

Capitolo 4

Micropali Prefabbricati in Cemento Armato Centrifugato

4.1 Generalità

Il micropalo prefabbricato in cemento armato centrifugato impiega una nuova tecnologia di esecuzione brevettata dall'Ing. Francesco Catanese. Rispetto al tradizionale micropalo valvolato con armatura tubolare in acciaio gode di innumerevoli vantaggi sia di carattere tecnico che economico. Esso è costituito da un cilindro in calcestruzzo ad altissima resistenza, armato con tondini di ferro e spirale (diametri in base ai calcoli statici) centrifugato a 600 giri al minuto in una macchina centrifuga di 24 metri. Può essere prodotto in un unico pezzo oppure in pezzi più piccoli, avvitabili rapidamente mediante una vite speciale ad alta resistenza. Caratteristica sostanziale del micropalo prefabbricato è il sistema delle iniezioni, **senza bisogno di packer**, che permette un'esecuzione notevolmente più rapida dei micropali tradizionali. Le iniezioni vengono fatte attraverso dei tubi da ½ pollice inseriti nel getto e sporgenti dalla testa del palo, attraverso una semplice pompa di mandata della miscela cementizia senza bisogno di operai specializzati.

Nel palo vengono inseriti due tipi di tubi (Vedi Fig 4.1)

- Un tubo per le iniezioni di primo tempo, cioè per formare la cosiddetta “camicia”. Esso parte dalla testa del palo, raggiunge il fondo e comunica con l’esterno del palo tramite due valvole.
- Due tubi per le iniezioni di secondo tempo ad alta pressione. Anch’essi partono dalla testa del palo, e raggiungono il fondo, ma a differenza del precedente comunicano più volte con l’esterno del palo tramite inserti metallici cavi sui quali sono posizionate le valvole. Collegando, uno alla volta i tubi d’acciaio di secondo tempo con la pompa di mandata della miscela cementizia, si mettono in funzione contemporaneamente tutte le valvole che si trovano lungo il tubo. Il numero di tali tubi è variabile e dipende dalle scelte del progettista.

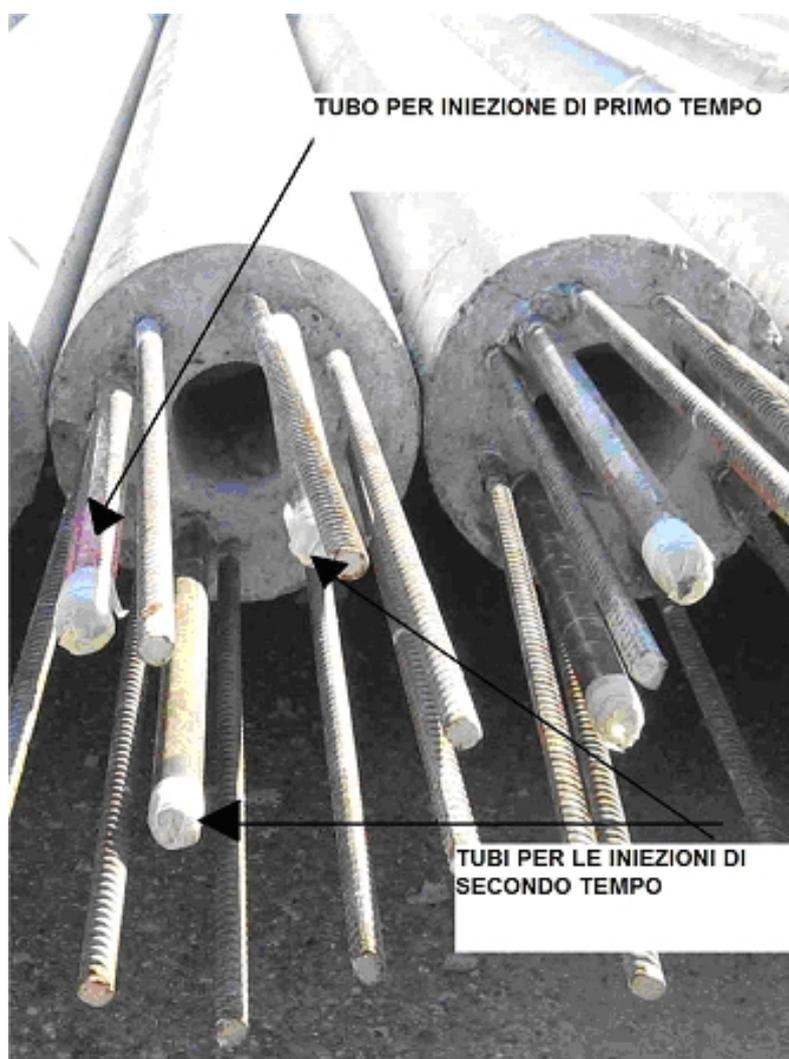


Figura 4.1 Testa dei Micropali Prefabbricati

VANTAGGI

- Riduzione drastica dei tempi di esecuzione
- Riduzione drastica dei costi
- Certezza della formazione della camicia
- Certezza della messa in funzione di tutte le valvole
- Impossibilità di manomissioni
- Migliore qualità del calcestruzzo del palo
- Maggiore protezione delle armature metalliche
- Minore deformazione assiale del palo e ridotti cedimenti di fondazione
- Maggiore resistenza rispetto all'instabilità dell'equilibrio elastico
- Facilità di accertamento delle dimensioni dei manufatti
- Maggiore aderenza camicia-palo
- Possibilità di essere installato in ogni tipo di terreno

4.2 Caratteristiche

Il Micropalo Prefabbricato nasce dalla solidarizzazione di due parti: il cilindro prefabbricato in cemento armato centrifugato e il successivo getto di intasamento a pressione, in una o più riprese, con miscela cementizia ad alta resistenza, opportunamente additivata in relazione alle caratteristiche del sottosuolo. La relativa leggerezza del palo permette di usare lo stesso mezzo meccanico sia per eseguire la perforazione che per l'installazione, cioè il semplice adagiamento del micropalo nel foro.

Esso gode di tutti i pregi del micropalo valvolato tradizionale. Infatti l'iniezione di malta iniettata in pressione consente una efficace bonifica della base di appoggio del micropalo, consolidando le zone che hanno subito allentamento tensionale per effetto del disturbo connesso alle operazioni di perforazione, con la creazione di un'espansione bulbare solidale alla punta dell'elemento rigido prefabbricato. Inoltre l'intasamento laterale con getto iniettato a pressione, permette una più efficace

permeazione del terreno e un migliore radicamento del palo alla formazione in cui viene installato. Infine, l'iniezione di secondo tempo, eseguita ad alta pressione, determina elevate coazioni tra la superficie laterale del micropalo ed il terreno circostante, dando luogo agli elevati valori di capacità portante risultati dalle prove di carico effettuate.

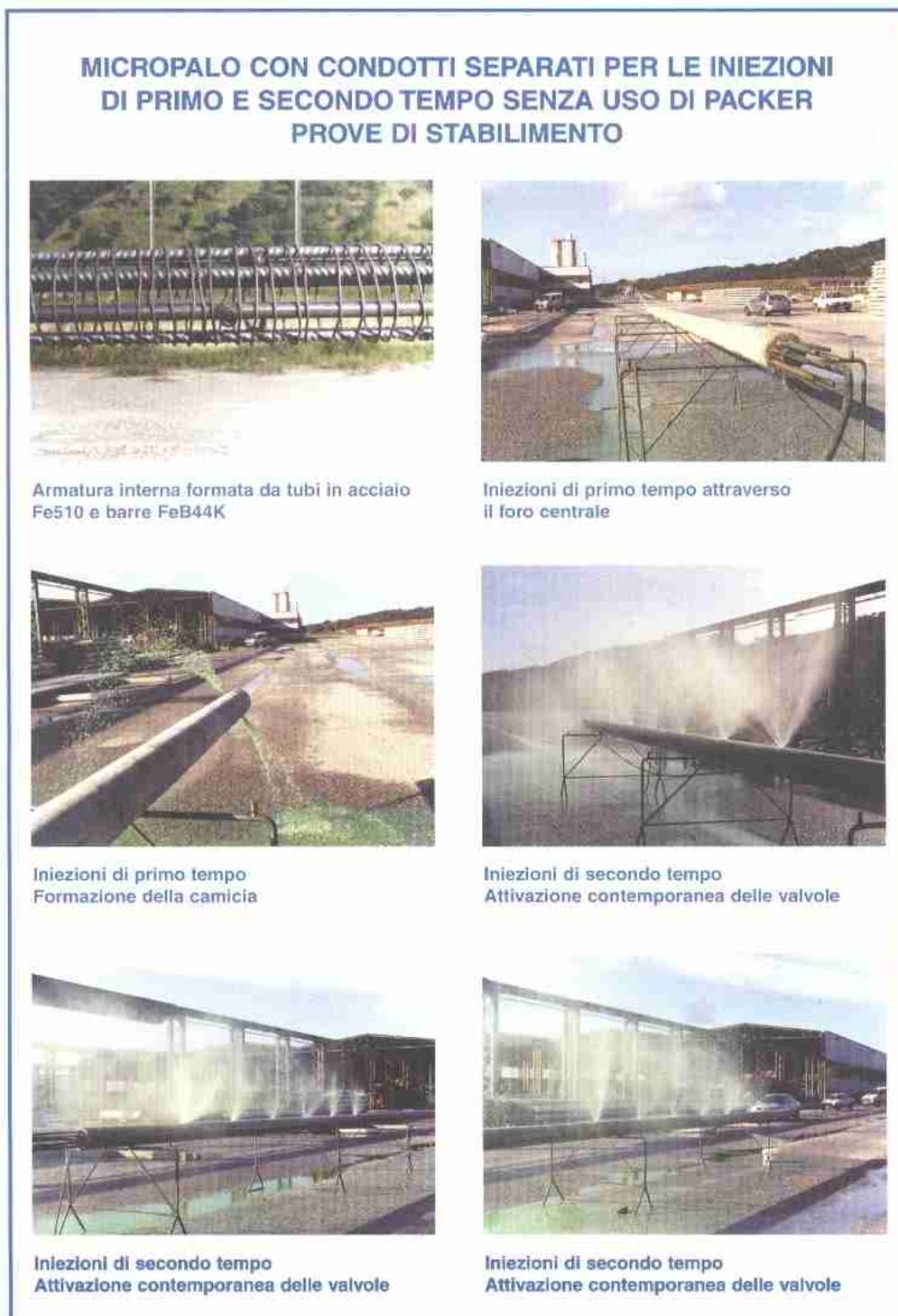


Figura 4.2 Prove di iniezione del Micropalo Prefabbricato

Rispetto al tradizionale micropalo valvolato con armatura tubolare, il Micropalo Prefabbricato gode, inoltre, di molteplici vantaggi, quali l'ottimizzazione dell'armatura a trazione, la rapidità e la facilità di messa in opera, la sicurezza di un prodotto prefabbricato. Le iniezioni di primo tempo, a bassa pressione, vengono effettuate attraverso un tubo in acciaio immerso nel getto, che raggiunge il fondo del palo. Le iniezioni di secondo tempo, ad alta pressione, vengono effettuate attraverso tubi in acciaio inseriti nel getto, comunicanti tramite inserti metallici cavi con i fori laterali del palo, nei quali vengono posizionate le valvole, collegando direttamente i tubi d'acciaio che fuoriescono dalla testa del palo con la pompa di mandata della malta, e mettendo in funzione quindi contemporaneamente tutte le valvole **senza uso di packer**.



Figura 4.3 – Particolare di una valvola di iniezione di secondo tempo

Le tecniche che si adottano attualmente per i micropali consistono nell'usare un'unica via sia per le iniezioni di primo tempo sia per quelle di secondo tempo. Si introduce nel foro centrale del palo un attrezzo, il packer, tramite il quale si inietta a bassa pressione la malta cementizia (iniezioni di primo tempo). In tal modo la malta viene immessa nel terreno direttamente attraverso il foro alla base del micropalo, creando un bulbo in corrispondenza della base di appoggio, e riempiendo, per risalita, l'intercapedine tra la parete del micropalo e quella del foro (formazione della camicia). Dopo circa 12 - 24 ore si introduce nello stesso foro, partendo dal basso, l'attrezzo di iniezione (il packer), il quale è provvisto di un manicotto di gomma speciale che gonfiandosi impedisce alla malta di risalire lungo il palo. Si inizia quindi a immettere malta ad alta pressione, la quale non potendo risalire lungo il palo, mette in funzione le valvole laterali. Tale operazione si deve ripetere per tutte le coppie di valvole presenti nel palo con notevoli tempi di esecuzione e costi elevati. Tre operai riescono ad effettuare, a regola d'arte, le iniezioni di secondo tempo solo su un numero esiguo di micropali. La nuova tecnologia riduce in maniera drastica i tempi di esecuzione e quindi i costi delle iniezioni. Inoltre permette di esercitare un maggior controllo sulla reale messa in funzione delle valvole di iniezione.

Il nuovo procedimento consiste nel collegare la pompa di mandata della malta direttamente ai tubi in acciaio che sporgono dalla testa del palo. (Già messo in opera e senza uso di packer). Attraverso il tubo principale si effettuano le iniezioni di primo tempo. Dopo circa 12 ore si procede alle iniezioni di secondo tempo, collegando alla pompa di mandata della malta i restanti tubi in acciaio che sono comunicanti con le valvole di iniezione poste sulla superficie laterale del micropalo. Da prove eseguite, presso lo stabilimento SAMER S.p.A. Industria Prefabbricati Centrifugati Precompressi, su micropali campione, e dalla pratica derivante ormai dall'ampio uso di questo prodotto, tutte le valvole si attivano contemporaneamente. A causa dell'elevata pressione, la malta rompe la camicia e forma delle sbulbature nel terreno.

La fase di iniezione di secondo tempo può essere ripetuta più volte a seconda della natura del sottosuolo. In tal modo riescono a ottenere coazioni

tra micropalo prefabbricato e terreno laterale di 10-20 kg/cm² e diametri dei bulbi di 30-80 cm, a seconda del tipo di terreno e delle pressioni e delle modalità di iniezione.

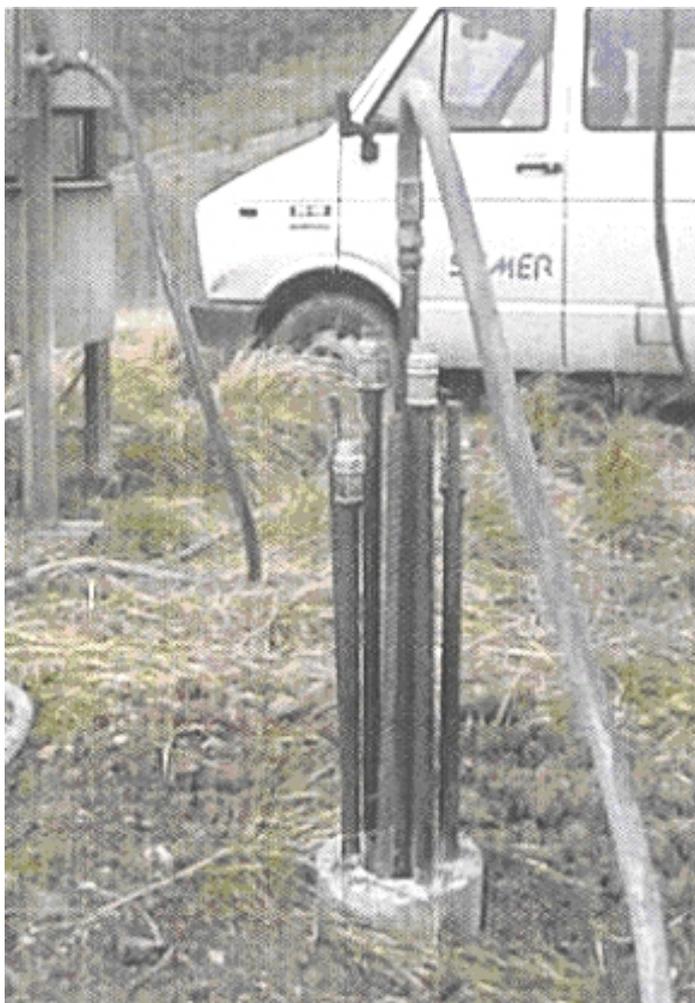


Figura 4.3 Particolare Iniezione di primo tempo



Figura 4.4 Particolare testa micropalo con cinque tubi di iniezione

4.3 Qualità dei Micropali Prefabbricati

Come già detto, nella costruzione dei pali di fondazione si lamentano spesso difetti esecutivi nella posa in opera. Tra questi, quelli che ricorrono più soventemente sono: vuoti alla base e lungo il fusto del palo, inclusioni di materiali estranei e vespai. I motivi più frequenti sono gli effetti arco, dovuti a incrostazioni all'interno del tubo di rivestimento e a difficoltà di penetrazione del calcestruzzo nell'intercapedine tra tubo di rivestimento e armature metalliche ed attraverso gli interferri. Ancora più gravi sono le inclusioni di materiali estranei, che possono aversi per effetto di collasso della parete del foro durante le operazioni di scavo senza rivestimento e anche per fori rivestiti durante il getto e, soprattutto, nel corso dell'estrazione del tubo di rivestimento. Per quanto attiene ai pali eseguiti in presenza di fango bentonitico, i difetti più comuni riguardano la degradazione del calcestruzzo costituente la base per la presenza di detriti di scavo; la degradazione del calcestruzzo del fusto per dilavamento del cemento, per segregazione dei componenti, per contaminazione e rimescolamento con i fanghi e i materiali in sospensione (soprattutto durante interruzioni prolungate dei getti).

La gran parte di questi difetti non viene rilevata, o almeno non viene denunciata al committente, con la conseguenza che la mancanza di

continuità nel getto del calcestruzzo crea le premesse per una rapida corrosione dell'armatura metallica compromettendo gravemente la funzionalità globale della palificata.

Nei micropali prefabbricati, i problemi di continuità e qualità del getto di calcestruzzo e di protezione delle armature metalliche sono evidentemente inesistenti. Il micropalo prefabbricato, essendo infatti prodotto in stabilimento, consente la possibilità di un accurato controllo con un esame visivo diretto, sia durante il ciclo costruttivo, che in fase di stoccaggio e di installazione, mentre il micropalo gettato in opera e i pali trivellati tradizionali non offrono nessuna garanzia. Per le stesse ragioni, il micropalo si presenta invulnerabile, e in grado di resistere ad ogni tipo di ambiente, anche i più aggressivi. Infatti, la compattezza del calcestruzzo centrifugato e le sue elevate caratteristiche di resistenza garantiscono un'efficace protezione delle armature metalliche nei riguardi della corrosione, anche in presenza di elementi aggressivi nel sottosuolo. Molto importante risulta, inoltre, la maggiore aderenza che si stabilisce tra la camicia ed il fusto del micropalo in calcestruzzo, rispetto a quella tra la stessa camicia e la superficie laterale dell'armatura dei micropali realizzata con tubolari in acciaio. Questa circostanza è molto importante allorché il terreno intorno ai micropali debba essere rimosso, come avviene per esempio nelle berlinesi. Nei micropali con tubolari in acciaio, infatti, molto spesso la camicia si stacca dal tubolare mettendolo a nudo e rendendone facile la corrosione. Questo grave inconveniente è fugato nei micropali prefabbricati, come evidenziato sperimentalmente, mediante le prove di carico a sfilamento sui tiranti prefabbricati in c.a.c..



Figura 4.5 Anas spa. SS 106 Jonica Realizzazione Svincolo Malderiti e Asta di Raccordo Aeroporto di Reggio Calabria Reggio Calabria. Installazione Micropalo Prefabbricato nelle fondazioni delle pile del Ponte “Madonna del Buon Consiglio”

4.4 Possibilità di controllo dimensionale

Le opere di fondazione, per il fatto di essere realizzate nel sottosuolo, sono celate all'osservazione diretta dei tecnici incaricati dei controlli e delle misurazioni e sottratte al loro giudizio critico. Ciò rende più difficili i controlli da parte delle stazioni appaltanti, e può dare luogo a controversie giudiziarie con le ditte costruttrici. Sotto questo aspetto i micropali prefabbricati danno possibilità di un accurato controllo delle dimensioni reali dei manufatti realizzati, oltre che sulla qualità dei materiali, e rendono superflui controlli quali la diagrafia sonica e l'ammittenza meccanica, di cui si fa uso sempre più spesso, per verificare la continuità dei pali trivellati.

4.5 Resistenza nei confronti dell'instabilità dell'equilibrio elastico

Uno dei problemi dei micropali deriva dall'instabilità dell'equilibrio elastico (carico critico di punta) che si verifica quando i micropali vengono scalzati per altezze rilevanti, oppure, meno frequentemente, se sono immersi per lunghezze rilevanti in terreni dalle caratteristiche meccaniche estremamente scadenti.

Il carico critico di punta può essere valutato attraverso la relazione:

$$N_p (kg) = A \sqrt{E_t (kg/cm^2)}$$

Nella tabella 4.1 sono riportati i valori del coefficiente A, relativamente ad alcune sezioni di micropali valvolati correntemente in uso, per un modulo di Young dell'acciaio pari a 2100000 kg/cmq.

$D_{est} (cm)$	$D_{int} (cm)$	$J_x (cm^4)$	A	λ_0
6,03	4	52	20890	642
7,61	5,6	116	31217	785
10,1	8,5	255	46242	955
10,1	9	189	39818	887
8,89	7,2	175	38306	870
8,8	7,2	162	36941	854
10,1	9,4	128	32733	804

Tabella 4.1 - Parametri A e λ_0 relativi al calcolo del carico critico per l'instabilità laterale per alcuni tubi usati per micropali tradizionali

D_{est} = diametro esterno del tubo.

D_{int} = diametro interno del tubo.

J_x = momento d'inerzia della sezione di tubo.

Avendo assunto per il calcestruzzo del micropalo prefabbricato un modulo di Young pari a 260000 kg/cm² e considerando che il momento d'inerzia della sezione di calcestruzzo è pari a 9.429 (cm⁴), mentre quello dell'armatura metallica è di 290 (cm⁴), si ottiene un valore del coefficiente **A** ben al di sopra di quelli riportati in tabella 4.1 per i micropali tradizionali. Per micropali prefabbricati $A = 110.626$

Per quanto attiene alla lunghezza d'onda, essa può essere espressa dalla relazione

$$\lambda(\text{cm}) = \lambda_0 \sqrt[4]{1/E_t (\text{kg/cm}^2)}$$

Il valore ottenuto per il micropalo prefabbricato ($\lambda_0 = 1478$) denuncia una chiara maggiore resistenza all'instabilità rispetto ai micropali tradizionali, i cui valori di λ_0 sono riportati nella stessa tabella 4.1 precedente.

La maggiore affidabilità dei micropali prefabbricati rispetto a quelli tradizionali per quanto attiene alla resistenza al carico di punta è perciò evidente.

4.6 Calcolo della capacità portante dei micropali prefabbricati

La portata dei micropali può essere valutata affidabilmente sulla base di prove di carico. Per tali opere, infatti, le modalità di installazione possono essere fortemente influenti sui valori di capacità portante. Tuttavia, in fase progettuale è necessario avere una previsione dei valori di portata utile da controllare eventualmente in seguito attraverso la sperimentazione. In tale ottica la capacità portante del micropalo è calcolata come somma della portata di punta, Q_p , e della portata laterale, Q_l .

In linea generale, per i micropali viene ordinariamente ritenuto che la portata di punta sia trascurabile rispetto a quella laterale, ma nel caso dei Micropali Prefabbricati la notevole capacità portante ampiamente evidenziata da prove di carico e l'ordinario diametro di perforazione di 240 mm permettono di considerare nei calcoli anche il contributo alla punta.

E' possibile usare la teoria di Bustamante e Doix, per le evidenti analogie con i micropali valvolati. [BUSTAMANTE M., DOIX B. (1985) *Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés*. Bull.Liaison Lab. Ponts et Chaussées, 140, pp 75-95]

La portata laterale è data dalla seguente equazione

$$Q_l = \tau_{\text{lim}} \pi D_e H$$

D_e = diametro efficace del palo

$D_e = \alpha D$

D = Diametro di perforazione (in genere 0,24 mt.)

τ_{lim} = resistenza a taglio lungo la superficie del palo

H = lunghezza della parte valvolata iniettata ad alta pressione.

Per quanto attiene al parametro α , esso può essere stimato secondo la tabella 4.2 proposta da Bustamante e Doix, relativa all'impiego di micropali valvolati.

Tipo di terreno	α
roccia alterata	1,2
marna argillosa	1,8
ghiaia	1,8
ghiaia con sabbia	1,6 - 1,8
sabbia con ghiaia	1,5 - 1,6
sabbia e sabbia limosa	1,4 - 1,5
limo	1,4 - 1,6
argilla	1,8 - 2,0

Tabella 4.2 –Valori di α secondo Bustamante e Doix

Per quanto riguarda la resistenza tangenziale limite, τ_{lim} , si rileva che l'uso delle formule tradizionali relative ai pali può portare a serie difficoltà di valutazione dei parametri coinvolti nelle formulazioni relative. Il rapporto tra la tensione orizzontale efficace, σ'_h , e quella verticale, σ'_v , è infatti fortemente influenzato dalle modalità di installazione del micropalo. Più ragionevolmente, si può fare maggiore affidamento a quanto emerso da risultati di prove di carico su micropali, pali iniettati e tiranti di ancoraggio per avere indicazioni progettuali più affidabili. A tal proposito, i dati raccolti da Bustamante e Doix, nonostante una consistente dispersione dei punti sperimentali, rivelano una dipendenza del valore di τ_{lim} dalla resistenza penetrometrica nella Standard Penetration Test, misurata attraverso il numero di colpi necessari alla penetrazione del campionatore per 30 cm nel terreno (N_{SPT}).

Il carico di esercizio da affidare al palo in condizioni di compressione semplice è dato dal valore minore tra i due carichi che seguono:

- la capacità portante del micropalo divisa per un opportuno coefficiente di sicurezza, assunto dal progettista (non inferiore a 2.5 secondo la vigente normativa);
- il carico ammissibile connesso alla massima tensione di compressione nel conglomerato, che può essere calcolata in rapporto alle dimensioni del palo ed alla resistenza a compressione semplice della sezione in cemento armato.

4.7 Accorciamento elastico e cedimento della fondazione

I micropali prefabbricati presentano un'ulteriore innovazione rispetto ai tradizionali micropali radice ed ai micropali valvolati.

I micropali radice sono gettati in sito sotto una pressione che non supera le 6 atm, pertanto hanno minore capacità portante rispetto ai tub-fix. Tuttavia, poiché l'azione resistente si esercita lungo l'intera superficie laterale del palo, l'accorciamento elastico risulta inferiore ai tub-fix, e il cedimento assai contenuto: elementi che rendono proprio l'impiego di questi micropali in problemi di sottofondazione.

I micropali tubfix sono realizzati con un'armatura tubolare attraverso la quale viene iniettata pasta (o malta) in più fasi successive raggiungendo pressioni elevate (almeno 20 atm) che non possono realizzarsi che negli strati profondi, ove viene realizzato un bulbo il quale esplica l'azione resistente. Il fusto metallico superiore, la cui area trasversale metallica è generalmente di 15-20 cmq, è pertanto soggetto ad un notevole accorciamento elastico, che può pregiudicarne l'uso in problemi di sottofondazione. La portata laterale unitaria dei pali tubfix è maggiore di quella dei pali radice, mediamente di circa 5 t/mq, pressoché indipendentemente dalla resistenza iniziale del terreno.

I micropali prefabbricati hanno il pregio di unire i vantaggi degli altri tipi di micropali. Essi, infatti sono caratterizzati da una capacità portante superiore a quella dei micropali valvolati, e, come evidenziato dalle prove di carico addirittura paragonabile a quella di pali di medio diametro, e presentano una deformabilità estremamente ridotta. Un confronto di deformabilità con i micropali valvolati tubfix può essere condotto nell'ipotesi di un modulo di Young di 206.000 N/mq per l'acciaio e di 27.000 N/mq per il calcestruzzo centrifugato del micropalo prefabbricato. In corrispondenza di tensioni di lavoro pari a quelle massime ammissibili per i due materiali (che sono di 240 N/mm² per l'acciaio Fe 510 e di 10,3 N/mm² per il calcestruzzo) si ha una deformazione di circa 1,2‰ per il micropalo valvolato tradizionale e di solo lo 0,5 ‰ per il micropalo prefabbricato.

4.8 Calcolo rapido del carico di esercizio del Micropalo Prefabbricato

Assumendo un coefficiente di sicurezza pari a quello minimo di normativa (2.5), il carico di esercizio può essere calcolato con la seguente procedura:

- si ricerca il valore del parametro T dalla tabella 4.3, in funzione del valore N_{SPT} e della lunghezza del tratto valvolato iniettato ad alta pressione;
- dal grafico 4.1 si ricava il carico di esercizio in funzione del valore di T e del tipo di terreno in cui il micropalo viene installato.

N_{SPT}	Lunghezza della parte valvolata iniettata ad alta pressione						
	4	6	8	10	12	14	16
6	12,8	19,2	25,6	32	38,4	44,8	51,2
8	14,4	21,6	28,8	36	43,2	50,4	57,6
10	16,0	24,0	32,0	40	48	56,0	64,0
12	17,6	26,4	35,2	44	52,8	61,6	70,4
14	19,2	28,8	38,4	48	57,6	67,2	76,8
16	20,8	31,2	41,6	52	62,4	72,8	83,2
18	22,4	33,6	44,8	65	67,2	78,4	89,6
20	24,0	36,0	48,0	60	72,0	84,0	96,0
22	25,6	38,4	51,2	64	76,8	89,6	102,4
24	27,2	40,8	54,4	68	81,6	95,2	108,8
26	28,8	43,2	57,6	72	86,4	100,8	115,2
28	30,4	45,6	60,8	76	91,2	106,4	121,6
30	32,0	48,0	64,0	80	96,0	112,0	128,0
32	33,6	50,4	67,2	84	100,8	117,6	134,4
34	35,2	52,8	70,4	88	105,6	123,2	140,8
36	36,8	55,2	73,6	92	110,4	128,8	147,2
38	38,4	57,6	76,8	96	115,2	134,4	153,6
40	40,0	60,0	80,0	100	120,0	140,0	160,0
42	41,6	62,4	83,2	104	124,8	145,6	166,4
44	43,2	64,8	86,4	108	129,6	151,2	172,8
46	44,8	67,2	89,6	112	134,4	156,8	179,2
48	46,4	69,6	92,8	116	139,2	162,4	185,6
50	48,0	72,0	96,0	120	144,0	168,0	192,0

Tabella 4.3 Valore del parametro T

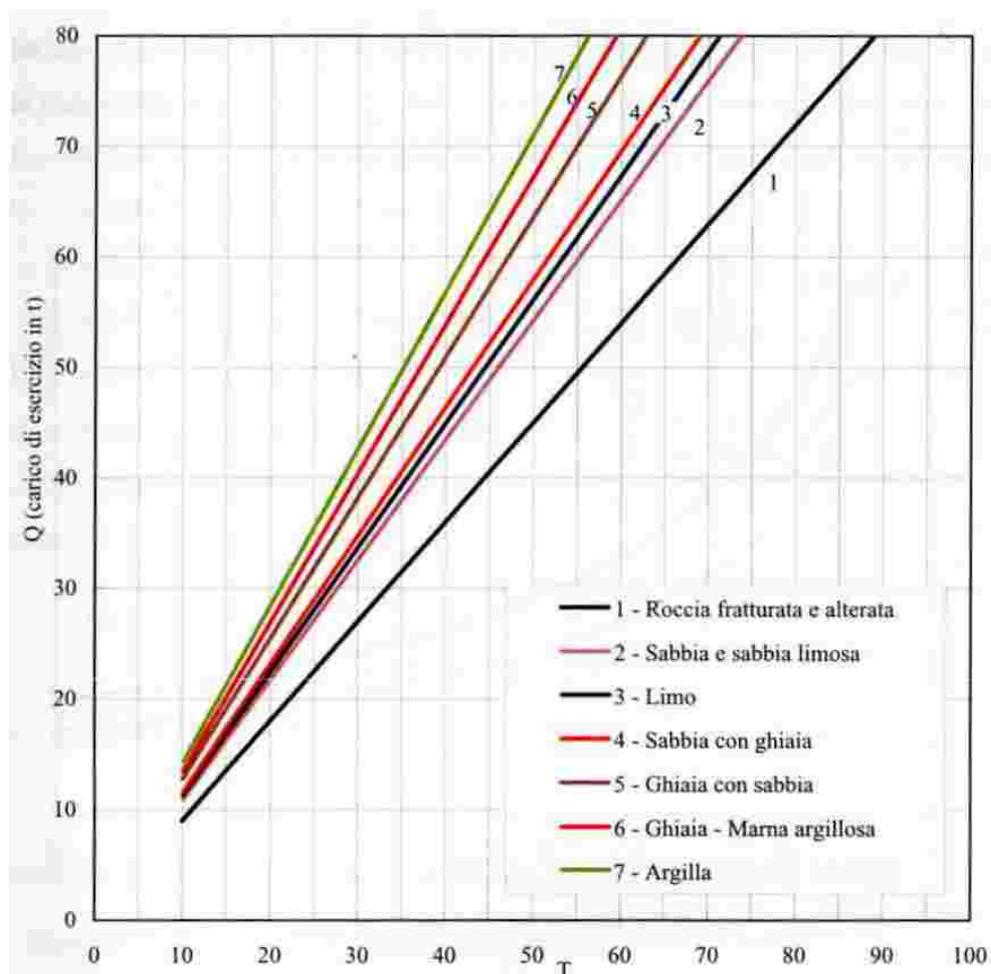


Grafico 4.1 - Carico di esercizio di un Micropalo Prefabbricato in c.a.c. in funzione del parametro T e del tipo di terreno

Il tratto minimo di palo da iniettare ad alta pressione (H) può essere valutato in maniera rapida con l'ausilio del grafico 4.2, in cui è stato assunto un coefficiente di sicurezza pari a quello minimo di normativa (2.5). Procedendo a vantaggio di sicurezza, non sono stati considerati i contributi di resistenza a compressione della camicia, del bulbo iniettato ad alta pressione e del calcestruzzo di riempimento, che tuttavia non sono affatto trascurabili. Il valore $\alpha = D_e/D_f$ va fissato in funzione della natura del terreno in cui il micropalo è installato, con l'aiuto della tabella 4.2.

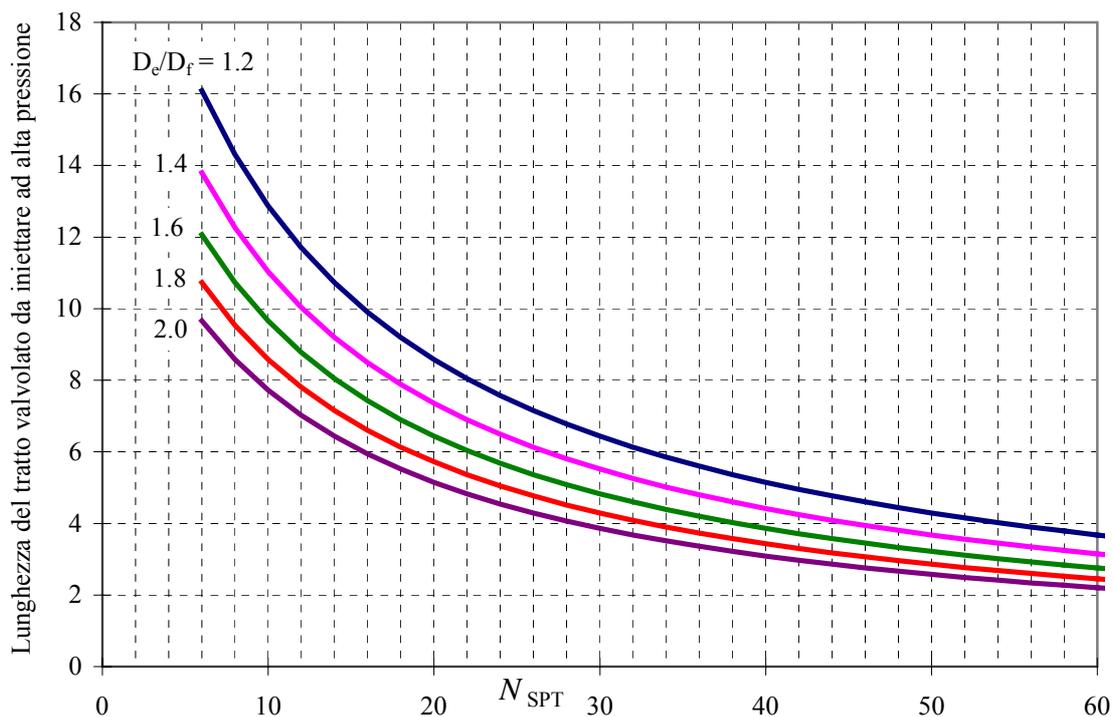


Grafico 4.2 - Lunghezza minima della parte valvolata iniettata ad alta pressione

4.9 Azioni taglianti trasmesse in fondazione

In linea generale la sovrastruttura trasmette in fondazione un carico che ha una componente orizzontale H . Se la struttura di fondazione è di tipo profondo, realizzata con micropali, il modo più razionale per assorbire tale componente orizzontale è quello di disporre i micropali con una certa inclinazione in modo che la forza orizzontale sia assorbita mediante sforzo normale, oppure aumentando l'armatura nella testa del palo.

In presenza di micropali disposti verticalmente, il carico limite orizzontale può essere calcolato mediante la teoria di Broms in riferimento alla condizione di palo lungo incastrato nella platea di fondazione (Fig 4.6).

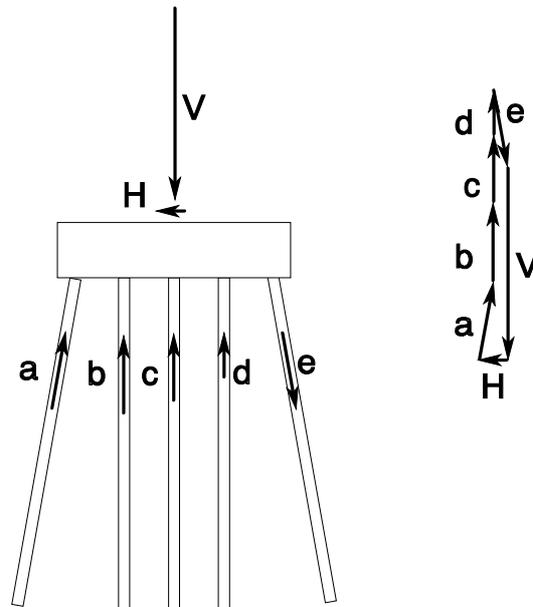


Figura 4.6 Pali incastrati nel plinto di fondazione

Il carico limite per terreno dotato di solo attrito è dato dalla relazione:

$$H_{\text{lim}} = \frac{3}{2} \left(\frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) \gamma D_e \sqrt[3]{\left(2 \frac{M_p}{\gamma D_e} \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \right)^2}$$

H_{lim} carico limite orizzontale del palo

ϕ' angolo di attrito del terreno in termini di tensioni effettive

γ peso dell'unità di volume del terreno

D_e diametro efficace del palo

M_p momento di plasticizzazione del palo

Per terreno puramente coesivo si può usare la formula:

$$H_{\text{lim}} = 3 c_u D_e^2 \left(\sqrt{81 + 4 \frac{M_p}{c_u D_e^3}} - 9 \right)$$

c_u coesione non drenata del terreno.

4.10 Materiali impiegati nella realizzazione dei Micropali Prefabbricati

- Calcestruzzo cementizio della classe Rck > 500 kg/cm²
- Armatura metallica longitudinale costituita da tondini in acciaio ad aderenza migliorata tipo FeB 44 k disposta lungo una circonferenza coassiale al palo, corredata da distanziatori dalla superficie esterna; da staffe f_i 8 disposte a spirale con passo 8 -10 cm;
- Tubi di iniezione da ½ pollice in acciaio Fe 430
- Valvole d'iniezione in acciaio tipo Fe 430
- Speciali dispositivi filettati in acciaio Fe 510 per l'unione di pezzi corti e la continuità delle iniezioni di primo e secondo tempo.

4.11 Processo costruttivo dei Micropali Prefabbricati

Il ciclo di prefabbricazione dei Micropali Prefabbricati e dei controlli di qualità annessi è articolato nel modo che segue:

- Vengono disposte le gabbie metalliche connettendo attraverso saldatura le armature longitudinali, gli anelli distanziatori, la spirale staffante e gli inserti metallici (valvole e dispositivi filettati).
- Le casseforme, della lunghezza di 24 m vengono aperte ed ispezionate per accertare l'assenza di incrostazioni provenienti dalle lavorazioni precedenti.
- Le gabbie metalliche dei pali vengono introdotte all'interno delle casseforme; poiché i pali hanno generalmente lunghezza inferiore a quella della cassaforma, nella stessa cassaforma vengono realizzati più pali interponendo tra essi alcune piastre di separazione dei getti.
- Si introduce nella cassaforma il conglomerato cementizio a bassissimo tenore d'acqua, additivato con fluidificante, volumetricamente predosato in relazione alle dimensioni finali del prefabbricato da realizzare.
- La cassaforma viene chiusa e serrata mediante un sistema di bullonatura; indi viene collocata in una centrifuga azionata da un motore a corrente continua e regolata elettronicamente in automatico.

- Nella centrifuga computerizzata il palo viene centrifugato con una procedura che prevede una fase di accelerazione che porta la velocità angolare da 0 a 600 giri/minuto in 30 secondi, una fase di regime in cui la velocità massima viene mantenuta costante per 3 minuti, una fase di decelerazione in cui la velocità viene portata da 600 giri/minuto fino allo stato di fermo.
- Il palo contenuto nella cassaforma viene sottoposto ad una fase di prestagionatura con emissione di vapore per la durata di 2.5 ore. L'immissione di vapore permette di ottenere già a 24 ore resistenze che si otterrebbero solo dopo 28 giorni.
- Al termine, la cassaforma viene aperta ed il palo estratto e trasportato allo stoccaggio; la cassaforma viene pulita per il suo reimpiego.

I micropali prefabbricati vengono ordinariamente realizzati con lunghezza di 12 m per facilità di movimentazione e trasporto. Tuttavia, le attrezzature dello stabilimento consentono la fornitura di pezzi di lunghezza maggiore (o minore), fino a 24 metri. In figura 4.7 si può notare la centrifuga dello stabilimento Samer S.p.A.



Figura 4.7 Parte dello stabilimento Samer s.p.a. centrifuga e casseri rotanti

4.12 Tecnica di installazione dei Micropali Prefabbricati

I micropali prefabbricati sono installati con la procedura di seguito esposta:

- Si esegue il preforo di alloggiamento del micropalo con l'apposita macchina perforatrice, raggiungendo la profondità di progetto; la perforazione può essere eseguita con qualsiasi sistema.
- Il palo prefabbricato viene sollevato all'estremità superiore dalla stessa macchina che ha eseguito la perforazione mantenuto in posizione verticale, in uno o più pezzi collegati per avvitamento degli inserti metallici filettati, nella disposizione specificata in progetto e con la prescritta sporgenza di annegamento nel successivo getto del basamento;
- Si eseguono le iniezioni di primo tempo (circa tre minuti), collegando direttamente la pompa al tubo di iniezione primario fuoriuscente dalla testa del palo, a pressione di 6 atm. In tal modo, la malta viene immessa nel terreno direttamente attraverso i fori alla base del palo, creando un bulbo in corrispondenza della sua base di appoggio al terreno, e riempiendo, per risalita, l'intercapedine tra la parete del micropalo prefabbricato e quella del foro (formazione della camicia).
- Dopo circa 8-24 ore si eseguono le iniezioni secondarie, collegando direttamente la pompa ai tubi di iniezione secondaria, fuoriuscenti dalla testa del palo. A causa della elevata pressione (20-40 atm), la malta rompe la camicia e forma delle sbulbature nel terreno. In tal modo si riescono ad ottenere coazioni tra micropalo e terreno laterale di 10-20 kg/cm² e diametri dei bulbi di 30-80 cm, a seconda del tipo di terreno e delle pressioni e delle modalità di iniezione.

4.13 Dimensioni commerciali dei Micropali Prefabbricati

I micropali prefabbricati sono realizzati in stabilimento secondo diametri e lunghezze richieste dal committente.

Il valore di resistenza caratteristica del calcestruzzo prefabbricato in genere adoperato è pari a $R'_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$.

Le tensioni massime ammissibili nel conglomerato sono:

tensione normale massima ammissibile per pressoflessione

$$\sigma'_c = 14,7 \text{ N/mm}^2.$$

tensione normale massima ammissibile per compressione semplice

$$\sigma'_c = 10,3 \text{ N/mm}^2.$$

tensione tangenziale massima ammissibile $\tau'_{b0} = 2,4 \text{ N/mm}^2$.

La tensione massima ammissibile nell'acciaio è di 2600 kg/cm².

Attualmente sono in produzione micropali del diametro di 110 e 210 mm, armati in base ai calcoli, con 8 tondini disposti lungo una corona circolare del diametro medio di 17 cm, con staffatura costituita da una spirale ϕ 8 con passo di 8-10 cm. Nei casi in cui le sollecitazioni di progetto fossero superiori a quelle ammissibili, è possibile inserire un tubo Fe510 (interno alla gabbia), per ottimizzare l'armatura nel tratto più sollecitato (come predisposto nei lavori di fondazione del viadotto Incoronata a Polla, eseguiti dalla CMC di Ravenna).

Il peso del palo prefabbricato è di circa 90 kg per metro di lunghezza.

4.14 Calcolo strutturale

Nelle seguenti tabelle sono riportate le coppie Sforzo normale ultimo – Momento flettente ultimo (N_u , M_u) ricavate con il metodo degli stati limite, per alcune sezioni comunemente utilizzate, considerando esclusivamente il calcestruzzo prefabbricato e 8 tondini di ferro :

Armatura 8 fi 12		Armatura 8 fi 16		Armatura 8 fi 18	
Nu (t)	Mu (t m)	Nu (t)	Mu (t m)	Nu (t)	Mu (t m)
95,69	0	122,61	0,00	138,95	0
88,75	0,89	112,48	0,67	127,44	0,64
85,14	1,7	110,75	1,11	118,87	2,08
73,4	2,2	100,71	2,27	107,78	2,69
63,13	2,53	90,06	2,70	92,91	3,25
54,63	2,73	80,07	3,04	80,73	3,63
47,79	2,87	70,61	3,32	70,94	3,9
39,98	3	60,57	3,57	62,38	4,12
32,31	3,07	52,26	3,76	53,95	4,32
27,78	3,06	43,78	3,94	47,05	4,47
22,17	2,99	36,94	4,06	41,69	4,59
18,25	2,92	29,33	4,11	33,54	4,7
14,09	2,82	24,06	4,09	24,8	4,71
10,9	2,72	18,34	4,03	20,38	4,69
6,42	2,57	13,17	3,95	15,46	4,64
0	2,29	8,56	3,85	9,07	4,54
		5,01	3,76	5,58	4,46
		1,83	3,66	2,19	4,38
		0,00	3,60	0	4,32

Il momento flettente misurato mediante prove di laboratorio risulta comunque maggiore di quello previsto dalle formulazioni matematiche. Il calcestruzzo prefabbricato ha una resistenza caratteristica notevolmente superiore al valore massimo imposto dalla normativa, inoltre non sono stati considerati i tubi di iniezione in acciaio, che non sono affatto trascurabili.

Le prove eseguite presso il Dipartimento di Strutture dell'Università della Calabria hanno evidenziato valori del momento di plasticizzazione molto maggiori di quelli teorici, anche su micropali privi dei tubi di iniezioni, in acciaio Fe 430, come risulta dalla seguente tabella riassuntiva.

Armatura Longitudinale	Valore sperimentale del momento di rottura	Valore sperimentale del momento per il quale sono apparse le prime lesioni
8 fi 16	11,3 t m	7,3 t m
8 fi 20	12,8 t m	9,1 t m

Tabella 4.4 Valori sperimentali del momento di rottura

4.15 Momento resistente del palo

Il micropalo prefabbricato può essere usato per formare paratie di pali in foglio, libere o ancorate a seconda delle esigenze progettuali.

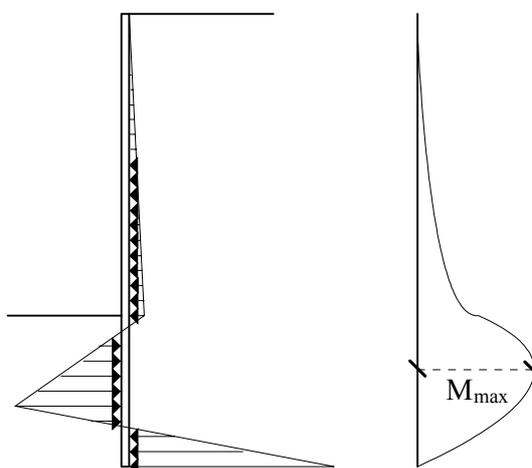


Figura 4.7 - Sforzi trasmessi dal terreno su una paratia libera ed andamento del momento flettente con la profondità

Il progettista, ricavato il momento massimo per metro di lunghezza della paratia, in rapporto alla configurazione geometrica e di carico della stessa, potrà valutare l'interasse massimo dei pali, dal rapporto tra tale momento massimo ed il valore del momento resistente sopra riportato.

4.16 Precompressione dei Micropali Prefabbricati

Alla pari dei micropali tub-fix, che nel caso di sottofondazioni vengono a volte precompressi in modo da eliminare il cedimento elastico ed evitare di trasmetterlo alla struttura, il micropali prefabbricati possono essere agevolmente precompressi. L'effetto della precompressione aumenta notevolmente la resistenza strutturale del materiale, che viene a trovarsi in

condizioni di poter assorbire efficacemente notevolissimi sforzi di trazione, pur mantenendo le piccole dimensioni che lo rendono così maneggevole.

Un importante utilizzo dei micropali precompressi, come già accennato, è nell'aggiornamento alla normativa sismica delle pile dei ponti, come è stato fatto negli Stati Uniti. La precompressione può risultare molto importante e conveniente anche nelle berlinesi.

4.17 Attrito Negativo

L'uso dei micropali Prefabbricati risulta vincente anche in tutti quei casi in cui ci si trova in presenza del fenomeno dell'attrito negativo.

Come già evidenziato, questo fenomeno si verifica quando almeno uno strato dei terreni in cui i pali di fondazione vengono installati si trovi in condizioni di consolidazione. In questo caso l'effetto di trascinamento del terreno che riduce il proprio volume provoca degli sforzi di taglio verso il basso sulla superficie del palo. Questi sforzi possono essere così elevati da superare i carichi di progetto e causare rilevanti cedimenti dei pali.

La consolidazione del terreno può dipendere da varie cause:

- carichi sulla superficie del terreno
- consolidazione del terreno per peso proprio
- prosciugamento del terreno
- effetto dell'infissione in terreni molli

Molto importante in fase di progetto è la considerazione che il trascinamento verso il basso può verificarsi anche a causa dell'assestamento di uno strato incompressibile, ghiaia o sabbia, causato, per esempio, dal cedimento di uno strato sottostante compressibile.

Il Micropalo Prefabbricato presenta grossi punti di forza nei confronti del fenomeno dell'attrito negativo, che lo rendono particolarmente adatto in questo tipo di circostanza.

- la possibilità di eseguire le iniezioni esclusivamente negli strati di terreno dalle caratteristiche meccaniche soddisfacenti. In questo

modo si riduce l'aderenza ai terreni soggetti a cedimenti e si aumenta notevolmente nei terreni migliori.

- La possibilità di essere ricoperto, nei tratti suscettibili di attrito negativo, con un lamierino metallico lubrificato. Alla pari dei pali battuti, al verificarsi di un cedimento di uno strato di terreni, il lamierino sarà trascinato verso il basso, mentre il palo rimarrà immobile.

4.18 Vite di Giunzione nei Micropali Prefabbricati

Per garantire una perfetta giunzione tra pezzi di micropali prefabbricati, dalle caratteristiche meccaniche adeguate, e che garantisca la continuazione dei tubi di iniezione, è stata studiata una vite ad un principio, prodotta nello stabilimento Samer S.p.A.



Figura 4.8 - Particolare Dispositivo Filettato lato maschio



Figura 4.9 - Particolare Dispositivo Filettato lato femmina



Figura 4.10 - Particolare Dispositivo Filettato

4.18 Calcoli Esecutivi

L'esempio che segue è relativo al calcolo reale delle fondazioni di un viadotto autostradale costruito in Italia, fondato interamente su micropali prefabbricati. Si riporta in dettaglio il procedimento per la Spalla A, evitando inutili ripetizioni.

Viadotto Nord	numero pali	lunghezza (mt.)
Spalla A	100	9
Pila 1	48	9
Pila 2	48	15
Spalla B	80	13

Viadotto Sud	numero pali	lunghezza (mt.)
Spalla A	100	9
Pila 1	48	9
Pila 2	48	15
Spalla B	80	13

Tabella 4.5 Lunghezze e numero dei pali

Terreni Ts

peso di volume naturale $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
 Modulo di reazione orizzontale $E_h = k z \text{ (kPa)}$
 $k = 5000 \text{ kN/m}^3$

Terreni D1

peso di volume naturale $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
 angolo di attrito $\phi' = 25^\circ$
 coesione drenata $c' = 20 \text{ kPa}$
 Modulo di reazione orizzontale $E_h = k z \text{ (kPa)}$
 $k = 10000 \text{ kN/m}^3$

Rocce cristalline Rcnp

peso di volume naturale $\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$
 angolo di attrito $\phi' = 40^\circ$
 coesione drenata $c' = 300 \text{ kPa}$

Secondo la teoria di Bustamante e Doix i micropali vengono distinti fra micropali eseguiti con iniezioni ripetute (IRS) e micropali eseguiti con il getto del palo in unica soluzione (IGU). Per i micropali prefabbricati in c.a.c si possono usare i valori IRS.

Si assume $d_s = \alpha d$, dove d è il diametro di perforazione ed α è il coefficiente della tabella 4.2

I calcoli sono stati condotti assumendo per ipotesi che la lunghezza della zona iniettata, L_s , sia pari alla lunghezza del micropalo stesso, penalizzando però nel tratto più superficiale i valori di s .

In condizioni statiche, per le verifiche di capacità portante, si è adottato un valore del coefficiente di sicurezza globale pari a $F_S=2.5$.

I valori della resistenza tangenziale s all'interfaccia tra tratto iniettato e terreno dipendono sia dalla natura e dalle caratteristiche del terreno sia dalla tecnologia e vengono ricavati dai seguenti abachi a cui è associata la tabella di seguito riportata [Viggiani, Fondazioni, pp. 394-395] :

Terreno	Tipo di iniezione	
	IRS	IGU
Da ghiaia a sabbia limosa	SG1	SG2
Limo e argilla	AL1	AL2
Marne, calcare marnoso, calcare tenero fratturato	MC1	MC2
Roccia alterata e/o fratturata	$\geq R1$	$\geq R2$

Tabella 4.6 - Specificazione tipo di iniezioni

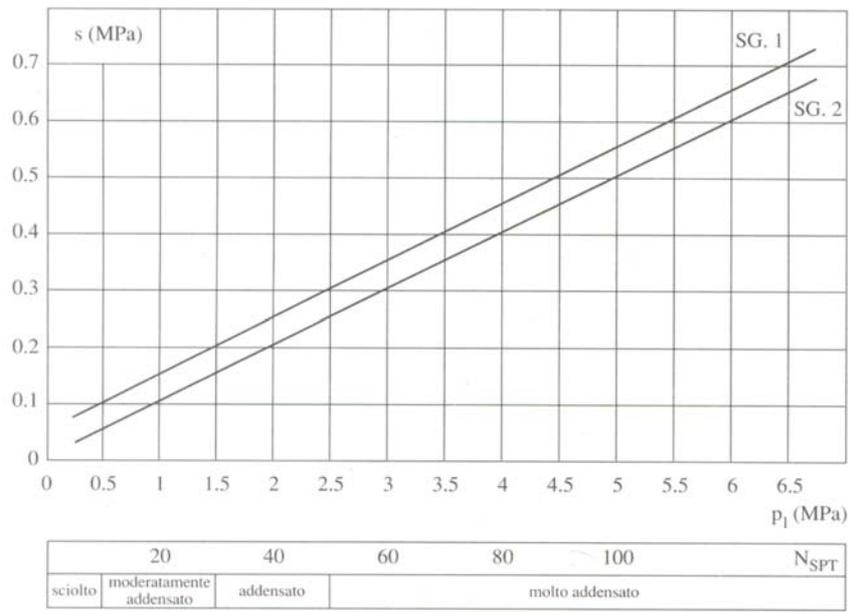


Grafico 4.3 - Abaco per il calcolo di s per sabbie e ghiaie

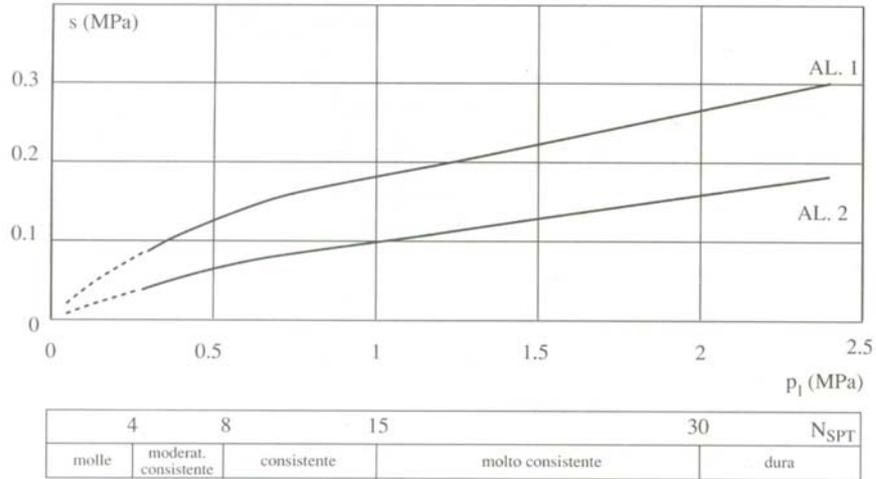


Grafico 4.4 - Abaco per il calcolo di s per argille e limi

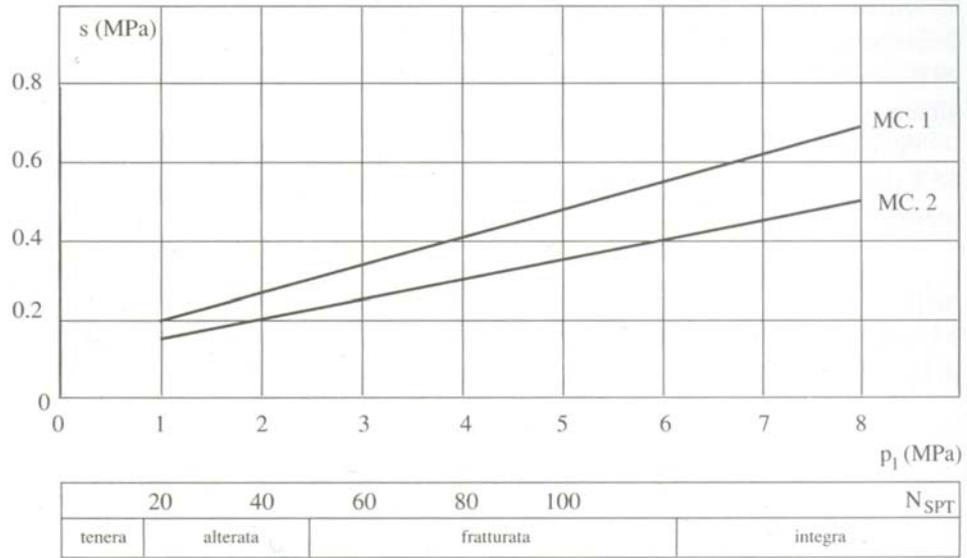


Grafico 4.5 - Abaco per il calcolo di s per gessi, marne, marne calcaree



Grafico 4.6 - Abaco per il calcolo di s per rocce alterate e fratturate

Sono stati assunti i seguenti valori cautelativi dei parametri α e s nei diversi terreni:

Terreni	α	s (kPa)
Terreni superficiali Ts	1.4	50
Terreni DI	1.4	100
Rocce granitiche integre Rcnp	1	500

Tabella 4.7 - Scelta del coefficiente alfa

Terreno	spessore (m)	α	ds (m)	s (kPa)	Qlim lat (kN)
Ts	0	1,4	0,24	50	0,00
DI	4	1,4	0,24	100	422,02
Rcnp	5	1	0,24	500	1.884,00

Q lim lat. = 2.306,0 kN
 Q lim punta = 345,9 kN (15% Qlim lat)
 Q lim = 2.651,9 kN
 Q amm = 1060,7 kN

Tabella 4.8 - Dettaglio dei calcoli

4.18.2 Calcolo dei palo soggetti a forze orizzontali e momento in testa

L'equazione differenziale della linea elastica di un palo soggetto a forze orizzontali e momenti in testa e' stata risolta con il metodo delle differenze finite con l'ausilio di un programma di calcolo automatico.

$$EJ*y^{IV}(z) + Es(z)*y(z) = 0$$

E = Modulo di elasticita' del materiale di cui e' costituito il palo.

J = Momento di inerzia della sezione del palo.

y(z) = Spostamento orizzontale della linea d'asse del palo.

z = Profondita' sotto la superficie del terreno.

Es(z) = Modulo di reazione orizzontale del terreno.

L'equazione differenziale della linea elastica di un palo soggetto a forze orizzontali e momenti in testa e' stata risolta con il metodo delle differenze finite con l'ausilio di un programma di calcolo automatico.

La soluzione dell'equazione differenziale della linea elastica, tenuto conto delle opportune condizioni al contorno, fornisce l'andamento della y(z), nota la quale, mediante derivazioni successive, si ottengono le altre grandezze incognite necessarie per il dimensionamento del palo.

$$Es = K_0 + K * z^n$$

$$K_0 = 2.750E+04 \text{ [kPa]}$$

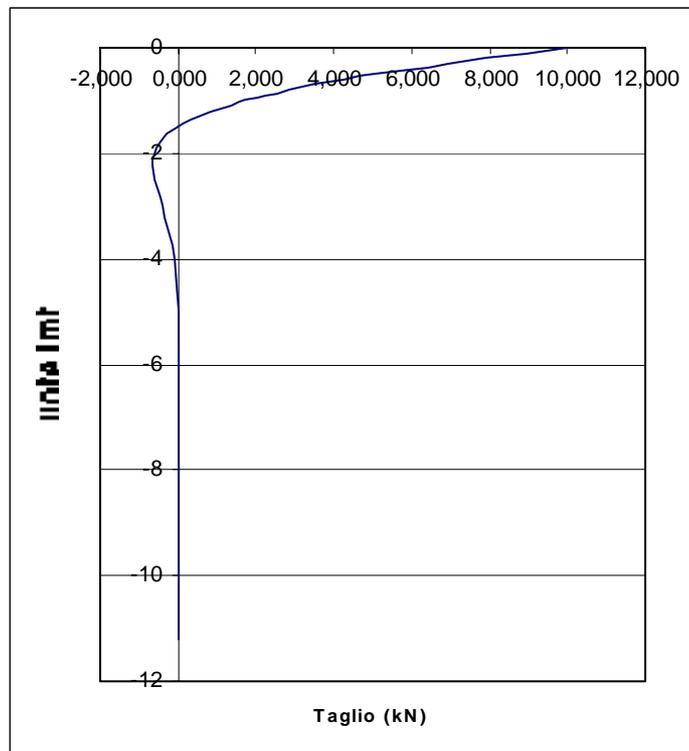
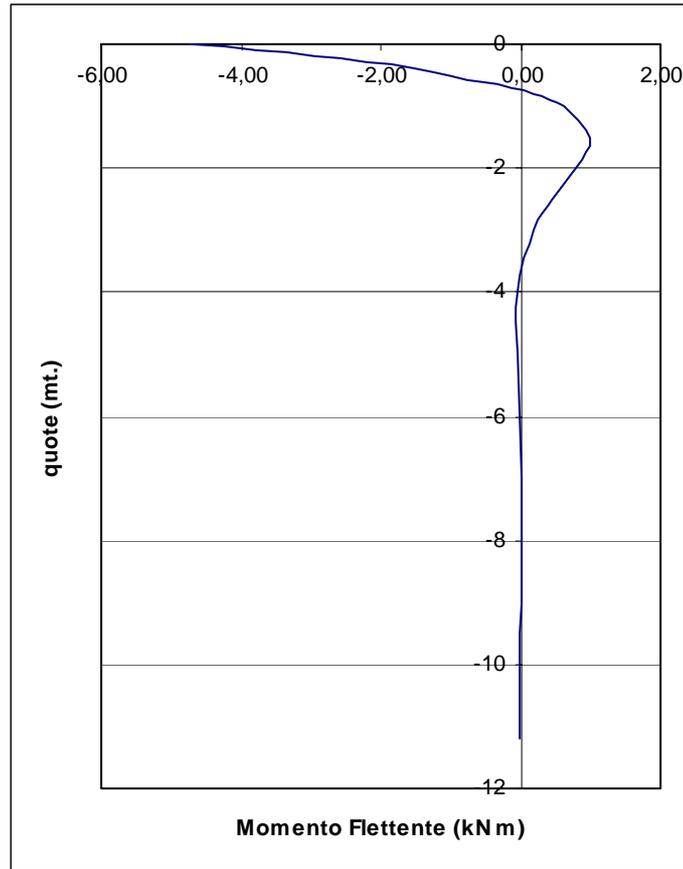
$$K = 1.000E+04 \text{ [kN/m}^3\text{]}$$

$$n = 1.00E+00$$

Condizioni al contorno:

$$\text{Taglio esterno applicato in testa al palo} \quad [\text{kN}] = 1.000E+01$$

$$\text{Rotazione della linea d'asse in testa al palo} \quad [\text{rad}] = 0.000E+00$$



Capitolo 5

Utilizzo dei Micropali Prefabbricati

Il comportamento dei Micropali Prefabbricati in condizioni di esercizio è risultato superiore alle aspettative risultanti dagli usuali calcoli geotecnici e strutturali, grazie alla nuova tecnologia di esecuzione e all'alta qualità del calcestruzzo centrifugato.

Ormai numerose amministrazioni e progettisti hanno adottato il Micropalo Prefabbricato come migliore scelta nelle più svariate applicazioni tecniche, forte dei suoi molteplici vantaggi, che lo hanno visto preferito per la velocità di realizzazione e la notevole capacità portante. Nella Tabella 5.1 sono evidenziate le forniture più importanti.

Elenco Principali Forniture di Micropali prefabbricati

Società Committente	Anno	Progetto e Località	Metri Lineari Fornitura
MERLO S.P.A	1999	ANAS S.p.A. - SS 106 Jonica Realizzazione Svincolo Malderiti e Asta di Raccordo Aeroporto di Reggio Calabria	43.997,73
MERLO S.P.A	2000	PROV.CZ - Lavori di realizzazione strada a scorrimento veloce Girifalco- Maida.	6.105,33
MERLO S.P.A	2000	PROV.CZ - Lavori di risanamento della frana Srada Provinciale San Floro	948,50
SGROMO	2003	COMUNE DI CURINGA - Lavori di consolidamento del centro storico	1.803,00
SGROMO	2003	COMUNE DI CURINGA - Lavori di consolidamento del centro storico	1.522,00
VIDONI	2002	ANAS S.p.A. - Autostrada SA-RC Lavori adeguamento sede stradale - Placcaggio fondazioni viadotto Campagnano Cosenza	5.411,50
CEPRINI	2003	RFI - Cantieri di Vermio e S. Benedetto	5.720,00
MERLO S.P.A	2003	ANAS S.p.A. - Costruzione opera di sostegno a seguito di crollo al km 512+100 Comune di Scilla	777,40
CMC	Lavori in corso	ANAS S.p.A. - Autostrada SA-RC Lavori adeguamento sede stradale - Placcaggio fondazioni viadotto Incoronata Polla	8.500,00
MERLO S.P.A.	Lavori in corso	ANAS S.p.A. - SS 106 Jonica. Realizzazione Svincolo Malderiti e Asta di Raccordo Aeroporto di Reggio Calabria	3.108,00
SGROMO	Lavori in corso	ANAS S.p.A. - SS 280 Lavori di ammodernamento svincolo san sinato. Catanzaro	12.600,00
TORNO S.P.A.	Lavori in corso	ANAS S.p.A. - SS 182 "Trasversale delle Serre" - Lavori di costruzione dei tronchi IV e IV bis	18.000,00
IMPREGILO CONDOTTE	Lavori in corso	ANAS S.p.A. - Autostrada SA- RC - Lavori di adeguamento sede stradale. Fondazioni viadotto "Scuola Agraria". Palmi	6.736,00

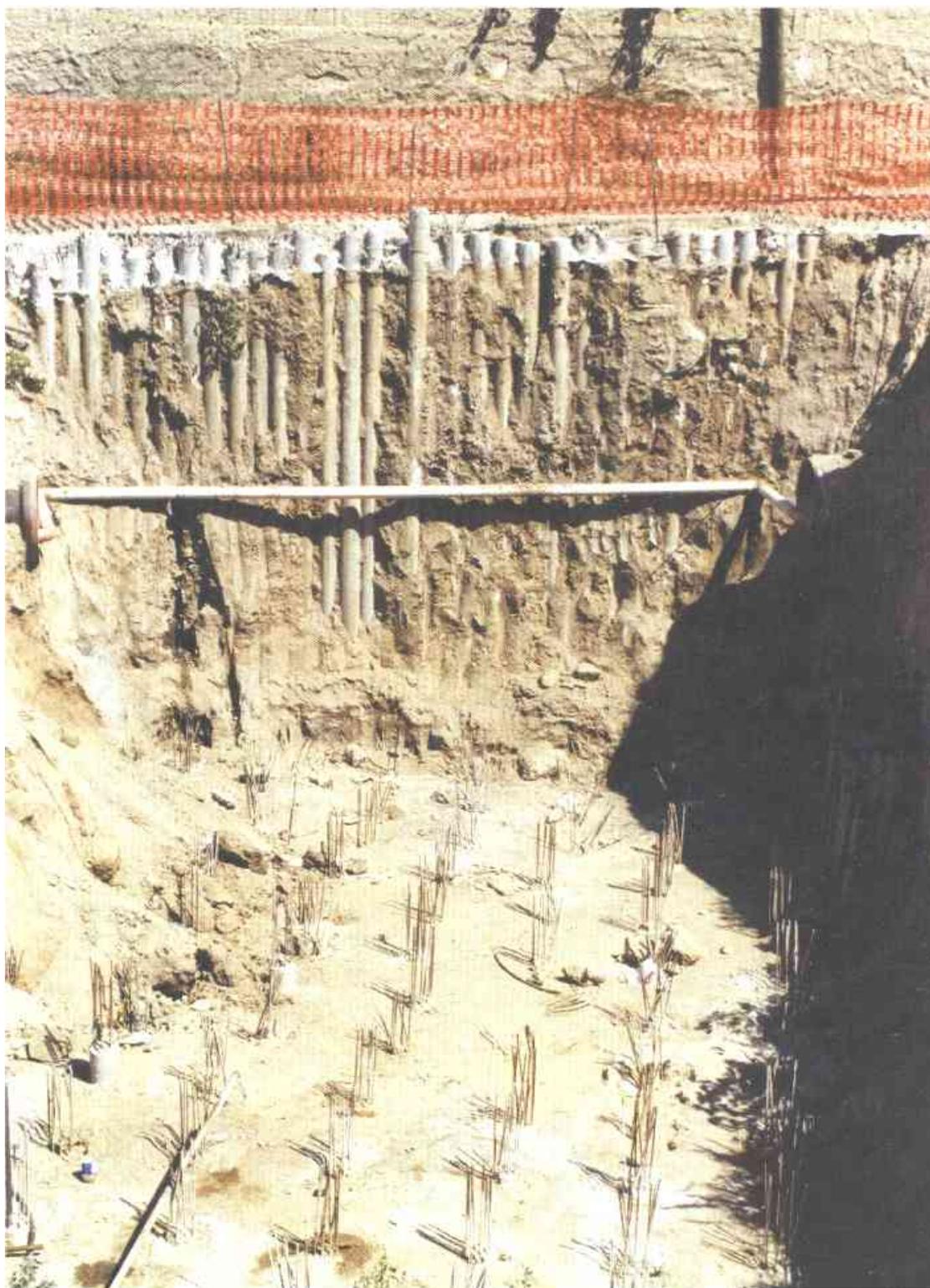
Tabell 5.1 Forniture Importanti

ANAS S.p.A. - SS 106 Jonica Realizzazione Svincolo Malderiti e Asta di Raccordo all'Aeroporto di Reggio Calabria

Utilizzo dei micropali prefabbricati: Fondazioni delle pile del viadotto, paratie provvisorie.

Impresa esecutrice dei lavori: Impresa Merlo







Provincia di Catanzaro - Lavori di realizzazione della strada a scorrimento veloce Girifalco - Maida.

Strada collegante le aree di Girifalco alla superstrada dei due mari.

Utilizzo dei micropali prefabbricati: Fondazioni delle pile dei ponti, paratie, fondazioni di muri in c.a.

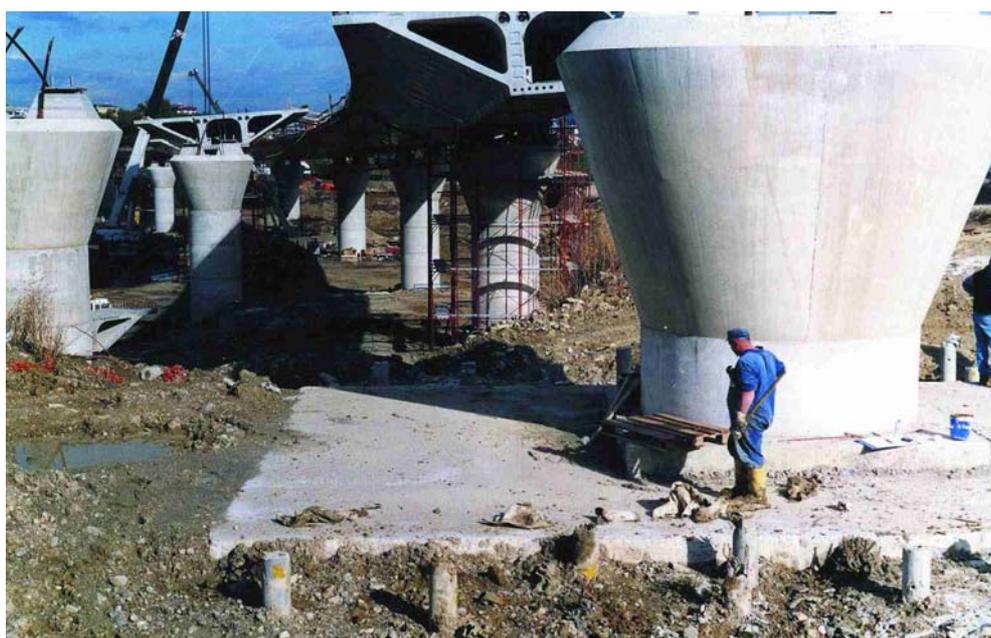
Impresa esecutrice dei lavori: Impresa Merlo



**ANAS S.p.A. - Autostrada SA-RC Lavori adeguamento sede stradale
Placcaggio fondazioni viadotto Campagnano (Cosenza)**

Utilizzo dei micropali prefabbricati: Ancoraggio ai plinti delle pile che avevano subito cedimenti incompatibili con le funzionalità dell'opera.

Impresa esecutrice dei lavori: Vidoni



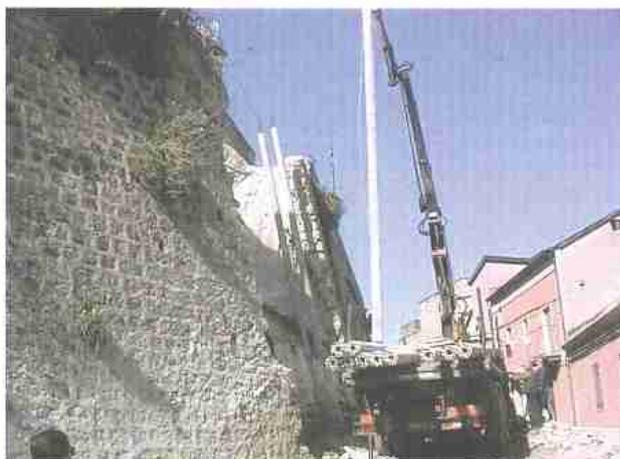
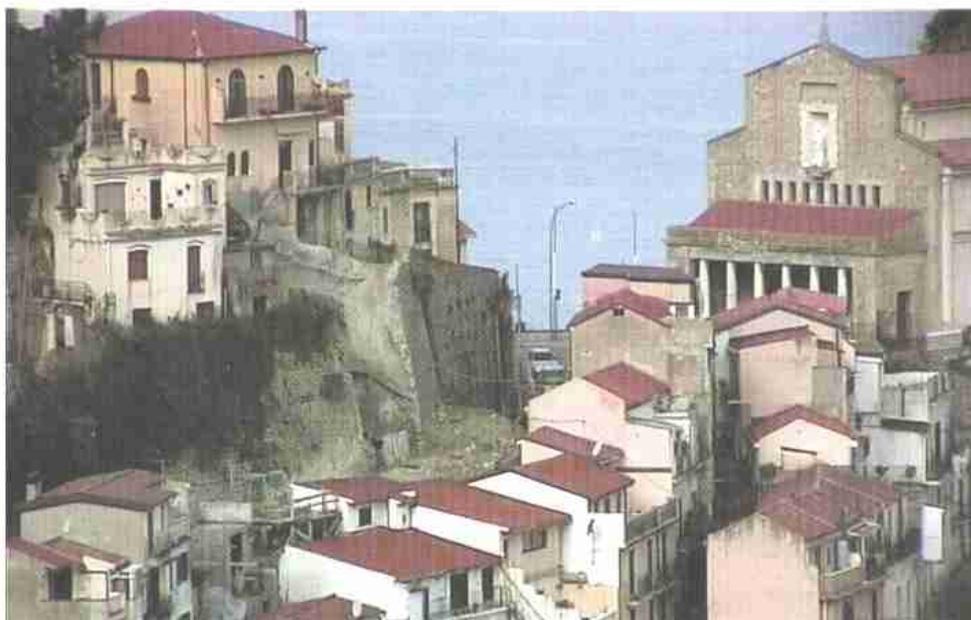


Costruzione opera di sostegno a seguito di crollo al km 512+100**Comune di Scilla**

Lavori di urgenza in difesa dell'abitato cittadino di Scilla.

Utilizzo micropali prefabbricati: paratie a protezione del centro abitato.

Impresa esecutrice dei lavori: Impresa Merlo



A.N.A.S. S.p.A. - SS.18
Lavori occorrenti per la costruzione di un'opera
di sostegno in corrispondenza
dell'abitato di Scilla (RC)



ANAS S.p.A. - Autostrada SA-RC Lavori adeguamento sede stradale

Placcaggio fondazioni viadotto Incoronata (Polla)

Impresa esecutrice dei lavori: CMC





**ANAS S.p.A. - SS 280 Lavori di ammodernamento svincolo San Sinato
– Catanzaro**

Utilizzo micropali prefabbricati: fondazioni del viadotto e paratie.

Ditta esecutrice dei lavori: Eurostrade



ANAS S.p.A. - Autostrada SA-RC - Lavori di adeguamento sede stradale. Fondazioni viadotto "Scuola Agraria". Palmi

Utilizzo micropali prefabbricati: fondazioni del viadotto

Ditta esecutrice: Impregilo – Condotte



