

ANALISI NUMERICHE DEM DI INTERAZIONE TERRENO-GEOGRIGLIA

Giovanni Stocco (stockgiov@gmail.com)

Dipartimento ICEA, Università degli Studi di Padova, Italia

Francesco Zarattini (francesco.zarattini@phd.unipd.it)

Dipartimento ICEA, Università degli Studi di Padova, Italia

Antonio Pol (antonio.pol@univ-eiffel.fr)

Dipartimento ICEA, Università degli Studi di Padova, Italia

Oliver Deter (deter@huesker.de)

Huesker GmbH, Germania

Laura Carbone (carbone@huesker.de)

Huesker GmbH, Germania

Christian Lackner (Christian.Lackner@3g.at)

3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH, Austria

Fabio Gabrieli (fabio.gabrieli@unipd.it)

Dipartimento ICEA, Università degli Studi di Padova, Italia

ABSTRACT. L'analisi dell'interazione geogriglie-terreno risulta particolarmente importante per ottimizzare i materiali e le geometrie al fine di ottimizzare il rinforzo ed è condotta tipicamente con prove di laboratorio. Dal punto di vista numerico, il metodo degli elementi discreti (DEM) si è dimostrato un valido strumento per analizzare nel dettaglio le specificità dell'interazione geogriglia-terreno sia a livello locale che macroscopico. Nel presente studio è stato utilizzato un modello 3D-DEM per simulare prove di estrazione di geogriglie eseguite in laboratorio (test di pull-out). Le caratteristiche e le proprietà micro-meccaniche degli elementi costituenti la geogriglia sono state calibrate e confrontate con prove eseguite in laboratorio su una geogriglia tessuta in PET. I terreni granulari sono stati simulati nel modello numerico utilizzando sia particelle sferiche di differenti dimensioni, sia gruppi di più sfere sovrapposte (clumps), in grado di simulare più realisticamente la forma irregolare della ghiaia.

1. INTRODUZIONE

Il comportamento meccanico delle geogriglie utilizzate per le terre rinforzate dipende dalle loro proprietà intrinseche (forma, materiale) e dalla interazione con le diverse tipologie di terreno. Considerando i terreni granulari, è di particolare interesse lo studio dell'influenza della forma e dimensione dei grani rispetto alle maglie della geogriglia, e per quest'ultima la diversa dimensione e spessore degli elementi longitudinali e trasversali. Tali fattori, infatti, possono favorire o meno l'incastro delle particelle di terreno fra le maglie della geogriglia, con conseguente minor propensione allo scivolamento di quest'ultima, in favore di un comportamento rigido in caso di applicazione di una forza di trazione.

Nel presente studio è stato utilizzato un modello agli elementi discreti per simulare una geogriglia tessuta in PET, i cui elementi sono stati modellati mediante particelle sferiche legate fra loro mentre le particelle di terreno sono state modellate sia mediante particelle sferiche sia mediante gruppi di più sfere sovrapposte (clumps) per simulare le forme più irregolari della ghiaia. Le proprietà micromeccaniche dei legami fra le sfere costituenti la geogriglia numerica sono state calibrate sulla base di risultati di prove eseguite in laboratorio su una geogriglia reale. A seguito della calibrazione sono state simulate mediante il modello prove di estrazione della geogriglia dal terreno, considerando diversi possibili scenari riguardanti il terreno.

2. MODELLO NUMERICO

2.1 Geogriglia

Le maglie della griglia possono essere modellate con i DEM utilizzando diversi approcci: mediante nodi, cilindri oppure particelle legate (Gabrieli et al., 2017). Quest'ultimo approccio delle "particelle legate" è stato

implementato nel presente studio, essendo il più accurato, in grado di simulare la resistenza a trazione e la rigidità a flessione degli elementi della geogriglia. Nel presente studio è stato utilizzato il codice DEM open-source Yade per modellare una geogriglia tessuta in PET, i cui elementi sono simulati mediante particelle sferiche di diverse dimensioni, unite fra loro da forze normali, tangenziali e rotazionali. Ciò ha permesso (a) di analizzare le proprietà a trazione e flessione degli elementi; (b) di simulare la sezione trasversale variabile degli elementi; (c) di simulare realisticamente la geometria degli elementi longitudinali.

Nel presente studio è stata considerata la geogriglia rivestita e tessuta in PET Fortrac® realizzata dalla Ditta Huesker (Fig. 1). Gli elementi longitudinali formano una spirale mentre gli elementi trasversali sono costituiti da fili fra loro indipendenti a formare una fascia flessibile. L'apertura della maglia è pari a 2 cm in entrambe le direzioni mentre lo spessore massimo è pari a 3 mm.

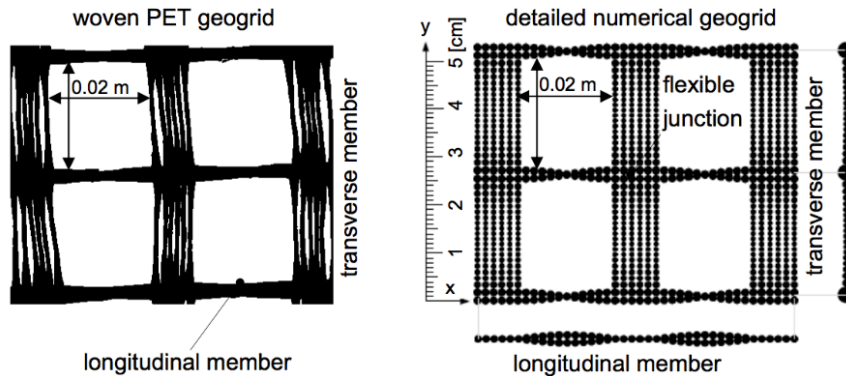


Figura 1. Geogriglia tessuta in PET Fortrac® prodotta dalla Huesker e relativo modello numerico.

Al fine di calibrare le proprietà meccaniche dei legami delle sfere costituenti la geogriglia, sono state considerate prove di laboratorio a trazione e flessione in entrambe le direzioni, trasversale e longitudinale. A titolo di esempio in Fig. 2 sono riportati i risultati per la direzione longitudinale. Nella prova di trazione la geogriglia evidenzia un comportamento pressoché elastico lineare fino alla rottura, al raggiungimento della massima resistenza a trazione.

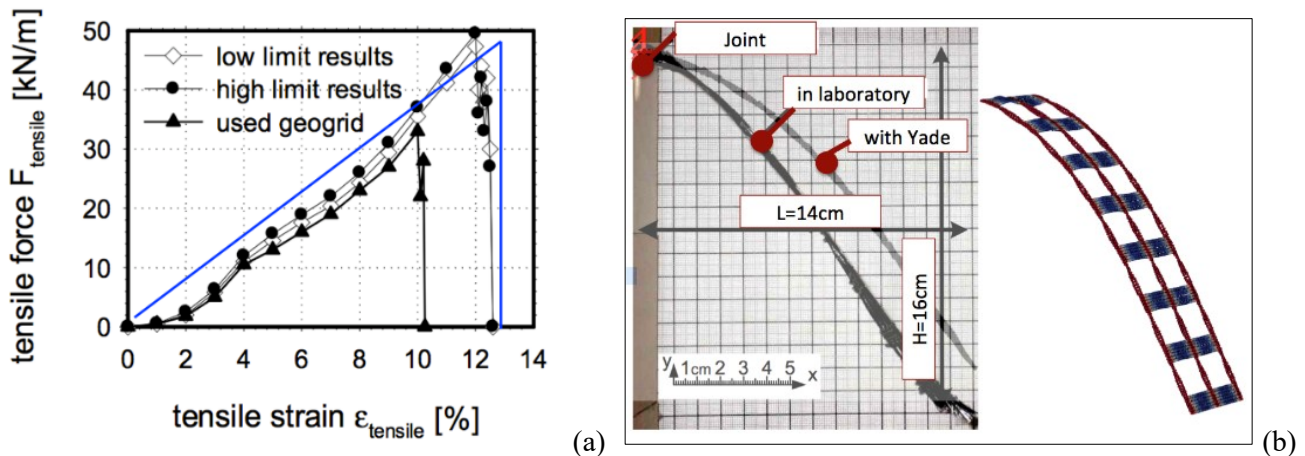


Figura 2. (a) Risultati reali (curva nera) e simulati (curva blu) di prove di trazione della geogriglia (modificato da Lackner, 2012) (b) visione laterale di una prova a flessione (modificato da Dijak, 2012).

Dalle analisi di sensibilità sono stati determinati il modulo di Young, la resistenza normale e tangenziale e la rigidità a rotazione al contatto tra le particelle che costituiscono la geogriglia (Tab. 1).

Tabella 1. Caratteristiche meccaniche delle particelle per la modellazione della geogriglia.

Diametro particelle	Modulo di Young	Resistenza normale e tangenziale	Rigidità rotazionale
mm	Pa	Pa	-
0.5-0.78	3.5e9	8.7e8	0.02

2.2 Terreno granulare

Nel presente studio sono stati considerate due tipologie di terreno granulare: il primo costituito da particelle sferiche (tipo A) ed il secondo costituito da clumps per simulare le particelle angolari (tipo B). La prima tipologia di terreno, facilmente modellabile, permette di analizzare i meccanismi di interazione mantenendo una bassa complessità e tempistica computazionale per l'esecuzione delle simulazioni. La forma delle particelle angolari è stata analizzata mediante fotogrammetria 3d di alcune particelle di ghiaia reali, successivamente simulate nel modello mediante la creazione di aggregati (clumps) di sfere sovrapposte fra loro (Fig. 3). Le proprietà micromeccaniche dei grani sono state calibrate in precedenti prove di laboratorio (Zarattini et al. 2019).

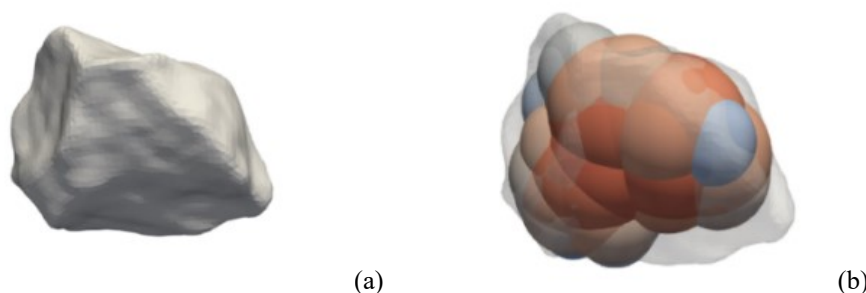


Figura 3. (a) Esempio di ricostruzione 3d della superficie di una particella di ghiaia e (b) relativo clump generato applicando la procedura di sovrapposizione fra sfere.

3 SIMULAZIONE PROVE DI ESTRAZIONE (PULL-OUT)

Il box per la prova di estrazione è stato modellato con le dimensioni 0.3 x 0.1 x 0.35 m (Fig. 4), considerando i criteri suggeriti dalla letteratura per l'esecuzione di prove di pull-out (ASTM, 2001; Konietzky et al., 2004; Moraci & Recalcatti, 2006; Palmeira, 2009). In direzione trasversale sono state applicate condizioni periodiche cosicché la dimensione trasversale (di soli 0.1 m) non costituisce un confinamento di tipo "parete" ma in realtà simula un box infinitamente largo. Ciò permette di simulare condizioni realistiche e al tempo stesso di contenere le tempistiche di calcolo, altrimenti elevate. La piastra rigida superiore applica una forza verticale prefissata che simula il confinamento del terreno e della geogriglia a diverse profondità. L'angolo d'attrito delle superfici è stato opportunamente fissato al fine di ridurre l'influenza sulle interazioni fra geogriglia e terreno (Palmeira & Milligan, 1989; Palmeira, 2009). La lunghezza del campione di geogriglia è pari a 295 mm (Fig. 4).

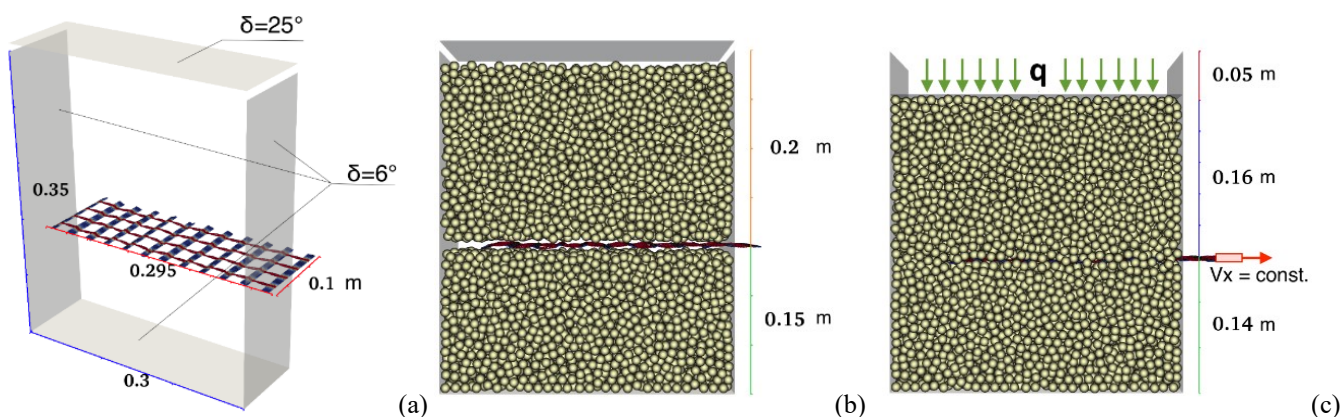


Figura 4. (a) Box di estrazione e geogriglia; (b) posizione iniziale degli elementi modellistici prima dell'avvio della simulazione; (c) applicazione del carico verticale e inizio della simulazione della prova di estrazione con l'applicazione di una velocità costante all'estremità esterna della geogriglia.

A seguito dell'inserimento delle geogriglia e del terreno, e dell'applicazione del confinamento mediante una velocità verticale variabile della piastra superiore, la simulazione della prova di estrazione ha inizio con l'applicazione di una velocità orizzontale costante alla geogriglia pari a 0.05 m/s (Fig. 4c).

4 RISULTATI

Le simulazioni hanno permesso di osservare ed analizzare nel dettaglio i fenomeni di interazione fra geogriglia e terreno fino alla rottura per scivolamento o per raggiunto carico massimo di trazione. La Fig. 5 illustra il movimento registrato dalle particelle di terreno e la distribuzione delle forze di trazione sulla geogriglia poco prima della sua rottura.

In particolare le simulazioni con diversi scenari hanno permesso di analizzare gli effetti del confinamento e gli effetti dell'utilizzo di un terreno realistico con particelle irregolari. Si è osservato che un maggior confinamento induce ad una rottura della geogriglia per minori deformazioni, mentre un basso confinamento provoca il rottura per scorrimento. Analogamente particelle angolari del terreno accentuano il comportamento fragile con il verificarsi di un rottura precoce della geogriglia.

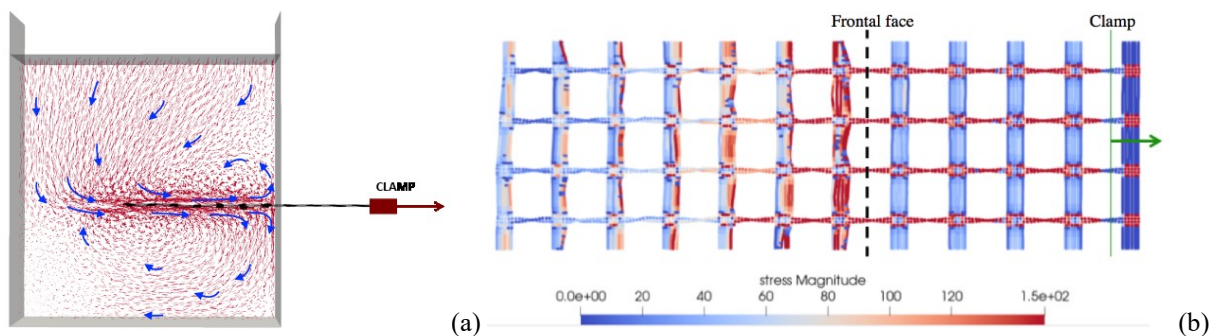


Figura 5. (a) Vista laterale del movimento delle particelle del terreno di tipo A durante la prova di estrazione; (b) Vista superiore della distribuzione degli sforzi a trazione nella geogriglia prima della rottura.

5 CONCLUSIONI

Il meccanismo d'interazione di una geogriglia flessibile con un terreno granulare è stato analizzato utilizzando la metodologia DEM e considerando la prova di pullout. L'utilizzo di un approccio micromeccanico ha permesso la simulazione dell'effetto di incastro fra geogriglia e particelle di terreno. I risultati numerici mostrano l'importante effetto delle forze di confinamento sulla tipologia di rottura. L'utilizzo di particelle di forma angolare permette di valutare condizioni maggiormente realistiche con un conseguente incremento della resistenza a rotazione delle particelle e del comportamento rigido dell'interazione terreno-geogriglia.

6 BIBLIOGRAFIA

- ASTM D6706-01, 2001. Standard test method for measuring geosynthetic pullout resistance in soil. Annual Book of ASTM Standards. ASTM International, West Conshohocken, USA. <http://www.astm.org>.
- Dijak, M. 2012. Dreidimensionale numerische Modellierung von Laborversuchen mit Geokunststoffen unter Verwendung der Diskreten Elemente Methode. Master thesis, Graz University of Technology, Institute of Soil Mechanics and Foundation Engineering (in German).
- Gabrieli, F., Pol, A. & Thoeni, K., 2017. Comparison of two DEM strategies for modelling cortical meshes. In *PARTICLES V: proceedings of the V International Conference on Particle-Based Methods: fundamentals and applications* (pp. 489-496). CIMNE.
- Konietzky, H., te Kamp, L., Groeger, T. & Jenner, C., 2004. Use of DEM to model the interlocking effect of geogrids under static and cyclic loading. *Numerical modeling in micromechanics via particle methods*, pp.3-12.
- Lackner, C. 2012. Prestressed reinforced soil Concept, investigations and recommendations, PhD thesis, Technical University Graz, Graz, Austria.
- Moraci, N. & Recalcati, P. 2006: Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(4): 220- 242.
- Palmeira, E.M. & Milligan, G.W., 1989. Large scale direct shear tests on reinforced soil. *Soils and foundations*, 29(1): 18-30.
- Palmeira, E.M. 2009. Soil-geosynthetic interaction: Modelling and analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(5): 368-390.
- Zarattini, F., Pol, A., Schenato, L., Tecca, P. R., Deganutti, A. M., Garcia-Ruiz, A., Soriano-Amat, M., González-Herràez, M., Martins, H. F., Pasuto, A., Palmieri, L., & Gabrieli, F. 2019. Preliminary numerical and experimental tests for the study of vibration signals in dry granular flows. *6th International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications, Particles 2019*, 305-312.