

7

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI

“FEDERICO II”



FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Specialistica in

Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale

SINTESI DELL'ELABORATO DI LAUREA

**CROLLO DI PARETI VERTICALI DI MATERIALI GRANULARI
INCOERENTI. SIMULAZIONE NUMERICA**

Anno Accademico 2008/2009

Relatore :

Prof. Ing. MASSIMO GRECO

Correlatrice :

Ing. CRISTIANA DI CRISTO

Candidata :

ROSA PATERNOSTRO 324/122

Sintesi:

“Crollo di pareti verticali di materiali granulari incoerenti. Simulazione numerica”

La tesi “Crollo di pareti verticali di materiali granulari incoerenti. Simulazione numerica” ha come oggetto di studio “il dam break granulare”. Gli esperimenti, pertanto, diversamente dal comune e cioè con sola acqua, sono stati condotti con la sola sabbia asciutta nel laboratorio di Ingegneria delle Acque dell’Università di Cassino. Si vuole studiare la modalità con cui una massa di materiale granulare secco si muove su una superficie orizzontale per effetto di una brusca apertura della paratoia che la sostiene e la si interpreta con modelli matematici. Questo studio riveste un ruolo importante nella ricerca in quanto permette di capire la quantità di materiale che si muove, la sua distribuzione, la velocità del fenomeno e la massima distanza raggiunta dalla massa granulare.

Tale approccio apre una strada di studio per numerose applicazioni ingegneristiche come situazioni che implicano il trasporto di materiali come minerali e cereali, valanghe rocciose, frane che sono eventi naturali che riguardano movimenti di solidi su larga scala, processi industriali, crolli di dighe.

Per quanto riguarda la parte sperimentale, è stata esposta in maniera più approfondita nella tesi di Perone Antonella Maria Paola: “Crollo di pareti verticali di materiali granulari incoerenti. Analisi sperimentale”. Si precisa che tutto il lavoro, sia relativo alla parte sperimentale che numerica, è stato affrontato in stretta collaborazione con Perone Antonella Maria Paola.

Si approfondisce, nell’ambito di questa tesi, l’analisi numerica attinente agli esperimenti effettuati sul dam break granulare.

Il comportamento dinamico di un mezzo granulare, almeno secondo alcuni autori, come *Kerswell* e *Poliquen*, può interpretarsi con le equazioni del moto dei fluidi, purchè si stimino correttamente le forze, specie quelle resistenti; ulteriore conferma sulla probabile applicabilità di equazioni di origine fluidodinamica deriva anche dalla constatazione che i dati sperimentali scalano secondo una similitudine alla Froude. Pertanto gli esperimenti, condotti nel corso di questa tesi, servono da un lato a confermare questa ipotesi, e dall’altro a valutare con quali formulazioni delle resistenze si può ottenere la predizione dei risultati sperimentali.

Al fine della rappresentazione dei processi di moto, trasporto ed evoluzione d'alveo, un modello adatto si può ottenere accoppiando le equazioni che descrivono l'idrodinamica alle equazioni di conservazione della massa del sedimento (*Exner, 1925*). Tale approccio utilizza relazioni ottenute in condizioni di moto uniforme cioè si basa sull'ipotesi che le portate solide si adattino istantaneamente alle condizioni idrodinamiche (*Modello Classico*). Dal punto di vista fisico, però, l'ipotesi di adattamento istantaneo del trasporto alle condizioni idrodinamiche appare non accettabile quando la corrente è caratterizzata da transitorie e rapide immissioni di materiale solido, o brusche variazioni dell'idrodinamica, per cui non è possibile calcolare la concentrazione della fase solida istante per istante e punto per punto attraverso una semplice formula di trasporto solido; in tale situazione risultano necessarie formulazioni di non equilibrio cioè relazioni atte a descrivere la dinamica del trasporto solido (*Modello Dinamico*).

Il modello, utilizzato in questa tesi, è l'estensione bidimensionale del *modello bifase*. In tale modello l'idrodinamica viene rappresentata mediante le equazioni della *Teoria delle acque basse*.

Per valutare l'**evoluzione morfologica** si utilizzano le equazioni che rappresentano la conservazione della massa e della quantità di moto del sedimento. In questa trattazione, infatti, lo si applica alla sola fase solida ipotizzando che questa abbia un comportamento da fluido, ipotesi convalidata sperimentalmente. Ovviamente, occorre modificare opportunamente le equazioni del modello dinamico per adattare alla sola fase solida asciutta e, diversamente dalla trattazione relativa ad un fluido, si considerano nelle equazioni dei coefficienti che tengano conto dell'attrito che ha un ruolo fondamentale fin dai primi istanti di sviluppo del processo. Il modello matematico esposto è costituito da un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali e da un idoneo numero di condizioni al contorno.

Tale modello non ha una soluzione analitica pertanto occorre utilizzare un metodo numerico per ottenere una soluzione completa del modello.

Sarà utilizzato il modello FiVFlood (Finite Volume model of Floods) (*Leopardi et Al., 2001*), un modello numerico bidimensionale per la simulazione del campo di moto, del trasporto e dell'evoluzione morfologica in corpi idrici a superficie libera.

L'integrazione numerica del modello matematico è realizzata mediante una tecnica ai volumi finiti (FVM) in cui gli schemi numerici utilizzati sono strutturati in modo tale da risolvere il sistema di equazioni per tempi crescenti cioè in avanti nel tempo. In particolare le derivate temporali vengono rappresentate per differenze finite, mentre per le derivate spaziali è possibile adottare il metodo dei volumi finiti.

Il programma, che utilizza il modello FiVFlood, si basa su una serie di dati in input, riportati nei file “Paramf” e “Params”.

In *Paramf* è stato modificato il dato T_{max} che rappresenta la durata del fenomeno da simulare, idealmente coincidente con quello osservato sperimentalmente. Si sottolinea, in proposito, che è stato inserito come T_{max} una durata leggermente superiore a quella stimata dal punto di vista sperimentale. Si evidenzia, qui di seguito, T_{max} nella parte interessata di *Paramf*:

```
integer bnd1,bnd2,bnd3,bnd4
real ku
hp(XXX)=(XXX+... (XXX))/2.0
parameter(g=9.81,m=1,n=600,l=1,Tmaxp=2.0,Pi=355./113.,soglia=0.0)

parameter(dt=1/2048.,DTS=1./32.,frifac=1.00,DTNOP=0.)
parameter(bnd1=2,bnd2=2,bnd3=2,bnd4=2,beta=0.005,beta1=0.00,pippi=1.5)
parameter(rkk2=1.2,rkk4=0.7)
parameter(h0=0.30,UC=0.0,LL=0.0)
parameter(h01=0.40,h02=0.01,h03=0.40,h04=0.01)
parameter(SSX=0.0,SSY=0.0,Q0=+0.05680*0,Q1=Q0,cp=1.0)
```

In *Params*, invece, sono stati cambiati i soli parametri riguardanti le proprietà della sabbia, il coefficiente di Bagnold c_5 , che rappresenta gli sforzi di attrito collisionali proporzionali al quadrato della velocità della particella, e, infine, il delta δ d’inizio corrispondente all’altezza iniziale della sabbia. Si ritrovano, in particolare, in *Params* le seguenti proprietà della sabbia:

- il diametro medio d_{50} delle particelle pari a 0.2 mm;
- la densità del mezzo granulare pari a 2633 kg/m³;
- la porosità n variabile tra le diverse prove:

| h | n |
|----|------|
| 30 | 0.44 |
| 40 | 0.41 |
| 50 | 0.43 |
| 60 | 0.43 |

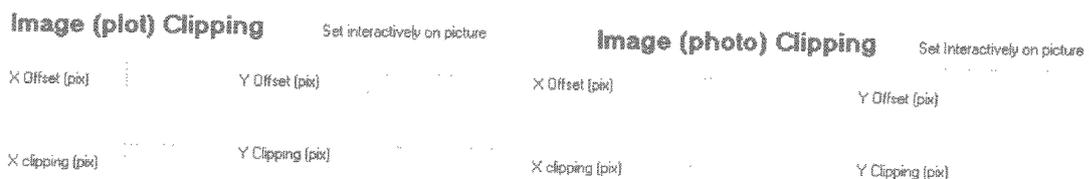
Si considera, quindi, per ciascun caso analizzato, l’effettiva porosità n . Tale porosità si ipotizza costante nello sviluppo dell’intero fenomeno; a rigore questa subisce un leggero aumento, pertanto trascurabile, per effetto del comportamento dilatante che la sabbia mostra in seguito all’apertura della paratoia.

- l'angolo d'attrito della sabbia; per questo sono stati scelti due valori 29° e 40°. Le motivazioni di questa scelta, che a primo impatto potrebbe essere avventata e fisicamente non giustificabile, saranno spiegate nel dettaglio successivamente. Si sottolineano, nel seguente scorcio di *Params*, i parametri che sono stati modificati per le diverse prove:

```
parameter(diameter=0.2E-3,rhos=2633.,rho=1000.,phi=56./180.*Pi,phi1=2./3.*phi)
parameter(lambda=0.44,Delay=0.000,omega=0.00,thetas=0.50,epsil=1.0*diameter)
parameter(Cs=(1.-lambda),deltainizio=0.30)
parameter(c9=8.)
parameter(c7=0.047,eta0=1.00,c5=0.0,cd=0.110)
parameter(Qs1=1.5*0.8012645312e-4*0.,ds1=0.0)
parameter(shields=.true.,vanrjin=.not.shields)
parameter(garcia=.true.,Armanini=.not.garcia)
```

L'implementazione numerica si articola in due fasi:

1. La prima fase consiste in un'operazione molto delicata e preliminare alla costruzione dei profili numerici nei diversi istanti temporali considerati: occorre trovare otto numeri, cosiddetti "magici" per la loro strategica importanza, che consentono di sovrapporre, quanto più precisamente possibile, la soluzione numerica a quella sperimentale, documentata dalle fotografie all'istante iniziale. Ciò comporta che i due profili, sperimentale e numerico, risultino nella stessa scala. Tali numeri sono riportati in questo particolare:



Cambiando gli otto numeri, appena definiti, si deformano e traslano opportunamente il profilo numerico e la foto sperimentale in modo tale da raggiungere l'obiettivo suddetto. Questa tecnica, che è stata adottata per la presentazione dei risultati in questo lavoro, consente di evitare la tediosa digitalizzazione delle immagini sperimentali, e di presentare il confronto tra esperimento e simulazione in maniera particolarmente efficace ed espressiva.

2. Nella seconda fase dell'analisi numerica, vengono tarati due specifici dati in input sull'istante finale delle prove sperimentali. Questi dati vengono considerati i soli variabili e sono l'angolo d'attrito ϕ e il coefficiente di

Bagnold c_5 . Il primo influenza molto fortemente la pendenza del profilo numerico all'istante finale e il secondo maggiormente la posizione del fronte d'avanzamento numerico. Questa operazione di calibrazione è stata effettuata sulla sola prova relativa all'altezza iniziale di 30 cm, assunta come riferimento. Le migliori combinazioni di parametri, trovate per la suddetta prova di riferimento, vengono utilizzate per tutte le altre; tale scelta si giustifica col fatto che, trattandosi della stessa sabbia, con le stesse caratteristiche medie in termini di ϕ e di porosità confrontabili, ci si aspetta che i parametri debbano essere uguali o comunque subire al più leggere variazioni nei diversi casi qui affrontati.

Esistono tante combinazioni di ϕ e c_5 , non analizzate in questa sede, che forniscono un'ottima sovrapposizione tra il profilo numerico e quello sperimentale all'istante finale. In questa tesi sono state trovate per la prova di 30 cm le combinazioni migliori per due valori completamente diversi di ϕ , come già accennato precedentemente:

$$\phi = 29^\circ \text{ e } \phi = 40^\circ$$

Il primo valore 29° è compatibile con quello medio dell'attrito statico di 30° del mezzo granulare, determinato dalle analisi geotecniche di laboratorio; il secondo 40° è un'angolo d'attrito dinamico e, anche se molto diverso e molto più grande dell'attrito statico medio, è giustificabile fisicamente con il comportamento dilatante della sabbia che rende le accelerazioni verticali differenti da quella gravitazionale.

I coefficienti c_5 di Bagnold, che definiscono le combinazioni migliori per la prova di 30 cm insieme ai suddetti angoli d'attrito, sono:

$$c_5 = 0.07 \text{ per } \phi = 40^\circ \text{ e } c_5 = 0.7 \text{ per } \phi = 29^\circ$$

Si riportano le soluzioni numeriche migliori, relative alla combinazione $c_5 = 0.07$ per $\phi = 40^\circ$, per le prove con altezza iniziale di 30 cm e 40 cm:

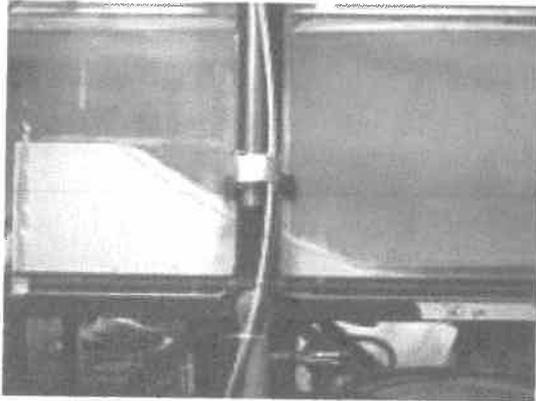


Figura 1 – 30 cm: $\phi = 40^\circ$ $c_s = 0.07$; $t = 1.7$ s

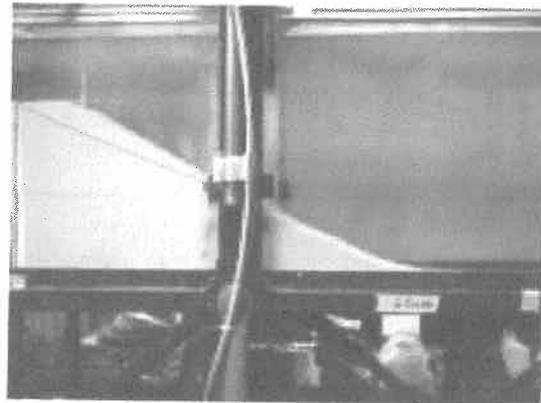


Figura 2 – 40cm: $\phi = 40^\circ$ $c_s = 0.07$; $t = 2.07$ s

Si osserva che:

- dal punto di vista quantitativo, la prima combinazione interpreta bene la forma dei profili sperimentali delle prove relative ad un'altezza iniziale di sabbia di 30 cm e 40 cm in termini di abbassamento medio, di posizione della discontinuità e del fronte d'avanzamento e del punto pivot dei profili in corrispondenza della paratoia. Pertanto sembra ragionevole che l'angolo d'attrito, rappresentativo del fenomeno studiato, sia quello dinamico di 40° e non quello statico per cui pare di poter affermare che gioca un importantissimo ruolo il comportamento dilatante della sabbia durante il fenomeno, studiato nell'ambito di questa tesi. Per entrambe le combinazioni il programma restituisce un tempo di arresto del fenomeno paragonabile con il tempo di arresto sperimentale del fronte d'avanzamento della sabbia. Ciò ha fatto pensare che il programma non tiene conto dei movimenti secondari, visti sperimentalmente e protagonisti del fenomeno dopo che il fronte d'avanzamento si è fermato. Il programma non riproduce affatto bene i primissimi istanti dall'apertura della paratoia perché considera la rimozione istantanea della paratoia, cosa che non corrisponde alla realtà. Infatti tali profili non coincidono in un intervallo temporale identico a quello di apertura della paratoia stessa. Si mostrano, a titolo di esempio, le simulazioni numeriche migliori, relative alla prova 30 cm, per la combinazione $\phi = 40^\circ - c_s = 0.07$; si considera, in merito, un intervallo temporale compreso tra l'istante immediatamente successivo a quello iniziale e quello immediatamente successivo al tempo di apertura della paratoia:

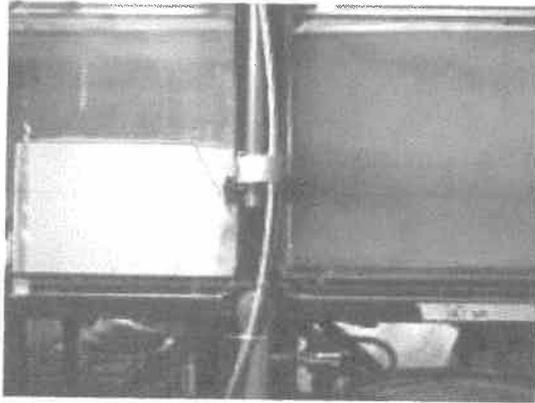


Figura 3 – Sovrapposizione del profilo numerico e sperimentale a $t = 0.067$ s

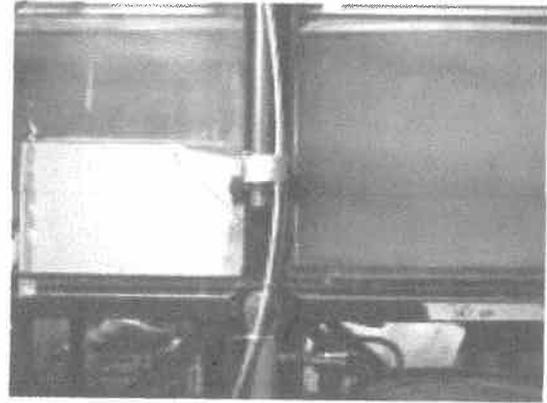


Figura 4– Sovrapposizione del profilo numerico e sperimentale a $t = 0.133$ s

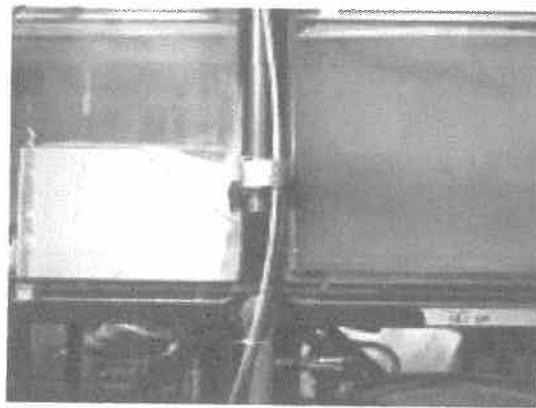


Figura 5 – Sovrapposizione del profilo numerico e sperimentale a $t = 0.200$ s

- dal punto di vista qualitativo, il programma riproduce dei principali movimenti osservati sperimentalmente, quali il macroscopico movimento di massa e i movimenti secondari, solo il primo. Ciò è stato già desunto dal confronto del tempo di arresto numerico con quello del fronte di avanzamento sperimentale. Sono state scelte, a testimonianza di quanto descritto, alcune simulazioni numeriche più significative. Esse si riferiscono agli istanti sperimentali successivi all'arresto del fronte della prova di 40 cm per la combinazione $\phi = 40^\circ - c_5 = 0.07$:

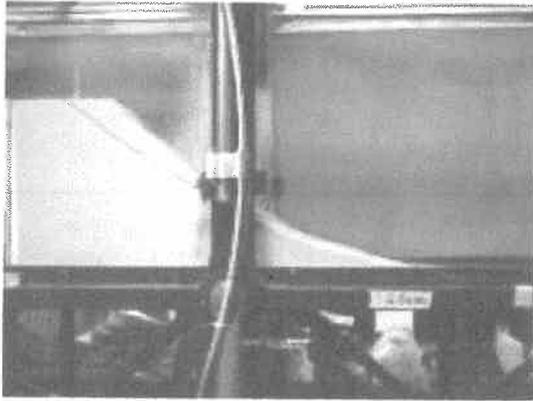


Figura 6 – Sovrapposizione del profilo numerico e sperimentale a $t = 0.5$ s

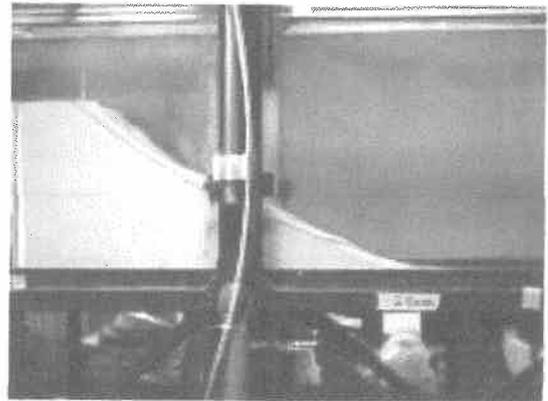


Figura 7 – Sovrapposizione del profilo numerico e sperimentale a $t = 1$ s

Una spiegazione di questo può derivare dalla assunzione, nel modello, di un comportamento della sabbia di moto di insieme, lungo la verticale, che invece non corrisponde più al vero quando la regione inferiore della sabbia, più prossima al fondo, si arresta, mentre la parte superiore continua uno scorrimento su quella sottostante.

La soluzione numerica, inoltre, prevede una propagazione a fronte ripido, conseguente alla rimozione istantanea della paratoia, che risulta più accentuata per le combinazioni che prevedono resistenze al moto maggiori e, quindi, un valore di c_5 più alto pari a 0.7. Il profilo numerico all'istante finale si presenta, indipendentemente dall'altezza iniziale di sabbia, rettilineo per un angolo d'attrito pari a 29° , con una pendenza minore dell'angolo d'attrito stesso, come è stato riscontrato dall'elaborazioni sperimentali. Tale profilo riproduce solo la forma rettilinea del profilo sperimentale all'istante finale ma presenta una pendenza minore sull'orizzontale. Per un angolo d'attrito pari a 40° , invece, si mostra leggermente concavo verso l'alto.

Dal lavoro svolto in questa tesi, si apre quindi la strada, per quanto riguarda la parte numerica, ad un ulteriore lavoro di ricerca che può presumibilmente condurre ad una modifica del modello che possa dar conto, trasformando parte della sabbia in fondo immobile durante il moto, dei fenomeni secondari osservati sperimentalmente.