



*Metodologia di Calcolo TFEg
Modelli e Validazione*



INDICE

INDICE	2
1 Elementi tesi attrezzati con dispositivi TFEG.....	3
1.1 Dati sperimentali ed interpretazione	3
1.2 Incremento di portanza dovuta al sistema TFEG.....	4
1.3 Validazione e sperimentazione elementi tesi	6
2 Elementi compressi attrezzati con dispositivi TFEG.....	12
2.1 Fondazione superficiale equivalente	12
2.2 Incremento di resistenza alla punta	14
2.3 Validazione e sperimentazione elementi compressi	14
2.4 Pali di grande diametro: PreloadTFEG.....	21



1 Elementi tesi attrezzati con dispositivi TFEG

Nella presente sezione si espone la metodologia di calcolo utilizzata per il dimensionamento di elementi tesi attrezzati con dispositivi TFEG. Tale metodologia viene applicata agli elementi quali tiranti (con trefoli, barre, armature tubolari) e chiodature.

1.1 Dati sperimentali ed interpretazione

La performance di tiranti attrezzati con sistema TFEG è stata apprezzata in innumerevoli campi sperimentali realizzati dalla JobSoil e da società terze.

Presso tali cantieri sono state svolte prove comparative tra i tiranti attrezzati con sistema TFEG e tiranti classici mono e pluri valvolati.

Tali dati hanno consentito di effettuare delle back-analysis al fine di poter individuare una utile metodologia di calcolo della portanza del tirante.

In particolare, da tali analisi è emerso che la forza esplicita sul tirante non risulta compatibile con il diametro di perforazione e con le caratteristiche meccaniche dei terreni presenti. Ciò indica che il sistema TFEG tende ad innescare un meccanismo di rottura del complesso tirante-terreno che non avviene più sul diametro di perforazione del tirante bensì su una superficie esterna più ampia.

Una conferma di tale meccanismo è dato dalle simulazioni numeriche con metodo agli elementi finiti tridimensionali effettuate dal Centro Ricerche della JobSoil.

Nella Figura 1 vengono riportati i risultati di una simulazione FEM in cui vengono sottoposti a trazione due elementi di fondazioni; il primo sprovvisto di sistema TFEG ed il secondo con sistema TFEG disposto all'estremità.



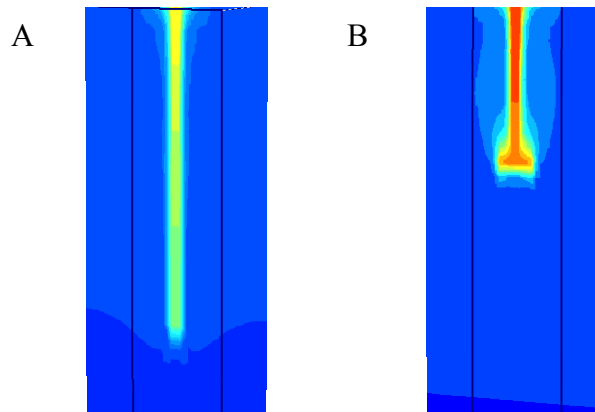


Figura 1: Campo di spostamenti dedotto da analisi FEM di bulbi di fondazioni sottoposti a trazioni : (a) fondazione priva di sistema TFEG (b) fondazione dotata di sistema TFEG all'estremità.

Si osserva che, nel primo caso, il volume di terreno che reagisce alla trazione del tirante è strettamente limitato al terreno circostante l'elemento di fondazione (e pertanto al diametro di perforazione). Nel caso di utilizzo del sistema TFEG il volume di terreno reagente alla trazione risulta essere nettamente maggiore del diametro di perforazione mobilitando, inoltre, un volume di terreno non "disturbato" dalla perforazione.

1.2 Incremento di portanza dovuta al sistema TFEG

La disposizione del TFEG nella parte terminale del tirante consente di sfruttare un contributo aggiuntivo del terreno che può essere calcolato tramite un approccio teorico definito CFAP (Cylindrical Failure Approach- vedi figura seguente) che simula l'azione resistente del TFEG come quello realizzato da un cilindro equivalente del diametro pari a quello dei manicotti TFEG estrusi.

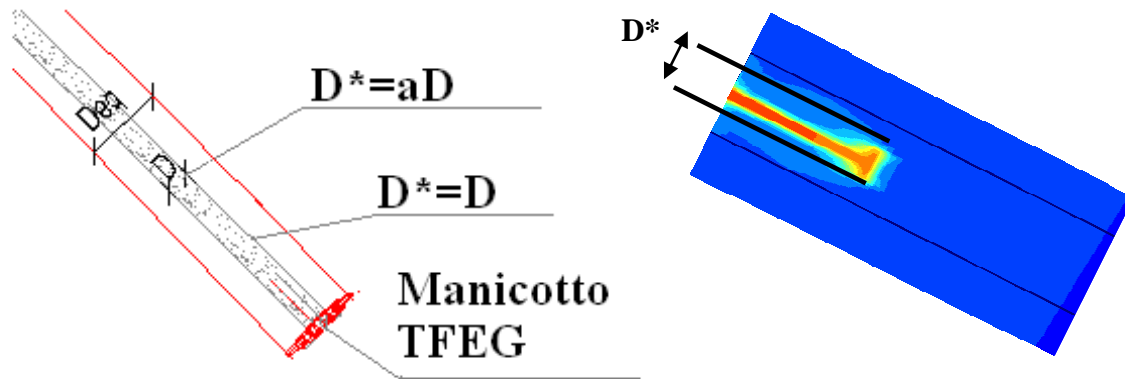


Figura 2: Meccanismo di calcolo dell'incremento di carico dovuto al dispositivo TFEG

Dal momento che l'operazione più delicata nei tiranti classici è data dall'iniezione, con il dispositivo TFEG si può inserire la boiaccia per gravità. Pertanto, prudenzialmente, per il calcolo dello sforzo di tiro ultimo si considera la tensione litostatica agente sul bulbo e i parametri di resistenza efficaci del terreno.

Considerando che nella maggior parte dei tiranti sperimentati il manicotto TFEG utilizzato era TirTfeg 139.7-3-160-4, le back-analysis effettuate indicano che prudenzialmente si può applicare tale metodologia considerando un cilindro equivalente di ampiezza pari a 750mm e lunghezza pari ad 7m (prudenzialmente in quanto i test utilizzati per le back-analysis non sono giunti a rottura dell'elemento di fondazione).

L'utilizzo dei parametri geotecnici caratteristici dei litotipi interessati è giustificato, inoltre, dal fatto che la rottura del complesso tirante-terreno avviene all'interno di un volume di terreno non "disturbato" dalle operazioni di perforazione.

Pertanto, si determina dapprima la tensione litostatica media σ'_m agente sul tratto d'influenza del TFEG (ovvero il tratto massimo di 7m del cilindro equivalente) e sull'eventuale tratto di bulbo eccedente la lunghezza del cilindro equivalente:

$$\sigma'_m = \frac{\sigma'_z + 2\sigma'_r}{3},$$

con:

σ'_z tensione litostatica agente lungo il tratto ancorato del tirante, $\sigma'_z = \gamma' \cdot z$;

σ'_r tensione radiale, $\sigma'_r = K_o \cdot \sigma'_z$, assumendo $K_o = 1 - \sin\phi$.

Noto il valore della σ'_m si determina il valore di N , $N = \sigma'_m \cdot A$, dove A rappresenta l'area del cilindro equivalente e dell'eventuale tratto di bulbo eccedente la lunghezza di detto cilindro. Infine il tiro T si determina come $T = c' \cdot A + N \cdot \tan\phi'$. Ovviamente per la determinazione del tiro si discretizza il tirante per tratti omogenei dal punto di visto litologico meccanico.

1.3 Validazione e sperimentazione elementi tesi

La sperimentazione effettuata dalla JobSoil per la validazione del modello utilizzato (back-analysis), come precedentemente esposto, si basa su dati effettivi di cantiere ottenuti in varie litologie. Si riportano, di seguito, i seguenti cantieri:

- **Centro Congressi Italia – Roma.**
- **Parcheggio interrato in località Mercatello – Salerno**
- **Parcheggio interrato in via Bernardini- Roma**
- **Campo sperimentale in Chattanooga, TN-USA**
- **Galleria in San Giuliano di Puglia, Campobasso**

Presso questi cantieri sono state svolte prove comparative tra i tiranti attrezzati con sistema TFEG e tiranti classici mono e pluri valvolati.

Nelle schede di seguito elencate si riportano:

- Una breve descrizione delle caratteristiche geometriche del tirante testato;
- Sintetica descrizione delle caratteristiche meccaniche dei terreni interagenti con il bulbo di fondazione del tirante;
- Curva tiro-allungamento registrata durante lo svolgimento della prova di tiro.

Centro Congressi Italia –Roma EUR

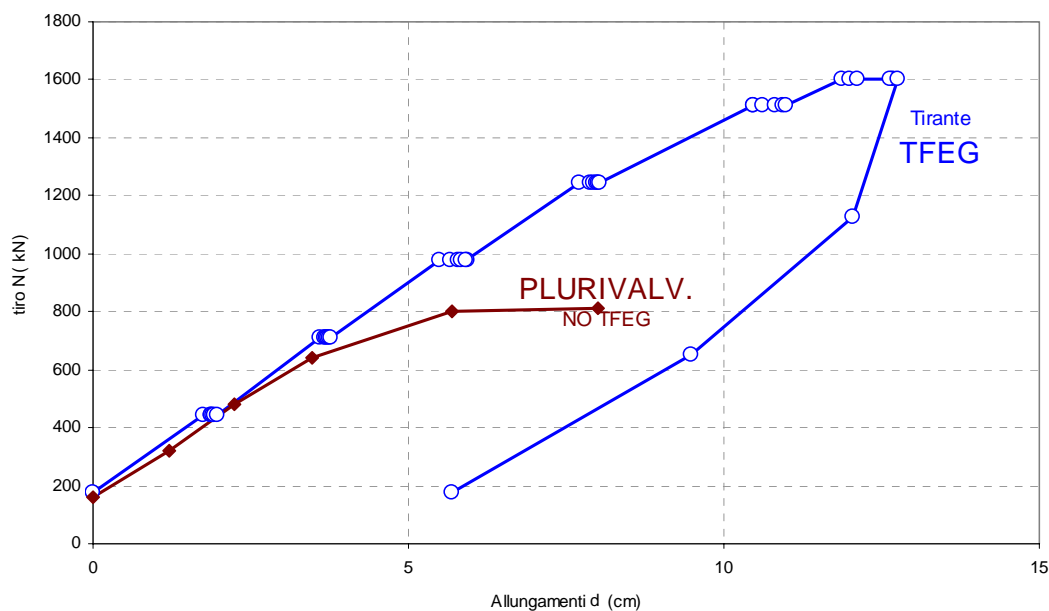
Descrizione tiranti

	TECNOLOGIA TFEG	TRADIZIONALE
Tipologia tirante	TECNOLOGIA TFEG	TRADIZIONALE
N° trefoli da 0.6"	8	8
Quota tirante	5 m	5m
φ perforazione	180 mm	180 mm
Inclinazione tirante	30°	30°
Lunghezza tirante	20 m	22m
Lunghezza bulbo	3 m	13m
Tipologia iniezione	pressione con sacco otturatore	plurivalvolato
TFEG:	Tir139.7-3-160-4	-----

Descrizione sintetica delle caratteristiche meccaniche dei terreni di fondazione dei tiranti

Litologia	: Limi argilloso-sabbiosi - coesivi
Peso unità di volume	: 16 kN/m ³
Angolo di attrito	: 27°
Coesione efficace	: 15 kPa
Coesione non drenata	: 100 kPa
Falda	: presente

GRAFICO TIRO-ALLUNGAMENTI



Parcheggio interrato in località Mercatello – Salerno

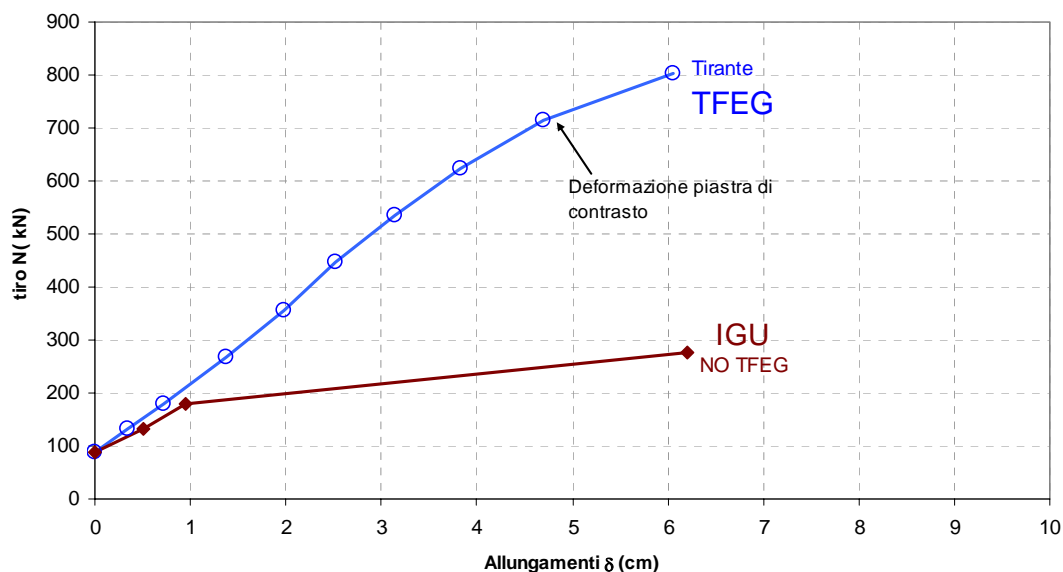
Descrizione tiranti

	TECNOLOGIA TFEG	TRADIZIONALE
Tipologia tirante		
N° trefoli da 0.6"	4	4
Quota tirante	2 m	2m
φ perforazione	180 mm	180 mm
Inclinazione tirante	15°	15°
Lunghezza tirante	15 m	15m
Lunghezza bulbo	7 m	7m
Tipologia iniezione	gravità	IGU
TFEG:	Tir139.7-3-160-4	-----

Descrizione sintetica delle caratteristiche meccaniche dei terreni di fondazione dei tiranti

Litologia	: Sabbia fine scarsamente addensata - granulare
Peso unità di volume	: 17.6 kN/m ³
Angolo di attrito	: 31°
Coesione efficace	: --- kPa
Coesione non drenata	: --- kPa
Falda	: 3.5m da p.c.

GRAFICO TIRO-ALLUNGAMENTI



Parcheggio interrato via Bernardini – Roma

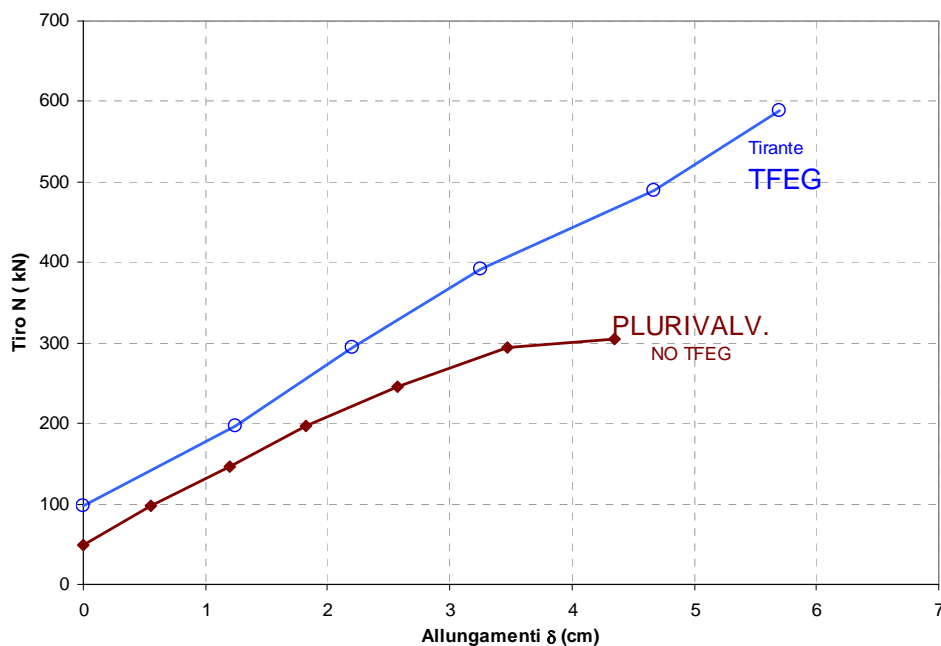
Descrizione tiranti

	TECNOLOGIA TFEG	TRADIZIONALE
Tipologia tirante		
N° trefoli da 0.6"	4	4
Quota tirante	4 m	4m
φ perforazione	180 mm	180 mm
Inclinazione tirante	15°	15°
Lunghezza tirante	23 m	23m
Lunghezza bulbo	10 m	10m
Tipologia iniezione	gravità	plurivalvolato
TFEG:	Tir139.7-3-160-4	-----

Descrizione sintetica delle caratteristiche meccaniche dei terreni di fondazione dei tiranti

Litologia	: Argille limose - coesivi
Peso unità di volume	: 18.7 kN/m ³
Angolo di attrito	: ---°
Coesione efficace	: --- kPa
Coesione non drenata	: 60 kPa (valore dedotto da prove di sfilo su tiranti plurivalvolati)
Falda	: presente

GRAFICO TIRO-ALLUNGAMENTI



Prova in Chattanooga, TN-USA

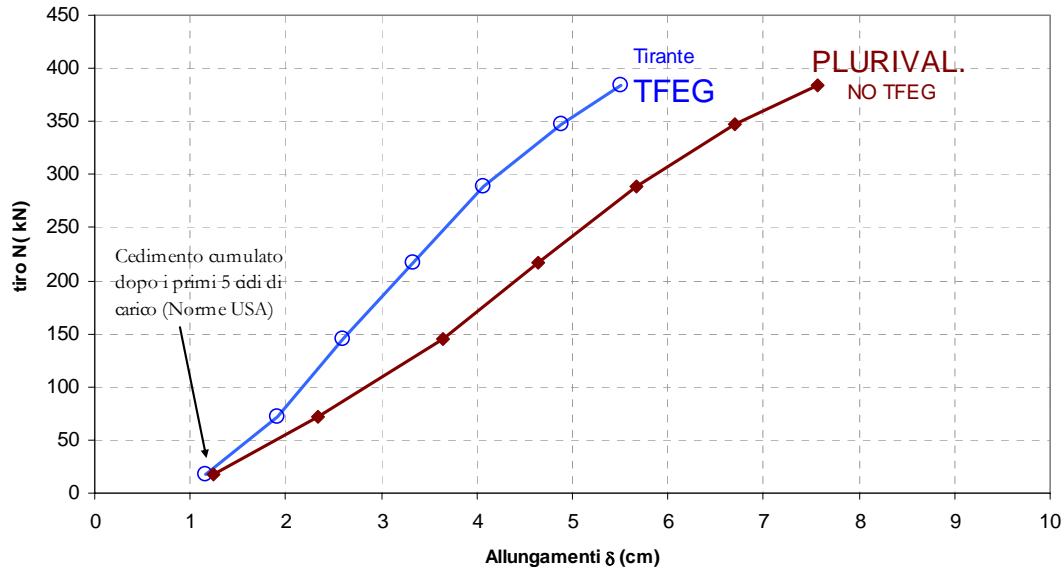
Descrizione tiranti

	TECNOLOGIA TFEG	TRADIZIONALE
Tipologia tirante		
N° trefoli da 0.6"	4	4
Quota tirante	3m	3m
φ perforazione	160 mm	160 mm
Inclinazione tirante	15°	15°
Lunghezza tirante	13.72 m	13.72m
Lunghezza bulbo	7.62 m	7.62m
Tipologia iniezione	gravità	plurivalvolato
TFEG:	Tir139.7-3-160-4	-----

Descrizione sintetica delle caratteristiche meccaniche dei terreni di fondazione dei tiranti

Litologia	: Limi argillosi - coesivi
Peso unità di volume	: $\approx 18-20 \text{ kN/m}^3$
Angolo di attrito	: 24°
Coesione efficace	: 10 kPa
Coesione non drenata	: ---
Falda	: assente

GRAFICO TIRO-ALLUNGAMENTI



N.B: anche se i due tiranti giungono ad eguale capacità portante, si osserva come il tirante plurivalvolato (senza TFEG) esiga degli allungamenti maggiori rispetto al tirante dotato di dispositivo TFEG



San Giuliano di Puglia, Campobasso

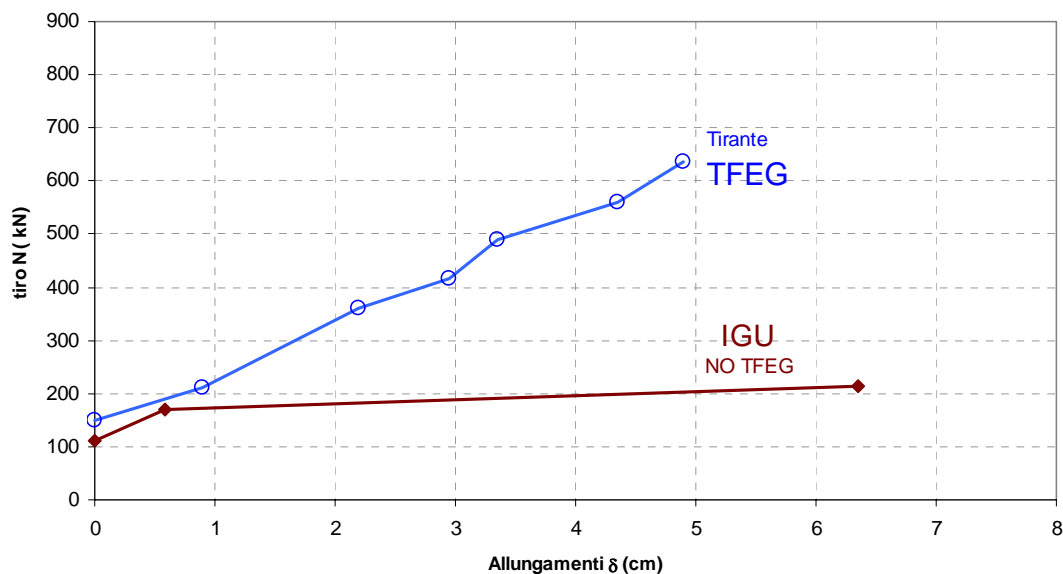
Descrizione tiranti

	TECNOLOGIA TFEG	TRADIZIONALE
Tipologia tirante		
N° trefoli da 0.6"	3	3
Quota tirante	7m	7m
φ perforazione	140 mm	140 mm
Inclinazione tirante	10°	10°
Lunghezza tirante	13 m	13m
Lunghezza bulbo	10 m	10m
Tipologia iniezione	gravità	IGU
TFEG:	Tir88.9-2-140-4	-----

Descrizione sintetica delle caratteristiche meccaniche dei terreni di fondazione dei tiranti

Litologia	: Sabbia limosa argillosa - coesivi
Peso unità di volume	: 18.40 kN/m ³
Angolo di attrito	: 30°
Coesione efficace	: 10 kPa
Coesione non drenata	: ---
Falda	: assente

GRAFICO TIRO-ALLUNGAMENTI



2 Elementi compressi attrezzati con dispositivi TFEG

Al fine di determinare l'incremento di portanza del sistema fondale dovuto al dispositivo TFEG per elementi compressi, si sono determinate due procedure di calcolo; tali procedure sono state oggetto sia di lavori scientifici teorici che di verifica mediante campi sperimentali.

Tali metodologie di calcolo vengono denominate:

- Fondazione superficiale equivalente
- Incremento di portanza alla punta

Nei seguenti paragrafi si descrivono brevemente i due modelli di calcolo, che si basano anche su dati di input diversi, riportando successivamente i risultati dei test di validazione.

2.1 Fondazione superficiale equivalente

Con il metodo denominato “*Fondazione superficiale equivalente*”, la struttura palo- TFEG è stata analizzata pensando al manicotto come una fondazione superficiale.

Il singolo manicotto TFEG si modella come una fondazione rigida diretta indipendente, posta alla profondità z_{TFEG} ed avente superficie pari alla proiezione sul piano orizzontale dell'area d'impronta del pistone estruso. Si assume quale dimensione caratteristica D_{TFEG} il diametro medio degli stadi.

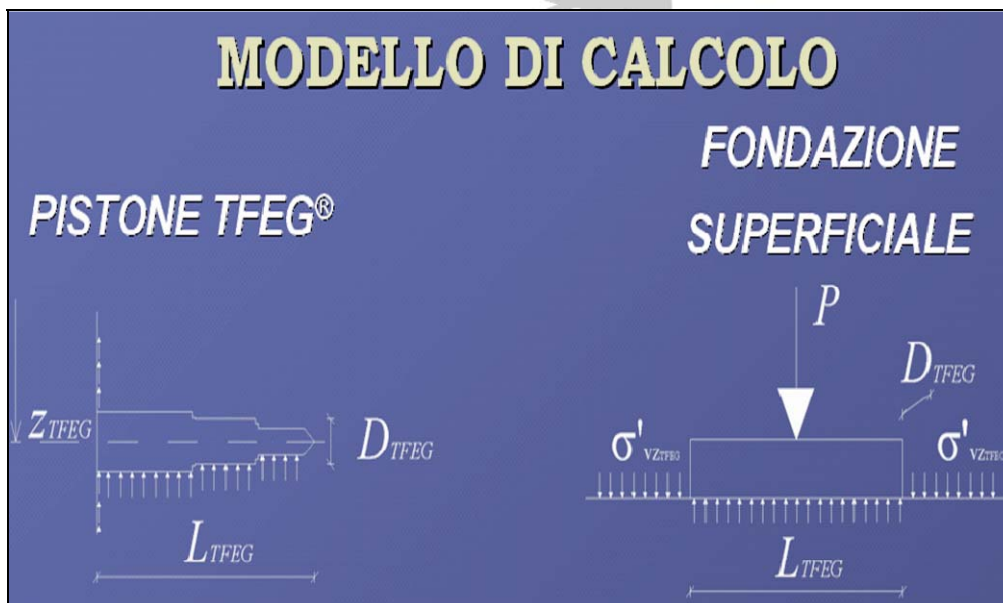


Figura 3: Equivalenza tra pistone e fondazione superficiale equivalente



Tale modello di calcolo fa riferimento alle ipotesi seguenti:

- si trascura qualsiasi effetto del meccanismo di infissione sulle curve di trasferimento dei carichi;
- si trascurano l'effetto della deformabilità palo-terreno e la deformabilità dell'elemento estruso;

Il contributo alla capacità portante laterale fornita dal dispositivo TFEG è valutata attraverso il calcolo della portanza della fondazione superficiale equivalente secondo la formulazione classica di Brinch-Hansen.

La formula di Brinch-Hansen, in condizioni drenate e non drenate, diviene:

$$\Delta P = Q_{lim} = (N_q \sigma'_{vzTFEG} + N_c c' + N_\gamma \gamma D_{TFEG} / 2) A_{TFEG}$$

$$\Delta P = Q_{lim} = (\sigma_{vzTFEG} + N_c c_u) A_{TFEG}$$

ove:

N_q, N_c, N_γ (fattori di capacità portante)

σ'_{vzTFEG} (tensione verticale efficace in corrispondenza del manicotto)

γ (peso unità di volume terreno)

c' (coesione efficace)

c_u (coesione non drenata)

D_{TFEG}, A_{TFEG} (diametro e area manicotto TFEG)

Le ipotesi alla base del modello semplificato sono conservative; infatti:

- lo schema alla Brinch-Hansen prevede superfici di rottura che si arrestano a livello del piano d'imposta del TFEG; in realtà nulla vieta che tali superfici si estendano ben al di sopra di detta quota;
- il problema è schematizzato come piano, ma in realtà ha un forte carattere di tridimensionalità.
- non si tiene conto in alcun modo dell'addensamento indotto dall'estrusione nel terreno circostante e del conseguente possibile incremento di resistenza di picco.

Come si evidenzierà nel successivo paragrafo, le risultanze dei campi sperimentali realizzati indicano che le ipotesi alla base di tale modello risultano essere molto conservative sottostimando la reale portanza del sistema del 50-70%.

2.2 Incremento di resistenza alla punta

Una formulazione che fornisce risultati sempre conservativi ma più vicino ai risultati sperimentali è rappresentata dalla metodologia denominata “*Incremento di portanza alla punta*”.

Tale schematizzazione assimila il manicotto TFEG alla punta di un micropalo infisso di area pari alla proiezione sul piano orizzontale dell'impronta del dispositivo; tale formulazione sfrutta i dati delle prove CPT per calcolare l'incremento di portanza del sistema mediante la relazione proposta da Bustamente e Gianceselli (1982).

Il dispositivo TFEG, in tale schematizzazione, viene visto come un allargamento della punta del palo e/o come superficie aggiuntiva che mobilita una resistenza del terreno lungo superfici simili a quelle di rottura presente alla base dei pali. Pertanto soffermandosi sull'incremento di resistenza offerto dal dispositivo TFEG, questo ultimo può essere calcolato nel seguente modo:

$$\Delta Q_{TFEG} = k_c q_c A_{TFEG}$$

in cui:

- k_c è un coefficiente variabile tra k_0 e k_p (valore tabellato);
- q_c rappresenta la resistenza alla punta del palo;
- A_{TFEG} l'area della superficie d'impronta del dispositivo TFEG;

La validità di tali formulazioni è stata verificata mediante la back analysis dei risultati del campo sperimentale di San Giovanni a Teduccio (NA), finanziato dal MIUR, oltre che di altri campi prova realizzati dalla JobSoil.

2.3 Validazione e sperimentazione elementi compressi

Campo Sperimentale S. Giovanni a Teduccio (NA)

Tale campo sperimentale, durato 18 mesi, è stato effettuato sotto il controllo del MIUR (Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica).

Sul sito, sono stati effettuati sondaggi geognostici e relative prove di qualificazione (SPT e prelievi di Campioni Indisturbati) e prove penetrometriche tipo CPT.

Individuate così le caratteristiche geotecniche dei suoli, si è progettato e realizzato 40 micropali dei quali, 20 utilizzati per fornire il contrasto alle successive prove di carico, e 20 strumentati con manicotti TFEG e quindi da testare.

I test sperimentali, alcuni dei quali si allegano al presente report, sono risultati essere estremamente interessanti avendo riscontrato aumenti percentuali della capacità a sopportare carichi dei singoli setti testati, che vanno dal 35% al 160 % .

Di seguito si riporta lo schema geometrico della disposizione dei pali prova e dei pali utilizzati per realizzare la struttura di contrasto all'interno del campo prova.

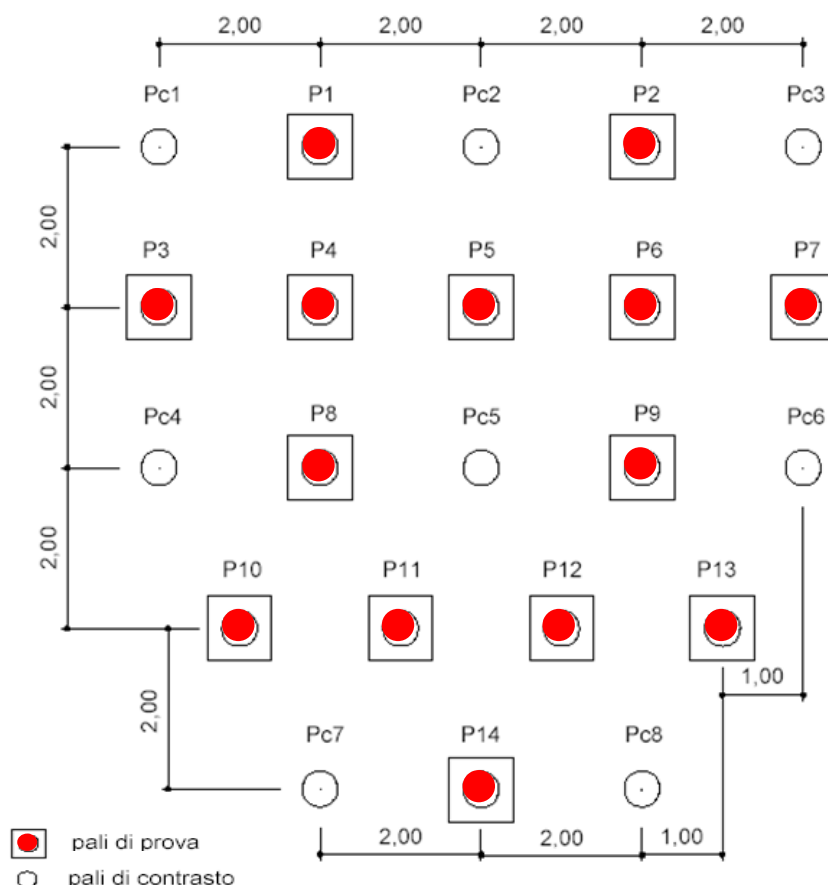


Figura 4: Disposizione planimetrica micropali testati nel campo sperimentale di S. Giovanni a Teduccio.

Il numero elevato di micropali testati è dipesa dal fatto che le prove sono state eseguite su pali di diversa lunghezza e con un numero di TFEG installato variabile da zero a tre.



Di seguito viene riportata la tabella riassuntiva dei dati sperimentali registrati in tale campo. Nella presente tabella si è indicato con:

- L lunghezza micropali
- N_{TFEG} numero di dispositivi costituiti da due manicotti presenti
- Z_{TFEG} quota attestazione dei dispositivi da p.c.
- P_{ult} carico limite registrato nella prova di carico

Tabella 1: risultati sperimentali prove di carico campo sperimentale di San Giovanni a Teduccio

PROVA n°	L(m)	Numero TFEG	Z_{TFEG} (m)	P_{ult} (kN)
3	3,7	0		210
2	3,7	1	1	396
10	3,7	2	1-3,5	448
11	6,2	0		274
4	6,2	1	6	341
8	6,2	2	1-6	495
12	8,2	0		398
14	8,2	1	8	375
5	8,2	2	1-8	433
6	8,2	3	1-6-8	520
7	10,2	0		471
1	10,2	1	10	511
9	10,2	2	8-10	625
13	10,2	3	1-8-10	657

Si precisa che il diametro di perforazione dei micropali è di 220mm e che l'iniezione della malta cementizia è avvenuta per gravità.

Come si evidenzia dalla predetta tabella, l'incremento di portanza, per effetto dei dispositivi TFEG rispetto alla configurazione di solo micropalo, è pari al 35-150%.

Nella figura seguente, a titolo esemplificativo, si riportano i risultati delle prove di carico effettuate sui micropali di lunghezza pari ad 8.20m dotati di dispositivi TFEG a varie quote.

Come si osserva dal grafico, i dispositivi TFEG, oltre ad incrementare la portanza dei micropali, rendono il sistema micropalo-terreno nettamente più rigido rispetto alla soluzione senza dispositivi TFEG, riducendo sensibilmente gli eventuali cedimenti indotti sulla sovrastruttura.



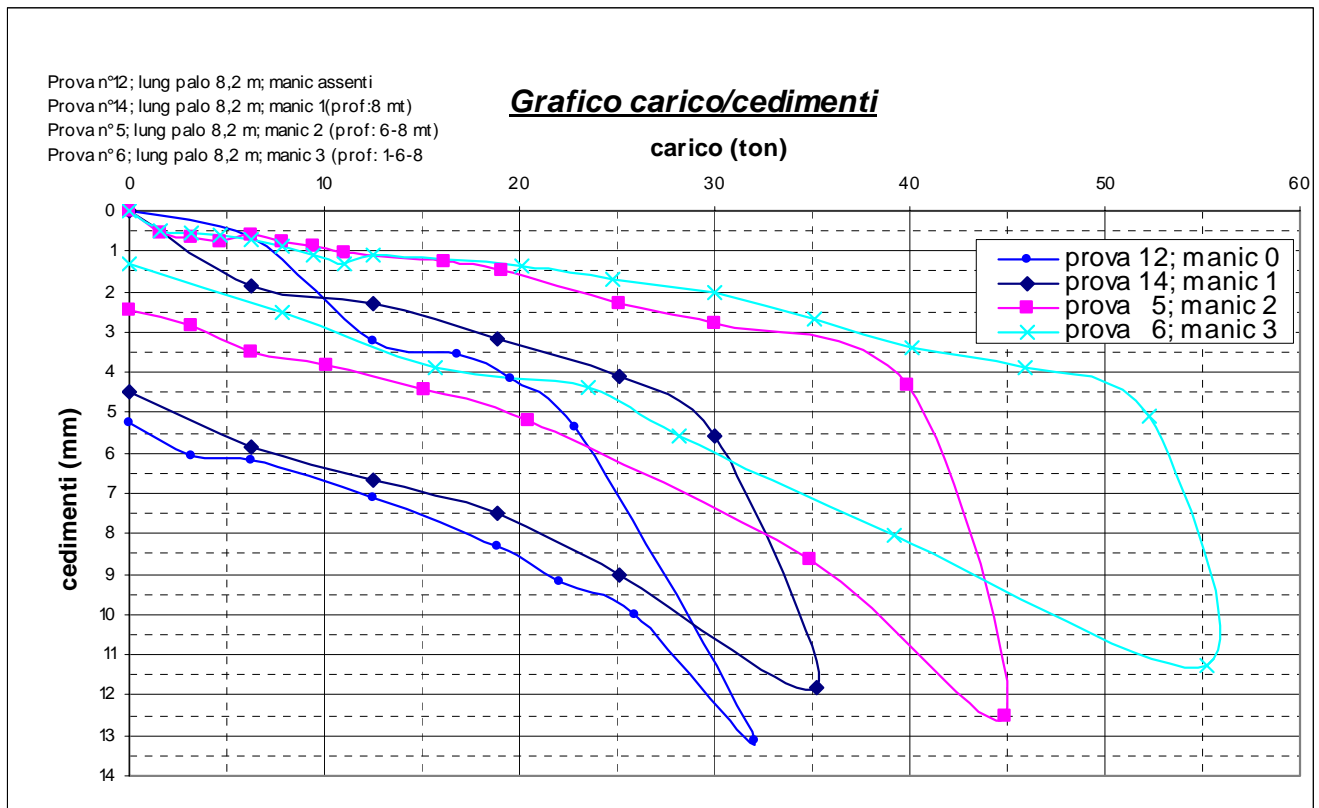


Figura 5: Curva carico-cedimenti per micropali di lunghezza pari ad 8.2m dotati di dispositivi TFEG a varie quote.

Campo Sperimentale di Teano (CE)

Il campo sperimentale di Teano, eseguito in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Geotecnica dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II", ha previsto l'esecuzione di tre micropali di diametro pari a 200mm e di lunghezza pari ad 8m (vedi schema planimetrico figura seguente).

Dal grafico mostrante i risultati delle prove di carico si evince come il micropalo senza dispositivo TFEG abbia mostrato un carico limite pari a circa 500kN (prova n°1); il micropalo dotato di dispositivo TFEG, invece ha subito una prima fase di carico-scarico sino a 650kN ed una successiva fase di ri-carico sino 850kN. A tale livello di carico si è avuto la rottura del sistema di contrasto è pertanto il carico ultimo del micropalo con dispositivo TFEG è sicuramente maggiore di 850kN, con un incremento minimo della portanza del palo di circa il 70%.



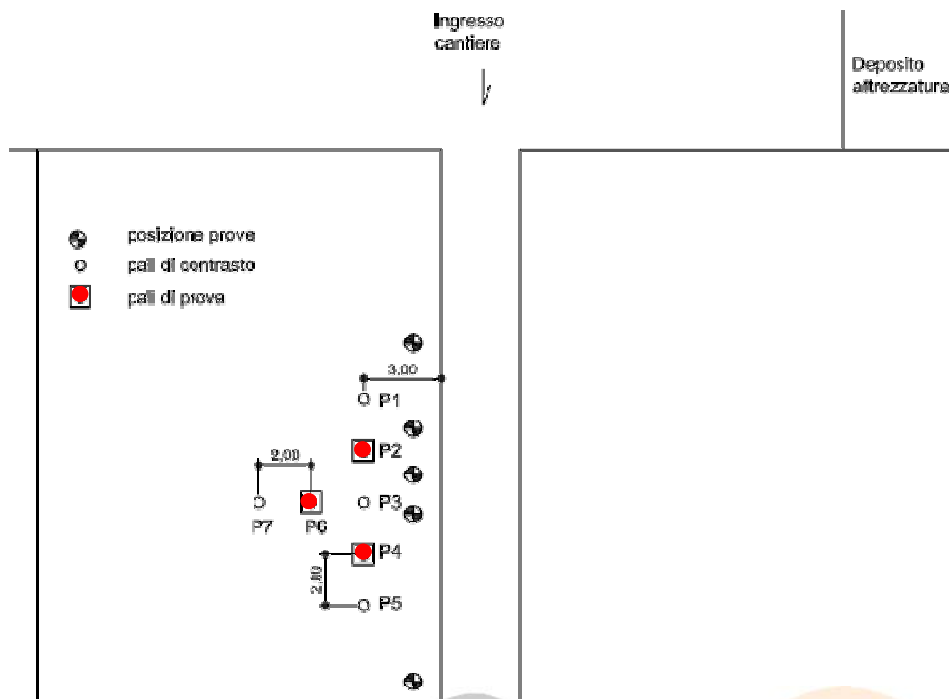


Figura 6: disposizione planimetrica pali campo sperimentale di Teano

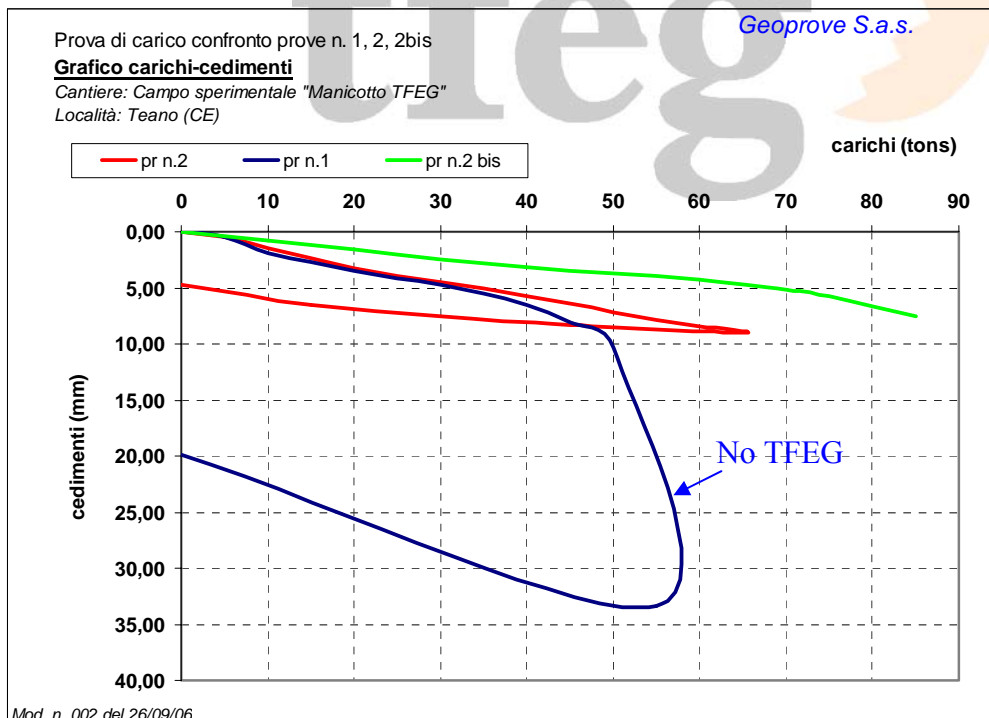


Figura 7: Risultati sperimentali campo di Teano

Validazione dei modelli di calcolo

I modelli di calcolo precedentemente riportati sono stati validati mediante i risultati sperimentali di tali campi. La validazione delle procedure di calcolo ha mostrato come la schematizzazione con “Fondazione Superficiale Equivalente” sia molto cautelativa con una sottostima del reale incremento di portanza che arriva anche al 90%.

Correlazione dati sperimentali

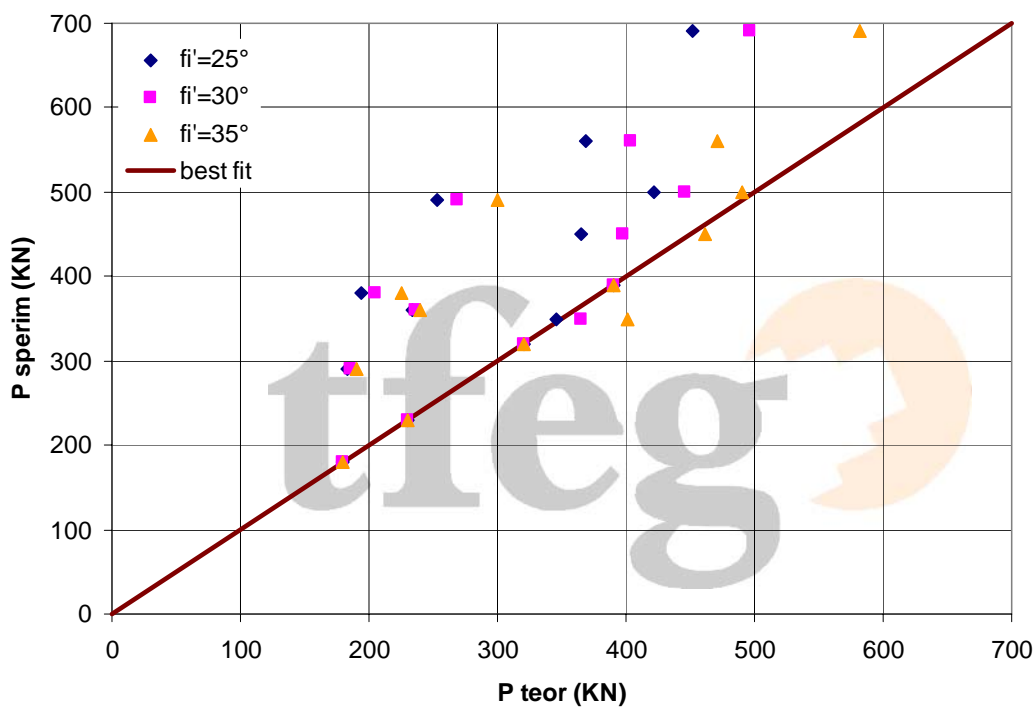


Figura 8: confronto tra i risultati sperimentali e quelli previsti teoricamente con il modello “Fondazione Superficiale Equivalente” per il cantiere di San Giovanni a Teduccio.

Una previsione più realistica ma sempre cautelativa è data dall’interpretazione di tali dati con il modello di calcolo “Incremento di resistenza alla punta” (vedi Figura 9).

Correlazione dati sperimentali

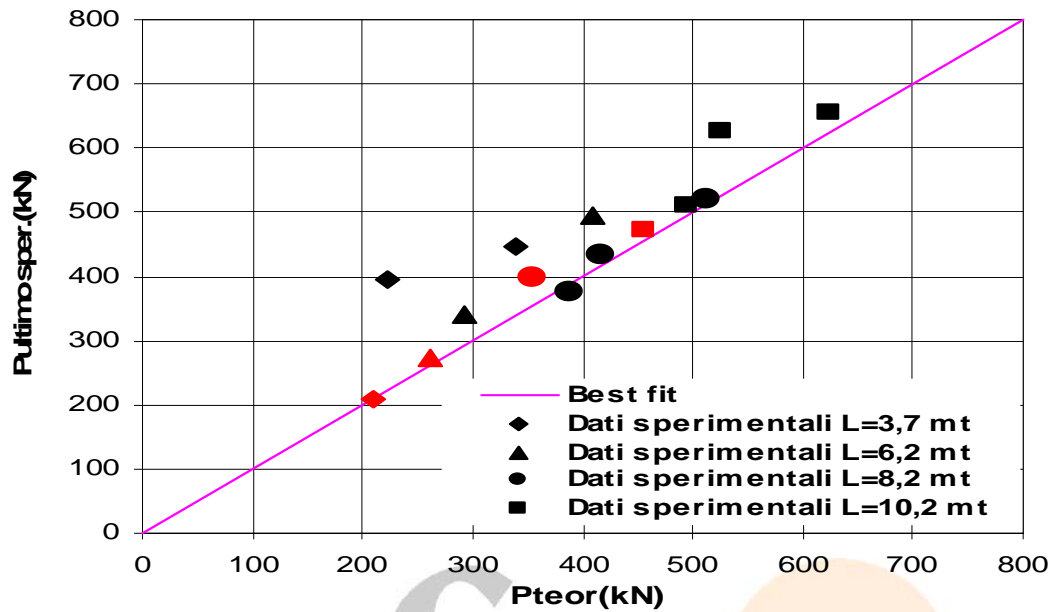


Figura 9: confronto tra i risultati sperimentali e quelli previsti teoricamente con il modello “Incremento di resistenza alla punta” per il cantiere di San Giovanni a Teduccio.

2.4 Pali di grande diametro: PreloadTFEG

Innumerevoli prove sperimentali presenti in letteratura evidenziano come la suddivisione della portanza del palo in capacità portatene laterale e di base è solo teorica; infatti le due aliquote di resistenza si mobilitano in maniera e momenti differenti. Tale semplice schematizzazione si ritiene normalmente valida per i pali di medio diametro (da $\Phi 400$ a $\Phi 600$). Allorquando si determina la capacità portante di pali di grande diametro si deve tenere presente che la resistenza laterale limite del fusto del palo si mobilita per spostamenti (e quindi cedimenti) dell'ordine di 10-20mm; per la completa mobilitazione della resistenza alla punta, invece, occorre che si sviluppino cedimenti variabili tra 0.1-0.25D.

Ciò comporta che, nel dimensionamento dell'opera fondale costituita da pali di grande diametro, il carico limite del palo non è dato dalla rottura del sistema palo-terreno, bensì dai cedimenti indotti dal carico proveniente della sovrastruttura in quanto il palo in condizioni di rottura avrebbe spostamenti non compatibili con la statica dell'opera.

Per tali motivi il progetto dei pali di grande diametro è basato, tradizionalmente, sulla considerazione di uno stato limite di servizio che tende a limitare la plasticizzazione del terreno.

Il sistema PreloadTFEG tenta di superare le predette limitazione del palo di grande diametro classico, prevedendo di inserire alla punta del palo un pistone di medio diametro che si elonghi verticalmente di almeno 200mm. In tal modo si pre-carica la punta del palo alla tensione desiderata (massimo sforzo di pre-sollecitazione pari alla resistenza laterale del palo) annullando i cedimenti almeno per il carico di progetto.

Inoltre la pre-carica della punta del palo, oltre ad incrementare la capacità portante utile del palo stesso, elimina alcuni inconvenienti tecnologici che potrebbero inficiare la statica del palo. Risulta infatti ben noto che per effetto della perforazione si induce una decompressione del terreno che risulta molto accentuata alla punta del palo; inoltre nell'area di sedime della punta del palo, oltre al materiale allentato dalla perforazione, tendono a depositare materiale di risulta della perforazione stessa e/o fanghi bentonitici (se eventualmente usati). Tali inconvenienti tecnologici si amplificano all'aumentare della lunghezza del palo e possono comportare una sensibile diminuzione effettiva della capacità portante del palo rispetto a quello di progetto.

Al fine di incrementare la rigidità del sistema fondale si prevede inoltre, dopo l'elongazione del sistema un iniezione in pressione alla base del palo.

Dimensionamento TFEG_rev0.3

Il dispositivo consente di testare e/o collaudare il palo stesso in quanto la capacità portante dell'elemento strutturale sarà pari ad almeno il doppio del carico di pre-sollecitazione.

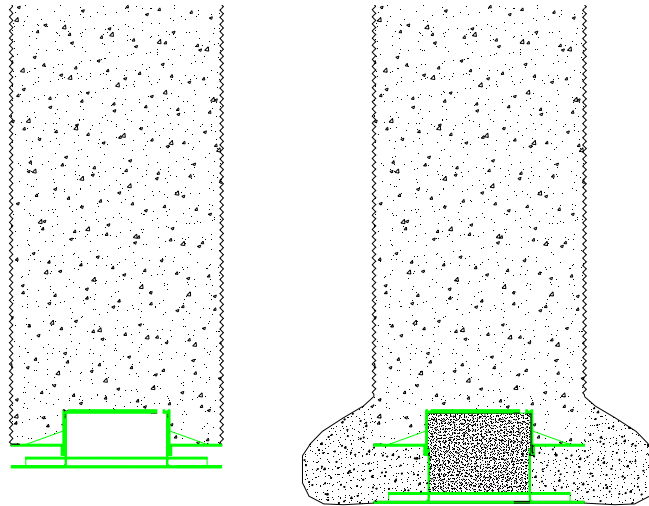


Figura 10: Immagine rappresentativa del sistema Preload TFEG su pali (configurazione prima e dopo apertura).

tfeg