

TIRANTI DI ANCORAGGIO IN DEPOSITI RECENTI: MONITORAGGIO ESTENSIMETRICO DELLA FONDAZIONE

Matteo Senigaglia (m.senigaglia@pm.univpm.it)
Paolo Ruggeri, Viviane M. E. Fruzzetti, Giuseppe Scarpelli
Università Politecnica delle Marche, Dipartimento SIMAU

ABSTRACT. La realizzazione di ancoraggi ad elevate prestazioni in depositi di modeste caratteristiche geotecniche impone la necessità di prevedere fondazioni di lunghezza superiore a quanto usualmente raccomandato. Per valutare il loro effettivo comportamento risulta pertanto determinante disporre dei risultati di prove di carico in sito. In questa nota tecnica si presentano i risultati del monitoraggio di due tiranti di ancoraggio con fondazione strumentata di lunghezza 18 e 30 m, realizzati in terreni di recente deposizione e sottoposti a prove di carico. I dati acquisiti sono stati confrontati con i risultati ottenuti da simulazioni numeriche FEM 3D.

1. INTRODUZIONE

I tiranti di ancoraggio sono sistemi geotecnici molto efficienti per trasferire sforzi di trazione al terreno. Nel tempo, sono state sviluppate molteplici tecniche di realizzazione, a partire dai tradizionali sistemi ad iniezione globale unica (IGU) e ad iniezioni ripetute e selettive (IRS) per arrivare ai recenti sistemi “autoperforanti” con punte a perdere e iniezioni a bassa o alta pressione utilizzando anche ugelli da trattamento jet grouting. La gran varietà di soluzioni tecnologiche e la dipendenza delle prestazioni del sistema da un elevato numero di parametri sia ambientali (caratteristiche del terreno, permeabilità, presenza di falda) che esecutivi (modalità e pressioni di iniezione, tra gli altri), si traduce nel nostro Paese in prescrizioni normative che richiedono l’esecuzione di ancoraggi preliminari di prova da sottoporre a prove di carico severe al fine di definire compiutamente gli elementi del progetto, nonché di verificare e collaudare tutti gli ancoraggi definitivi.

In questa nota vengono presentati i risultati relativi a due ancoraggi preliminari di prova, realizzati nel porto di Ravenna nell’ambito di lavori di rinnovamento strutturale di banchine portuali esistenti; la particolarità di tali ancoraggi è la loro strumentazione con estensimetri lungo il tratto di fondazione. I due ancoraggi hanno geometria diversa e sono del tipo autoperforante con punta a perdere, armati con tubolari in acciaio; il primo è stato realizzato con un’iniezione a bassa pressione, il secondo mediante un’iniezione ad alta pressione con ugelli jet grouting. Il monitoraggio estensimetrico della fondazione ed il confronto di tali misure con i risultati di una modellazione numerica FEM 3D, condotta attraverso il codice di calcolo Plaxis, hanno permesso di fare alcune valutazioni sulla distribuzione di carico lungo la fondazione di ancoraggi di elevata lunghezza al crescere del tiro applicato.

2. QUADRO DI RIFERIMENTO DELLO STUDIO

Tra gli aspetti di maggiore rilievo nel progetto degli ancoraggi troviamo quello della stima della resistenza unitaria all’interfaccia fondazione-terreno e quello della previsione dell’effettivo comportamento degli ancoraggi con fondazione di elevata lunghezza. Lunghezze di fondazione superiori ai 15-20 m superano ampiamente le dimensioni utilizzate negli studi originali sugli ancoraggi (Ostermayer & Scheele, 1978) tanto che diversi documenti tecnici di provenienza anglosassone suggerivano di limitare a 10-12 m la lunghezza della fondazione e vari autori esprimono la loro preferenza per soluzioni di ancoraggio “multibulbo” per lunghezze superiori (Vukotić et al., 2013). Scelte progettuali che seguono tali approcci, e riconducibili essenzialmente all’osservazione del comportamento degli ancoraggi in roccia, mirano ad evitare possibili fenomeni di rottura progressiva all’interfaccia fondazione-terreno, situazione che determinerebbe una riduzione della resistenza media unitaria lungo il tratto di fondazione.

Si osserva, d’altra parte, che numerose sono le opere di ingegneria civile, realizzate in Italia e nel mondo, che vedono la presenza di ancoraggi di elevata lunghezza; tra queste opere ci sono le banchine portuali. Le Norme Tecniche per le Costruzioni in Italia non prevedono limitazioni geometriche per la progettazione degli ancoraggi, obbligano però, in maniera cogente, alla realizzazione di ancoraggi preliminari di prova. La pratica professionale corrente prevede in fase progettuale il dimensionamento della fondazione attraverso la stima di resistenze unitarie all’interfaccia terreno-fondazione (generalmente assunte costanti nell’ambito della stessa unità litologica) in

funzione delle sole caratteristiche geotecniche del terreno e della tecnologia di esecuzione, rimandando a prove preliminari in situ per la conferma del dimensionamento stabilito inizialmente.

3. MATERIALI E METODI

Nel porto di Ravenna, nell'ambito di due campi prova, sono stati sperimentati due tiranti auto-perforanti di lunghezza complessiva 36 m, realizzati attraverso iniezioni a bassa ed alta pressione e inclinati rispetto all'orizzontale di 50° e 17° (Tab. 1). La caratteristica di questo sistema è l'utilizzo di tubolari cavi in acciaio S335J0 dotati di filettatura per l'accoppiamento mediante manicotti e di una punta speciale (Fig. 1) per la perforazione e l'iniezione della miscela cementizia in fase di avanzamento. Gli ancoraggi sono stati posti in opera attraverso l'utilizzo di perforatrice a roto-percussione in cui è il tubolare munito di punta a costituire il sistema di perforazione e consente sia l'iniezione di acqua/miscela cementizia all'interno del tubolare sia l'allontanamento del fluido di spurgo all'esterno. Per ottimizzare l'esecuzione e ridurre gli sprechi, il tirante a bassa pressione è stato realizzato utilizzando acqua come fluido di perforazione per circa i 2/3 della sua lunghezza, mentre per la restante parte è stata iniettata boiaccia di cemento secondo un rapporto a/c pari a circa 0,55. Il tirante ad alta pressione è stato realizzato avanzando con acqua a bassa pressione per i primi 18 m, quindi con la tecnica del jet grouting mono-fluido iniettando attraverso gli ugelli posti in punta una miscela cementizia con un rapporto a/c di circa 1,00 per i successivi 18 m.

Tabella 1: Caratteristiche tecniche tiranti

Tipo	Lunghezza libera (m)	Lunghezza fondazione (m)	Diametro fondazione (m)	Inclinazione (°)	Diametro armatura (mm)	Diametro punta (mm)
Bassa pressione	6	30	0,25	50	139,7	180
Alta pressione	18	18	0,45	17	114,3	240



Figura 1: Particolare punta di perforazione: a) bassa pressione; b) alta pressione; c) estensimetri pronti per l'installazione

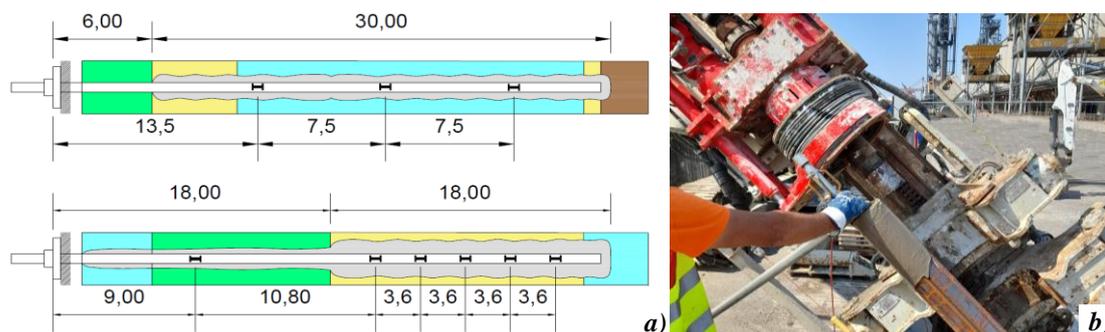


Figura 2: a) schema di disposizione degli estensimetri; b) installazione sensori

I diametri ottenuti in fondazione, pari a 25 cm e 45 cm rispettivamente per l'ancoraggio a bassa pressione e per l'ancoraggio ad alta pressione sono stati valutati sulla base del diametro nominale di perforazione e del volume di iniezione per il primo, e stimando il diametro della colonna in jet-grouting tramite il metodo semi-empirico di Flora et al. (2013) in funzione dei parametri tecnici di esecuzione e delle caratteristiche del terreno per il secondo. Alla fine della fase di iniezione, all'interno dei tubolari pieni di miscela cementizia è stata inserita, per tutta la lunghezza, un'asta in acciaio che fungeva da supporto di strain-gauges a corda vibrante, per il monitoraggio delle deformazioni durante la prova di carico (Fig. 2). Le prove di carico sono state svolte su entrambi i tiranti applicando una procedura a step di carico secondo le raccomandazioni AGI-AICAP (2012), ovvero per i casi in esame, un

carico di allineamento pari a 50 kN e quindi sei step di carico uguali, fino al raggiungimento di 1367 kN per il tirante a bassa pressione e 1341 kN per il tirante ad alta pressione. Per tutti gli step di carico, sono stati rilevati i valori di allungamento massimo, attraverso comparatori millesimali posti in testa all'ancoraggio, e i valori di deformazione registrati dagli estensimetri all'interno del tubolare. Il sistema di contrasto, in entrambi i casi, garantiva l'assenza di spostamenti del supporto. I risultati delle prove di carico sono stati analizzati in termini di carico-spostamento in testa ai tiranti, e di distribuzione delle deformazioni e del carico lungo lo sviluppo del tirante. È stato poi eseguito un confronto tra i dati sperimentali e i risultati ottenuti da una simulazione numerica condotta con il codice di calcolo FEM - *Plaxis 3D*; per i terreni è stato utilizzato un legame costitutivo elasto-plastico con rigidità variabile in funzione del livello di deformazione ("*Hardening Soil model with small strain stiffness*"), per l'ancoraggio un elemento di volume elastico lineare con rigidità ponderata sulle caratteristiche di armatura e bulbo di fondazione (Fig. 3). Data la modalità di realizzazione dei due ancoraggi, si è considerato che la porzione iniziale dell'ancoraggio ("lunghezza libera") risulti vincolata al terreno a causa della miscela cementizia risalita verso la superficie durante la fase di iniezione della fondazione.

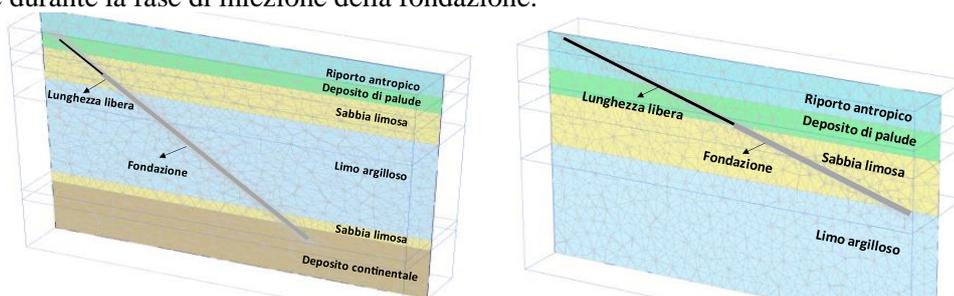


Figura 3: Modello numerico e stratigrafico

4. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

In Figura 4 è rappresentata la curva carico applicato - spostamento in testa dei due ancoraggi. Sullo stesso grafico è anche riportata la previsione del modello numerico. I dati sperimentali indicano un progressivo aumento dello spostamento al crescere del carico, cioè una diminuzione della rigidità del sistema al crescere della deformazione. Nel tirante a bassa pressione non si nota alcun tratto lineare riconducibile ad una "parte libera" che qui avrebbe comunque lunghezza molto modesta. Nell'ancoraggio ad alta pressione, invece, un tratto quasi lineare fino a 1000 kN sembra presente, probabilmente a causa della notevole differenza di diametro tra punta di perforazione e trattamento jet-grouting. Ciò sembra confermarsi dall'osservazione del ramo di scarico, che determina un modesto recupero elastico nel tirante a bassa pressione mentre un significativo recupero nel tirante ad alta pressione. Il ciclo di carico-scarico riprodotto dal modello numerico (linea tratteggiata nella Figura 4) coglie abbastanza bene il comportamento in fase di carico in entrambi i casi, mentre sovrastima il recupero elastico nel tirante a bassa pressione.

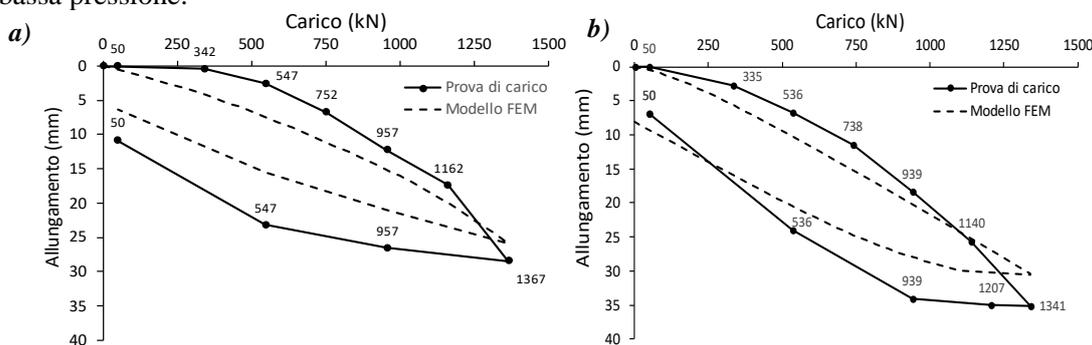


Figura 4: Risposta carico spostamento: a) tirante bassa pressione; b) tirante ad alta pressione

I risultati delle letture estensimetriche lungo lo sviluppo dell'ancoraggio per alcuni valori significativi del carico applicato sono presentati nella Figura 5. Sulla base della stima della geometria della fondazione, assumendo ragionevoli valori delle proprietà elastiche dei materiali (acciaio e miscela di iniezione) e ipotizzando l'assenza di scorrimenti relativi tra armatura e bulbo di fondazione, è possibile tradurre la misura locale di deformazione nel corrispondente valore del carico nella sezione di misura.

È così possibile ottenere una rappresentazione grafica compatta di come il carico applicato alla testa del tirante si distribuisca in profondità. In questa rappresentazione, la pendenza dei diversi segmenti indica l'aliquota di carico

che viene trasferita al terreno tra due punti di misura consecutivi. Inoltre, negli stessi grafici, con linea tratteggiata, è riportata la distribuzione delle deformazioni e del carico ottenuta dal modello numerico.

Nel caso del primo tirante, si può notare come il trasferimento di carico sia quasi costante con la profondità, sintomo che la rigidità dell'ancoraggio è in grado di distribuire il carico lungo tutta la lunghezza della fondazione e che il terreno risponde in maniera sostanzialmente uniforme. Ai carichi maggiori, comunque, si osserva una maggiore risposta del tratto iniziale dell'ancoraggio rispetto a quella terminale. Il modello numerico riproduce bene il comportamento osservato, anche se tende a distribuire più uniformemente il carico in profondità.

Nel caso del secondo tirante si può notare una modesta reazione della "parte libera" ed un trasferimento di gran parte del carico alla prima parte della fondazione in jet-grouting. La fondazione risulta mobilitata in modo disuniforme, con una prima parte che assorbe quasi l'intero carico ed una seconda che rimane sostanzialmente non sollecitata. Noto è il carico trasferito nel segmento di fondazione compreso tra i sensori E3 ed E4, che raggiunge 120 kN/m. In questo caso il modello numerico coglie bene il differente comportamento tra fondazione e parte libera del tirante, ma la risposta della fondazione risulta più omogenea di quanto effettivamente osservato. Ciò potrebbe dipendere da un diametro disuniforme della fondazione non considerato nel modello o da un possibile ingresso della perforazione nei limi argillosi di scarsa rigidità a livello dei sensori E4-E5 piuttosto che a livello di E6 come ipotizzato nello schema di calcolo.

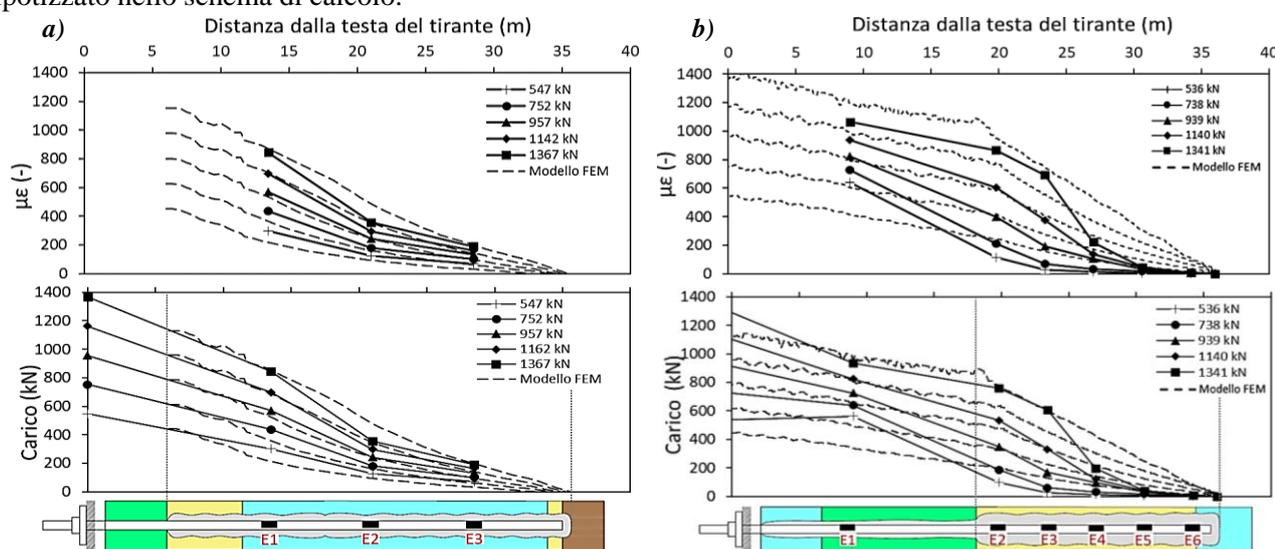


Figura 5: Deformazioni e distribuzione del carico: a) tirante bassa pressione; b) tirante ad alta pressione

5. CONCLUSIONI

I tiranti di ancoraggio rappresentano una soluzione efficiente per il trasferimento di azioni di trazione al terreno. Per ogni utilizzo è necessario studiare il reale comportamento in sito al fine di validare le assunzioni progettuali. Nello studio presentato, tramite l'utilizzo di sensori di deformazione distribuiti lungo il tirante, si è valutato il comportamento di due ancoraggi "autoperforanti", con fondazioni di elevata lunghezza, realizzati con tecnologie di iniezione differenti in depositi recenti di modeste caratteristiche geotecniche. La possibilità di collocare i sensori dopo la realizzazione dell'ancoraggio e non prima come tipicamente accade, ha permesso di garantire il corretto funzionamento di tutta la strumentazione, evitando i danneggiamenti in fase di realizzazione che si osservano negli ancoraggi tradizionali nella fase di posa in foro e cementazione. Una prima interpretazione dei dati ha evidenziato come nel caso del tirante realizzato a bassa pressione il comportamento descritto dal modello numerico sia coerente con quello sperimentale, mentre l'interpretazione del comportamento del tirante realizzato in jet grouting richiede ulteriori approfondimenti.

6. BIBLIOGRAFIA

Flora A., Modoni G., Lirer S., Croce P. (2013). The diameter of single-, double-, and triple-fluid jet grouting columns: Prediction method and field trial results. *Géotechnique*, 63(11): 934-945.

Ostermayer H., Scheele F. (1978). Research on ground anchors in non-cohesive soils. *Revue Française de Géotechnique* 3: 92-97.

Vukotić G., González Galindo J., Soriano A. (2013). The influence of bond stress distribution on ground anchor fixed length design. Field trial results and proposal for design methodology. *Proc. of 18th ICSMGE*.