

FONDAZIONI CON COLONNE DI SABBIA E GEOSINTETICI E RECUPERO DI UN'AREA ALLA FOCE DEL FIUME ELBA

1. Premessa

Negli ultimi anni, nuove particolari applicazioni con geosintetici sono state sviluppate in vari settori dell'ingegneria geotecnica ed idraulica, nelle quali questi materiali vengono utilizzati come elementi strutturali di rinforzo del terreno, come ad esempio le terre rinforzate ed i rilevati rinforzati su pali e fondati su terreni a bassa capacità portante.

Il presente articolo illustra l'impiego di un nuovo sistema di fondazione con colonne di sabbia incapsulate con geosintetici ad elevato modulo ("geotextile-encased-columns": GEC), impiegato nella costruzione di una diga su terreni limosi molto soffici, per il recupero e bonifica di una vasta area alla foce del fiume Elba ad Amburgo. Tale area, delle dimensioni di 140 ettari, verrà utilizzata per la costruzione di uno stabilimento di produzione dei nuovi Airbus A380 da mille passeggeri e di altri modelli.

2. Principi generali del sistema

Il sistema di fondazione con colonne di sabbia incapsulate con geosintetici ad elevato modulo (geotextile encased columns – GEC), può essere considerato come un ulteriore sviluppo e miglioramento del sistema tradizionale con pali e colonne in sabbia/ghiaia.

Infatti, l'idea generale del sistema è quella di avere un'alternativa più economica ai sistemi di fondazione tradizionali con pali di vario tipo ed allo stesso tempo permettere la costruzione di colonne in sabbia e ghiaia in terreni molto soffici, anche in assenza di spinta laterale di confinamento.

Questo sistema permette, sia di migliorare le caratteristiche del terreno, sia di agire come elemento portante di fondazione su terreni molto soffici ($c_u < 15 \text{ kN/m}^2$), in quanto il geotessile ad elevato modulo di forma cilindrica, prodotto senza cuciture longitudinali né trasversali, è dimensionato per assorbire le tensioni radiali agenti nella colonna (Fig. 1).

Il principio generale è il medesimo dei rilevati su pali: trasferire completamente il carico del rilevato in profondità, attraverso terreni soffici, ad uno strato di terreno stabile e portante situato in profondità.

E' tuttavia evidente un'importante differenza rispetto ai rilevati su pali in calcestruzzo, acciaio o legno, che sono dei sistemi a cedimento praticamente nullo, sia durante la fase di costruzione, che nel corso della vita utile dell'opera.

Se la progettazione è stata effettuata correttamente, la rigidezza dei pali è così elevata che non si verifica alcun

cedimento in corrispondenza della testa dei pali. A tale livello viene usualmente posato orizzontalmente un geosintetico di rinforzo di elevata resistenza a trazione e basso creep, in modo da evitare fenomeni di punzonamento nel rilevato e ridurre così i cedimenti differenziali.

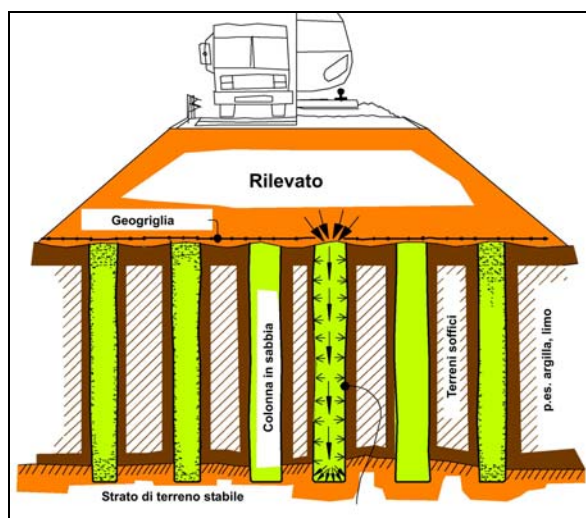


Figura 1: principio di funzionamento del sistema GEC

Il comportamento del sistema GEC, al contrario, non è perfettamente rigido: le colonne in sabbia si assestano verticalmente a causa delle deformazioni radiali. Tali deformazioni vengono però contrastate dalla elevata resistenza anulare esercitata dal geotessile.

Si raggiunge quindi una configurazione di equilibrio, garantita dalla resistenza della sabbia, della tensione anulare che si sviluppa nel geotessile tubolare e dalla reazione del terreno soffice circostante (che può anche essere pari a zero: in tal caso la capacità portante è garantita dal solo GEC) (Fig. 2).

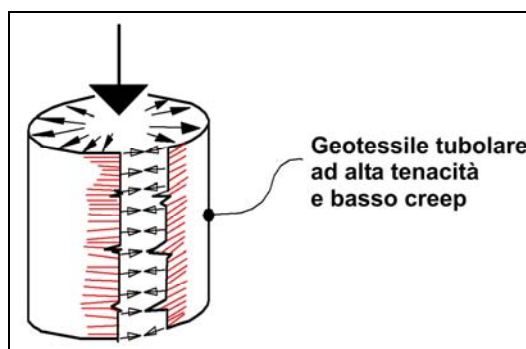


Figura 2: tensioni che si sviluppano nella colonna

L'attivazione delle tensioni anulari richiede una certa deformazione radiale del geotessile (in direzione anulare si hanno deformazioni del 2÷5 %), che comporterà delle deformazioni verticali in sommità della colonna. I rilevati fondati su GEC saranno quindi soggetti a cedimenti, che però avverranno per la maggior parte durante la fase di costruzione e che possono essere previsti e controllati.

Dal punto di vista progettuale, due sono i parametri che influenzano l'entità dei cedimenti: la "densità percentuale" delle colonne (rapporto fra l'area coperta dalle colonne e la superficie totale) ed il modulo elastico J (rigidezza tensionale) e la resistenza a trazione del geotessile tubolare in direzione anulare.

Per quanto riguarda la "densità" delle colonne, i cedimenti in sommità possono essere ridotti aumentando la percentuale di area coperta dalle colonne, ossia aumentando il diametro (normalmente 0.6÷0.8 m) o diminuendo la spaziatura (normalmente 1.5÷2.5 m).

Tale percentuale varia mediamente tra il 10 ed il 20 %: valori inferiori al 10 % potrebbero essere rischiosi dal punto di vista della stabilità, mentre valori superiori al 20 % potrebbero essere non economicamente vantaggiosi.

Per quanto riguarda invece il modulo elastico J del geotessile impiegato, maggiore sarà il suo valore, minori saranno la deformazione radiale del geotessile, la deformazione della colonna in sabbia e quindi anche il cedimento verticale in sommità della colonna.

Dal punto di vista del materiale, dunque, la caratteristica fondamentale da tenere in considerazione in fase progettuale è il modulo elastico J e non solo la resistenza a rottura del geosintetico.

Per una progettazione accurata ed una corretta valutazione della portanza e dei cedimenti del sistema, non è sufficiente considerare il modulo elastico del materiale a breve termine, ma è di fondamentale importanza tenere conto anche dei fenomeni di "creep" (deformazione viscosa sotto carico costante) a cui il geotessile sarà soggetto, e quindi del modulo elastico del materiale a lungo termine. La conoscenza delle curve isocrone del materiale risulta perciò essere determinante per la progettazione e dimensionamento del sistema GEC.

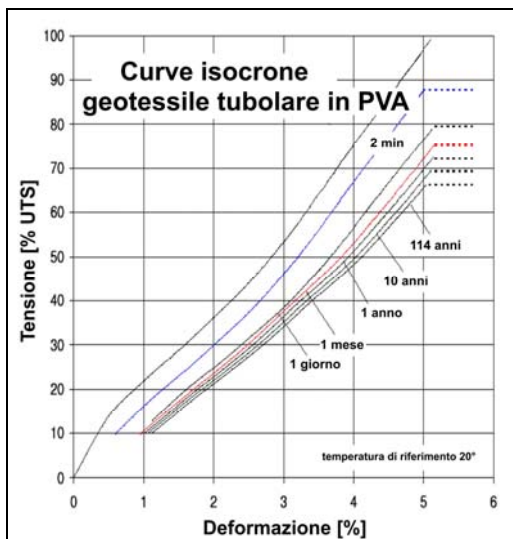


Figura 3: curve isocrone del geotessile tubolare in PVA

Ecco perché l'impiego di fibre in PVA (polivinilalcol), polimero caratterizzato da valori di modulo elastico J elevati (ca. 4.000 kN/m), allungamenti a rottura a breve e lungo termine inferiori al 6 %, comportamento al creep ottimale e sul quale sono state effettuate numerose prove di laboratorio per determinare il comportamento del materiale a lungo termine, risulta ottimale per il sistema GEC. (Fig. 3)

3. Posa in opera del sistema GEC

La realizzazione delle colonne incapsulate con il geotessile tubolare avviene generalmente impiegando la seguente tipologia d'installazione.

Un metodo prevede l'utilizzo di una camicia in acciaio chiusa nella parte inferiore che viene infissa nel terreno. Successivamente, dopo aver inserito il geotessile tubolare e riempito con sabbia, viene aperta la chiusura inferiore e la camicia in acciaio viene estratta. Durante questa fase, la camicia viene fatta vibrare per ottenere il grado di compattazione della sabbia nella colonna richiesto.

Alternativamente si può utilizzare una camicia aperta nella parte inferiore, dal cui interno bisognerà poi scavare il terreno. Una volta terminata la fase di scavo, la sequenza di posa prosegue come nel caso precedente.

Dal punto di vista del geosintetico da utilizzare, due sono le possibilità per quanto riguarda la scelta del suo diametro.

La prima consiste nella scelta del diametro del geotessile tubolare leggermente maggiore a quello della camicia in acciaio. In questo modo è maggiore l'interazione con il terreno circostante (e di conseguenza la pressione passiva che si attiva), ma sono anche maggiori i cedimenti in testa delle colonne.

La seconda possibilità consiste nella scelta del diametro del geotessile tubolare uguale a quello della camicia. Questo secondo metodo, attualmente il più utilizzato, implica una minore interazione con il terreno sofficie circostante, maggiori tensioni anulari nel geotessile e minori cedimenti in sommità.

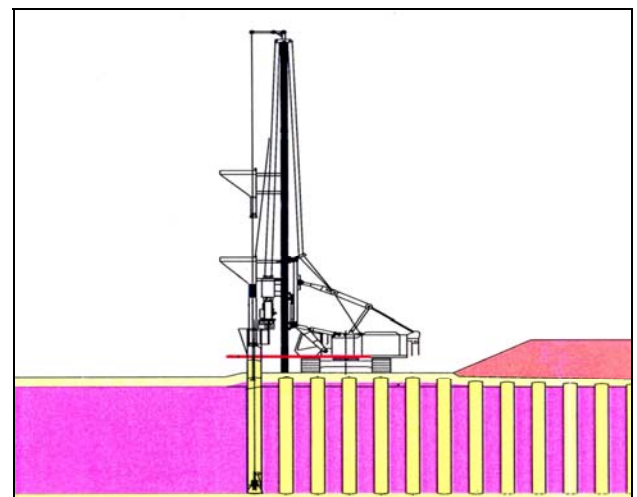


Figura 4: metodo di infissione per dislocamento

Le figure 4 e 5 illustrano il metodo di infissione per dislocamento ed una colonna di GEC "in aria" (senza pressione laterale di confinamento) in un campo prova dimostrativo.



Figura 5: colonna GEC "in aria"

4. Metodi di calcolo

I primi metodi di calcolo per le colonne di sabbia incapsulate con geosintetici furono introdotti da Van Impe (1987) ed in seguito sviluppati per mezzo di analisi con modelli ad elementi finiti (FEM). Ulteriori sviluppi si sono poi avuti nel 1999-2000 a seguito di ricerche effettuate da Raithel e Kempfert, che hanno portato alla definizione di un metodo di calcolo analitico. Tale metodo, seppure introduca alcune necessarie approssimazioni, fornisce un valido strumento per effettuare una prima valutazione del problema nelle situazioni "standard".

Grazie al metodo di Raithel e Kempfert si possono ottenere dei grafici che, a seconda delle caratteristiche del terreno di fondazione, dell'altezza del rilevato, del tipo di terreno di rilevato, della percentuale di colonne e del modulo elastico del geotessile permettono di calcolare il cedimento previsto (il cedimento, come detto in precedenza, avverrà quasi esclusivamente durante la fase di costruzione). Si ritiene che tali grafici, basati su una serie di metodi analitici, siano oggi un ottimo aiuto in fase pre-progettuale per avere un dimensionamento di massima del sistema GEC. (Fig. 6)

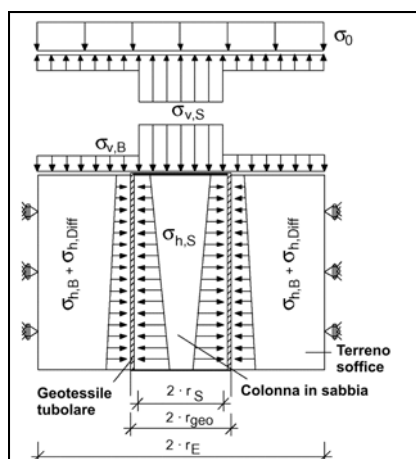


Figura 6: modello di calcolo

4.1. Esempio di dimensionamento del sistema GEC

A titolo di esempio, si analizza il problema di un rilevato di altezza 4 m su un terreno soffice di 10 m di spessore (modulo edometrico 0.5 MPa). Il cedimento previsto, senza opere di fondazione, è pari a 1,5 m circa.

I grafici riportano in ascissa il modulo elastico J (rigidezza tensionale) del geotessile impiegato che ne rappresenta la rigidezza anulare, ed in ascissa il cedimento, mentre le curve rappresentano diverse densità percentuali delle colonne. Quindi, note due di queste variabili, può essere facilmente calcolata la variabile incognita.

Ipotizzando di utilizzare un geotessile con una rigidezza anulare di 3000 kN/m ed una percentuale di colonne del 10 %, dal grafico sotto riportato si ottiene un cedimento di circa 28 cm rispetto al cedimento di 1,5 m senza GEC (Fig. 7).

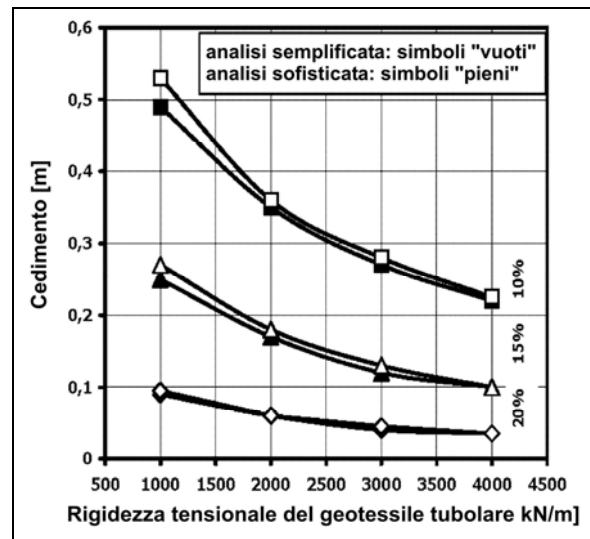


Figura 7: grafici per il dimensionamento del sistema GEC

5. Esempio di realizzazione del sistema GEC - Progetto Muehlenberger Loch - Amburgo

A partire dal 1996, grazie a questo innovativo sistema di costruzione è stato possibile realizzare numerosi progetti di rilevati ferroviari, stradali, dighe, ecc. su terreni molto soffici in Germania, Svezia ed Olanda. Il sistema GEC si è dimostrato molto valido, sia dal punto di vista statico e della stabilità, che dal punto di vista economico.

Uno dei progetti più importanti realizzati fino ad oggi, è stata la realizzazione di una diga con fondazione su colonne in sabbia incapsulate con geotessile lungo il fiume Elba per la bonifica e recupero di una vasta area fluviale di ca. 140 ettari nella zona del Muehlenberger Loch, presso Amburgo.

L'impiego previsto di quest'area bonificata è l'ampliamento degli stabilimenti di produzione della Daimler Chrysler Aerospace Airbus per la costruzione dei nuovi Airbus A380 da mille passeggeri e di altri modelli di aerei.

Il problema principale da risolvere è stata la realizzazione della diga perimetrale su un terreno molto soffice (c_u variabile tra 0,4 e 10 kN/m²) di spessore variabile tra 8 e 14 m (Fig. 8). La zona in questione era inoltre soggetta alle variazioni del livello del fiume Elba. Per queste tipologie di terreni (fanghi limosi) i sistemi tradizionali di fondazione quali le tecniche di miglioramento delle caratteristiche geotecniche del terreno per addensamento con vibro-infissione di pali o di colonne in sabbia e/o ghiaia non erano possibili dato il basso valore di $c_u < 15$ kN/m², limite minimo per la realizzazione di colonne in sabbia/ghiaia non incapsulate. La rimozione dei fanghi contaminati, oltre ad essere molto costosa non era comunque possibile in questo sito.

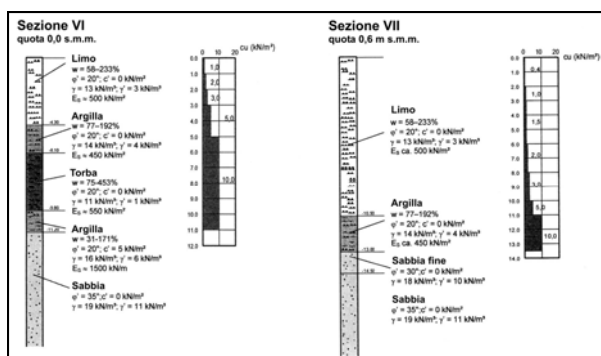


Figura 8: stratigrafia dei terreni in sito

Il progetto originale prevedeva la realizzazione di un diaframma perimetrale provvisorio in cls tirantato, lungo 2,5 km e profondo 40 m. Tale diaframma avrebbe dovuto garantire la separazione e la protezione dalle variazioni di livello del fiume Elba e permettere la realizzazione delle fasi successive di recupero dell'area da bonificare. Tale area di 140 ettari veniva quindi caricata con vari strati di sabbia e materiali aridi fino ad una quota di 5.5 m sopra il livello del mare. Dopo 3 anni, necessari alla consolidazione dei terreni soffici presenti, si sarebbe potuta costruire la diga perimetrale finale avente un'altezza di 9 m sul livello del mare e quindi sarebbe stato possibile rimuovere il diaframma provvisorio. La necessità di tale chiusura temporanea era dovuta al fatto che la posa del primo strato di sabbia di 3 m di spessore sarebbe avvenuta anche al di sotto del livello del fiume. Senza tale diaframma, l'instabile terreno soffice contaminato si sarebbe potuto spingere sia all'interno del fiume che nell'adiacente zona pianeggiante, soggetta alle variazioni del livello del corso d'acqua.

La progettazione si è pertanto orientata verso una soluzione alternativa con il sistema di fondazione GEC che ha permesso la realizzazione immediata della diga perimetrale, senza la necessità di dover costruire il diaframma provvisorio (Fig. 9).

Lo studio e sviluppo del progetto è stato condotto dallo Studio di Ingegneria Kempfert and Partner Geotechnik assieme all'impresa di costruzione che ha eseguito i lavori, Josef Möbius BauGesellschaft GmbH & Co., ed al produttore del geosintetico fornito per l'incapsulamento delle colonne, la Huesker Synthetic GmbH.

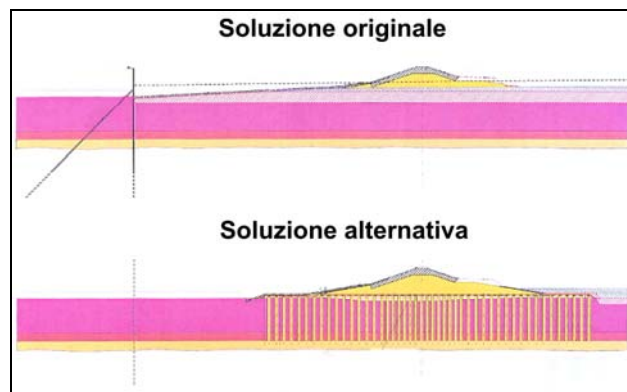


Figura 9: soluzione originale e soluzione alternativa

Il dimensionamento è stato realizzato sia con metodi analitici precedentemente descritti che con il metodo ad elementi finiti (FEM). E' stato impiegato un geotessile tessuto di incapsulamento senza cuciture, avente un modulo elastico J compreso fra 1.800 e 2.800 kN/m (rigidezza del materiale) e resistenza ultima a trazione compresa fra 100 e 400 kN/m. La percentuale di copertura delle colonne, rispetto alla superficie di base, della diga era compresa fra il 10 ed il 20 %. La verifica di stabilità globale dell'opera ha previsto inoltre la posa trasversale, rispetto l'asse della diga, di un geotessile tessuto ad elevato modulo e resistenza compresa fra 500 e 1.000 kN/m. Questo ha permesso di aumentare la stabilità dell'area retrostante la diga avente altezza fino a 5-8 metri sul livello del mare.



Figura 10: vista aerea della zona bonificata

Le colonne in sabbia del sistema GEC sono state realizzate con il metodo della vibro-infissione. Sono state posate circa 60.000 colonne, di lunghezza compresa tra 4 e 14 metri e con interasse variabile tra 1,7 e 2,4 m (Figg. 10-12).

L'addensamento del terreno soffice ha determinato un innalzamento dello stesso, all'interno ed all'esterno della maglia di colonne posate, per valori fino al 3-8 %. Non è stato rilevato alcun fenomeno di liquefazione del terreno soffice per effetto dell'azione energica di compattazione delle colonne. Misurazioni sul campo hanno mostrato un incremento della resistenza al taglio in condizione non drenate del terreno soffice adiacente alle colonne per un fattore di due che ha determinato un ulteriore effetto stabilizzante per il metodo di installazione utilizzato.



Figura 11: infissione della camicia in acciaio

La soluzione alternativa con il sistema GEC ha permesso un risparmio di 35.000 tonnellate di acciaio per la costruzione del diaframma, 1,1 milioni di metri cubi di sabbia, 8 milioni di litri di carburante, l'ulteriore bonifica di 15 ettari (essendo stata diminuita la larghezza originale della diga) ed ha permesso di ridurre di un anno il tempo di costruzione. Inoltre i cedimenti misurati sono risultati minori di quelli previsti e sono avvenuti in un tempo minore.



Figura 12: vista sui pali in sabbia incapsulati

BIBLIOGRAFIA

Alexiew D., Montez F., da Silva A.-E.-F., Brokemper D.. Simplified Estimation and Graphs for Pre-Design of Geosynthetic-Encased Sand or Gravel Columns as Embankment Foundation.

Kempfert H.-G., Möbius W., Wallis P., Raithel M., Geduhn M. & McClinton R.G. Reclaiming land with geotextiles encased columns. Geotechnical Fabrics Report, Vol 20, No. 6 Agosto 2002.

Raithel M., Kempfert H.-G.. Calculation models for dam foundations with geotextile-coated sand columns. Proc. GeoEng 2000. Melbourne, Novembre 2000.

Raithel M.. Zum Trag und Verformungsverhalten von

Geokunststoffummantelten Sandsäulen (To the bearing and deformation behaviour of geosynthetic-encased-columns). University of Kassel, Series „Geotechnics“, No. 6, Luglio 1999 (in German).

Ringtrac® - Series. Data sheets and parameters. HUESKER Synthetic GmbH, Gescher, 1997-2003

Ringtrac® M - Series. Data sheets and parameters. HUESKER Synthetic GmbH, Gescher, 1997-2003

van Impe W.F.. Soil improvement techniques and their evolution. 1989. pp. 63-66.

RIASSUNTO

Fondazioni con colonne di sabbia e geosintetici e recupero di un'area alla foce del fiume Elba

Il presente articolo illustra un nuovo sistema di fondazione per terreni soffici costituito da colonne in sabbia incapsulate con geotessile di elevate caratteristiche di resistenza a trazione, modulo elastico e bassa deformazione.

Vengono presentati i principi generali del sistema, la posa in opera ed i metodi di dimensionamento.

Viene quindi presentata un'importante realizzazione del sistema GEC impiegato nella fondazione di una diga perimetrale di 2.5 km di lunghezza sul fiume Elba ad Amburgo – Germania per il recupero di un'ampia area industriale di 140 ettari

ABSTRACT

Geotextile-encased columns foundation system and reclaiming land project at river Elba

The paper presents a new foundation system with geotextile-encased-column (GEC) on very soft soil with high tensile strength, high modulus and low deformation geotextiles. General principles of the system, installation technology and design and calculation methods are shown.

Furthermore an important application of GEC system have been presented for a land reclamation project on river Elba, Hamburg – Germany for the foundation of a 2.5 km dike length on very soft soil.