

INTEGRAZIONE

Come richiesto dall'Amm. Prov. Servizio Pianificazione Territoriale tramite PEC
PG/2021/0118557

MICROZONAZIONE SISMICA

L'aggiornamento con il DGR 630/2019 del DGR 2193/2015, che integrava la Delibera Regionale 112/2007, emessa dalla Assemblea Legislativa della Regione Emilia Romagna in data 2 Maggio 2007, fornendo i criteri per l'individuazione delle aree che potrebbero essere soggette ad effetti sismici locali (microzonazione sismica) in modo da orientare le scelte di pianificazione verso le aree a minor rischio. La metodologia indicata per tali tipi di studio prevede due fasi di analisi, con diversi livelli di approfondimento.

La prima fase ha carattere qualitativo ed è diretta ad identificare le parti di territorio suscettibili di effetti locali (amplificazione del segnale sismico, cedimenti, instabilità dei versanti, fenomeni di liquefazione, rotture del terreno, ecc.).

Essa viene realizzata sulla base di rilievi, osservazioni e valutazioni di tipo geologico e geomorfologico, svolte a scala territoriale, associati a raccolte di informazioni sugli effetti indotti dai terremoti passati.

La seconda fase ha invece come obiettivo la microzonazione sismica del territorio. Sulla base degli scenari individuati dalle analisi svolte nel corso della prima fase, nella seconda fase si attuano due diversi livelli di approfondimento:

a) analisi semplificata (secondo livello di approfondimento); basata, oltre che sull'acquisizione di dati geologici e geomorfologico più dettagliati di quelli rilevati nel primo livello, su prove geofisiche in sito e su prove geotecniche di tipo standard; essa viene svolta nelle aree pianeggianti e sub-pianeggianti, incluse le zone di fondovalle appenniniche, con stratificazione orizzontale e sub-orizzontale, e sui versanti stabili con acclività minore o uguale a 15° in cui il deposito ha spessore costante;

b) analisi approfondita (terzo livello di approfondimento), richiesta nei seguenti casi:

- Aree soggette a liquefazione e densificazione;
- Aree instabili e potenzialmente instabili;
- Aree in cui le coperture hanno spessore fortemente variabile, come ad esempio nelle aree pedemontane e di fondovalle a ridosso dei versanti;
- Aree in cui è prevista la realizzazione di opere di rilevante interesse pubblico.

Visionando le Carte di PSC per la presenza di sedimenti fini si è deciso di effettuare una microzonazione sismica con analisi approfondita di III° livello.

L'analisi approfondita di terzo livello prevede la valutazione dei fattori di amplificazione F_a sulla base delle velocità medie delle onde di taglio all'interno della copertura (V_{SH}) o nei primi 30 metri dalla superficie (V_{S30}), calcolate secondo le seguenti formule:

$$V_{SH} = \frac{H}{\sum \frac{h_i}{V_{S_i}}} \quad V_{S_{30}} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

I fattori stimati esprimono l'amplificazione del moto sismico al passaggio dal bedrock alla superficie nel rapporto di PGA.



RISPOSTA SISMICA DI III° LIVELLO

Come in precedenza detto viene qui di seguito proposta un'analisi sismica di III° livello, in cui viene definito il Fattore di Amplificazione di P.G.A.

La modellazione numerica della risposta sismica locale (RSL) è stata effettuata utilizzando il software "RSL III" della ditta Geostru di Bianco (RC), avvalendosi dello specifico codice di calcolo monodimensionale "SHAKE".

L'elaborazione ha permesso di valutare l'amplificazione dell'impulso sismico al suolo e di quantificare gli spettri di risposta sulla base di terremoti di riferimento (TR 712 anni con smorzamento pari al 5%) forniti dalla Regione Emilia-Romagna, per lo Stato Limite Ultimo SLV.

Il Software RSL III permette di valutare puntualmente l'effettiva amplificazione stratigrafica sfruttando la soluzione dell'equazione differenziale che governa il problema della propagazione di onde di taglio in un solido alla Kelvin-Voigt ed un comportamento dei terreni secondo curve di decadimento per G e lo smorzamento tratte dalla letteratura scientifica e/o normative, o ancora, curve di decadimento personalizzate.

La procedura di calcolo utilizzata da RSL III per la risposta sismica locale è di tipo lineare equivalente su un modello di n strati piani e paralleli di estensione orizzontale infinita su un semispazio corrispondente al bedrock.

L'input sismico, rappresentato da più accelerogrammi, viene applicato al bedrock e viene valutato il moto di propagazione delle onde in direzione perpendicolare alla superficie utilizzando l'equazione di equilibrio dinamico in funzione dello spostamento. I valori finali forniti dall'analisi di risposta sismica locale sono gli accelerogrammi e i relativi spettri di risposta, lo spettro medio e quello medio normalizzato da confrontare con lo spettro di normativa.

La verifica monodimensionale dell'amplificazione locale, tramite l'utilizzo di Shake, si compone di due fasi: elaborazione del modello e simulazione degli effetti indotti dal sisma di progetto.

La prima fase consiste nel costruire la colonna di sottosuolo di riferimento, rappresentata da strati (layer) a differente tessitura e da diversi valori delle onde di taglio S (Vs).

Il modello geologico si è basato sulla stratigrafia redatta sugli esiti delle prove penetrometriche CPT e dell'indagine sismica HVSR.

La prova HVSR consente di valutare la distribuzione delle velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio (Vs) nei primi trenta metri pari a 241 m/s. All'interno del modello geologico utilizzato per l'analisi di RSL si sono quindi inseriti i sismostrati riportati nel capitolo "Sismicità dell'Area" di suddetta relazione; il bedrock sismico è stato quindi impostato alla profondità di 100 m dal piano campagna attuale attribuendo una velocità di 600 m/s.

Occorre poi procedere all'inserimento degli input sismici, desunti dai segnali di riferimento selezionati dalla banca dati accelerometrica "European Strong Motiondatabase" e forniti dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli regionale. Si tratta di tre tipologie di segnali, già "scalati" per il territorio comunale a cui si riferiscono e sono rappresentati dai tre differenti accelerogrammi di progetto:

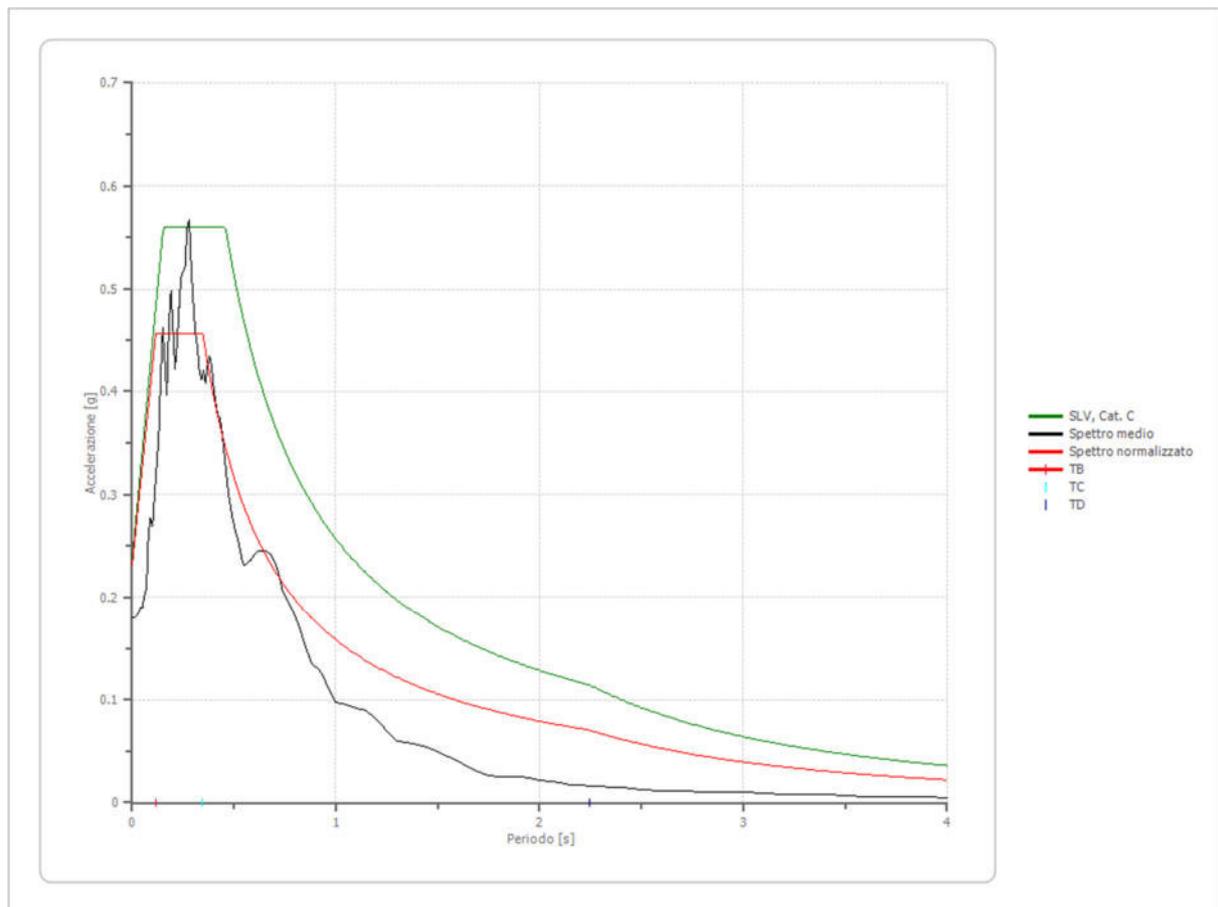
- 1) impulsivo;
- 2) con ampio contenuto in frequenze;
- 3) con componente predominante alle alte frequenze.

La modellazione consente la valutazione dell'amplificazione locale intesa come rapporto PGA/PGA0 ossia come rapporto dell' $a_{g_{max}}$ al suolo (calcolata con SHAKE) con quella del suolo rigido. Si rammenta ancora che per il Comune di Reggio nell'Emilia la DAL 112/2007 riporta un' $a_{g_{max}}$ al suolo rigido pari a 0,157 g.

In allegato vengono riportate tutte le elaborazioni fornite dal software RSL III, da cui sono stati estrapolati i risultati qui di seguito forniti.

I risultati ottenuti evidenziano che il fattore di amplificazione FA è pari a 1.287 e un fattore di amplificazione spettrale massima Fo di 1.968, da cui deriva un a_{max} o PGA al sito pari a 0.232 g.

Visionando il grafico del rapporto degli spettri, suddetto valore di accelerazione risulta essere inferiore rispetto a quello calcolato nel capitolo precedente con una risposta sismica semplificata, a favore della sicurezza, si dovrà pertanto adottare il valore di 0.241 g per dimensionare le strutture.



confronto spettro di progetto e spettro da normativa

CEDIMENTI POST-SISMICI

Nel presente capitolo viene fatta una stima dei cosiddetti cedimenti post-sismici, ossia dei cedimenti permanenti di riconsolidazione conseguenti ad un terremoto. La causa dei cedimenti di riconsolidazione che si registrano dopo un evento sismico in un terreno è dovuta alla dissipazione delle pressioni interstiziali man mano che l'acqua viene espulsa dalla zona interessata. Per stimare l'entità di tale cedimento è necessario caratterizzare dal punto di vista geotecnico i vari strati del terreno attraverso prove in situ e in laboratorio. La numerosità delle verticali indagate dovrà essere tanto più spinta quanto più importante è l'opera da realizzare e quanto estesa è l'area di indagine. È necessario predisporre con appropriate rilevazioni l'entità delle fluttuazioni dei livelli di falda e considerare nelle analisi la condizione meno cautelativa. Per ognuna delle verticali indagate verranno valutati i cedimenti di riconsolidazione post ciclica. Il cedimento di riconsolidazione, per i terreni granulari saturi liquefacibili e per i terreni coesivi, può essere valutato dalla seguente espressione:

$$\Delta H = \varepsilon_{vr} \cdot H$$

dove H è l'altezza del generico strato ed ε_{vr} (%) rappresenta la deformazione volumetrica post-ciclica definita da:

$$\varepsilon_{vr} = \frac{\alpha \cdot C_r}{1 + e_0} \log \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta u}{\sigma'_0}} \right)$$

in cui

- α costante sperimentale compresa tra 1 e 1.5;
- e_0 l'indice dei vuoti iniziale;
- $C_r = 0.225 C_c$ l'indice di riconsolidazione post-ciclica;
- C_c l'indice di compressione.

Nel caso di terreni coesivi, il programma calcola il rapporto di pressione interstiziale come:

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

dove

σ'_0 valore iniziale della pressione media efficace alla profondità considerata;

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

- σ'_{v0} pressione verticale efficace e k_0 il coefficiente di spinta a riposo
- γ_{max} deformazione di taglio massima raggiunta durante il sisma;
- β viene posto circa uguale a 0.45 (coefficiente sperimentale);
- γ_v deformazione di soglia volumetrica, determinabile da prove cicliche di laboratorio.

Ma può anche essere valutata, in prima approssimazione, con la relazione che segue

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

OCR è il grado di sovraconsolidazione, A e B sono coefficienti sperimentali che possono essere calcolati per interpolazione lineare dalla seguente tabella.

I_p [%]	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	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$

Valori suggeriti per i coefficienti A e B

Il rapporto di pressione interstiziale, nel caso di terreni incoerenti liquefacibili, viene determinato per interpolazione lineare dai valori riportati in Tabella in funzione dell'ampiezza della deformazione massima indotta dal terreno.

γ_{max} [%]	$r_u = \Delta_u / \sigma'_0$
0.005	0.2
0.1	0.4
0.2	0.6
0.4	0.8
5	0.95

Rapporto di pressione interstiziale r_u in funzione di γ_{max}

L'ampiezza della deformazione di taglio massima γ_{max} si calcola dalla relazione seguente:

$$\gamma_{max} = 0.65 \cdot \frac{a_{max,s}}{g} \cdot \sigma_v \cdot r_d \cdot \frac{1}{G}$$

dove

$a_{max,s}$ picco di accelerazione al piano campagna del sisma di progetto;

g accelerazione di gravità;

σ_v tensione totale verticale;

r_d coefficiente riduttivo dell'azione sismica che mette in conto la deformabilità del sottosuolo determinato dalla relazione $r_d = 1 - 0.015z$;

G modulo di taglio corrispondente al livello deformativo γ_{max} ;

il modulo di taglio può essere determinato da prove di laboratorio o mediante la Tabella seguente applicando un fattore riduttivo al modulo di taglio G_0 (modulo di taglio a piccole deformazioni).

$a_{max,s}$ [g]	G/G_0
0.10	0.80
0.20	0.50
0.30	0.35
0.40	0.28

Fattore di riduzione del modulo di taglio nei primi 20 m in funzione dell' accelerazione $a_{max,s}$

Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica nei terreni granulari saturi

La deformazione volumetrica (e verticale) ϵ_v nei terreni granulari saturi può essere stimata da prove CPT in funzione della resistenza penetrometrica di punta normalizzata e corretta, $(qc1N)_{cs}$ e del coefficiente di sicurezza alla liquefazione FL , e da prove SPT in funzione della resistenza SPT normalizzata e corretta $(N1)_{60,cs}$ e del rapporto di tensione ciclica CSR.

Il cedimento post-sismico per ciascuno strato è dato da:

$$\Delta s_i = \epsilon_{vi} \cdot \Delta z_i$$

In alternativa, la deformazione volumetrica, ϵ_v (espressa in decimali), può essere stimata mediante le seguenti espressioni (Idriss e Boulanger, 2008):

$$\epsilon_v = 1.5 \cdot \exp \left(2.551 - 1.147 \cdot (q_{c1Ncs})^{0.264} \right) \cdot \min(0.08, \gamma_{max}) \quad \text{con } q_{c1Ncs} \geq 21$$

$$\epsilon_v = 1.5 \cdot \exp \left(-0.369 \cdot \sqrt{(N1)_{60cs}} \right) \cdot \min(0.08, \gamma_{max})$$

in cui γ_{max} (decimale) è la massima deformazione di taglio indotta dall'azione sismica, determinabile, in prima approssimazione, con la relazione empirica:

$$\gamma_{max} = \frac{a_{max}}{g} \cdot \sigma_{v0} \cdot r_d \cdot \frac{1}{G}$$

dove G è il modulo di taglio corrispondente al livello deformativo γ , che può essere determinato per via iterativa, noto il valore della rigidità iniziale G_0 ($= \rho V_s^2$) utilizzando la legge di variazione $G(\gamma)/G_0$ ottenuta con prove dinamiche in laboratorio o, in modo approssimato, desunta da curve di letteratura per terreni con proprietà simili (si veda ad es. Figura 4 da AGI, 2005).

Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica nei terreni granulari insaturi

Il cedimento indotto dall'azione sismica nei terreni granulari insaturi può essere stimato dai risultati di prove SPT con il metodo di Pradel (1998), nel modo seguente:

$\Delta s_i = 2\varepsilon_{NC} \cdot \Delta z_i$. in cui Δs è il cedimento dello strato di spessore Δz

$\varepsilon_{N_c} = \varepsilon_{15} \cdot \left(\frac{N_c}{15}\right)^{0.45}$ è la deformazione volumetrica per un numero di cicli equivalente N_c il cui valore è funzione della magnitudo del terremoto secondo l'equazione: $N_c = (M - 4)^{2.17}$

$\varepsilon_{15} = \gamma \cdot \left(\frac{(N_1)_{60}}{20}\right)^{-1.2}$ è la deformazione volumetrica dopo 15 cicli di ampiezza γ ,

$(N_1)_{60}$ è il numero di colpi della prova SPT normalizzato alla pressione atmosferica, e γ è la deformazione di taglio media indotta dall'azione sismica.

Quest'ultima può essere determinata, in prima approssimazione, con la relazione empirica:

$$\gamma = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \sigma_{v0} \cdot r_d \cdot \frac{1}{G}$$

G è il modulo di taglio corrispondente al livello deformativo γ , che può essere determinato per via iterativa, noto il valore della rigidità iniziale $G_0 (= \rho V_s^2)$, utilizzando la legge di variazione $G(\gamma)/G_0$ ottenuta con prove dinamiche in laboratorio

STRATO	N ₆₀	METODO	INDICE PLASTICITÀ (%)	INDICE VUOTI (%)	INDICE COMPRESIONE	MODULO TAGLIO STATICO (kN/m ²)	OR	ALFA	FS LIQUEFAZIONE	TENSIONE EFFICACE (kN/m ²)	DEFORMAZIONE VERTICALE	CEDIMENTO POST-SISMICO (mm)	INCREMENTO PRESSIONE NEUTRA (kN/m ²)
1	15.34	Idriss Boulanger	18.00	15.00	0.6	2500.00	1.10	1	0	27.21	1.07E-03	1.6027	20.17
2	20.69	Yasuhara Andersen	11.00	10.00	0.7	4000.00	2.00	1.25	0	59.8055	0.00E+00	0	79.2
3	25.62	Yasuhara Andersen	11.00	10.00	0.7	4000.00	2.00	1.25	3.4845	87.7445	2.87E-05	0.0861	0.01
4	6.78	Yasuhara Andersen	18.00	15.00	0.6	2500.00	2.00	1	3.4845	176.218	1.88E-05	0.1788	0.03
5	25.49	Idriss Boulanger	0.00	0.00	0	0.00	1.00	0	2.1085	199.5005	0.00E+00	0	0
Cedimento totale			1.868 mm										

Pur trattandosi di deformazioni apprezzabili in valore assoluto, occorre precisare che le stesse hanno carattere areale. Pertanto, considerando che nel caso in esame non vi sono eteropie geologiche molto rilevanti e che le strutture previste sono dimensionalmente contenute, tali cedimenti non dovrebbero essere in grado di provocare danneggiamenti significativi.

Reggio Emilia, giugno 2021



Dott. Geol. Guido Barbieri

Iscr. Ordine dei Geologi Emilia Romagna n° 417

Guido Barbieri

ALLEGATI

RISPOSTA SISMICA LOCALE DI 3° LIVELLO

Cartografia tematica





RISPOSTA SISMICA LOCALE DI 3° LIVELLO

AMPLIAMENTO EDIFICIO PRODUTTIVO

**VIA CANTÙ, 17
MARMIROLO DI REGGIO NELL'EMILIA**

Committente: ZANNI SRL

Data: giugno 2021

INTRODUZIONE

PROCEDURA DI CALCOLO

La procedura di calcolo adoperata da RSL per la valutazione della funzione di trasferimento presuppone come base di partenza uno o più accelerogrammi, od uno spettro di risposta in accelerazione, e la conoscenza della stratigrafia del sito attraverso i seguenti parametri geotecnici per ogni strato:

- peso per unità di volume;
- velocità di propagazione delle onde di taglio;
- coefficiente di spinta laterale;
- modulo di taglio iniziale (opzionale);
- spessore;
- indice di plasticità.

La non linearità del calcolo è introdotta dalla dipendenza del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso dalla deformazione.

Schematicamente la procedura è riassumibile nel seguente modo:

1. Valutazione dello spettro di Fourier dell'accelerogramma (omessa nel caso si debba analizzare uno spettro);
2. Ricerca di un errore relativo piccolo seguendo la procedura di:
 - 2.1. Stima della funzione di trasferimento;
 - 2.2. Valutazione della deformazione indotta in ciascuno strato;
 - 2.3. Correzione del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso per ogni strato;

Le operazioni 2.1, 2.2 e 2.3 sono ripetute fino a quando la differenza di deformazione tra un'iterazione e la precedente non rimane al di sotto di una soglia ritenuta accettabile;
3. Trasformazione inversa di Fourier dello spettro precedentemente calcolato ed opportunamente pesato per mezzo della funzione di trasferimento calcolata.

Attraverso questa procedura è possibile “trasferire” l'accelerogramma dal bedrock in superficie. La deformazione per ciascuno strato viene corretta sulla base del rapporto fra deformazione effettiva e massima come suggerito dalla letteratura scientifica, ovvero

$$\frac{\gamma_{eff}}{\gamma_{max}} = \frac{M - 1}{10}$$

dove M rappresenta la magnitudo del sisma.

Per la valutazione della funzione di trasferimento, RSL considera un suolo variamente stratificato composto da N strati orizzontali di cui l' N -esimo è il letto di roccia (bedrock). Ponendo come ipotesi che ciascuno strato

si comporti come un solido di Kelvin-Voigt $\left[\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma(z,t)}{\partial z \partial t} \right]$, la propagazione delle onde di taglio che attraversano gli strati verticalmente può essere definita dall'equazione dell'onda:

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

dove: u rappresenta lo spostamento; t il tempo; ρ la densità; G il modulo di deformazione al taglio; η la viscosità. Per onde armoniche lo spostamento può essere scritto come:

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

che sostituita nella (1) pone

$$(G + i\omega\eta) \frac{d^2 U}{dz^2} = \rho \omega^2 U \quad (3)$$

dove ω rappresenta la frequenza angolare. La (3) può essere riscritta come

$$G^* \frac{d^2 U}{dz^2} = \rho \omega^2 U \quad (4)$$

avendo posto $G^* = G + i\omega\eta$, ovvero il modulo di deformazione al taglio *complesso*. Questo può essere ulteriormente riscritto come

$$G^* = G(1 + 2i\xi) \quad (5)$$

avendo posto

$$\eta = \frac{2G}{\omega} \xi \quad (6)$$

dove ξ rappresenta il coefficiente di smorzamento viscoso. Ciò posto, e fatta convenzione che l'apice * indica la natura complessa della variabili in gioco, la soluzione dell'equazione generica dell'onda è la seguente:

$$u(z, t) = Ee^{i(\omega t + k^* z)} + Fe^{i(\omega t - k^* z)} \quad (7)$$

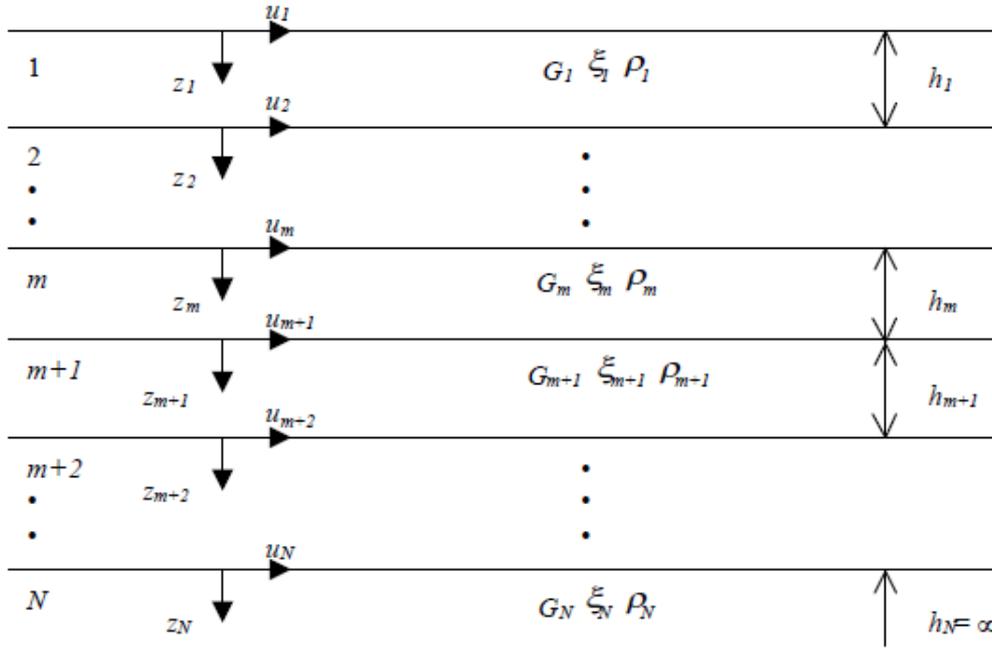


Figura 1: Esempio di stratigrafia per riferimento.

dove E e F dipendono dalle condizioni al contorno e rappresentano l'ampiezza d'onda che viaggia rispettivamente verso l'alto (-z) e verso il basso (+z), mentre k^* rappresenta il numero d'onda complesso dato dalla seguente espressione:

$$k^* = \omega \sqrt{\frac{\rho}{G^*}} \quad (8)$$

Il taglio invece è dato da:

$$\tau(z, t) = G^* \frac{dU}{dz} e^{i\omega t} = ik^* G^* \left[Ee^{i(\omega t + k^* z)} + Fe^{i(\omega t - k^* z)} \right] e^{i\omega t} \quad (9)$$

Per il generico strato m di spessore h_m gli spostamenti, rispettivamente in sommità ($z = 0$) ed al fondo ($z = h_m$), sono:

$$u_m(0, t) = (E_m + F_m) e^{i\omega t} \quad (10)$$

$$u_m(h_m, t) = \left(E_m e^{ik_m^* h_m} + F_m e^{-ik_m^* h_m} \right) e^{i\omega t} \quad (11)$$

Poiché deve essere rispettata la congruenza sullo spostamento all'interfaccia tra gli strati, ovvero lo spostamento in sommità ad uno strato deve essere uguale allo spostamento sul fondo di quello immediatamente sopra, se ne deduce che:

$$u_m(z = h_m, t) = u_{m+1}(z = 0, t) \quad (12)$$

Usando la (10), (11) e la (12), ne consegue che

$$E_{m+1} + F_{m+1} = E_m e^{ik_m^* h_m} + F_m e^{-ik_m^* h_m} \quad (13)$$

Il taglio in sommità ed al fondo dell' m -esimo strato è dato da:

$$\tau_m(0, t) = ik_m^* G_m^* [E_m - F_m] e^{i\omega t} \quad (14)$$

$$\tau_m(h_m, t) = ik_m^* G_m^* [E_m e^{ik_m^* h_m} - F_m e^{-ik_m^* h_m}] e^{i\omega t} \quad (15)$$

Poiché fra uno strato e l'altro il taglio deve essere continuo si ha

$$\tau_m(z = h_m, t) = \tau_{m+1}(z = 0, t) \quad (16)$$

ovvero

$$E_{m+1} - F_{m+1} = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} (E_m e^{ik_m^* h_m} - F_m e^{-ik_m^* h_m}) \quad (17)$$

Sommando la (13) alla (17) e sottraendo la (17) alla (13) si ottiene

$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (18)$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (19)$$

dove α_m^* rappresenta il coefficiente di impedenza complesso al contorno tra gli strati m ed $m+1$, ed è dato dalla seguente espressione:

$$\alpha_m^* = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} \quad (20)$$

Poiché in superficie il taglio è nullo,

$$\tau_1(0, t) = ik_1^* G_1^* [E_1 - F_1] e^{i\omega t} = 0$$

si deduce che $E_1 = F_1$.

Le equazioni (18) e (19) possono essere successivamente applicate agli strati successivi da 2 ad m . La funzione di trasferimento A_{mn} che lega gli spostamenti in sommità degli strati m ed n è definita dalla seguente espressione:

$$A_{mn} = \frac{u_m}{u_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \quad (21)$$

A_{mn} rappresenta la funzione di trasferimento, ovvero la funzione che mette in relazione il modulo della deformazione tra i punti m e n .

In pratica lo stato deformativo di una stratigrafia rimane definito una volta nota la deformazione di un suo qualsiasi punto. Inoltre, poiché la velocità e l'accelerazione sono legati allo spostamento,

$$\dot{u}(z, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = i\omega u(z, t) \quad \ddot{u}(z, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 u(z, t) \quad (22)$$

La funzione di trasferimento A_{mn} può essere espressa anche in funzione delle velocità e dell'accelerazione al tetto degli strati n ed m :

$$A_{mn}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{\dot{u}_m}{\dot{u}_n} = \frac{\ddot{u}_m}{\ddot{u}_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \quad (23)$$

La deformazione tangenziale rimane definita alla profondità z e al tempo t dalla relazione:

$$\gamma(z, t) = \frac{\partial u}{\partial z} = ik^* (E e^{ik^* z} - F e^{-ik^* z}) e^{i\omega t} \quad (24)$$

E la corrispondente tensione tangenziale, dalla seguente espressione:

$$\tau(z, t) = G^* \gamma(z, t) \quad (25)$$

Ai fini di una corretta interpretazione del problema della risposta sismica locale, risulta utile riprodurre la rappresentazione schematica di Figura 2 in cui è riportata la terminologia utilizzata per lo studio del moto sismico di un deposito che poggia su un basamento roccioso.

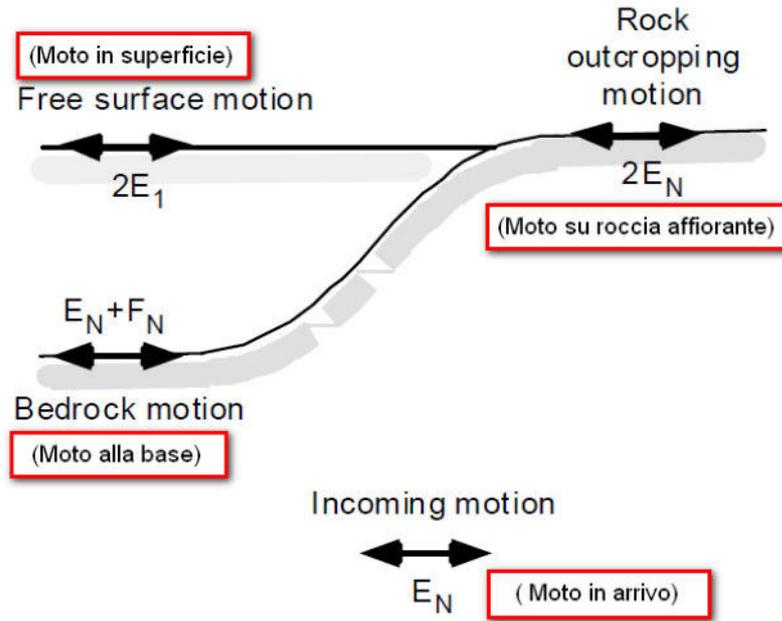


Figura 2: Schema di riferimento e terminologia utilizzata.

Le onde di taglio si propagano verticalmente attraverso il bedrock con ampiezza pari ad E_N ; al tetto del bedrock, sotto il deposito degli strati di terreno, il moto ha un'ampiezza pari a $E_N + F_N$. Sulla roccia affiorante, poiché le tensioni tangenziali sono nulle ($E_N = F_N$), il moto avrà ampiezza pari a $2E_N$. La funzione di trasferimento dal bedrock al bedrock-affiorante è la seguente:

$$A_{NN}(\omega) = \frac{2E_N}{E_N + F_N} \quad (26)$$

A è non lineare poiché G è funzione di γ . Nella procedura di calcolo infatti, da una stima iniziale del modulo di deformazione al taglio, si ottiene la tensione ipotizzando un legame lineare, per poi ottenere un nuovo valore di γ . Grazie a questo valore aggiornato si valuta un nuovo modulo G così da ripetere la procedura fino a quando la differenza tra la deformazione aggiornata e quella ottenuta dalla precedente iterazione viene ritenuta accettabile. Il modello per $G(\gamma)$ adoperato è quello suggerito da Ishibashi e Zhang (1993) che tiene conto degli effetti della pressione di confinamento e dell'indice di plasticità:

$$G = G_{max} \cdot K(\gamma, PI) (\sigma'_m)^{m(\gamma, PI) - m_0} \quad (24)$$

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000102 + n(PI)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right\} \quad (25)$$

$$m(\gamma, PI) - m_0 = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(-0.0145PI^{1.3}) \quad (26)$$

$$n(PI) = \begin{cases} 0.0 & \text{per } PI = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} & \text{per } 0 < PI \leq 15 \\ 7.0 \times 10^{-7} PI^{1.976} & \text{per } 15 < PI \leq 70 \\ 2.7 \times 10^{-5} PI^{1.115} & \text{per } PI > 70 \end{cases} \quad (27)$$

dove G_{max} è dato dalla relazione

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (28)$$

dove ρ è la densità del terreno e V_s la velocità di propagazione delle onde di taglio nello stesso. La (28) fornisce il valore iniziale di G per la prima iterazione.

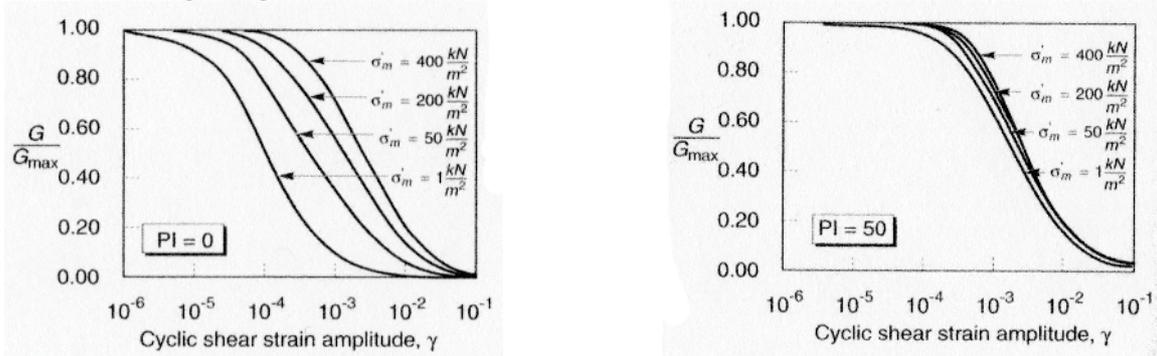


Figura 2: Influenza della pressione di confinamento e della plasticità sul modulo di deformazione al taglio.

Per quanto riguarda invece il coefficiente di smorzamento viscoso ξ , in conseguenza del modello introdotto dalla (24) si ha:

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 PI^{2.5})}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{max}} + 1 \right] \quad (29)$$

da cui si deduce che anche ξ deve essere ricalcolato ad ogni iterazione.

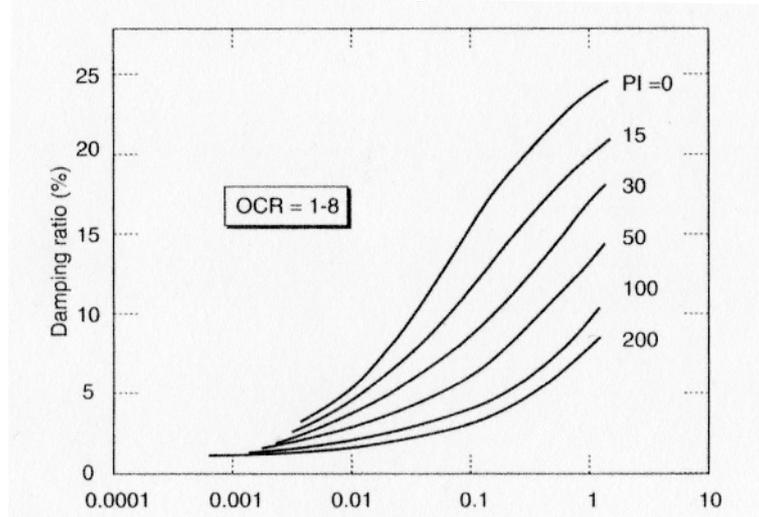


Figura 3: Influenza della plasticità sul coefficiente di smorzamento viscoso.

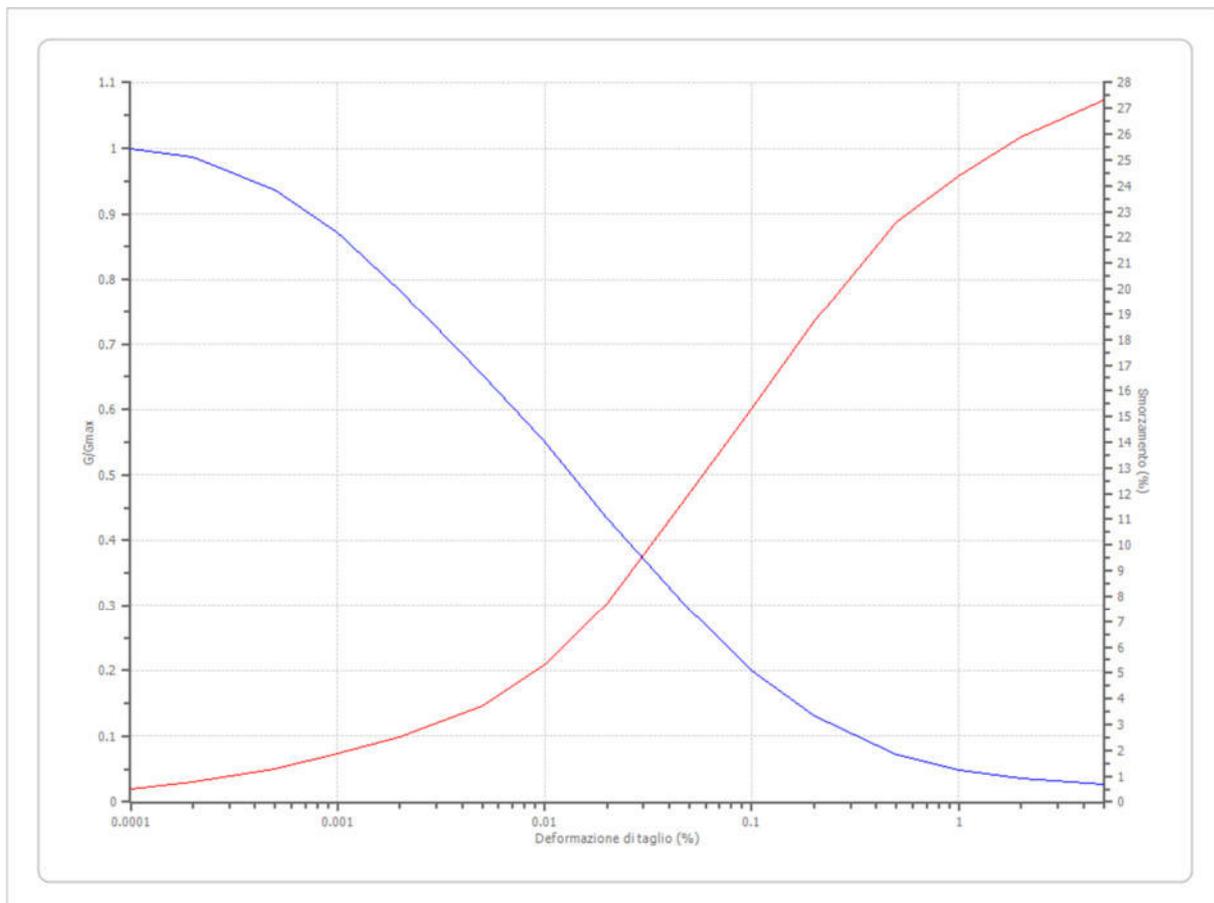
Dati generali

Latitudine 44,6431351[°]
 Longitudine 10,7096272[°]

Terreni

Seed et al. (1986) Gravel

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.0001	1.000	0.0001	0.500
0.0002	0.987	0.0002	0.800
0.0005	0.937	0.0005	1.300
0.001	0.872	0.001	1.900
0.002	0.783	0.002	2.500
0.005	0.653	0.005	3.700
0.010	0.550	0.010	5.300
0.020	0.434	0.020	7.700
0.050	0.293	0.050	12.000
0.100	0.200	0.100	15.300
0.200	0.132	0.200	18.700
0.500	0.072	0.500	22.600
1.000	0.049	1.000	24.400
2.000	0.036	2.000	25.900
5.000	0.027	5.000	27.300



Stratigrafia

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Terreno	Gmax [MPa]	Peso unità vol. [kN/m ³]	Vs [m/s]	Tensione verticale [kPa]
1	--	2.1	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	72.66	22.0	110.0	12.8
2	2.1	10.0	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	94.25	22.0	205.0	135.6
3	12.1	3.5	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	191.21	22.0	292.0	266.9
4	15.6	4.0	Idriss (1990) Sand (Seed and Idriss 1970)	332.41	22.0	385.0	312.6
5	19.6	4.4	Seed et al. (1986) Gravel	270.03	22.0	347.0	363.8
6	24.0	6.0	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	378.82	22.0	411.0	427.2
7	30.0	40.0	Seed et al. (1986) Gravel	560.65	22.0	500.0	707.6
8	70.0	50.0	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	560.65	22.0	550.0	1256.2
9	100.0	--	Smorzamento costante	560.65	22.0	600.0	1560.9

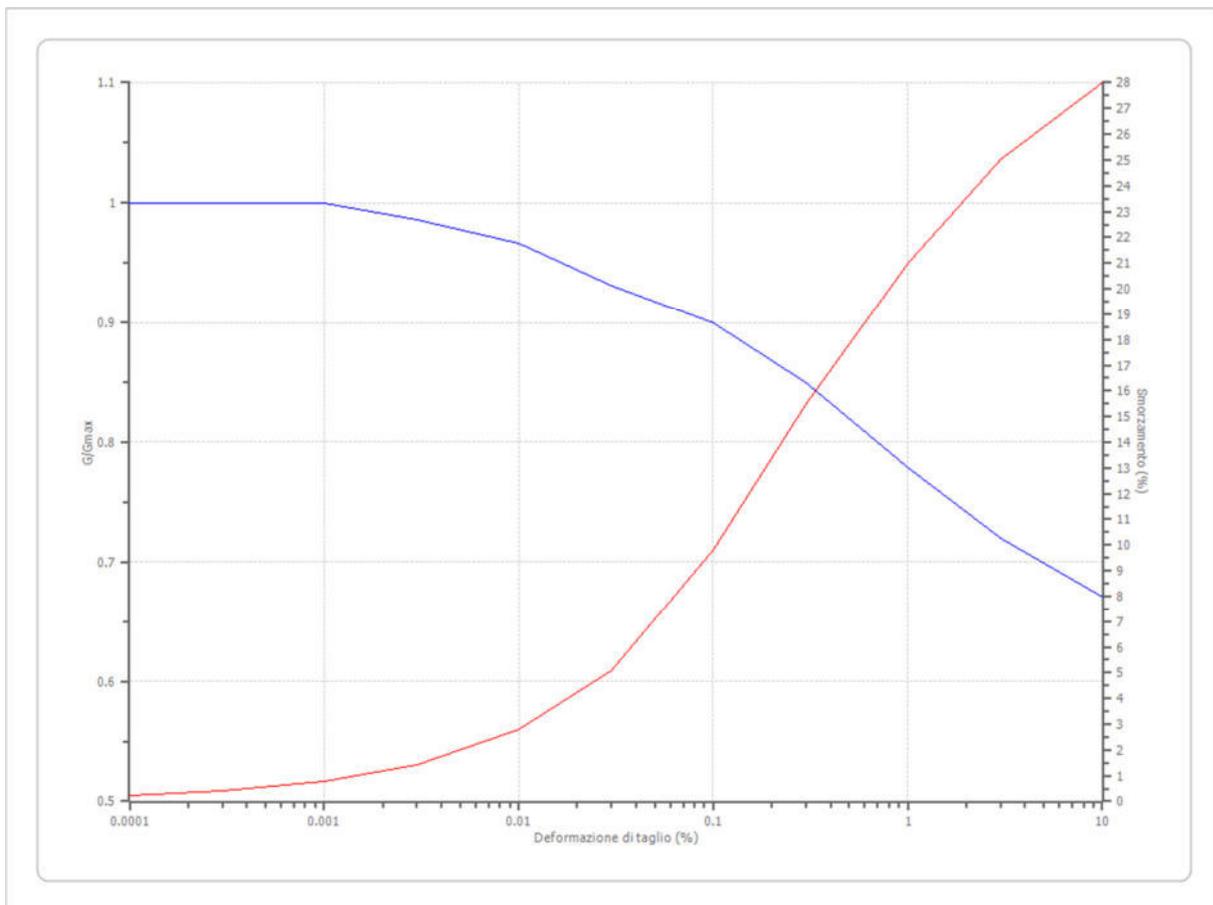
Strato con falda: 2
 Strato rilevamento accelerogramma: 9 Affiorante

Elaborazione

Numero di iterazioni 16
 Rapporto tra deformazione a taglio effettiva e deformazione massima 0.5
 Tipo di modulo elastico Shake
 Massimo errore percentuale di convergenza 1.34 E-03

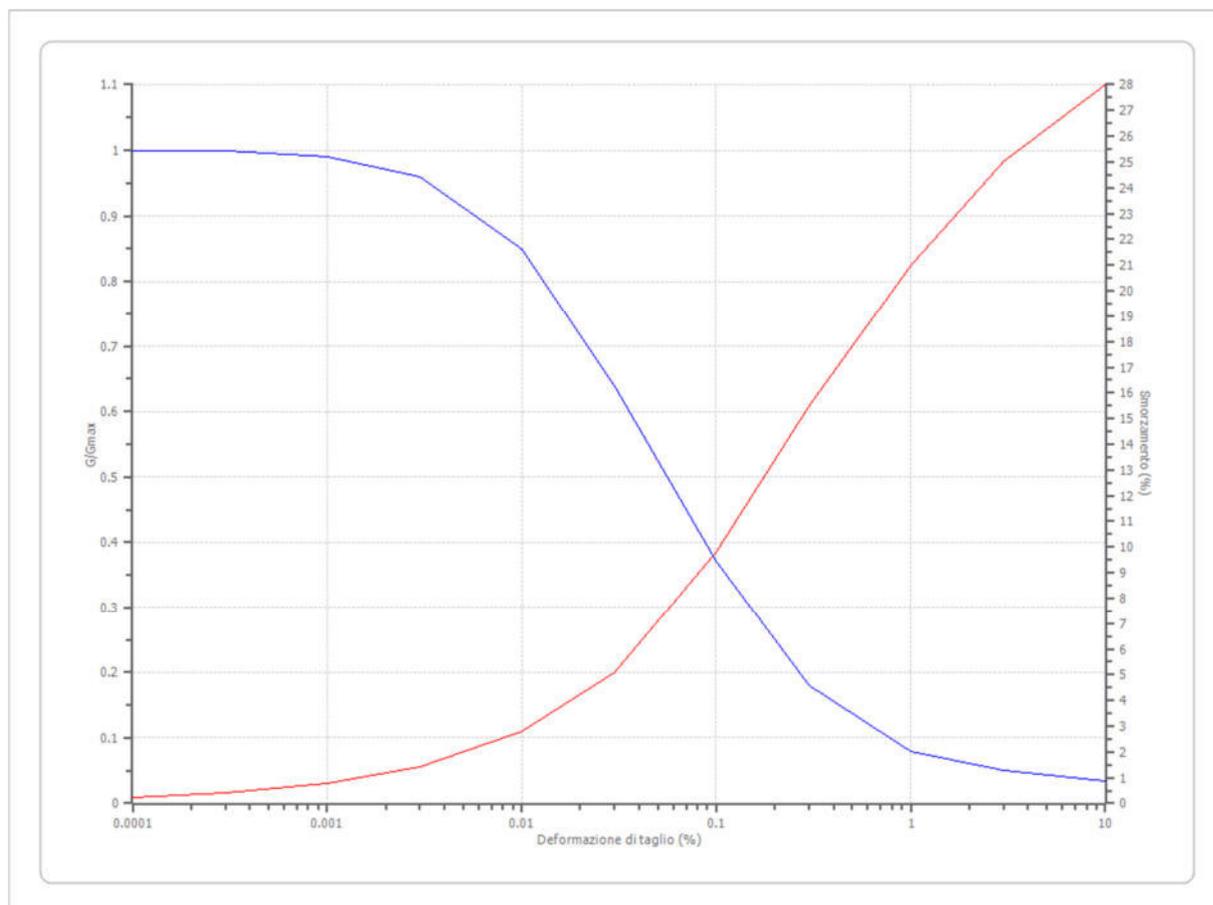
Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.0001	1.000	0.0001	0.240
0.0003	1.000	0.0003	0.420
0.001	1.000	0.001	0.800
0.003	0.986	0.003	1.400
0.010	0.966	0.010	2.800
0.030	0.931	0.030	5.100
0.100	0.900	0.100	9.800
0.300	0.850	0.300	15.500
1.000	0.779	1.000	21.000
3.000	0.720	3.000	25.000
10.000	0.671	10.000	28.000



Idriss (1990) Sand (Seed and Idriss 1970)

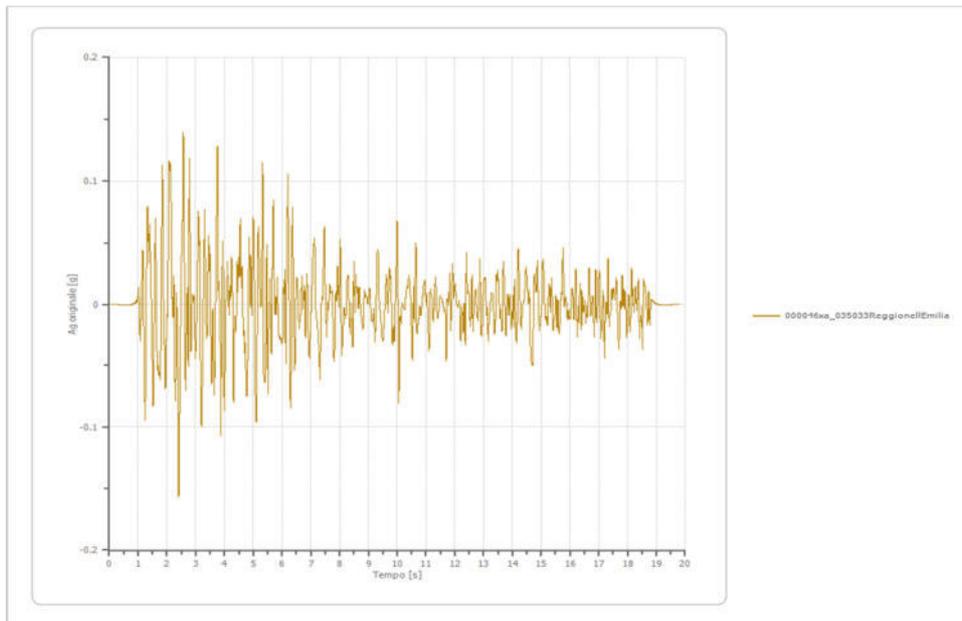
Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.0001	1.000	0.0001	0.240
0.0003	1.000	0.0003	0.420
0.001	0.990	0.001	0.800
0.003	0.960	0.003	1.400
0.010	0.850	0.010	2.800
0.030	0.640	0.030	5.100
0.100	0.370	0.100	9.800
0.300	0.180	0.300	15.500
1.000	0.080	1.000	21.000
3.000	0.050	3.000	25.000
10.000	0.035	10.000	28.000



File 000046xa_035033ReggionellEmilia:

Accelerogramma importato

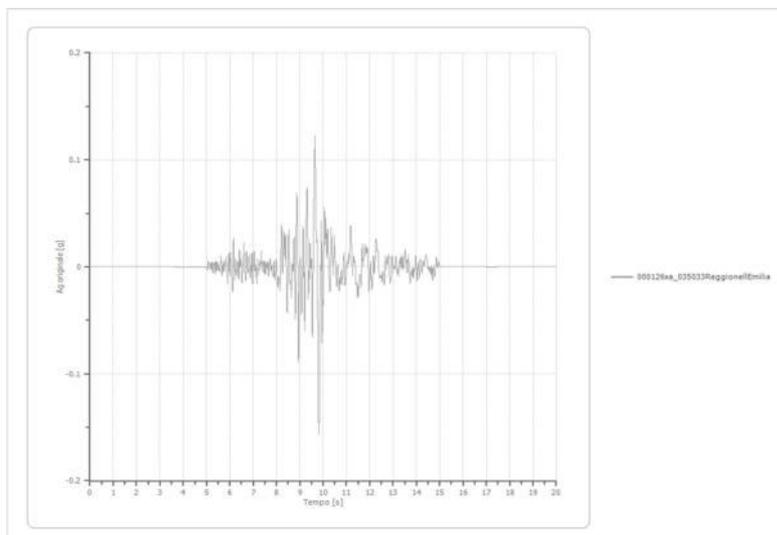
Nome del file 000046xa_035033ReggionellEmilia
Durata della traccia 19.810 [s]
Accelerazione massima 0.157 [g]
Periodo con accelerazione massima 2.410 [s]



File 000126xa_035033ReggionellEmilia:

Accelerogramma importato

Nome del file 000126xa_035033ReggionellEmilia
Durata della traccia 19.985 [s]
Accelerazione massima 0.157 [g]
Periodo con accelerazione massima 9.820 [s]



File 000354xa_035033ReggionellEmilia:

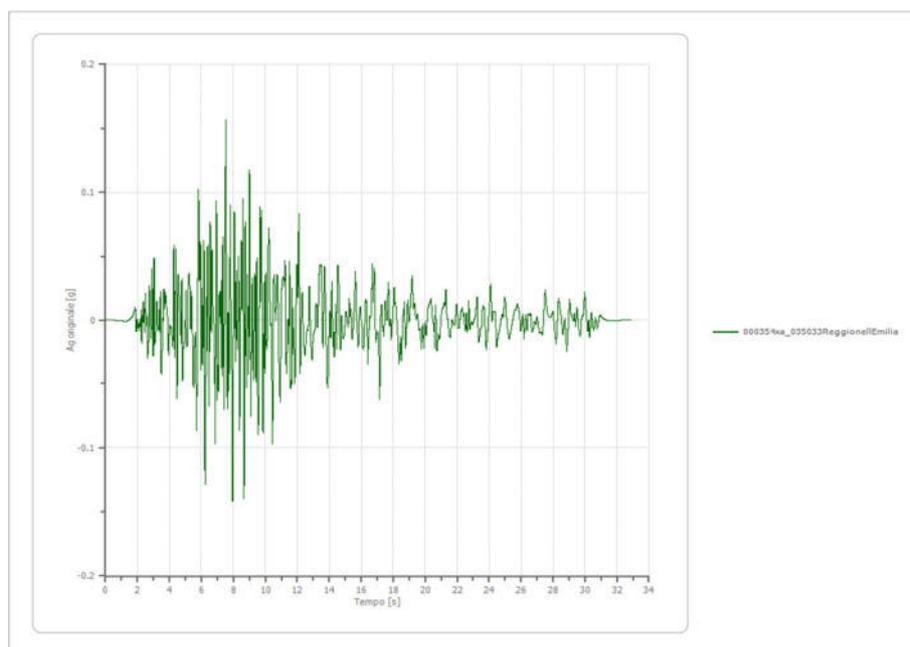
Accelerogramma importato

Nome del file 000354xa_035033ReggionellEmilia

Durata della traccia 32.875 [s]

Accelerazione massima 0.157 [g]

Periodo con accelerazione massima 7.525 [s]

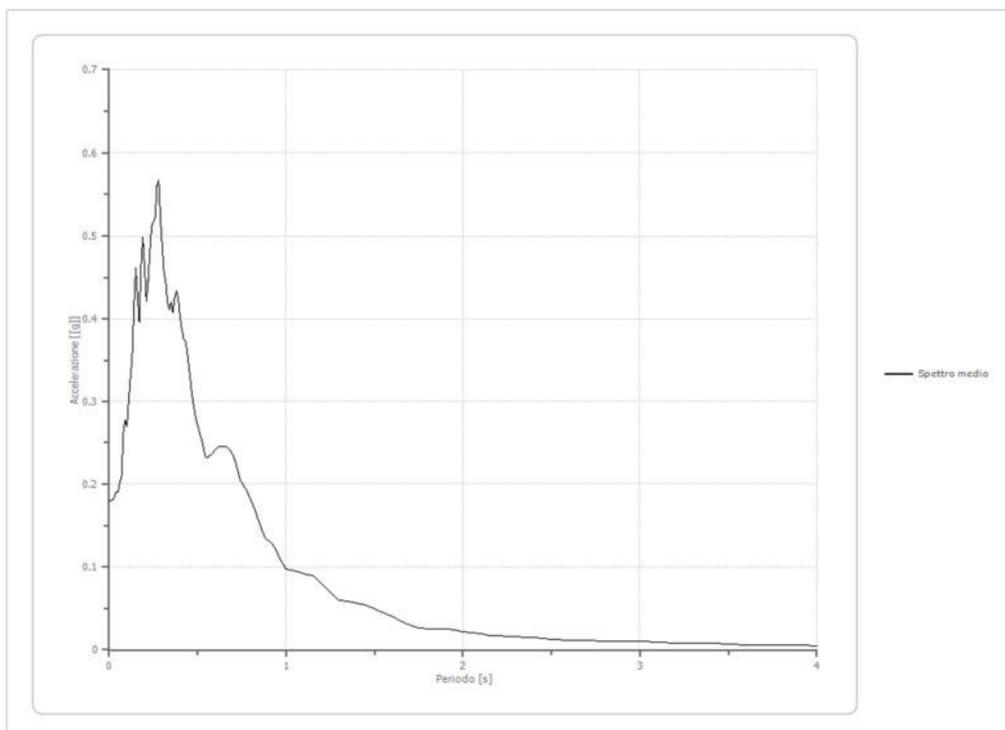


Fattori di amplificazione ICMS 2008

Tai	0.150 [s]
Tvi	0.700 [s]
Tao	0.280 [s]
Tvo	0.680 [s]
Sami	3.477 [m/s ²]
Svmi	0.185 [m/s]
Samo	4.476 [m/s ²]
Svmo	0.247 [m/s]
Fa	1.287 [-]
Fv	1.332 [-]
TB	0.116 [s]
TC	0.347 [s]
TD	2.244 [s]
SA(0)	0.232 [g]
SA(TB)	0.456 [g]

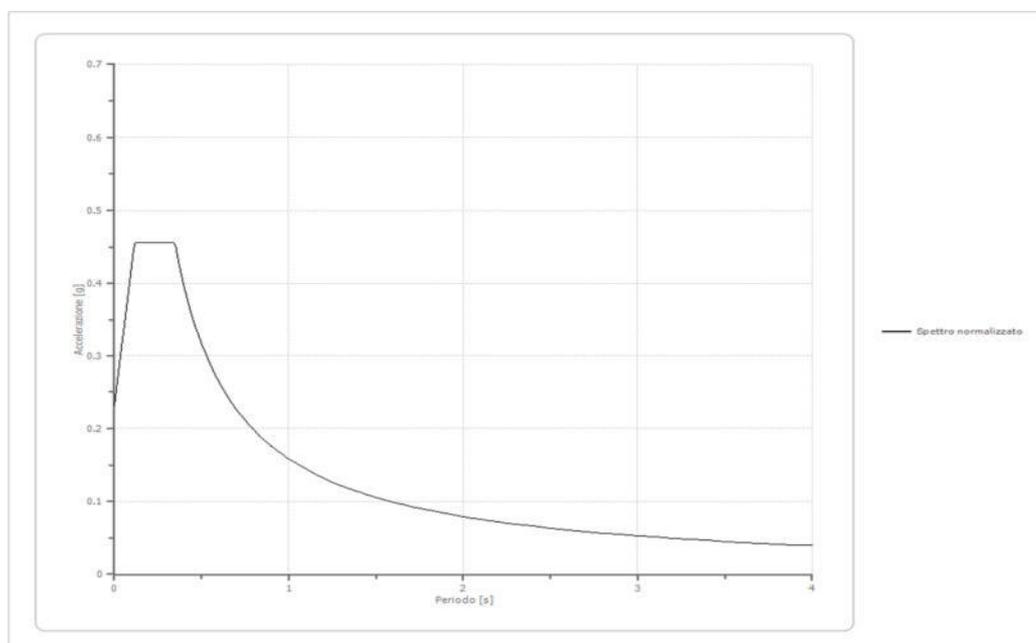
Spettro medio di risposta elastico

Periodo [s]	Accelerazione [g]								
0.00	0.1801	0.26	0.5220	0.52	0.2552	0.98	0.1041	2.25	0.0160
0.01	0.1801	0.27	0.5603	0.53	0.2469	1.00	0.0970	2.30	0.0157
0.02	0.1815	0.28	0.5672	0.54	0.2356	1.05	0.0951	2.35	0.0153
0.03	0.1841	0.29	0.5201	0.55	0.2318	1.10	0.0922	2.40	0.0147
0.04	0.1902	0.30	0.4865	0.56	0.2325	1.15	0.0898	2.50	0.0132
0.05	0.1901	0.31	0.4564	0.57	0.2351	1.20	0.0805	2.60	0.0119
0.06	0.2021	0.32	0.4430	0.58	0.2365	1.25	0.0695	2.70	0.0111
0.07	0.2102	0.33	0.4193	0.60	0.2416	1.30	0.0595	2.80	0.0107
0.08	0.2624	0.34	0.4117	0.62	0.2447	1.35	0.0579	2.90	0.0103
0.09	0.2778	0.35	0.4204	0.64	0.2456	1.40	0.0564	3.00	0.0098
0.10	0.2693	0.36	0.4082	0.66	0.2451	1.45	0.0536	3.10	0.0092
0.11	0.3004	0.37	0.4249	0.68	0.2420	1.50	0.0488	3.20	0.0086
0.12	0.3282	0.38	0.4343	0.70	0.2352	1.55	0.0449	3.30	0.0082
0.13	0.3553	0.39	0.4255	0.72	0.2226	1.60	0.0396	3.40	0.0075
0.14	0.4150	0.40	0.4032	0.74	0.2055	1.65	0.0341	3.50	0.0066
0.15	0.4621	0.41	0.3880	0.76	0.1978	1.70	0.0297	3.60	0.0060
0.16	0.4295	0.42	0.3766	0.78	0.1896	1.75	0.0264	3.70	0.0057
0.17	0.3965	0.43	0.3744	0.80	0.1807	1.80	0.0255	3.80	0.0055
0.18	0.4633	0.44	0.3626	0.82	0.1704	1.85	0.0253	3.90	0.0052
0.19	0.4986	0.45	0.3438	0.84	0.1586	1.90	0.0247	4.00	0.0050
0.20	0.4613	0.46	0.3236	0.86	0.1466	1.95	0.0236		
0.21	0.4213	0.47	0.3050	0.88	0.1349	2.00	0.0222		
0.22	0.4461	0.48	0.2905	0.90	0.1315	2.05	0.0206		
0.23	0.4821	0.49	0.2797	0.92	0.1284	2.10	0.0190		
0.24	0.5117	0.50	0.2702	0.94	0.1218	2.15	0.0176		
0.25	0.5166	0.51	0.2621	0.96	0.1128	2.20	0.0167		



Spettro normalizzato di risposta elastico

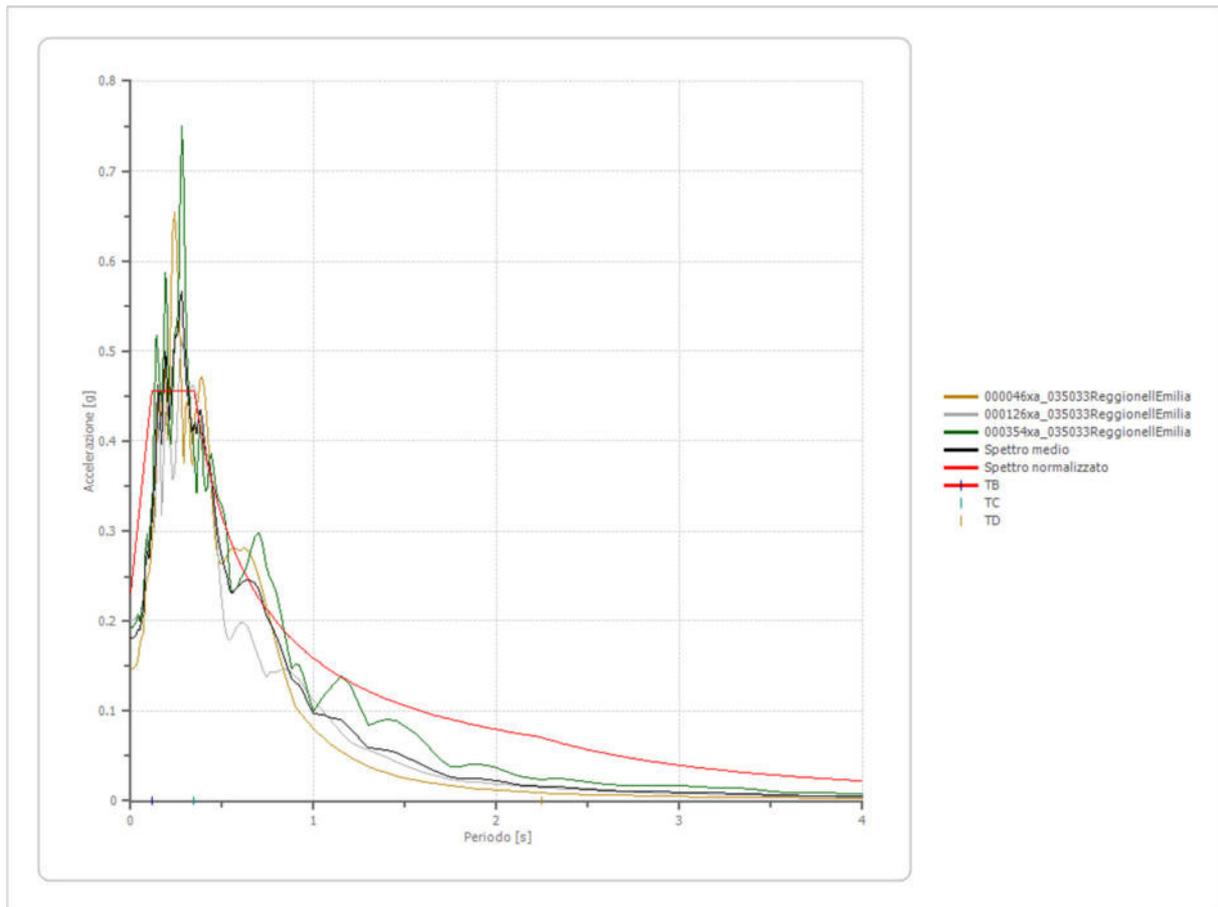
Periodo [s]	Accelerazione [g]								
0.00	0.2318	0.26	0.4562	0.52	0.3042	0.98	0.1614	2.25	0.0703
0.01	0.2512	0.27	0.4562	0.53	0.2985	1.00	0.1582	2.30	0.0688
0.02	0.2706	0.28	0.4562	0.54	0.2929	1.05	0.1507	2.35	0.0673
0.03	0.2900	0.29	0.4562	0.55	0.2876	1.10	0.1438	2.40	0.0659
0.04	0.3095	0.30	0.4562	0.56	0.2825	1.15	0.1376	2.50	0.0633
0.05	0.3289	0.31	0.4562	0.57	0.2775	1.20	0.1318	2.60	0.0608
0.06	0.3483	0.32	0.4562	0.58	0.2727	1.25	0.1266	2.70	0.0586
0.07	0.3677	0.33	0.4562	0.60	0.2636	1.30	0.1217	2.80	0.0565
0.08	0.3871	0.34	0.4562	0.62	0.2551	1.35	0.1172	2.90	0.0545
0.09	0.4065	0.35	0.4520	0.64	0.2472	1.40	0.1130	3.00	0.0527
0.10	0.4260	0.36	0.4394	0.66	0.2397	1.45	0.1091	3.10	0.0510
0.11	0.4454	0.37	0.4275	0.68	0.2326	1.50	0.1055	3.20	0.0494
0.12	0.4562	0.38	0.4163	0.70	0.2260	1.55	0.1021	3.30	0.0479
0.13	0.4562	0.39	0.4056	0.72	0.2197	1.60	0.0989	3.40	0.0465
0.14	0.4562	0.40	0.3955	0.74	0.2138	1.65	0.0959	3.50	0.0452
0.15	0.4562	0.41	0.3858	0.76	0.2081	1.70	0.0931	3.60	0.0439
0.16	0.4562	0.42	0.3766	0.78	0.2028	1.75	0.0904	3.70	0.0428
0.17	0.4562	0.43	0.3679	0.80	0.1977	1.80	0.0879	3.80	0.0416
0.18	0.4562	0.44	0.3595	0.82	0.1929	1.85	0.0855	3.90	0.0406
0.19	0.4562	0.45	0.3515	0.84	0.1883	1.90	0.0833	4.00	0.0395
0.20	0.4562	0.46	0.3439	0.86	0.1839	1.95	0.0811		
0.21	0.4562	0.47	0.3366	0.88	0.1798	2.00	0.0791		
0.22	0.4562	0.48	0.3296	0.90	0.1758	2.05	0.0772		
0.23	0.4562	0.49	0.3228	0.92	0.1719	2.10	0.0753		
0.24	0.4562	0.50	0.3164	0.94	0.1683	2.15	0.0736		
0.25	0.4562	0.51	0.3102	0.96	0.1648	2.20	0.0719		



Parametri spettro normalizzato

Ag [g]	F0	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]	S
0.232	1.968	--	0.116	0.347	2.244	0.232	0.456	1.440

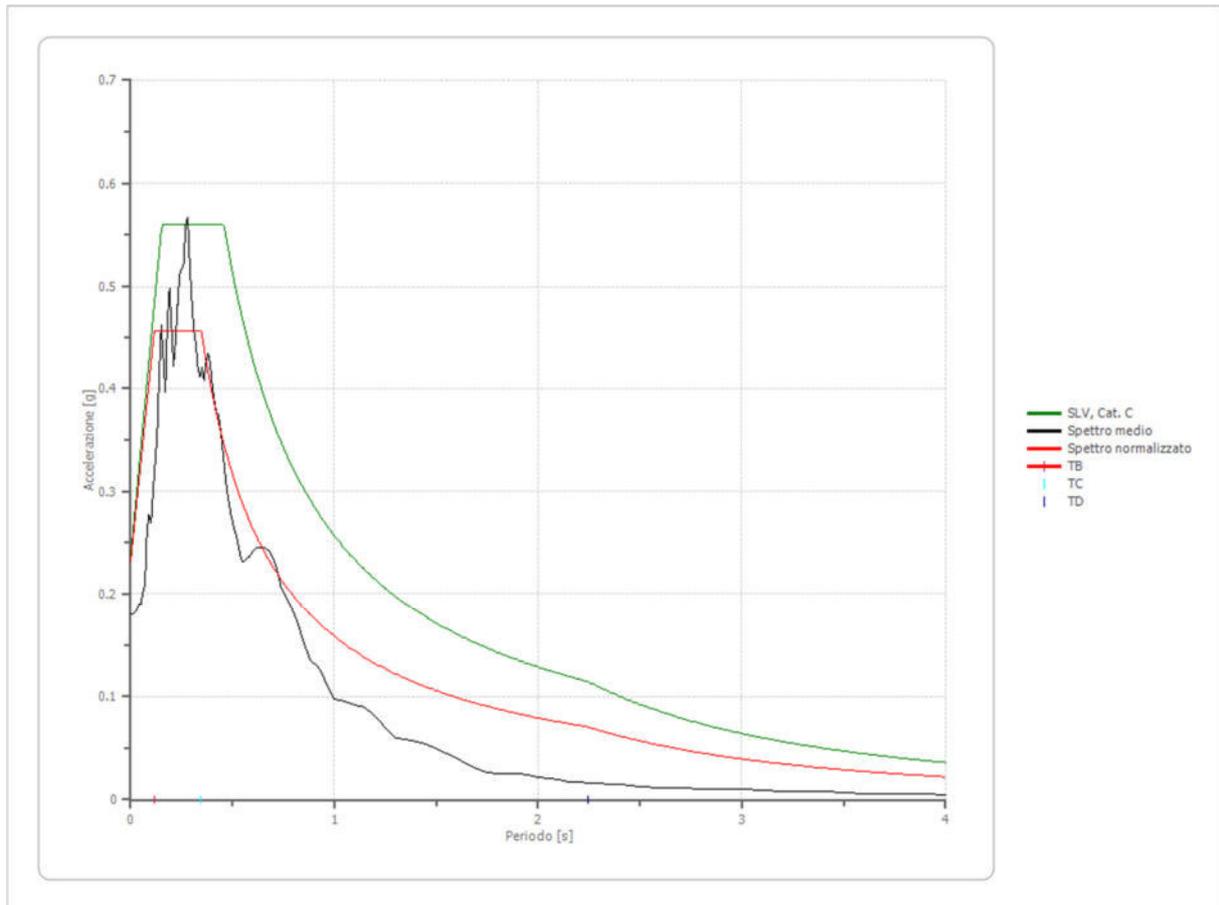
Confronto tra gli spettri



Confronto spettro normativa

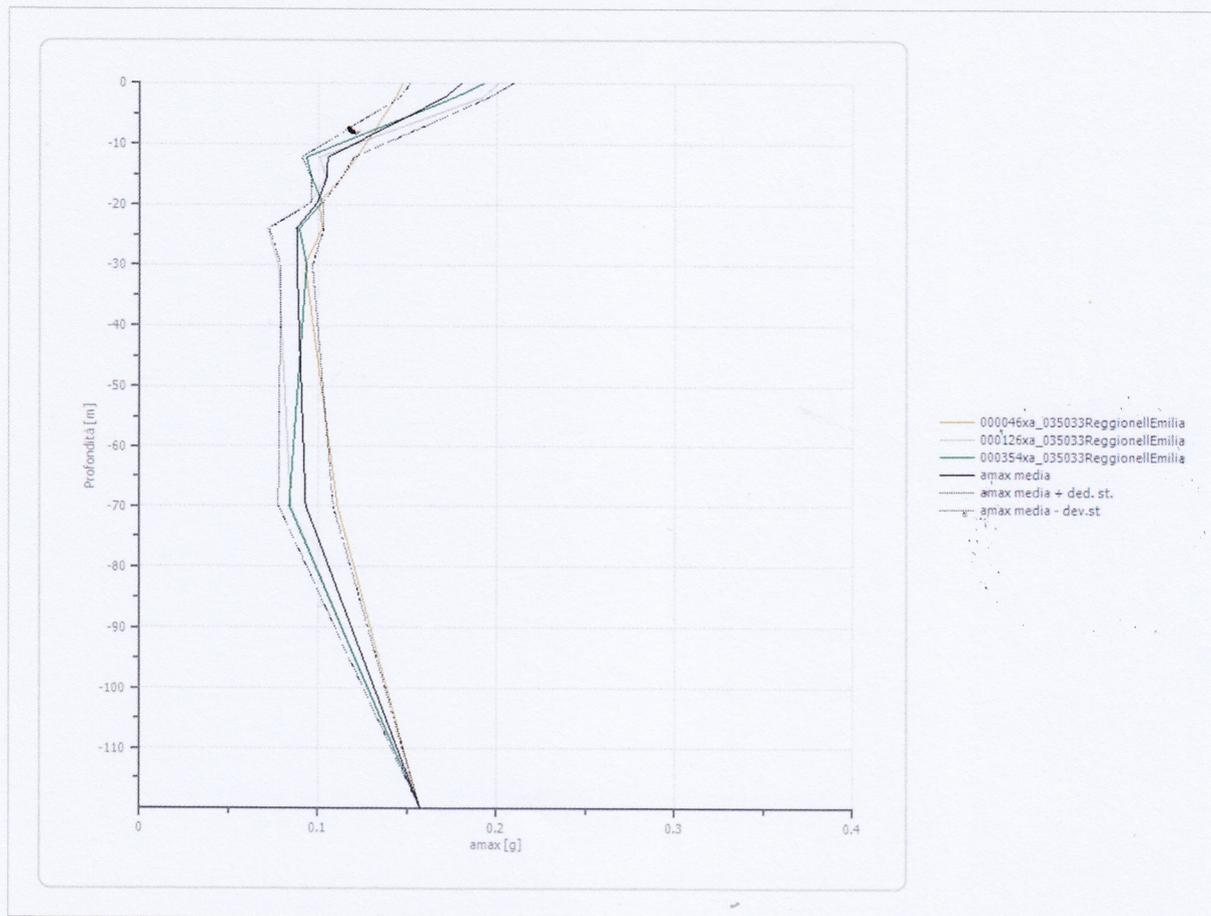
Tipo di spettro: Spettro di risposta elastico

	Operatività SLO	Danno SLD	Salvaguardia vita SLV	Prev. collasso SLC
Tr [anni]	30	50	475	975
ag [g]	0.050	0.062	0.161	0.205
Fo	2.472	2.494	2.365	2.383
Tc* [s]	0.251	0.265	0.29	0.307
Ss	1.50	1.50	1.47	1.41
St	1.00	1.00	1.00	1.00
Cc	1.66	1.63	1.58	1.55
TB [s]	0.139	0.144	0.153	0.159
TC [s]	0.416	0.431	0.458	0.476
TD [s]	1.800	1.848	2.244	2.420
Se(0) [g]	0.075	0.093	0.237	0.288
Se(TB) [g]	0.185	0.232	0.560	0.687

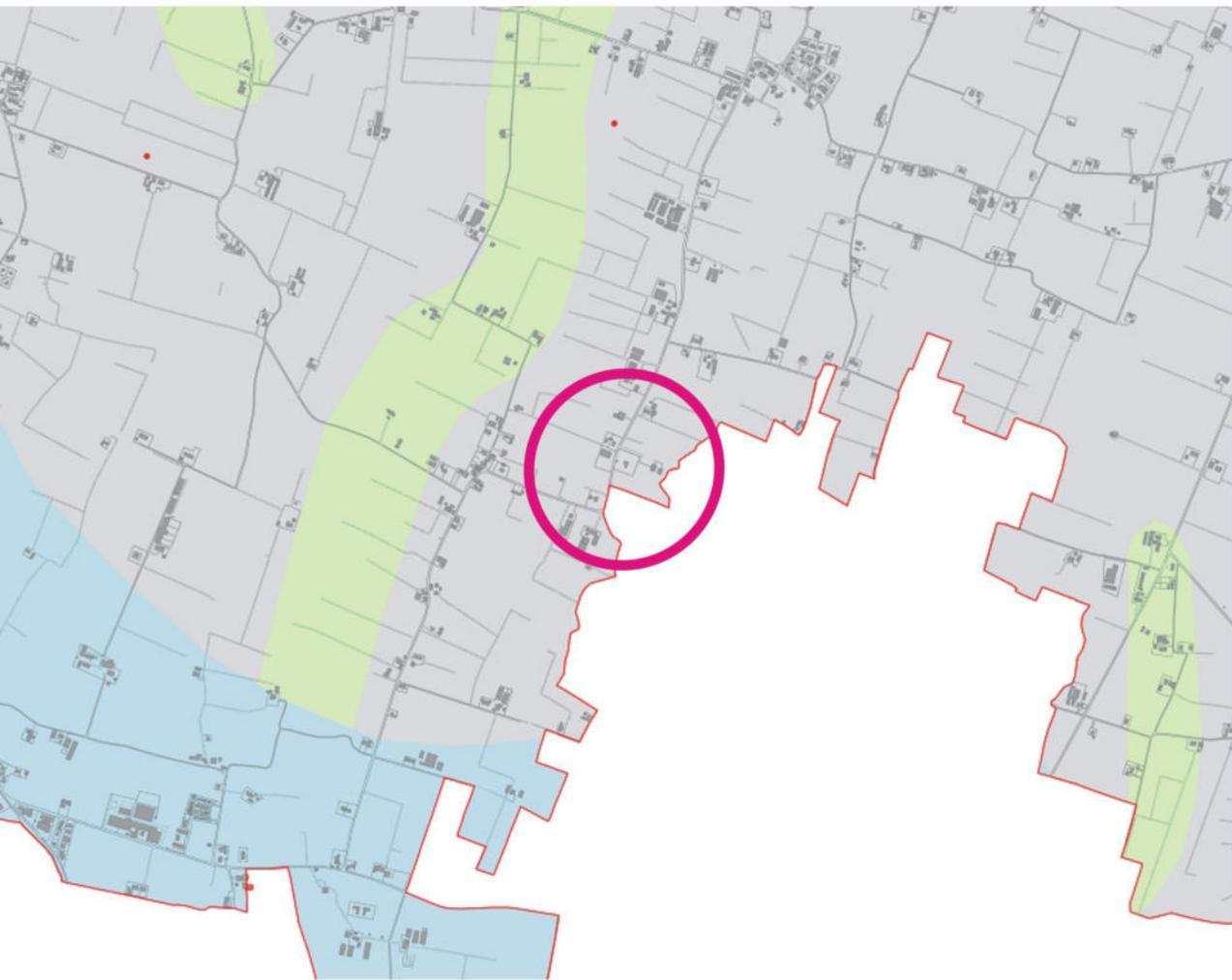


Profilo a max

	0.0 [m]	2.1 [m]	12.1 [m]	15.6 [m]	19.6 [m]	24.0 [m]	30.0 [m]	70.0 [m]	120.0 [m]
000046x a_03503 3Reggio nellEmil ia [g]	0.147	0.144	0.121	0.113	0.100	0.102	0.093	0.111	0.157
000126x a_03503 3Reggio nellEmil ia [g]	0.200	0.193	0.101	0.104	0.095	0.072	0.078	0.085	0.157
000354x a_03503 3Reggio nellEmil ia [g]	0.193	0.177	0.093	0.096	0.102	0.089	0.093	0.084	0.157
media [g]	0.180	0.171	0.105	0.104	0.099	0.088	0.088	0.093	0.157
Dev. St. [g]	0.029	0.025	0.015	0.008	0.003	0.015	0.009	0.015	0.000



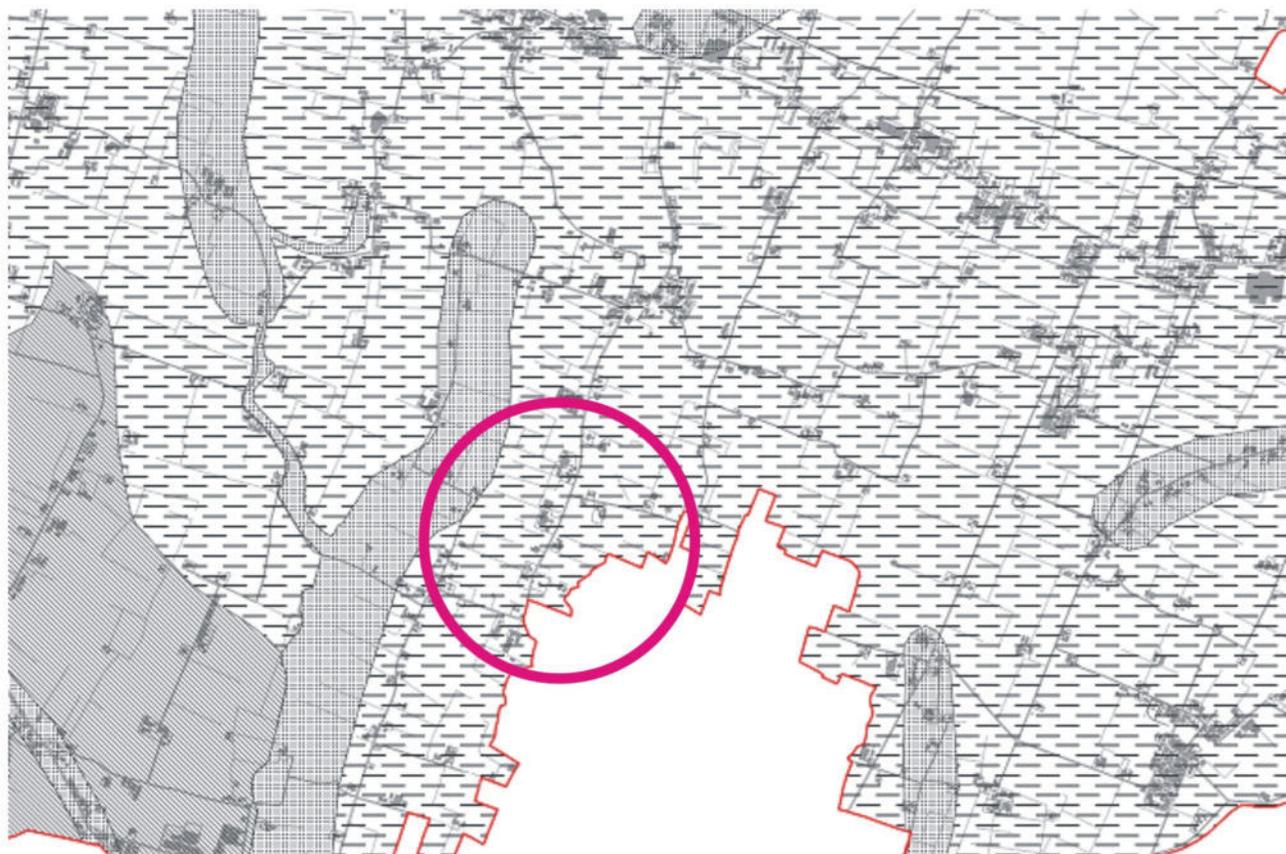
TAV 8 della Relazione geologico ambientale del QC del PSC zona Marmirolo



effetti attesi

Protocollo n. 2237/C/223_01 P3/2021/0169468 del 27/07/2021 Pag. 11 di 27

TAV. 8 della Relazione geologico ambientale del QC del PSC zona Marmiolo



effetti locali