

Capitolo 6

Conclusioni

La conoscenza del comportamento dei materiali granulari è considerata oggi, a differenza del passato, una priorità della ricerca scientifica, per i riflessi negli ambiti della difesa del territorio, e per le numerose applicazioni civili o industriali. La fenomenologia di questo tipo di materiali consiste di figure numerose: e.g. il comportamento attritivo-coesivo, la dilatanza, il fenomeno della segregazione, e la formazione di meso-strutture che determinano una distribuzione fortemente non omogenea delle forze, nel materiale, a livello microscopico (cioè a livello dei grani). Uno degli aspetti più interessanti di questi materiali, e forse quello di più difficile comprensione, è l'ambiguità del loro comportamento, tra solido e fluido.

All'interno della classe di fenomeni nei quali i materiali granulari manifestano un comportamento di tipo fluido coesistono scenari differenti, tutti di estremo interesse dal punto di vista geotecnico. La condizione di *stato critico* rientra a pieno titolo in questo ambito, assieme al fenomeno, intimamente correlato, della *localizzazione della deformazione*. Scenari più intuitivamente riconducibili alla nozione di “flusso” vi appartengono ugualmente: ad esem-

pio quelli classificabili come *flussi densi di materiale granulare*, o quelli impropriamente detti “*gas granulari*”. Una vasta letteratura è stata prodotta attorno a queste tematiche, specialmente negli ultimi venti anni. Le evidenze sperimentali, sia di tipo fisico che di tipo numerico (i.e., con il metodo degli elementi discreti), sono numerose ed hanno consentito la validazione di modelli al continuo capaci di descrivere *alcuni* aspetti del comportamento fluido dei materiali granulari. Molte questioni più urgenti dal punto di vista applicativo, rimangono però ancora irrisolte; tra queste, in particolare, sono da mettere in evidenza i fenomeni di *innesco e propagazione di frane in materiale granulare e l'evoluzione delle bande di taglio*.

Recentemente, nuovi metodi di osservazione sperimentale si sono resi disponibili; tra questi, la tecnica di fotogrammetria *PIV* nella sua variante digitale, presenta particolare elementi di interesse: è stata sviluppata in origine per lo studio della cinematica dei fluidi, e le sue recenti varianti digitali sono “apparentemente” di facile utilizzo. Questa tecnica consente di misurare *campi* piani di velocità, in base all'analisi ed al confronto di fotogrammi successivi, utilizzando metodi analitici e statistici, organizzati nella disciplina oggi nota come “*analisi del segnale*”.

Le caratteristiche di questo strumento suggeriscono la sua applicazione al cosiddetto “materiale analogico di Schneebeli”, cioè ad un analogo bidimensionale dei materiali granulari ottenuto assemblando un insieme di cilindri (di uguale lunghezza) in luogo di un insieme di grani. Questa possibilità è stata indagata nel presente lavoro, con particolare riferimento alle figure fenomenologiche evidenziate poco sopra. Con l'apparato sperimentale $1\gamma 2\epsilon$ ed i sistemi di acquisizione ed analisi di immagine, messi a disposizione dal laboratorio *Sols, Solides, Structures* di Grenoble, sono state effettuate misurazioni *PIV* su due differenti scenari di flusso granulare.

Un primo esperimento è stato condotto su di un provino, realizzato con materiale analogico di Scheebeli, che era stato modellato a forma di pendio (con pendenza di 23.6°) e posizionato all'interno del telaio dell'apparecchiatura $1\gamma 2\epsilon$. La lenta, parallela e costante, rotazione delle traverse laterali di contenimento, ha indotto nel provino, inizialmente, una deformazione distortionale distribuita nel volume. Un graduale aumento della pendenza del lato inclinato ha accompagnato l'evolvere di questa prima fase del processo deformativo sino all'avvento di un fenomeno di collasso che ha interessato gli strati più superficiali del pendio. Il collasso, generatosi in sommità al pendio, si è propagato verso valle; è evoluto in un flusso granulare, sino ad arrestarsi poco dopo l'impatto con la traversa di contenimento sul lato opposto, ed ha causato una riduzione di pochi gradi della pendenza del lato inclinato. Successivamente alla fase di collasso, si è ristabilito lo scenario precedente, di deformazione controllata dalle condizioni al bordo, e sostanzialmente distribuita nel volume; un successivo (sebbene molto meno rilevante) fenomeno di collasso è stato ugualmente osservato, che è stato qualitativamente simile al precedente.

Nel secondo esperimento, una piastra è stata posta in sommità ad un provino simile a quello del caso precedente. La piastra è stata obbligata ad un movimento verticale, lento e costante verso il basso. La pressione della piastra, sul provino, ha indotto una deformazione lenta, progressiva, inizialmente distribuita nel volume. Con l'evolvere della prova, si è gradualmente evidenziato, e reso visibile anche ad occhio nudo, uno scenario di rottura plastica, caratterizzato da una banda di taglio che attraversava il provino, richiamando in maniera evidente il tipico meccanismo rigido-plastico di rottura per le fondazioni superficiali.

Per entrambe le prove, numerose altre dello stesso tipo erano state esegui-

te in precedenza, con le quali ci si era accertati della ripetibilità delle figure qualitative evidenziate nel processo deformativo.

Sulle immagini acquisite durante le prove, sono state effettuate le misurazioni dei campi di velocità (e spostamento incrementale) per mezzo di un software che implementa la versione digitale della tecnica *PIV*. Dopo una lunga fase per la determinazione dei parametri “ottimi” per il procedimento di fotogrammetria (scelti in un ambito determinato dalle indicazioni raccolte in letteratura, ma raffinati, per il vero, grazie a numerose analisi fotogrammetriche “di tentativo”), si è giunti ad una sequenza di campi di velocità e spostamento incrementale rappresentativi delle diverse fasi delle due prove.

Nella fase iniziale della prima prova (in cui le deformazioni progredivano lente, omogenee, controllate dal bordo) le misure sono in buon accordo quantitativo e qualitativo con i fenomeni osservati. La precisione teorica raggiungibile dal procedimento (dell'ordine di 0.1 pix) rappresenta una stima affidabile dell'errore della misure (dell'ordine di 10^{-1} mm in termini di spostamento incrementale, corrispondenti a circa 10^{-2} mm/s in termini di velocità). Ragionando sempre per linee essenziali, questo errore incide in generale, comunque, per un'aliquota dell'ordine del 10% sui valori significativi misurati. Nella seconda prova, caratterizzata nel suo insieme da condizione di deformazione lenta e controllata, la scelta di un lasso temporale più ampio tra i fotogrammi di ogni coppia da analizzare, ha consentito livelli di precisione di poco superiori; tale dato va però valutato assieme alla constatazione secondo la quale, all'aumentare del lasso di tempo tra due fotogrammi successivi, i valori di spostamento incrementale mantengono il loro significato, mentre le misure di velocità sono sempre meno rappresentative come approssimazioni dei valori di velocità istantanea.

L'interpolazione, con campi continui, dei valori di velocità misurati in nu-

merosi punti del provino, ha consentito un'analisi qualitativa, semplificata, di alcune figure di deformazione. In particolare, nella fase avanzata della seconda prova, è ben evidenziata la localizzazione della (velocità di) deformazione deviatorica in corrispondenza della banda di taglio (il cui spessore, in grossolana approssimazione, è circa 20 volte il diametro d_{50} per il materiale utilizzato), in assenza di significative variazioni della deformazione volumetrica. È da sottolineare, circa i campi di deformazione, l'eventualità di ottenere misure "apparenti" in corrispondenza, nell'immagine, dei confini fisici dei provini.

Una discussione a parte meritano le misure ottenute in corrispondenza della fase di collasso e flusso veloce che ha interrotto la continuità del comportamento nella prima prova. Lo strato coinvolto dal flusso ha spessore pari a pochi multipli del diametro rappresentativo delle particelle; questo rende diggià discutibile il significato di misurazioni "al continuo", come quelle prodotte dalla tecnica *PIV*. La resa grafica di queste misure ha messo in evidenza un numero di determinazioni errate di vettori spostamento, la più parte delle quali è stata efficacemente corretta grazie alle procedure di *post-processing* delle misure. La corrispondenza quantitativa tra i valori misurati e le velocità realmente coinvolte, è in questo caso molto poco soddisfacente, e la precisione raggiungibile dalla procedura di fotogrammetria (pari in questo caso a circa 10^{-1} mm in termini di spostamento incrementale) non è in alcun modo rappresentativa. Cionondimeno, le figure qualitative che emergono dalla resa grafica, in particolare dei campi di velocità lineare e velocità di deformazione deviatorica, offrono interessanti spunti di riflessione. Sembra significativo, specialmente nelle fasi di innesco ed arresto del flusso (cioè per velocità ancora basse e misure ancora sufficientemente attendibili), il ripetersi ritmico di zone in compressione e zone in estensione nelle lungo

le regioni (superficiali) attivate.

L'utilizzo della tecnica di fotogrammetria *PIV*, nel suo formato digitale, ha dato, nell'insieme, risultati soddisfacenti. I buoni livelli di precisione (raggiunti, in questo lavoro, e per entrambe le prove, nelle fasi di deformazione lenta e controllata) sono accompagnati dalla possibilità di mettere in evidenza interessanti figure qualitative; la possibilità di osservare quest'ultime, in particolare, permane anche nei casi in cui la precisione delle misure non sia più soddisfacente dal punto di vista quantitativo (è il caso, ad esempio, della fase di flusso rapido durante la prima prova). L'utilizzo di questa tecnica per lo studio dei materiali granulari sembra quindi ragionevole e promettente. È importante sottolineare, ad ogni modo, che la possibilità di ottenere semplici figure qualitative del fenomeno, o invece misure di "livello quantitativo", dipende da un numero importante di fattori.