

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
“FEDERICO II”

FACOLTÀ DI INGEGNERIA



CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN  
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

(Classe delle Lauree Specialistiche in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Classe N. 38/S)

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA IDRAULICA,

GEOTECNICA E AMBIENTALE

SINTESI DELL'ELABORATO

***COMPORAMENTO MECCANICO  
DEI RILEVATI DI TERRA RINFORZATA***

**RELATORE**

Prof. Ing. Gianfranco URCIUOLI

**CANDIDATO**

Giuseppe SPIZUOCO  
matr. 324/216

**CORRELATORE**

Dott. Ing. Marianna PIRONE

Anno Accademico 2011-2012

## **LE TERRE RINFORZATE**

Negli ultimi anni si sono diffuse notevolmente le tecniche di rinforzo delle terre in grado di assolvere sia alla funzione di opere di sostegno che di rispondere alle esigenze di salvaguardia ambientale e di corretto inserimento paesaggistico-ambientale dell'opera. La tecnologia delle terre rinforzate rappresenta la ripresa ed il perfezionamento, in chiave moderna, di sistemi di rinforzo praticati da molti anni. Negli anni settanta hanno cominciato a diffondersi i geosintetici ed altre tecnologie, oggi ampiamente sperimentate in tutto il mondo, che offrono prestazioni molto interessanti sotto vari aspetti: tecnici, economici ed ambientali. Si è arrivati, grazie allo sviluppo della tecnologia dei prodotti sintetici, ad una razionalizzazione di tale utilizzo. Sono state analizzate le proprietà dei vari materiali utilizzati, definite le caratteristiche di deformabilità e il loro comportamento nel tempo in relazione ad eventuali fenomeni di danneggiamento.

Mediante l'inserimento nel terreno di elementi dotati di resistenza a trazione, se questi sono in grado di interagire con il mezzo in cui sono inseriti, il risultato è un sistema composito dotato di caratteristiche meccaniche superiori rispetto a quelle del solo terreno.

## **TEMI TRATTATI**

L'elaborazione di tesi è relativo al comportamento meccanico dei rilevati di terra rinforzata.

- Si parte dalla descrizione della tecnica costruttiva, dei vari materiali utilizzati e di alcuni accorgimenti riguardanti la loro messa in opera. Inoltre sono illustrati il funzionamento, le varie tipologie di verifiche e i metodi di analisi (Capitolo 1).
- Sono indicate le Raccomandazioni BS8006:2010 e le Norme Tecniche per le Costruzioni del 14/01/2008 che integrano i criteri generali suggeriti dagli Eurocodici (Capitolo 2).

- Viene eseguita l'analisi di un rilevato di terra rinforzata per campo di suzione nulla utilizzando un software commerciale che implementa il metodo degli elementi finiti (PLAXIS-2D). Lo scopo dell'applicazione è valutare come le variabili in gioco nella definizione del modello (densità del reticolo di elementi finiti, lunghezza dei rinforzi, rigidità del paramento) influiscono sul valore del coefficiente di sicurezza FS e quindi sulla stabilità del pendio. Inoltre sono state calcolate le caratteristiche della sollecitazione nei rinforzi a rottura ed anche in condizione di esercizio (Capitolo 3).
- E' stato studiato il comportamento meccanico del rilevato in condizione di parziale saturazione. Sono stati analizzati i benefici e le problematiche che si manifestano al variare delle condizioni esterne (piogge) ed è stata valutata l'efficacia di un possibile intervento di impermeabilizzazione capace di conservare elevate suzioni nel sottosuolo evitando l'infiltrazione delle acque meteoriche (Capitoli 4 e 5).

## **RISULTATI**

E' stato analizzato attraverso il codice di calcolo agli elementi finiti PLAXIS-2D un rilevato di altezza pari a 12 m e pendenza del paramento pari a  $65^\circ$ , costituito da terreno granulare di buona qualità ben compattato. Le analisi di stabilità globale condotte secondo le NTC del 14/01/2008, considerando il rilevato di terra rinforzata e campo di suzioni nulle ( $\gamma=19 \text{ kN/m}^3$ ,  $\phi'=40^\circ$ ,  $c'=0 \text{ kPa}$ ) con paramento rinverdito flessibile costituito da una rete elettrosaldata, mostrano che la configurazione progettuale ottima che garantisce la stabilità prevede una lunghezza dei rinforzi pari a 6 m nel primo gradone al piede del pendio e 8 m nei restanti gradoni, fornendo un valore del coefficiente di sicurezza FS pari a 1,127. Il meccanismo di rottura generale è di tipo misto, in quanto la superficie di scorrimento critica interseca solo i rinforzi posti al piede del pendio mentre i restanti sono inglobati nel volume di terreno instabile.

Il meccanismo di rottura critico per i rinforzi è il raggiungimento della resistenza a trazione. Ciò si evidenzia nei rinforzi posti al piede del pendio in cui gli sforzi assiali sono grosso modo costanti e pari alla resistenza a trazione di progetto ad essi attribuita, nella condizione di collasso globale.

La messa in opera di un paramento rigido costituito da pannelli di calcestruzzo prefabbricati non comporta, per la geometria analizzata, particolari benefici né di natura statica né “estetica” rispetto al caso in cui il paramento sia costituito da una semplice rete elettrosaldata e poi rinverdito. Infatti in entrambi i casi il valore del coefficiente di sicurezza, la posizione della superficie di scorrimento e gli sforzi assiali nei rinforzi sono confrontabili. Sostanziali variazioni si riscontrano tuttavia nei rinforzi posti al piede del pendio intersecati dalla superficie di scorrimento critica in cui si nota uno spostamento della distribuzione degli sforzi assiali verso il paramento che svolge la funzione di contenimento, assorbendo tali sollecitazioni. Lo stesso fenomeno non si ripete nei rinforzi superiori probabilmente perchè essi sono interessati da un meccanismo di rottura globale non essendo intersecati dalla superficie di scorrimento critica.

Il paramento rigido, invece, è efficiente nel caso di muro verticale di terra rinforzata; infatti in tal caso gli sforzi assiali di progetto risultano essere molto maggiori rispetto al caso di scarpata a gradoni. Tali sollecitazioni sono assorbite dal paramento che svolge perfettamente la sua funzione di contenimento. Il sistema costituisce una valida alternativa tecnico-strutturale ai tradizionali manufatti in calcestruzzo nonché ai muri di cemento armato o modulari prefabbricati; la loro maggiore competitività economica è dovuta alle operazioni di carpenteria, getto e maturazione del calcestruzzo con riduzione dei costi globali dell'opera anche del 25%. Inoltre la realizzazione del muro a paramento verticale consente di occupare un minor ingombro in pianta riducendo in tal modo gli oneri di esproprio rispetto al caso di scarpata a gradoni inclinati.

La condizione di parziale saturazione (nel caso esaminato la distribuzione è idrostatica) favorisce notevolmente la stabilità del pendio. Il miglioramento delle caratteristiche meccaniche del terreno si traduce nella messa in opera di rinforzi di lunghezza minore (3 m nel primo gradone al piede del pendio e 5 m nei restanti gradoni) per garantire un coefficiente di sicurezza ottimizzato ( $FS_{ottimo}$ ) pari a 1,117.

Confrontando i risultati delle analisi eseguite, considerando il terreno nelle condizioni di completa e parziale saturazione riferite a modelli geometrici perfettamente uguali è possibile concludere:

- 1) nel caso di terreno parzialmente saturo FS subisce un incremento di circa il 23% passando da un valore di 1,127 ad un valore di 1,39;
- 2) la posizione della superficie di scorrimento critica nelle due condizioni, sostanzialmente non cambia: essa è quindi indipendente dal regime di pressioni neutre nel terreno ma dipende essenzialmente dalla lunghezza dei rinforzi;
- 3) gli sforzi assiali nelle geogriglie di rinforzo sono maggiori in condizioni di completa saturazione rispetto alle condizioni di parziale saturazione. La riduzione dello sforzo assiale massimo è di circa il 40% passando da un valore di 16,73 kN/m ad un valore di 6,803 kN/m;
- 4) la messa in opera della terra in condizione di parziale saturazione consente di utilizzare rinforzi di lunghezza inferiore risparmiando 60 m lineari a metro nella direzione longitudinale.

Sotto ponendo la superficie del rilevato ad un periodo di piogge di 2 mesi si verifica la formazione di un fronte di saturazione di spessore pari a circa 3 m che comporta una drastica riduzione della suzione e del relativo contributo di resistenza al taglio in termini di coesione apparente  $c_a$ . Tale riduzione di resistenza si traduce nella riduzione del coefficiente di sicurezza che passa da un valore pari a 1,39 ( in ipotesi di assenza di piogge) ad un valore di 1,32.

La messa in opera di un geocomposito impermeabilizzante sulla superficie superiore del rilevato permette di conservare in gran parte del corpo del rilevato la condizione di parziale saturazione anche in periodi dell'anno caratterizzati da precipitazioni intense. Tuttavia, l'infiltrazione di acqua attraverso il paramento fa sì che la configurazione progettuale ottima in ipotesi di assenza di pioggia non coincida con la configurazione ottima in ipotesi di precipitazione. Ciò nonostante, l'impermeabilizzazione della parte superiore del rilevato consente di ottenere ancora un notevole risparmio sulla lunghezza dei rinforzi rispetto al caso in cui tutto il rilevato si trovi in condizione di completa saturazione (ovvero campo di suzioni nulle).