

**Un'analisi dei meccanismi evolutivi di alcune particolari colate**

N. J. HUTCHINSON - *A sliding-consolidation model for flow slides*. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 23, n. 2, may 1986, pp. 115-126.

**Premessa**

In una memoria pubblicata su Geotechnique HUTCHINSON e BANDHARI (1971) formulavano l'ipotesi che alcuni tipi di movimenti di massa nei pendii naturali possono essere interpretati come fenomeni di rottura di tipo non drenato, causati dai meccanismi di alimentazione delle frane. Gli Autori riferivano il proprio studio ad una serie di fenomeni, tutti individuati col termine generale di colate di fango: dai movimenti relativamente lenti di detriti argillosi più o meno rammolliti lungo superfici di taglio ben individuate, ai rapidi movimenti di materiale vulcanico con velocità fino a 1000 m/min.

Nella memoria che qui si recensisce Hutchinson analizza la rottura per collasso strutturale e la successiva evoluzione in colata (flow slide) di un pendio costituito da materiale metastabile incoerente. Sulle caratteristiche microstrutturali e sui meccanismi di collasso di questi terreni l'Autore non si sofferma: si può comunque tentare di definirli come materiali dotati di una microstruttura a cui compete una quantità di energia superiore a quella dello stato più stabile; il passaggio dallo stato metastabile a quello stabile (collasso) non è spontaneo, ma deve essere at-

tivato da un rifornimento di energia (azioni sismiche, battitura di pali). Il cedimento dei legami microstrutturali comporta il trasferimento di parte delle tensioni preesistenti sull'acqua di porosità (caricamento in condizioni non drenate): si generano pressioni neutre molto alte, prossime a quelle totali (liquefazione) e si innescano frane estremamente rapide, anche su pendii piuttosto dolci, a causa della conseguente diminuzione di resistenza a taglio sulla superficie di scorrimento.

L'aspetto più significativo della pubblicazione è rappresentato dal tentativo di interpretare l'evoluzione della frana ed il suo arresto con l'effetto della consolidazione successiva al primo incremento di pressioni neutre. In questo senso ci sembra che l'articolo, sia pure limitato al caso particolare di terreno metastabile incoerente, possa offrire lo spunto per ulteriori ricerche sull'influenza del regime transitorio delle pressioni neutre sui meccanismi delle colate.

**Il modello**

Hutchinson analizza il movimento del generico concio della colata, applicando ad esso le equazioni del moto rigido: prescinde pertanto da ogni possibile movimento viscoso che si può sviluppare all'interno della frana. Il modello consente di prevedere la velocità e la lunghezza della colata, una volta note la geometria e le proprietà meccaniche del materiale in frana. Lo schema di riferimento è riportato in figura 1.

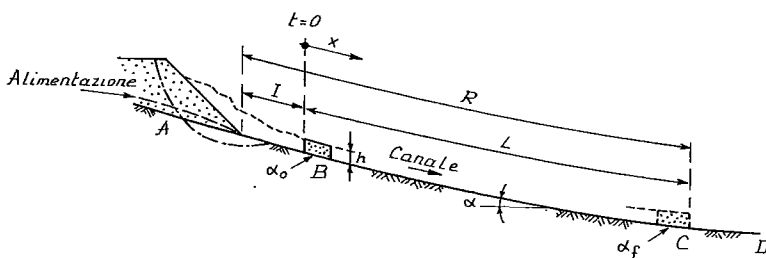


Fig. 1. - Profilo del pendio.

Per la formulazione del modello l'Autore introduce alcune ipotesi:

— la zona di alimentazione rappresentata in figura è interessata da una rottura; il materiale franato cola con uno spessore costante  $h$ ;

— il pendio BD costituisce una superficie di scorrimento indeformabile con inclinazione sull'orizzontale variabile lungo la direzione  $x$  e pari a  $\alpha_0$  nel punto B;

— l'elemento della colata, inteso come generico concio rigido (fig. 2) è dotato di una velocità iniziale  $v_0$ , dovuta al precedente scorrimento nel tratto AB;

— il materiale di colata è privo di coesione;

— uno strato del concio, di spessore  $sh$ , in prossimità della superficie di scorrimento, è saturo o prossimo alla saturazione: in questo strato le pressioni neutre generate a seguito della rottura sono variabili nell'intervallo di estremi  $u_{t0}$ ,  $u_{b0}$ , come mostrato in figura 2.

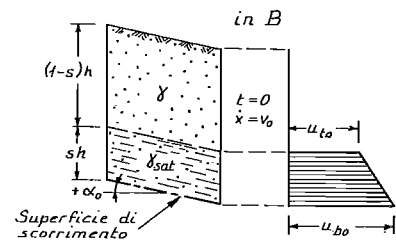


Fig. 2. - Distribuzione iniziale delle pressioni neutre.

Tali pressioni sono incognite; sono però calcolabili i massimi valori che esse possono attingere in corrispondenza del completo annullamento delle pressioni effettive nello strato saturo:

$$(u_{b0})_{\max} = [(1-s) \cdot \gamma + \gamma_{\text{sat}}] \cdot h \cdot \cos^2 \alpha_0 \quad (1)$$

$$(u_{t0})_{\max} = (1-s) \cdot \gamma \cdot h \cdot \cos^2 \alpha_0 \quad (2)$$

Il reale valore che  $u_b$  assume è espresso attraverso il termine  $r_0$ , come aliquota della massima pressione neutra raggiungibile sulla base dell'elemento:  $r = u_b / (u_b)_\text{max}$ .

In figura 3 sono mostrate le forze

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = m \cdot g \cdot \text{sen} \alpha - (m \cdot g \cdot \text{cos} \alpha - u_b \cdot b \cdot \text{sec} \alpha) \cdot \text{tg} \phi' \quad (3)$$

in cui i simboli usati hanno il seguente significato:

- $b$  dimensione del concio lungo l'orizzontale;
- $m$  massa del concio;
- $x$  direzione parallela alla superficie di scorrimento;
- $\phi'$  angolo di attrito del materiale;
- $u_b$  pressione neutra alla base del concio, al generico tempo  $t$ .

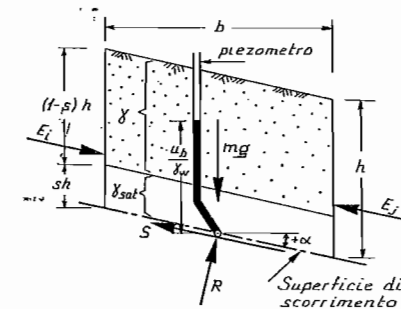


Fig. 3. - Schema delle forze agenti sul generico concio della colata.

Poiché

$$m \cdot g = b \cdot h \cdot [(1 - s) \cdot \gamma + s \cdot \gamma_{\text{sat}}] \quad (4)$$

dalle (3) e (4) si ottiene l'espressione dell'accelerazione riferita al generico concio:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = g \cdot \left( \text{sen} \alpha - \left( \text{cos} \alpha - \frac{u_b}{h \cdot \text{cos} \alpha [(1 - s) \cdot \gamma + s \cdot \gamma_{\text{sat}}]} \right) \cdot \text{tg} \phi' \right) \quad (5)$$

Se al tempo  $t = 0$   $x = 0$  e  $dx/dt = v_0$  le equazioni del moto accelerato assumono la seguente forma:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \cdot t + v_0 \quad (6)$$

$$x = \frac{d^2x}{dt^2} \cdot \frac{t^2}{2} + v_0 t \quad (7)$$

Tali equazioni unite alle condizioni iniziali sono sufficienti a descrivere il moto della colata, a fornire gli spostamenti e le velocità in ogni istante di tempo, conoscendo i valori numerici dei parametri che compaiono nelle (5), (6) e (7).

Fin qui l'Autore si è limitato ad una applicazione del secondo principio della dinamica; l'aspetto interessante ed originale del modello proposto sta nell'aver ben evidenziato che la durata del fenomeno franoso e quindi lo spazio percorso dipendono fra l'altro dal fenomeno di consolidazione che interessa il materiale franato, dopo la rottura.

Se all'istante iniziale il coefficiente di

che agiscono sul generico concio della colata. Nell'ipotesi che le forze  $E_i$  ed  $E_j$  siano uguali, opposte ed abbiano la stessa retta d'azione, viene applicato al concio il secondo principio della dinamica:

Quando  $u_b$  attinge un valore sufficientemente piccolo, l'accelerazione diventa negativa (espressione 5) e la velocità del moto, dopo aver raggiunto un massimo, comincia a diminuire fino ad annullarsi al tempo  $t_r$ . I valori di  $t_r$ , vale a dire la durata della colata, e di  $x_r$  cioè il percorso compiuto dal concio, possono essere valutati con le equazioni descritte.

#### Comparazione del modello con alcuni risultati di campo

Il modello è stato applicato alla frana di Aberfan, che si mobilitò nel 1966 all'interno di una grossa discarica mineraria del Galles del Sud e fu studiata nel dettaglio da Bishop, Hutchinson, Penman ed Evans e quindi da Williams per conto del tribunale di Aberfan. La colata si divise in due lingue: quella a Nord, che si fermò a ridosso di un rilevato; l'altra più a Sud che invece lo scavalcò ed invase il villaggio provocando 144 morti. Il percorso della colata meridionale dall'origine del canale di flusso fino al rilevato fu di 430 metri. Superato il rilevato, la frana proseguì fino a raggiungere la lunghezza di 600 metri; se non avesse trovato ostacoli si sarebbe sviluppata, secondo l'Autore, per ben 750 metri.

Hutchinson interpreta tale fenomeno con le equazioni precedentemente ritrovate, poste in diagramma per diversi valori dei parametri che influenzano il problema. Negli stessi abachi sono riportati i parametri del terreno ricavati dalle indagini di laboratorio ed in sito:  $\gamma = 17,3$  kN/mc per lo strato superiore e  $18,6$  kN/mc per quello inferiore saturo,  $\phi' = 36^\circ$ ,  $c_v = 1.000 \div 10.000$  mcq/anno (vale a dire  $0,3 \div 3$  cmq/sec, valore tipico delle sabbie).

Per poter eseguire la back analysis l'Autore fissa i valori di  $v$  ed  $s$  rispettivamente in  $9,5$  m/s e  $0,1$ .

Il risultato è che il modello è in buon accordo con i dati fisici misurati; si può però obiettare che sono comunque possibili piccole modifiche dei parametri in gioco (in particolare  $s$ ,  $v_0$  e  $v$ ) per ottenere lo stesso risultato.

In figura 4 sono rappresentate le combinazioni di valori che l'angolo di attrito del terreno  $\phi'$ , il coefficiente di consolidazione  $c_v$  ed il rapporto  $r_0$  assumono, determinando sempre uno sviluppo del canale di flusso di 750 m (linea intera) o di 600 m (linea a tratti). In figura 5 è mostrata una correlazione analoga fra la velocità media dei primi 430 metri del canale, il coefficiente  $c_v$  ed il rapporto  $r_0$ . Tutti i punti che giacciono sulle curve in figura si associano ad una lunghezza del canale di 750 m. Adottando i dati disponibili (lunghezza del canale, velo-

sicurezza alla traslazione nella direzione del pendio è minore dell'unità per effetto delle sovrappressioni neutre indotte dal collasso strutturale del materiale, il generico concio della colata inizia a muoversi con velocità crescente nel tempo.

$$F = \frac{m \cdot g \cdot \text{cos} \alpha - u_b(t) \cdot b \cdot \text{sec} \alpha}{m \cdot g \cdot \text{sen} \alpha} \cdot \text{tg} \phi'$$

Applicando la teoria della consolidazione unidimensionale del Terzaghi, si può valutare il tempo necessario perché sulla superficie di scorrimento la pressione neutra si porti dal valore iniziale  $u_b$  al valore  $u_b$ , relativo al generico tempo:

$$t = \frac{T \cdot d^2}{c_v}$$

— con  $T$  fattore di tempo;

—  $d$  percorso della particella fluida per raggiungere le superfici a pressione relativa nulla;

—  $c_v$  coefficiente di consolidazione del materiale di frana.

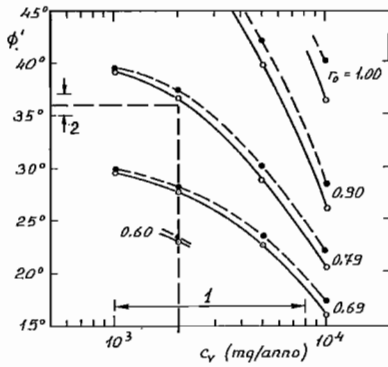
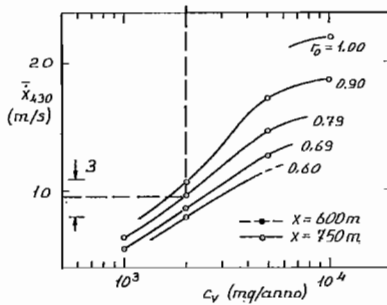


Fig. 4. - Curve a cui corrisponde uno sviluppo del canale di flusso di 750 m (600 m), al variare di  $\phi'$ ,  $c_v$  ed  $r_0$ .

cià media, angolo di attrito) gli abachi sono stati utilizzati in modo da ricavare quell'unico valore del coefficiente di consolidazione che soddisfa entrambe le correlazioni per lo stesso  $r_0$  (vedi costruzione riportata in figura).

Nel caso in esame sono stati ottenuti i seguenti valori  $r_0=0.78$ ,  $c_v=2000$  mq/anno.



1 valori di  $c_v$  di laboratorio  
2 " "  $\phi'$  " " " "  
3 valori stimati di  $\bar{x}_{430}$

Fig. 5. - Curve a cui corrisponde uno sviluppo del canale di flusso di 750 m (600 m) al variare di  $\bar{x}_{430}$ ,  $r_0$  e  $c_v$ .

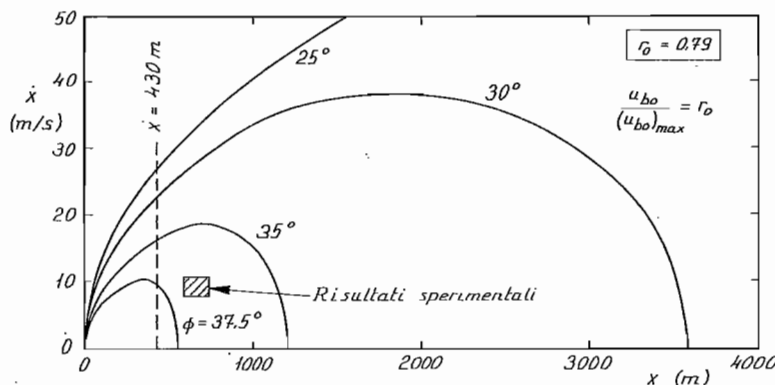


Fig. 6. - Curve della velocità del concio in funzione del suo spostamento, al variare di  $\phi'$ , per un prefissato rapporto  $r_0 = u_{bo}/(u_{bo})_{max}$ .

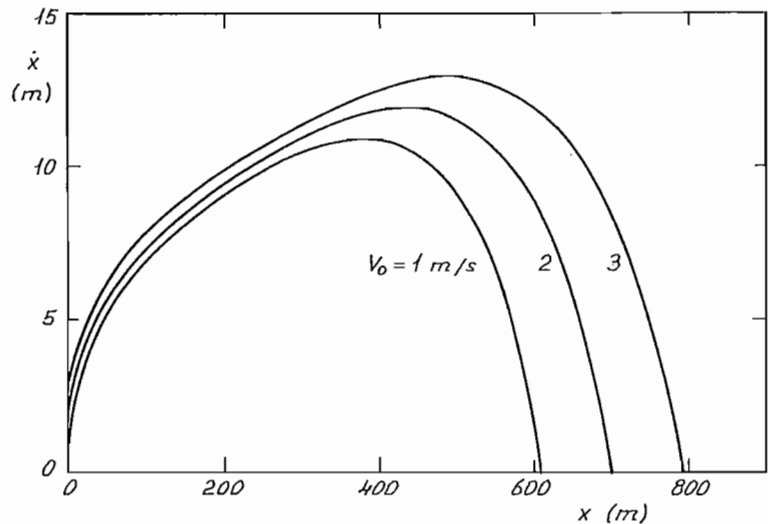


Fig. 7. - Effetto della velocità iniziale  $v_0$  sulla massima velocità raggiungibile dal concio e sul suo spostamento.

### Ulteriori considerazioni

L'analisi del modello proposto, di indubbio valore concettuale, mostra la complessa interazione fra i fattori che regolano l'evoluzione della colata studiata. La figura 5 mostra che a parità di spazio percorso e di sovrappressioni neutre iniziali, il fenomeno è tanto più rapido quanto maggiore è il coefficiente di consolidazione del terreno; pertanto la durata del fenomeno è tanto minore quanto più i terreni sono permeabili e rigidi.

Dalla figura 6, in cui è riportata la velocità del generico concio in funzione dello spazio percorso, si evince che, a parità di sovrappressioni neutre iniziali, l'angolo di attrito ha una grossa influenza sulla velocità massima della frana e sulla lunghezza del canale di flusso, individuata dall'intersezione di ciascuna curva con l'asse delle ascisse.

Nella figura il quadratino campito indica i valori dei parametri in gioco, nel caso della frana di Aberfan: si ve-

de come siano in buon accordo con le previsioni del modello.

Si nota inoltre che la velocità del movimento franoso è crescente fin quando l'effetto della forza d'inerzia prevale su quello della consolidazione; quando le pressioni neutre sulla superficie di scorrimento diventano molto piccole, ovvero la consolidazione prevale sulla forza d'inerzia, la velocità diventa decrescente. Nella seguente tabella sono indicati i valori che  $c_v$  ed  $r_0$  devono assumere perché il modello continui a fornire la stessa lunghezza del canale di flusso e la stessa velocità media, al variare di  $\phi'$ :

$\phi' = 36^\circ$	$c_v = 2000$ mq/anno	$r_0 = 0,78$
$\phi' = 30^\circ$	$c_v = 2250$ mq/anno	$r_0 = 0,73$
$\phi' = 25^\circ$	$c_v = 2700$ mq/anno	$r_0 = 0,66$

Un'influenza assai più marcata è esercitata invece dallo spessore del materiale saturo alla base della colata; per  $s = 0.2$  (invece che 0.1)  $c_v$  deve raggiungere il valore di 800 mq/anno, per  $s = 0.3$   $c_v = 18.000$  mq/anno, perché le previsioni del modello siano in accordo con i dati reali.

La fig. 7 infine evidenzia l'influenza della velocità iniziale  $v_0$  sulla velocità massima raggiunta dalla colata e sulla lunghezza del canale di flusso. La variazione di  $v_0$  da 1 a 2 m/s è quasi equivalente ad una riduzione del coefficiente di consolidazione del 10%.

### Conclusioni

L'interesse della memoria presentata da N. J. Hutchinson, senza dubbio uno dei più autorevoli studiosi di frane del mondo, è nell'aver sottolineato la possibilità di analizzare su basi meccanistiche l'evoluzione di un fenomeno franoso ed in questo senso ci sembra che il lavoro vada, oltre la semplice

possibilità di studiare teoricamente il movimento delle colate in materiali metastabili (flow slide).

Il modello è estremamente semplice ed utilizza i concetti della meccanica elementare. Purtroppo alcuni dei parametri in gioco sfuggono ad un controllo e ad una valutazione ben approssi-

mata ( $c$ ,  $s$ ,  $v_0$ ); resta però il contributo derivante dalla possibilità di analizzare l'influenza dei principali fattori geometrici e meccanici sull'evoluzione delle colate in materiali incoerenti e di comprendere su basi razionali il fenomeno.

(Gianfranco Urciuoli)

#### BIBLIOGRAFIA

HUTCHINSON J.N., BHANDARI R.K. (1971) - *Undrained loading, a fundamental mechanism of mudflow and other mass movements*. Geotechnique, 21 (4), pp. 353-358.