

GEOSTRU SOFTWARE

Effetto dell'acqua sulla stabilità dei versanti in campo sismico

1	Resistenza a taglio in condizioni di carico sismico.....	2
1.1	Analisi in condizioni di tensioni efficaci.....	2
1.1.1	Terreni coesivi.....	2
1.1.2	Terreni granulari.	3
1.2	Analisi in condizioni di tensioni totali.	5
1.2.1	Terreni coesivi.....	5
2	Parametri dell'accelerogramma.	6
2.1	Intensità di Arias.	6
2.2	Intensità degli incroci con l'asse dei tempi.	7
2.3	Durata effettiva secondo Trifunac.	7
3	Implementazione delle procedure di calcolo nel software SLOPE.....	8

1 Resistenza a taglio in condizioni di carico sismico.

In assenza di determinazioni sperimentali appropriate, ottenute da prove di cicliche di laboratorio, la riduzione di resistenza al taglio in condizioni di carico sismico può essere stimata avvalendosi di relazioni empiriche di letteratura, come indicato nei paragrafi seguenti, con riferimento al caso di analisi condotte in termini di tensioni efficaci o in termini di tensioni totali.

1.1 Analisi in condizioni di tensioni efficaci.

L'incremento di pressione interstiziale deve essere valutato nel caso di terreni saturi se la deformazione di taglio indotta dall'azione sismica è superiore al valore della deformazione di soglia volumetrica, γ_v . Nei terreni parzialmente saturi, la pressione interstiziale aumenta durante l'applicazione della sollecitazione sismica, ma si mantiene generalmente inferiore alla pressione atmosferica; in tal caso, può essere assunto un valore nullo delle pressioni interstiziali per tutto il periodo di applicazione del carico ($\sigma' = \sigma$) e le analisi possono essere eseguite utilizzando le caratteristiche di resistenza determinate in prove drenate eseguite su provini preventivamente saturati dello stesso materiale. Per la valutazione di Δu è opportuno distinguere il comportamento delle terre in relazione alla loro diversa natura, coesiva o incoerente.

1.1.1 Terreni coesivi.

Nei terreni coesivi, l'incremento di pressione interstiziale Δu , ad una certa profondità, può essere stimato mediante la seguente relazione empirica (Matsui et al., 1980):

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_0} = \beta \cdot \left[\log \left\{ \frac{\gamma_{c,\max}}{\gamma_v} \right\} \right]$$

Dove σ'_0 è il valore iniziale della pressione media efficace¹ alla profondità considerata, $\gamma_{c,\max}$ è la deformazione di taglio massima raggiunta durante il sisma e $\beta \approx 0.45$ è un coefficiente sperimentale. La deformazione di soglia volumetrica γ_v , determinabile con prove cicliche di laboratorio, può essere valutata in prima approssimazione mediante la relazione:

$$\gamma_v = A \cdot (OCR - 1) + B$$

¹ $\sigma'_0 = \sigma'_{v0} \cdot \frac{(1 + 2 \cdot k_0)}{3}$

Nella quale OCR è il grado di sovraconsolidazione, A e B sono coefficienti sperimentali che, in assenza di una determinazione diretta, possono essere ricavati in funzione dell'indice di plasticità:

Ip (%)	A	B
20	$0.4 \cdot 10^{-3}$	$0.6 \cdot 10^{-3}$
40	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
55	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$

Tabella: Valori suggeriti per i coefficienti A e B

Il valore di $\gamma_{c,max}$ relativo alla profondità considerata può essere determinato mediante un'analisi della risposta sismica locale. In alternativa, si determina preliminarmente il valore di τ_{max} mediante la relazione empirica:

$$\tau_{max} = \frac{a_{max}}{g} \cdot \sigma_v \cdot r_d$$

Dove a_{max} , espressa in g, è l'accelerazione di picco al piano campagna sulla verticale relativa al punto considerato; g è l'accelerazione di gravità; σ_v è la tensione verticale totale; r_d è un coefficiente riduttivo che tiene conto dell'azione sismica alla profondità di interesse che porta in conto la deformabilità del sottosuolo. Il coefficiente r_d può essere valutato, in prima approssimazione, con la seguente espressione:

$$r_d = 1 - 0.015 \cdot z$$

Dove z è la profondità nel punto considerato. La massima deformazione di taglio indotta dal sisma si ricava quindi dalla relazione:

$$\gamma_{c,max} = \frac{\tau_{max}}{G}$$

Dove il modulo di taglio G può essere determinato, per via iterativa, dalla curva G- γ ottenuta da prove di laboratorio (A tale proposito consultare l'allegato A).

1.1.2 Terreni granulari.

Nei terreni granulari, l'incremento di pressione interstiziale generato dalla sollecitazione sismica può essere stimato mediante la seguente relazione empirica (Seed & Booker, 1997):

$$\frac{\Delta u_N}{\sigma'_0} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left\{ \left(\frac{N}{N_L} \right)^{\frac{1}{a}} \right\}$$

Dove Δu_n è l'incremento di pressione interstiziale dopo N cicli di carico, σ'_0 il valore iniziale della pressione media efficace alla profondità considerata, N è il numero di cicli di carico di ampiezza costante equivalente al sisma ed N_L è il numero di cicli di carico necessari per produrre la liquefazione nel terreno. La costante sperimentale a può essere valutata mediante la relazione proposta da Fardis & Veneziano (1981) in funzione della densità relativa D_r (in frazione):

$$a = 0.96 \cdot D_r^{0.93} \cdot \varepsilon_g$$

Il termine ε_g ha distribuzione log-normale con valore medio unitario e varianza pari a 0.1. Per determinare il numero di cicli N che compare in una delle relazioni precedenti è necessario approssimare la storia deformativa di taglio irregolare indotta dal terremoto con una sollecitazione ciclica equivalente di ampiezza costante (τ_{eq}) e numero di cicli equivalente (N_{eq}) seguendo una delle numerose procedure presenti in letteratura. Utilizzando ad esempio la procedura proposta da Biondi et al. (2004) si ottiene:

$$\tau_{eq} = 0.65 \cdot \tau_{max}$$

$$N_{eq} = e^{(\alpha + \beta \cdot \ln(a \cdot \max) + \gamma \cdot \ln(I_a) + \delta \cdot \ln(v_0) + \varepsilon \cdot \ln(\tau^D))}$$

Nella prima delle equazioni precedenti τ_{max} rappresenta la sollecitazione di taglio massima indotta dal terremoto alla profondità considerata, il cui valore può essere stimato mediante un'analisi della risposta sismica locale o, in prima approssimazione mediante la relazione utilizzata nel paragrafo relativo ai terreni coesivi. Nella seconda delle equazioni precedenti i vari termini hanno il seguente significato:

- I_A è l'intensità di Arias (m/s);
- v_0 è l'intensità degli incroci con l'asse dei tempi dell'accelerogramma (s^{-1});
- T_D è la durata dell'accelerogramma definita da Trifunac² e Brady (s);

L'intensità di Arias è definita mediante la seguente formula:

$$I_a = \frac{\pi}{2 \cdot g} \cdot \int_0^{\infty} [a(t)]^2 dt$$

² La durata di Trifunac (Trifunac & Brady, 1975) è definita come l'intervallo temporale compreso tra gli istanti in cui viene rilasciata un'energia pari al 90% del totale, più specificamente come l'intervallo di tempo che intercorre tra il raggiungimento del 5% ed il 95% dell'intensità di Arias.

Gli altri simboli che compaiono, ossia $\alpha - \beta - \gamma - \delta - \varepsilon$, sono delle costanti per le quali è consigliato il seguente valore:

$$\begin{cases} \alpha = -1.629 \\ \beta = -2.493 \\ \gamma = 1.239 \\ \delta = 0.854 \\ \varepsilon = -0.307 \end{cases}$$

Per la determinazione del valore di N_L si può fare riferimento a metodi che poggiano su interpolazioni di tipo grafico, o eventualmente si possono utilizzare i risultati di prove triassiali cicliche o di taglio semplice ciclico. Per avere ulteriori informazioni sulla determinazione di N_L consultare l'allegato B

1.2 Analisi in condizioni di tensioni totali.

1.2.1 Terreni coesivi

Se l'analisi è eseguita in termini di tensioni totali, il valore della coesione non drenata c_u deve essere ridotto rispetto al caso statico per tener conto della degradazione conseguente al carattere ciclico delle sollecitazioni sismiche.

Una stima del coefficiente di riduzione della resistenza non drenata, δ_{cu} può essere ottenuta mediante l'equazione:

$$\delta_{cu} = N^{-t}$$

Dove N è il numero di cicli di carico indotti dal sisma e t è un parametro di degradazione che può essere stimato con la seguente relazione:

$$t = s \cdot (\gamma_c - \gamma_v)^r$$

Funzione della deformazione di taglio ciclica γ_c e della deformazione di soglia volumetrica, quest'ultima valutata come esposto in precedenza. I valori di s e r possono essere stimati in funzione dell'indice di plasticità, I_p e del grado di sovraconsolidazione OCR:

	OCR = 1		OCR = 2	OCR = 4
	$I_p = 15$	$I_p = 30$	$I_p = 50$	$I_p = 50$
s	0.195	0.095	0.075	0.054
r	0.600	0.600	0.495	0.423

Coefficienti per il calcolo dell'indice di degradazione ciclica (Matasovic, 1993)

Il numero di cicli N può essere valutato calcolando il numero di incroci con l'asse dei tempi nell'intervallo di tempo compreso tra il primo e l'ultimo superamento di una prefissata soglia di accelerazione (solitamente pari a 0.05 g). Per la deformazione di taglio ciclica γ_c si può utilizzare la seguente relazione:

$$\gamma_c = \frac{\tau_{eq}}{G}$$

In cui il valore del modulo di taglio G viene determinato per via iterativa dalla curva G- γ ottenuta da prove di laboratorio e τ_{eq} è calcolabile con la formula utilizzata in precedenza.

2 Parametri dell'accelerogramma.

Lo studio del problema relativo alla valutazione dell'incremento di pressione interstiziale nei terreni, nel caso di azione sismica, richiede che siano calcolati alcuni parametri che individuano le proprietà in frequenza ed in intensità dell'accelerogramma. I parametri che saranno determinati sono i seguenti:

- Intensità di Arias (I_a in m/s);
- Intensità degli incroci dell'accelerogramma con l'asse dei tempi (ν_0 in 1/s);
- Durata effettiva del moto definita da Trifunac (Trifunac e Brady, 1975, TD in s);

2.1 Intensità di Arias.

L'intensità di Arias è un parametro dell'accelerogramma che fornisce informazioni sull'intensità e sulla frequenza dello stesso. Il parametro è definito dalla seguente relazione:

$$I_A = \frac{\pi}{2 \cdot g} \int_0^{TMAX} [a(t)]^2 \cdot dt$$

Dove:

- TMAX è l'intera durata dell'accelerogramma;
- $a(t)$ è l'accelerogramma.

Ordinariamente i valori di tale parametro variano tra 0.05 e 3.

2.2 Intensità degli incroci con l'asse dei tempi.

Tale parametro è definito mediante la seguente formula:

$$v_0 = \frac{Ni}{T_{MAX}}$$

Dove:

- Ni è il numero di volte, durante tutta la durata dell' accelerogramma, in cui l' accelerogramma stesso interseca l'asse dei tempi;
- Tmax è la durata dell'accelerogramma.

2.3 Durata effettiva secondo Trifunac.

Tale parametro individua l'intervallo di tempo compreso tra i seguenti estremi:

$$tds = t : I_A(tds) = 5\%I_A$$

$$tde = t : I_A(tde) = 95\%I_A$$

Dove:

$$I_A(t^*) = \frac{\pi}{2 \cdot g} \int_0^{t^*} [a(t)]^2 \cdot dt$$

Secondo le definizioni precedenti il tempo definito da Trifunac vale:

$$TD = tde - tds$$

3 Implementazione delle procedure di calcolo nel software SLOPE

Le procedure per il calcolo delle sovrappressioni interstiziali in campo dinamico sono state implementate nel software Slope di GeoStru.

Da una serie di test svolti con il software Slope si evidenziano scarti di variazione sul fattore di sicurezza dal 15 al 20%, con incrementi di pressione neutra, all'aumentare di a_g/g , che variano dal 20 all' 80%.

Metodo di Bishop

Terreno:

$G_0 = 12000$ KPa

$G_y = 9000$ Kpa

$D_r = 55\%$

$OCR = 1$

$I_p = 20\%$

Dati sismici

Intensità di Arias I_a :

2.26

N. incroci con asse

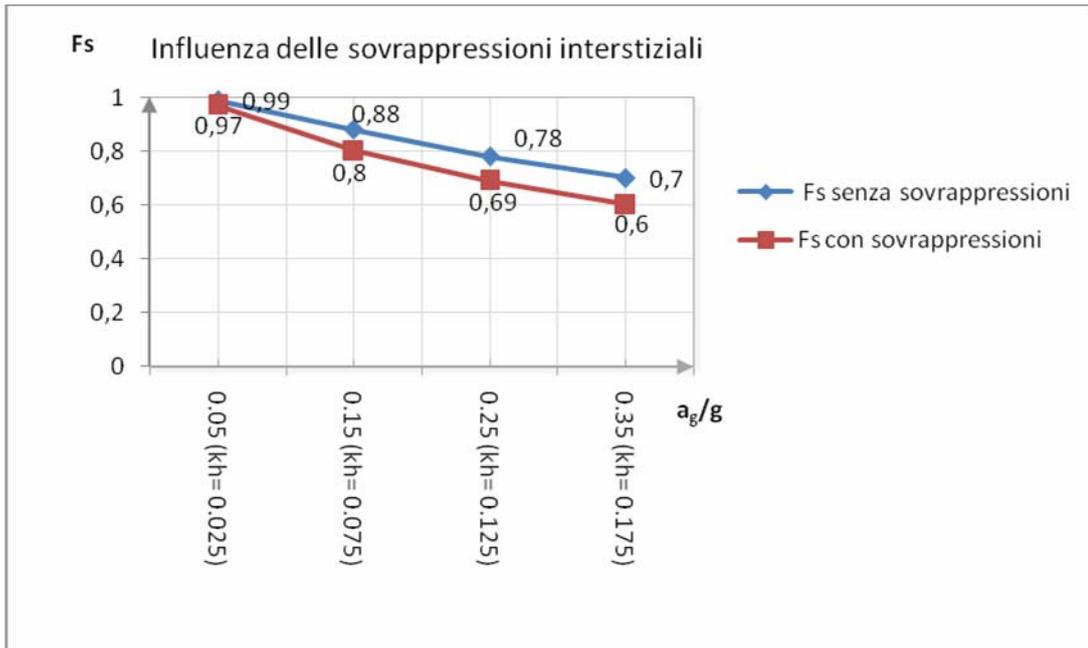
tempi: 29.75

Periodo di Trifunac:

12.96 s

a_g/g	0.05 ($k_h = 0.025$)	0.15 ($k_h = 0.075$)	0.25 ($k_h = 0.125$)	0.35 ($k_h = 0.175$)
Fattore di sicurezza	0.99	0.88	0.78	0.70
Pressioni idrostatiche				
Fattore di sicurezza	0.97	0.80	0.69	0.60
Sovrappressioni neutre				

a_g/g	0.05 ($k_h = 0.025$)	0.15 ($k_h = 0.075$)	0.25 ($k_h = 0.125$)	0.35 ($k_h = 0.175$)
U_{max} (Kg/cm ²)	1.14	1.14	1.14	1.14
ΔU_{max} (Kg/cm ²)	0.23	0.63	0.80	0.92



Allegato A

Calcolo del modulo di taglio G

Il modulo di taglio da introdurre nelle equazioni precedenti può essere valutato facendo riferimento a diagrammi del tipo di quelli mostrati nella seguente figura, nei quali si traccia l'andamento del modulo di taglio con la deformazione di taglio (per diversi valori di indice di plasticità del terreno I_p):

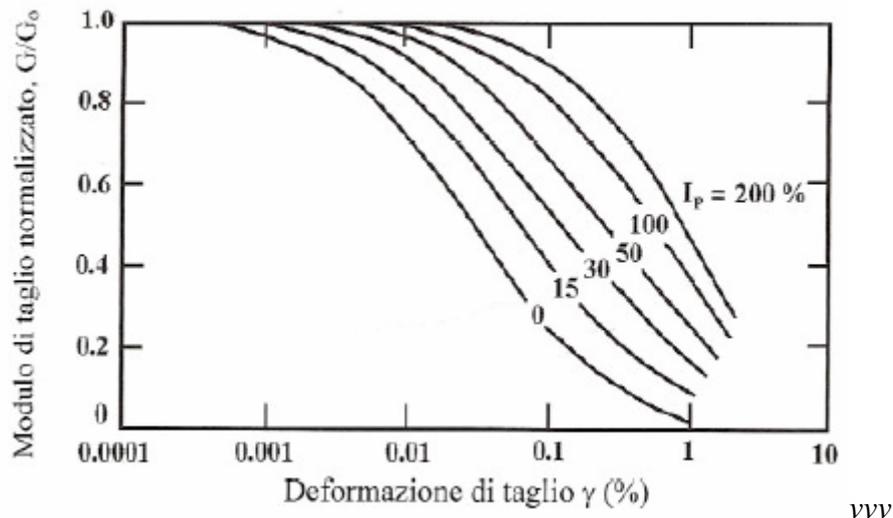


Diagramma utilizzato per il modulo di taglio G

Come si osserva ad essere diagrammato non è direttamente G bensì il rapporto G/G_0 dove G_0 è il modulo di taglio in condizioni dinamiche per basse deformazioni. Il modulo G_0 può essere ricavato correlandolo con la velocità delle onde S dello strato:

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2$$

Dove ρ è la densità di massa del terreno data dal peso di volume diviso l'accelerazione di gravità in m/s^2 ($9.81 m/s^2$).

In alternative esistono diverse formulazioni per la valutazione di G_0 , tra cui le seguenti:

Metodo di Imai e Tomauchi.

Questo metodo correla il modulo di taglio dinamico per basse deformazioni con la resistenza di punta media:

$$G_0 = 28 \cdot q_c^{0.611} \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Dove q_c è la resistenza di punta media nello strato misurata con il penetrometro statico. Il risultato è espresso in kg/cm^2 .

Metodo Ohsaki & Iwasaki.

Questo metodo assume validità nell'ambito di sabbie pulite o con fine plastico. Questo metodo correla il modulo di taglio a basse deformazioni con il numero di colpi medio nello strato e con la granulometria del terreno:

$$G_0 = a \cdot N_{spt}^b \left[\frac{t}{m^2} \right]$$

Dove N_{spt} è il numero di colpi medio dello strato e le costanti a e b si possono ricavare mediante la seguente tabella:

a	b	Granulometria
650	0.94	Sabbie pulite
1182	0.76	Sabbie con fine plastico

Valori dei parametri da inserire nella formula di Ohsaki e Iwasaki

Calcolo di N_L (numero di cicli necessari per ottenere la liquefazione del terreno)

Il numero di cicli necessario per la liquefazione del terreno può essere valutato con l'ausilio di diagrammi del tipo di quelli nella figura che segue. Nella figura è diagrammato l'andamento di N_L in funzione dell'ampiezza dello sforzo di taglio imposto τ_{hv} (Normalizzato rispetto al valore iniziale della tensione media efficace). Il diagramma è noto per diversi valori di densità relativa D_r :

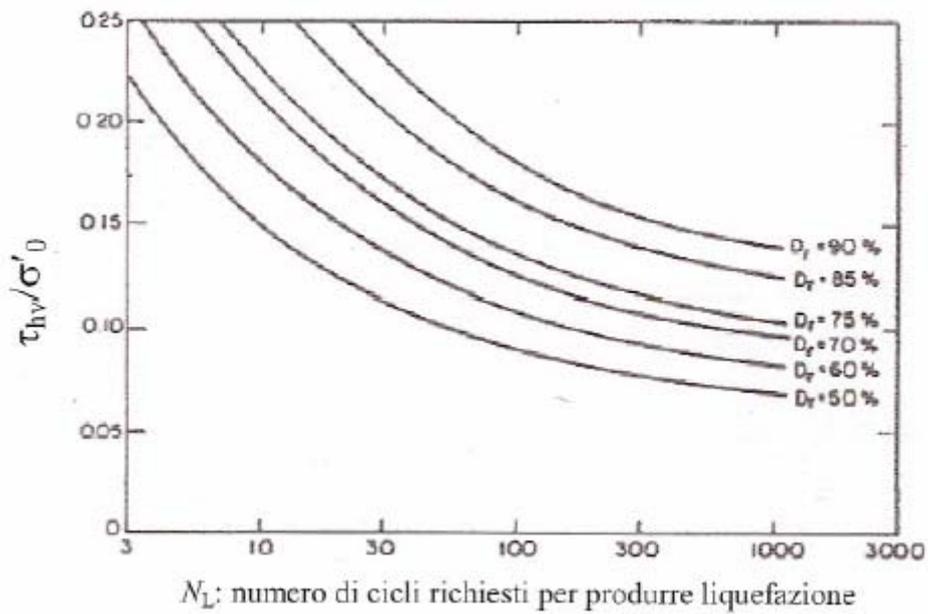


Diagramma utilizzato per il calcolo di N_L