

3) Teoria e Normativa.

3.1 Stima della curva di possibilità climatica.

Partendo dai dati pluviometrici forniti da una stazione di misura, è possibile eseguire le elaborazioni necessarie per ottenere le curve che descrivono l'altezza delle precipitazioni (h) in funzione della loro durata (t). L'equazione che collega queste due variabili ha la seguente forma:

$$h \text{ (mm)} = a t^n;$$

dove a = variabile funzione del tempo di ritorno;
 n = costante per un dato valore di t ;

e prende il nome di *curva segnalatrice di possibilità climatica o pluviometrica*.

Tale equazione permette, per esempio, di calcolare l'altezza meteorica (h) relativa ad una precipitazione di 30 minuti (t), con un tempo di ritorno di 10 anni.

I dati pluviometrici necessari al calcolo sono reperibili sugli Annali Idrologici delle stazioni pluviografiche. Su tali documenti vengono generalmente fornite, in forma di tabella, le massime precipitazioni registrate anno per anno, per determinate durate di riferimento. Normalmente si distinguono i dati relativi alle precipitazioni con durata inferiore ad 1 ora (piogge di notevole intensità e breve durata), da quelle di durata superiore. Le durate di riferimento sono generalmente standard, prendendo in considerazione durate di 10, 15, 30, 45 minuti, nel caso di piogge brevi ed intense, e di 1, 3, 6, 12 e 24 ore nel caso di precipitazioni orarie.

N	t = 10 minuti	t = 15 minuti	t = 30 minuti	t = 45 minuti	anno
1	17.0	19.0	22.4	30.4	1985
2	10.6	14.2	21.0	29.6	1986
3	5.4	7.8	15.8	30.2	1987

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

4	9.2	10.4	23.0	35.8	1988
---	-----	------	------	------	------

Tabella 1 - precipitazioni di durata inferiore a 1 h.

N	t = 1 h	t = 3 h	t = 6 h	t = 12 h	t = 24 h	anno
1	10.0	20.0	22.0	33.4	43.4	1985
2	37.0	38.0	39.8	39.8	41.0	1986
3	28.0	31.2	31.2	43.8	61.2	1987
4	54.0	68.6	71.2	71.2	71.2	1988

Tabella 2 - precipitazioni di durata superiore a 1 h.

Una stima sufficientemente attendibile della curva segnalatrice di possibilità climatica richiede l'utilizzo di registrazioni che coprano almeno un intervallo di 30-35 anni. Minore l'intervallo di registrazione minore l'attendibilità dei risultati.

Volendo ricavare le curve relative a precipitazioni di durata superiore ad un'ora (Tabella 2), bisogna procedere come segue:

- per ogni durata di riferimento, si ordinano e si numerano i valori delle precipitazioni ricavati dagli Annali Idrologici, regolarizzati con il metodo di Gumbel (vedi di seguito), in senso decrescente, ponendo quindi i valori massimi registrati per ogni intervallo di tempo sulla prima riga della tabella, quelli minimi sull'ultima; di conseguenza, se per esempio l'intervallo di registrazione è di 30 anni, la prima riga sarà indicata con il numero 30, l'ultima con il numero 1.
- utilizzando i dati di ogni riga e impostando un calcolo di regressione, si ricavano i valori dei parametri a e n relativi ad ogni anno; il numero identificativo di ogni riga rappresenta il tempo di ritorno dell'evento meteorico; nel caso, per esempio, di un'intervallo di registrazione di 30 anni, si ricavano 30 curve segnalatrici di possibilità climatica (quindi 30 valori di a e di n); i parametri a e n relativi alla prima riga sono quelli riferiti ad eventi meteorici di durata inferiore ad 1 h con tempo di ritorno di 30 anni, quelli dell'ultima riga ad eventi meteorici con tempo di ritorno di 1 anno.

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

Lo stesso va adottato per durate pluviometriche inferiori ad 1 h (Tabella 1), quando questa è disponibile.

Ricavate le curve, si potrà notare che, mentre n rimane più o meno costante, il parametro a tende ad assumere valori differenti in funzione del tempo di ritorno, tendendo a crescere con esso.

Attraverso procedure statistiche è possibile ricavare stime del parametro a anche per tempi di ritorno superiori al numero massimo di registrazioni annuali disponibili.

Il metodo statistico utilizzato generalmente è quello di Gumbel. Di seguito viene esposta la procedura da seguire.

- Eseguito il calcolo delle curve segnalatrici di possibilità climatica per gli N anni di cui si dispongono le registrazioni pluviometriche, si ordinano i valori di a ricavati in ordine crescente, attribuendo il numero 1 al valore massimo, il valore N a quello minimo.
- Si calcolano gli N rapporti:

$$P_i = i / (N + 1);$$

con i compreso fra 1 e N . Questi rapporti indicano la probabilità che il corrispondente valore di a non venga raggiunto o superato. I valori di P_i ricavati permettono di definire la scala dei tempi di ritorno:

$$T_i = 1 / (1 - P_i).$$

- Si riportano le N coppie di valori (T_i, a_i) in un diagramma semilogaritmico (l'asse X - l'asse dei tempi di ritorno - va costruito in scala logaritmica), interpolando fra i punti una retta: il diagramma consente di ricavare il valore di a per qualsiasi tempo di ritorno.

Per ottenere, per esempio, l'altezza di precipitazione per un evento meteorico di durata corrispondente a 1,3 ore, con tempo di ritorno di 50 anni, si procede come segue:

dal diagramma Tempo di ritorno - Parametro a si ricava il valore di a corrispondente ad un tempo di ritorno di 50 anni;

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

1. si calcola il parametro n facendo la media dei valori di n ottenuti dalle curve segnalatrici di possibilità pluviometrica;
2. si introducono infine i valori di a e n nella relazione $h = a \times t^n$; ponendo $t = 1.3$ ore.

E' evidente che l'estrapolazione del parametro a non deve andare troppo oltre il periodo di registrazione.

3.2 Prove di permeabilità.

3.2.1 Introduzione

Nei materiali sciolti, permeabili per porosità, nei quali è verificata la legge di Darcy, la permeabilità si esprime attraverso il coefficiente di permeabilità k che ha le dimensioni di cm/s o m/s. Nelle rocce, permeabili per fessurazione, nelle quali non è valida la legge di Darcy, la permeabilità si indica attraverso il valore degli assorbimenti d'acqua misurati in fori di sonda, espressi in litri assorbiti per ogni metro di lunghezza di foro, e della pressione usata nella prova. Talvolta il coefficiente k è usato per definire la permeabilità degli ammassi rocciosi, ma assume in questo caso un significato orientativo.

Il coefficiente di permeabilità di un terreno viene sempre determinato con difficoltà e presenta spesso un notevole grado di incertezza; i valori sperimentali, salvo nei casi in cui il terreno è omogeneo ed isotropo, sono infatti affetti da errori che possono anche essere di un intero di grandezza.

La scelta del metodo di prova va effettuata in funzione del tipo di terreno e della precisione desiderata.

L'attendibilità delle prove, come suggerito dall'AGI nelle *"Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche"* (giugno 1977), può essere migliorata adottando i seguenti accorgimenti:

- conoscenza della distribuzione delle pressioni neutre nel terreno prima della prova;
- conoscenza esatta, per quanto possibile, del profilo stratigrafico;
- realizzazione con la prova di condizioni di moto laminare in regime permanente;
- adozione in tutte le prove che comportano immissione d'acqua nel terreno, di acqua limpida.

3.2.2 Prove in pozzetto.

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

Le prove in pozzetto sono adatte soprattutto per terreni granulari e forniscono una valutazione della permeabilità dei terreni superficiali al di sopra del livello di falda.

Vengono eseguite in pozzetti cilindrici o a base quadrata con pareti verticali o inclinate.

Si dividono in:

- prove a carico costante, effettuate cioè riempiendo d'acqua il pozzetto e misurando la portata necessaria per mantenere costante il livello;
- prove a carico variabile, effettuate misurando la velocità di abbassamento in funzione del tempo.

Le condizioni necessarie perchè le prove siano significative sono le seguenti:

- il terreno deve essere saturato preventivamente in modo da stabilire un regime di flusso permanente;
- la profondità del pozzetto deve essere pari a circa 1/7 dell'altezza del fondo dal livello di falda;
- il diametro (o il lato di base) del pozzetto deve essere almeno 10 - 15 volte il diametro massimo dei granuli del terreno;
- il terreno sia omogeneo, isotropo e con coefficiente di permeabilità $k > 10^{-6}$ m/s

A) Pozzetto circolare.

Il coefficiente di permeabilità k viene calcolato con le seguenti relazioni:

a) Prove a carico costante:

$$k = \frac{q}{\pi d h_m}$$

con

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

q = portata assorbita a livello costante;
h_m = altezza dell'acqua nel pozzetto (h_m > d/4);
d = diametro del pozzetto.

b) Prove a carico variabile:

$$k = \frac{d(h_2 - h_1)}{32(t_2 - t_1)h_m}$$

con

h_m = altezza media dell'acqua nel pozzetto (h_m > d/4);
d = diametro del pozzetto;
t₂-t₁ = intervallo di tempo;
h₂-h₁ = variazione di livello dell'acqua nell'intervallo t₂-t₁ .

B) Pozzetto quadrato.

Il coefficiente di permeabilità k viene calcolato con le seguenti relazioni:

a) Prove a carico costante:

$$k = \frac{q}{b^2 \left(27 \frac{h}{b} + 3 \right)}$$

con

q = portata assorbita a livello costante;
h = altezza dell'acqua nel pozzetto (h > d/4);
b = lato della base del pozzetto.

b) Prove a carico variabile:

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

$$k = \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1} \frac{1 + \left(2 \frac{h_m}{b}\right)}{\left(27 \frac{h_m}{b} + 3\right)}$$

con

h_m = altezza media dell'acqua nel pozzetto ($h_m > d/4$);

b = lato della base del pozzetto.

$t_2 - t_1$ = intervallo di tempo;

$h_2 - h_1$ = variazione di livello dell'acqua nell'intervallo $t_2 - t_1$.

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

3.2.3 Prove in foro di sondaggio

Le prove in foro di sondaggio permettono di determinare la permeabilità di terreni al di sopra o al di sotto del livello di falda. Possono essere eseguite durante la trivellazione del foro a diverse profondità oppure alla fine della trivellazione sul solo tratto terminale.

Per l'esecuzione delle prove è necessario che:

- le pareti della perforazione siano rivestite con una tubazione per tutto il tratto del sondaggio non interessato dalla prova;
- nel caso di terreni che tendono a franare o a rifluire, il tratto di prova deve essere riempito con materiale filtrante di granulometria adatta ed isolato mediante un tampone impermeabile.

Le prove si dividono in prove a carico costante o a carico variabile.

A) Prove a carico costante.

Le prove a carico costante si eseguono misurando la portata necessaria per mantenere costante il livello dell'acqua nel foro, in condizioni di regime costante. Si possono eseguire anche nel terreno al di sopra del livello di falda; in questo caso è necessario saturare preventivamente il terreno in modo da stabilire un regime di flusso permanente.

1) Raccomandazioni A.G.I. (1977)

Il coefficiente di permeabilità è dato dalla:

$$k = \frac{q}{mh}$$

con

q = portata immessa;

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

h = livello dell'acqua in foro;
 m = coefficiente di forma = 2,85D
 con D= diametro del foro
 (N.B.: per prove sopra il livello di falda, h è misurato rispetto alla base del foro).

2) Hvorslev (1951) Wilkinson (1968)

Il coefficiente di permeabilità è sempre dato dalla:

$$k = \frac{q}{mh}$$

in questo caso però il coefficiente m assume valori differenti, in funzione delle condizioni di filtrazione, secondo la tabella:

Condizioni	Coefficiente
Filtro sferico in terreno uniforme	$2\pi D$
Filtro emisferico al confine con uno strato confinato	πD
Fondo filtrante piano al confine con uno strato confinato	$2D$
Fondo filtrante piano in terreno uniforme	$2,75D$
Tubo parzialmente riempito al confine con uno strato confinato	$\frac{2D}{1 + \frac{8LK_h}{\pi DK_v}}$
Tubo parzialmente riempito in terreno uniforme	$\frac{2,75D}{1 + \frac{11LK_h}{\pi DK_v}}$
Filtro cilindrico al confine con uno strato confinato	$\frac{3\pi L}{\ln \left[\frac{3L}{D} + 1 + \left(\frac{3L}{D} \right)^2 \right]}$

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

Filtro cilindrico in terreno uniforme	$\frac{3\pi L}{\ln \left[\frac{3L}{D} + 1 + \left(\frac{3L}{D} \right)^2 \right]}$
---------------------------------------	--

Dove:

- L= Lunghezza del tratto filtrante;
- K_h = Permeabilità orizzontale del terreno;
- K_v = Permeabilità verticale del terreno.

Nel caso non sia noto, il rapporto K_h/K_v può essere inserito in prima approssimazione uguale a 10.

3) Zagar (1953)

3a) *Terreno saturo*

Si applica sempre la relazione:

$$k = \frac{q}{mh}$$

in questo caso però il coefficiente m assume i seguenti valori:

$m = 5,7r$ se il foro è aperto solo sul fondo;

$$m = \frac{4\pi r \sqrt{\left(\frac{L}{2r}\right)^2 - 1}}{\ln \left[\frac{L}{2r} + \sqrt{\left(\frac{L}{2r}\right)^2 - 1} \right]}$$

Se il foro è aperto anche lateralmente

con r =raggio del foro e L =lunghezza del tratto filtrante.

3b) *Terreno non saturo*

Nel caso in cui il livello dell'acqua nel foro di prova sia ad una quota superiore rispetto al livello della falda, la relazione vista in precedenza non è più applicabile.

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

Definiti H_u la differenza di quota fra il livello dell'acqua nel foro e il livello della falda e r' il rapporto fra il raggio del foro e l'area della superficie filtrante, si calcola il parametro Y secondo la relazione:

$$Y = -1,0556 + 0,035 \frac{100h}{H_u}$$

dove h è l'altezza media dell'acqua nel foro rispetto al fondo del foro stesso. Nel caso risulti $\text{Log}_{10}(Hu/L) > Y$, dove L è la lunghezza del tratto filtrante, per il calcolo di K si applica la relazione:

$$k = \frac{q}{Cr'h}$$

dove C è fattore ricavabile dalla formula:

$$C = C1 + (C2 - C1) \text{Log}_{10} \frac{100L}{h}$$

$$C1 = 60,96 + 0,152 \frac{h}{r}$$

$$C2 = 104,58 + 0,822 \frac{h}{r}$$

Nel caso invece in cui sia $\text{Log}_{10}(Hu/L) \leq Y$ si applica la relazione:

$$k = \frac{q}{\left(C + 4 \frac{r}{r'}\right) r' (H_u + h - L)}$$

dove $C = 6,247 + 0,797 \frac{L}{r}$

Si tenga presente che la procedura è in questo caso applicabile solo se sono verificate le condizioni $h > 5L$ e $L > 10r'$.

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

B) Prove a carico variabile.

Le prove a carico variabile al di sotto del livello di falda si dividono in *Prove di risalita* e *Prove di abbassamento*. Le prove di risalita si eseguono abbassando il livello dell'acqua nel foro di un'altezza nota e misurando la velocità di risalita del livello. Le prove di abbassamento si eseguono riempiendo il foro d'acqua per un'altezza nota e misurando la velocità di abbassamento del livello. Le prove di abbassamento possono essere eseguite anche nel terreno al di sopra del livello di falda; in questo caso il terreno deve essere preventivamente saturato.

1) Raccomandazioni A.G.I. (1977)

Per le prove a carico variabile il coefficiente di permeabilità è dato dalla:

$$k = \frac{A}{C_L(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

con

A = area di base del foro di sondaggio;

h_1 e h_2 = altezza dei livelli d'acqua nel foro rispetto al livello della falda indisturbata o al fondo del foro stesso agli istanti t_1 e t_2 ;

t_1 e t_2 = tempi ai quali si misurano h_1 e h_2 ;

C_L = coefficiente di forma dipendente dell'area del foro di sondaggio e dalla lunghezza del tratto di foro scoperto.

Per il coefficiente C_L sono suggeriti i seguenti valori:

$$L \gg d \quad C_L = L$$

$$L \leq d \quad C_L = 2\pi d + L$$

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

dove L è la lunghezza del tratto di foro scoperto e d il diametro del foro.

4) Hvorslev (1951) Wilkinson (1968)

Il coefficiente di permeabilità è sempre dato dalla:

$$k = \frac{A}{C_L(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

in questo caso però il coefficiente C_L assume valori differenti, in funzione delle condizioni di filtrazione, secondo la tabella:

Condizioni	Coefficiente
Filtro sferico in terreno uniforme	$2\pi D$
Filtro emisferico al confine con uno strato confinato	πD
Fondo filtrante piano al confine con uno strato confinato	$2D$
Fondo filtrante piano in terreno uniforme	$2,75D$
Tubo parzialmente riempito al confine con uno strato confinato	$\frac{2D}{1 + \frac{8LK_h}{\pi DK_v}}$
Tubo parzialmente riempito in terreno uniforme	$\frac{2,75D}{1 + \frac{11LK_h}{\pi DK_v}}$
Filtro cilindrico al confine con uno strato confinato	$\frac{3\pi L}{\ln \left[\frac{3L}{D} + 1 + \left(\frac{3L}{D} \right)^2 \right]}$
Filtro cilindrico in terreno uniforme	$\frac{3\pi L}{\ln \left[\frac{3L}{D} + 1 + \left(\frac{3L}{D} \right)^2 \right]}$

Dove:

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

L= Lunghezza del tratto filtrante;
K_h= Permeabilità orizzontale del terreno;
K_v= Permeabilità verticale del terreno.

Nel caso non sia noto, il rapporto K_h/K_v può essere inserito in prima approssimazione uguale a 10.

5) Zagar (1953)

Si applica la relazione:

$$k = \frac{\pi r^2}{m} \frac{(h_2 - h_1)}{h_m}$$

dove r è il raggio del foro e h_m la profondità media dell'acqua nel foro. Il coefficiente m assume i seguenti valori:

$m = 5,7r$ se il foro è aperto solo sul fondo;

$m = \frac{4\pi r \sqrt{\left(\frac{L}{2r}\right)^2 - 1}}{\ln \left[\frac{L}{2r} + \sqrt{\left(\frac{L}{2r}\right)^2 - 1} \right]}$ Se il foro è aperto anche lateralmente

con r=raggio del foro e L=lunghezza del tratto filtrante.

3.2.4 Stima della permeabilità da analisi granulometriche.

Esistono in letteratura numerose correlazioni empiriche che permettono di stimare la permeabilità di un mezzo poroso, passando attraverso l'analisi della curva granulometrica. Pur non potendo sostituire le determinazioni in sito, tali formule possono essere utili per una prima determinazione di k in terreni sabbiosi. Di seguito

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

vengono elencate e descritte le dieci relazioni più usate, indicando per ognuna di essa il campo di applicabilità. Tutte, per semplicità, vengono espresse nella forma:

$$K(m/s) = \frac{g}{\nu} C \phi(n) d_e^2$$

dove:

g = accelerazione di gravità = 9,81 (m/s²);

ν = coefficiente di viscosità dell'acqua, variabile in funzione della temperatura, secondo la seguente tabella:

T (°C)	0	5	10	15	20	30	50
ν (mq/s)	1,78 10 ⁻⁶	1,52 10 ⁻⁶	1,31 10 ⁻⁶	1,14 10 ⁻⁶	1,01 10 ⁻⁶	0,81 10 ⁻⁶	0,55 10 ⁻⁶

C = costante;

$\phi(n)$ = funzione della porosità del terreno;

d_e = diametro efficace dei granuli.

Le formule presentate differiscono fra loro per i diversi valori adottati delle grandezze C, $\phi(n)$ e d_e .

Si ricorda infine che la porosità del terreno può essere stimata in prima approssimazione attraverso la relazione empirica:

$$n = 0,255(1 + 0,83^\eta)$$

dove $\eta = d_{60}/d_{10}$ è il coefficiente di uniformità del terreno.

1) Formula di Hazen.

Nella formula di Hazen le grandezze da introdurre nella relazione di calcolo di K assumono i seguenti valori:

C = 6 10⁻⁴

$\phi(n) = [1 + 10(n - 0,26)]$

$d_e = d_{10}$

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

La formula è applicabile nelle seguenti condizioni:

$$0,1 \text{ mm} < d_e < 3 \text{ mm} \text{ e } \eta < 5.$$

2) Formula di Slichter.

Nella formula di Slichter le grandezze da introdurre nella relazione di calcolo di K assumono i seguenti valori:

$$\begin{aligned} C &= 1 \cdot 10^{-2} \\ \phi(n) &= n^{3,287} \\ d_e &= d_{10} \end{aligned}$$

La formula è applicabile nel caso di sabbie grossolane.

$$0,01 \text{ mm} < d_e < 5 \text{ mm}.$$

3) Formula di Terzaghi.

Nella formula di Terzaghi le grandezze da introdurre nella relazione di calcolo di K assumono i seguenti valori:

$$\begin{aligned} C &= 10,7 \cdot 10^{-3} \text{ per sabbia con granuli arrotondati e } 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ per} \\ &\text{sabbia con granuli a spigoli vivi} \\ \phi(n) &= \left(\frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2 \\ d_e &= d_{10} \end{aligned}$$

La formula è applicabile nel caso di sabbie grossolane.

4) Formula di Beyer.

Nella formula di Beyer le grandezze da introdurre nella relazione di calcolo di K assumono i seguenti valori:

$$\begin{aligned} C &= 6 \cdot 10^{-4} \text{ Log}_{10}(500/\eta) \\ \phi(n) &= 1 \end{aligned}$$

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

$$d_e = d_{10}$$

La formula è applicabile nelle seguenti condizioni:
 $0,06 \text{ mm} < d_e < 0,6 \text{ mm}$ e $1 < \eta < 20$.

5) Formula di Sauerbrei.

Nella formula di Sauerbrei le grandezze da introdurre nella relazione di calcolo di K assumono i seguenti valori:

$$C = 3,75 \cdot 10^{-3}$$

$$\phi(n) = \frac{n^3}{(1-n)^2}$$

$$d_e = d_{17}$$

La formula è applicabile nel caso di sabbie e argille sabbiose con $d_e < 0,5 \text{ mm}$.

6) Formula di Krueger.

Nella formula di Krueger le grandezze da introdurre nella relazione di calcolo di K assumono i seguenti valori:

$$C = 4,35 \cdot 10^{-5}$$

$$\phi(n) = \frac{n}{(1-n)^2}$$

$$1/d_e = \sum \Delta g_i \frac{2}{d_i^g + d_i^d} \text{ dove } \Delta g_i \text{ è la frazione di peso del campione}$$

compresa fra il diametro maggiore e minore (d_i^g e d_i^d) dei granuli del passante i-esimo

La formula è applicabile nel caso di sabbie medie con $\eta > 5$.

7) Formula di Kozeny.

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

Nella formula di Kozeny le grandezze da introdurre nella relazione di calcolo di K assumono i seguenti valori:

$$C = 8,3 \cdot 10^{-3}$$

$$\phi(n) = \frac{n^3}{(1-n)^2}$$

$$1/d_e = \frac{3}{2} \frac{\Delta g_i}{d_i} + \sum \Delta g_i \frac{d_i^g + d_i^d}{2d_i^g d_i^d} \text{ dove } \Delta g_i \text{ è la frazione di peso del campione compresa fra il diametro maggiore e minore } (d_i^g \text{ e } d_i^d) \text{ dei granuli del passante } i\text{-esimo}$$

La formula è applicabile nel caso di sabbie grossolane.

8) Formula di Zunker.

Nella formula di Zunker le grandezze da introdurre nella relazione di calcolo di K assumono i seguenti valori:

$$C = \begin{aligned} &= 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ per sabbie uniformi con granuli arrotondati} \\ &= 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ per sabbie grossolane con granuli arrotondati} \\ &= 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ per sabbie eterogenee} \\ &= 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ per sabbie eterogenee, argillose con granuli a spigoli vivi} \\ &\text{in alternativa si può inserire un valore medio di } 1,55 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\phi(n) = \left(\frac{n}{1-n} \right)^2$$

$$1/d_e = \frac{3}{2} \frac{\Delta g_i}{d_i} + \sum \Delta g_i \frac{d_i^g - d_i^d}{d_i^g d_i^d (\ln d_i^g - \ln d_i^d)} \text{ dove } \Delta g_i \text{ è la frazione di peso del campione compresa fra il diametro maggiore e minore } (d_i^g \text{ e } d_i^d) \text{ dei granuli del passante } i\text{-esimo}$$

La formula è applicabile nel caso di sabbie da fini a grossolane.

9) Formula di Zamarin.

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

Nella formula di Zamarin le grandezze da introdurre nella relazione di calcolo di K assumono i seguenti valori:

$$C = 8,3 \cdot 10^{-3}$$

$$\phi(n) = \frac{n^3}{(1-n)^2} (1,275 - 1,5n)^2$$

$$1/d_e = \frac{3}{2} \frac{\Delta g_i}{d_i} + \sum \Delta g_i \frac{\ln d_i^g - \ln d_i^d}{d_i^g - d_i^d} \text{ dove } \Delta g_i \text{ è la frazione di peso del campione compresa fra il diametro maggiore e minore } (d_i^g \text{ e } d_i^d) \text{ dei granuli del passante } i\text{-esimo}$$

La formula è applicabile nel caso di sabbie grossolane.

10) Formula USBR.

Nella formula USBR le grandezze da introdurre nella relazione di calcolo di K assumono i seguenti valori:

$$C = 4,8 \cdot 10^{-4} d_{20}^{0,3}$$

$$\phi(n) = 1$$

$$d_e = d_{20}$$

La formula è applicabile nel caso di sabbie medie con $\eta < 5$.

3.3 Stima dell'intensità e della durata critica di precipitazione per l'innescò di movimenti franosi in coltri detritiche.

3.3.1 Stima dello spessore critico di una copertura detritica.

I movimenti franosi che coinvolgono coperture detritiche in senso lato, cioè quei depositi derivanti dal disfacimento meteorico e dalla frammentazione meccanica del substrato roccioso, in genere sono caratterizzati da una notevole estensione in senso longitudinale rispetto allo spessore del materiale coinvolto. Tale tipo di frana può essere analizzato in maniera efficace attraverso il metodo del pendio illimitato (Skempton, 1957), supponendo cioè una superficie di scivolamento piana, parallela al profilo topografico e di lunghezza indefinita. Un'altra osservazione è che spesso la mobilitazione del detrito avviene in seguito a saturazione del materiale in corrispondenza di eventi meteorici intensi. E' possibile, utilizzando la relazione di Skempton nel caso di terreni saturi, valutare lo spessore della coltre detritica necessario per raggiungere la condizione di equilibrio limite (forze stabilizzanti=forze instabilizzanti). In questa situazione il coefficiente di sicurezza calcolato con la formula del pendio illimitato è uguale a 1 e lo spessore di materiale corrispondente viene definito critico.

Lo spessore critico può essere quindi calcolato direttamente attraverso la relazione:

$$h_{crit} = \frac{c}{\gamma \left(\operatorname{tg} \beta - \frac{\gamma'}{\gamma} \operatorname{tg} \varphi \right)} \cos^2 \beta$$

dove:

- c (t/mq) = coesione drenata del terreno;
- φ (°) = angolo di resistenza al taglio del terreno;
- γ (t/mc) = peso di volume saturo del terreno;
- γ' (t/mc) = peso di volume immerso del terreno;
- β (°) = inclinazione del versante.

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

E' evidente che, nel caso di terreno con coesione nulla, lo spessore critico sarà sempre uguale a zero e quindi perde significato tutta la verifica seguente.

3.3.2 Stima dell'intensità e della durata critica di precipitazione.

Il modello, messo a punto da Wallace (1977) e Pradel e Raad (1993), prevede il verificarsi della seguente serie di eventi:

- su un versante assimilabile ad un pendio illimitato, secondo la definizione di Skempton, si verifica una precipitazione meteorica di intensità superiore alla permeabilità del terreno; si considerano nulli gli apporti idrici provenienti da monte e l'effetto dell'evapotraspirazione, ipotizzando che i due fenomeni si compensino;
- lo strato superficiale inizia a saturarsi e il fronte di saturazione, al proseguire della precipitazione, tende ad approfondirsi sempre più;
- quando lo spessore della coltre saturata dalla pioggia è uguale o leggermente superiore allo spessore critico, calcolato con la verifica di stabilità, si ha l'innescò del movimento franoso.

Nel caso la precipitazione duri meno del tempo necessario al fronte di saturazione per raggiungere lo spessore critico non si avrà alcun movimento franoso.

Utilizzando il modello di infiltrazione di Green e Ampt (1911) è possibile stabilire il tempo minimo necessario, perché si abbia la saturazione dello spessore critico:

$$t_{\min} = \frac{\Delta\theta}{k} \left[D - P_{ris} \ln \left(\frac{P_{ris} + D}{P_{ris}} \right) \right]$$

dove:

$\Delta\theta$ = porosità efficace residua data da $(1-s)\theta$, in cui s è il grado di saturazione iniziale del terreno e θ è la porosità efficace;

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

k (mm/h) = permeabilità del terreno;
 D (mm) = spessore critico
 P_{ris} (mm) = pressione di risaturazione, stimabile, nota la curva granulometrica del terreno, con la relazione $12/d_{10}$, dove d_{10} è il diametro del passante al 10%.

Di conseguenza una delle condizioni perché si abbia l'innescò del movimento franoso è che sia $t_{prec} \geq t_{min}$ (durata della precipitazione).

Nel caso inoltre l'intensità della precipitazione sia inferiore alla permeabilità del terreno non si potranno instaurare le condizioni di saturazione, in quanto l'acqua infiltrata viene allontanata troppo rapidamente.

Per un determinato valore di durata è possibile stimare l'intensità di precipitazione minima, perchè si possa creare un fronte di saturazione:

$$I_{min} (mm/h) = \frac{\Delta\theta}{t} \left[D - P_{ris} \ln \left(\frac{P_{ris} + D}{P_{ris}} \right) \right] \frac{D + P_{ris}}{D}$$

Facendo variare t , partendo da un valore minimo uguale al t_{min} calcolato, si può ottenere una curva, che, su un grafico in scala bilogarithmica, disponendo sulle ordinate le intensità di precipitazione e in ascissa le durate, fornisce l'indicazione dell'intensità minima di precipitazione, associata ad una determinata durata, necessaria per l'innescò della frana. In pratica tutte le precipitazioni con una durata minima superiore a t_{min} e con un'intensità che si colloca sopra la curva disegnata possono produrre il movimento franoso.

Per poter fare delle previsioni sulla frequenza, in un determinato versante, di eventi di movimentazione della coltre detritica, è necessario confrontare la curva Durata-Intensità, determinata con il modello, con le curve di possibilità climatica stimate partendo dai dati di piovosità del bacino per diversi tempi di ritorno.

Nella figura che segue in blu è indicata la curva del modello e in nero la curva di possibilità climatica per un determinato tempo di ritorno. La zona in rosso racchiude tutte le possibili combinazioni di durata e intensità di precipitazione che possono innescare, nel versante preso

PROGRAM GEO – Green ver.1.1

in esame, un movimento franoso con una frequenza uguale al tempo di ritorno della curva climatica.

