dei battipali.

Tutti i tipi tranne i micropali non si adattano ad essere eseguiti sotto edifici esistenti, sia per i rischi statici dati dalle modifiche, anche temporanee, introdotte nel terreno di fondazione, sia per la difficoltà di operare da scantinati o nelle immediate adiacenze di muri esistenti.

La seguente tabella 1/3 fornisce delle linee guida per quanto concerne le condizioni più favorevoli di applicazione dei differenti tipi di palo (Mascardi, 1975).

Dall'esame di tale tabella si possono trarre le seguenti considerazioni di carattere generale:

1. i pali più efficienti ed economici sono anche i meno versatili, cioè quelli che meno si prestano a raggiungere elevate profondità in qualunque condizione geotecnica;
2. non esiste un tipo di palo universale, ma una gamma estesa di tipi variamente idonei nelle diverse condizioni;
3. può capitare che diverse condizioni contraddittorie si assommino nello stesso caso, rendendo molto difficile una scelta soddisfacente, ovvero consigliando di sostituire ai pali altri tipi di fondazione.

**Tabella 1.3. Tipo di palo, condizioni geotecniche e campi di impiego preferenziali**

| Tipo di palo    |                      | Portate massime (kN) | Lunghezze (m) |          | Condizioni geotecniche                 |                         |                                                           | Campi di impiego preferenziali                                     |
|-----------------|----------------------|----------------------|---------------|----------|----------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
|                 |                      |                      | Massima       | Ottimali | Favorevoli                             | Sfavorevoli             | Contrarie                                                 |                                                                    |
| Pali infissi    | in c.a.              | 1000                 | 35(*)         | 6 ÷ 18   | sabbie sciolte, argille non sature     | argille compatte        | ciottoloni                                                | edilizia residenziale                                              |
|                 | in acciaio           | 30000                | 150 (*)       | –        | strati portanti molto profondi         | calcarenti tenere       | trovanti, strati duri di elevato spessore                 | opere marittime su alti fondali                                    |
|                 | Franki               | 1200                 | 35(*)         | 10 ÷ 20  | strato portante sotto terreno scadente | argille compatte        | strati profondi coesivi teneri, falde artesiane, trovanti | edilizia industriale media e residenziale                          |
|                 | Raymond              | 1200                 | 45(*)         | 20 ÷ 30  | sabbie sciolte                         | argille compatte        | trovanti                                                  |                                                                    |
| Pali trivellati | con tubo provvisorio | 15000                | 45            | 20 ÷ 30  | terreni eterogenei coesivi             | sabbie sotto falda (**) | strati alterni argillosi e sabbiosi sotto                 | grandi manufatti strali e ferroviari, edilizia industriale pesante |
|                 | a fango              | 20000                | 75            | 25 ÷ 40  | terreni sciolti medio-fini             | ghiaie poco sabbiose    | falde artesiane                                           |                                                                    |
|                 |                      | micropali            | 1000          | 75       | 20 ÷ 30                                | tutte                   | falde artesiane                                           | nessuna                                                            |

(\*) congiungendo in opera più elementi

(\*\*) tranne che per tubi vibroinfissi

## 1.7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Bachy (1992), *Interception of Pollution by Impervious Barrier*. Sancho de Avila Car Park, Barcellona, Spagna, Promotional literature. Parigi. Francia.