

Intensità di pioggia critica e tirante idrico

L'altezza della lama d'acqua (tirante idrico) che si forma a seguito del deflusso può essere stimata dalla seguente relazione, dovuta a Ikeya (1989):

$$h_0 = \left(\frac{f}{8g \sin(\theta)} \right)^{1/3} \left(\frac{Q_0}{B} \right)^{2/3}$$

Dove, oltre ai termini noti

g = accelerazione di gravità [m/s^2]

f = coefficiente di Darcy – Weisbach [-]

θ = pendenza della zona di alimentazione [$^\circ$].

Combinando l'espressione precedente con l'equazione esprimente lo stato di equilibrio fra la resistenza al taglio e la forza di taglio in un materiale granulare, e trascurando la velocità del flusso, data da (Takahashi, 1977):

$$C^*(\sigma - \rho) + \rho \left(1 + \frac{h_0}{d_{50}} \right) = C^*(\sigma - \rho) \frac{\tan(\phi)}{\tan(\theta)}$$

in cui

σ = peso specifico dei grani [g/cm^3]

ρ = peso specifico dell'acqua [g/cm^3]

ϕ = angolo di attrito dei grani [$^\circ$]

C^* = concentrazione volumetrica massima dei grani [-]

d_{50} = diametro caratteristico dei grani [m]

è possibile calcolare l'intensità di pioggia che soddisfa i requisiti per lo sviluppo del debris flow:

$$I_{pc} = \frac{3,6}{S} \left(\frac{8g \cdot \sin(\theta)}{f} \right)^{1/2} \left\{ C^* \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \left(\frac{\tan(\phi)}{\tan(\theta)} - 1 \right) - 1 \right\}^{3/2} d_{50}^{3/2} B$$

I risultati della formula indicata vanno logicamente considerati come indicativi, benché diano un grado di precisione realistico.

Per esempio, Villi e Dal Prà (2001), relativamente all'episodio verificatosi il 14 agosto 1998 in Alto Adige tra Fortezza e Mules e che ha causato la chiusura temporanea dell'autostrada del Brennero e della ferrovia Bolzano-confine, hanno valutato un'intensità di pioggia critica pari a 24 mm/h.

La pioggia caduta e registrata alla vicina stazione pluviometrica di Fortezza è stata pari a 21 mm/h con un massimo di 44 mm in tre ore.

Noto il tirante idrico h_0 che si sviluppa con l'evento meteorico, è possibile stimare il volume di debris mobilizzabile con l'evento mediante il calcolo dello spessore dello strato potenzialmente erodibile con la seguente formula:

$$a_L = \frac{h_0}{\left[C^* \Delta \left(\frac{\tan(\phi)}{\tan(\theta)} - 1 \right) - 1 \right]}$$

dove

a_L = spessore dello strato erodibile della corrente [m]

h_0 = tirante idrico [m]

$$\Delta = \frac{\sigma - \rho}{\rho}$$

Si noti che, affinché l'equazione sia attendibile, il valore di θ deve essere uguale o inferiore a 16° , come dimostrato da Bertolo et al. (2003).

Il valore del tirante idrico critico, inteso come la profondità minima del flusso capace di innescare il trasporto solido, si può scrivere, in accordo con Takahashi (1991):

$$h_{cr} = d_{50} \left[C^* \Delta \left(\frac{\tan(\phi)}{\tan(\theta)} - 1 \right) - 1 \right]$$

Worman (1993) e Chiew & Parker (1994) hanno proposto espressioni diverse per h_{cr} ; Worman propone l'utilizzo della formula:

$$h_{cr} = \frac{d_{50}}{\sin(\theta)} \left[\left(\frac{\sigma}{\rho} - BF \right) C^* (\tan(\phi) \cos(\theta) - \sin(\theta)) - h_{sg} (1 - C^*) \sin(\theta) \right]$$

In cui BF esprime un fattore di galleggiamento, dato dalla:

$$BF = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta) - \frac{\sin(\theta)}{\tan(\phi)}}$$

e h_{sg} indica la percentuale dello strato superficiale granulare soggetto alle forze di flusso, il cui valore consigliato è 0,6.

Chiew & Parker propongono invece la seguente formula:

$$h_{cr} = 0,06 d_{50} \Delta \cdot C^* \frac{1}{\tan(\theta)} \left(1 - \frac{\tan(\theta)}{\tan(\phi)} \right)$$

Spesso le colate di detrito si possono sviluppare in sezioni ristrette di torrenti, nelle quali, a seguito del trasporto di tronchi e arbusti e al loro incastrò trasversale, si può formare una occlusione, a monte della quale si forma un accumulo di acqua e detrito.

Sotto l'azione della spinta esercitata da monte, la diga naturale così formatasi può crollare improvvisamente, dando luogo alla formazione di un fronte di colata che si muove velocemente verso valle.

La portata del flusso che si genera, ipotizzando viscosità nulla e assumendo che la componente longitudinale della forza peso e la resistenza al moto si bilancino tra loro, può essere calcolata con la formula, conservativa, nota come *dam break*:

$$Q_0 = \frac{8}{27} B H^{3/2} g^{0,5}$$

con

Q_0 = portata liquida attesa a seguito dell'evento di piovosità [m^3/s]

B = larghezza della diga naturale [m]

H = altezza della diga naturale [m].

Si pone l'accento sul fatto che la formula del *dam break* prevede la mobilitazione istantanea di tutto il detrito accumulato portando quindi a valori di velocità e di portata nel canale di flusso molto elevati.

Condizioni fisiche

Le condizioni di equilibrio di un ammasso di materiale granulare sono garantite dal rapporto tra componente normale e componente tangenziale delle forze in stabilizzanti, che deve essere inferiore alla tangente dell'angolo di attrito del materiale stesso.

Nella sua forma completa, tale rapporto è esprimibile dalla formula:

$$\frac{gh_0 \rho \sin(\theta) + C^* a_L g \sigma \sin(\theta) + (1 - C^*) a_L g \rho \sin(\theta)}{C^* a_L g \sigma \cos(\theta) - C^* a_L g \rho \cos(\theta)} \leq \tan(\phi)$$

Dopo alcuni passaggi, e assumendo che lo spessore a_L sia proporzionale al diametro dei grani d_{50} , secondo la $a_L = n d_{50}$, con n superiore a 1, si giunge all'espressione finale:

$$\tan(\theta) \leq \frac{C^* (\sigma - \rho) \tan(\phi)}{C^* (\sigma - \rho) + \rho \left(1 + \frac{h_0}{a_L} \right)}$$

Imponendo $h=0$, si avrà il limite superiore θ_s teorico per l'innesco di una colata detritica anche in assenza di flusso idrico superficiale:

$$\tan(\theta_s) = \frac{C^* (\sigma - \rho) \tan(\phi)}{C^* (\sigma - \rho) + \rho}$$

Takahashi ha inoltre postulato che il limite inferiore θ_i teorico per lo sviluppo di una colata propriamente detta è dato allorchè si verifica la condizione $a_L > 0,7h_0$, per cui:

$$\tan(\theta_i) = \frac{C^*(\sigma - \rho)\tan(\phi)}{C^*(\sigma - \rho) + \rho(2,43)}$$

Si può pertanto ritenere che una colata detritica vera e propria può innescarsi per pendenze comprese mediamente tra 14° e 23° (assumendo valori tipici di $C^*=0,7$, $\sigma=2,65 \text{ g/cm}^3$, $\rho=1,0 \text{ g/cm}^3$, $\phi=38^\circ$). Per valori superiori a 23° si può avere uno scivolamento del materiale in assenza di moto idrico superficiale o terreno stabile (per $\theta \leq \phi$) o una condizione di instabilità generale (per $\theta > \phi$).

Per valori inferiori a 14° si può avere o flusso immaturo di detriti o, se la condizione:

$$\frac{h_0}{d} \geq \frac{C^*(\sigma - \rho)(\tan(\phi) - \tan(\theta))}{\rho \tan(\theta)} - 1$$

non è soddisfatta, trasporto di fondo.

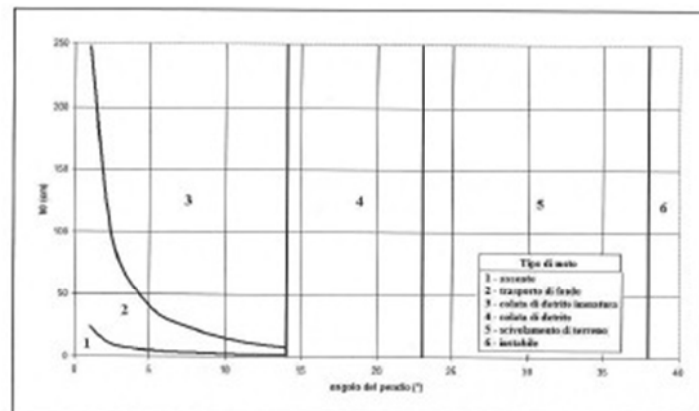
Logicamente, perché avvenga trasporto di fondo deve essere soddisfatta anche la condizione:

$$\rho h_0 \tan(\theta) \geq 0,05 \frac{(\sigma - \rho)}{\rho} d$$

che esprime il superamento della forza di trazione critica, cioè lo sforzo per il quale il tirante idrico è in grado di mobilitare un granulo di diametro d assegnato; il valore numerico di 0,05 esprime come prima approssimazione il coefficiente della relazione di Shields indipendentemente dal numero di Reynolds, a condizione che σ e ρ siano espressi in g/cm^3 .

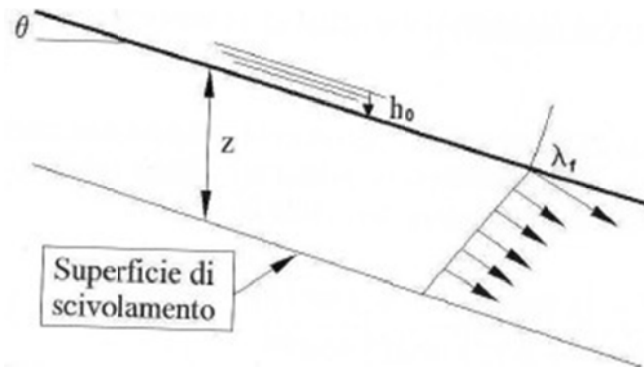
Nel caso quest'ultima condizione non sia soddisfatta, non si ha nessun tipo di moto. Le condizioni di equilibrio e il relativo tipo di movimentazione del terreno corrispondente è rappresentato graficamente nella figura seguente in funzione dell'inclinazione del pendio.

I parametri utilizzati sono h_0 e $\tan(\phi)$; il diametro dei grani caratteristico d è stato posto uguale a 5 cm.



Condizioni geotecniche

Il metodo più utilizzato per analizzare le condizioni di stabilità della potenziale zona d'iniziazione della colata, rappresentate da un valore del coefficiente di sicurezza esprimente il rapporto fra la resistenza al taglio disponibile e la forza di taglio mobilitata, è il cosiddetto metodo del pendio indefinito, schematizzato nella figura seguente.



Nella figura, secondo la soluzione proposta da Genevois et al. (1999), si è indicato:

θ = inclinazione del pendio, uguale per definizione all'inclinazione della superficie di scivolamento

z = spessore del corpo di frana

h_0 = altezza del flusso idrico al disopra del livello del terreno naturale

λ_f = angolo di direzione dei vettori del flusso con la normale al pendio.

Si possono prospettare due ipotesi.

LIVELLO D'ACQUA COINCIDENTE CON IL PENDIO O POSTO A QUOTA INFERIORE A QUESTI ($H_0=0$)

Supponendo il terreno completamente saturato, il coefficiente di sicurezza F_s è calcolato dalla formula:

$$F_s = \frac{c' + (z\gamma_s \cos^2(\theta) - u_p) \tan(\phi')}{z\gamma_s \sin(\theta) \cos(\theta)}$$

con

c' = coesione del terreno in termini di sforzi efficaci

ϕ' = angolo d'attrito del terreno in termini di sforzi efficaci

γ_s = peso di volume saturo del terreno

u_p = pressione nei pori, dalla

$$u_p = \gamma_w z \left(1 - \frac{\tan(\lambda_f + \theta - 90)}{\tan(90 - \theta) + \tan(\lambda_f + \theta - 90)} \right)$$

dove γ_w è il peso di volume dell'acqua.

PRESENZA DI UNA LAMA D'ACQUA IN CONDIZIONI DI FLUSSO AL DI SOPRA DEL TERRENO ($H_0 > 0$)

Partendo dal modello proposto da Takahashi, Genevois et al. Introducono quale elemento addizionale al calcolo della stabilità la direzione del vettore del flusso; il coefficiente di sicurezza è calcolato in questo caso dalla formula:

$$F_s = \frac{c' + (z\gamma_s \cos^2(\theta) - u_p) \tan(\phi')}{(z\gamma_s + h\gamma_w) \sin(\theta) \cos(\theta)}$$

Condizioni di equilibrio dell'alveo

A partire dagli anni '70, l'Università di Napoli (Pica, 1972) ha portato avanti una ricerca teorica-sperimentale al fine di mettere a punto un criterio per la determinazione della portata solida e delle condizioni necessarie e sufficienti per l'inizio del moto dei materiali costituenti l'alveo.

Sulla base di tali studi e ricerche si è pervenuti a formulare un parametro adimensionale τ^* rappresentante lo sforzo tangenziale sulla parete, a partire dalla funzione di Shields nel quale i parametri caratterizzanti la geometria delle sezioni sono espressi come funzione della portata per mezzo di equazioni proposte nell'ambito della teoria del regime permanente.

Tale parametro può essere espresso (Pica e Preti, 1999) come:

$$\tau^* = \frac{1}{\Delta} \frac{Q_0^{3/8} S^{13/16}}{g^{3/16} d_{50}^{15/16}}$$

dove d_{50} indica il diametro rappresentativo dei grani del materiale in alveo.

Elaborazioni dei dati sperimentali di Napoli e di altri autori hanno messo in evidenza che:

- Per valori di τ^* inferiori a 0,2 il trasporto solido è praticamente nullo con condizioni di moto incipiente;
- Per valori di τ^* compresi tra 0,2 e 0,5 il trasporto solido è selettivo nei confronti del materiale d'alveo con tendenza all'asportazione per effetto della corrente delle frazioni più fini;
- Per valori di τ^* superiori a 0,5 tutto il materiale costituente l'alveo è posto in movimento.