

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

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

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA IDRAULICA, GEOTECNICA E  
AMBIENTALE

**SINTESI DELL'ELABORATO DI LAUREA**

**SPERIMENTAZIONE NUMERICA**

**SULLA FUNZIONE DI RINFORZO NEI TERRENI**

RELATORE

Ch.mo Prof. Gianfranco Urciuoli

CORRELATORE

Dott. Ing. Marianna Pirone

CANDIDATO

Grazia Porcaro

Matr. 324/128

ANNO ACCADEMICO 2009/2010

## RELAZIONE SINTETICA

---

Il progresso tecnologico e il miglioramento dei materiali da costruzione ha portato alla realizzazione di rilevati e scarpate “armati”, cioè opere in cui elementi resistenti a trazione vengono inclusi nel terreno. In questo lavoro di tesi sono proposti due studi. Il primo è relativo alle *terre rinforzate*, strutture utilizzate soprattutto come muri di sostegno e spalle da ponte, ma anche più genericamente in opere civili ed industriali. Si tratta di pendii artificiali in cui sono inserite ogni 50-60 cm di terreno compattato reti metalliche o polimeriche resistenti a trazione. Le reti polimeriche, dette geogriglie, possono essere, in funzione del processo produttivo, di tre tipi: estruse, tessute, a sovrapposizione di nastri elettrosaldati. Mentre i rinforzi metallici utilizzati nelle terre rinforzate possono essere di due tipi: strisce metalliche o reti metalliche a doppia torsione.

Il secondo studio, invece, è relativo alla tecnica del *Soil-nailing* (chiodatura del terreno) che consiste nell'utilizzo in versanti naturali di elementi resistenti in acciaio dolce dotati di rigidità assiale e flessionale. Tale tecnica è usata per il sostegno di scavi e per la stabilizzazione dei pendii. In base al tipo di installazione possono essere divisi in *driven*, *grouted* e *jet grouted nails*. I *driven* sono chiodi direttamente infissi, i *grouted* sono cementati a pressione atmosferica e i *jet grouted* cementati ad alte pressioni. Oltre all'installazione dei chiodi l'opera in *Soil nailing* prevede anche l'installazione di un rivestimento del paramento esterno che dipende dal tipo di struttura, permanente o temporanea. Per le strutture temporanee si adottano generalmente geotessili, mentre nell'altro caso, rivestimenti in calcestruzzo prefabbricato o gettato in opera.

Di entrambe le tecniche sono illustrati la messa in opera, le tipologie di rinforzi esistenti sul mercato, i meccanismi di trasferimento del carico dal terreno ai rinforzi e le varie tipologie di verifiche e i metodi di analisi. La modellazione dei due interventi in esame è condotta avvalendosi di due strumenti di calcolo, *SlopeW*, basato sui metodi dell'equilibrio limite e *Plaxis*, basato invece sui metodi agli elementi finiti. Il primo utilizza il *Metodo delle strisce*, in cui la massa potenzialmente instabile è suddivisa in strisce, per le quali sono soddisfatte le sole equazioni di equilibrio.

Il software *Plaxis* risolve le equazioni indefinite dell'equilibrio e quelle di congruenza. Pertanto *SlopeW* è capace di modellare le sole condizioni di rottura, *Plaxis* modella anche le condizioni di esercizio.

La modellazione dei rinforzi in entrambi i software ha tenuto conto della normativa vigente attualmente in Italia, le *Norme Tecniche per le Costruzioni 2008*, in cui si prescrive l'utilizzo di coefficienti parziali di sicurezza riduttivi, da applicare alle resistenze e amplificativi, da applicare alle sollecitazioni. Tuttavia per il calcolo del coefficiente di sicurezza da applicare alla resistenza a trazione delle geogriglie si è fatto riferimento alle Raccomandazioni Inglesi BS 8006:1995.

Avvalendosi dei due strumenti sono state eseguite analisi di stabilità di semplici schemi geometrici con l'obiettivo di capire quali variabili esercitino maggiore influenza sulla stabilità del pendio ed è stata valutata la differenza fra i due metodi utilizzati.

In *SlopeW* sono state considerate due geometrie, con caratteristiche meccaniche dei terreni diverse, una per le terre rinforzate, una seconda per i chiodi, su entrambe sono state condotte analisi parametriche facendo variare la lunghezza, l'interasse dei rinforzi e la loro resistenza massima a trazione. Per il soil-nailing sono state condotte anche analisi in cui si valuta l'effetto dell'inclinazione di infissione dei chiodi sulla stabilità globale.

Lo schema geometrico utilizzato in *Plaxis* per le terre rinforzate non lo è stesso di quello utilizzato già in *SlopeW*, mentre per i chiodi è stata riprodotto quello precedentemente analizzato in *SlopeW*, per permettere il confronto dei risultati.

Infatti confrontando i risultati delle analisi di stabilità condotte in maniera simile sia in *SlopeW* che in *Plaxis*, si perviene a valori dei coefficienti di sicurezza pressoché simili, e a superfici di scorrimento, salvo che in alcuni casi, confrontabili; in particolare, FS calcolato con *Plaxis* risulta quasi sempre essere lievemente inferiore rispetto a FS calcolato con *SlopeW*. Sebbene i due software si basino su metodi diversi, modellano il pendio al collasso fornendo risultati assimilabili.

L'utilizzo di *Plaxis* ha permesso, inoltre, lo studio della distribuzione delle sollecitazioni normali all'interno dei rinforzi sia in condizioni di esercizio che al collasso. Nella prima delle due condizioni gli sforzi normali lungo i rinforzi risultano essere trascurabili rispetto alla resistenza a trazione e a sfilamento di progetto. Pertanto in fase di esercizio i rinforzi non sarebbero caricati sensibilmente a trazione ma rappresenterebbero solo una riserva di resistenza.

Al collasso, invece, alcuni dei rinforzi, quelli posti più in basso, in particolare attingono la loro resistenza massima, mentre quelli meno profondi potrebbero più probabilmente avere una crisi per sfilamento piuttosto che per trazione.

Infine è stata condotta la modellazione di un intervento di stabilità misto: gabbionate fissate al versante tramite chiodi. La presenza delle gabbionate consente di raggiungere una stabilità globale soddisfacente con chiodi di lunghezza minore rispetto a quelli che servirebbero se l'intervento fosse costituito da sola chiodatura.

In *SlopeW* e *Plaxis* è stata riprodotta una geometria in cui si considera una gabbionata di altezza variabile connessa con chiodi di lunghezza variabile. Si sono analizzate le superfici di

scorrimento e gli incrementi in termini di coefficienti di sicurezza che si ottengono considerando solo i gabbioni, solo i chiodi e l'intervento combinato.

Inoltre sono state analizzate le sollecitazioni a rottura lungo il chiodo nel caso in cui sia inserito da solo o sia accoppiato ai gabbioni. Ne risulta che l'intervento combinato gabbioni-chiodi comporta in testa ai chiodi una sollecitazione maggiore rispetto a quella che si svilupperebbe se la gabbionata non ci fosse.