

# MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI DISCRETI DI PROVE DI PUNZONAMENTO DI UNA RETE CORTICALE A DOPPIA TORSIONE CON MAGLIA ESAGONALE

Antonio Pol (antonio.pol@unipd.it)  
*Università degli studi di Padova, Dipartimento ICEA*

Fabio Gabrieli (fabio.gabrieli@unipd.it)  
*Università degli studi di Padova, Dipartimento ICEA*

Klaus Thoeni  
*University of Newcastle (Australia), Center for Geotechnical and Materials Modelling*

Nicola Mazzon  
*Maccafferri Innovation Center*

## ABSTRACT.

Le reti metalliche sono comunemente usate per la protezione su pendio e la prevenzione del rischio di crolli e distacchi. La loro progettazione è principalmente basata su considerazioni di carattere empirico, legate all'esperienza del progettista; data l'importanza di tali interventi, e al fine di ottimizzare il progetto, stanno entrando in uso nuovi metodi numerici. In questo lavoro verrà impiegato il metodo agli elementi discreti (DEM), particolarmente adatto per lo studio di problemi a grandi deformazioni, fino alla rottura degli elementi. L'obiettivo è quello di validare un modello di rete a doppia torsione con maglia esagonale attraverso il raffronto con i risultati sperimentali relativi a prove di punzonamento. In particolare verranno analizzati tre diversi modelli costitutivi e l'influenza delle curve tensione-deformazione relative al filo singolo e a quello doppio torto.

## 1. Introduzione

Il distacco di frammenti o blocchi da pendii ed ammassi rocciosi rappresenta uno dei rischi naturali più importanti in ambiente montano nonché nel contesto di cave e miniere. Un metodo comunemente usato per mitigare questo rischio è quello di installare sistemi protettivi come reti corticali o reti paramassi. Il loro dimensionamento avviene generalmente sulla base di considerazioni dettate dall'esperienza, anche se negli ultimi anni sono stati fatti notevoli passi avanti grazie all'avvento di nuovi modelli numerici e strategie di calcolo. Modelli numerici adeguati sono tutt'ora in fase di sviluppo e molteplici sono quelli proposti in letteratura.

Il più comunemente usato è il metodo agli elementi finiti (FEM). Questo metodo risulta notevolmente efficace nella modellazione dinamica di problemi continui, ma presenta alcune limitazioni nel caso di problemi di distacco o di rottura, legati all'elevata domanda computazionale. In questi casi il metodo agli elementi discreti (DEM) rappresenta una buona alternativa. Nel DEM il materiale viene rappresentato mediante un numero discreto di particelle rigide che possono compenetrarsi durante una collisione. Queste particelle interagiscono fra loro attraverso una specifica legge di contatto o, nel nostro caso, con una legge d'interazione a distanza; le informazioni riguardanti la posizione delle particelle vengono aggiornate ad ogni passo temporale attraverso uno specifico algoritmo di ricerca dei contatti e la successiva integrazione esplicita delle equazioni del moto.

In questo studio è stato utilizzato un modello numerico agli elementi discreti di una rete doppio torto a maglia esagonale. Tale modello è stato poi calibrato sulla base di risultati sperimentali forniti dal produttore; particolare attenzione è stata posta nella scelta delle leggi costitutive utilizzate per descrivere i fili componenti la rete. Le simulazioni sono state effettuate mediante l'utilizzo del codice open-source Yade (Šmilauer V. et al., 2010).

## 2. Modello agli elementi discreti della rete

Il modello proposto è relativo ad una rete a doppia torsione con maglia esagonale del tipo 8x10 con diametro dei fili pari a 2.7 mm. Le caratteristiche e le dimensioni della rete, considerate in questo studio, sono riassunte in Figura 1a.

L'utilizzo di una maglia esagonale regolare comporta un aumento della resistenza complessiva della rete per effetti legati alla simmetria della struttura ed alla migliore distribuzione degli sforzi sugli elementi, mentre la doppia torsione dei fili permette di prevenire la compromissione dell'intera rete nel caso di rottura di un filo singolo.

La rete è rappresentata attraverso delle particelle sferiche poste ai nodi fisici della rete (Nicot F. et al. 2001, Bertrand D. et al. 2005, Bertrand D. et al. 2008), i contatti fra queste particelle non sono generalmente permessi mentre sono consentiti i contatti tra queste ultime e ad altri elementi esterni. I fili fra le particelle non sono descritti da corpi ma da interazioni remote (Figura 1a) con delle curve forza-spostamento. La generazione della rete segue la procedura presentata in Thoeni et al. 2011. Al termine del processo di generazione tutte le particelle presentano lo stesso diametro pari a quattro volte il diametro del filo singolo, la loro densità viene modificata in modo da raggiungere la medesima massa della rete reale.

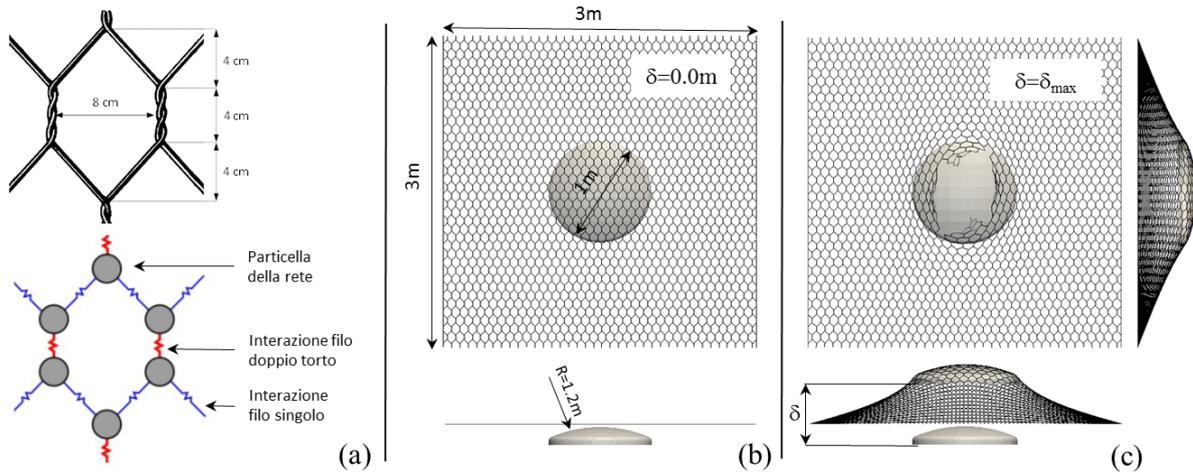


Figura 1. (a) Schema della rete doppio torto a maglia esagonale con definizione dei parametri geometrici e delle corrispondenti interazioni remote nel modello. (b) Geometria della prova di punzonamento e viste ortogonali nelle condizioni iniziali e (c) a rottura.

Nel presente studio sono state utilizzate differenti leggi costitutive allo scopo di verificare la loro validità, comparando i risultati numerici con quelli derivanti dalle prove sperimentali. Nel primo modello, presentato in Bertrand D. et al. 2008, si assume che la curva forza-spostamento relativa ad un filo a doppia torsione sia direttamente derivata da quella scelta per il filo singolo per mezzo di due parametri locali  $\lambda_k$  e  $\lambda_\varepsilon$ : il primo agisce sulla rigidità iniziale (ramo elastico) del filo doppio torto, mentre  $\lambda_\varepsilon$  quantifica la riduzione della deformazione a rottura.

Il secondo modello, presentato in Thoeni et al. 2013, usa due curve forza-spostamento distinte per i due tipi di filo. Infine viene utilizzato un modello stocastico presentato in Thoeni et al. 2013; quest'ultimo permette di tener conto delle irregolarità geometriche della rete fisica derivanti da imperfezioni nella lunghezza reale dei fili (ovvero delle interazioni remote) che compongono la rete. Tale differenza è legata al processo produttivo della rete che comporta una diversa lunghezza causata dall'andamento non perfettamente rettilineo dei fili in seguito alla realizzazione della doppia torsione. A questo scopo vengono introdotti due parametri: il primo parametro  $\lambda_u$  definisce una traslazione orizzontale della curva forza-spostamento, il secondo parametro  $\lambda_F$  modifica la rigidità del filo nella parte traslata. Queste irregolarità sono distribuite in modo casuale sulla rete in accordo con una distribuzione triangolare centrata sul valore  $0.5\lambda_u L_0$ , dove  $L_0$  è la distanza iniziale fra due particelle interagenti (lunghezza iniziale del filo).

### 3. Calibrazione del test di punzonamento

Per effettuare la calibrazione del modello sono stati utilizzati dei risultati sperimentali ottenuti da test eseguiti conformemente alla norma UNI 11437-2012. La forma del punzone è riportata in Figura 1b. La rete utilizzata ha dimensioni 3 x 3 m ed è vincolata in modo da fissare i quattro bordi della stessa alla struttura esterna. Le medesime condizioni vengono riprodotte nella modellazione numerica. Il punzone è modellato attraverso un elemento a mesh triangolare, privo di attrito, al quale è imposto uno spostamento verticale a velocità costante.

Allo scopo di poter comparare i differenti modelli, è stata inizialmente utilizzata la stessa curva tensione-deformazione, sperimentale, ottenuta da una prova di trazione sui fili. Con il modello 1 (Bertrand D. et al. 2008) solamente la curva relativa al filo singolo è rilevante e, una volta calibrati, i parametri che descrivono l'interazione del filo doppio torto risultano pari a  $\lambda_k = 0.10$  e  $\lambda_\varepsilon = 0.83$ . Per il modello 2 (Thoeni et al. 2013), deterministico, vengono utilizzate entrambe le curve sperimentali (filo

singolo e doppio torto) relative ai test di trazione. Infine per il modello 3 (Thoeni et al. 2013), stocastico, vengono inizialmente utilizzate le medesime curve del modello deterministico e poi calibrati i parametri di dispersione stocastica. La calibrazione dei parametri ha portato ai valori  $\lambda_u = 0.02$  e  $\lambda_\varepsilon = 0.80$ . In Figura 2a viene confrontata la risposta numerica dei sopra citati modelli, in termini di curva forza-spostamento sui punch test. Si può notare, in generale, un buon accordo con i risultati sperimentali per tutti i modelli utilizzati.

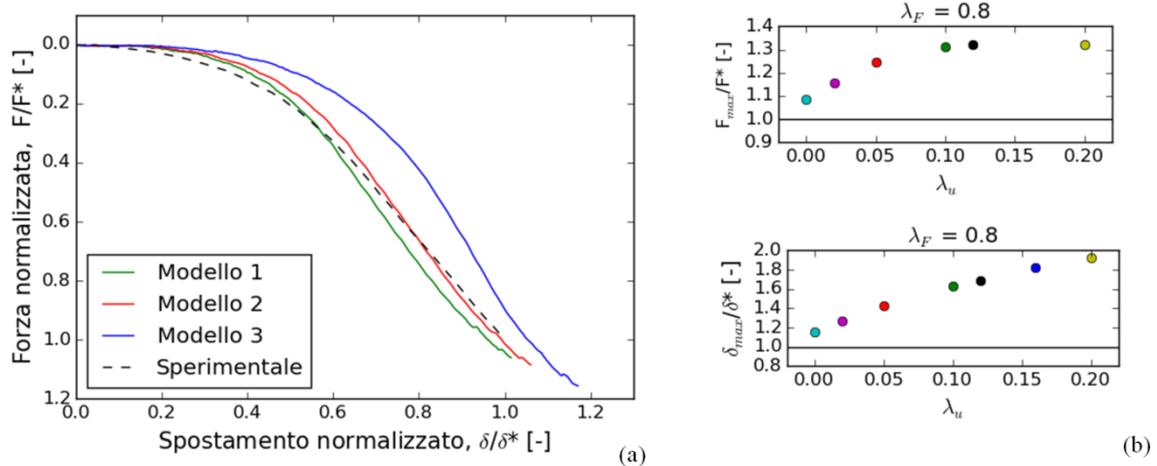


Figura 2. (a) Confronto fra risultati sperimentali (1 test) e numerici (3 modelli) relativi ad una prova di punzonamento, le curve sono normalizzate sulla media dei massimi valori sperimentali di forza  $F^*$  e spostamento  $\delta^*$ ; (b) influenza del parametro stocastico  $\lambda_u$  su forza e spostamento a rottura (modello 3).

Nei riguardi del modello stocastico, in questo caso è importante osservare che il ridotto valore di  $\lambda_u$ , ottenuto dalla calibrazione, comporta una distorsione trascurabile dei fili e quindi il modello si comporta approssimativamente alla stregua di un modello deterministico. In Figura 2b viene presentato uno studio parametrico di  $\lambda_u$ ; è possibile osservare che lo spostamento a rottura  $\delta_{max}$  decresce al diminuire di  $\lambda_u$ , mentre il valore della forza a rottura  $F_{max}$  inizialmente cresce all'aumentare di  $\lambda_u$  e oltre un valore pari a  $\lambda_u = 0.2$  questo parametro non mostra più una influenza sul valore della forza a rottura. Nel caso qui studiato i valori a rottura di forza e di spostamento non sono influenzati da  $\lambda_F$ , questo è dovuto al basso valore assunto per il parametro  $\lambda_u$ .

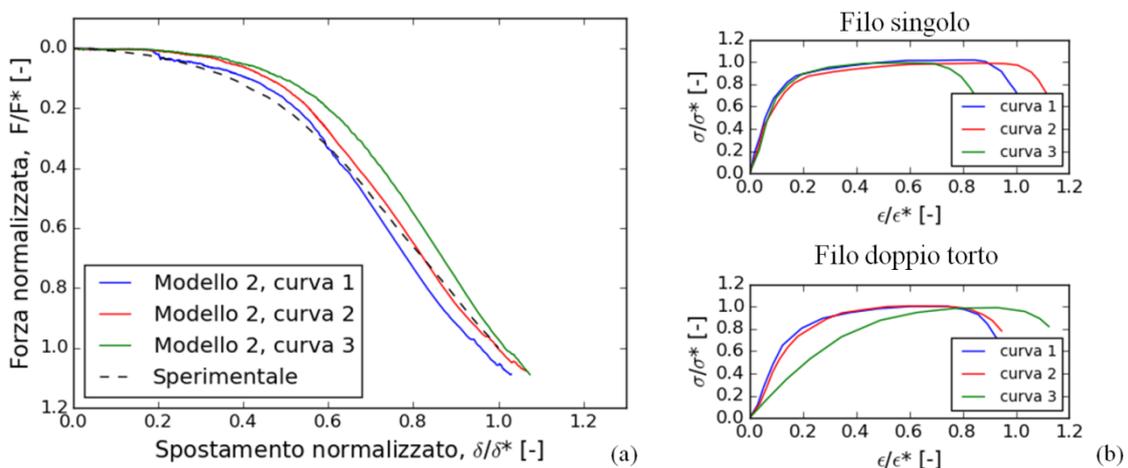


Figura 3. (a) Risposta meccanica delle prove di punzonamento (modello 2) utilizzando diverse curve tenso-deformative ricavate da prove di trazione sperimentali sui fili (le curve sono normalizzate come prima esposto); (b) curve tensione-deformazione sperimentali, normalizzate sulla media dei massimi valori sperimentali di tensione  $\sigma^*$  e deformazione  $\varepsilon^*$ , relative al filo singolo ed al filo doppio torto.

Infine è stata indagata l'influenza dovuta all'utilizzo di tre differenti curve tenso-deformative, ottenute da prove sperimentali di trazione sul filo singolo e sul filo doppio torto. Come illustrato in Figura 3a, la scelta della curva tensione-deformazione influenza il risultato numerico in maniera non trascurabile. In particolare, sia la diversa rigidità iniziale dei fili che la lunghezza del ramo plastico influenzano la deformabilità complessiva del sistema rete-punzone. La presenza di elementi più rigidi induce una concentrazione degli sforzi mentre, viceversa, un tratto plastico più ampio permette di

distribuire meglio le tensioni tra elementi con diversa rigidità. Da queste considerazioni si può immaginare come l'utilizzo di diverse curve tenso-deformative possa essere un modo per valutare i parametri del modello stocastico al fine di descrivere la variabilità che tipicamente contraddistingue le prove di laboratorio.

#### 4. Conclusioni

I risultati sperimentali di prove di punzonamento sono fondamentali per la stima e la comprensione del comportamento meccanico delle reti corticali. Il buon accordo fra risultati sperimentali e numerici mostrato in questo lavoro conferma l'efficacia di questo strumento numerico per la simulazione di prove sperimentali, da bassi livelli di deformazione della rete fino alle condizioni ultime di rottura.

L'intrinseca variabilità del materiale e della geometria della rete sembra essere importante e potrebbe essere effettivamente valutata utilizzando i risultati di una serie di prove di trazione, su filo singolo e su filo doppio torto, per la calibrazione di un modello stocastico.

#### 5. Bibliografia

- Nicot F, Cambou B, Mazzoleni G. (2001). Design of rockfall restraining nets from a discrete element modeling. *Rock Mech Rock Eng* 34, 99-118.
- Bertrand D, Nicot F, Gotteland P, Lambert S. (2005). Modelling a geo-composite cell using discrete analysis. *Comput Geotech* 32(8), 564-577.
- Bertrand D, Nicot F, Gotteland P, Lambert S. (2008). Discrete element method (DEM) numerical modelling of double-twist hexagonal mesh. *Canadian Geotech J* 45(8), 1104-1117.
- Thoeni K, Lambert C, Giacomini A, Sloan S.W. (2011). Discrete modelling of a rockfall protective system. *Oñate E, Owens D, editors. Particle-based methods II: Fundamentals and applications. II International conference on particle-based methods. CIMNE Internat Center for Numerical Methods in Engineering*, 24-32.
- Thoeni K, Lambert C, Giacomini A, Sloan S.W. (2013). Discrete modelling of hexagonal wire meshes with a stochastically distorted contact model. *Comput Geotech* 49, 158-169.
- Šmilauer V, Catalano E, Chareyre B, Dorofenko S, Duriez J, Gladky A, et al. (2010). Yade Documentation, 1st ed., *The Yade Project* <<http://yade-dem.org/doc/>>.