

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI “FEDERICO II”
FACOLTÀ DI INGEGNERIA



CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE ED IL TERRITORIO
(CURRICULUM *DIFESA DEL SUOLO*)

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA IDRAULICA, GEOTECNICA E AMBIENTALE

ABSTRACT

Analisi sperimentale e teorica del comportamento meccanico
di terreni rinforzati con fibre sintetiche

RELATORE

Ch.mo Prof. Ing. Alessandro Flora

CORRELATORE

Ing. Stefania Lirer

CANDIDATA

Concetta Di Mauro matr. 324/155

ANNO ACCADEMICO 2011-2012

Nel corso del tempo, l'attività di ricerca su terreni fibro – rinforzati ha dimostrato il miglioramento del comportamento meccanico del materiale composito rispetto al terreno naturale. Attraverso svariate prove su diverse tipologie di terreno e con diverse tipologie di fibre, si è comprovata l'efficacia della presenza di inclusioni che aumentano il valore di resistenza, di duttilità e riducono la perdita di resistenza nella fase post – picco. “L'uso di fibre flessibili disposte in maniera discreta e casuale imita il comportamento delle radici delle piante, dando la possibilità di migliorare la resistenza e la stabilità degli strati superficiali di terreno” (Diambra, 2008). La possibilità di impiego per la stabilizzazione di sottili strati di terreno, per la realizzazione di rilevati, etc. fanno dei terreni fibro – rinforzati una materia di ricerca estremamente interessante; i terreni fibro – rinforzati forniscono la possibilità di ridurre costi e tempi di realizzazione di un'opera, in quanto il rinforzo è realizzato a mezzo del semplice mescolamento delle fibre con il terreno in sito.

Il comportamento di tali tipi di terreni è fortemente anisotropo e dipende da vari fattori geometrici, nonché dai micro – meccanismi di interazione tra il terreno e le fibre. Sarebbe opportuno, in qualsiasi eventuale formulazione per l'interpretazione del comportamento meccanico del terreno, tener conto di parametri quali: l_f - lunghezza delle fibre, $w_f = \frac{W_f}{W_s}$ - frazione gravimetrica di fibre, $\rho = \frac{L_f}{d_f}$ - *aspect ratio* o snellezza delle fibre, d_{50} – diametro in corrispondenza del 50% di passante in peso, stato tensionale.

Il meccanismo di interazione si suddivide in due fasi. La prima fase consta di un processo puramente attritivo, la deformazione del provino induce lo scorrimento delle fibre all'interno della matrice, lo sforzo tangenziale all'interfaccia fibra – terreno, che conseguentemente si genera, si tradurrà in uno sforzo assiale nella fibra σ_f . Per stati tensionali di confinamento molto elevati il valore della tensione di snervamento della fibra σ_0 può essere superato determinando

così la seconda fase, quella di scorrimento - snervamento. L'involuppo di rottura del terreno fibro - rinforzato, rappresentativo di tali meccanismi, è di tipo bilineare (sebbene alcuni ricercatori discutano sulla validità di tale ipotesi, affermando che, talune volte, per tensioni di confinamento elevate ed involuppi di rottura bilineari, le fibre, a prova terminata, risultavano ancora integre).

L'obiettivo del presente studio è la verifica degli effetti dell'anisotropia attraverso una programmazione sperimentale costituita da 16 prove di tipo CID (consolidate isotropicamente drenate). Le prime 3 determinano il comportamento meccanico del terreno naturale e le restanti 13 coinvolgono il terreno fibro - rinforzato. Sono stati esperiti 3 differenti livelli tensionali $\sigma'_c = 50, 100$ e 200 KPa per 4 differenti giaciture delle fibre all'interno del campione ovvero $\omega = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ e 90° . Il terreno fibro - rinforzato viene realizzato impiegando una sabbia avente la seguente distribuzione granulometrica:

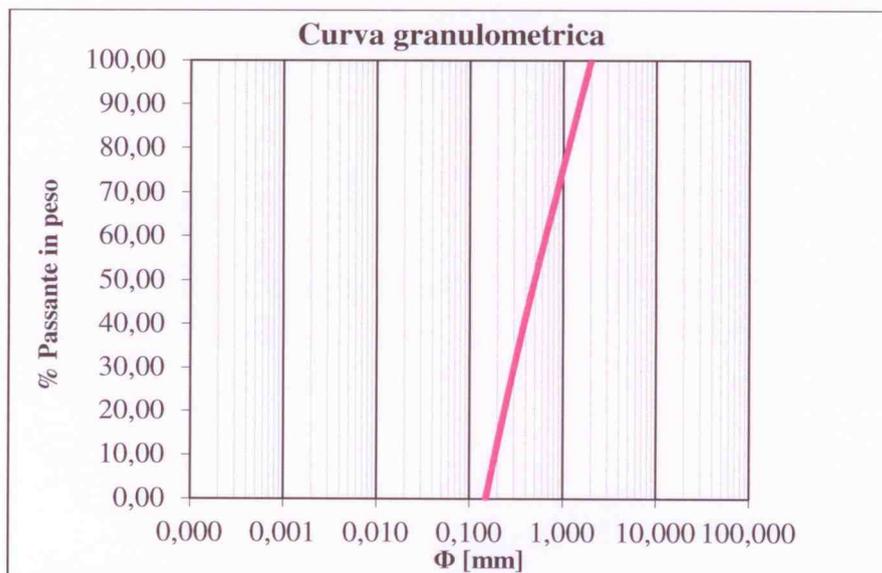


Figura 1-Curva granulometrica del materiale adoperato

e fibre in polipropilene di lunghezza $l_f = 24$ mm.

PROGRAMMA SPERIMENTALE

| NOME | TIPO | C/E | σ_c | ω | e | w |
|-------|------|-----|------------|----------|------|------|
| | | | KPa | ° | - | % |
| PT1 | CID | C | 50 | - | 1,50 | - |
| PT2 | CID | C | 100 | - | 1,50 | - |
| PT3 | CID | C | 200 | - | 1,50 | - |
| PTF4 | CID | E | 50 | 0 | 1,50 | 0,05 |
| PTF5 | CID | C | 50 | 0 | 1,50 | 0,05 |
| PTF6 | CID | C | 50 | 30 | 1,50 | 0,05 |
| PTF7 | CID | C | 50 | 60 | 1,50 | 0,05 |
| PTF8 | CID | C | 50 | 90 | 1,50 | 0,05 |
| PTF9 | CID | C | 100 | 0 | 1,50 | 0,05 |
| PTF10 | CID | C | 100 | 30 | 1,50 | 0,05 |
| PTF11 | CID | C | 100 | 60 | 1,50 | 0,05 |
| PTF12 | CID | C | 100 | 90 | 1,50 | 0,05 |
| PTF13 | CID | C | 200 | 0 | 1,50 | 0,05 |
| PTF14 | CID | C | 200 | 30 | 1,50 | 0,05 |
| PTF15 | CID | C | 200 | 60 | 1,50 | 0,05 |
| PTF16 | CID | C | 200 | 90 | 1,50 | 0,05 |

Tabella 1-Programma sperimentale

Dall'analisi dei risultati sperimentali è ben visibile l'effetto dell'anisotropia: la giacitura delle fibre più performante è quella orizzontale. Nei campioni con fibre verticali si ha persino una coincidenza dell'angolo di attrito con quello del terreno naturale, evidenziandone la completa inefficacia.

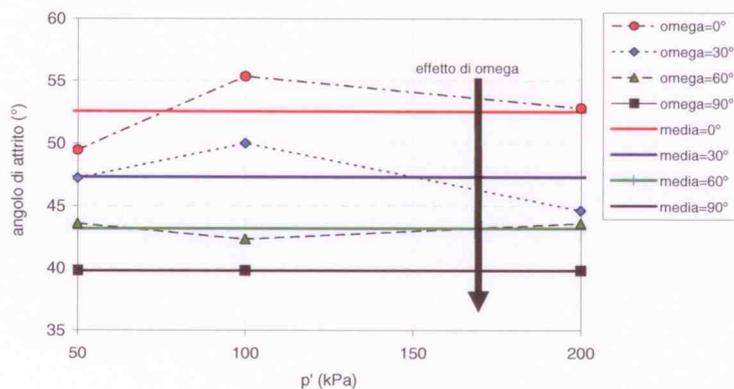


Figura 1-Valori degli angoli di attrito del terreno fibro - rinforzato in funzione della giacitura delle fibre ω

In particolare si nota una dispersione sperimentale dei risultati per alcuni valori a 0° e 30° in relazione alla tensione di confinamento; ciò nonostante, si rileva che globalmente il trend è quello atteso ed i valori di angolo di attrito si riducono all'aumentare di ω (con ω angolo di

inclinazione preferenziale delle fibre rispetto all'orizzontale). Nell'analisi dei modelli di interpretazione, considereremo, nell'intervallo di tensioni investigate, un involuppo di rottura lineare, con φ funzione non lineare di ω .

Tra le numerose trattazioni in materia vanno annoverate quelle degli autori:

- *Michalowski - 2008*
- *Lirer e Flora - 2011*

Michalowski calcola il valore di resistenza a taglio R (raggio limite del cerchio di Mohr) del materiale sfruttando il criterio di omogeneizzazione dell'energia secondo cui in una deformazione plastica incipiente il lavoro esterno è pari a quello interno dovuto alla dissipazione per scorrimento delle fibre rispetto al terreno. Siccome il materiale è fibro - rinforzato le direzioni principali di tensione ruoteranno rispetto a quelle di deformazione di un angolo m di "non coassialità" non noto *a priori*. È per questo che M. determina R come il valore minimo tra tutti i valori calcolati a diversi angoli m . L'angolo di attrito del materiale fibro - rinforzato, secondo M., è massimo quando la direzione di tensione principale massima coincide con quella di deformazione minima, formando un angolo ψ rispetto alla direzione preferenziale di giacitura pari a $90^\circ - \omega$.

L'elaborato di tesi prevede un utilizzo del modello di M. attraverso un processo di *back analysis*; sappiamo, infatti, che, a dispetto dell'anisotropia del materiale fibro - rinforzato, la direzione principale massima coincide con quella verticale in prove di compressione triassiale; conoscendo, quindi, sia l'angolo ψ pari a $90^\circ - \omega$ che ω si ricava un valore di angolo di attrito per ciascuna giacitura mediato sulle tre tensioni di confinamento. Il modello, dà una buona stima dei valori di angoli di attrito per materiali con direzione preferenziale delle fibre di tipo orizzontale, e risulta via via meno efficace nella stima all'aumentare dell'inclinazione delle

fibre fino a sovrastimare la resistenza per il materiale con fibre in direzione verticale (ove, invece, è noto che le fibre costituiscono un elemento di debolezza se soggette a compressione riducendo, addirittura, la resistenza del materiale al di sotto dei valori per solo terreno).

L'ultimo studio effettuato a riguardo, è proprio quello realizzato presso il Dipartimento di Ingegneria Geotecnica; Idraulica e Ambientale condotto dal prof. ing. Alessandro Flora e dall'ing. Stefania Lirer. Il modello stima il valore del rapporto deviatorico q/p' , attraverso un'espressione derivata dallo studio dell'interazione fibra - terreno a livello micro - meccanico. A differenza degli altri modelli, la formulazione Lirer - Flora tiene conto di tutti gli aspetti geometrici oltre che del livello tensionale:

$$\eta_r = \eta \left(1 + 0.00004 \cdot \sin \psi \cdot \beta \cdot \frac{\sigma_{y,f}^{0.85}}{p_a^{0.65} \cdot p_c^{0.2}} \right)$$

Con β pari a :

$$\beta = \sqrt{w_f \cdot \rho \cdot \frac{L_f}{d_{50}}}$$

In particolare, per considerare l'anisotropia del materiale correlata all'orientamento delle fibre, è stata inserita una funzione non lineare $\sin \psi$.

A partire dall'involuppo di rottura Lirer - Flora proposto, si è tentato, sulla base delle speculazioni effettuate dagli altri autori, di utilizzare una funzione, in luogo di $\sin \psi$, che tenesse conto della non - linearità dell'involuppo di rottura con ψ . Si è ipotizzato di ricorrere ad una funzione di orientamento delle fibre $\lambda(\theta)$ di tipo ellittica $\lambda(\theta) = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta}}$ (con

$$a = \frac{2\bar{\rho}}{\xi I_1}, \quad b = \frac{2\bar{\rho}}{I_1}, \quad I_1 = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{\xi^2 + \tan^2 \theta}} d\theta$$

adoperata da Michalowski, molto schiacciata con valore $\xi = b/a = 0,0001$ in quanto, è plausibile che, sebbene la tecnica di preparazione del materiale sia tale da disporre le fibre secondo una direzione preferenziale, una piccola percentuale di fibre si discosti da quella imposta, il cui contributo, in termini di resistenza risulterà, comunque, inferiore.

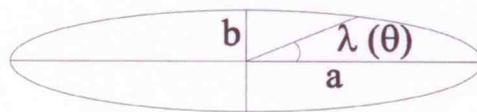


Fig. 3 Funzione di distribuzione dell'orientamento delle fibre

$\lambda(\theta)$ rappresenta la concentrazione volumetrica delle fibre rispetto al volume totale del provino.

Una volta determinato il valore di $\bar{\lambda}(\theta)$ attraverso il seguente integrale:

$$\bar{\lambda}(\theta) = \int_{-\theta^0}^{\theta^0} \lambda(\theta) d\theta$$

con $\theta^0 = \pm \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$, siccome solo le fibre in regime deformativo di trazione contribuiscono effettivamente alla resistenza, si passa alla determinazione di $w_f(\theta)$ (concentrazione gravimetrica delle fibre in funzione dell'orientamento) che verrà sostituito poi nel parametro β :

$$w_f(\theta) = \bar{\lambda}(\theta) \cdot \frac{\gamma_f}{\gamma}$$

e quindi:

$$\beta = \sqrt{\bar{\lambda}(\theta) \cdot \frac{\gamma_f}{\gamma} \cdot \rho \cdot \frac{L_f}{d_{50}}}$$

Si determina il seguente diagramma:

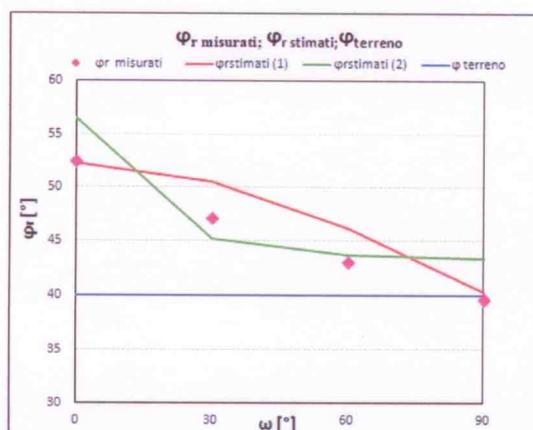


Fig. 4 Valori stimati con i due diversi inviluppi Lirer - Flora, valori sperimentali e valori del terreno naturale in funzione di ω

La curva rossa rappresenta i valori stimati mediante l'inviluppo con la funzione non lineare $\sin\psi$, la verde, invece è quella ricavata attraverso l'introduzione della funzione distribuzione di tipo ellittica. Come si evince dai risultati, i valori di angoli di attrito stimati mediante l'inviluppo Lirer - Flora modificato seguono con buona approssimazione l'andamento reale se si eccettua il valore in corrispondenza della giacitura a 90° .

Molto probabilmente con una differente funzione $\lambda(\theta)$, si potrà meglio modellizzare la variazione di resistenza all'interno di un terreno fibro - rinforzato in relazione alla direzione di orientamento preferenziale delle fibre.