

SOMMARIO

SOMMARIO	1
TEORIA E NORMATIVA	3
STIMA DEL TERREMOTO DI PROGETTO.....	3
<i>Analisi probabilistica: metodo di Cornell</i>	3
<i>Analisi storico-statistica</i>	6
<i>Parametri sismici legati all'accelerogramma</i>	7
CARATTERIZZAZIONE DEL SITO DA UN PUNTO DI VISTA SISMICO.....	10
<i>Caratterizzazione del terreno</i>	10
Caratterizzazione del terreno attraverso prove penetrometriche dinamiche (SPT).....	10
Caratterizzazione del terreno attraverso prove penetrometriche statiche (CPT).....	12
<i>Classificazione del sito</i>	13
Metodo basato sulla rigidità degli strati di copertura.....	13
Metodo basato sulla velocità delle onde S negli strati di copertura.....	14
Metodo previsto dall'Eurocodice 8 (1994).....	16
Metodo previsto dall'Eurocodice 8 (2003).....	17
STIMA DEL PERIODO DI RISONANZA FONDAMENTALE DEL TERRENO.....	19
STIMA DELL'AMPLIFICAZIONE SISMICA.....	21
<i>Effetti stratigrafici: metodi di II livello</i>	21
Metodo di Midorikawa (1987).....	21
Metodo di Boore e Atkinson (2008).....	22
<i>Effetti stratigrafici: metodi di III livello</i>	25
Propagazione in direzione verticale di un'onda di taglio in un modello stratigrafico monodimensionale.....	25
Stima del moto sismico in superficie.....	28
Stima dell'amplificazione con il modello lineare equivalente.....	30
Determinazione dei parametri geotecnici dinamici del terreno.....	30
Stima delle curve $G(\gamma)$ e $\beta(\gamma)$ da correlazioni empiriche.....	31
<i>Effetti topografici: metodi di II livello</i>	35
Metodo dell'Eurocodice 8 (2003).....	35
SPETTRI DI RISPOSTA ELASTICI SEMPLIFICATI.....	36
<i>Stima dello spettro di risposta elastico</i>	36
<i>Spettri di risposta elastica secondo l'Eurocodice 8</i>	37
<i>Spettri di risposta elastica attraverso l'applicazione di equazioni per la predizione del moto nel sottosuolo (GMPEs): Boore e Atkinson (2008)</i>	39
<i>Procedura per ottenere un spettro di risposta elastica adattato all'Eurocodice 8 secondo gli ICMS 2008</i>	44
<i>Stima degli spettri di risposta elastica delle velocità e degli spostamenti</i>	46
<i>Intensità di Housner</i>	46

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

EFFETTI GEOTECNICI DEL SISMA.....	47
<i>Stima della variazione della pressione interstiziale in terreni incoerenti.....</i>	<i>47</i>
<i>Stima della variazione della pressione interstiziale in terreni coesivi.....</i>	<i>48</i>
<i>Stabilità di un versante indefinito con il metodo di Newmark.....</i>	<i>51</i>
VALUTAZIONE EMPIRICA DEL RISCHIO SISMICO DEGLI EDIFICI.....	54
<i>Curve di fragilità: Rota et al. (2008)</i>	<i>54</i>
<i>Curve di fragilità: Rossetto et al. (2003)</i>	<i>56</i>

Teoria e Normativa

Stima del terremoto di progetto

Analisi probabilistica: metodo di Cornell

La procedura di calcolo richiede che venga inizialmente stimata la relazione frequenza-magnitudo (Gutenberg & Richter) della zona sismogenetica in cui ricade il sito indagato. Si procede come indicato di seguito

- 1) Si effettua l'estrazione degli eventi sismici dal catalogo dei terremoti ricadenti all'interno dell'area di riferimento.
- 2) Si fissa un intervallo di magnitudo di calcolo, scegliendo un'opportuno valore di soglia inferiore (m_0), per esempio 4, e un valore di soglia superiore (m_1) stimabile, prendendo la massima magnitudo rilevata negli eventi storici incrementata di 3-4 decimi. Quindi se la magnitudo massima registrata nella zona sismogenetica è 6, come soglia massima si può inserire un valore di 6,3-6,4.
- 3) Si suddivide l'intervallo m_1-m_0 in un adeguato numero di sottointervalli, con un'ampiezza di magnitudo di 0,3-0,5, e per ogni intervallo si stima la frequenza degli eventi con la relazione:

$$v(M) = \frac{N}{Tempo}$$

dove la grandezza Tempo indica il numero di anni compresi nell'estratto dal catalogo dei terremoti. Quindi se, per esempio, l'estratto comprende terremoti dall'anno 1200 all'anno 1992 e per una magnitudo maggiore o uguale a 4 gli eventi conteggiati sono 75, si avrà:

$$v(M \geq 4) = \frac{75}{(1992 - 1200)} = 0,0947$$

- 4) Si procede calcolando le frequenze relative a tutti gli intervalli di magnitudo considerati ($v(M \geq 4)$, $v(M \geq 4,4)$, $v(M \geq 4,8)$, eccetera), disponendole poi in un grafico, con, lungo l'asse delle ascisse, il valore di

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Magnitudo e , lungo l'asse delle ordinate, il logaritmo in base dieci delle frequenze.

5) S'interpolano quindi i dati del logaritmo della frequenza in funzione della magnitudo, con il metodo dei minimi quadrati, per ricavare i parametri a e b della curva:

$$\log v = a - bM$$

che rappresenta la relazione di Gutenberg-Richter della frequenza in funzione della magnitudo.

Ricordando che la frequenza è il reciproco del tempo, la curva di Gutenberg-Richter può essere utilizzata per ottenere il valore di magnitudo in funzione di uno specifico tempo di ritorno.

Il metodo di Cornell si basa su un modello statistico di tipo poissoniano, fondato sul presupposto che ogni evento sismico sia indipendente da quelli avvenuti in precedenza o che avverranno in futuro. Per quanto riguarda la localizzazione della sorgente, si suppone inoltre che essa possa ricadere in un punto qualunque all'interno di zona sismogenetica omogenea. La probabilità che un certo valore 'critico' A dell'accelerazione sismica non venga superato annualmente in corrispondenza del sito in esame è fornito, nell'ipotesi di sorgente sismica puntiforme, dalla relazione:

$$(1) P[a \leq A] = \exp \left[-vFC \exp \left(-\frac{\beta A}{b_2} \right) \right]$$

dove:

v = tasso di frequenza annuo;

β = $b \ln(10)$; in cui b è il parametro della relazione di Gutenberg-Richter;

F = $r^{-\beta c_3/c_2}$; in cui r è la distanza della sorgente dal sito, data da: $r^2 = R^2 + h^2$ in cui R =distanza epicentrale e h =profondità ipocentro;

$$C = \exp \left[\beta \left(\frac{c_1}{c_2} + m_0 \right) \right]$$

m_0 = soglia inferiore di magnitudo della relazione di Gutenberg-Richter.

I parametri c_1 , c_2 e c_3 dipendono dalla legge di attenuazione sismica scelta, avente la seguente forma:

$$\ln(a_{\max}) = c_1 + c_2 M - c_3 \ln(R^2 + h^2)$$

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Di seguito vengono riportati i valori relativi di c1, c2, c3 e h di alcune delle curve di attenuazione più usate o significative.

Metodo	c1	c2	c3	h
Pugliese e Sabetta (1987) <i>Sito con copertura profonda o rigido</i>	-3.2075	0.8358	0.5	5.0
Pugliese e Sabetta (1987) <i>Sito con copertura sottile</i>	-4.2483	0.8358	0.5	5.0
Cauzzi e Faccioli (2008) <i>Categoria sottosuolo EC8 A</i>	-5.2676	1.2802	0.791	5.0
Cauzzi e Faccioli (2008) <i>Categoria sottosuolo EC8 B</i>	-4.7610	1.2802	0.791	5.0
Cauzzi e Faccioli (2008) <i>Categoria sottosuolo EC8 C</i>	-4.5676	1.2802	0.791	5.0
Cauzzi e Faccioli (2008) <i>Categoria sottosuolo EC8 D</i>	-4.5031	1.2802	0.791	5.0
Ambraseys et al.(1996) <i>roccia</i>	-3.4078	0.6125	0.461	3.5
Ambraseys et al.(1996) <i>terreni compatti</i>	-3.1384	0.6125	0.461	3.5
Ambraseys et al.(1996) <i>terreni soffici</i>	-3.1223	0.6125	0.461	3.5
Ambraseys et al.(1996) <i>terreni molto soffici</i>	-2.8529	0.6125	0.461	3.5
Wang et al. (1999)	0.9901- 0.01105R- 6.8886	0.9855	0.382	0.0

La relazione (1) vale solo per una sorgente puntiforme. Al fine di considerare il contributo di una superficie circolare, di area totale S e di raggio R₀, centrata sul sito di indagine, in cui ricade il sito, la probabilità di

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

non superamento di uno specifico valore di accelerazione sismica a_g assume la seguente forma:

$$P[a \leq a_g] = \exp \left\{ -\frac{\nu}{E \cdot A} \left[C \cdot G \cdot \exp \left(-\beta \frac{a_g}{c_2} \right) - (1 - E)A \right] \right\}$$

dove:

$$E = 1 - \exp[-\beta(m_1 - m_0)]$$

$$A = R_0^2$$
$$G = \frac{1}{\gamma} (R_0^2 + h^2)^\gamma$$

Il periodo di ritorno dell'evento di riferimento è dato da:

$$T = \frac{1}{1 - P[a \leq a_g]}$$

Analisi storico-statistica

Si basa sulla costruzione di una curva frequenza-accelerazione, analoga a quella di Gutenberg-Richter relativa alla magnitudo.

1) Si effettua l'estrazione degli eventi sismici dal catalogo dei terremoti ricadenti all'interno dell'area di riferimento. Si stima, quindi, applicando un'adeguata legge di attenuazione, il valore di accelerazione sismica risentito nel sito di riferimento per ogni evento estratto dal catalogo

2) Si fissa un intervallo di accelerazione sismica di calcolo, scegliendo un'opportuno valore di soglia inferiore (a_0), per esempio 0.03, e un valore di soglia superiore (a_1) stimabile, prendendo la massima accelerazione rilevata negli eventi storici incrementata di 0.01.

3) Si suddivide l'intervallo $a_1 - a_0$ in un adeguato numero di sottointervalli e per ogni intervallo si stima la frequenza degli eventi con la relazione:

$$\nu(a_g) = \frac{N}{Tempo}$$

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

dove la grandezza Tempo indica il numero di anni compresi nell'estratto dal catalogo dei terremoti.

4) Si procede calcolando le frequenze relative a tutti gli intervalli di accelerazione considerati, disponendole poi in un grafico, con, lungo l'asse delle ascisse, il valore dell'accelerazione a , lungo l'asse delle ordinate, il logaritmo in base dieci delle frequenze.

☞ S'interpolano quindi i dati del logaritmo della frequenza in funzione dell'accelerazione, con il metodo dei minimi quadrati, per ricavare i parametri a e b della curva:

$$\log(\nu) = a - b \cdot a_g$$

Ricordando che la frequenza è il reciproco del tempo, la curva frequenza-accelerazione può essere utilizzata per ottenere il valore di accelerazione sismica in funzione di uno specifico tempo di ritorno.

Rispetto al metodo storico-statistico, quello di Cornell tende ad essere meno conservativo nel caso di eventi con tempi di ritorno plurisecolari.

Parametri sismici legati all'accelerogramma

Oltre all'accelerazione di picco (PGA), la severità di un sisma può essere valutata, calcolando una serie di parametri aggiuntivi direttamente correlabili con il livello di danno osservato nei terremoti storici.

☐ Intensità di Arias

L'Intensità di Arias (1970) rappresenta un indice proporzionale all'energia liberata dal sisma. E' di fatto l'integrale del quadrato dell'accelerazione esteso a tutta la durata T dell'accelerogramma:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^T a^2(t) dt$$

☐ Fattore di Saragoni

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Viene definito come il rapporto fra l'Intensità di Arias e il quadrato del numero di attraversamento dello zero da parte del segnale sismico per unità di tempo (v_0):

$$P_D = \frac{Ia}{v_0^2}$$

Durata significativa

E' l'intervallo di tempo compreso fra il 5% e il 95% del totale dell'Intensità di Arias.

Velocità assoluta cumulata

E' l'integrale del valore assoluto dell'accelerazione esteso alla durata totale T dell'accelerogramma:

$$CAV = \int_0^T |a(t)| dt$$

Spostamento assoluto cumulato

E' l'integrale del valore assoluto della velocità esteso alla durata totale T dell'accelerogramma:

$$CAD = \int_0^T |v(t)| dt$$

Indice di Fajfar

E' definito come il prodotto fra la velocità di picco (PGV) e la durata significativa t_d elevata a 0,25:

$$F_i = PGV t_d^{0.25}$$

Caratterizzazione del sito da un punto di vista sismico.

Caratterizzazione del terreno

Per la classificazione del sito è necessario conoscere le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo dell'area indagata. In particolare devono essere noti:

- il numero e lo spessore degli strati di copertura, cioè dei livelli sovrastanti il bedrock o il bedrock-like, intendendo con questi termini l'eventuale substrato roccioso (bedrock) o uno strato sciolto (bedrock-like) con velocità delle onde S nettamente maggiore dei livelli superiori (e generalmente con valori oltre i 500-800 m/s);
- la velocità delle onde S negli strati di copertura.

La caratterizzazione può essere effettuata, utilizzando indagini geofisiche (sismica a rifrazione, prove downhole e crosshole, cono sismico, MASW, ReMi, HVSR, ecc.) o, in assenza di queste, attraverso prove penetrometriche dinamiche (SPT) o statiche (CPT)

Caratterizzazione del terreno attraverso prove penetrometriche dinamiche (SPT).

□ Otha e Goto (1978)

La relazione di Otha e Goto (1978), consigliata dal Manuale internazionale TC4 per la zonazione dei rischi geotecnici, correla N_{spt} con V_s , tenendo conto sia dell'età del deposito che della sua granulometria dominante. Ha la seguente espressione:

$$V_s (m/s) = 68 N_{spt}^{0.17} D^{0.2} EF$$

dove $D(m)$ è la profondità media dello strato dal piano campagna, E è un fattore che tiene conto dell'età del deposito (Tabella I) e F è un coefficiente funzione della granulometria dominante dello strato (Tabella II).

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Età del deposito	Fattore E
Olocene	1.0
Pleistocene	1.3

Tabella I

Granulometria dominante	Coefficiente F
Argilla	1.00
Sabbia fine	1.09
Sabbia media	1.07
Sabbia grossa	1.14
Sabbia ghiaiosa	1.15
Ghiaia	1.45

Tabella II

□ Imai (1977)

La formula di Imai, valida per terreni sabbiosi o argillosi, ha la seguente forma:

$$V_s (m / s) = \alpha N_{spt}^\beta$$

dove α e β assumo i seguenti valori:

Litologia ed età	α	β
Argilla Olocene	102	0.29
Sabbia Olocene	81	0.33
Argilla Pleistocene	114	0.29
Sabbia Pleistocene	97	0.32

□ Lee (1990)

Valida per terreni olocenici, granulometricamente compresi fra le argille e le sabbie, ha la seguente forma:

$$V_s (m / s) = \alpha N_{spt}^\beta$$

dove α e β assumo i seguenti valori:

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Litologia	α	β
Argilla	114.4	0.31
Limo	105.6	0.32
Sabbia	57.4	0.49

□ Muzzi (1984)

Questa formula è stata calibrata su terreni italiani sabbiosi e argillosi di età olocenica. Ha la seguente forma:

$$V_s (m / s) = \alpha N_{spt}^\beta$$

dove α e β assumo i seguenti valori:

Litologia	α	β
Argilla	102	0.292
Sabbia	80.6	0.331

Caratterizzazione del terreno attraverso prove penetrometriche statiche (CPT).

□ Barrow e Stokoe (1983)

La relazione, valida per tutti i tipi di terreno, ha la seguente forma:

$$V_s (m / s) = \alpha + \beta q_c$$

dove α e β sono due coefficienti che valgono rispettivamente 50.6 e 2.1 e q_c è espresso in kg/cmq.

□ Mayne e Rix (1995)

La relazione di, valida per terreni coesivi, è la seguente:

$$V_s (m / s) = \alpha q_c^\beta$$

in cui α e β sono due coefficienti che valgono rispettivamente 1.75 e 0.627 e q_c è espresso in kPa.

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Classificazione del sito

Metodo basato sulla rigidità degli strati di copertura.

Proposto da Draft (1989) e adottato nel Chinese Aseismic Design Code for Structures, questo metodo propone una classificazione del sito basata sulla stima di un parametro, l'indice di sito, funzione del modulo di taglio medio e dello spessore degli strati di copertura. Il modulo di taglio medio viene stimato con la relazione:

$$G(kPa) = \frac{\sum_{i=1}^n h_i \frac{\gamma_i}{9.81} V_{si}^2}{\sum_{i=1}^n h_i}$$

in cui:

$h(m)$ = spessore dello strato i -esimo;

$\gamma(kN/mc)$ = peso di volume naturale dello strato i -esimo;

$V_s(m/s)$ = velocità delle onde S dello strato i -esimo;

n = numero degli strati di copertura.

Se lo spessore complessivo degli strati di copertura supera i 20 m vanno presi in considerazione nel calcolo solo i livelli fino a tale profondità. Secondo questo metodo va considerato come bedrock o bedrock-like qualsiasi livello con velocità delle onde S superiore a 500 m/s.

L'indice di sito viene quindi calcolato con la formula:

$$\mu = 0.6\mu_g + 0.4\mu_h$$

dove μ_g è il contributo del modulo di taglio medio all'indice di sito ed è fornito dalla relazione:

$$\mu_g = 1 - \exp[-0.66(G - 30000)10^{-5}] \quad \text{Se } G > 30000 \text{ kPa;}$$

$$\mu_g = 0 \quad \text{Negli altri casi;}$$

e μ_h è il contributo dovuto allo spessore della copertura ed è dato dalla relazione:

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

$$\mu_h = \exp\left[-0.916(H-5)^2 10^{-2}\right]$$

$$\mu_h = 0$$

Se $H > 80$ m

$$\mu_h = 1$$

Se $H \leq 5$ m

Dove H è lo spessore complessivo della copertura.

Nel caso in cui sia $G > 500000$ kPa e contemporaneamente $H \leq 5$ m bisogna porre $\mu_h = \mu_g = 1$.

La classificazione del sito si ottiene dalla seguente tabella:

Tipo di sito	Rigido	Med. rigido	Med. soffice	Soffice
Indice di sito	$1 > \mu > 0.9$	$0.9 > \mu > 0.3$	$0.3 > \mu > 0.1$	$0.1 > \mu > 0$

In generale il fenomeno dell'amplificazione sismica si accentua al diminuire dell'indice di sito.

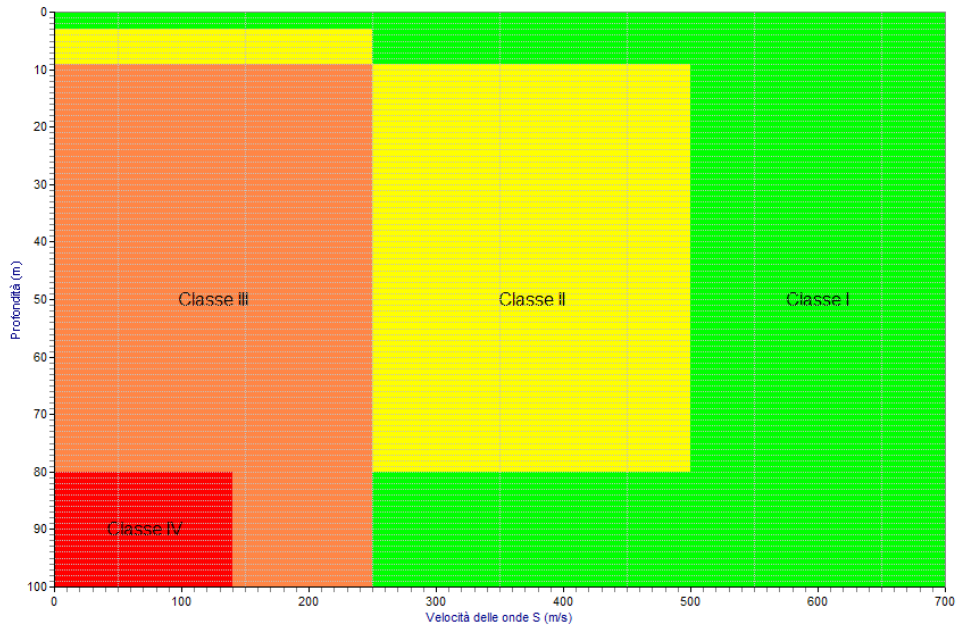
Metodo basato sulla velocità delle onde S negli strati di copertura.

Proposto dal Chinese Aseismic Design Code for Structures, questo metodo prevede una classificazione del sito basata sia sulla velocità media delle onde S nella copertura sia sullo spessore complessivo della stessa. La velocità media delle onde S viene calcolata come media armonica delle Vs dei singoli strati di copertura.

$$V_{sH} = \frac{H}{\sum_{i=1, N} \frac{h_i}{V_{si}}}$$

Lo spessore della copertura (H) viene calcolato partendo dal tetto del primo strato incontrato, dalla superficie, con velocità delle onde S superiore a 500 m/s. Nello schema seguente sono indicate le quattro classi di sito previste dal metodo.

PROGRAM GEO – Sisma ver.4



La classe viene determinata, incrociando la profondità del bedrock sull'asse delle ordinate con la Vs media della copertura lungo l'asse delle ascisse. In generale il fenomeno dell'amplificazione sismica si accentua passando dalla classe I alla classe IV.

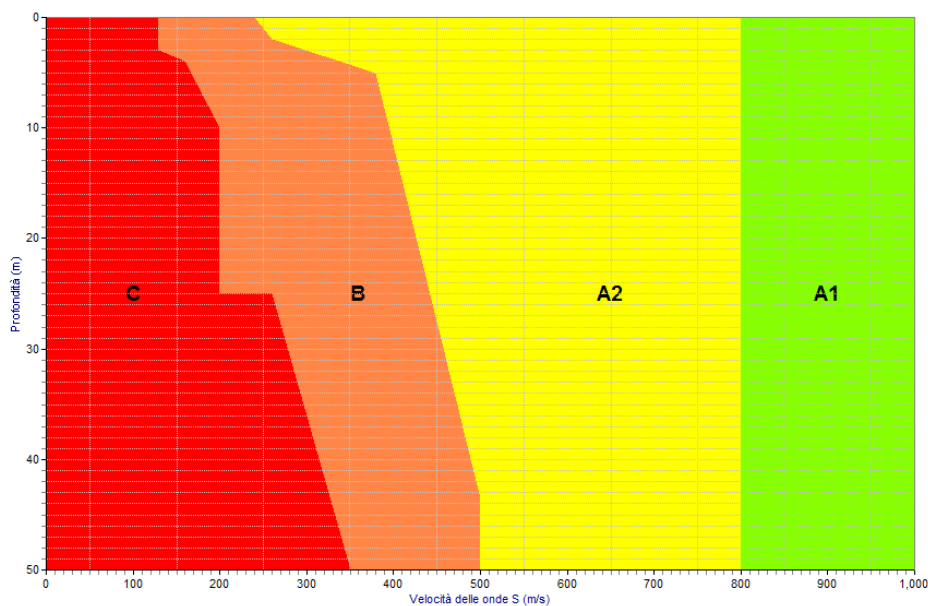
PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Metodo previsto dall'Eurocodice 8 (1994).

Anche nell'Eurocodice 8, nella versione del 1994, è prevista una classificazione del sito in funzione sia della velocità media delle onde S nella copertura che dello spessore H della stessa. La velocità media è calcolata con la seguente relazione:

$$V_{sH} = \frac{H}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{si}}}$$

Vengono identificate tre classi, la A (a sua volta suddivisa in due sottoclassi, la A1 e la A2), la B e la C, ad ognuna delle quali è associato uno spettro di risposta elastico. Lo schema indicativo di riferimento per la determinazione della classe del sito è il seguente:



La classe viene determinata, incrociando la profondità del bedrock sull'asse delle ordinate con la Vs media della copertura lungo l'asse delle ascisse. In generale il fenomeno dell'amplificazione sismica diventa più accentuato passando dalla classe A1 alla classe C.

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Metodo previsto dall'Eurocodice 8 (2003).

Vengono identificate 5 classi, A, B, C, D e E ad ognuna delle quali è associato uno spettro di risposta elastico. Lo schema indicativo di riferimento per la determinazione della classe del sito è il seguente:

Classe	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di V_{s30} superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} , compresi fra 360 m/s e 800 m/s ($N_{spt,30} > 50$ nei terreni a grana grossa o $cu_{30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi fra 180 e 360 m/s ($15 < N_{spt,30} < 50$ nei terreni a grana grossa, $70 < cu_{30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati oppure di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s30} < 180$ m/s ($N_{spt,30} < 15$ nei terreni a grana grossa, $cu_{30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	Terreni di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, giacenti su un substrato di riferimento ($V_{s30} > 800$ m/s).

Per V_{s30} s'intende la media pesata delle velocità delle onde S negli strati fino a 30 metri di profondità dal piano di posa della fondazione, calcolata secondo la relazione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{si}}}$$

Analogamente per $N_{spt,30}$ e cu_{30} :

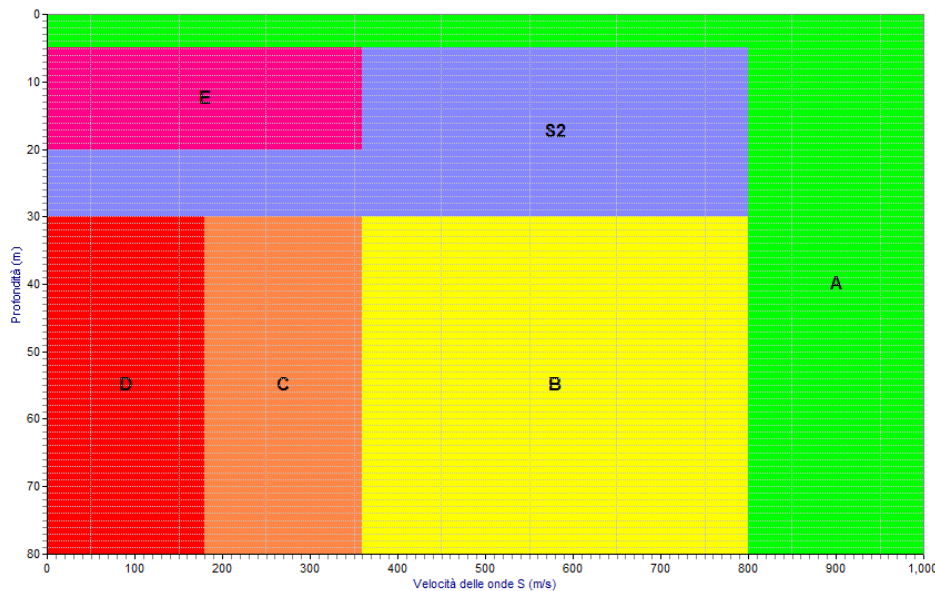
$$N_{spt,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{N_{spt,i}}}$$

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

$$cu_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{cu_i}}$$

Nel caso non siano disponibili le misure di Vs per i primi 30 metri e i terreni siano costituiti da alternanze di terreni a grana grossa e fina, si procede calcolando le classi corrispondenti per $N_{spt,30}$ e cu_{30} , assumendo quindi la classe peggiore fra le due calcolate.

In generale il fenomeno dell'amplificazione sismica diventa più accentuato passando dalla classe A alla classe D.



La classe viene determinata, incrociando la profondità del bedrock sull'asse delle ordinate con la Vs media della copertura lungo l'asse delle ascisse.

Alle cinque categorie descritte se ne aggiungono altre due per le quali sono richiesti studi speciali per la definizione dell'azione sismica da considerare.

Classe	Descrizione
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di V_{s30} inferiori a 100 m/s (o $10 < cu_{30} < 20$), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o argille altamente organiche.
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria non rientrante nelle classi precedenti.

Stima del periodo di risonanza fondamentale del terreno.

Il periodo di risonanza fondamentale del terreno T può essere misurato direttamente, per esempio attraverso la tecnica HVSR, o stimato attraverso correlazioni empiriche.

- Correlazione empirica basata sulla media pesata delle Vs.

Il valore di T può essere stimato passando attraverso il calcolo della media pesata delle Vs all'interno del terreno di copertura:

$$\overline{V_s} = \frac{\sum_{i=1,N} V_{si} h_i}{H} \quad T = \frac{4H}{\overline{V_s}}$$

in cui H è lo spessore della copertura e Vs_i e h_i rispettivamente la velocità delle onde S e lo spessore dello strato i-esimo.

- Correlazione empirica basata sulla media pesata delle rigidezze e delle densità.

Il valore di T può essere stimato passando attraverso il calcolo della media pesata di G₀ (modulo di taglio per basse deformazioni) e di ρ (densità dello strato, dato dal rapporto fra il peso di volume e l'accelerazione di gravità g: ρ=γ/g) all'interno del terreno di copertura:

$$\overline{G_0} = \frac{\sum_{i=1,N} G_{0i} h_i}{H} \quad \overline{\rho} = \frac{\sum_{i=1,N} \rho_i h_i}{H} \quad T = \frac{4H}{\sqrt{\frac{\overline{G_0}}{\overline{\rho}}}}$$

in cui H è lo spessore della copertura.

- Correlazione empirica basata sulla somma dei periodi naturali di ogni strato.

Il valore di T può essere stimato, eseguendo la sommatoria dei periodi di risonanza fondamentale di ogni singolo strato lungo la verticale.

$$T = \sum_{i=1,N} 4 \frac{h_i}{V_{si}}$$

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

in cui H è lo spessore della copertura.

□ Correlazione empirica basata sull'approccio di Rayleigh semplificato.

La relazione è la seguente:

$$\omega = \sqrt{\frac{4 \sum_{i=1,N} \frac{(H - Z_i)^2}{V_{si}^2} h_i}{\sum_{i=1,N} (X_i + X_{i+1})^2 h_i}} \quad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

dove:

$X_{i+1} = X_i + \frac{H - Z_i}{V_{si}^2} h_i$ e $X_1 = 0$, in cui H-Z_i è la profondità media dello strato i-esimo.

Stima dell'amplificazione sismica.

Fattori geomorfologici e stratigrafici locali possono modificare le caratteristiche del moto sismico, filtrando le onde nel passaggio dal bedrock alla superficie. L'effetto di filtraggio conduce a una redistribuzione dell'energia con l'amplificazione del moto vibratorio associato ad alcune frequenze. Esistono diverse metodologie per la stima dell'amplificazione sismica in superficie. Alcune sono basate sull'uso di modelli numerici 1D e 2D, che, partendo da l'input sismico, forniscono la funzione di trasferimento del moto dal bedrock alla superficie. Si tratta di modelli che richiedono un input accurato, sia per quanto riguarda le caratteristiche geotecniche del terreno, sia per quanto riguarda il moto sismico di riferimento. Sono note in letteratura però metodologie più speditive, basate sulle caratteristiche lito-stratigrafiche del sito e sulla stima della velocità delle onde S nei livelli di copertura. Si tratta di metodi di analisi di II livello, secondo la definizione data nel Manuale Internazionale TC4.

Effetti stratigrafici: metodi di II livello.

Metodo di Midorikawa (1987)

Si tratta di un metodo consigliato nel Manuale TC4 per microzonazioni di II livello. Il fattore di amplificazione relativa per il picco di accelerazione (PGA) è fornito dalla relazione:

$$F_a = 68V_s^{-0.6} \text{ per } V_s < 1100 \text{ m/s}$$
$$F_a = 1 \text{ per } V_s \geq 1100 \text{ m/s}$$

dove V_s è la velocità media pesata delle onde S degli strati fino ad una profondità massima di 30 metri. Questo vuol dire che nel caso il bedrock, qui individuato da una velocità limite di 1100 m/s, si trovi ad una profondità superiore a 30m, va considerata solo la media delle velocità degli strati compresi fra le profondità 0 e 30 m.

Il valore dell'accelerazione di picco in superficie è dato dalla:

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

$$PGA(g) = a_{bedrock} F_a$$

dove $a_{bedrock}$ è l'accelerazione sismica nel bedrock.

Questo metodo non tiene conto degli effetti di amplificazione dovuti a irregolarità topografiche o del substrato.

Metodo di Boore e Atkinson (2008)

I fattori di amplificazione relativi all'accelerazione e alla velocità sismica di picco sono dati da:

$$F_a = F_L + F_{NL}$$

dove:

F_L = termine lineare del fattore di amplificazione;

F_{NL} = termine non lineare del fattore di amplificazione.

Il termine lineare si ottiene con la seguente relazione:

$$F_L = b_{lin} \ln(V_{s30}/V_{ref})$$

in cui:

b_{lin} = coefficiente uguale a -0.360 per la PGA e a -0.600 per la PGV;

V_{ref} = velocità delle onde S nel bedrock; Boore e Atkinson pongono

$$V_{ref} = 760 \text{ m/s}$$

V_{s30} = media pesata delle velocità delle onde S negli strati di copertura entro i primi 30 m di profondità.

Il termine non lineare, che in prima approssimazione può anche essere trascurato, è dato da:

$$(a) \quad pga_{4nl} \leq a_1 :$$

$$F_{NL} = b_{nl} \ln(pga_{low} / 0.1)$$

$$(b) \quad a_1 < pga_{4nl} \leq a_2 :$$

$$F_{NL} = b_{nl} \ln(pga_{low} / 0.1) + c[\ln(pga_{4nl} / a_1)]^2 + d[\ln(pga_{4nl} / a_1)]^3$$

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

(c) $a_2 < pga4nl :$

$$F_{NL} = b_{nl} \ln(pga4nl / 0.1)$$

in cui

pga4nl = accelerazione sismica al bedrock;

$a_1 = 0.03$ g accelerazione di soglia per l'amplificazione lineare;

$a_2 = 0.09$ g accelerazione di soglia per l'amplificazione non lineare;

pga_low = 0.06 g limite fra comportamento lineare e non;

b_{nl} = coefficiente per il termine non lineare, ricavabile come segue:

(a) $V_{S30} \leq V_1 :$

$$b_{nl} = b_1 .$$

(b) $V_1 < V_{S30} \leq V_2 :$

$$b_{nl} = (b_1 - b_2) \ln(V_{S30} / V_2) / \ln(V_1 / V_2) + b_2 .$$

(c) $V_2 < V_{S30} < V_{ref} :$

$$b_{nl} = b_2 \ln(V_{S30} / V_{ref}) / \ln(V_2 / V_{ref}) .$$

(d) $V_{ref} \leq V_{S30} :$

$$b_{nl} = 0.0 .$$

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

dove:

$$V_1 = 180 \text{ m/s};$$

$$V_2 = 360 \text{ m/s};$$

$$b_1 = -0.640 \text{ per la PGA e } -0.500 \text{ per la PGV};$$

$$b_2 = -0.14 \text{ per la PGA e } -0.06 \text{ per la PGV}.$$

Infine i coefficienti c e d sono dati da:

$$c = (3\Delta y - b_{ni} \Delta x) / \Delta x^2$$

$$d = -(2\Delta y - b_{ni} \Delta x) / \Delta x^3$$

in cui:

$$\Delta x = \ln(a_2 / a_1)$$

$$\Delta y = b_{ni} \ln(a_2 / pga_low).$$

Effetti stratigrafici: metodi di III livello.

Propagazione in direzione verticale di un'onda di taglio in un modello stratigrafico monodimensionale.

Un'onda di taglio di frequenza angolare ω che si propaga verso l'alto causa spostamenti orizzontali nel terreno $u(z,t)$ che devono soddisfare l'equazione differenziale:

$$(1) \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t}$$

dove ρ è la densità di massa del terreno (peso di volume diviso l'accelerazione di gravità g), G il modulo dinamico di taglio e η la viscosità del mezzo.

Lo spostamento u , indotto dalla sollecitazione armonica di frequenza ω , può anche essere espresso nella forma:

$$(2) u(z,t) = U(z)e^{i\omega t}$$

Sostituendo la (2) nella (1) si ottiene:

$$(3) (G + i\omega\eta) \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \rho\omega^2 U$$

L'equazione (3) ha la seguente soluzione generale :

$$(4) U(z) = Ee^{ikz} + Fe^{-ikz}$$

in cui:

$$k = \sqrt{\frac{\rho\omega^2}{G^*}}$$

G^* è il modulo di taglio complesso dato dalla relazione:

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

$$G^* = G(1 + 2i\beta)$$

e β è il fattore di smorzamento critico del terreno, così definito:

$$\beta = \frac{\omega\eta}{2G}$$

Nella relazione (4) E rappresenta l'ampiezza dell'onda incidente, cioè diretta verso l'alto, e F l'ampiezza dell'onda riflessa dall'interfaccia dello strato, e quindi diretta verso il basso.

Combinando la (2) e la (4) si ricava:

$$(5) u(z, t) = (Ee^{ikz} + Fe^{-ikz})e^{i\omega t}$$

In un terreno composto da più strati, al tetto dello strato n-esimo di spessore h si ha:

$$(6) u_n(z = 0) = (E_n + F_n)e^{i\omega t}$$

mentre alla base:

$$(7) u_n(z = h) = (E_n e^{ik_n h_n} + F_n e^{-ik_n h_n})e^{i\omega t}$$

Lo sforzo di taglio agente sul piano orizzontale all'interfaccia dello strato è dato dalla relazione:

$$\tau(z, t) = G^* \frac{\partial u}{\partial t}$$

Quindi in corrispondenza della faccia superiore dello strato n-esimo si ha:

$$(8) \tau_n(z = 0) = ik_n G_n^* (E_n + F_n)e^{i\omega t}$$

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

e in quella inferiore:

$$(9) \tau_n(z=h) = ik_n G_n^* (E_n e^{ik_n h_n} + F_n e^{-ik_n h_n}) e^{i\omega t}$$

La deformazione tangenziale ($\gamma(z,t) = \frac{\partial u}{\partial t}$) è invece ricavabile come segue:

$$\begin{aligned} \gamma_n(z=0) &= ik_n (E_n + F_n) e^{i\omega t} \\ \gamma_n(z=h) &= ik_n (E_n e^{ik_n h_n} + F_n e^{-ik_n h_n}) e^{i\omega t} \end{aligned}$$

In un terreno multistrato, in generale, i parametri ρ , G e β variano da strato a strato. Di conseguenza anche i valori di E e F tendono ad assumere valori differenti. Le ampiezze E e F dell'onda incidente e riflessa all'interfaccia dello strato $n+1$ rispetto allo strato n , posto ad una quota superiore, si possono ricavare dalle relazioni:

$$(10) E_{n+1} = \frac{1}{2} E_n (1 + \alpha_n) e^{ik_n h_n} + \frac{1}{2} F_n (1 - \alpha_n) e^{-ik_n h_n}$$

$$(11) F_{n+1} = \frac{1}{2} E_n (1 - \alpha_n) e^{ik_n h_n} + \frac{1}{2} F_n (1 + \alpha_n) e^{-ik_n h_n}$$

in cui:

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{\rho_n G_n^*}{\rho_{n+1} G_{n+1}^*}}$$

è il rapporto d'impedenza complesso fra gli strati n e $n+1$.

In superficie lo sforzo di taglio deve essere uguale a zero. Dalla relazione (8) si ricava quindi che al piano campagna $E_1=F_1$.

Ponendo per semplicità $E_1=F_1=1$ è possibile, utilizzando le relazioni (10) e (11) calcolare i valori di E e F per tutti gli strati di copertura, partendo dalla superficie fino al bedrock.

La funzione di trasferimento fra gli spostamenti dello strato n e lo strato $n+1$, più profondo, è definita come segue:

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

$$(12) A_{n+1,n}(\omega) = \frac{u_n}{u_{n+1}} = \frac{E_n + F_n}{E_{n+1} + F_{n+1}}$$

In corrispondenza dell'interfaccia superiore del bedrock $E'=F'$ (sforzo di taglio nullo). Di conseguenza la relazione che fornisce la funzione di trasferimento dell'onda di taglio in superficie rispetto al substrato roccioso (fattore di amplificazione dinamica) è data dalla relazione:

$$(13) A_{bedrock,1}(\omega) = \frac{1}{E_{bedrock}}$$

Stima del moto sismico in superficie.

La procedura di calcolo vista nel paragrafo precedente si riferisce al caso di una singola onda di taglio di frequenza angolare ω . In linea di massima il fattore di amplificazione varia in funzione di ω , come si deduce dalla relazione (3).

Un accelerogramma si compone di una sequenza di valori di accelerazione a , registrati o simulati numericamente, all'interno di un intervallo di tempo T . I valori di a sono campionati con un passo costante Δt , detto intervallo di campionamento, di solito compreso fra 0,01 e 0,02 secondi. La durata dell'evento sismico è dato quindi da:

$$(14) T(s) = n\Delta t$$

dove n è il numero complessivo degli intervalli di campionamento.

Un impulso sismico, memorizzato in forma di accelerogramma, può essere visto come la somma finita di una serie di onde taglio con differenti frequenze angolari ω e quindi può essere espresso sottoforma di trasformata discreta di Fourier.

$$(15) a(t) = \sum_{j=0}^{j=n/2} (a_j e^{i\omega_j t} + b_j e^{-i\omega_j t})$$

in cui $n/2$ sono le frequenze angolari equidistanti date da:

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

$$\omega_j = \frac{2\pi}{n\Delta t} j$$

I parametri a e b , funzioni di ω , prendono il nome di coefficienti complessi e sono forniti dalle relazioni:

$$(16) a_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} a(t) e^{-i\omega_j t}$$

$$(17) b_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} a(t) e^{i\omega_j t}$$

I valori di a e b si ricavano, applicando l'algoritmo della trasformata veloce di Fourier (FFT) alla (15).

Poiché sia a che b sono numeri complessi, solitamente il loro andamento in funzione della frequenza viene rappresentato graficamente come spettro delle ampiezze di Fourier, ponendo, in ascissa, gli $n/2$ valori di ω e in ordinata i corrispondenti valori di ampiezza, dati da:

$$(18) |F(\omega)|_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2}$$

Applicando agli $n/2$ valori di ω il calcolo del fattore di amplificazione illustrato nel paragrafo precedente, è possibile costruire graficamente l'andamento della funzione di trasferimento, espressa dalla (13), in funzione della frequenza (grafico della funzione di trasferimento).

Se la (15) rappresenta l'accelerogramma registrato al bedrock, quello in superficie avrà la seguente forma:

$$(19) a_{\text{superficie}}(t) = \sum_{j=0}^{j=n/2} A_{\text{bedrock},1}(\omega_j) (a_j e^{i\omega_j t} + b_j e^{-i\omega_j t})$$

In pratica, quindi, i valori di a e b calcolati per il bedrock con l'algoritmo FFT devono essere moltiplicati per i fattori di amplificazione corrispondenti allo stessa frequenza ω , per ricavare i parametri a e b della trasformata

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

discreta di Fourier dell'accelerogramma di superficie. I valori di $a_{\text{superficie}}$ per la durata T dell'evento sismico si ottengono quindi, applicando l'algoritmo della trasformata veloce inversa di Fourier (IFFT) alla (19).

Stima dell'amplificazione con il modello lineare equivalente.

La procedura di calcolo illustrata nel paragrafo precedente è applicabile anche nel caso in cui il comportamento del terreno non sia lineare. La procedura da seguire è quella indicata di seguito.

1. Si stima la risposta sismica di ogni singolo strato, introducendo inizialmente i valori G_0 e β_0 , validi per basse deformazioni.
2. Si calcola la deformazione tangenziale indotta dal sisma e si aggiornano i valori di G e β sulla base delle curve $G(\gamma)$ e $\beta(\gamma)$ ricavate in precedenza. Si ripetono i passi 1 e 2 fino a quando le differenze nei valori della deformazione tangenziale calcolati in due iterazioni successive diventa inferiore ad un valore di tolleranza prestabilito.

Determinazione dei parametri geotecnici dinamici del terreno.

Nell'equazione differenziale (1) compaiono alcuni parametri caratteristici del terreno. Oltre al peso di volume, di semplice determinazione, la risoluzione della (1) richiede la conoscenza, per ogni strato, delle grandezze G , modulo dinamico di taglio, e η , viscosità del mezzo. Quest'ultimo viene sostituito solitamente dal parametro $\beta = \frac{\omega\eta}{2G}$, fattore di smorzamento dello strato.

G e β dipendono dalla deformazione tangenziale (γ) che subisce il terreno al passaggio di un'onda di taglio di frequenza data. In particolare G assume un valore massimo (G_0) per valori bassi o nulli di γ . Al crescere di γ il valore di G tende a diminuire secondo una tipica curva di decadimento. Al contrario β in corrispondenza di ridotti valori di γ assume il suo valore minimo (β_0) e cresce quindi all'aumentare di γ secondo una tipica curva d'incremento fino al raggiungimento del suo valore massimo (β_{max}). Sia G_0 che β_{max} , e le relative curve di decadimento e incremento, possono essere dedotte direttamente attraverso specifiche prove di laboratorio (colonna risonante).

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Stima delle curve $G(\gamma)$ e $\beta(\gamma)$ da correlazioni empiriche.

Nella scelta dei parametri G e β da inserire nel calcolo del fattore di amplificazione va tenuto presente il loro comportamento non lineare al variare della deformazione tangenziale indotta dal sisma. Solo in presenza di sollecitazioni sismiche di bassa intensità, con valori di PGA (accelerazione di picco) indicativamente inferiori a 0,1 g, è appropriato l'uso esclusivo dei parametri G_0 e β_0 (modello lineare). Per terremoti di intensità maggiore la non linearità di G e β non può essere trascurata.

Nasce quindi il problema della determinazione delle curve $G(\gamma)$ e $\beta(\gamma)$ per i singoli strati costituenti il modello di terreno in esame. Nella pratica vengono spesso utilizzate le curve proposte da Hardin e Drnevich (1972). Le curve di decadimento di G e quella d'incremento di β secondo gli Autori possono essere approssimate dalle relazioni:

$$G(\gamma) = \frac{G_0}{1 + \gamma_h}$$
$$\beta(\gamma) = \frac{\beta_{\max} \gamma_h}{1 + \gamma_h}$$

Il parametro γ_h delle curve è ricavabile dalla formula:

$$\gamma_h = \frac{\gamma}{\gamma_r} \left(1 + A e^{-B \frac{\gamma}{\gamma_r}} \right)$$

dove γ_r è dato da τ_{\max}/G_0 e A e B sono grandezze ottenibili dalla seguente tabella:

Litologia	A	B
Sabbia asciutta	-0,5	0,16
Sabbia satura	$-0,21 \text{Log}_{10} N$	0,16
Terreni coesivi	$1+0,25 \text{Log}_{10} N$	1,30

in cui N è il numero di cicli di carico indotti dal sisma.

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

La grandezza τ_{max} , che rappresenta lo sforzo di taglio massimo dinamico mobilabile dal terreno, può essere ottenuto dalla seguente correlazione empirica:

$$\tau_{max} (MPa) = F \left\{ \left[\frac{1+k_0}{2} \sigma_0 \sin \varphi + c \cos \varphi \right]^2 - \left[\frac{1-k_0}{2} \sigma_0 \right]^2 \right\}^{1/2}$$

dove:

F = fattore correttivo funzione della litologia e del grado di saturazione:

F=1,10-1,15 (sabbie asciutte)

F=1,5-1,3 (terreni coesivi saturi)

F=1,5-2,0 (terreni coesivi parzialmente saturi).

C (Mpa) = coesione drenata del terreno.

φ (°) = angolo di resistenza al taglio del terreno.

K_0 = coefficiente di spinta a riposo del terreno.

σ_0 (Mpa) = pressione verticale efficace media.

In alternativa alle curve di Hardin e Drnevich è possibile utilizzare quelle suggerite da Seed e Idriss (1970,1990) e da Rollins et al. (1998).

Argille (Seed e Idriss)

γ (%)	G/G ₀	β (%)
0,0001	1	0,24
0,0003	1	0,42
0,001	1	0,8
0,003	0,981	1,4
0,01	0,941	2,8
0,03	0,847	5,1
0,1	0,656	9,8
0,3	0,438	15,5
1	0,238	21
3	0,144	25
10	0,11	28

Sabbie (Seed e Idriss)

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

γ (%)	G/G_{max}	β (%)
0,0001	1	0,24
0,0003	1	0,42
0,001	0,99	0,8
0,003	0,96	1,4
0,01	0,85	2,8
0,03	0,64	5,1
0,1	0,37	9,8
0,3	0,18	15,5
1	0,08	21
3	0,05	25
10	0,035	28

Substrato roccioso(Seed e Idriss)

γ (%)	G/G_{max}	β (%)
0,0001	1	0,4
0,0003	1	0,8
0,001	0,9875	1,5
0,003	0,9525	3
0,01	0,9	4,6
0,03	0,81	
0,1	0,725	
1	0,55	

Ghiaie con ciottoli-ghiaie con sabbia (Rollins)

γ (%)	G/G_{max}	β (%)
0,0001	1	1
0,0003	1	1
0,001	0,96	1,5
0,003	0,88	2,1
0,01	0,75	4
0,03	0,55	7
0,1	0,33	11
0,3	0,19	14
1	0,05	17

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Argille con ghiaia-argille limose (Rollins)

γ (%)	G/G_{\max}	β (%)
0,0001	1	2
0,0003	1	2
0,001	0,97	2,1
0,003	0,95	2,2
0,01	0,88	3
0,03	0,70	4,5
0,1	0,37	10
0,3	0,15	17
1	0,05	25

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Effetti topografici: metodi di II livello.

Metodo dell'Eurocodice 8 (2003).

Il fattore di amplificazione topografico S_t si ottiene direttamente dalla seguente tabella:

Categoria topografica	Caratteristiche della superficie topografica	Ubicazione opera o dell'intervento	S_t
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$	-	1.00
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$	sommità del pendio	1.20
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$	cresta del rilievo	1.20
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$	cresta del rilievo	1.40

Il parametro S_t assume valore unitario al piede del versante e il valore massimo sulla sommità, crescendo in maniera lineare. Va applicato solo nel caso di pendii con altezza H superiore a 30 m.

Spettri di risposta elastici semplificati.

Stima dello spettro di risposta elastico.

Nell'analisi sismica delle strutture si utilizza spesso come riferimento il moto di un oscillatore elastico ad un grado di libertà. Tale oscillatore, posto sul terreno in condizioni iniziali di quiete [$y(0)=0$] e sollecitato successivamente dal sisma di progetto, subirà uno spostamento y nel tempo che potrà essere descritto dalla seguente relazione:

$$y(t) = -\frac{1}{\omega_d} \int_0^t a(\tau) e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \text{sen}[\omega_d(t-\tau)] d\tau$$

in cui l'integrale al secondo membro prende il nome di integrale di Duhamel e dove:

- ζ = fattore di smorzamento dell'oscillatore, normalmente minore di 0,1 (10 %) e di solito posto uguale a 0,05 (5%);
- ω_n = periodo di oscillazione naturale, dato da $2\pi/T$;
- ω_d = periodo di oscillazione smorzata, dato da $\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$.

Un edificio sottoposto a sollecitazione sismica entra in oscillazione con un periodo che dipende dalle sue caratteristiche strutturali e geometriche. Esistono più modalità di vibrazione, ma nei casi più frequenti viene preso in considerazione solo il primo modo (T_0), detto anche modo fondamentale. L'importanza dello Spettro di Risposta Elastico del terreno deriva dal fatto che se, durante un evento sismico, il terreno vibra con periodo che corrisponde a T_0 , l'edificio entra in risonanza e subisce un'accelerazione sismica data dal valore di $a(g)$ letto in ordinata nello spettro in corrispondenza del periodo T_0 .

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Spettri di risposta elastica secondo l'Eurocodice 8.

Nell'Eurocodice 8 viene proposto uno spettro di risposta elastico dell'accelerazione, per la componente orizzontale del moto, caratterizzato dal seguente andamento:

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]$$

dove la grandezza a_g esprime l'accelerazione orizzontale di picco nel bedrock in g, mentre i periodi T_B , T_C e T_D sono ricavabili dalle seguenti tabelle, in funzione della magnitudo delle onde di superficie (M_S) presa come riferimento:

Ground type	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

Tipo 1 ($M_S > 5.5$)

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Ground type	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,05	0,25	1,2
B	1,35	0,05	0,25	1,2
C	1,5	0,10	0,25	1,2
D	1,8	0,10	0,30	1,2
E	1,6	0,05	0,25	1,2

Tipo 2 ($M_S \leq 5.5$)

Il parametro η è il fattore di correzione per lo smorzamento viscoso ed è dato da:

$$\eta = \left[\frac{10}{5 + \xi} \right]^{0.5} \geq 0.55.$$

S è il coefficiente di amplificazione stratigrafica, che, eventualmente, andrà moltiplicato per S_t il coefficiente di amplificazione topografico.

Lo spettro di risposta elastico delle accelerazioni per la componente verticale del moto, è invece descritta dalle seguenti relazioni:

$$0 \leq T \leq T_B : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 3,0 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right]$$

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

dove la grandezza a_{vg} esprime l'accelerazione verticale di picco nel bedrock in g, mentre i periodi T_B , T_C e T_D sono ricavabili dalle seguenti tabelle, in funzione della magnitudo delle onde di superficie (M_S) presa come riferimento:

Spectrum	a_{vg}/a_g	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
Type 1	0,90	0,05	0,15	1,0
Type 2	0,45	0,05	0,15	1,0

Tipo 1 ($M_S > 5.5$) - Tipo 2 ($M_S \leq 5.5$)

Spettri di risposta elastica attraverso l'applicazione di equazioni per la predizione del moto nel sottosuolo (GMPEs): Boore e Atkinson (2008).

Le GMPEs (Ground Motion Prediction Equations) sono relazioni empiriche che mettono in relazione un parametro sismico, normalmente la PGA, la PGV o le accelerazioni spettrali, con la magnitudo e la distanza, epicentrale, ipocentrale o della faglia, del sisma.

La relazione di Boore e Atkinson si basa sulla seguente equazione:

$$\ln Y = F_M(\mathbf{M}) + F_D(R_{JB}, \mathbf{M}) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, \mathbf{M}) + \varepsilon\sigma_T,$$

dove le funzioni F_M , F_D e F_S rappresentano, rispettivamente, le funzioni di scalatura del parametro sismico Y relativamente alla magnitudo del sisma, alla distanza e all'amplificazione stratigrafica. M è la magnitudo momento del sisma, R_{JB} è la distanza di Joiner-Boore, definita come la distanza minima fra il sito esaminato e la proiezione in superficie della faglia, che, nel caso $M < 6$, corrisponde in pratica alla distanza epicentrale, e V_{S30} è la media pesata della velocità delle onde S nei primi 30 m di profondità. Il parametro ε indica la distanza, in termini di deviazione standard, di un singolo valore di $\ln Y$ dal valore medio di $\ln Y$; σ_T è una grandezza funzione dell'incertezza insita nei dati sperimentali impiegati per la definizione della GMPEs.

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

La funzione F_M è data da:

(a) $\mathbf{M} \leq \mathbf{M}_h$

$$F_M(\mathbf{M}) = e_1U + e_2SS + e_3NS + e_4RS + e_5(\mathbf{M} - \mathbf{M}_h) + e_6(\mathbf{M} - \mathbf{M}_h)^2$$

(b) $\mathbf{M} > \mathbf{M}_h$

$$F_M(\mathbf{M}) = e_1U + e_2SS + e_3NS + e_4RS + e_7(\mathbf{M} - \mathbf{M}_h)$$

dove:

M_h = magnitudo cardine, parametro funzione del periodo spettrale T;

$e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7$ = coefficienti funzione del periodo spettrale;

U, SS, NS, RS = grandezze che possono assumere i valori 0 o 1 in funzione del tipo di faglia (U=non specificata, SS=trascorrente, NS=normale, RS=inversa) in base al seguente schema:

Fault Type	U	SS	NS	RS
unspecified	1	0	0	0
strike-slip	0	1	0	0
normal	0	0	1	0
thrust/reverse	0	0	0	1

La funzione F_D si ricava dalla seguente espressione:

$$F_D(R_{JB}, \mathbf{M}) = [c_1 + c_2(\mathbf{M} - \mathbf{M}_{ref})] \ln(R / R_{ref}) + c_3(R - R_{ref})$$

in cui:

$$R = \sqrt{R_{JB}^2 + h^2}$$

dove h, c_1 , c_2 , c_3 , M_{ref} a R_{ref} sono parametri funzione del periodo spettrale T.

$M_{ref} = 4.5$;

$R_{ref} = 1.0$.

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Infine, la funzione F_S viene ricavata con la procedura vista per la stima dell'amplificazione sismica secondo Boore e Atkinson.

Di seguito sono riportate le tabelle con i parametri funzione del periodo spettrale.

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

period	b_{in}	b_1	b_2
PGV	-0.600	-0.500	-0.06
PGA	-0.360	-0.640	-0.14
0.010	-0.360	-0.640	-0.14
0.020	-0.340	-0.630	-0.12
0.030	-0.330	-0.620	-0.11
0.050	-0.290	-0.640	-0.11
0.075	-0.230	-0.640	-0.11
0.100	-0.250	-0.600	-0.13
0.150	-0.280	-0.530	-0.18
0.200	-0.310	-0.520	-0.19
0.250	-0.390	-0.520	-0.16
0.300	-0.440	-0.520	-0.14
0.400	-0.500	-0.510	-0.10
0.500	-0.600	-0.500	-0.06
0.750	-0.690	-0.470	0.00
1.000	-0.700	-0.440	0.00
1.500	-0.720	-0.400	0.00
2.000	-0.730	-0.380	0.00
3.000	-0.740	-0.340	0.00
4.000	-0.750	-0.310	0.00
5.000	-0.750	-0.291	0.00
7.500	-0.692	-0.247	0.00
10.000	-0.650	-0.215	0.00

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

period	c_1	c_2	c_3	h
pga4nl	-0.55000	0.00000	-0.01151	3.00
PGV	-0.87370	0.10060	-0.00334	2.54
PGA	-0.66050	0.11970	-0.01151	1.35
0.010	-0.66220	0.12000	-0.01151	1.35
0.020	-0.66600	0.12280	-0.01151	1.35
0.030	-0.69010	0.12830	-0.01151	1.35
0.050	-0.71700	0.13170	-0.01151	1.35
0.075	-0.72050	0.12370	-0.01151	1.55
0.100	-0.70810	0.11170	-0.01151	1.68
0.150	-0.69610	0.09884	-0.01113	1.86
0.200	-0.58300	0.04273	-0.00952	1.98
0.250	-0.57260	0.02977	-0.00837	2.07
0.300	-0.55430	0.01955	-0.00750	2.14
0.400	-0.64430	0.04394	-0.00626	2.24
0.500	-0.69140	0.06080	-0.00540	2.32
0.750	-0.74080	0.07518	-0.00409	2.46
1.000	-0.81830	0.10270	-0.00334	2.54
1.500	-0.83030	0.09793	-0.00255	2.66
2.000	-0.82850	0.09432	-0.00217	2.73
3.000	-0.78440	0.07282	-0.00191	2.83
4.000	-0.68540	0.03758	-0.00191	2.89
5.000	-0.50960	-0.02391	-0.00191	2.93
7.500	-0.37240	-0.06568	-0.00191	3.00
10.000	-0.09824	-0.13800	-0.00191	3.04

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Period	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	M_R
pga4nl	-0.03279	-0.03279	-0.03279	-0.03279	0.29795	-0.20341	0.00000	7.00
PGV	5.00121	5.04727	4.63188	5.08210	0.18322	-0.12736	0.00000	8.50
PGA	-0.53804	-0.50350	-0.75472	-0.50970	0.28805	-0.10164	0.00000	6.75
0.010	-0.52883	-0.49429	-0.74551	-0.49966	0.28897	-0.10019	0.00000	6.75
0.020	-0.52192	-0.48508	-0.73906	-0.48895	0.25144	-0.11006	0.00000	6.75
0.030	-0.45285	-0.41831	-0.66722	-0.42229	0.17976	-0.12858	0.00000	6.75
0.050	-0.28476	-0.25022	-0.48462	-0.26092	0.06369	-0.15752	0.00000	6.75
0.075	0.00767	0.04912	-0.20578	0.02706	0.01170	-0.17051	0.00000	6.75
0.100	0.20109	0.23102	0.03058	0.22193	0.04697	-0.15948	0.00000	6.75
0.150	0.46128	0.48661	0.30185	0.49328	0.17990	-0.14539	0.00000	6.75
0.200	0.57180	0.59253	0.40860	0.61472	0.52729	-0.12964	0.00102	6.75
0.250	0.51884	0.53496	0.33880	0.57747	0.60880	-0.13843	0.08607	6.75
0.300	0.43825	0.44516	0.25356	0.51990	0.64472	-0.15694	0.10601	6.75
0.400	0.39220	0.40602	0.21398	0.46080	0.78610	-0.07843	0.02262	6.75
0.500	0.18957	0.19878	0.00967	0.26337	0.76837	-0.09054	0.00000	6.75
0.750	-0.21338	-0.19496	-0.49176	-0.10813	0.75179	-0.14053	0.10302	6.75
1.000	-0.46896	-0.43443	-0.78465	-0.39330	0.67880	-0.18257	0.05393	6.75
1.500	-0.86271	-0.79593	-1.20902	-0.88085	0.70689	-0.25950	0.19082	6.75
2.000	-1.22652	-1.15514	-1.57697	-1.27669	0.77989	-0.29657	0.29888	6.75
3.000	-1.82979	-1.74690	-2.22584	-1.91814	0.77966	-0.45384	0.67466	6.75
4.000	-2.24656	-2.15906	-2.58228	-2.38168	1.24961	-0.35874	0.79508	6.75
5.000	-1.28408	-1.21270	-1.50904	-1.41093	0.14271	-0.39006	0.00000	8.50
7.500	-1.43145	-1.31632	-1.81022	-1.59217	0.52407	-0.37578	0.00000	8.50
10.000	-2.15446	-2.16137	0.00000	-2.14635	0.40387	-0.48492	0.00000	8.50

Procedura per ottenere un spettro di risposta elastica adattato all'Eurocodice 8 secondo gli ICMS 2008.

Gli spettri di risposta generati partendo da un accelerogramma hanno solitamente un aspetto irregolare. E' ammissibile una regolarizzazione della forma, per semplificarne l'utilizzo, applicando comuni tecniche di smussamento (media mobile, media mobile esponenziale, ecc.).

Per generare uno spettro elastico semplificato, adattato all'Eurodice 8 si possono prendere come riferimento le coordinate del massimo assoluto dello spettro generato (T_{max} , PSA_{max}), usando, per la creazione dello spettro semplificato, i seguenti parametri (ICMS, 2008):

$$S=Fa;$$

$$St=1;$$

$$Tc=2\pi(Fv/Fa);$$

$$Tb=Tc/3;$$

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Td=2.0 o 1.2, in funzione del tipo di spettro (tipo 1 o tipo 2)

dove Fa e Fv sono i fattori di amplificazione stimati con il metodo ICMS.

I passaggi di calcolo per stimare Fa sono i seguenti:

1. si stima il valore del periodo T in corrispondenza del quale lo spettro delle accelerazioni al bedrock presenta il suo valore massimo (T_{max});
2. si calcola il valore medio delle ordinate dello spettro nell'intorno di T_{max} con la seguente relazione:

$$A_{medio} = \frac{1}{T_{max}} \int_{0,5T_{max}}^{1,5T_{max}} A(T) dT$$

3. si ripetono i passi 1 e 2 per lo spettro di risposta delle accelerazioni in superficie;
4. si calcola Fa facendo il rapporto fra A_{medio} in superficie e al bedrock:

$$Fa = \frac{A_{medio\ superfcie}}{A_{mediobedrock}}$$

I passaggi di calcolo per stimare Fv invece sono i seguenti:

5. si stima il valore del periodo T in corrispondenza del quale lo spettro delle velocità al bedrock presenta il suo valore massimo (T_{max});
6. si calcola il valore medio delle ordinate dello spettro nell'intorno di T_{max} con la seguente relazione:

$$V_{medio} = \frac{1}{T_{max}} \int_{0,8T_{max}}^{1,2T_{max}} V(T) dT$$

7. si ripetono i passi 1 e 2 per lo spettro di risposta delle accelerazioni in superficie;
8. si calcola Fv facendo il rapporto fra V_{medio} in superficie e al bedrock:

$$Fv = \frac{V_{medio\ sup\ erfcie}}{V_{mediobedrock}}$$

Stima degli spettri di risposta elastica delle velocità e degli spostamenti.

E' possibile passare direttamente dallo spettro delle accelerazioni a quello delle velocità e degli spostamenti, anche se al prezzo di una certa approssimazione, moltiplicando le ordinate dello spettro elastico per il fattore di conversione $T/2\pi$, dove T è il periodo di oscillazione (ascissa dello spettro):

☐ spettro delle velocità:

$$PSV = \frac{T}{2\pi} A(T)$$

☐ spettro degli spostamenti:

$$PSD = \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 A(T)$$

Intensità di Housner

L'Intensità di Housner è una grandezza legata allo spettro elastico delle velocità. E' in pratica definito come l'integrale di PSV, per uno smorzamento del 5%, in un determinato intervallo di T (periodo di oscillazione), normalmente compreso fra 0,1 s e 2,5 s.

$$I_H = \int_{T_1}^{T_2} PSV(T) dT$$

Effetti geotecnici del sisma.

Stima della variazione della pressione interstiziale in terreni incoerenti.

In presenza di sisma si può assistere a un incremento delle pressioni interstiziali Δu prodotto dalle deformazioni indotte nel terreno saturo dal passaggio delle onde sismiche.

Nei terreni incoerenti è possibile applicare la relazione di Seed e Booker (1977), in cui la variazione Δu è legata al numero di cicli di carico N indotti nel terreno dal sisma:

$$\Delta u_N = \sigma'_0 \frac{2}{\pi} \operatorname{sen}^{-1} \left[\left(\frac{N}{N_L} \right)^{0,5a} \right]$$

dove N_L è il numero di cicli di carico necessari per produrre la liquefazione dello strato di terreno saturo, σ'_0 (vedi sotto) è la pressione media efficace in condizioni statiche e a un fattore legato alla densità relativa, espressa in forma decimale, attraverso la relazione (Fardis e Veneziano, 1981):

$$a = 0,96 D_r^{0,83}$$

La grandezza N_L può, in via approssimativa, essere dedotta dalla seguente tabella (Seed et al., 1975):

N_L	$\tau_{\text{medio}}/\sigma'_0$
100	0,09
30	0,12
10	0,15
3	0,22

In cui τ_{medio} è lo sforzo di taglio medio indotto dal sisma uguale al 65% di quello massimo (vedi sotto).

Il parametro N si può ricavare in funzione della magnitudo del sisma con la tabella seguente (Seed et al., 1975):

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

N	M
3,8	5
4,0	5,5
4,5	6,0
7,0	6,5
10,0	7

Una volta valutata Δu , è possibile stimare l'angolo di resistenza al taglio in condizioni dinamiche:

$$\tan \varphi^* = \left(1 - \frac{\Delta u}{\sigma'_0} \right) \tan \varphi$$

Stima della variazione della pressione interstiziale in terreni coesivi.

Una semplice relazione empirica che permette di stimare approssimativamente l'incremento di u in condizioni dinamiche nei terreni coesivi è invece quella di Matsui et al. (1980):

$$\Delta u = \sigma'_0 \beta \text{Log}_{10} \left(\frac{\gamma_{\max}}{\gamma_s} \right)$$

dove:

σ'_0 = pressione media efficace, data da:

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

in cui σ'_{v0} è la pressione verticale efficace e k_0 il coefficiente di spinta a riposo del terreno, stimabile con la relazione:

$$k_0 = 1 - \text{sen} \varphi$$

con φ angolo di attrito del terreno;

β = fattore empirico sperimentale che vale circa 0,45;

γ_s = deformazione corrispondente alla soglia volumetrica, stimabile con la formula:

$$\gamma_s = A(OCR - 1) + B$$

dove A e B si ricavano in funzione dell'indice di plasticità IP:

$$IP = 20\% - A = 0,4 \cdot 10^{-3} \quad B = 0,6 \cdot 10^{-3}$$

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

IP= 40% - A=1,2 10⁻³ B=1,1 10⁻³

IP= 55% - A=2,5 10⁻³ B=1,2 10⁻³

γ_{\max} = deformazione massima indotta dal sisma nel terreno, data da:

$$\gamma_{\max} = \frac{\tau_{\max}}{G_{\gamma}}$$

in cui τ_{\max} è lo sforzo di taglio massimo prodotto dal terremoto:

$$\tau_{\max} = a_g \sigma_v r_d$$

con a_g l'accelerazione sismica espressa in g, σ_v la pressione verticale totale e $r_d = 1-0,015Z$, dove Z è la profondità dal piano campagna; G_{γ} è il modulo dinamico di taglio in corrispondenza del valore di deformazione γ ; G_{γ} , per elevate deformazioni, è sempre minore di G_0 , modulo per basse deformazioni, e, per valori di γ vicini a quelli della soglia volumetrica, può essere posto ragionevolmente uguale a circa 0,75 G_0 ; si ricorda che G_0 è correlato alla velocità delle onde S nel terreno in base alla relazione:

$$G_0 = \rho V_s^2$$

dove ρ è la densità del terreno data dal rapporto fra il peso di volume del terreno e l'accelerazione di gravità (9,81 m/s²).

Dalla relazione di Matsui si evince che, perché ci sia un incremento di pressione interstiziale positivo, γ_{\max} deve essere maggiore di γ_s . Questo significa che significativi aumenti di u si possono avere solo in presenza di elevate sollecitazioni sismiche e in terreni con bassi valori di G_0 .

Nei terreni coesivi con indice di plasticità inferiore o uguale a circa 55 (IP≤55%) in condizioni non drenate si può osservare una diminuzione di c_u legata alla degradazione dovuta ai cicli di carico indotti dal sisma. L'indice di degradazione può essere stimato, nel caso in cui $\Delta u / \sigma'_{v0} > 0,5$, con la relazione:

$$\delta c_u = \sqrt{\frac{c_u - \Delta u}{c_u}}$$

dove invece si abbia $\Delta u / \sigma'_{v0} \leq 0,5$ δc_u si può stimare come segue:

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

$$\delta c_u = N^{-t}$$

in cui N è il numero di cicli di carico indotti dal sisma (vedi tabella sopra) e t è una grandezza funzione della deformazione di taglio ciclica indotta dal sisma $\gamma_c = \frac{\tau_{media}}{G_\gamma}$ e dalla deformazione corrispondente alla soglia volumetrica (vedi sopra):

$$t = s(\gamma_c - \gamma_s)^r$$

I parametri s e r si ricavano dalla seguente tabella (Matasovic, 1993):

	OCR=1			OCR=2	OCR=4
	IP=15%	IP=30%	IP=50%	IP=50%	IP=50%
s	0,195	0,095	0,075	0,054	0,042
r	0,600	0,600	0,495	0,480	0,423

La coesione non drenata corretta si ottiene quindi con la seguente relazione:

$$c_{uc} = \delta c_u x c_u$$

Una volta stimata Δu , è possibile calcolare il cedimento post-sismico del terreno con la seguente relazione:

$$\Delta H = \frac{\alpha C_r}{1 + e_0} \log \left[\frac{1}{1 - \frac{\Delta u}{\sigma'_0}} \right] H$$

in cui:

H = spessore dello strato;

C_r = indice di riconsolidazione;

e_0 = indice dei vuoti;

α = costante sperimentale, solitamente posta uguale a 1.

Stabilità di un versante indefinito con il metodo di Newmark.

L'analisi dinamica semplificata di un pendio consente di stimare gli spostamenti cumulativi indotti da un sisma, attraverso l'analisi del suo accelerogramma, in un corpo potenzialmente franoso. Il metodo, detto degli spostamenti, originariamente elaborato da Newmark (1965), presuppone che siano verificate le seguenti condizioni:

- 1) l'accelerogramma utilizzato sia identico per tutto il versante esaminato;
 - 2) la resistenza al taglio del terreno costituente il pendio sia identica in condizioni statiche e dinamiche;
 - 3) il corpo di frana non possa muoversi verso monte.
- La procedura di calcolo viene descritta di seguito.

1) Si stima l'accelerazione sismica orizzontale critica k_c del versante, cioè quella per cui si ha $F_s=1$. Nel caso di pendio indefinito k_c assume la seguente forma

$$k_c = \frac{\frac{cb}{\cos \alpha} + [(W + Qb) \cos \alpha - U] \tan \varphi - (W + Qb) \sin \alpha}{\frac{1}{2} W \cos \alpha}$$

2) Si prendono in esame i valori di $a_g(t)$ registrati nell'accelerogramma con un passo di lettura Δt uguale a quello di registrazione; il movimento inizia nell'istante t_0 in cui si ha $a_g(t) \geq k_c$.

3) Si calcola lo spostamento indotto nel pendio attraverso una doppia integrazione numerica di $a_r(t) = a_g(t) - k_c$, ottenendo le seguenti relazioni:

$$(1) s(t + \Delta t) = s(t) + v(t)\Delta t + \frac{2a_r(t) + a_r(t + \Delta t)}{6} \Delta t^2$$

$$(2) v(t + \Delta t) = v(t) + \frac{a_r(t) + a_r(t + \Delta t)}{2} \Delta t ;$$

Ovviamente al tempo $t=0$ dell'accelerogramma saranno $s(t)=0$ e $v(t)=0$.

4) Si moltiplica lo spostamento trovato s , che si riferisce a un blocco rigido posto su un piano orizzontale, per un fattore correttivo A che tenga conto del reale andamento del piano di scivolamento. Nel caso di blocco su superficie piana, A assume la seguente forma:

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

$$A = \frac{\cos(\varphi - \alpha)}{\cos \varphi}$$

dove φ è l'angolo di resistenza al taglio mobilitato lungo la superficie di scorrimento e α l'inclinazione della superficie stessa.

5) Si continuano ad applicare le (1) e (2) per i successivi intervalli Δt fino al momento in cui non risulterà:

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \frac{a_r(t) + a_r(t + \Delta t)}{2} \Delta t = 0$$

6) Si prosegue nella lettura dei valori di $a_g(t)$ fino alla fine della registrazione, ripetendo i passi 2) e 3) nel caso in cui ci si trovi nuovamente nella condizione $a_g(t) \geq k_c$.

7) Il valore di k_c può anche non rimanere costante durante l'evento sismico per effetto della variazione della sovrappressione interstiziale (Δu) nel versante. In questo caso è più corretto procedere considerando due valori dell'accelerazione sismica critica, uno, minore, relativo alla parte iniziale del sisma, quando le Δu sono ancora nulle, e uno, maggiore, riguardante la parte finale del sisma, quando le Δu raggiungono il loro valore massimo (metodo di Newmark modificato).

Lo spostamento totale cumulato negli intervalli in cui $a_g(t) \geq a_c$ può essere utilizzato, in prima battuta, per avere un'indicazione qualitativa del livello di danno indotto dal sisma secondo la tabella che segue (Legg e Slosson, 1984):

Livello di danno	Spostamento totale (cm)
Irrilevante	<0.5
Modesto	0.5-5
Forte	5-50
Severo	50-500
Catastrofico	>500

Per quanto riguarda lo spostamento massimo ammissibile, cioè lo spostamento oltre il quale il versante può essere considerato instabile, si può fare riferimento al seguente schema (ASCE, 2002 e Wilson e Keefer, 1985):

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

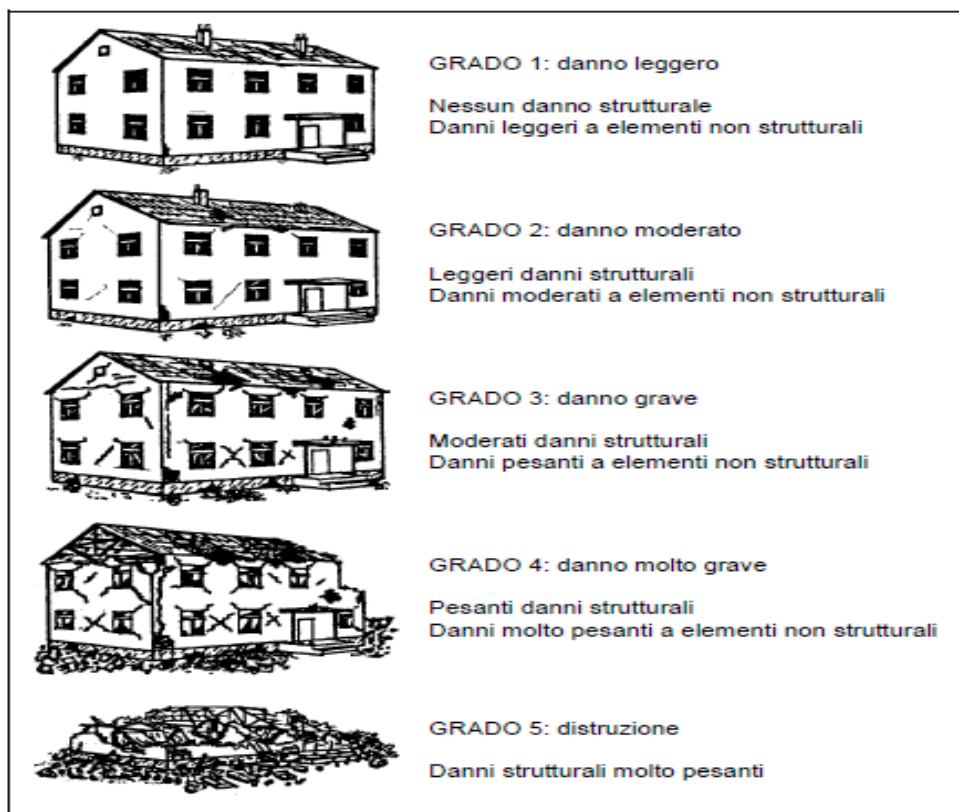
Descrizione	Spostamento max ammissibile (cm)
Pendio in roccia	2
Pendio in terra con manufatti	5
Pendio in terra senza manufatti con comportamento di tipo duttile (sabbie e ghiaie sciolte, argille poco sovraconsolidate)	15
Pendio in terra senza manufatti con comportamento di tipo fragile (sabbie e ghiaie addensate, argille molto sovraconsolidate) e resistenza al taglio mobilitata di picco	5
Pendio in terra senza manufatti con comportamento di tipo fragile (sabbie e ghiaie addensate, argille molto sovraconsolidate) e resistenza al taglio mobilitata residua o per grandi deformazioni	15

Valutazione empirica del rischio sismico degli edifici.

Una valutazione approssimativa e utile ai fini della pianificazione territoriale del rischio sismico dei singoli edifici può essere condotta, utilizzando le Curve di Fragilità. Si tratta di grafici, distinti per tipologia di edificio, dove sulle ascisse compare un parametro legato al sisma (PGA, Intensità di Housner, ecc.) e sulle ordinate la probabilità di superamento di un determinato livello di danno.

Curve di fragilità: Rota et al. (2008)

Per le tipologie di edificio presenti nel territorio europeo sono state messe a punto da Rota et al.(2008) una serie di Curve di Fragilità, espresse in termini di Intensità di Housner e legate alla Scala Macrosismica Europea (EMS98) del danno.



PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Le curve sono state ricavate in funzione della classe di edificio e del numero di piani, ipotizzando una distribuzione lognormale della probabilità.

Label	Building class	No. of storeys
MX1	Mixed	1-2
MX2	Mixed	≥3
RC1	Reinforced concrete – seismic design	1-3
RC2	Reinforced concrete – no seismic design	1-3
RC3	Reinforced concrete – seismic design	≥4
RC4	Reinforced concrete – no seismic design	≥4
IMA1	Masonry – irregular layout – flexible floors – with tie rods and/or tie beams	1-2
IMA2	Masonry – irregular layout – flexible floors– w/o tie rods and tie beams	1-2
IMA3	Masonry – irregular layout – rigid floors – with tie rods and/or tie beams	1-2
IMA4	Masonry – irregular layout – rigid floors - w/o tie rods and tie beams	1-2
IMA5	Masonry – irregular layout – flexible floors – with tie rods and/or tie beams	≥3
IMA6	Masonry – irregular layout – flexible floors– w/o tie rods and tie beams	≥3
IMA7	Masonry – irregular layout – rigid floors – with tie rods and/or tie beams	≥3
IMA8	Masonry – irregular layout – rigid floors - w/o tie rods and tie beams	≥3
RMA1	Masonry – regular layout – flexible floors – with tie rods and/or tie beams	1-2
RMA2	Masonry – regular layout – flexible floors – w/o tie rods and tie beams	1-2
RMA3	Masonry – regular layout – rigid floors – with tie rods and/or tie beams	1-2
RMA4	Masonry – regular layout – rigid floors – w/o tie rods and tie beams	1-2
RMA5	Masonry – regular layout – flexible floors – with tie rods and/or tie beams	≥3
RMA6	Masonry – regular layout – flexible floors – w/o tie rods and tie beams	≥3
RMA7	Masonry – regular layout – rigid floors – with tie rods and/or tie beams	≥3
RMA8	Masonry – regular layout – rigid floors – w/o tie rods and tie beams	≥3
ST	Steel	All

(Da Rota et.al. 2003)

Il valore medio (μ) e la deviazione standard (σ) per ogni classe di edificio sono tabellate nello schema seguente.

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

Label	DS1		DS2		DS3		DS4		DS5	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
MX1	1.60	4.36	7.69	5.88	13.64	8.95	11.16	5.01	9.13	2.90
MX2	1.20	5.67	6.83	4.44	6.97	3.18	9.70	4.01	8.91	2.58
RC2	5.30	3.80	11.04	4.83	9.26	2.85	7.84	1.85	-	-
RC4	4.25	2.91	7.90	3.11	7.84	2.55	8.28	2.06	-	-
IMA1	-9.94	13.23	10.23	17.01	12.15	10.20	10.89	5.82	9.41	3.03
IMA2	-7.97	9.30	2.31	13.80	8.23	15.27	11.57	10.64	11.27	6.36
IMA3	-1.98	13.92	11.99	11.25	14.12	9.14	13.41	6.21	-	-
IMA4	-7.18	11.33	4.27	6.26	6.15	5.11	6.89	3.43	6.99	2.34
IMA5	-8.92	10.36	3.10	5.94	4.79	2.92	13.65	7.85	10.54	3.91
IMA6	-7.28	8.11	2.37	10.65	5.43	6.48	7.30	4.63	8.98	3.93
IMA7	0.93	4.15	3.58	1.83	4.56	1.90	7.29	3.08	8.32	2.50
IMA8	-5.84	8.58	2.73	4.23	3.92	2.53	5.27	2.26	6.58	2.12
RMA1	0.89	8.01	15.56	12.26	13.59	7.69	10.39	3.59	6.31	0.95
RMA2	-9.01	14.89	7.42	11.16	11.72	10.91	14.21	8.77	11.85	5.06
RMA3	6.84	14.80	11.51	6.55	11.27	5.12	8.95	2.98	7.19	1.65
RMA4	0.37	16.33	18.50	15.35	16.05	9.75	12.77	5.43	8.53	2.27
RMA5	-0.14	8.81	7.98	9.60	13.20	9.08	9.22	3.36	6.77	1.36
RMA6	-2.39	6.56	3.69	3.46	4.97	3.18	6.23	2.81	9.24	3.69
RMA7	3.47	5.06	10.05	7.07	7.58	3.39	11.50	4.67	8.98	2.61
RMA8	-0.61	11.59	6.99	7.61	7.25	4.47	7.63	2.98	8.60	2.73
MX1	1.60	4.36	7.69	5.88	13.64	8.95	11.16	5.01	9.13	2.90
MX2	1.20	5.67	6.83	4.44	6.97	3.18	9.70	4.01	8.91	2.58

(Da Rota et.al. 2003)

Curve di fragilità: Rossetto et al. (2003)

Le curve di fragilità messe a punto da Rossetto et al. fanno riferimento a edifici in cemento armato e hanno la seguente forma:

$$P = 1 - \exp(-\alpha GM^\beta)$$

dove GM è il parametro di riferimento del sisma (PGA, accelerazione $S_{a5\%}$ o spostamento $S_{d5\%}$ spettrale con smorzamento 5%). Le grandezze α e β sono tabellate in funzione del GM scelto, del livello di danno e del percentile di riferimento.

PROGRAM GEO – Sisma ver.4

	Mean		U90%		L90%		
	α	β	α	β	α	β	
							PGA
Slight	1.556	1.60	3.950	1.60	0.830	1.60	339872
Light	1.055	1.80	2.732	1.80	0.620	1.80	339187
Moderate	0.250	3.00	0.903	3.00	0.102	3.00	331702
Extensive	0.093	4.00	0.538	4.00	0.010	4.00	329152
P.Collapse	0.009	5.80	0.162	5.80	0.001	5.80	292839
Collapse	0.001	8.00	0.005	8.00	0.001	8.00	77876
							Sa_{5%}(T_{ela})
Slight	0.633	1.80	1.865	1.80	0.192	1.80	339872
Light	0.396	1.80	1.356	1.80	0.116	1.80	339187
Moderate	0.153	1.80	0.524	1.80	0.041	1.80	331702
Extensive	0.090	2.00	0.447	2.00	0.036	2.00	329152
P.Collapse	0.050	2.20	0.265	2.20	0.031	2.20	292839
Collapse	0.010	3.00	0.056	3.00	0.006	3.00	77876
							Sd_{5%}(T_{ela})
Slight	25.82	1.10	76.45	1.10	13.72	1.10	339872
Light	21.08	1.20	73.88	1.20	8.350	1.20	339187
Moderate	6.500	1.15	29.57	1.15	2.342	1.15	331702
Extensive	3.000	1.30	17.52	1.30	1.323	1.30	329152
P.Collapse	2.500	2.00	13.45	2.00	1.200	2.00	292839
Collapse	2.000	2.40	9.37	2.40	1.119	2.40	77876

(Da Rossetto et.al. 2003)