

# Capitolo 1

## Introduzione

La classe dei materiali detti comunemente “granulari” è costituita di specie diverse e numerose, talune di origine naturale, altre di produzione antropica. Molti geomateriali ne fanno parte: non solo i limi, le sabbie, le ghiaie e le loro miscele ma anche, ad una scala di osservazione opportuna, gli insiemi di detriti di diametri maggiori quando questi interagiscono intensamente in cinematismi d’insieme. I procedimenti di stoccaggio o il trasporto in condotta di sementi, pillole, o “grani” di qualsivoglia specie, implicano difficoltà tecniche rilevanti che incidono sull’efficienza dei procedimenti impiegati dalle industrie (ad esempio) alimentari, farmaceutiche, per la produzione di materiali da costruzione, di fertilizzanti, mangimi, o di carbone. L’interesse nei confronti dei materiali granulari converge quindi da un ambito ampio ed eterogeneo di attività umane; a ciò fa fronte, a tutt’oggi, una scarsa conoscenza del loro comportamento. Più precisamente, sebbene da un lato sono stati fatti notevoli progressi nello sviluppo di modelli costitutivi per i terreni, molte figure fenomenologiche rimangono estremamente poco precisate ed ancora “difficili”.

Una prima restrizione dell'ambito di questo studio è a favore della *fenomenologia dei materiali granulari asciutti non coesivi*, cioè dei fenomeni esibiti (alla scala macroscopica) da insiemi di grani che soddisfano (alla scala microscopica) le ipotesi seguenti: (i) che il diametro rappresentativo dei grani  $d$  sia sufficientemente grande affinché siano trascurabili le azioni elettrostatiche, capillari, e aereodinamiche (e.g.  $d > 100 \mu\text{m}$ ; *Chevoir e Pouliquen, 2002*); (ii) che sia trascurabile il contributo della deformabilità dei grani alle variazioni di forma e volume dello spazio complessivamente impegnato dall'insieme; (iii) che la viscosità del fluido interstiziale, se alcuno, sia trascurabile.

I materiali granulari asciutti esibiscono una quantità di figure fenomenologiche non comuni ad altri solidi o fluidi; tra queste, la più rappresentativa è appunto questa loro duplice natura; *Eckart et al. (2002)* la introducono in maniera sintetica e puntuale:

*[...] depending on the externally applied mechanisms [granular materials] behave somewhat like solids or fluids or gases. Furthermore, their behaviour can in a given process change form, say being fluid-like to suddenly solid-like, often repeatedly, so that an intermittent reaction results from a driving mechanism that may strictly be continuous.*

Si deve aggiungere che il confine tra queste due tipologie di comportamento (la transizione dal comportamento solido al comportamento fluido) è di per sé oggetto di studio e potrebbe essere intesa come una terza categoria di fenomeni. Nel presente lavoro, a carattere sperimentale, l'attenzione è limitata sostanzialmente ai *flussi di materiale granulare*; di questi fenomeni di discute, in maniera più diffusa, nel Capitolo 2.

Gli ultimi progressi della fotogrammetria digitale hanno segnato una notevole evoluzione di questo insieme di tecniche. Il loro utilizzo per la misu-

razione dei campi di spostamento e velocità, inizialmente a quasi esclusivo vantaggio della meccanica dei fluidi, si è progressivamente allargato sino a coprire, ad oggi, un ambito estremamente vasto di discipline sperimentali. Recentemente queste tecniche, ed in particolare la tecnica *digital Particle Image Velocimetry* (*dPIV*, o impropriamente solo “*PIV*”), hanno attratto l’attenzione degli studiosi del comportamento dei materiali granulari (e.g. *Eckart et al.*, 2003; *Medina et alii*, 1998, 2000; *Sielamowicz e Blonski*, 2004).

Esperienza e competenza specialistiche sono state sviluppate dal personale scientifico e tecnico del laboratorio *Sols, Solides, Structures* di Grenoble<sup>1</sup>, relativamente allo studio a carattere sperimentale e teorico dei materiali granulari — come, più in generale, dei geomateriali. A disposizione di questa struttura sono sistemi sperimentali con carattere di unicità, tra cui l’apparato denominato  $1\gamma 2\epsilon$  per l’esecuzione di sperimentazioni su materiale granulare analogico bidimensionale (anche detto *materiale di Schneebeli*). Per la misurazione dei campi di spostamento o deformazione, questi sistemi sono sovente, ed efficacemente, accoppiati ad un sistema di fotogrammetria “tradizionale” (i.e. la *stereofotogrammetria*).

A chi scrive è stata data l’opportunità, con questo lavoro, di *valutare e ponderare l’applicabilità, della tecnica di fotogrammetria digitale PIV, alla misurazione dei campi di spostamento e velocità nei flussi di materiale granulare*. Le sperimentazione delle quali ci si è avvalsi, descritte nel Capitolo 4, sono state effettuate con l’apparato  $1\gamma 2\epsilon$ ; con ciò si richiama implicitamente l’attenzione del lettore su di un’ultimo restringimento dell’ambito di questo studio, nel quale si farà riferimento esclusivamente a condizioni di *moto e deformazione piani*.

---

<sup>1</sup>*Centre National de la Recherche Scientifique, Institute National Politecnique de Grenoble, Université Joseph Fourier.*

Alcuni dettagli delle misurazioni effettuate, ed i risultati più rappresentativi, sono descritti nel Capitolo 5, prima di procedere ad una sintesi conclusiva.

**Motivazioni** L'intensa urbanizzazione ed industrializzazione hanno spinto alla ricerca di nuovi siti da edificare in aree per le quali si pongono legittimamente le questioni della stima e mitigazione del rischio ambientale. Ancora più urgente è la valutazione del rischio nelle zone già edificate: i tragici recenti eventi del *maggio 1998*<sup>2</sup> hanno mostrato come sia carente l'informazione di cui disponiamo e la nostra conoscenza del comportamento dei geomateriali. Gli strumenti concettuali e tecnici elaborati sino ad oggi non ci consentono, nelle situazioni indicate sopra, di produrre valutazioni esaurienti; più precisamente, ad esempio, lo stato dell'arte per lo studio dei flussi di materiale granulare non ci consente ancora di effettuare previsioni sufficientemente attendibili ed accurate circa l'innesco ed il raggio d'azione di frane, o sulla loro interferenza con centri abitati, attività lavorative ed infrastrutture. Con il termine "frana" si intende qui il moto di masse di geomateriali (roccia, terra o detrito), secondo gravità, limitato dalla superficie topografica, che ha luogo in seguito ad un fenomeno di instabilità e distacco della massa dalla sua configurazione di equilibrio; la definizione è piuttosto generica poiché l'ambito a cui ci si riferisce è estremamente eterogeneo. Diversi sono i tentativi di sistemazione di questo ambito (e.g. *Varnes, 1978; Cruden e Varnes, 1996; Hungr et al., 2001*); se ci si limita ai *fenomeni di colata rapida*, è possibile effettuare una prima distinzione tra i casi in cui il moto avvenga in co-presenza di fluido (*flowslide e debris flow*) e quelli in cui il materiale è sostanzialmen-

---

<sup>2</sup>Il 5 maggio, i versanti di una vasta area ai piedi del rilievo di Pizzo d'Alvano (SA) furono interessati da numerose colate di detriti che causarono oltre 150 vittime, complessivamente, nei Comuni di Bracignano, Siano, Sarno (SA) e Quindici (AV).

te asciutto (*sturztrom*).<sup>3</sup> Con il termine “*debris flow*” si fa riferimento alla mobilitazione di importanti masse di detrito costituito da una fase fluida ed una fase granulare, ed in cui la fase fluida è una sospensione di particelle (essenzialmente argillose) in acqua. L’uso di questo termine si distingue da quello del termine “*flowslide*”, che si riferisce a casi analoghi, ma nei quali la fase fluida è semplicemente acqua o una miscela di acqua e aria. Materiali granulari con elevata porosità, struttura sciolta, ed in condizioni di totale o parziale saturazione, sono suscettibili di repentine perdite di resistenza; la causa sarebbe il collasso della struttura del materiale, metastabile, con conseguente forte incremento delle pressioni neutre; questo è, in molti casi, lo scenario di innesco di fenomeni del tipo *flowslide*, ma siamo lontani da una sua compiuta e condivisa interpretazione e modellazione. Infine si utilizza il termine “*sturztrom*” con riferimento ad una corrente di detriti generata dalla progressiva frammentazione, lungo il percorso, del corpo di una frana in roccia di notevoli dimensioni (e.g., con volumi maggiori di  $10^6$  m<sup>3</sup>). Sorprendono, nei fenomeni in questione, le elevate velocità raggiunte (sino a 50 m/s per gli *sturztrom*) e le distanze percorse, talvolta in apparente contrasto con le modeste pendenze lungo le quali lo scorrimento aveva avuto luogo. Ci si interroga su quali siano i meccanismi che consentono il verificarsi di flussi con queste caratteristiche: una (necessaria) forte riduzione della resistenza interna sembra plausibile, nel caso di *flowslide* e *debris flow*, in virtù di forti incrementi delle pressioni neutre, nella fase di scorrimento; questi incrementi, a loro volta, necessitano ancora di una spiegazione con significato meccanico compiuto. Nel caso degli *sturztrom*, trattandosi di correnti asciutte, si ipotizza che una riduzione della resistenza interna al materiale sia legata ai

---

<sup>3</sup>Si utilizza qui la terminologia maturata nella letteratura in lingua inglese, poiché la corrispondente terminologia italiana non è ancora consolidata.

meccanismi per la trasmissione della quantità di moto che si generano ad elevate velocità, quando i contatti tra le particelle sono essenzialmente di tipo collisionale.

*Guzzetti (2000)* censisce gli eventi franosi che hanno causato vittime sul territorio italiano attuale, dal 1279 al 1999; documenta 995 eventi per i quali si ha notizia di 10447 vittime. Il fatto che 5939 di queste abbiano perso la vita in eventi verificatisi nel XX° Secolo non è di per se indice di un'enfasi recente di questi accadimenti; va tenuto presente, come dettagliato da *Guzzetti*, che solo successivamente alla Seconda Guerra Mondiale, i rilevamenti dei fenomeni franosi sono sufficientemente attendibili ed in numero rappresentativo; a ritroso nel tempo, l'esattezza e la sistematicità dei rilevamenti vanno gradualmente decrescendo, sino a rendere il dato poco o per nulla rappresentativo. Ciononostante il persistere di questi fenomeni è sempre più motivo di preoccupazione a livello politico, amministrativo, e sociale. Se la sensibilizzazione della popolazione è in gran parte da attribuire all'eco dei mezzi di comunicazione di massa, certamente più forte che in passato, a livello amministrativo si aggiungono elementi di preoccupazione ulteriori. È significativa la stima citata da *Canuti et alii* alla Giornata di Studio 'Technologie per la mitigazione del rischio idrogeologico' (presso la Sala del Cenacolo della Camera dei Deputati, Roma, 20 novembre 2001), secondo i quali il costo totale dei danni provocati da fenomeni franosi era compreso fra 1 e 2 miliardi di EURO per anno, corrispondenti mediamente all'1.5 per mille del prodotto interno lordo (PIL); gli stessi autori aggiungono che stime più complete, che tenessero conto dei danni indiretti associati alle perdite di produttività, alla riduzione del valore del patrimonio immobiliare, alla riduzione delle entrate fiscali ed altri effetti economici indotti, sarebbero state inquadrabili tra il 3 ed il 4 per mille del PIL. Dallo stesso testo, si riporta lo stralcio che segue,

che esprime con puntualità altre ragioni di preoccupazione:

*1629 centri abitati montani e collinari, molti dei quali di notevole rilevanza storico-architettonica e paesaggistica, sono classificati “da trasferire” o “da consolidare” a spese dello Stato ai sensi della L.445/1908 e delle sue successive modifiche ed integrazioni. In seguito ad indagini svolte nell’ultimo decennio dal GNDCI [Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche], il numero di centri abitati affettivamente instabili risulta tuttavia di gran lunga superiore, stimabile in oltre 5000. [...]. Oltre 9600 aree sul territorio sono state ad oggi individuate e perimetrare come “a rischio di frane estremamente elevato” ai sensi della L.267/1998 (DL 180/1998) dalle Regioni e dalle Autorità di Bacino. [...]. Considerazioni particolari si applicano alla protezione dei beni culturali e naturalistici, per i quali i danni causati dai fenomeni franosi possono assumere una rilevanza incommensurabile. Una significativa porzione delle emergenze storiche, architettoniche, artistiche e naturalistiche del nostro Paese è esposta direttamente o indirettamente al rischio di frana. Considerando soltanto i 33 siti italiani inclusi nell’UNESCO World Heritage List, si può osservare che ben 11 sono interessati da fenomeni di dissesto indotti da movimenti di versante [...].*

Le ragioni per le quali solo negli ultimi decenni le frane siano assunte a vero e proprio problema socio-economico, nonostante sia da escludere un concomitante aumento della severità e della frequenza di questi fenomeni, sarebbero da ricercare in una nostra maggiore esposizione e vulnerabilità. Siamo più esposti, come anticipato, in funzione della massiccia — e spesso incontrollata — urbanizzazione ed industrializzazione che hanno coinvolto anche aree su

cui pendeva da sempre un giudizio di instabilità; l'interruzione delle attività produttive, di qualsiasi genere, ha oggi un impatto economico, ed in termini di competitività di mercato, che non aveva in passato, e ci rende, in questo senso, più vulnerabili. Sebbene la pericolosità degli eventi franosi, intesa come probabilità di accadimento, non sia necessariamente aumentata (anzi è accertato che il territorio italiano sia stato molto maggiormente interessato da fenomeni franosi tra il 1550 ed il 1850, in corrispondenza del periodo di deterioramento climatico denominato “Piccola Età Glaciale”) sebbene questo fattore non sia quindi apprezzabilmente peggiorato, il “rischio ambientale” è più elevato che in passato, in virtù dell'accresciuta esposizione e vulnerabilità.

Questo lavoro rientra nell'ambito, estremamente ampio, degli sforzi che negli ultimi decenni sono stati profusi da ricercatori nei campi della geotecnica, della geologia, della fisica, della meccanica di solidi e fluidi, e della matematica, per colmare il ritardo dovuto alla nostra scarsa conoscenza di questo particolare e comune tipo di geomateriali: i materiali granulari.

**Alcune figure fenomenologiche.** Non c'è disaccordo, nella letteratura in materia, nel riconoscere a Charles Augustine Coulomb il primo tentativo di modellazione del comportamento a rottura dei terreni (dunque, per inclusione, dei materiali granulari) in termini di *coesione* e di *attrito*: nell'*Essai* del 1773 queste figure fenomenologiche compaiono per l'analisi della spinta delle terre sulle opere sostegno.<sup>4</sup> L'*Ingénieur du Roi*, com'è titolato l'autore in testa all'opera, applica i concetti di attrito e coesione al calcolo delle spinte sulle opere di sostegno; i ragionamenti di equilibrio utilizzati sono espressi

---

<sup>4</sup>Senza discutere dell'importanza storica del saggio, se ne ricorda qui la varietà degli argomenti trattati (la resistenza dei pilastri in muratura, il proporzionamento delle opere di sostegno delle terre, il calcolo degli archi e delle volte) e l'incisività nel campo a venire della meccanica delle terre.



con riferimento ad azioni risultanti su corpi rigidi e manca qualsiasi analisi compiuta del ruolo del fluido interstiziale al terreno.<sup>5</sup> In Figura 1.1 è riportata la tavola descrittiva, nell'*Essai*, del generico scenario di spinta del terreno

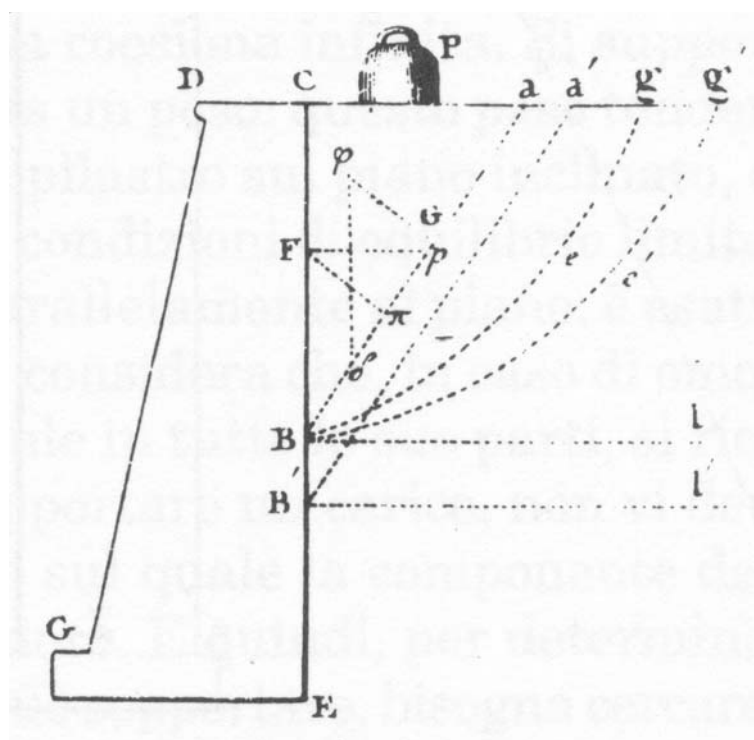


Figura 1.1: (Da *Coulomb*, 1773) Schema per il calcolo della spinta del terreno su di un muro di sostegno.

sul muro di sostegno, o viceversa: al cuneo di terreno sono applicate la forza di gravità, la spinta del muro e l'azione interna in corrispondenza della superficie di rottura, decomponibile in un'azione attritiva ed una coesiva. Nella forma in cui è proposta da C. A. Coulomb l'idea di azione attritiva è la stessa

<sup>5</sup>Solo cinquant'anni più tardi, infatti, Augustin Louis Cauchy poté sintetizzare efficacemente il concetto di tensione (*Cauchy*, 1823, 1827) ed ancora più di un trentennio fu atteso per la pionieristica indagine sperimentale di Henry Darcy sui moti di filtrazione (*Darcy*, 1856).

che è rimasta a noi: essa consiste di una componente normale alla superficie di rottura, vincolata a ragionamenti di equilibrio globale, e di una seconda componente parallela alla stessa superficie, dipendente dalla prima tramite una costante. La definizione di coesione da cui muove l'autore è invece poco più che sgrossata, ed il concetto che esprime non è ancora distinto da quello di resistenza a trazione:

*La cohesione se mesure par la resistance que le corps solides opposent  
à la desunion direct de leurs parties [...].*

Questa ambiguità non si riflette però sull'analisi che è condotta considerando agente sulla superficie di rottura una forza ad essa parallela, proporzionale alla sua estensione, di intenzione opposta al meccanismo. Questo metodo di calcolo è ancora oggi di largo impiego nelle applicazioni più convenzionali di ingegneria geotecnica, accompagnato da confortanti coefficienti di sicurezza, ed applicato agli scenari più diversi sotto il nome di *metodo dell'equilibrio limite*. Da allora ad oggi, i concetti di coesione ed attrito sono stati tradotti dal contesto di cui sopra, a quello della meccanica dei continui, e sono stati espressi in termini di tensioni (o pressioni); a partire dal primo e più "popolare" esempio, i.e. il *criterio di Mohr-Coulomb*<sup>6</sup>, numerose altre forme sono state date ai concetti di coesione ed attrito, e questi sono sintetizzati nelle leggi di snervamento per i modelli di plasticità perfetta (vedi in particolare il *metodo dell'analisi limite*, e.g. *Chen, 1975*), o elasto-plastici (*Drucker et al., 1957; Poorooshab et al., 1967; Roscoe e Burland, 1968; Nova and Wood, 1979; Lade e Kim, 1988*) o ancora sono trattati unitariamente ai problemi di localizzazione della deformazione, instabilità e biforcazione del comportamento

---

<sup>6</sup>Per una sintesi storica ed applicativa del criterio di Mohr-Coulomb si veda in particolare *Parry (1995)*.

meccanico (*Darve*, 1984; *Nova*, 1989; *Rudniki and Rice* 1975; *Vardoulakis*, 1995).

Una seconda figura fenomenologica di rilievo dei materiali granulari è denominata *dilatanza*, dal termine inglese “*dilatancy*” utilizzato originariamente da *Osborne Reynolds* nel 1885:

*[...], I would point out the existence of a singular property of such granular media, which is not possessed by known fluids or solids. [...] I have called this unique property of granular masses “dilatancy”, because the property consists in a definite change of bulk consequent on a definite change of shape or distortional strain, any disturbance whatever causing a change of volume and generally dilatation.*

Si intende cioè con il termine “dilatanza” la proprietà dei materiali granulari di esibire variazioni di volume anche quando il vincolo imposto alla cinematica è una semplice variazione di forma. Non è privo di senso obiettare che, in realtà, la dilatanza sia per definizione una “non proprietà” dei materiali granulari, nel senso che esibiscono una proprietà in senso compiuto quei materiali per i quali *non* vi è accoppiamento tra variazioni di forma e variazioni di volume. La ragione di questo aspetto del comportamento dei materiali granulari è illustrato in Figura 1.2: un insieme di sfere in configurazione compatta, se sottoposto ad una deformazione distorsionale, raggiunge una sistemazione più dispersa in ragione del necessario “scavallamento” dei grani, gli uni sopra gli altri: cioè per ragioni legate unicamente a vincoli imposti dalla microstruttura. Nei materiali granulari in genere, la geometria interna è estremamente più complessa del caso in Figura 1.2, ma si può osservare la medesima figura fenomenologica ed è ragionevole motivarla in base ad un meccanismo analogo.

Esperimenti su pile di materiale granulare hanno mostrato che la distri-

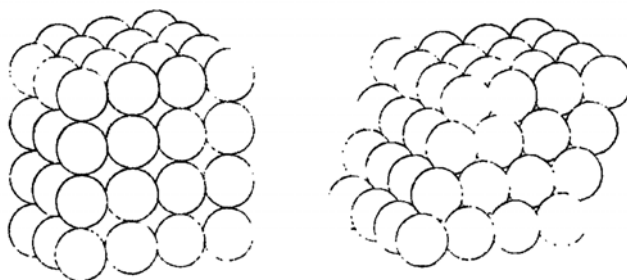


Figura 1.2: (Da *Raynolds*, 1885) Dilatanza per un insieme di grani sferici in configurazione compatta, sottoposto a variazione di forma.

buzione delle forze di contatto all'interno dell'insieme di grani è lontana dall'essere omogenea o isotropa; utilizzando dischi di materiale fotoelastico, *Drescher e de Josselin de Jong* (1972) mettono in evidenza, a livello dei grani, la formazione di meso-strutture e la concentrazione delle azioni interne lungo catene preferenziali di contatti. Questa organizzazione interna dei sistemi granulari è di per se una spiccata figura fenomenologica; appare estremamente interessante, e complessa, la questione della sua relazione con le caratteristiche del materiale a livello macroscopico, con riferimento, ad esempio, alle caratteristiche del tensore delle pressioni.

Il fenomeno della segregazione, anch'esso caratteristico dei materiali granulari, è tra quelli più facilmente osservabili. La più parte delle persone ha potuto notare che in una confezione di cereali per la colazione, la frazione fine si seleziona progressivamente, e generalmente caratterizza le ultime razioni... Lo stesso fenomeno è osservabile nei corpi di frana, nel caso di flussi di detriti per i quali la frazione più grossolana è situata nelle parti più superficiali o nei pressi del fronte del corpo di frana. Il fenomeno può essere interpretato e descritto come l'effetto macroscopico del riarrangiamento interno al materiale reso possibile dal continuo e casuale crearsi di vuoti come "posizioni dispo-

nibili” per i grani, e della presenza di un’azione esterna (e.g. la gravità) che determina direzioni preferenziali, nello spazio, per gli spostamenti (*Savage e Lun*, 1988).

I materiali granulari, come anticipato, possono comportarsi come fluidi, e numerosi modelli sono stati elaborati per la descrizione di questo tipo di comportamento. Tra questi, vi sono i modelli detti *quasi-idrodinamici* e caratterizzati, come suggerisce la denominazione, da un sistema di equazioni costitutive simili alle equazioni di Navier Stokes per i fluidi “canonici”. Anziché su base fenomenologica come i modelli di idrodinamica usuali, i modelli quasi-idrodinamici per i materiali granulari sono ottenuti applicando procedure di media alle grandezze microscopiche. È centrale, a riguardo, la scelta della scala temporale e spaziale alla quale la procedura di media è applicata: le lunghezze che separano la scala macroscopica da quella microscopica sono molto maggiori che per altri materiali usuali (e.g. i metalli, o i fluidi ordinari); inoltre, molti dei fenomeni d’interesse applicativo sono caratterizzati da lunghezze caratteristiche intermedie tra le due scale, in cui il flusso interessa uno strato superficiale dello spessore di pochi diametri, per il quale è legittimo interrogarsi circa l’opportunità di una modellazione al continuo. I fenomeni di localizzazione della deformazione, ad una scala opportuna, sono anch’essi assimilabili a flussi di materiale granulare. Per l’approfondimento di questo e di altri aspetti relativi ai flussi di materiale granulare, si rimanda al Capitolo 2.

**Fotografia, movimento, fotogrammetria** L’avvento della fotografia, tra la prima e la seconda metà del Milleottocento, ha rivoluzionato il rapporto tra uomo e immagine: la rappresentazione della realtà per immagini assumeva per la prima volta carattere oggettivo e le potenzialità descrittive della

fotografia applicata allo studio del movimento furono ben presto intuite in campo artistico, o ai suoi confini...

“*Le mouvement dans les fonctions de la vie*” titola nel 1868 la tesi di dottorato di Étienne-Jules Marey, francese, fisiologo, che fedele al motto osserverà il movimento animale — e non solo — con metodi diversi. Iniziando con strumentazioni non fotografiche per la registrazione del moto (e.g. *le sphymographe*), pubblica nel 1873 lo studio dal titolo “*La machine animale*”, che avrà attenti lettori oltr’oceano... Dodici otturatori, di altrettante cabine fotografiche in batteria, si azionano in sincrono al passaggio di un cavallo; ne fissano il movimento: era il 1878, e le esperienze fotografiche di Aedward Muybridge (1830-1904), ispirate dal lavoro di Marey, furono rivoluzionarie e sono difficilmente collocabili tra arte, tecnologia e scienza. Dall’andatura del cavallo al gesto dell’uomo (Figg. 1.3 e 1.4): con la fotografia da allora è possibile descrivere e *misurare* il movimento<sup>7</sup>

Colpito a sua volta dai risultati del “collega” americano, è di nuovo il fisiologo francese a innovare: adotta anche lui il metodo fotografico e nel 1882 mette a punto il suo *fusil photographique* (Fig.1.5) col quale può fissare sino a dieci fotogrammi in un secondo — si consideri, a fronte, che lo standard odierno per le apparecchiature di presa video professionali è di venticinque immagini al secondo. L’interesse per le applicazioni scientifiche lo guida a sperimentare quello che forse è il primo esempio di una efficace tecnica di visualizzazione del flusso. Con la *machine a fumée*, (Fig. 1.6) riesce a indurre flussi uniformi di rigoli di fumo in una cabina osservabile dall’esterno, fotografando l’effetto indotto dall’inserimento di modelli bidimensionali.

---

<sup>7</sup>Tra gli innumerevoli lavori dedicati all’opera di Étien-Jules Marey e di Aedward Muybridge, si possono citare, ad esempio e rispettivamente, *Braun* (1992) e *MacDonnell’s* (1972).



Figura 1.3: (Da <http://www.masters-of-photography.com>) Aedward Muybridge, “*The horse in motion*”, 1878.

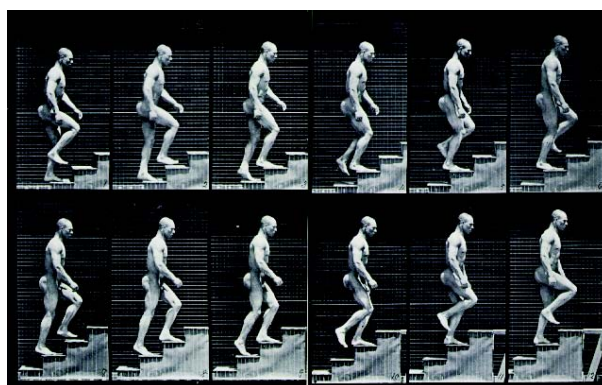


Figura 1.4: (Da <http://www.masters-of-photography.com>) Aedward Muybridge, “*Ascending stairs*”, 1884-85.

Di lì a poche decine d’anni, il binomio fotografia-movimento, trovò interpreti tra i futuristi; ma nel Fotodinamismo di Arturo, Anton Giulio e Carlo Ludovico Bragaglia (Fig. 1.7), l’apparecchio fotografico non fu mai uno strumento di misura (vedi anche *Marra*, 1999).

Gli autori di un testo di riferimento per gli utilizzatori delle tecniche di fotogrammetria digitale (*Raffel et alii*, 1998) riconoscono invece in Ludwing Prandtl il vero precursore in questo campo; in Fig. 1.8 egli appare, ai primi

del 'Novecento, accanto alla sua canaletta ad acqua, utilizzata per la visualizzazione del flusso in prossimità di modelli bidimensionali (prismi, cilindri, profili alari). L'utilizzo di particelle di mica consentì di tracciare il fluido, e di ottenere immagini del tipo in Fig. 1.9 (ottenuta in realtà da una replica della canaletta originale). All'epoca fu possibile ottenere sole informazioni qualitative dalle immagini che ne derivarono; quanto bastò allo scienziato tedesco per elaborare la sua *teoria degli strati limite* (Prandtl, 1904).

Ad un secolo da allora, le tecniche di fotogrammetria sono state elaborate, sperimentate, perfezionate, commercializzate. Il passaggio evolutivo che le ha rese strumenti contemporanei, e non più prototipi, risale agli ultimi vent'anni: è quello della loro conversione in forma ottico-digitale, dall'originale impostazione su base ottico-analogica. L'utilizzatore contemporaneo di queste tecniche ha la possibilità di ottenere informazione quantitative (i.e. misure di campi di velocità o di spostamento incrementale) laddove ai suoi predecessori erano consentite solamente osservazioni qualitative (Fig. 1.10).



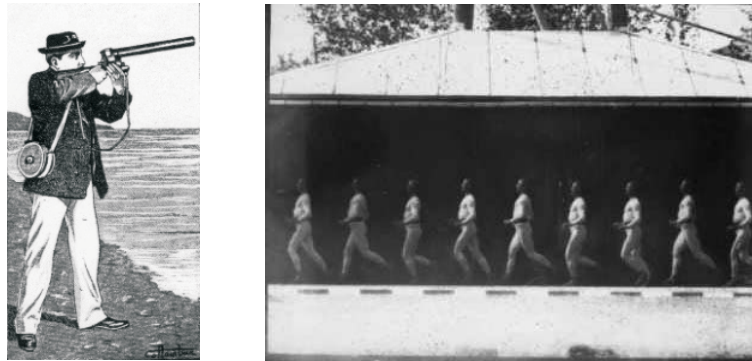


Figura 1.5: (Da <http://easyweb.easynet.co.uk>) Étienne-Jules Marey, esperimenti con il *fusil photographique*, 1882.



Figura 1.6: (Da <http://www.marey-expo.com>) Étienne-Jules Marey, esperimenti con la *machine à fumée*.



Figura 1.7: (Da <http://www.museodellafotografia.it>) Arturo e Anton Giulio Bragaglia, “Lo schiaffo”, 1921.

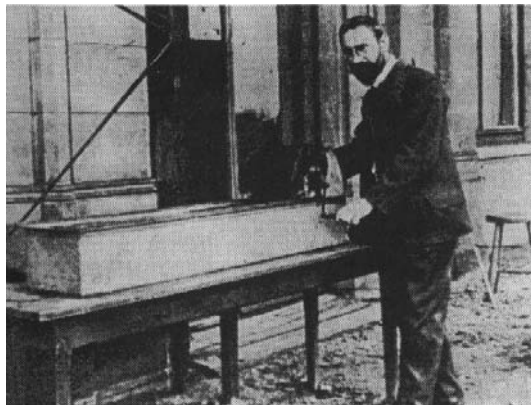


Figura 1.8: (Da *Raffel et al.*, 1998) L. Prandtl, nel 1904, fotografato accanto alla canaletta ad acqua.

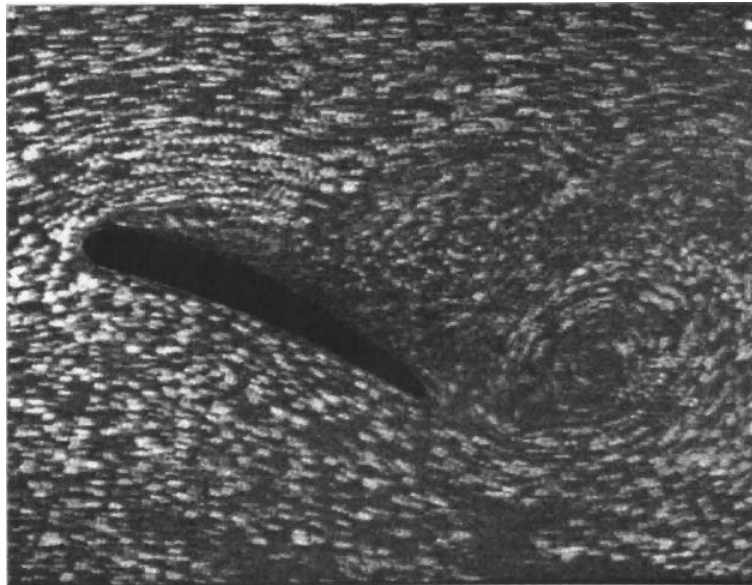


Figura 1.9: (Da *Raffel et al.*, 1998) Immagini da una replica della canaletta di L. Prandtl.

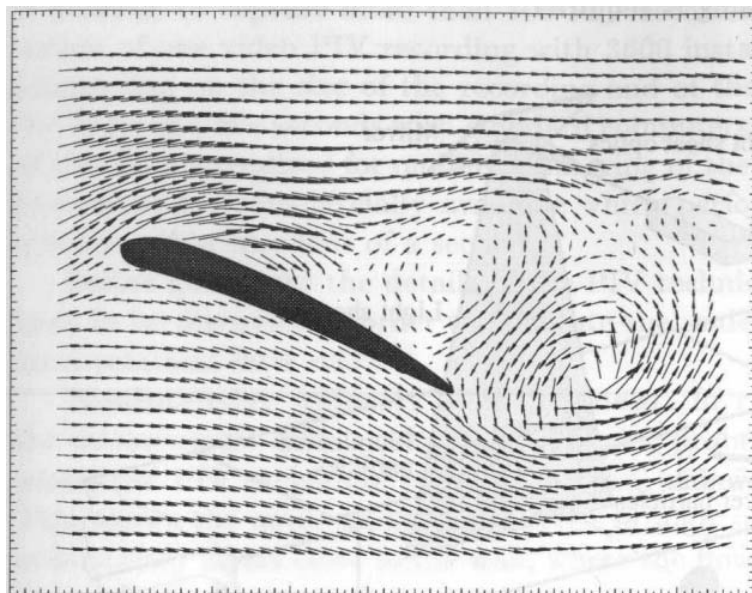


Figura 1.10: (Da *Raffel et al.*, 1998) Risultato dell'analisi *PIV* sul fotogramma in Fig. 1.9.