IMPIEGO DI SENSORI PIEZORESISTIVI PER LA MISURA DELLA DIFFUSIONE DI CARICHI IMPULSIVI IN SABBIA

Davide Ricchetti
Politecnico di Bari
davidericchetti91@gmail.com

Valentina Marzulli
Institute for Multiscale Simulation,
Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg
valentina.marzulli@fau.de

Annamaria di Lernia
Politecnico di Bari
annamaria.dilernia@poliba.it

Francesco Adamo
Politecnico di Bari
francesco.adamo@poliba.it

Francesco Cafaro
Politecnico di Bari
francesco.cafaro@poliba.it

Sommario

La modellazione fisica è una strategia largamente impiegata nello studio di problemi geotecnici, siano essi di natura statica o di natura dinamica (terremoti, vibrazioni, impatti). Molti studi sono stati condotti per studiare l'effetto di sollecitazioni di natura periodica sulla risposta dei terreni e sull'interazione terreno-struttura. Negli ultimi anni è cresciuta l'attenzione sulla modellazione degli effetti di carichi impulsivi, anche per l'interesse connesso alla progettazione di strutture geotecniche sulla Luna, esposte agli urti di micro-meteoriti. Collocandosi nel suddetto ambito, il presente lavoro è incentrato sulla valutazione della prestazione di sensori piezoresistivi, realizzati presso il Politecnico di Bari e impiegati per studiare sia il processo di mobilizzazione di spinta attiva di uno strato di terreno granulare (simulante lunare DNA-1A) sostenuto da parete rigida (caso statico), sia la risposta dello stesso terreno quando sollecitato da impatti a bassa energia cinetica (caso dinamico). Le misure degli incrementi di tensione indotti al fondo dello strato dagli urti sono confrontate con preliminari simulazioni numeriche e stime analitiche semplificate.

1. Introduzione

Negli ultimi anni è cresciuta l'attenzione sulla modellazione degli effetti di carichi impulsivi, anche per l'interesse connesso alla progettazione di insediamenti umani sulla Luna (Benaroya et al. 2002) e delle relative strutture geotecniche, esposte agli urti di micro-meteoriti. In questo ambito, la modellazione fisica degli impatti su terreni granulari, sia a gravità terrestre che a gravità modificata, offre la possibilità di dedurre sperimentalmente delle leggi di scala, invocando grandezze normalizzate, sia con riferimento alla geometria dei processi di "cratering" che con riferimento alla diffusione dei carichi nel sottosuolo connessi all'urto (Gudkova et al. 2015; Clark et al. 2015;

Goldman & Umbanhovar 2008; Umbanhovar & Goldman 2010). In questa nota sono riportati alcuni risultati preliminari, sperimentali e numerici, relativi a una ricerca sull'interazione tra opere di sostegno e regolite lunare in condizioni di microgravità (Cafaro et al. 2018), anche in presenza di impatti. In particolare, si discute la messa a punto di un set-up sperimentale per la modellazione fisica di impatti su rinterro di simulante lunare DNA-1A (Marzulli & Cafaro 2018; Cesaretti et al. 2014) sostenuto da muro a gravità, finalizzata a descrivere la diffusione del carico impulsivo in profondità ed alla calibrazione di leggi di scala note. Il materiale adoperato ha composizione granulometrica, chimica e mineralogica simile a quella della regolite lunare.

2. Modellazione fisica di impatti

Nell'ambito della succitata ricerca, si è avviata una campagna sperimentale tuttora in corso presso il Laboratorio Geotecnico del Politecnico di Bari. E' stato realizzato un modello fisico con pareti e muro di sostegno in plexiglass (Fig. 1 a) atto a consentire la creazione di un rinterro di simulante, per strati di spessore variabile fino a 20 cm e area di impronta di dimensioni pari a 16 cm per 20 cm, sostenuto da muro di sezione rettangolare. Tale muro può essere lasciato libero di traslare orizzontalmente per studiare il processo di mobilizzazione della spinta attiva, ma durante gli esperimenti di impatto è stato mantenuto in posizione bloccata. I sensori impiegati per la misura delle pressioni (Fig. 1 b, c) sono dei sensori piezoresistivi (Hall et al. 2008; Valle-Lopera et al. 2017) e sono stati realizzati presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione del Politecnico di Bari, mediante procedimento di fotoincisione con luce ultravioletta e successivo *etching* con soluzione di acido cloridrico e perossido di idrogeno concentrati. Si tratta di sensori "tattili non matriciali", che restituiscono quindi un valore di pressione "mediato" su tutta l'area utile del sensore stesso: ne consegue che tali sensori possono essere adoperati per la misura della tensione totale nell'intorno di un punto solo quando la loro dimensione è adeguatamente ridotta in rapporto alle dimensioni del modello.

Fig.1 - Modello fisico con muro di sostegno (a), sensore piezoresistivo (b) e posizionamento del sensore al fondo del modello prima del riempimento (c)

L'acquisizione è avvenuta tramite scheda National Instruments (NI USB-6289), 32 Inputs, 18-bit, 625 kS/s. Il sensore, alimentato a 10V, è stato tarato con due modalità distinte: durante la procedura indicata in Figura 2 come "Taratura A", carichi sono stati applicati staticamente su piastra di ripartizione in plexiglass a contatto col sensore; la "Taratura B" invece è consistita nella sepoltura progressiva del sensore, avvolto da Velostat®, per strati di DNA-1A di peso noto, previa interposizione di pellicola trasparente tra sensore e terreno. Frequenza di campionamento e numero di campioni per acquisire ogni step di taratura sono stati imposti pari rispettivamente a 10 kHz e 20000. La curva di fitting dei dati di taratura B, quella che riproduce maggiormente le condizioni degli esperimenti, sembra sostanzialmente lineare nel campo di pressione indagato. Sempre in Figura 2 si può osservare una isteresi sostanzialmente trascurabile con riferimento alla taratura A, che ha previsto ciclo di carico-scarico, particolarmente nel ramo caratterizzato da pressioni inferiori ai 20 kPa. Il sensore

sembra invece molto sensibile alle modalità di taratura, almeno quando rivestito da Velostat, come si evince dalle due curve di taratura molto diverse, per cui diventa importante che le stesse modalità simulino il più possibile le condizioni ambientali dell'esperimento. Tale aspetto richiede ulteriori indagini e interpretazioni.

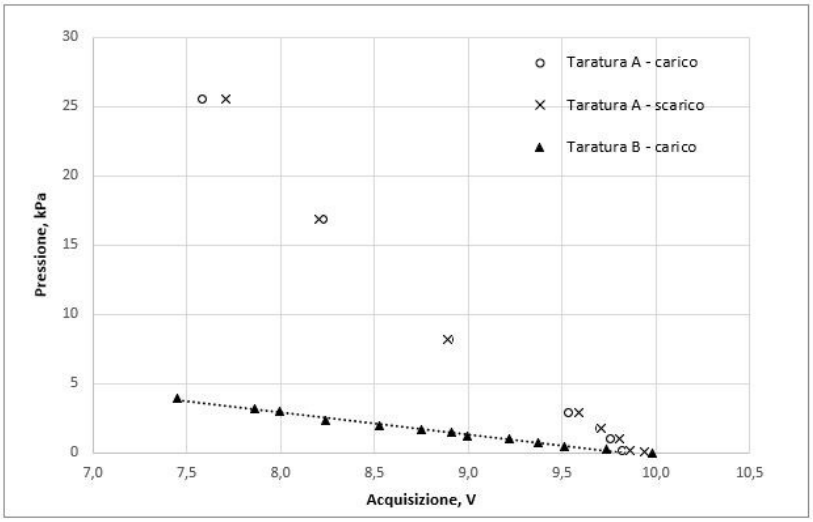

Fig.2 - Curve di taratura del sensore su supporto flessibile

Gli esperimenti di impatti hanno riguardato strati di spessore diverso e sono stati realizzati per caduta libera di proiettili di dimensioni e massa noti, assicurando un range di velocità di impatto tra circa 3 e 7 m/s. Il sensore preventivamente avvolto da Velostat è stato posizionato al centro della base del contenitore (Fig. 1c) e isolato dal riempimento di simulante lunare mediante pellicola trasparente. Si è ritenuto che tale accorgimento limitasse il rischio di alterazione della misura connesso al contatto diretto tra terreno e Velostat. Si è poi proceduto alla creazione del backfill. Frequenza di campionamento e numero di campioni per la misura di impatto sono stati imposti pari rispettivamente a 200 kHz e 1000000: tale frequenza di acquisizione sembra adeguata per registrare l'evento senza dar luogo a sottocampionamento. In questa sede si mostrano solo i risultati dell'esperimento per strato di spessore 10 cm e per il proiettile di massa pari a 95.05 g che impatta la superficie del terreno con velocità di 5.93 m/s. Il plot con il segnale rilevato è riportato in Figura 3. La trasformazione della variazione di voltaggio in valori di variazione della pressione risente ovviamente della curva di taratura scelta e tale aspetto richiede approfondimenti per ridurre il grado di incertezza della misura: sembra in ogni caso che l'impatto considerato produca al fondo un incremento della tensione verticale inferiore ai 4 kPa.

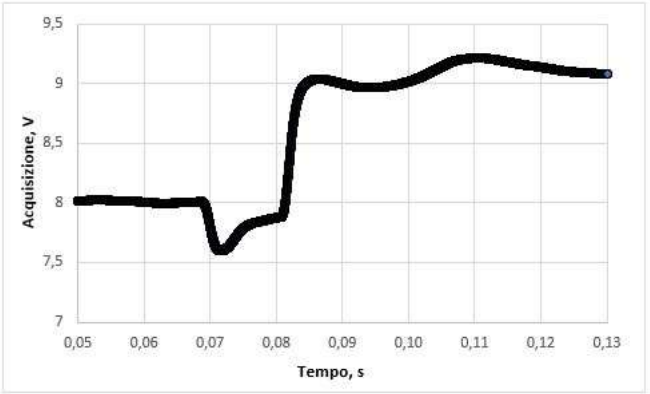

Fig.3 - Segnale rilevato dal sensore al fondo del rinterro durante l'impatto

3. Simulazione numerica: risultati preliminari

Il set-up sperimentale precedentemente discusso è stato modellato mediante il codice di calcolo agli elementi finiti PLAXIS 2D (Brinkgreve et al. 2016), eseguendo analisi bidimensionali in condizioni di deformazione piana. La geometria del modello numerico riproduce fedelmente quella del modello fisico: il terreno di riempimento è posto in un contenitore di larghezza 20 cm e altezza 10 m, sostenuto da un muro indeformabile, di pari altezza e 4.6 cm di larghezza, avente peso dell'unità di volume γ pari a 11.6 kN/m^3 poggianti su una base indeformabile (Fig.4a). Il muro è impedito di muoversi nelle due direzioni orizzontale e verticale. Gli elementi in plexiglass, costituenti il muro e la base del modello, sono stati modellati con il legame costitutivo elastico lineare non poroso, i cui parametri elastici sono il modulo di Young E assunto pari a 3.3 GPa e il coefficiente di Poisson ν pari a 0.37. Il comportamento del terreno di riempimento è stato modellato con il legame elasto-plastico perfetto rispondente al criterio di Mohr – Coulomb, i cui parametri sono stati assegnati sulla base dei dati sperimentali disponibili (Marzulli & Cafaro, 2018). Il coefficiente di Poisson è determinato in funzione del coefficiente di spinta a riposo K_0, mediante la relazione elastica $K_0/(1+K_0)$, dove K_0 è valutato con la nota relazione di Jaky. La capacità dissipativa del materiale è implementata mediante lo smorzamento viscoso di Rayleigh, adottando uno smorzamento target pari all'1%, sulla base di valori riportati da Senetakis et al. (2013) per una sabbia vulcanica. L'interazione tra il materiale di riempimento e il muro è stata simulata mediante elementi interfaccia, che consentono lo scorrimento ed eventuale separazione lungo la superficie di contatto. Il comportamento a taglio è governato dal criterio di resistenza di Mohr-Coulomb, che richiede la definizione dell'angolo di attrito muro-terreno δ. Nell'ipotesi di parete liscia (superficie in plexiglass del contenitore), le interfacce muro-terreno di riempimento sono state modellate assumendo un coefficiente di attrito tanδ pari al 20% di quello del terreno di riempimento (R_{inter} = 0.2). I parametri meccanici assegnati ai materiali costituenti il modello numerico sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1. Caratteristiche meccaniche assegnate al modello numerico

		γ (kN/m^3)	E (MPa)	ν	ϕ'	ψ	$R_{interface}$	α_R	β_R
Terreno di riempimento	MC	12.75	34.13	0.19	50	10	0.2	0.1232	6.41*10^{-4}
Muro	LE	11.6	3300	0.37		-	-		
Interfaccia muro-sottofondo	MC	-	10	0.37	38.7	-	-		

L'impatto del proiettile sulla superficie del terreno di riempimento è modellato attraverso un carico puntuale variabile nel tempo con legge triangolare. L'intensità della forza di impatto durante il tempo di collisione è determinata in prima approssimazione mediante il teorema dell'impulso, nell'ipotesi di urto anelastico, ossia prescindendo dalla quantificazione della dissipazione connessa alla penetrazione del proiettile nel terreno. Nota la massa del proiettile pari a 95.05 g che impatta la superficie del riempimento con velocità di 5.93 m/s in un intervallo di tempo stimato pari a 0.0026 s (Fig. 3), è possibile determinare la forza di impatto $F_{impatto}$, pari a 0.217 kN, assunta uniformemente distribuita nell'intervallo temporale di collisione. La scelta di tale intervallo richiede una interpretazione che nella fattispecie è stata fatta sulla base del plot delle pressioni misurate al fondo dal sensore nel tempo durante l'urto (Fig. 3). Nell'ipotesi di distribuzione triangolare della forza nel tempo, la forza di impatto $F_{impatto}$ deve essere raddoppiata per fornire l'intensità della forza massima (pari a 0.433 kN). L'andamento della forza di impatto nel tempo implementato nel calcolo è riportato in Fig. 4b. L'analisi consta di 3 fasi di calcolo: una fase plastica in cui sono attivati gli elementi in plexiglass (piano di appoggio e muro), una fase plastica di attivazione del terreno di riempimento ed una fase dinamica, che simula l'impatto del proiettile nell'ipotesi che l'intero evento si verifichi per una durata di 0.026 s.

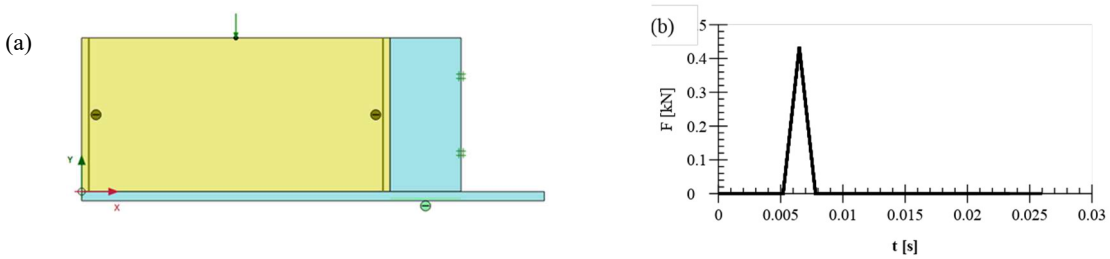

Fig. 4 - Geometria del modello numerico implementato in PLAXIS2D (a) e diagramma della forza di impatto nel tempo assegnata in input (b)

I risultati sono illustrati in termini di diagramma della storia temporale della tensione verticale (Fig. 5) di un punto alla base del terreno di riempimento in corrispondenza della verticale passante per la mezzeria, posizione in cui nel modello fisico è allocato il sensore (Fig. 1c).

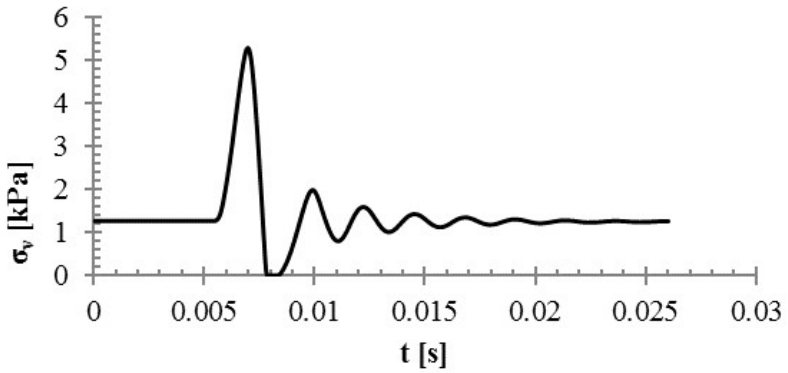

Fig. 5. Andamento della tensione verticale nel tempo in corrispondenza di punto alla base del modello e in asse rispetto alla forza di impatto applicata

Il valore della tensione al fondo pre-impatto è quello della tensione verticale geostatica, pari a 1.275 kPa. Nel momento in cui il proiettile impatta sulla superficie del terreno di riempimento, si genera nel sistema una perturbazione che produce una variazione dell'intensità della tensione verticale. La tensione verticale cresce fino ad un picco, pari a circa 5 kPa, per poi decrescere oscillando fino a riportarsi alla condizione di equilibrio statico. L'ordine di grandezza della tensione calcolata sembra coerente con quanto rilevato dal sensore durante l'esperimento prima descritto.

Conclusioni e sviluppi futuri

I risultati preliminari della ricerca presentata hanno permesso di evidenziare pregi e difetti della tipologia di sensore adottata per la misura della diffusione di carichi impulsivi in sabbia, connessi ad impatti. Tra i pregi si evidenziano la ridotta isteresi, il basso costo unito alla facilità di fabbricazione, la possibilità di leggere la durata dell'evento di "arrivo" al punto di misura se impiegati congiuntamente ad idonea scheda di acquisizione dati. Tra i difetti, una forte dipendenza della curva di taratura dalle modalità di svolgimento della stessa. E' stata anche effettuata una simulazione numerica agli elementi finiti per una preliminare valutazione del valore di tensione atteso alla base del rinterro in

conseguenza dell'impatto, per quanto sulla base di assunzioni semplificate sulla fisica dell'urto e sulla distribuzione temporale della forza di impatto implementata nel calcolo FEM.
Tra gli sviluppi, andrà testato l'effetto sulle misure della rigidezza del supporto del sensore, di materiali conduttivi diversi dal Velostat (da adottare come rivestimento del sensore) e della temperatura a cui si effettuano le misure. Una volta ottimizzata la configurazione sperimentale, sarà possibile dedurre leggi di scala per il simulante DNA-1A in interazione con muro di sostegno, anche studiando gli effetti di bordo del modello fisico, sia in condizioni statiche (studio di mobilizzazione della spinta attiva) che in condizioni dinamiche (studio di impatti a differente energia cinetica).

Bibliografia

Benaroya H., Bernold L., Chua K.M. (2002). Engineering, design, and construction of lunar bases. *J. Aerosp. Eng.*, 15(2), 33-45

Brinkgreve R.B.J., Kumarswamy S., Swilfs W.M. (2016). *PLAXIS 2D 2016. Reference manual.*

Cafaro F., Miticocchio E., Marzulli V. (2018). Remarks on the sources of error in the modelling of lunar geotechnical structures. *Studia Geotechnica et Mechanica* (accepted for publication).

Cesaretti G., Dini E., De Kestelier X., Colla V., Pambaguian L. (2014). Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*, 93, 430-450

Clark A.H., Petersen A.J., Kondic L., Behringer R.P. (2015). Nonlinear Force Propagation During Granular Impact. PRL 114, 144502 (2015). *Physical Review Letters*

Goldman D.I., Umbanhovar P. (2008). Scaling and dynamics of sphere and disk impact into granular media. *Physical Review* E 77, 021308

Gudkova T., Lognonné P., Miljković K., Gagnepain-Beyneix J. (2015). Impact cutoff frequency - Momentum scaling law inverted from Apollo seismic data. *Earth and Planetary Science Letters*. 427.

Hall R.S., Desmoulin G.T., Milner T. E. (2008). A technique for conditioning and calibrating force-sensing resistors for repeatable and reliable measurement of compressive force. *Journal of Biomechanics* 41 (2008) 3492–3495.

Marzulli V., Cafaro F. (2018). Geotechnical properties of uncompacted DNA-1A lunar simulant. Submitted to *Journal of Aerospace Engineering, ASCE.*

Senetakis K., Anastasiadis A., Pitilakis K. (2013). Normalized shear modulus reduction and damping ratio curves of quartz sand and rhyolitic crushed rock. *Soils and Foundations*, 53, No. 6, pp. 879-893.

Umbanhovar P., Goldman D.I. (2010). Granular impact and the critical packing state. *Physical Review E* 82, 010301R

Valle-Lopera D.A., Castaño-Franco A.F., Gallego-Londoño J., Hernández-Valdivieso A.M. (2017). Test and fabrication of piezoresistive sensors for contact pressure measurement. *Revista Facultad de Ingeniería*, Universidad de Antioquia, No. 82, pp. 47-52, 2017.