

COMPRESSIBILITÀ E RESISTENZA DI UN TERRENO ARGINALE RINFORZATO CON FIBRE DA SCARTI TESSILI

Chiara Rossignoli (chiara.rossignoli@polimi.it)

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano

Marco Caruso (marco.caruso@polimi.it)

Laboratorio Prove Materiali, Strutture e Costruzioni, Politecnico di Milano

Donatella Sterpi (donatella.sterpi@polimi.it)

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano

ABSTRACT. L'articolo propone un'indagine sperimentale sul miglioramento e il rinforzo di terreni arginali tramite l'utilizzo di fibre da scarti tessili. Attraverso prove di laboratorio su terreni a cui sono state aggiunte fibre di lino e viscosa, sono stati valutati gli effetti della presenza delle fibre sulla compattazione e sulla resistenza del terreno. I risultati mostrano che l'aggiunta di fibre modifica la risposta del terreno in termini di compattazione riducendo la massima densità secca e aumentando il contenuto d'acqua ottimo. Inoltre, la presenza delle fibre può aumentare significativamente la resistenza al taglio del terreno, in funzione della loro geometria (i.e. diametro e lunghezza) e della quantità considerata. Ulteriori analisi su campioni di dimensioni maggiori sono raccomandate per studiare il comportamento dei terreni rinforzati con fibre tessili, a diverse scale.

1. INTRODUZIONE

Le opere in terra di difesa dalle acque subiscono deterioramenti dovuti al naturale invecchiamento e ad azioni esterne. La degradazione dei materiali e le interazioni terreno-atmosfera, insieme all'attività della fauna fossoria, compromettono stabilità e funzionalità delle strutture arginali.

La riparazione degli argini implica interventi mirati a ripristinare la loro integrità strutturale, come la chiusura di fratture e tane. Tali interventi richiedono l'adozione di metodologie che siano adeguate dal punto di vista ingegneristico e che siano in grado di garantire la sostenibilità ambientale. In letteratura è stata ampiamente studiata l'efficacia dell'utilizzo di fibre per il rinforzo dei terreni (Shukla, 2017) e, in particolare, è stata recentemente considerata la possibilità di utilizzare fibre provenienti da scarti tessili (Rahman et al., 2022).

La presente ricerca ha il duplice obiettivo di proporre metodologie efficaci e sostenibili per il miglioramento e il rinforzo degli argini e per il riutilizzo di scarti tessili altrimenti destinati alle discariche o all'incenerimento (Rossignoli et al., 2023). L'articolo presenta un'indagine di laboratorio su terreni trattati con fibre tessili. In particolare, si presentano i risultati di prove di compattazione Proctor Standard (ASTM D698-12, 2021) e di taglio diretto (EN ISO, 2019) su terreni rinforzati con fibre di lino e di viscosa per valutarne l'effetto sulla compattazione e sulla resistenza meccanica del terreno.

2. MATERIALI E PROCEDURA SPERIMENTALE

Il terreno utilizzato è stato raccolto a Ponte Alto (MO), in corrispondenza di un vecchio argine golenale del Fiume Secchia. La caratterizzazione del terreno naturale è avvenuta presso il Settore Geotecnico del Laboratorio Prove Materiali, Strutture e Costruzioni del Politecnico di Milano. Dall'analisi granulometrica, il terreno è stato classificato come limo sabbioso con argilla, avente diametro caratteristico $d_{50}=0.042$ mm.

Per quanto riguarda gli elementi di rinforzo, sono stati considerati scarti tessili pre-consumo, forniti da industrie operanti nel settore tessile in Lombardia. In particolare, sono stati considerati scarti di lino e di viscosa, forniti, rispettivamente, dalla Tessitura Enrico Sironi (VA) e dalla società Aspesi Antonio s.r.l. (VA). La scelta dei materiali è avvenuta sulla base di considerazioni relative alla loro natura e geometria, selezionate in relazione al tipo di applicazione considerata. Il lino e la viscosa sono materiali idrofili ed essendo, rispettivamente, di origine naturale e sintetica sono ecocompatibili e risultano adatti ad applicazioni che comportano la loro permanenza nel terreno. Dal punto di vista della geometria, sono state considerate fibre monodimensionali e sono state caratterizzate definendone la lunghezza e il diametro.

La miscela tra terreno e tessili è stata realizzata aggiungendo manualmente la quantità stabilita di fibre al terreno umido e mescolando in modo tale da ottenere un composto omogeneo. L'omogeneità è stata verificata

tramite ispezione visiva. Il contenuto di fibre f_c , espresso in percentuale, è definito come: W_f/W_s , dove W_f è il peso delle fibre e W_s è il peso secco del terreno. La quantità di fibre necessarie per raggiungere il contenuto desiderato è stata valutata mediante pesatura con bilancia avente risoluzione 0.01 g. Al termine della preparazione, le miscele sono state poste in un contenitore ermetico e sono state lasciate riposare per 24 ore in modo tale da garantire uno stato di umidità omogeneo.

L'influenza delle fibre sulle caratteristiche di compattazione del terreno è stata valutata mediante prove Proctor. In particolare, sono state considerate 5 diverse configurazioni, per studiare il comportamento del terreno naturale e del terreno trattato con fibre di lino ($f_c = 1\%, 2\%$) e di viscosa ($f_c = 0.5\%, 1\%$). Per ciascuna configurazione, sono state realizzate diverse miscele, al variare del contenuto d'acqua. Il terreno è stato compattato in tre strati all'interno di un cilindro avente diametro di 10.2 cm applicando un'energia di compattazione corrispondente alla prova Proctor Standard. Al termine di ciascuna prova è stata stimata la densità secca ed è stato misurato il contenuto d'acqua. Interpolando i punti sperimentali, si è ottenuta la curva di compattazione per ciascuna delle configurazioni considerate.

L'influenza delle fibre sulla resistenza al taglio del terreno è stata analizzata mediante prove di taglio diretto. In particolare, è stato studiato l'effetto del diametro e della lunghezza delle fibre ed è stato stimato il contenuto ottimo di fibre. I provini sono stati preparati tramite compattazione Proctor Standard ad un contenuto d'acqua $w = 16\%$. I campioni a sezione quadrata (dimensione del lato 60mm e altezza 40mm) sono stati posti nella scatola di taglio, sommersi d'acqua e lasciati saturare per 48 ore. Sono state condotte prove a tre diversi livelli di sforzo verticale (25, 50 e 100 kPa). Al completamento della fase di applicazione del carico verticale, è stata avviata la fase di taglio, durante la quale è stato applicato uno spostamento orizzontale alla velocità costante di 0.01 mm/min.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

Nel paragrafo 3.1 sono riportati i risultati delle prove di compattazione Proctor. I risultati delle prove di taglio sono riportati nei paragrafi successivi (3.2-3.4).

3.1 Effetto delle fibre sulla compattazione

La Figura 1 riporta i risultati sperimentali delle prove di compattazione Proctor Standard eseguite sul terreno trattato con diverse percentuali di fibre di lino (a) e viscosa (b). La curva di compattazione del terreno naturale è rappresentata in nero, come riferimento.

L'aggiunta di fibre porta a una complessiva riduzione della densità, ovvero a una minore compattazione, con conseguente diminuzione della densità secca massima. Tale diminuzione dipende dalla tipologia e dal contenuto di fibre ed è principalmente dovuta ai meccanismi di interazione con la matrice solida: la presenza di fibre crea vuoti aggiuntivi all'interno del campione e ostacola il movimento dei grani, riducendo la loro possibilità di avvicinarsi e, quindi, inibendo la capacità di creare una struttura granulare più compatta.

Inoltre, si osserva che, con l'aggiunta delle fibre, il contenuto di acqua necessario per ottenere la compattazione ottima aumenta dal 14 al 16-17%, anche a causa della natura idrofila delle fibre.

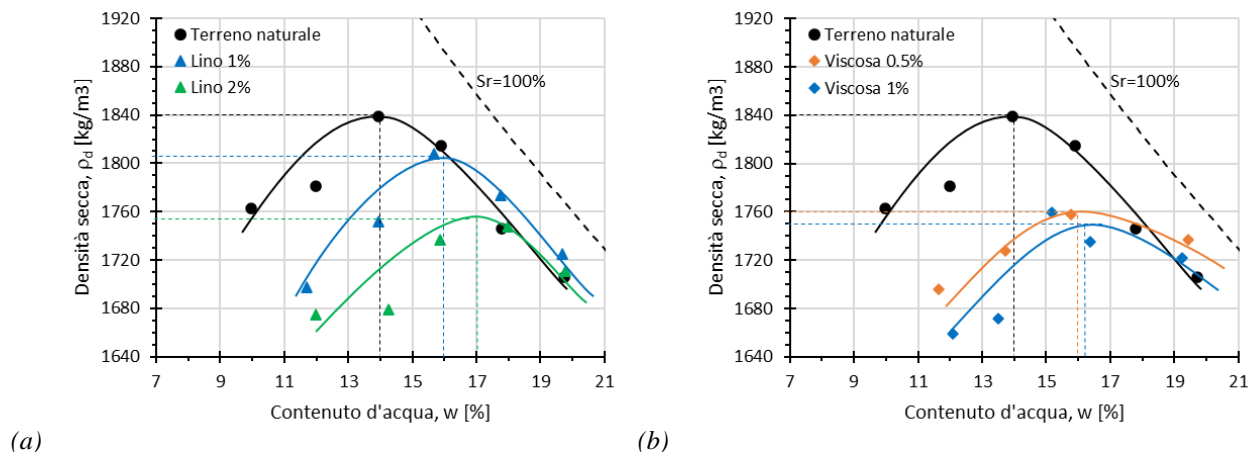


Figura 1. Risultati delle prove di compattazione Proctor Standard eseguite sul terreno trattato con diverse percentuali di (a) lino e (b) viscosa. In nero è rappresentata la curva di compattazione del terreno naturale, come riferimento.

3.2 Effetto del diametro delle fibre sulla resistenza

L'influenza del diametro delle inclusioni sulla resistenza del terreno trattato è stata studiata confrontando i risultati ottenuti considerando fibre di lino e di viscosa di lunghezza costante, pari a 15 mm, e di diametro pari a 0.6mm e 0.2mm rispettivamente. La Figura 2a riporta i risultati sperimentali della fase di taglio delle prove eseguite sul terreno naturale e trattato, per i tre livelli di sforzo verticale considerati (25, 50 e 100 kPa). Il contenuto di fibre è, per tutti i campioni, pari all'1%.

La variazione della risposta dei campioni dovuta alla presenza delle fibre è legata alla capacità delle stesse di variarne lo stato di addensamento: la presenza delle fibre tende a ridurre l'addensamento, conferendo al terreno trattato un comportamento duttile.

Per quanto riguarda la condizione ultima, le fibre di viscosa aumentano significativamente la resistenza del materiale, mentre la resistenza del terreno trattato con fibre di lino si assesta su valori prossimi a quelli osservati per il terreno naturale. Tale risposta è dovuta alla differenza di diametro tra le fibre di lino e di viscosa. A parità di peso, queste ultime, avendo un diametro minore e un peso specifico confrontabile, sono presenti in maggiore quantità all'interno del campione e, di conseguenza, garantiscono la presenza di maggiori punti di contatto con il terreno; in questo modo, il campione risulta una miscela di terra e fibre uniformemente diffuse (Figura 2b). L'aggiunta delle fibre di lino, invece, non produce effetti rilevanti poiché la quantità di fibre all'interno del terreno non è sufficiente a garantire una adeguata adesione tra fibre e terreno. Inoltre, poiché il loro diametro è relativamente grande rispetto al diametro caratteristico del terreno, il numero di punti di contatto tra fibre e terreno risulta ridotto (Figura 2c).

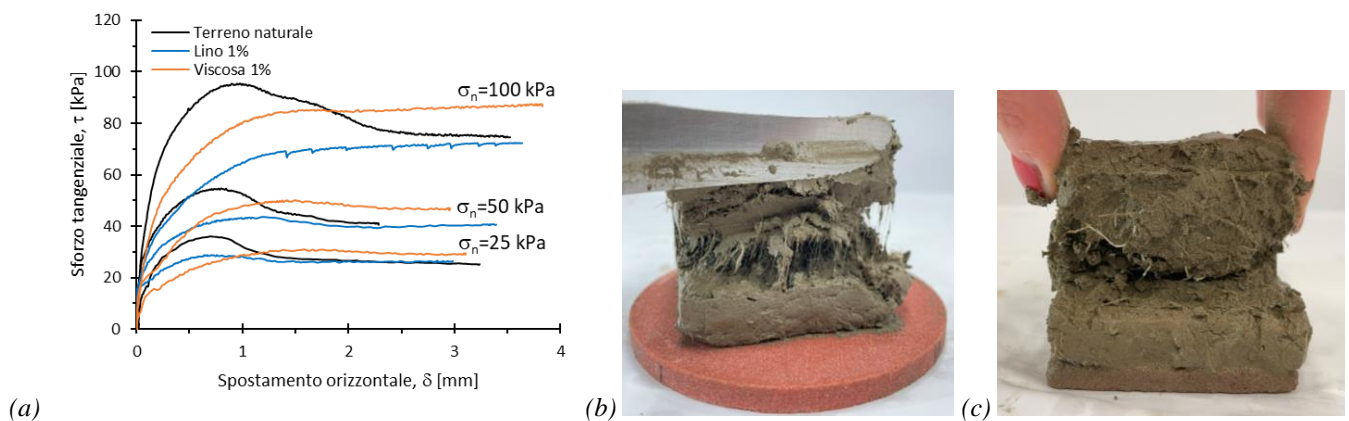


Figura 2. A sinistra: (a) risultati sperimentali delle prove di taglio diretto condotte sul terreno naturale e sul terreno trattato con lino e viscosa; $f_c=1\%$. A destra: campioni rinforzati con fibre di viscosa (b) e di lino (c). Fotografie scattate al termine delle prove, dopo aver separato manualmente la metà inferiore e quella superiore dei due campioni.

3.3 Effetto della lunghezza delle fibre sulla resistenza

L'influenza della lunghezza delle inclusioni sulla resistenza del terreno è stata studiata confrontando i risultati ottenuti considerando fibre di viscosa di lunghezza pari a 15 mm e 30 mm. La Figura 3a riporta i risultati sperimentali della fase di taglio delle prove eseguite sul terreno naturale e trattato, per i tre livelli di carico verticale considerati (25, 50 e 100 kPa). Il contenuto di fibre è 1%.

I risultati confermano che la presenza delle fibre conferisce al terreno un comportamento duttile. La presenza di fibre di lunghezza pari a 30 mm non ha un effetto positivo sulla resistenza ultima, che non si discosta significativamente da quella del terreno naturale. In questo caso, infatti, le fibre tendono a raggrupparsi tra loro, compromettendo la loro capacità di ingranarsi efficacemente con le particelle di terreno e riducendo, di conseguenza, la loro efficacia nel migliorarne la resistenza ultima.

Per i campioni rinforzati con fibre di lunghezza pari a 15 mm si conferma un aumento della resistenza del terreno, poiché la lunghezza delle fibre è tale da garantire un adeguato ingranamento con le particelle di terreno. In particolare, le fibre hanno una lunghezza molto maggiore delle dimensioni caratteristiche dei grani, ma sufficientemente piccola da escludere la formazione di raggruppamenti di sole fibre.

3.4 Effetto del contenuto di fibre sulla resistenza

L'influenza del contenuto di fibre è stata studiata confrontando i risultati ottenuti considerando diverse percentuali di viscosa di lunghezza pari a 15 mm. In particolare, sono stati considerati contenuti di fibre pari a 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00% e 1.25%.

La Figura 3b riporta i risultati sperimentali della fase di taglio delle prove eseguite sul terreno naturale e trattato, ad uno sforzo verticale di 100 kPa. Per contenuti di fibre pari a 0.25%, 0.50% e 0.75% la resistenza ultima del terreno si assesta su un valore prossimo a quello osservato per il terreno naturale. Quando il contenuto di fibre è pari a 1%, la resistenza è massima; mentre incrementandolo ulteriormente fino all'1.25% si osserva una minore resistenza a causa della formazione di raggruppamenti di sole fibre che risultano separati dalla matrice solida e, di conseguenza, inefficaci nel conferire resistenza al terreno. È stato quindi riconosciuto che esiste un contenuto di fibre ottimo in corrispondenza del quale la resistenza ultima è massima; per il caso analizzato tale valore è pari all'1%.

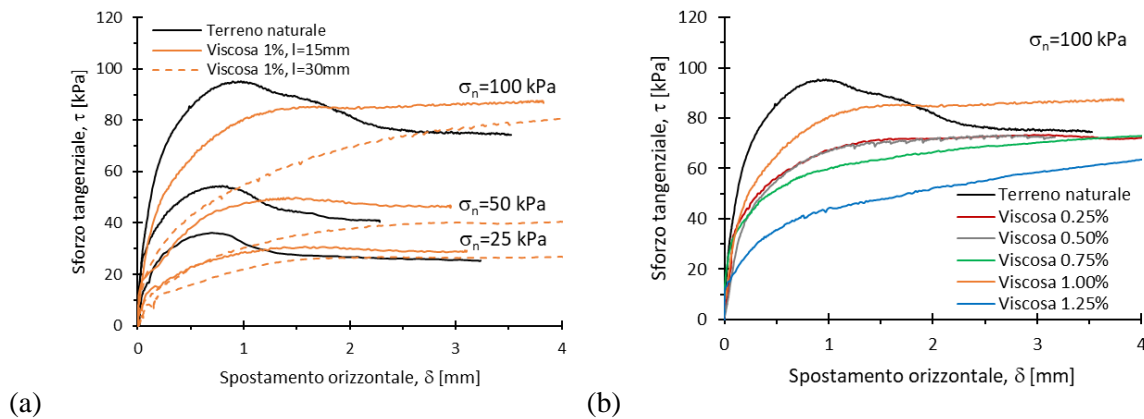


Figura 3. Risultati sperimentali delle prove di taglio condotte sul terreno naturale e terreno trattato (a) con fibre di viscosa di lunghezza 15 e 30mm; $f_c=1\%$ e (b) con fibre di viscosa di lunghezza 15mm, per diversi contenuti di fibre.

4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Sono state eseguite prove di compattazione e prove di taglio diretto su campioni di terreno rinforzato con fibre di lino e di viscosa. La presenza delle fibre limita il movimento dei grani e crea vuoti aggiuntivi nel terreno, riducendo la massima densità secca raggiungibile tramite compattazione. Inoltre, la presenza di fibre idrofile contribuisce all'aumento di contenuto d'acqua ottimo grazie alla loro capacità di trattenere acqua.

I risultati delle prove di taglio hanno messo in luce che la presenza delle fibre conferisce al terreno un comportamento duttile. La resistenza del terreno è migliorata se si considerano fibre il cui diametro e la cui lunghezza sono tali da garantire un adeguato ingranamento con il terreno. Prove condotte considerando diversi contenuti di fibre hanno dimostrato che esiste un contenuto di fibre ottimo in corrispondenza del quale si ha la resistenza massima e oltre il quale la resistenza del terreno trattato è minore di quella del terreno naturale.

L'impiego di terreni rinforzati con fibre da scarti tessili appare quindi una soluzione efficace nell'ambito degli interventi di riparazione e rinforzo degli argini, tuttavia, è necessario valutare l'influenza delle dimensioni del campione. Come passo successivo, si condurranno prove di taglio su campioni di grandi dimensioni per verificare come cambia la resistenza meccanica al variare delle dimensioni del campione e della lunghezza delle fibre.

5. BIBLIOGRAFIA

ASTM Standard D698-12 (2021). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.

EN ISO 17892-10:2019 - Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 10: Direct shear tests.

Rahman S.S., Siddiqua S., Cherian C. (2022). Sustainable applications of textile waste in the construction and geotechnical industries: a retrospect. *Cleaner Engineering and Technology*, 6, 100420.

Rossignoli C., Caruso M., Jommi C., Sterpi D. (2022). Preliminary experimental investigation into the use of recycled fibres from textile waste for the improvement of embankments. *Journal of Water and Land Development*, 59, 202-207.

Shukla S.K. (2017). *Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering*. Springer, Singapore.