

MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI DISCRETI DI UN RIVESTIMENTO CORTICALE IN RETE METALLICA

Antonio Pol (antonio.pol@phd.unipd.it), Fabio Gabrieli
Università degli studi di Padova

ABSTRACT. L'utilizzo di rivestimenti in rete metallica ha trovato largo favore negli ultimi decenni come intervento di controllo di fenomeni di instabilità superficiale lungo pendii e scarpate. Tuttavia le metodologie di dimensionamento risultano ancora notevolmente semplificate e presentano alcune criticità. Forti incognite sono legate alla scelta del meccanismo di rottura da assumere per lo strato instabile. Inoltre viene trascurata la progressiva attivazione della capacità di contenimento della rete con la deformazione. In questo lavoro, è stato simulato un rivestimento in rete metallica interagente con uno strato granulare instabile utilizzando il metodo agli elementi discreti. I risultati ottenuti evidenziano il meccanismo di rottura caratteristico del problema. Inoltre risulta possibile ricostruire il comportamento meccanico del sistema in rete in termini di legame forza-spostamento, e dunque caratterizzare l'azione stabilizzante che esso applica sul materiale a tergo.

1. INTRODUZIONE

La messa in sicurezza di fenomeni di instabilità superficiale su pendio viene generalmente eseguita mediante l'installazione di rivestimenti flessibili. Fra le possibili scelte tecniche, l'utilizzo di rivestimenti corticali in rete metallica (o reti corticali) risulta frequente nella pratica in quanto questi offrono una elevata capacità di ritenuta unita alla facilità di posa in opera. La rete metallica viene ancorata alla parte stabile del pendio tramite l'installazione di barre d'ancoraggio distribuite con maglia regolare (quadrata o a quinconce) lungo la superficie del pendio. La connessione fra barra di ancoraggio e rete viene effettuata mediante speciali piastre metalliche. Un esempio di applicazione è riportato in Figura 1a.

La progettazione di un sistema corticale viene eseguita generalmente attraverso metodi all'equilibrio limite. Differenti metodologie sono presenti in letteratura, esse differiscono principalmente nella rappresentazione dell'azione stabilizzante (azione concentrata o distribuita) e nella scelta del meccanismo di rottura nel materiale a tergo. Quest'ultima non è supportata da specifiche evidenze scientifiche e i diversi metodi considerano arbitrariamente meccanismi locali o diffusi. Inoltre la forte dipendenza dell'azione stabilizzante esercitata dal sistema in rete con la sua deformazione non è considerata. Tale azione viene infatti assunta costante con valori derivanti da prove di laboratorio caratterizzate da condizioni non rappresentative di quelle di reale applicazione.

In questo lavoro, il metodo agli elementi discreti (DEM) è stato utilizzato per simulare un rivestimento corticale in una condizione di sito idealizzata. L'efficacia di tale metodo nell'analisi di problemi d'interazione rete-terreno è stata dimostrata in recenti lavori (Gabrieli et al. 2018; Pol et al. 2020; Pol and Gabrieli 2021). I risultati ottenuti nel presente contributo permettono di identificare il meccanismo di rottura che si sviluppa nel materiale a tergo. Inoltre risulta possibile ricostruire il comportamento meccanico, in termini di legame forza-spostamento, del sistema in rete.

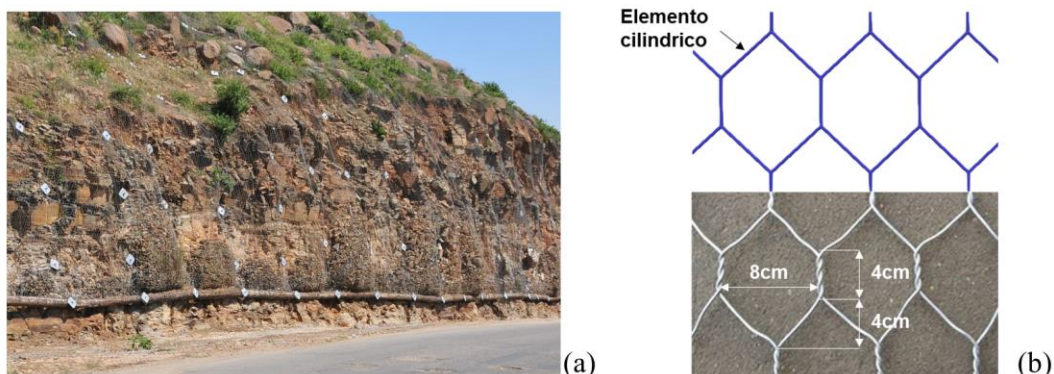


Figura 1. (a) Esempio di rivestimento corticale lungo un pendio. (b) Geometria della rete a maglia esagonale a doppia torsione e schematizzazione nel modello agli elementi discreti.

2. MODELLO NUMERICO

2.1 Modello numerico della rete

Nel presente studio è stata considerata una rete a doppia torsione con maglia esagonale 8x10 con diametro nominale dei fili 2.7mm prodotta da Officine Maccaferri. Nel modello agli elementi discreti la rete viene descritta mediante elementi cilindrici fra loro interconnessi permettendo una rappresentazione dettagliata della geometria della rete (Effeindzourou et al. 2017; Gabrieli et al. 2017). Un elemento cilindrico può essere considerato alla stregua di un classico elemento discreto, con la differenza che esso può deformare in direzione assiale; tale deformazione è regolata da una legge forza-spostamento associata all'elemento. La reazione dell'elemento è consentita solo in trazione in quanto la resistenza a compressione dei fili metallici risulta trascurabile, inoltre deformazioni flessionali/torsionali non sono considerate. In questo lavoro due differenti leggi forza-spostamento sono state utilizzate per descrivere il comportamento meccanico delle due tipologie di filo (singolo e doppia torsione) che caratterizzano la rete; tali leggi sono state ricavate da risultati sperimentali riportati in Thoeni et al. 2013. La geometria della rete è riportata in Figura 1b; nella stessa figura è inoltre presentato un confronto con la schematizzazione nel modello numerico.

Il modello numerico della rete è stato validato utilizzando risultati sperimentali di prove di punzonamento (UNI 11437-2012). Tali risultati sono stati presentati in lavori precedenti (Gabrieli et al. 2020; Pol et al. 2021) e sono per brevità omissi nella presenta nota.

2.2 Modello numerico del rivestimento corticale

Un sistema corticale di dimensioni 2.88x9m² è stato considerato in questo studio. Il sistema è costituito da tre pannelli di rete con ancoraggi disposti a maglia quadrata ed interasse di 3m in senso verticale (direzione y) e 2.88m in senso orizzontale (direzione x), come riportato in Figura 2a. Nel modello sono state considerate delle piastre di ancoraggio quadrate di lato 32cm impedendo lo spostamento degli elementi di rete da esse intercettati. Per considerare un ideale sistema infinitamente esteso in senso orizzontale sono state imposte delle condizioni di periodicità al contorno del sistema in rete. Allo stesso scopo le piastre di ancoraggio sono considerate solo per metà del loro sviluppo in senso orizzontale. Le condizioni di vincolo utilizzate sono: spostamento in direzione x (u_x) impedito per i nodi posti a $x=0m$ o $x=2.88m$; spostamento in direzione y (u_y) impedito per i nodi posti a $y=9.00m$; spostamenti impediti nelle tre direzioni ($u_x = u_y = u_z = 0$) per i nodi posti a $y=0m$ e per quelli intercettati dalle piastre di ancoraggio. Per chiarezza espositiva le condizioni di vincolo sono riportate in Figura 2a.

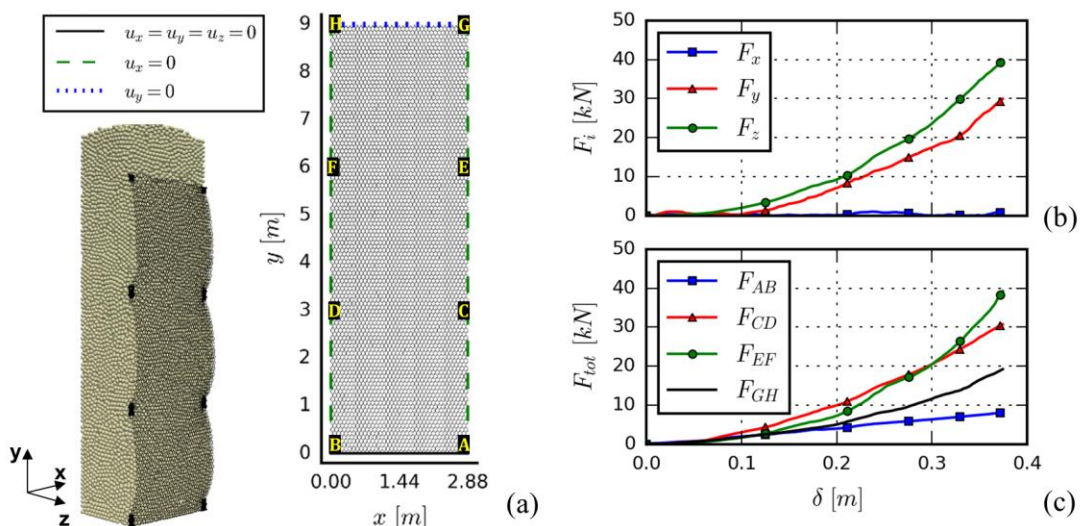


Figura 2 (a) Vista 3D del modello e condizioni al contorno utilizzate nel modello DEM.. Curve forza-spostamento relative (b) al pannello centrale, (c) alle coppie di ancoraggi ad uguale quota y (e.g. F_{AB} è data dalla somma delle forze agenti sugli ancoraggi A e B).

Lo strato di terreno instabile a tergo della rete viene schematizzato con una colonna di materiale granulare caratterizzato da un diametro medio $d_{50}=0.12m$ e densità $\rho = 2900N/m^3$. Le particelle che rappresentano il terreno numerico sono caratterizzate da una rigidità normale al contatto $k_n=6e6N/m$, una rigidità tangenziale $k_t=0.3k_n$ ed un angolo d'attrito al contatto $\phi_c=35^\circ$ (lo stesso valore è utilizzato al contatto terreno-rete). Una legge

di contatto elastica lineare in direzione normale e elastica lineare con limite plastico in direzione tangenziale sono utilizzate per contatti del tipo terreno-terreno e terreno-rete. Inoltre, una resistenza rotazionale (modello descritto in Belheine et al. 2009 con parametri $k_r=0.1$ e $\eta=0.1$) è imposta alle particelle componenti il volume granulare per ovviare alla limitazione dell'angolo di attrito macroscopico imposta dalla scelta di particelle sferiche. Lo strato di terreno è stato generato mediante una fase di deposizione a gravità all'interno di un box prismatico privo di attrito. In una seconda fase, l'instabilità del materiale granulare viene innescata rimuovendo una delle pareti di contenimento, attivando così il movimento del materiale contro la rete. Durante la simulazione vengono registrate tensioni e deformazioni di ogni filo, oltre a forze e spostamenti per gli elementi componenti lo strato di terreno. Il termine della simulazione è dettato dalla rottura del sistema rete che avviene in prossimità dell'ancoraggio F. Le simulazioni sono state eseguite utilizzando il codice open-source YADE (Šmilauer et al. 2015).

Un primo risultato è presentato in Figura 2b dove sono riportate le curve forza-spostamento ($F-\delta$), per le tre componenti spaziali, relative al pannello centrale ($3m \leq y \leq 6m$). Il rispetto delle condizioni di simmetria del problema è confermato da un valore trascurabile della forza in direzione x durante l'intera simulazione. La progressiva attivazione dell'azione stabilizzante con la deformazione della rete è evidente osservando l'andamento delle componenti in direzione longitudinale (F_y) e normale (F_z) al pannello. Tali legami forza-spostamento caratterizzano la risposta del sistema in rete tenendo conto della mutua interazione fra terreno e struttura. Essi possono essere utilizzati per migliorare la caratterizzazione del comportamento meccanico dei pannelli in rete, ad oggi legata a test di laboratorio, quest'ultimi inficiati da condizioni di vincolo e carico spesso lontane da quelle di reale applicazione. Inoltre le curve $F-\delta$ possono essere associate ai classici metodi di dimensionamento all'equilibrio limite per fornire una stima degli spostamenti necessari ad attivare la forza stabilizzante richiesta per garantire l'equilibrio del sistema terreno-rete. È infine significativo osservare come la forza F_y presenti valori comparabili con F_z ; ciò sottolinea l'importanza di considerare un'azione attritiva di interfaccia nella fase di dimensionamento. Infine in Figura 2c viene riportato l'andamento delle forze (F_{tot} è calcolata come la norma euclidea delle tre componenti spaziali) agenti sulle piastre di ancoraggio durante l'intera simulazione. Tali forze sono calcolate con riferimento alle coppie di ancoraggi ad ugual quota y (e.g. F_{AB} è data dalla somma delle forze agenti sugli ancoraggi A e B). Le relazioni ottenute possono essere utilizzate per una stima delle forze scaricate dalla rete sulle piastre di ancoraggio. Si noti che per ottenere la forza complessiva agente sugli elementi di ancoraggio, a tali forze devono essere sommate le forze esercitate dal terreno direttamente sulla parte posteriore delle piastre.

3. MECCANISMO DI ROTTURA NEL MATERIALE A TERGO

Una corretta definizione del meccanismo di rottura non può prescindere dagli effetti legati all'interazione fra la struttura di ritenuta ed il terreno. In particolare, essendo i sistemi corticali in rete notevolmente flessibili, l'attivazione dell'azione stabilizzante è fortemente influenzata dagli spostamenti indotti dal terreno sulla rete stessa come evidenziato nel precedente paragrafo. L'approccio agli elementi discreti utilizzato in questo lavoro, consente di simulare in modo realistico ed efficiente tale interazione.

In Figura 3a è riportata l'evoluzione del campo di spostamento nel terreno. Il campo di spostamento è calcolato tramite un'interpolazione lineare su una griglia regolare degli spostamenti in direzione z (i.e. d_z). Solamente gli spostamenti nella direzione fuori piano della rete sono stati considerati in quanto responsabili dell'attivazione della capacità di ritenuta di quest'ultima. Dai risultati ottenuti risulta evidente la presenza di meccanismi di rottura localizzati, ogni singolo pannello è dunque sollecitato da un cuneo di terreno delimitato dalla presenza degli ancoraggi. Il vincolo imposto dalle piastre di ancoraggio (piastre fisse) permette al terreno di sviluppare internamente un effetto arco; tale effetto tende a stabilizzare dei volumi di terreno nelle vicinanze degli ancoraggi dividendo così lo strato instabile in cunei fra loro distinti. Per visualizzare lo sviluppo dell'effetto arco nel terreno a tergo, è utile analizzare lo "strong network" (forze superiori alla forza media di contatto) delle forze di contatto fra le particelle riportato in Figura 3b. La dimensione dei tratti e la gradazione di colore è proporzionale all'intensità della forza di contatto. Si nota la presenza di catene di forze di elevata intensità in corrispondenza delle piastre di ancoraggio, tali catene evolvono all'interno del terreno formando delle "strutture ad arco" che permettono una parziale stabilizzazione della zona retrostante. I cunei instabili sono evidenziati dalle zone caratterizzate da una bassa densità ed intensità di forze di contatto (zone "bianche" Figura 3b).

Infine osservando l'evoluzione temporale del campo di spostamenti del terreno (Figura 3a) si nota una graduale attivazione dei singoli cunei. Inizialmente gli spostamenti si concentrano nella parte bassa del sistema attivando la reazione del pannello inferiore. In seguito, quando l'azione stabilizzante di tale pannello risulta sufficiente per limitare gli spostamenti del terreno, si sviluppa un secondo cuneo in corrispondenza del secondo

pannello, tale processo è poi ripetuto nel pannello superiore. L'attivazione dei singoli meccanismi locali è dunque un processo progressivo a partire dal piede del pendio.

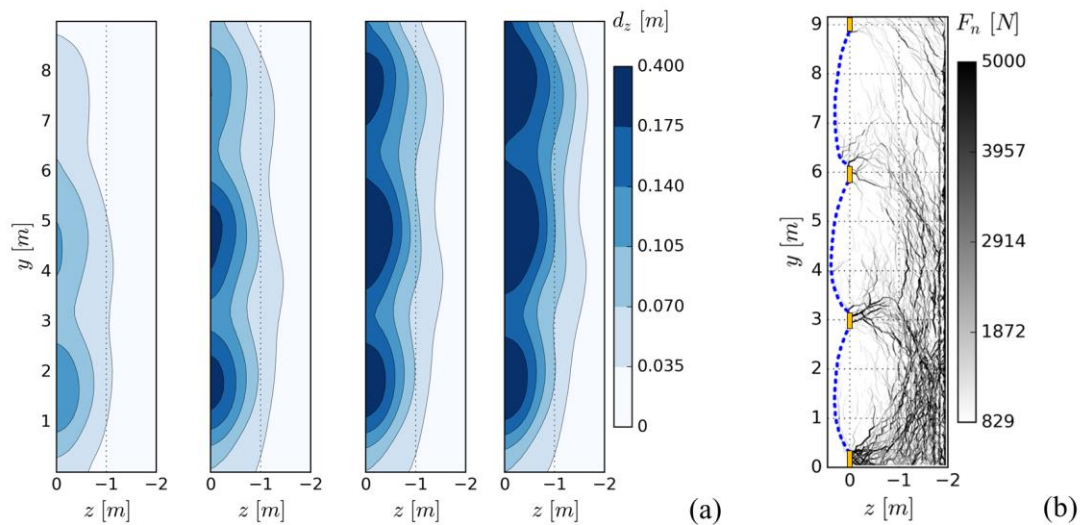


Figura 3 (a) Evoluzione del campo di spostamenti in direzione z per il materiale a tergo. (b) "Strong network" delle forze di contatto.

4. CONCLUSIONI

In questa nota un rivestimento corticale in rete, interagente con uno strato granulare instabile, è stato analizzato utilizzando il metodo agli elementi discreti. I risultati numerici hanno permesso di caratterizzarne la risposta meccanica evidenziando la forte dipendenza dell'azione stabilizzante dalla deformazione del sistema. Le curve forza-spostamento ottenute permettono una miglior comprensione del comportamento meccanico di questi sistemi, inoltre consentono una stima degli spostamenti in condizioni di esercizio. L'utilizzo di un approccio particellare ha permesso di identificare il meccanismo di rottura nel terreno a tergo. Un meccanismo locale compreso fra due ancoraggi è stato osservato. Tale risultato suggerisce che la scelta di un meccanismo locale a cuneo permette una buona schematizzazione del problema nelle classiche metodologie di dimensionamento all'equilibrio limite. L'approccio utilizzato si è rivelato efficiente nello studio di rivestimenti corticali in rete e può essere facilmente esteso per la caratterizzazione di diverse tipologie di rete e condizioni di carico.

5. BIBLIOGRAFIA

- Belheine N, Plassiard JP, Donzé F V., et al (2009) Numerical simulation of drained triaxial test using 3D discrete element modeling. *Comput Geotech* 36:320–331. doi: 10.1016/j.compgeo.2008.02.003
- Effeindzourou A, Thoeni K, Giacomini A, Wendeler C (2017) Efficient discrete modelling of composite structures for rockfall protection. *Comput Geotech* 87:99–114. doi: 10.1016/j.compgeo.2017.02.005
- Gabrieli F, Pol A, Mazzon N, Deana ML (2020) Discrete element simulations of punch tests for the mechanical characterization of cortical meshes. In: *Proc. of the 14th International Congress on Rock Mech. and Rock Eng.* pp 3401–3407
- Gabrieli F, Pol A, Thoeni K (2017) Comparison of two DEM strategies for modelling cortical meshes. *Proc Part Methods - Fundam Appl Part* 2017 489–496
- Gabrieli F, Pol A, Thoeni K, Mazzon N (2018) Particle-based modelling of cortical meshes for soil retaining applications. In: *Numerical Methods in Geotechnical Engineering IX*. London: CRC Press. pp 391–397
- Pol A, Gabrieli F (2021) Discrete element simulation of wire-mesh retaining systems: An insight into the mechanical behaviour. *Comput Geotech* 134:. doi: 10.1016/j.compgeo.2021.104076
- Pol A, Gabrieli F, Brezzi L (2021) Discrete element analysis of the punching behaviour of a secured drapery system : from laboratory characterization to idealized in situ conditions. *Acta Geotech*. doi: 10.1007/s11440-020-01119-z
- Pol A, Gabrieli F, Mazzon N (2020) Enhancement of Design Methodologies of Anchored Mesh Systems Using the Discrete Element Method. In: *Calvetti F, Cotecchia F, Galli A, Jommi C (eds) Geotechnical Research for Land Protection and Development*. Springer International Publishing, Lecco, Italy, pp 500–508
- Šmilauer V, Catalano E, Chareyre B, et al (2015) Yade documentation. In: *Release 2015-03-09.git-a2be717*
- Thoeni K, Lambert C, Giacomini A, Sloan SW (2013) Discrete modelling of hexagonal wire meshes with a stochastically distorted contact model. *Comput Geotech* 49:158–169. doi: 10.1016/j.compgeo.2012.10.014