

## CONFRONTO DI DIVERSI APPROCCI PROGETTUALI PER IL DIMENSIONAMENTO DI RILEVATI SU PALI

Stefano Malvestio (stefano.malvestio@its-engineering.com), Michele Titton (michele.titton@its-engineering.com), Andrea De Pin (andrea.depin@its-engineering.com)  
*ITS-Engineering*

Francesca Ceccato (francesca.ceccato.1@unipd.it)  
*Università di Padova*

**ABSTRACT.** La costruzione di rilevati di altezza significativa su terreni compressibili e poco resistenti richiede molto spesso l'esecuzione di tecniche di consolidamento del terreno di fondazione, allo scopo di migliorarne le proprietà meccaniche e di compressibilità. Tra le molteplici soluzioni adottabili vi è quella di utilizzare pali e geosintetici. In letteratura sono stati proposti diversi metodi per il dimensionamento dei rilevati su pali e i risultati spesso differiscono molto tra loro in termini di sforzo normale agente sui pali e tensione sul geosintetico. In questo articolo vengono confrontati i risultati ottenuti seguendo l'approccio progettuale proposto dalla normativa inglese BS 8006 e tedesca EBGEO e quelli ottenuti da simulazioni numeriche con il software Midas FEA NX. Il caso studio descritto nel suddetto articolo si riferisce alla progettazione di un rilevato di raccordo al nuovo cavalcaferrovia in località Montecchio Maggiore.

### 1. INTRODUZIONE

Le dimensioni plano-altimetriche del rilevato d'approccio alla spalla del cavalcaferrovia e la presenza di uno strato superficiale di materiale coesivo fortemente compressibile e non idoneo a garantire la stabilità a breve termine dell'opera rendono necessario un intervento di miglioramento del terreno di fondazione. Al fine di garantire una resistenza sufficiente e limitati cedimenti del rilevato durante la vita utile dell'opera, si è preferita la soluzione con pali e geosintetico. Il geosintetico ha la funzione di ripartire in maniera omogenea il carico proveniente dalla sovrastruttura sul piano di posa, il quale viene poi trasferito ai terreni più profondi e resistenti per mezzo dei pali. In corrispondenza di ciascun palo è presente, inoltre, un capitello in c.a. che consente di incrementare l'aliquota di carico che viene trasferita su ciascun elemento di rinforzo.

Il presente studio si pone quindi come obiettivo il confronto tra i risultati derivanti dall'applicazione dell'approccio progettuale analitico proposto dalla normativa inglese BS 8006, tedesca EBGEO e quelli derivanti da un modello numerico tridimensionale agli elementi finiti, per la determinazione dell'aliquota di carico trasmessa ai pali di fondazione e al geosintetico, come conseguenza dello sviluppo dell'effetto arco nel terreno costituente il corpo del rilevato. Per semplificare i confronti, le analisi sono state condotte con riferimento ai valori caratteristici delle azioni, delle resistenze e dei parametri geotecnici del terreno di fondazione.

### 2. INQUADRAMENTO DELL'OPERA

Il caso studio ricade nell'ambito del progetto definitivo di realizzazione del "Raccordo e Rampa Nord Cavalca Ferrovia km 40+365,76" nel Comune di Montecchio Maggiore. Il progetto prevede la realizzazione di un rilevato della lunghezza complessiva di 280m e di altezza variabile fra 2m e 10,5m, con inclinazione delle scarpate laterali 2:3. Verrà utilizzato materiale misto granulare riciclato con le proprietà riportate in Tabella 1.

Le indagini geotecniche hanno rilevato la presenza di uno strato di argilla che raggiunge gli 8m di profondità (UG1), al di sotto del quale è presente uno spesso strato di sabbia e ghiaia (UG2). Le proprietà dei materiali sono sinteticamente riportate in Tabella 1. La successione stratigrafica di cui sopra ha reso necessaria l'adozione di tecniche di miglioramento del terreno; in particolare, nella zona più prossima al raccordo con il cavalcaferrovia, dove il rilevato ha un'altezza compresa fra 10,5m e 8,5m, si è optato per la soluzione con pali e geosintetici, oggetto del presente articolo.

Sono stati scelti pali CFA del diametro di 600mm, lunghi 8m disposti con una maglia rettangolare 2,75x2,75 m, geogriglia monodirezionale disposta in ambedue le direzioni di sviluppo del rilevato e capitello di dimensioni 1,25x1,25x0.5m in corrispondenza della testa del palo, in modo da consentire il trasferimento della maggior parte del carico ai pali senza interessare in maniera eccessiva il terreno compreso tra due elementi di rinforzo consecutivi.

Al fine di ottenere un modello di calcolo del tutto analogo a quello riportato nelle linee guida BS 8006 e EBGEO, il rilevato è stato rappresentato come in Figura 1, semplificando la reale geometria dell'opera.

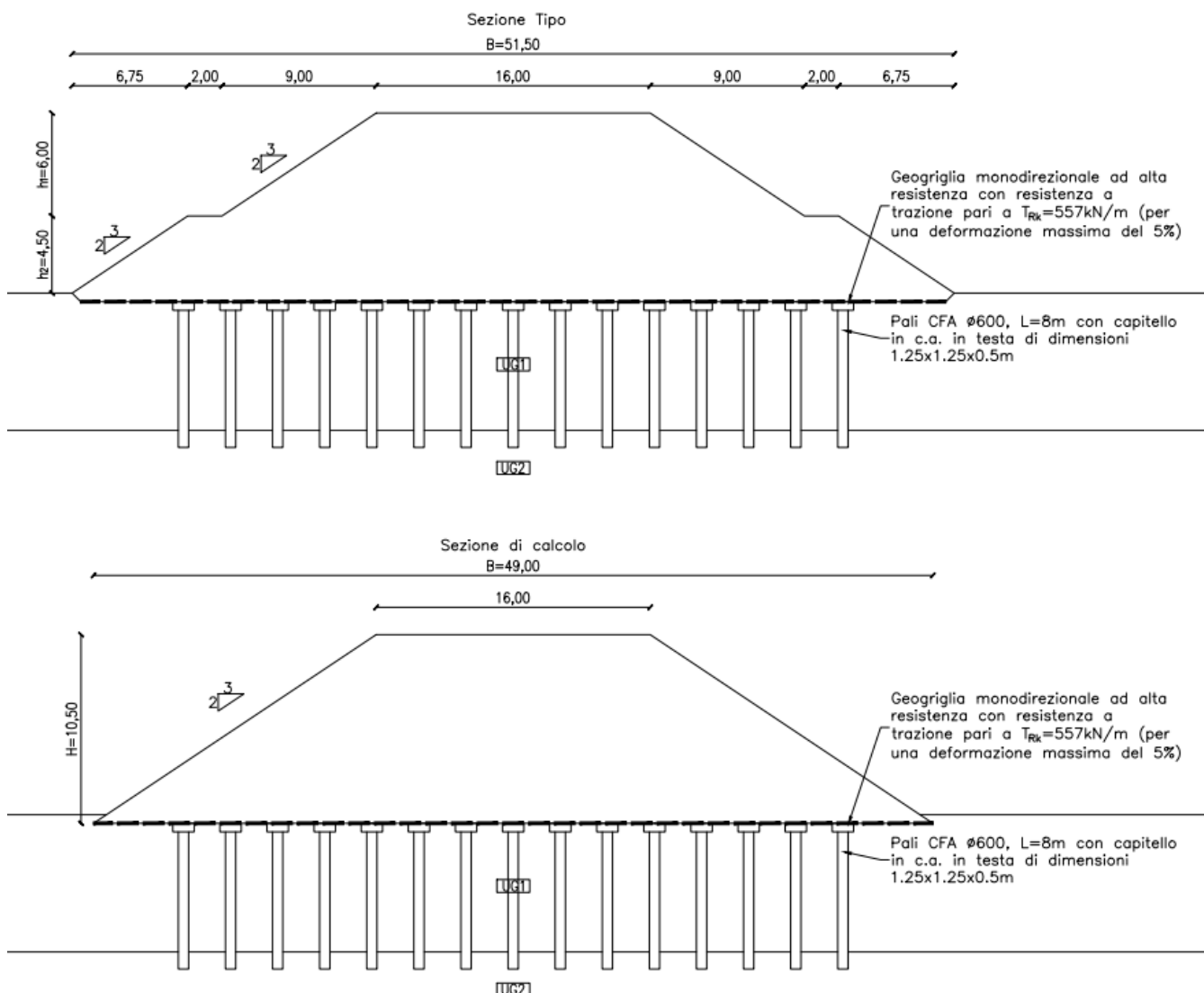


Figura 1. Confronto tra la sezione reale (in alto) e quella di calcolo (in basso), con individuazione delle principali grandezze caratteristiche.

Oltre al peso proprio del rilevato, è stato considerato, in corrispondenza della sommità del rilevato, un sovraccarico di entità pari a  $q=20\text{kN/m}^2$  a simulare l'azione derivante dal transito veicolare.

Per la geogriglia si è scelto un elemento monodirezionale ad alta resistenza da disporsi in ambedue le direzioni di sviluppo del rilevato. In direzione trasversale la geogriglia adottata presenta una resistenza a trazione, determinata in corrispondenza di una deformazione massima inferiore al 5%, pari a  $T_{Rk}=557\text{kN/m}$ ; in direzione longitudinale è stata invece adottata una geogriglia avente resistenza a trazione massima, per lo stesso livello deformativo ( $\epsilon=5\%$ ), pari a  $T_{Rk}=193\text{kN/m}$ .

Tabella 1. Parametri geotecnici di riferimento.

	$\gamma$ [ $\text{kN/m}^3$ ]	$\phi$ [ $^\circ$ ]	$C_u$ [kPa]	$E'-M$ [MPa]
UG1	18	-	50	2
UG2	19	34	-	30
Rilevato	20	35	-	30

### 3. DIMENSIONAMENTO DEI PALI E GEOSINTETICI

Il calcolo dello sforzo normale  $N_k$  sui pali e della trazione  $T_k$  sul geosintetico viene condotto applicando l'approccio analitico proposto da BS 8006 ed EBGEO e la modellazione numerica con Midas FEA (v2023). Per limitare la lunghezza dell'articolo, non si descrivono dettagliatamente i due metodi ma si riassumono brevemente le ipotesi alla base delle due diverse teorie di calcolo analizzate. In BS 8006 possono essere adottati due metodi per il calcolo delle forze sui pali: la formula di Marston (1913), che assume la formazione di un arco semicilindrico, e quella di Hewlett e Randolph (1988) che assume un arco emisferico e limita la tensione massima di taglio. Per il calcolo della tensione sul geosintetico si applica la teoria della membrana elastica assumendo una distribuzione uniforme del carico e trascurando la reazione del terreno sottostante. In EBGEO si assume invece la formazione di un arco emisferico e si esegue un'analisi plastica applicando il teorema del limite inferiore. Per il calcolo della tensione nel geosintetico si applica la teoria della membrana elastica assumendo una distribuzione di pressione triangolare e tenendo conto anche della reazione del terreno presente fra i pali.

Le simulazioni numeriche sono state invece condotte su un modello 3D semplificato, realizzato sfruttando le simmetrie geometriche dell'opera. I pali vengono modellati come elementi *beam*, il geosintetico è simulato come un elemento *geogrid* mentre il terreno è modellato con elementi solidi. Le proprietà dei materiali sono elencate sinteticamente in Tabella 2 e la mesh è rappresentata in Figura 2.

Tabella 2. Parametri geotecnici di riferimento – modello numerico.

	Modello costitutivo	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	$C_u$ [kPa]	$E'-M$ [MPa]
UG1	Soft soil	18	-	50	2
UG2	Mohr Coulomb	19	34	-	30
Rilevato	Mohr Coulomb	20	35	-	30
Palo-Capitello	Elastic	25	-	-	31447
Geogriglia	Elastic	-	-	-	921050

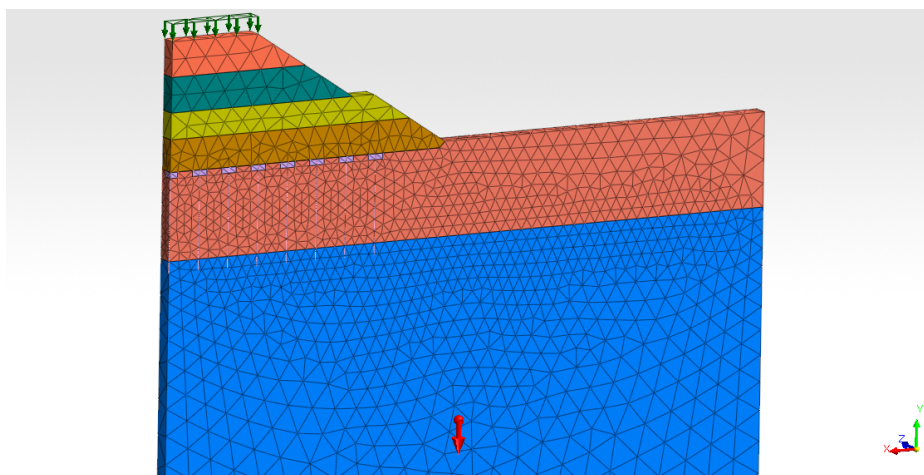


Figura 2. Rappresentazione del modello numerico tridimensionale e della discretizzazione adottata.

Nella tabella seguente si riporta, per ciascun metodo, l'efficienza del trasferimento di carico valutata con la relazione  $E = N_k / (W + Q)$ , intesa come il rapporto fra la forza trasferita ai rinforzi ( $N_k$ ) e il peso del rilevato ( $W$ ) comprensivo dei sovraccarichi valutati in corrispondenza del piano campagna ( $Q = q / (1 + h/B)$ ), la forza sui pali ( $N_k$ ), e la forza sul geosintetico derivante dallo sviluppo dell'effetto arco all'interno del corpo del rilevato ( $T_M$ ).  $T_M$  è stata calcolata in entrambi i casi assumendo una deformazione nel geosintetico pari a  $\epsilon=5\%$  e una rigidezza  $J_k$  di 9210,5kN/m. Nella trattazione descritta nelle EBGEO la tensione sul geosintetico può essere stimata considerando la reazione del terreno compreso fra i pali; in tabella 2 si riportano i valori calcolati con e senza tale contributo per facilitare il confronto con BS 8006 che assume una reazione del sottofondo nulla.

$T_M$  rappresenta la tensione sul geosintetico in direzione trasversale al rilevato, depurata della componente di trazione sollecitante legata allo spreading laterale delle scarpate, che può essere calcolato come  $T_{spreading} = 0.5\gamma h^2 k_a + qhk_a$ , con  $k_a = \tan^2(45 - \varphi/2)$ .

Si può osservare che i vari approcci di calcolo seguiti nella progettazione in essere forniscono valori molto differenti tra loro in termini di azione agente sul palo e trazione sul geosintetico. In particolare, la trattazione riportata nelle EBGEO restituisce dei valori di trazione sul geosintetico nettamente maggiori rispetto a quanto stimato con la normativa BS 8006. A seconda del metodo di calcolo seguito, la BS 8006 fornisce inoltre un'efficienza del trasferimento di carico nettamente differente; in particolare, il carico gravante sul palo con la relazione di Marston risulta inferiore rispetto a quello determinato con la relazione proposta da Hewlett e Randolph.

La modellazione numerica ha permesso di ottenere dei valori di trazione sul geosintetico e azione assiale sul palo inferiori rispetto alle trattazioni analitiche. Il carico gravante in corrispondenza del piano di posa del rilevato viene infatti in gran parte assorbito dagli elementi di rinforzo mentre la restante parte di tensione agente viene sostenuta dal geosintetico e dal terreno presente tra due elementi beam consecutivi.

Tabella 3. Confronto tra i risultati derivanti dall'applicazione dell'approccio analitico (BS 8006 e EBGEO) e numerico (Modello FEM 3D).

	E (-)	$N_k$ (kN)	$T_M$ (kN/m)
<b>BS 8006 (Marston)</b>	0.70	811.37	53.86
<b>BS 8066 (Hewlett e Randolph)</b>	0.88	1012.88	80.48
<b>EBGEO (senza reazione del sottofondo)</b>	0.817	942.4	184.21
<b>EBGEO (con reazione del sottofondo)</b>	0.817	942.4	156.58
<b>MODELLO FEM 3D</b>	-	758.4	19.2

#### 4. CONCLUSIONI

Lo scopo di questo articolo è stato quello di confrontare i risultati derivanti dall'applicazione della normativa inglese BS 8006, tedesca EBGEO ed una modellazione tridimensionale semplificata, per la valutazione delle sollecitazioni agenti sui pali e geosintetici, nell'ambito della progettazione definitiva di un rilevato di raccordo al nuovo cavalcavia ferroviario in località Montecchio Maggiore.

I risultati differiscono molto tra di loro in termini di efficienza di trasferimento del carico e quindi di sforzo normale agente sull'elemento di rinforzo e trazione sul geosintetico. In particolare, le soluzioni analitiche forniscono dei valori di trazione sul geosintetico e azione assiale sul palo nettamente maggiori rispetto a quanto ottenuto mediante simulazione numerica semplificata del problema. Nelle trattazioni analitiche del problema, ad esclusione della normativa EBGEO, la reazione del terreno presente tra due elementi di rinforzo consecutivi non viene tenuta in considerazione. La tensione agente in corrispondenza di questa porzione di terreno viene infatti considerata completamente assorbita come sforzo di trazione dal geosintetico,

A seguito di quanto esposto, l'utilizzo dell'approccio analitico proposto dalla normativa inglese e tedesca ha comunque consentito di dimensionare l'intervento di rinforzo dal punto di vista strutturale e geotecnico. Sviluppi futuri del lavoro andranno a investigare maggiormente l'effetto della tridimensionalità dell'opera.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- BS 8006 (2010). *Code of Practice for Strengthened/reinforced Soils and Other Fills*, British Standards Institution BSI, London, UK. ISBN 978-0-580-53842-1
- EBGEO (2011). *Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements—EBGEO*. Digital in English. German geotechnical society. ISBN: 978-3-433-60093-1.
- Hewlett, W. J. and Randolph, M. A (1988). *Analysis of Piled Embankments*. Ground Engineering. April pp.12-18.
- Marston A., Anderson A.O. (1913). *The theory of load on pipes ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipes*. Bulletin 31, Iowa Engineering Experiment Station, Iowa State College, Ames, Iowa.