

Alcuni risultati interessanti riguardanti i mezzi granulari

Francesco Di Credico¹, Patrizio Signanini²

¹Dipartimento di Scienze della Terra, Laboratorio di Geofisica Applicata ed Esplorazione Geologica del Sottosuolo, Università “G. d’Annunzio” di Chieti, fdicredico@unich.it, tel. 08713556160

²Dipartimento di Scienze della Terra, Laboratorio di Geofisica Applicata ed Esplorazione Geologica del Sottosuolo, Università “G. d’Annunzio” di Chieti, signanini@unich.it, tel. 08713556454

Some interesting results about granular media

ABSTRACT: This study represents an attempt to clarify some anomalous behaviour found in alluvial terrains when subjected to an earthquake. Our approach to the study of granular media has been bibliographic and experimental. Despite many studies carried on this topic, this behaviour is still little understood because of the complex nature of granular media. The goal to the experimental research was at least to confirm the „anomalous“ behaviour reported in previous studies (e.g., chain of force, not-uniform distribution of pressure, etc.). In particular, this study is focused on pressure distributions and their quantification with respect to the pure granular media, and especially refers to the behaviour of natural deposits, which are intermediate between granular and cohesive media.

Key terms: granular media, pressure distribution, chain of force, silos effect

Termini chiave: mezzi granulari, distribuzione delle pressioni, catene di forza, effetto silos

Riassunto

Questo lavoro rappresenta un tentativo di fare luce su alcuni comportamenti anomali riscontrati nei depositi alluvionali quando soggetti ad un evento sismico. Il nostro approccio allo studio dei mezzi granulari è stato sia di tipo bibliografico che sperimentale. Nonostante i molti lavori concernenti l’argomento, questo comportamento è ancora poco compreso a causa della natura complessa dei mezzi granulari. L’obiettivo della ricerca sperimentale è di confermare almeno il comportamento „anomalo“ riportato nei lavori precedenti (es. catene di forza, distribuzione non uniforme della pressione, etc). In particolare, questo studio è focalizzato sulla distribuzione della pressione e relativa quantificazione in questi mezzi, ed in particolare, si riferisce al comportamento dei depositi naturali, che si collocano in una posizione intermedia tra mezzi granulari e mezzi coesivi.

1. Introduzione

La natura complessa ed ancora poco compresa dei mezzi granulari si affaccia costantemente nella vita di tutti i giorni (riso, pillole, farina, zucchero, cereali). Molti prodotti industriali vengono lavorati e trasportati in forma granulare: minerali, materiali da costruzioni, rottami detriti e via dicendo. Anche in geologia i sistemi granulari sono onnipresenti basti pensare alle sabbie, ghiaie, ciottoli, deserti, spiagge, fondali marini, depositi alluvionali ed molti altri. Risulta quindi fondamentale aumentare ed approfondire le nostre conoscenze riguardo questi materiali

al fine di migliorare e sperimentare quelle metodologie applicabili per la loro caratterizzazione sismica, geotecnica e geologica in generale

2. Stato dell’arte sui mezzi granulari

Le proprietà dei mezzi granulari, intesi come sistemi naturali, sono attualmente oggetto di notevole interesse da parte della comunità scientifica. Sono numerosissime le pubblicazioni realizzate fino ad oggi riguardanti i mezzi granulari (Nur & Wang, 1989; Rollins *et alii.*, 1998), modellazioni agli elementi finiti, simulazioni statistiche e prove sperimentali sono le principali metodologie di analisi utilizzate. Quella che segue è una breve rassegna dei principali lavori realizzati al fine di investigare quelle che sono le svariate ed esclusive fenomenologie presentati da mezzi granulari.

- Mezzi granulari ricadono nella classe dei mezzi porosi, ma a differenza di questi ultimi materiali per la parte solida, la loro struttura è discontinua a livello microscopico. Per questa ragione le particelle possono essere soggette a spostamenti e rotazioni indipendenti (Diebels, 2000).
- I mezzi granulari sono costituiti da particelle solide le cui dimensioni sono comprese tra alcuni micrometri (polveri) ed alcuni centimetri (ghiaie) e le cui interazioni sono fortemente anelastiche. Le loro proprietà macroscopiche sono in genere molto diverse da quelle degli usuali liquidi o solidi (Duran, 1999).
- Per i sistemi granulari non valgono le tradizionali leggi

della termodinamica e dell'idrodinamica che si applicano alle usuali forme di aggregazione della materia (liquidi, solidi e gas). In un mezzo granulare, la tipica scala di energia è mgd (m massa del grano, d diametro del grano, g accelerazione di gravità) e a temperatura ambiente è almeno 1000 volte maggiore dell'energia termica $k_b T$ (k_b costante di Boltzmann, T temperatura) pertanto a meno di perturbarlo dall'esterno iniettando energia in modo continuo, un sistema granulare non "esplora" lo spazio delle fasi, ma al contrario rimane intrappolato in un qualche stato metastabile (Bettolo *et alii*, 2002).

- I sistemi granulari hanno comportamenti simili a quelli dei sistemi disordinati e vetrosi (vetri di spin) per esempio il rilassamento lento verso l'equilibrio e una dipendenza della storia passata (Bettolo *et alii*, 2003).
- Un ammasso di mezzi granulari in quiete mostra un comportamento tipico di un mezzo solido, infatti anche se sulla superficie del mucchio agisce uno sforzo di taglio generato dalla forza di gravità, i grani rimangono immobili (Duran, 2000).
- Se confinati assumono la forma del loro contenitore analogamente ad un mezzo fluido (Diebels, 2000).

Applicando una forza di compressione dall'alto sul cumulo di granulari, questa non viene trasmessa uniformemente verso il basso, ma forma un reticolo molto complesso di catene di forza. Proprio l'esistenza di queste catene descritte dalla legge di Janssen (1895) nei silos per cui, contrariamente ad un mezzo fluido usuale la pressione non aumenta linearmente con la profondità, è responsabile della manifestazione di forti variazioni nella distribuzione delle pressioni interne del mezzo e conseguentemente agisce lungo le pareti del contenitore. Queste variazioni non sono affatto trascurabili e possono avere effetti catastrofici, come nel caso della rottura dei silo (normalmente utilizzati come sistemi di immagazzinamento) (Nouguier *et alii*, 2000).

Le catene di forza possono portare alla formazione spontanea di veri e propri archi come risultato della disposizione casuale dei grani (Howell & Behringer, 1997, Behringer *et alii*, 1999).

La trasmissione della forza in una catena è canalizzata lungo la stessa fino all'ultimo grano della struttura locale in cui avviene la riemissione (Howell *et alii*, 2000).

Le variazioni di forza, nelle catene possono superare notevolmente il valore medio ed hanno una distribuzione esponenziale indipendente dal diametro delle particelle (Nouguier *et alii*, 2000).

- Nei fluidi granulari la distribuzione di probabilità delle velocità della singola particella si discosta dall'usuale gaussiana e le disomogeneità in densità all'interno di questi possono essere grandi (Duran, 2000).
- Ancora oggi non è possibile stabilire a priori se un materiale granulare, al termine di un determinato processo d'agitazione, si mescola o se le sue componenti, invece, si siano segregate.

- La pressione varia esponenzialmente con la profondità all'interno di un contenitore colmo riempito con del mezzo granulare e fino ad una data profondità ed in seguito non cresce. Le forze in gioco che contribuiscono alla pressione sono la gravità e l'attrito delle particelle con le pareti del silo (Tejchman, 1997).

La distribuzione delle pressioni alla base d'aggregati di mezzi granulari diminuisce spostandosi dalla periferia verso la parte centrale (Mattutis & Schinner, 1999).

3. Il nostro approccio: dal qualitativo al quantitativo

In questo lavoro sono state utilizzate due differenti metodologie peraltro già sperimentate da diversi autori (Jaeger *et alii*, 1996): il metodo della carta carbone per la registrazione dei trend nella distribuzione delle pressioni ed il metodo fotoelastico per quantificare l'intensità dello stress. Lo scopo della nostra analisi è stato quello di chiarire alcuni punti fondamentali concernenti la trattazione dei mezzi granulari:

- confermare quanto trovato dagli autori precedenti sia per ciò che concerne le catene di forza che per la distribuzione delle pressioni
- verificare come cambia la distribuzione delle pressioni, passando da mezzi granulari puri a mezzi granulari multifase in cui le forze coesive ed adesive diventano via via predominanti
- confrontare il numero di particelle totali costituenti il mezzo granulare e quelle coinvolte nelle catene di forza
- analizzare qualitativamente l'osservazione delle peculiarità della distribuzione delle pressioni nelle catene di forza
- tentare di quantificare la distribuzione media delle pressioni
- verificare se il comportamento di questi mezzi quando sottoposti ad azione dinamica corrisponde a quello descritto dai diversi autori utilizzando non segnali periodici ma impulsivi ed energizzando sia verticalmente ed obliquamente (circa 45°) il sistema
- verificare se la distribuzione di pressione in funzione del rapporto H/L nei silo (altezza su diametro) segue l'andamento generalmente accettato da diversi autori, utilizzando contenitori con differenti caratteristiche geometriche
- è stata inoltre condotta una sperimentazione per vedere se è possibile, variando le condizioni di energizzazione, orientare il verso del vettore nelle catene di forza.

Le metodologie predisposte utilizzate si basano su principi molto semplici, la prima è che ogni granulo lascia sulla carta carbone un'impronta proporzionale alla forza esercitata, mentre la seconda è basata sulle proprietà di quei materiali trasparenti che variano il loro indice di rifrazione quando sottoposti a stress.

4. La sperimentazione

Per simulare dei silos a piccola scala sono stati utilizzati: un fusto metallico del diametro di 21 cm e d'altezza 38 cm, un tubo di policarbonato con altezza 40 cm e diametro 18 cm, due tubi di PVC, uno con altezza 51 cm e diametro 35 cm, un secondo con altezza 80 e diametro 40 cm ed infine una vasca cubica di policarbonato con lato 60 cm (figura 1).

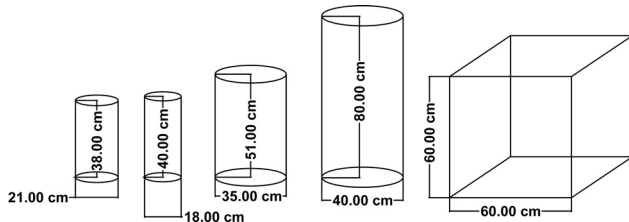


Figura 1: Fusto utilizzato nelle prove del metodo della carta carbone
Containers used in the test with carbon paper

Sono stati impiegati dei fogli di cartoncino A4 bianchi, lisci con elevata densità adattati in modo da rivestire perfettamente l'interno e la base del cilindro metallico ricoperti con una pellicola di carta carbone.

Dopo aver colmato il cilindro metallico con i diversi mezzi granulari sono stati applicati dei pesi aggiuntivi da laboratorio fino a 160kg (figura 2) sottoponendo così il sistema a carico verticale concludendo la prova statica. Rimuovendo i pesi e svuotando il fusto si ottiene il cartoncino "impressonato".

Sono state effettuate prove in condizioni dinamiche di compressione verticale e dinamiche di compressione laterale utilizzando gli stessi mezzi granulari e la procedura di riempimento e di carico sopradescritta.

Sono stati inferti con un peso di 16Kg dei colpi dall'alto verso il basso da un'altezza di 50 cm, in modo da generare una compressione verticale (figura 2) ottenendo un secondo cartoncino impressonato.

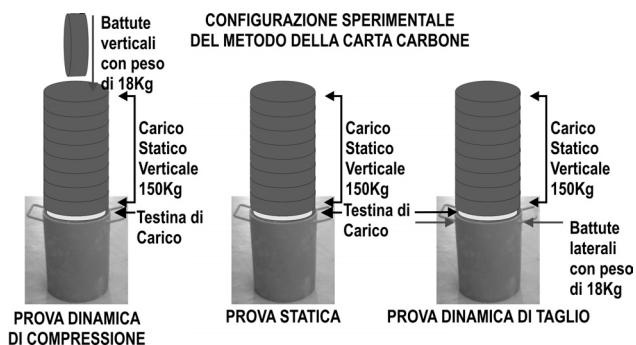


Figura 2: Predisposizione delle prove dinamiche con la carta carbone
Preparation of dynamic tests with carbon paper

Sempre per l'esecuzione delle prove dinamiche, dopo aver caricato il fusto sempre con la procedura di cui sopra,

sono stati inferti dei colpi lateralmente al cilindro mantenendo la direzione ma con verso alternato con un peso da 16 kg intesa a fornirci informazioni sulla risposta del sistema alle sollecitazioni di taglio (figura 2) e ricavando così un terzo cartoncino impressonato.

Nella figura 3 sono rappresentate le curve granulometriche dei mezzi analizzati ovvero del limo-argilloso (curva 1), della sabbia (curva 2) e della ghiaia (curva 3) ben essiccate e selezionate granulometricamente ed inoltre tre miscele composte in peso dal 70% di argilla, 13% di sabbia e 17% di ghiaia (curva 4), 50% di argilla, 24% di sabbia e 26% di ghiaia (curva 5) ed 29% di argilla, 32% di sabbia e 38% di ghiaia (curva 6).

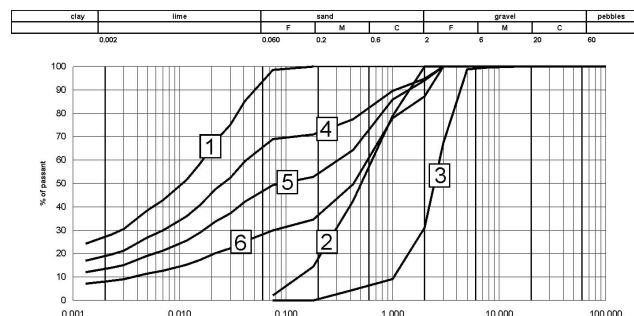


Figura 3: Curve granulometriche dei mezzi granulari utilizzati
Granulometric curves of the granular media used

Le "impronte" così ottenute sono state in seguito trasformate in formato digitale in modo da poter effettuare su di esse del processing. Le strisciate sono state divise in piccoli segmenti orizzontali (larghi un cm) e per ognuno tramite istogramma digitale è stato calcolato il numero dei pixel bianchi e neri.

Su tutti questi materiali, utilizzando il contenitore di policarbonato si è inoltre utilizzata la tecnica di misurazione basata sulla fotoelasticità per cui impiegando una luce bianca polarizzata è possibile rendere evidente le differenze di pressione che agiscono sulle pareti di un recipiente costituito da mezzo fotoelastico (policarbonato) (Zandman *Et Alii*, 1962; Vishay Measurement Group, 1989; Aben & Josepson, 1995; Jaeger *et alii*, 1996; Patterson *et alii*, 1997). La figura 4 schematizza la metodologia impiegata.

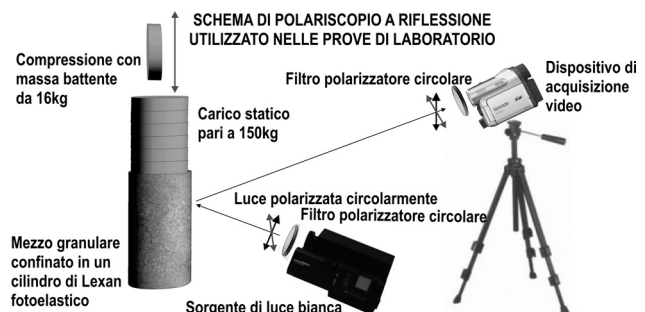


Figura 4: Polariscoipo a riflessione realizzato
Reflection polariscope that has been used

Anche in questo tipo di sperimentazione una volta costipato il mezzo, questo è stato sottoposto ad un carico verticale di 150 kg che gravava esclusivamente sul materiale granulare, acquisendo informazioni sulla risposta sismica del sistema in condizioni statiche e procedendo inoltre all'acquisizione delle immagini in condizioni dinamiche analogamente a quanto eseguito con le prove mediante carta carbone sui campioni già descritti. Relativamente al campione numero 2 (sabbia) si è eseguito un ciclo di sperimentazione statiche e dinamiche in condizioni di saturazione al 100%.

Dai filmati sono stati estratti i singoli fotogrammi e successivamente elaborati digitalmente solo i frame relativi agli istanti precedenti, contemporanei e posteriori alla compressione del mezzo in modo da individuare le aree a pressione analoga costituite da frange isocromatiche di interferenza, lungo la superficie del cilindro. Queste aree appaiono come delle isole chiuse di colore uniforme e ben delimitate tra loro.

Per la quantificazione di questi effetti cromatici in termini di kilopascal è stato necessario apportare le opportune note correzioni derivate dalla variazione dell'angolo tra la luce incidente e la superficie del cilindro che genera un colore di interferenza falsato.

Già nei fotogrammi è stato possibile individuare l'effetto delle differenti pressioni medie nei silos e l'effetto cromatico relativo alle catene di forza.

Per non incappare in quest'errore le frange sono state ricostruite mediante software lungo una piccola porzione verticale del cilindro corrispondente alla zona più illuminata, colpita perpendicolarmente, ed in seguito allargate per facilitarne il riconoscimento.

5. Osservazioni

Il metodo della carta carbone ha permesso un'analisi qualitativa osservando le singole impronte nonché una valutazione sempre qualitativa del trend generale della distribuzione delle pressioni lungo le pareti del contenitore. È stato osservato che questo metodo ha un range molto limitato nella definizione delle pressioni, infatti, se da una parte per basse forze esercitate dai singoli granuli il cartoncino non viene impressionato dall'altro per valori di forza elevati giunge a saturazione ed opera nel campo del nero. In compenso nello stretto range in cui opera, la carta carbone risulta possedere una sensibilità molto più elevata rispetto al metodo fotoelastico e permette di compiere una serie di osservazioni di notevole interesse.

- In condizioni statiche le tracce lasciate sulla carta carbone sono poco numerose e solo per la ghiaia abbiamo un numero apprezzabile di pixel neri comunque concentrati per valori di H/L pari a 0,42, dove H ed L sono rispettivamente l'altezza ed il diametro del cilindro.
- Nelle prove dinamiche in tutti i mezzi analizzati si è riscontrata una concentrazione delle tracce di pressioni

per valori di H/L compresi tra 0,33 ed 0,57. In media il valore di H/L, risultato in corrispondenza del massimo, è di 0,48 in regime dinamico di compressione e di 0,36 in regime dinamico di taglio.

- Nelle prove dinamiche, presupponendo che l'energia di eccitazione sia stata la stessa, il valore del numero normalizzato dei pixel impressionati è risultato essere maggiore nella compressione e diminuire in quella di taglio. Inoltre il valore di H/L corrispondente al massimo del numero dei pixel impressionati nella prova dinamica di compressione risulta essere maggiore rispetto a quello riscontrato nella prova dinamica di taglio.
- Nelle miscele è stata riscontrata la presenza d'orizzonti, situati a diversa altezza che interrompono il consueto trend, ripresentandosi poi al di sotto.
- Alla base del cilindro le tracce registrate sono pressoché nulle soprattutto in condizioni statiche. In regime dinamico il numero dei pixel aumenta pur rimanendo estremamente inferiore rispetto alle sezioni laterali. Il trend generale osservato mostra una concentrazione dei pixel neri ai bordi del cilindro rimanendo molto scarse al centro (figura 5).
- È stato calcolato il numero medio di granelli coinvolti dalle catene di forza rispetto al numero totale presente nel contenitore. Ad esempio per la sabbia medio-grossolana sono stati ricavati i seguenti rapporti: 1 su 1000 nella prova statica, 2 su 5 nella prova di compressione verticale e 1 su 10 nella prova di compressione verticale.

Il metodo fotoelastico ha permesso di ottenere una prima quantificazione delle pressioni totali esercitate dai mezzi granulari lungo il rivestimento di policarbonato. Entrambi i metodi mostrano una buona corrispondenza dei risultati sperimentali così come la distribuzione delle pressioni lungo il cilindro, la presenza di punti in cui la forza esercitata sul contenitore è molto superiore alla media ed infine gli stessi valori di pressione di picco per il medesimo rapporto H/L. Proprio utilizzando quest'ultimo parametro è stato possibile eseguire una comparazione, tentando così una taratura del metodo della carta carbone e definendone il range operativo.

Infatti, è stato registrato come per il limo i valori di pressione calcolati in prossimità della base mediante la conversione tra i due metodi indica circa 1000Pa per 30 pixel, mentre il massimo valore registrato corrisponde a 1400Pa per 450 pixel (H/L compreso tra 0,4 e 0,6). Il limo mostra un range di variazione delle pressioni più basso e meglio distribuito tra quelli registrati, permettendo una riproduzione più agevole delle tracce della carta carbone. Per la sabbia i valori di pressione calcolati in prossimità della base mediante la conversione tra i due metodi corrisponde a circa 1200Pa (30 pixel) ed il massimo valore registrato corrisponde a circa 1500Pa (300 pixel) con H/L pari ad 0,4 mentre il range di applicazione della carta carbone è molto stretto a causa dell'elevato valore medio

delle pressioni. Infine per la ghiaia i valori di pressione calcolati in prossimità della base mediante la conversione tra i due metodi corrisponde a circa 1400Pa (30 pixel) ed il massimo valore registrato corrisponde a 1600Pa (150 pixel) con H/L prossimo a 0,4, in questo caso il range di applicazione della carta carbone è molto stretto sempre a causa dell'elevato valore medio delle pressioni.

Questo risultato permette di avere subito un'idea di quanto sia differente la distribuzione delle pressioni in questi mezzi rispetto ad un materiale isotropo come ad esempio l'acqua, basti pensare che nelle prove di laboratorio, applicando un carico di 200 Kg ad una sabbia medio - grossolana, il valore di pressione riscontrato alla base è stato di circa un migliaio di Pascal, mentre caricando dello stesso peso un fluido (trascurando il peso dell'acqua) questo ultimo avrà alla base un valore maggiore di circa 60 volte.

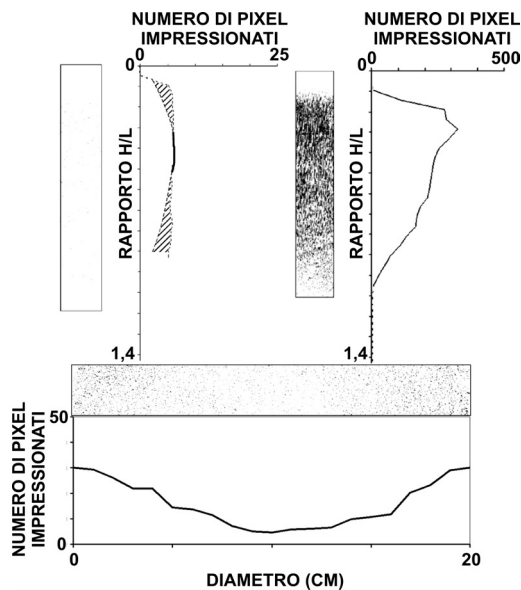


Figura 5: Prova statica (a) e dinamica (b) di compressione verticale, sezione laterale e sezione basale (c) utilizzando della sabbia medio-grossolana

Static and dynamic vertical compressive test, sides (a and b) and on base section in dynamic test (c) in a medium-coarse sand

6. Stabilità delle catene di forza in condizioni statiche e dinamiche

La presenza delle grandi variazioni di pressione all'interno dei mezzi granulari è stata oggetto di grande interesse da parte della comunità scientifica internazionale. E' stato possibile osservare in questi mezzi quando sottoposti a stress la presenza di catene di forza. Nelle prove da noi svolte è stato possibile registrarne la loro estesa e costante presenza sia dalle impronte della carta carbone e sia visivamente da particolari punti di elevata intensa luminosità riscontrati lungo il rivestimento fotoelastico (figura 6).

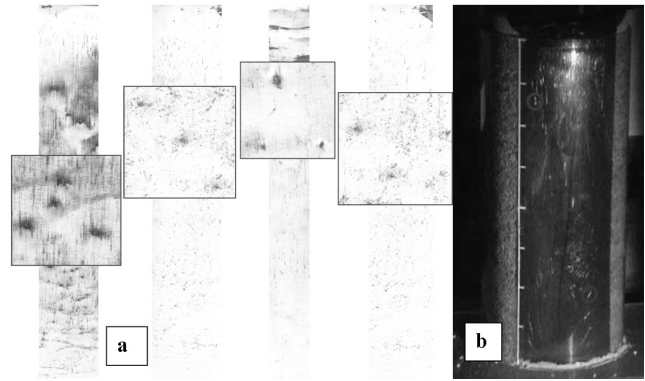


Figura 6: Tracce della presenza di catene di forza nella carta carbone e lungo il cilindro fotoelastico

Traces reproduced by the chains of forces on carbon paper and on the photo elastic container

In tutte le prove effettuate sono state riscontrate zone estremamente variabili all'interno delle impronte della carta carbone, nonché piccole macchie fortemente marcate (picchi di pressione) circondate da un alone bianco (figura 6a) che segnalano zone a forte gradiente di pressione corrispondenti a quanto visibile operando in fotoelasticità (figura 6b), il che potrebbe far supporre proprietà di invarianza di scala.

E' stato osservato operando in campo dinamico che i punti d'intensa luminosità-pressione mantenevano una posizione pressoché invariata nonostante il gran numero di sollecitazioni subite dal mezzo (10 impulsi).

Lo stesso fenomeno, indice di catene di forza molto stabili alle sollecitazioni dinamiche, è stato registrato con il metodo della carta carbone, infatti la figura 7 mostra chiaramente che l'impronta costituita da un granello, inizialmente un punto, traccia un segmento in seguito a percussione per poi ritornare al punto di partenza.

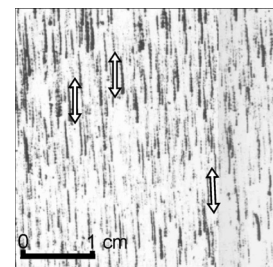


Figura 7: Tracce lasciate dai granelli di una ghiaia durante una prova di compressione verticale

Traces left by grains of a gravel in a vertical compression test

7. Effetto silos od effetto amos?

Relativamente al problema della quantificazione delle distribuzioni media delle pressioni, la prima sperimentazione eseguita sui diversi campioni nel medesimo contenitore, ha registrato che il punto di massima pressione veniva riscontrato indipendentemente dal

materiale a profondità media di circa 8,5 cm corrispondenti ad un valore di H/L pari a 0,4.

Si è deciso in seguito di variare le dimensioni del contenitore per vedere se questo rapporto H/L in cui si verifica il massimo di pressione rimanesse costante, in pratica se l'effetto osservato che non sembrava dipendere dalla natura e composizione del materiale dipendesse più dal contenitore o dal mezzo granulare stesso.

E' facile accorgersi che la distribuzione delle massime pressioni avviene sempre a circa lo stesso rapporto H/L, infatti, i valori di picco sono stati riscontrati a profondità di circa 8, 9, 17, 21 e 24 cm nei cinque contenitori rispettivamente con altezze e diametri di 38-21, 40-18, 51-35, 80-40 ed 60-68 cm.

Nella figura 8 sono rappresentati i valori di profondità e del diametro dei tre contenitori per i quali è stato riscontrato il picco del numero di pixel impressionati sulla carta carbone. I tre punti sono stati interpolati dalla funzione logaritmica caratterizzata dall'equazione $y = 14,336 \ln(x) - 33,727$ riportata nella figura 8.

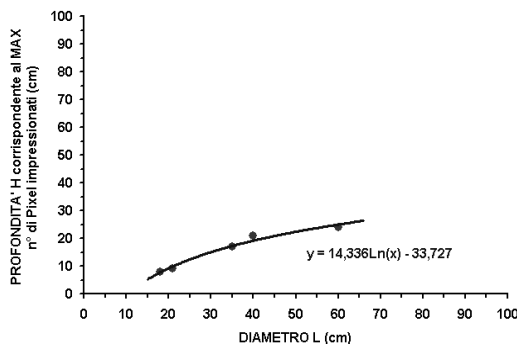


Figura 8: Fitting logaritmico dei punti dei picchi di pressione in funzione del diametro del contenitore

Fitting of a logarithmic function to the pressure maximums with respect to the container's diameter

8. La pressione esercitata può cambiare di segno?

Un ultimo esperimento è stato condotto in un mezzo granulare (sabbia medio-grossolana) in una vasca cubica con lato di 600 mm utilizzando delle lastre di policarbonato (analogo a quello utilizzato nella precedente analisi fotoelastica). Questo contenitore è stato colmato interamente e predisposto in modo tale da poter applicare su di esso sia il metodo fotoelastico che quello della carta carbone. E' stata condotta una serie d'esperimenti al fine di registrare l'andamento della pressione all'interno della vasca. In particolare è stato inserito un foglio rigido ricoperto di carta carbone con orientazione tale da dividere esattamente a metà la vasca colma di sabbia. Sono stati generati contemporaneamente degli impulsi compressivi con il medesimo peso in due aree della vasca speculari rispetto alla lastra (figura 9). In questa prova è stato possibile osservare un trend molto interessante: i granuli, relativi all'area di alta pressione, hanno tracciato sulla carta

carbone un moto che dalle zone inferiori esterne di questo livello ad elevata pressione convergono verso il centro del lato superiore della lastra, a testimoniare un cambiamento della direzione dei vettori di forza all'interno del mezzo granulare (figura 10)

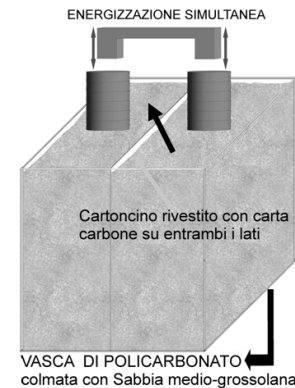


Figura 9: Predisposizione sperimentale della vasca di policarbonato

Experimental layout using the polycarbonate container

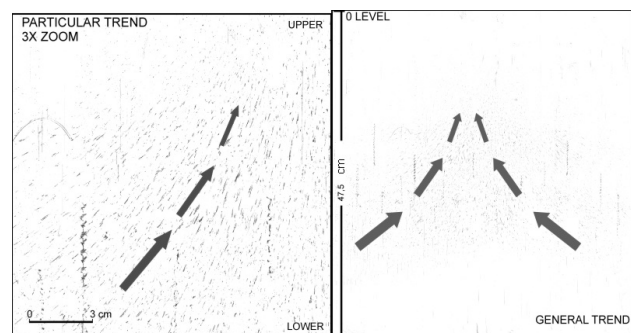


Figura 10: Trend generale (a sinistra) e relative ingrandimenti (a destra) ottenuti dal cartoncino impressionato

General trend (left) and relative enlargement (right) obtained from the rigid impressed sheet

9. Conclusioni

Fondamentalmente abbiamo potuto confermare buona parte delle osservazioni eseguite dai diversi autori nei precedenti lavori, ma riteniamo di dover fare delle precisazioni a riguardo sia inerenti ad aspetti qualitativi che quantitativi della problematica ed in particolare:

- Il passaggio tra mezzi granulari puri e mezzi coesivi non presenta una transizione netta ma graduale nelle curve della distribuzione della pressione.
- La presenza dell'acqua nelle miscele portate a saturazione, conferma seppur attenuato il trend generalmente riscontrato nelle prove con mezzi asciutti.
- Nelle catene di forza ci sono delle variazioni dell'ordine di parecchi KPa tra la zona d'ombra ed i punti impressionati confermati dalle osservazioni effettuate con il metodo fotoelastico.

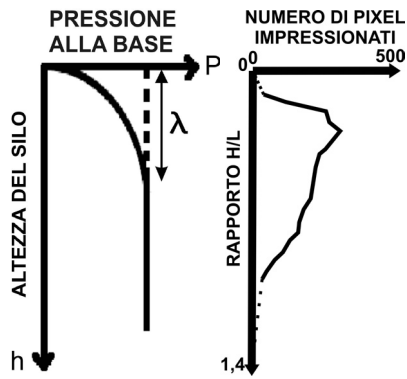


Figura 11: Confronto tra la curva di Janssen per il silo e grafico ricavato dalla cartoncino impressionato lungo le pareti dei cilindri
Comparison between the curve of Janssen for the silo and diagram gained from the impressioned paper along the walls of the cylinders

- Le sperimentazioni dinamiche ottenute con energizzazione monocromatica che mostrano flusso di materiale non corrispondono a quelle riscontrate con una sorgente impulsiva da noi sperimentata, infatti le catene

di forza non cambiano distribuzione spaziale e si può osservare come i granelli si spostino, ma ritornino nella posizione iniziale.

- La curva di variazione delle pressioni all'interno di un silo così come viene definita dalla legge di Janssen non è stata riscontrata nelle nostre sperimentazioni.
- L'ipotesi di un H/L costante proposto da diversi autori, non è stato riscontrato nelle nostre prove che al contrario ha permesso di definire questo rapporto tramite una equazione logaritmica.
- Abbiamo osservato sperimentalmente che operando opportunamente sulle pressioni si poteva invertire il loro segno.

10. Implicazioni

Le implicazioni conseguenti a quanto sopra esposto appaiono notevoli soprattutto per ciò che riguarda le scienze della terra ed in particolare i campi della geofisica, della geotecnica e soprattutto riguardo il comportamento di questi materiali quando soggetti ad input sismico.

Bibliografia

- Aben H. & Josepson J. (1995) – On the precision of Integrated Photoelasticity for Hollow Glassware. *Optic and Lasers in Engineering*, 22, 121-135.
- Behringer R.P., Howell D., Kondic L., Tennakoon S. & Veje C. (1999) – Predictability and granular materials. *Physica D*, 133, 1-17.
- Bettolo U.M., Puglisi A. & Vulpiani A. (2003) – La forza dei Granelli, 8. *Le Scienze*.
- Djebels S. (2000) – A macroscopic description of the quasi-static behaviour of granular materials based on the theory of porous media. *Granular Matter*, 2, 143-152, Springer-Verlag.
- Duran J. (2000, Eds.) – *Sands, Powder and Grains*. Springer-Verlag, Berlino.
- D. Howell & R.P. Behringer. (1997) – Dynamics of Stress Chains for 2D Sheared Granular Materials. *Proceedings of the Third International Conference on Powders & Grains*, R.P. Behringer and J.T. Jenkins eds. (A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands), pp. 337-40
- Jaeger H. M., S. R. Nagel & R. P. Behringer. (1996) – Granular solids, liquids, and gases. *Reviews of Modern Physics*, 68, n°4 October.
- Janssen H.A. (1895) – Versuche über Getreidedruck in Silozellen. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 39, 1045-1049.
- Mattutis H.G. & Schinner A. (1999) – Influence of the geometry on the pressure distribution of granular heaps. *Granular Matter*, 1, 195-201, Springer Verlag.
- Nougier C., Bohatier C., Moreau J.J. & Radjai F. (2000) – Force fluctuation in a pushed granular material. *Granular Matter*, 2, 171-178, Springer-Verlag.
- Nur A. M. & Zhijing Wang (1989, Eds.) – *Seismic and Acoustic velocities in Reservoir Rocks*. Society of Exploration Geophysicists Volume I, II. Franklyn K. Levin Editor Series.
- Patterson E.A., Ji W. & Wang Z.F. (1997) – On Image Analysis for Birefringence Measurements in Photoelasticity. *Optic and Lasers in Engineering*, 28, 17-36.
- Rollins K. M., Evans M.D., Diehl N.B. & Daily III W.D. (1998) – Shear Modulus and Damping Relationship for Gravels. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. Vol. 124, 5, 396-405.
- Tejchman J. (1998) – Numerical simulation of filling in silos with a polar hypoplastic constitutive model. *Powder Technology*, 96, 227-239.
- Vishay Measurements Group (1989, Eds.) – *Introduction to Stress Analysis by the Photostress® Method*. TN -702 - 1.
- Zandman F., S. Redner, and E.I. Regina (1962) – Reinforcing Effect of Birefringent Coatings. *Experimental Mechanics*, 2, 55-64 (February).