\Dott. Paolo Paccara - GEOLOGO
Via Turati, 22 05100 Terni
Telefax 0744 / 221468 – 333/7907925

COMUNE DI TERNI

AGGIORNAMENTO DELLA RELAZIONE di MICROZONAZIONE SISMICA – LIVELLO III

——————————— ❋ ———————————

Piano Attuativo di iniziativa privata

Zona C5 - Insediamenti residenziali di espansione.

Zona G - Spazi pubblici attrezzati per impianti sportivi (Gv), comprese tra Via del Centenario e Via del Rivo.

COMMITTENTE: Impresa Ponteggia Snc – TERNI.

——————————— ❋ ———————————

dott. Paolo Paccara - Geologo
Ordine dei Geologi dell'Umbria
Iscrizione Albo Professionale n° 219.

ORDINE DEI GEOLOGI
GEOLOGO
PACCARA PAOLO
ALBO
219
DELLA REGIONE UMBRIA

Dott.ssa Tatiana Nevi - Geologa

MARZO 2013

COMUNE DI TERNI
Provincia di Terni

1 - PREMESSA

In seguito all'incarico ricevuto dalla Impresa Ponteggia Snc di Terni si redige il presente aggiornamento all'integrazione di Microzonazione sismica del Piano Attuativo di iniziativa privata, Zona C5, per insediamenti residenziali di espansione e Zona Gv per spazi pubblici attrezzati per impianti sportivi, comprese tra Via del Centenario e Via del Rivo.
Tale aggiornamento si rende necessario in ragione di un errore grafico riscontrato nella precedente versione della perizia di microzonazione sismica ove è stato indicato un orizzonte ghiaioso nella porzione basale delle stratigrafie, anziché sabbie e sabbie limose effettivamente intercettate dai carotaggi.
Inoltre nel periodo intercorso tra la precedente perizia e la presente è stata eseguita un'ulteriore indagine sismica di misurazione del rumore di fondo – HVSR con la quale è stato possibile individuare la frequenza di picco del sito ed relativo rapporto H/V.
Inoltre si è riusciti ad utilizzare il software Rexel 3.5 fino a ricavare i 7 accelegrammi di riferimento per il sito di interesse; questi accelerogrammi sono stati utilizzati per la successiva valutazione della risposta sismica locale (RSL) mediante il software Geostru RSLIII, e quindi definire il Fattore di Amplificazione specifico dell'area (dato puntuale rispetto ai valori indicati nella precedente perizia ove venivano utilizzati i valori tabellati del Dipartimento di Protezione Civile.
Le opere previste nel PA sono da ritenersi importanti pertanto si è proceduto all'effettuazione di tutti le indagini necessarie a definire poi la RSL numerica e confrontarle con i risultati dei DPCN e dei vvalori anche indicati nella relazione del Politecnico di Milano per il completamento della microzonazione sismica nella fascia pedemontana di B.Rivo.
Per completezza dei dati esposti si riportano il dettaglio delle stratigrafie dei carotaggi eseguiti nel 2010, le ulteriori prove penetrometriche superpesanti DPSH del 2011 e le indagini MASW eseguite sull'area sempre nel settembre 2011.

2 – INDAGINI GEOGNOSTICHE E PENETROMETRICHE

2.1 – SONDAGGI GEOGNOSTICI

Di seguito vengono descritte nel dettaglie le stratigrafie dei carotaggi eseguiti nel lotto oggetto di Piano Attuativo, le prove penetrometriche superpesanti DPSH, gli stendimenti sismici MASW e la misura HVSR (per la loro ubicazione vedi planimetria a seguire).

Sondaggio S1 – profondità raggiunta -14 m

Da 0 a 3 m: detriti di versante ghiaiosi immersi in matrice limo-sabbiosa rosso bruna con clasti eterometrici di natura calcarea e marnosa, di diametro 5-7 cm.
Da 3 a 5 m: livello a prevalente matrice sabbioso limosa e sabbioso argillosa rosso bruna
Da 5 a 7 m: di nuovo ghiaie etero metriche di dimensioni 2-3 cm in matrice limo-sabbiosa rossastra, mediamente cementate
Da 7 a 14 m: prevalenza di sabbie limose e sabbie argillose rosso-brune con falda intercettata a -13.5 m dal piano campagna.

Sondaggio S2 – profondità raggiunta -13 m

Da 0 a 1.5 m: coltre di alterazione dei detriti di versante ghiaiosi immersi in matrice limo-sabbiosa rosso bruna
Da 1.5 a 2 m: livello ghiaioso in matrice sabbioso limosa
Da 2 a 7 m: prevalenza di sabbie limose e sabbie argillose rosso-brune con pochi inclusi carbonatici e con falda intercettata a -7 m dal piano campagna
Da 7 a 13 m: sabbie argillose rosso brune in falda.

Sondaggio S3 – profondità raggiunta -15 m

Da 0 a 2 m: detriti di versante ghiaiosi immersi in matrice limo-sabbiosa rosso bruna
Da 2 a 5.5 m: ghiaie in matrice limo sabbiosa con clasti di diametro 1 cm circa
Da 5.5 a 12 m: sabbie limose e sabbie argillose rosso-brune con pochi inclusi carbonatici
Da 12 a 15 m: limi sabbiosi scuri con pochi clasti inclusi e mediamente addensati. Falda intercettata a -13.5 m.

2.2 –PROVE PENETROMETRICHE SUPERPESANTI (DPSH)

Sono state eseguite 3 prove penetrometriche dinamiche continue.

Caratteri delle prove penetrometriche come Metodo di Indagine in situ

L'indagine è stata condotta utilizzando il penetrometro dinamico medio PAGANI TG 73-100/200 (vedi tra gli allegati l'ubicazione delle prove e i relativi grafici di interpretazione per ogni singola prova penetrometrica). Il penetrometro dinamico è uno strumento di perforazione a percussione capace di valutare con continutà lo stato di addensamento dei terreni attraversati. Si tratta di un metodo di indagine che permette di valutare le condizioni di resistenza in sito dei terreni, la presenza di falda idrica e di dedurre in parte anche la natura litologica dei terreni. Le prove penetrometriche dinamiche sono codificate secondo una conduzione standardizzata; quindi per terreni molto addensati o cementati se si registra una resistenza all'avanzamento della punta su 30 cm di asta superiore a 60 colpi si deve sospendere la perforazione.

L'interpretazione di una prova consiste nel differenziare il terreno in strati omogenei caratterizzati da valori di resistenza simili; da questa discretizzazione si ottiene il parametro noto come Resistenza Penetrometrica Dinamica RPD, attraverso la nota Formula Olandese. Il software utilizzato per la determinazione delle resistenze (Win-din), consente di elaborare il numero di colpi N registrati dal penetrometro qui in uso, in numenro di colpi NSPT, ovvero in colpi della Prova penetrometrica Standard. Dal numero di colpi NSPT si determinano i parametri geotecnici sulla scorta di correlazioni note nella letteratura geotecnica specifica e di natura sperimentale. In questo caso, essendo i litotipi presenti prevalentemente ghiaiosi, le correlazioni valide sono quelle per terreni granulari, quindi si è determinata dapprima la densità relativa e da questa l'angolo di attrito ϕ', ma anche la coesione in condizioni non drenate (parametro Cu), il contenuto medio di acqua (W) e l'indice dei vuoti (e).

Prova n 1, profondità raggiunta 11.40 m (vedi grafico prova penetrometrica n°1 e sua ubicazione, allegati in fondo):

- dal piano campagna a -3 m di profondità: ghiaie e brecce in matrice sabbiosa. RPD Resistenza penetrometrica dinamica media =152.9 Kg/cmq, Nspt medio per questo strato = **26**. Terreno che resiste a condizioni granulari, angolo di attrito ϕ' = 32°, coesione = 0 Kg/cmq.
- da 3 a 5.7 m si è perforato uno strato di limi sabbiosi rosso bruni. RPD Resistenza penetrometrica dinamica media = 44.8 Kg/cmq, Nspt medio per questo strato = **9**. Terreno che resiste a condizioni miste granulari coesive, angolo di attrito ϕ' = 26°, coesione non drenata Cu = 0.3 Kg/cmq.
- da 5.7 a 9.6 m si è perforato uno strato di limi sabbiosi mediamente addensati. RPD Resistenza penetrometrica dinamica media = 98.3 Kg/cmq, Nspt medio per questo strato = **24**. Terreno che resiste a condizioni miste granulari coesive, angolo di attrito ϕ' = 29°, coesione non drenata Cu = 0.35 Kg/cmq.
- da 9.6 a 11.40 m si è perforato uno strato di ghiaie in matrice sabbiosa. RPD Resistenza penetrometrica dinamica media = 178.2 Kg/cmq, Nspt medio per questo strato = **50**. Terreno che resiste a condizioni granulari, angolo di attrito ϕ' = 37°, coesione = 0 Kg/cmq.

Prova n 2, profondità raggiunta 13.2 m (vedi grafico prova penetrometrica n°2 e sua ubicazione, allegati in fondo):

- dal piano campagna a -2.7 m di profondità: brecce in matrice sabbiosa. RPD Resistenza penetrometrica dinamica media =94 Kg/cmq, Nspt medio per questo strato = **16**. Terreno che resiste a condizioni granulari, angolo di attrito ϕ' = 31.5°, coesione = 0 Kg/cmq.
- da 2.7 a 5.1 m si è perforato uno strato di limi sabbiosi poco addensati. RPD Resistenza penetrometrica dinamica media = 43.7 Kg/cmq, Nspt medio per questo strato = **9**. Terreno che resiste a condizioni miste granulari coesive, angolo di attrito ϕ' = 25.5°, coesione non drenata Cu = 0.25 Kg/cmq.
- da 5.1 a 10.5 m si è perforato uno strato di limi sabbiosi mediamente addensati. RPD Resistenza penetrometrica dinamica media = 84.6 Kg/cmq, Nspt medio per questo strato = **21**. Terreno che resiste a condizioni miste granulari coesive, angolo di attrito ϕ' = 28.5°, coesione non drenata Cu = 0.35 Kg/cmq.
- da 10.5 a 13.2 m si è perforato uno strato di ghiaie in matrice sabbiosa mediamente addensate. RPD Resistenza penetrometrica dinamica media = 149 Kg/cmq, Nspt medio per questo strato = **44**. Terreno che resiste a condizioni granulari, angolo di attrito ϕ' = 36.5°, coesione = 0 Kg/cmq.

falda idrica a -7 m dal piano campagna.

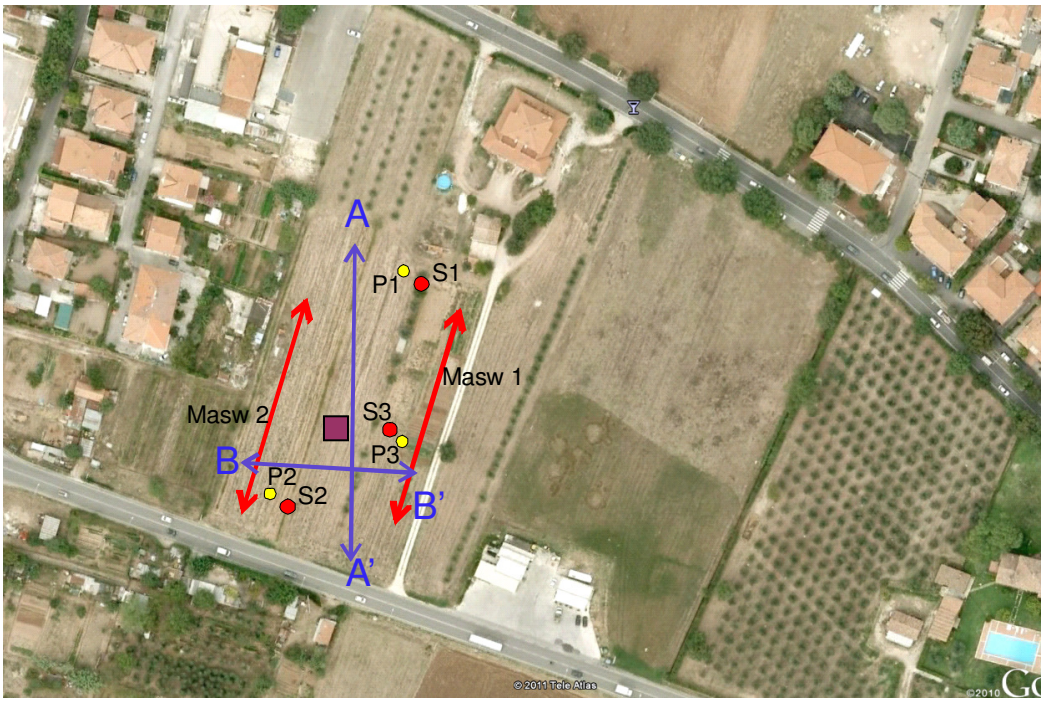
Prova n 3, profondità raggiunta 10.2 m (vedi grafico prova penetrometrica n°3 e sua ubicazione, allegati in fondo):

- dal piano campagna a -2.1 m di profondità: brecce in matrice sabbiosa. RPD Resistenza penetrometrica dinamica media =55 Kg/cmq, Nspt medio per questo strato = **9**. Terreno che resiste a condizioni granulari, angolo di attrito ϕ' = 28°, coesione = 0 Kg/cmq.

- da 2.1 a 4.8 m si è perforato uno strato di limi sabbiosi poco addensati. RPD Resistenza penetrometrica dinamica media = 42.6 Kg/cmq, Nspt medio per questo strato = **8**. Terreno che resiste a condizioni miste granulari coesive, angolo di attrito ϕ' = 26.5°, coesione non drenata Cu = 0.3 Kg/cmq.

- da 4.8 a 7.2 m si è perforato uno strato di limi sabbiosi mediamente addensati. RPD Resistenza penetrometrica dinamica media = 117.2 Kg/cmq, Nspt medio per questo strato = **26**. Terreno che resiste a condizioni miste granulari coesive, angolo di attrito ϕ' = 29°, coesione non drenata Cu = 0.4 Kg/cmq.

- da 7.2 a 10.2 m si è perforato uno strato di ghiaie in matrice sabbiosa mediamente addensate. RPD Resistenza penetrometrica dinamica media = 204 Kg/cmq, Nspt medio per questo strato = **52**. Terreno che resiste a condizioni granulari, angolo di attrito ϕ' = 38°, coesione = 0 Kg/cmq.



Misura HVSR

SONDGGIO

PROVA PENETROMETRICA SUPERPESANTE

STENDIMENTO DI SISMICA A RIFRAZIONE MASW

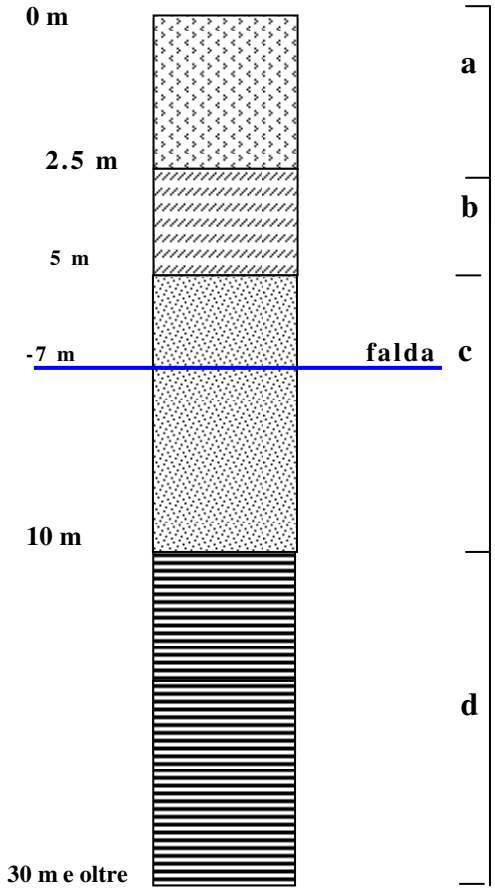
SEZIONI STRATIGRAFICHE (Vedi allegati)

2.3 MODELLO GEOTECNICO DI RIFERIMENTO (corretto)

L'area di studio vede la presenza di sedimenti a comportamento prevalentemente granulare (e subordinatamente coesivo), ma sulla scorta delle indagini geognostiche condotte possono essere distinte due differenti zone geotecniche soprattutto per la diversa posizione dell falda: la prima zona geotecnica è ubicata verso valle, ovvero prossima a Via del Centenario, ove risulta più superficiale, la seconda zona invece è individuabile nella porzione verso monte dell'area di studio, dove con falda idrica è più profonda.

A seguire vengono riproposte le due stratigrafie di riferimento, corrette quindi rispetto a quanto indicato nella relazione geologica del Piano Attuativo, ed estese fino a 30 m da interpretazione degli stendimenti MASW, dalla misura HVSR e dalla consultazione di alcune stratigrafie di pozzo nell'area limitrofa a Borgo Rivo.

stratigrafia zona geotecnica 1, prossima a Via del Centenario



(**a**) brecce in matrice sabbiosa: γn = 1,85 t/mc, ϕ' = 29°, C' = 0 Kg/cmq, E=Modulo di Young espresso in kg/cmq= 280

(**b**) limi sabbiosi poco addensati: γn = 1.8 t/mc, ϕ' = 25°, C' = 0.15 Kg/cmq, E=Modulo di Young espresso in kg/cmq= 220

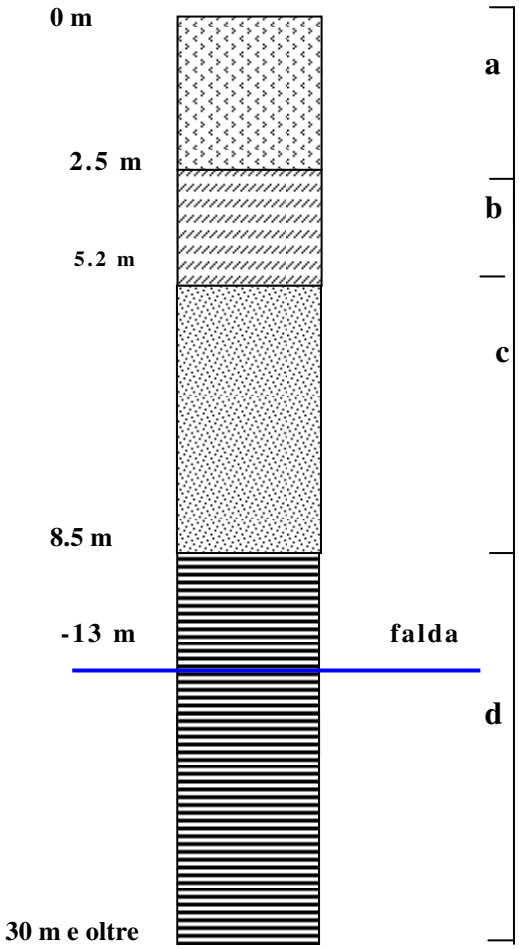
(**c**) sabbie e limi mediamente addensati γn = 1.9 t/mc, .γsat = 2 t/mc ϕ' = 28°, C' = 0.2 Kg/cmq, E=Modulo di Young espresso in kg/cmq= 320

Bedrock like

(**d**) argille limo-sabbiose consistenti con intercalazioni di orizzonti di travertini, di spessore metrico, nella porzione superiore, passanti ad argille limo-sabbiose (Bacino Tiberino) γn = 2.1 t/mc, ϕ' = 25°, C' = 0.5 Kg/cmq, E=Modulo di Young espresso in kg/cmq= 500

Disegno non in scala

stratigrafia zona geotecnica 2



(**a**) brecce in matrice sabbiosa: γn = 1,85 t/mc, ϕ' = 28°, C' = 0 Kg/cmq, E=Modulo di Young espresso in kg/cmq= 280

(**b**) limi sabbiosi poco addensati: γn = 1.85 t/mc, ϕ' = 26°, C' = 0.15 Kg/cmq, E=Modulo di Young espresso in kg/cmq= 230

(**c**) sabbie e limi mediamente addensati .γn = 1.95 t/mc, ϕ' = 28.5°, C' = 0.2 Kg/cmq, E=Modulo di Young espresso in kg/cmq= 320

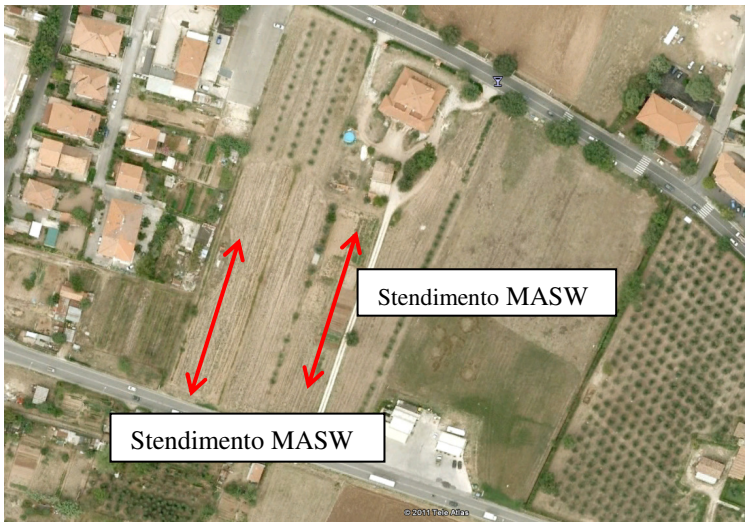
Bedrock like

(**d**) argille limo-sabbiose consistenti con intercalazioni di orizzonti di travertini, di spessore metrico, nella porzione superiore, passanti ad argille limo-sabbiose (Bacino Tiberino) γn = 2.1 t/mc, ϕ' = 25°, C' = 0.5 Kg/cmq, E=Modulo di Young espresso in kg/cmq= 500

Disegno non in scala

3 – ANALISI E RISULTATI DEGLI STENDIMENTI DI SISMICA A RIFRAZIONE MASW

Presso la proprietà Ponteggia s.n.c. sono stati condotti due stendimenti di sismica a rifrazione MASW, lunghi 32 m ciascuno e con distanza intergeofonica di 2 m, volti alla caratterizzazione delle proprietà meccaniche ed elastiche dei primi metri di sottosuolo così come previsto dalle normative vigenti (D.M. 14/01/2008 PUNTO 3.2.2).
Lo scopo dell'indagine è la caratterizzazione dinamica del sottosuolo nelle prime decine di metri con 1'individuazione delle principali unità geofisiche e delle relative proprietà meccaniche elastiche, quali velocità delle onde longitudinali P (Vp), velocità delle onde trasversali S (Vs) e i relativi parametri elastici (E, G, K e v).
Sulla base dei valori di Vs e del modulo di taglio (G) sarà possibile valutare la rigidezza del suolo e fornire delle prime indicazioni sul comportamento dinamico della parte superfciale del sottosuolo, in applicazione alla normativa nazionale (D.G.R. 22 dicembre 2005, n. VIIUlS66 "Criteri e indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del P.G.T., in attuazione dell'art. 57, comma 1, della l.r. 12/2005").



In riferimento alla nuova normativa antisismica presto in vigore (D.M. 14/1/2008), redatta sulla base dell'Eurocodice 7, ai fini della progettazione ingegneristica, la categoria di suolo risultante dalle prove di sismica a rifrazione è la categoria di suolo C, ovvero "ovvero *Terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con Vs30 comprese tra 360 e 180 m\s" in quanto la Vs30 è pari a 260 m\s < 360 m\s mentre nella masw 2 la Vs30 è pari a 302 m\s < 360 m\s*

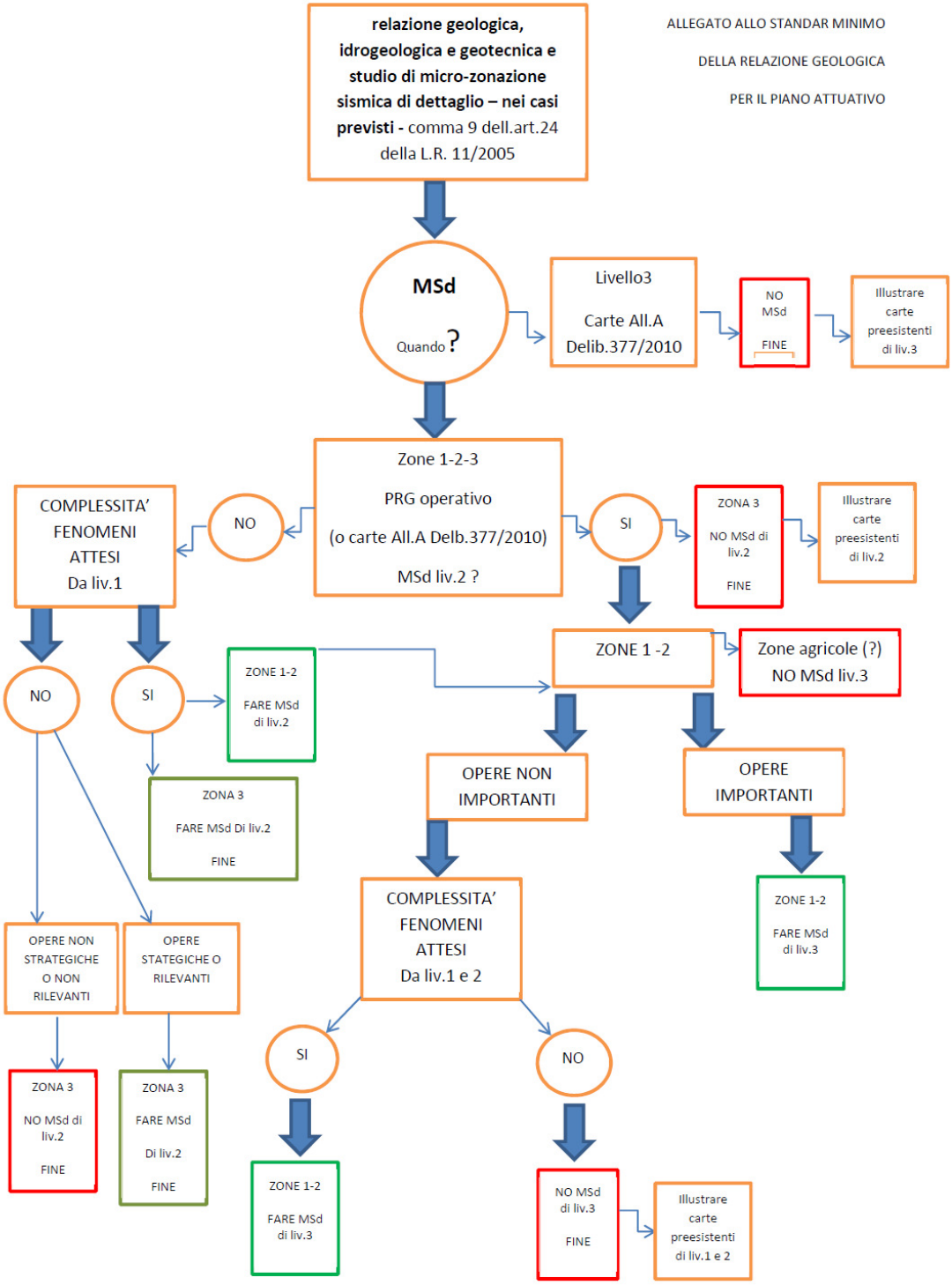
4–ASPETTI IDROGEOLOGICI

Nell'area indagata le indagini hanno confermato la presenza di una falda idrica di natura freatica il cui andamento vede un gradiente con direnzione Sud piuttosto pronunciato; infatti nei sondaggi eseguiti nella porzione settentrionale (S1) la falda è posta a circa -14 m dal pc mentre in S2 (ubicato nella porzione meridionale dell'area di Piano Attuativo) essa è posizionata a circa **–7 m di profondità**. La posizione più superficiale della falda è anche dovuta al contemporaneo abbassamento delle quote del piano campagna, inclinato verso valle e pertanto nella zona prossima a Via del Centenario la falda idrica risulta più superficiale.
La falda è contenuta negli orizzonti sabbioso-ghiaiosi dei depositi di versante e sostenuta da livelli a maggiore frazione limo-argillosa, intercalati a più riprese nei depositi ghiaiosi e sabbioso-ghiaiosi. Per quanto riguarda la permeabilità primaria dei terreni è possibile asserire che le ghiaie in matrice sabbioso-limosa rossastra costituenti i detriti di versante presentano

conducibilità idraulica elevata (K = 10^{-1} – 10^{-2} cm\s), mentre permeabilità più basse possono essere assegnate sia ai livelli argillo-limosi intercalati alle ghiaie sabbiose detritiche sia per alle sottostanti sabbie argillose e argille sabbiose (tiberine) con valori di permeabilità K ~ 10^{-3} – 10^{-4} cm\s.

5 – ULTERIORI INDAGINI DI MICROZONAZIONE SISMICA - SECONDO LIVELLO

In ottemperanza alle disposizioni della DGR 377/2010 e alle recenti indicazioni dell'ordine dei geologi Geologi Regione Umbria (standard minimo per la redazione del Piano Attuativo - approvate con delibera del 17/7/2012), è stata svolta l'indagine di microzonazione sismica di secondo livello. Oltre ai dati già esposti nell'integrazione di studio per il Piano Attuativo, laddove si specificavano gli aspetti di Microzonazione simica, è stata eseguita un'ulteriore indagine geofisica volta a valutare il rapporto di picco di H/V (misurazione del rumore sismico di fondo HVSR) per la determinazione della profondità del bedrock e che viene a seguito commentata e descritta.



3.3 – MISURAZIONE RUMORE SISMICO – RAPPORTO H/V

La tecnica HVSR permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito. Successivamente, come ulteriore sviluppo, la stima del parametro normativo Vs30 attraverso un processo di inversione del problema iniziale.

Le ipotesi alla base della tecnica sono: una concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz); assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze; le sorgenti di rumore sono uniformemente distribuite intorno alla stazione di registrazione. Se queste sono soddisfatte, la tecnica può essere suddivisa nelle fasi che vengono di seguito illustrate.

Si esegue una registrazione del rumore ambientale lungo tre direzioni ortogonali tra loro (x,y,z) con una singola stazione per una durata non inferiore ai 20 minuti.

Si esegue un'operazione detta di windowing, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di prefissata durata. Queste finestre vengono filtrate in base a dei criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione.

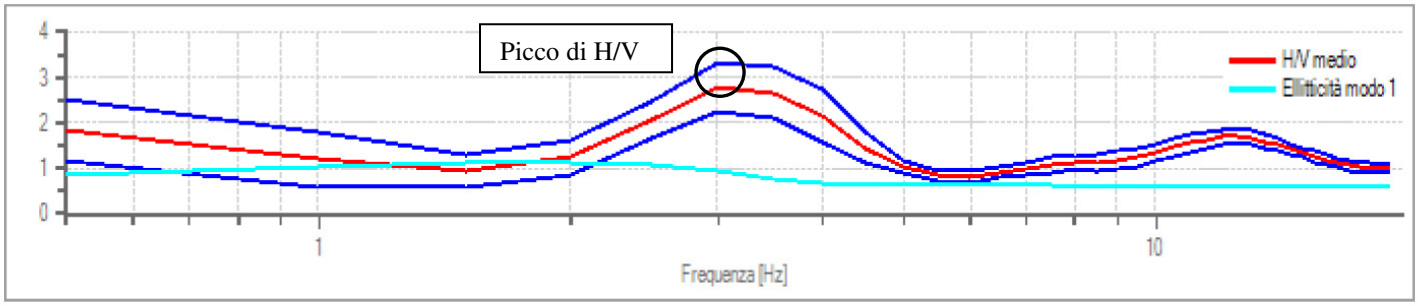
Per ciascuna delle finestre rimanenti, quindi ritenute valide, viene valutato lo spettro di Fourier. Quest'ultimo viene sottoposto a tapering e/o lisciamento secondo una delle varie tecniche note in letteratura e ritenute all'uopo idonee.

Successivamente si prendono in considerazione gli spettri delle finestre relative alle tracce orizzontali in coppia. Ovvero, ogni spettro di una finestra per esempio della direzione X, ha il suo corrispettivo per le finestre nella direzione Y, vale a dire che sono relative a finestre temporali sincrone. Per ognuna di queste coppie viene eseguita una somma tra le componenti in frequenza secondo un determinato criterio che può essere, ad esempio, una semplice media aritmetica o una somma euclidea.

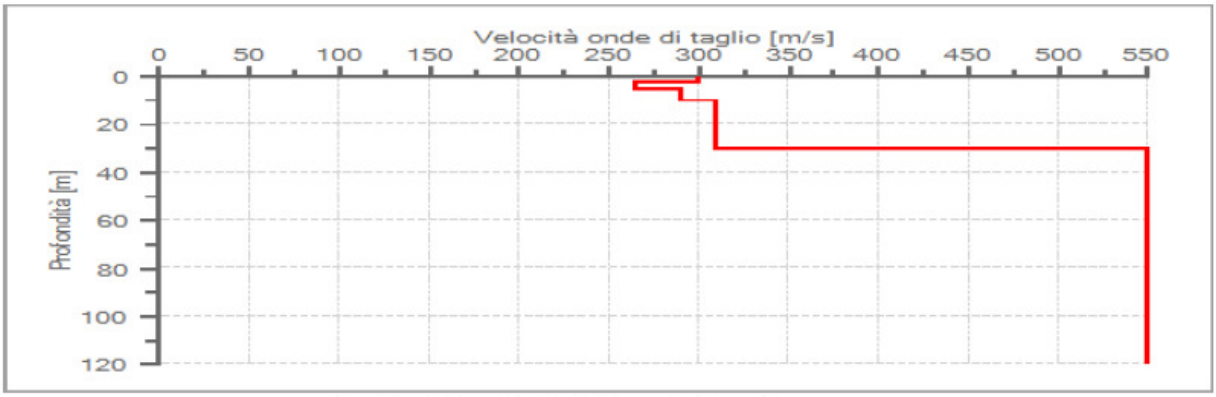
Per ciascuna coppia di cui sopra, esiste lo spettro nella direzione verticale Z, ovvero relativo alla finestra temporale sincrona a quelle della coppia. Ogni componente in frequenza di questo spettro viene usato come denominatore nel rapporto con quello della suddetta coppia. Questo permette quindi di ottenere il ricercato rapporto spettrale H/V per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l'operazione di windowing.

Eseguendo per ciascuna frequenza di tali rapporti spettrali una media sulle varie finestre, si ottiene il rapporto spettrale H/V medio, la cui frequenza di picco (frequenza in cui è localizzato il massimo valore assunto dal rapporto medio stesso) rappresenta la deducibile stima della frequenza naturale di vibrazione del sito.

Presso l'area oggetto di Piano Attuativo la misurazione del rumore sismico di fondo - di durata pari a 20 minuti - ha fornito una **frequenza di picco del rapporto H/V pari a 3 Hz -+ 0.2 Hz corrispondente a profondità del bedrock pari a circa 30 m dal piano campagna.**



Rapporto spettrale H/V e suo intevallo di fiducia



Valore Vs30: 300,94 m/s

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m^3]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	2,5	17,5	0,35	300
2	2,5	3	17	0,3	265
3	5,5	4,5	18	0,3	290
4	10	20	19	0,25	310
5	30	90	20	0,2	550

La misura H/V individua un bedrock-like posto a -30 m dal piano campagna, ovvero suggerisce un un netto salto di velocità rispetto alle coperture alluvionali e detritiche superiori, con velocità di circa 550 m/s e che con la profondità è presumibile che aumentino fino ad essere prossime a quelle tipiche di un substrato roccioso s.s.. Dai dati stratigrafici a disposizione (stratigrafie profonde di sondaggi e pozzi nell'area, banche dati degli studi di MSS della Regione Umbria per il dopo terremoto di Narni del 2002, e MSS del Politecnico di Milano PRG di Terni) si ritiene che tale bedrock-like sia correlabile con le unità lacustri del B. Tiberino, costituite da successioni di argille limose con intercalazioni di orizzonti travertinosi nella porzione alta (Unità di Acquasparta) e passanti ad argille sabbiose di età pliocenica molto consisenti. Tuttavia la profondità del bedrock in senso stretto (roccioso) è posto a profondità maggiori, valutate in circa -120 m dal piano campagna, profondità analoga a quella ipotizzata dal Poliecnico di Milano e confermato da una prova H/V eseguita nei pressi dell'edificio denominato "il Tulipano" – B. Rivo, in occasione di un piano Attuativo Privato, misure H/V eseguite nel dicembre 2012 dal Dott. Geol. Uffreduzzi.

6 – RISPOSTA SISMICA LOCALE – MICROZONAZIONE SISMICA DI III LIVELLO

Per l'esecuzione della risposta sismica locale di 3° livello si è utilizzato il software Rexel che ha estratto dalla banca dati dei terremoti italiani (ITACA) 7 accelerogrammi implementati successivamente nel software di calcolo RSL III della Geostru.
RSL III è coì in grado di fornire valori di Fa e Fv specifici per il sito di studio.

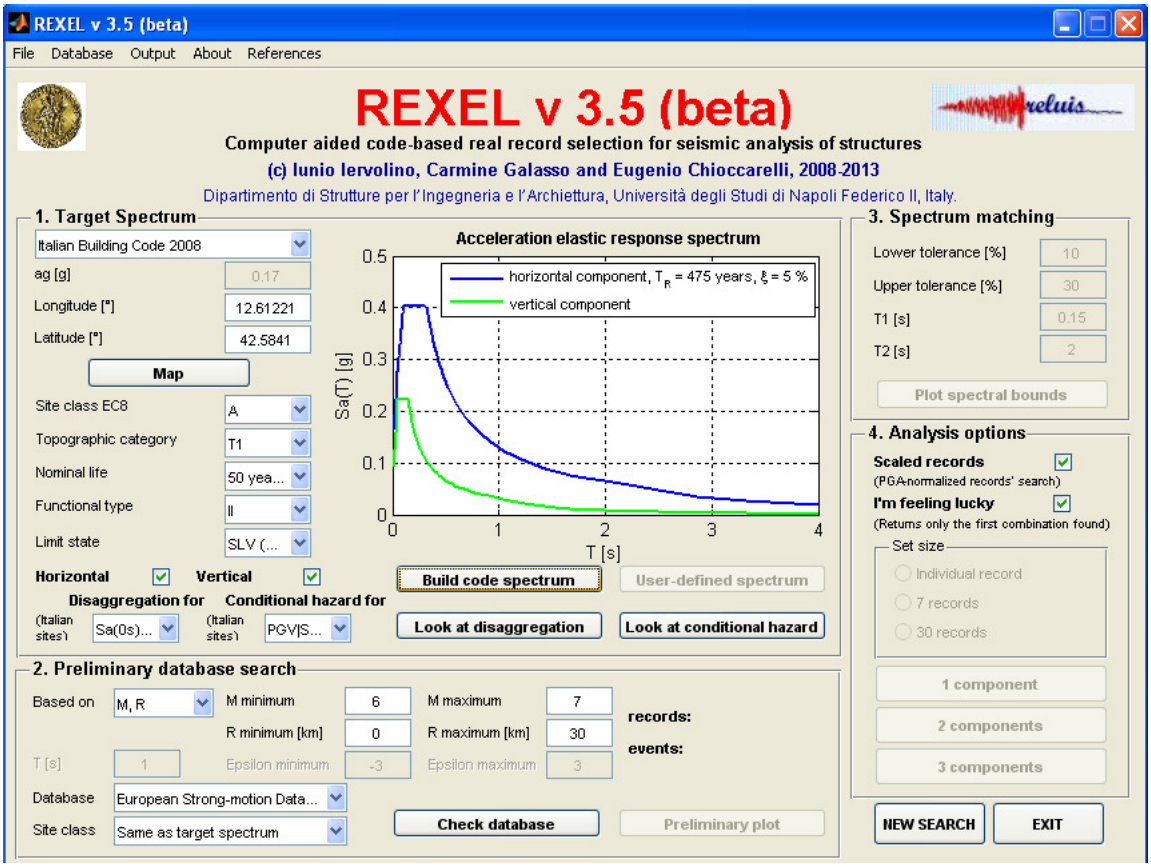
6.1 – DETERMINAZIONE DEGLI ACCELEROGRAMMI DI RIFERIMENTO

Tramite il software REXEL versione 3.5 è stato possibile effettuare una ricerca ddelle combinazioni di accelerogrammi naturali compatibili con gli spettri in accelerazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC '08) per il sito di indagine.
Gli accelerogrammi possono anche rispecchiare caratteristiche di sorgente di interesse in termini di magnitudo, distanza epicentrale e misure d'intensità del terremoto.
Le registrazioni accelerometriche contenute in REXEL sono quelle dell'European Strong Motion Database (ESD), quelle dello Italian Accelerometric Archive (ITACA), o del database con

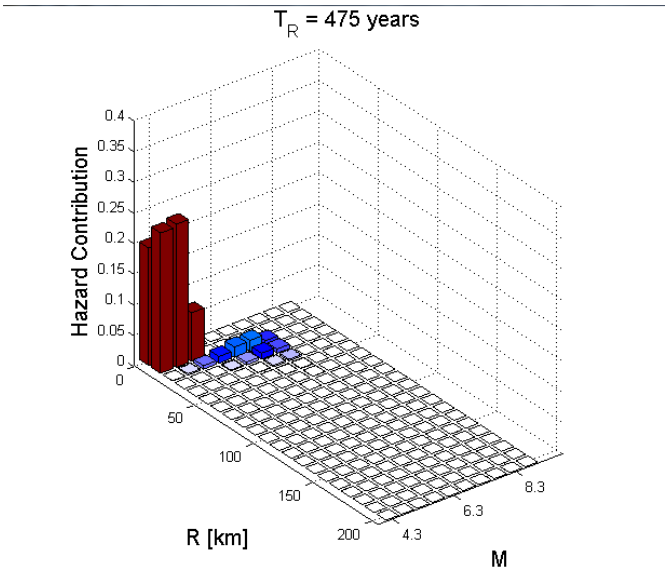
records da tutto il mondo: Selected Input Motions for Displacement-Based Assessment and Design (SIMBAD).

A seguire si riportano le varie fasi di elaborazione degli accelerogrammi:

- nella fase 1 si prendono a riferimento le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC '08), inserendo i dati geografici di latitudine e longitudine, la categoria di sottosuolo rigido (categoria A), la categoria topografica (in questo caso T1), la classe d'uso della struttura e la relativa vita nominale, è possibile determinare lo spettro di accelerazione elastico sia orizzontale che verticale.

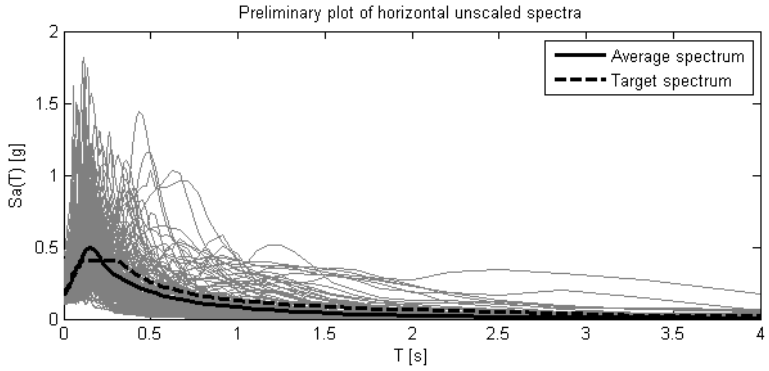


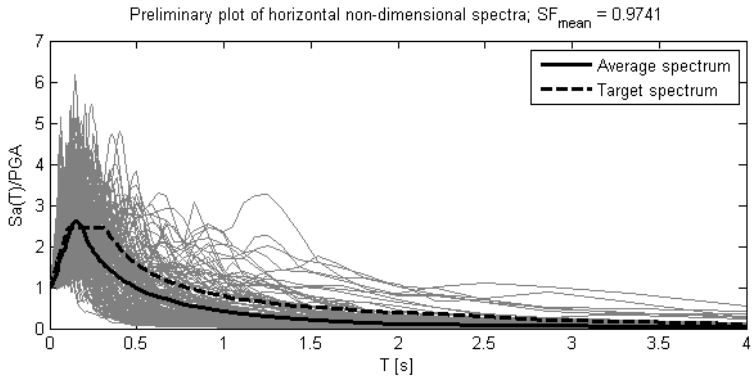
Successivamente si è effettuata la disaggregazione del rischio sismico per terremoti con Tempi di ritorno di 475 anni per il sito di indagine.



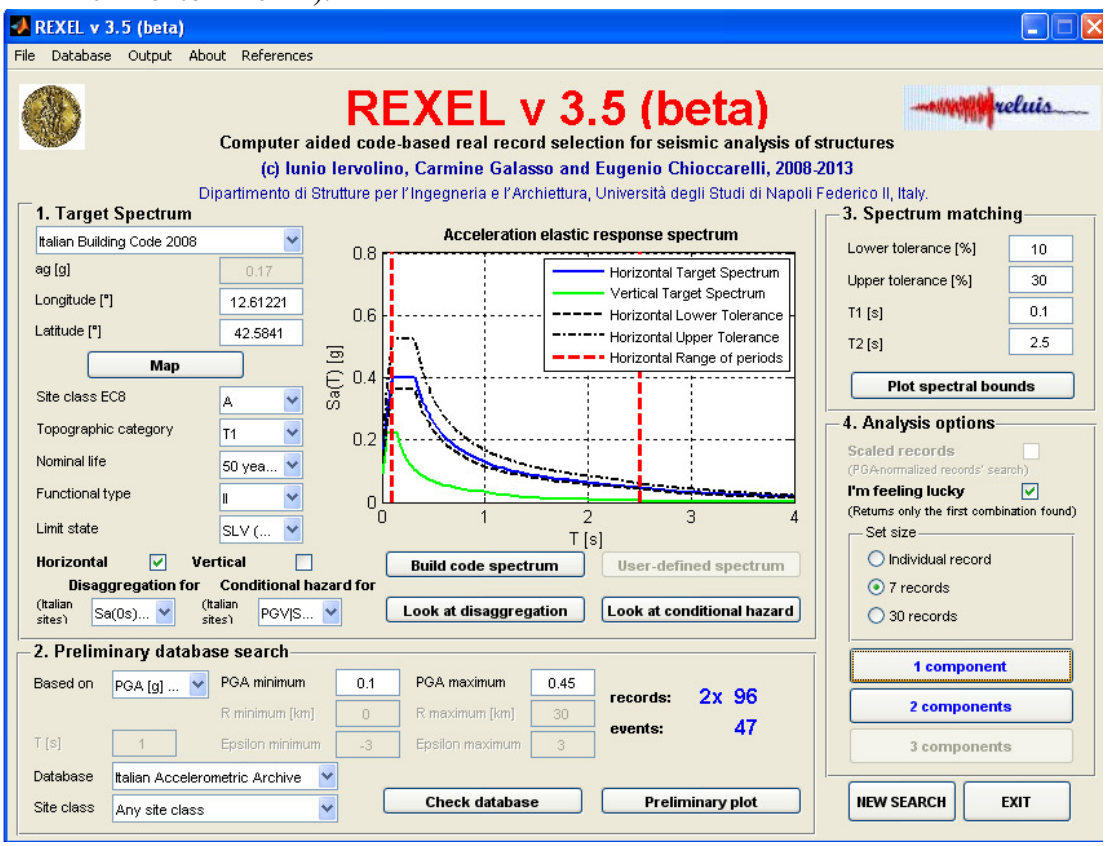
Il grafico di disaggregazione del rischio sismico è un diagramma ternario ed evidenzia un contributo di rischio elevato per terremoti con magnitudo circa a 4.3-5 e distanza entro i 20 km

- nella fase 2 si effettua una ricerca preliminare nei database disponibili degli eventi da prendere come riferimento per le successive fasi di analisi sismiche. Nel caso in questione si sono cercati gli eventi sismici riportati nel Italian Accelometrich Archive, **con Pga compresa tra 0.15 e 0.45**, e per qualunque categoria di suolo. Con tali parametri sono stati individuati 47 eventi le cui registrazioni non scalate sono riportate a seguire per la componente orizzontale.





- nella fase 3 si specifica la tolleranza con cui lo spettro medio della combinazione deve rispettare l'obiettivo di un intervallo di periodo compreso tra 0.1 sec e 2 sec (intervallo di riferimento T1 e T2).



- la fase 4 del sofware consente di individuare sette accelerogrammi riferiti rispettivamente a sette eventi con le specifiche sismiche e di accelerazione già indicate in precedenza. Questi accelerogrammi saranno inseriti nel software RSL III Geostru per determinare il fattore di amplificazione del sito.

1	Waveforn	Earthqual	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	Fault Mec	Epicentra	PGA_X [m	PGA_Y [m	PGV_X [m	PGV_Y [m	ID_X	ID_Y	Np_X	Np_Y	EC8 Site class
2	353	96	NVL	ZONA PARMA	15/10/1996	5.04	Thrust	132.501	13.014	1.949	0.086897	0.12102	5.187	30.217	0.77123	0.78421	C
3	103	28	SRC0	FRIULI EARTHQUAKE 4TH SHOCK	15/09/1976	5.09	Thrust	164.207	12.852	2.449	0.10752	0.20528	42.894	31.488	0.65334	0.55895	A
4	261	70	CSN0	VAL COMINO EARTHQUAKE	07/05/1984	5.09	Normal	197.303	14.257	11.132	0.11158	0.078448	79.712	122.846	1.284	0.63873	C
5	168	47	BRN	IRPINIA EARTHQUAKE	23/11/1980	6.09	Normal	422.094	21.353	17.478	0.12718	0.097241	120.813	161.055	0.56573	0.85367	B
6	353	96	NVL	ZONA PARMA	15/10/1996	5.04	Thrust	132.501	13.014	1.949	0.086897	0.12102	5.187	30.217	0.77123	0.78421	C
7	104	28	GMN	FRIULI EARTHQUAKE 4TH SHOCK	15/09/1976	5.09	Thrust	46.987	24.726	25.037	0.13489	0.30445	7.656	42.947	10.529	10.987	B
8	181	47	STR	IRPINIA EARTHQUAKE	23/11/1980	6.09	Normal	332.615	22.088	30.972	2,530556	0.70318	98.837	42.482	4,794444	0.82359	B
9	mean:					6,042857		20,40297	1,732901	2,11556	0,145625	0,232949	7,465086	6,589314	0,826977	0,791717	

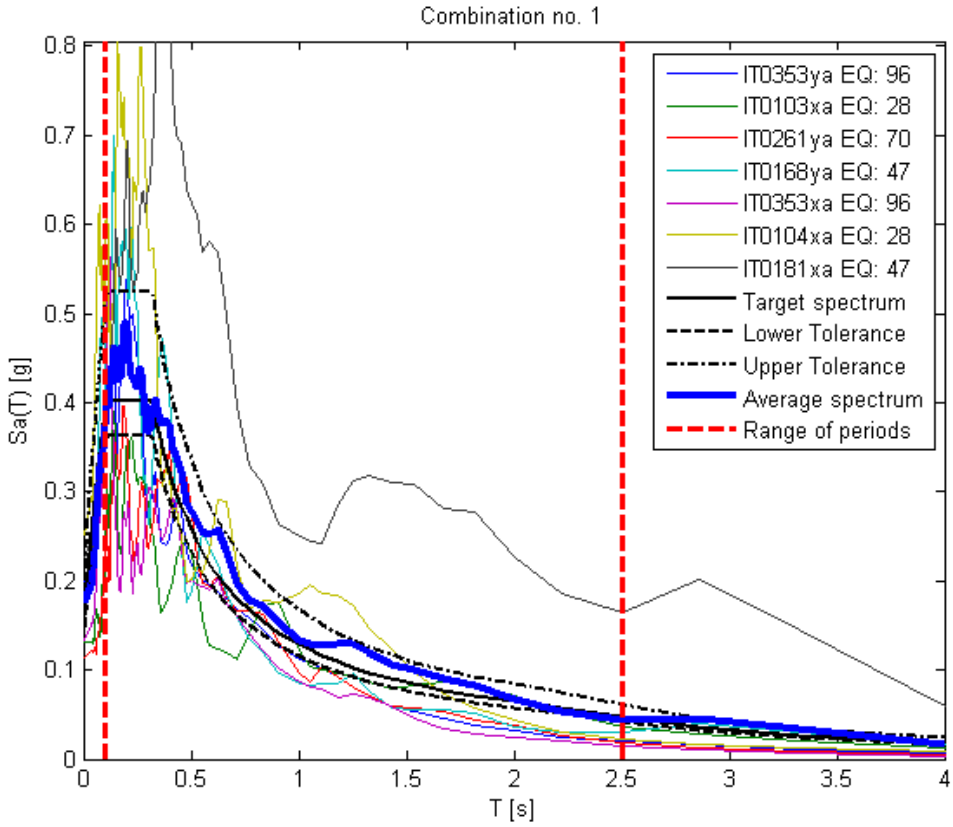
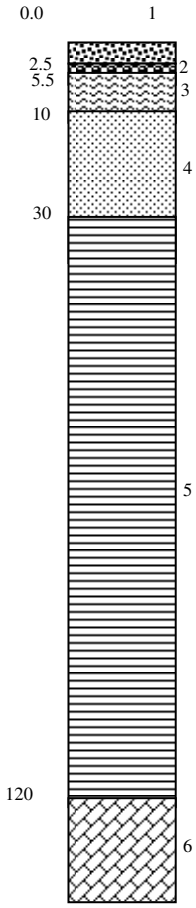


Grafico del risultato della combinazione ottenuta: visibili i sette accelerogrammi spettro compatibili.
Sono visibili i 7 spettri ottenuti dal database dell'Archivio Accelerometrico Italiano (IT0353ya…..), lo spettro obbiettivo (in nero), i due spettri limiti della tolleranza - inferiori e superiori (linee tratteggiate nere), lo spettro medio (in blu).

6.2– MODELLAZIONE NUMERICA DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL)

Il livello 3° di Microzonazione sismica prevede l'impiego di parametri che quantificano la variazione del moto sismico in superficie; le amplificazioni sono espresse attraverso due fattori: FA e FV da applicare alle ordinate spettrali a basso periodo (FA) e ad alto periodo (FV).
Per il caso di studio, sulla base di tutte le indagini eseguite, si è definita una sismostratigrafia oggettiva fino a 25/30 m di profondità e stimando la profondità del bedrock a circa 120 m dall'attuale piano campagna come a seguire.

Simostratigrafia PA Impresa Ponteggia snc, Via del Centenario



Strato 1: da 0.0 a -2.5 m: detriti; Vs = 300 m/s
Strato 2: da -2.5 a -5.5 m: ghiaie e brecce in matrice; Vs = 265 m/s
Strato 3: da -5.5 a -10.0 m: sabbie limo-argillose; Vs = 280 m/s

Strato 4: da -10.0 a -30.0 m: limi sabbiosi mediamente addensati, con falda a -13,5m; Vs = 310 m/s

Strato 5: da -30.0 a -120.0 m: argille con intercalazioni di travertini (nella parte alta); Vs = 500 m/s. Bacino Tiberino

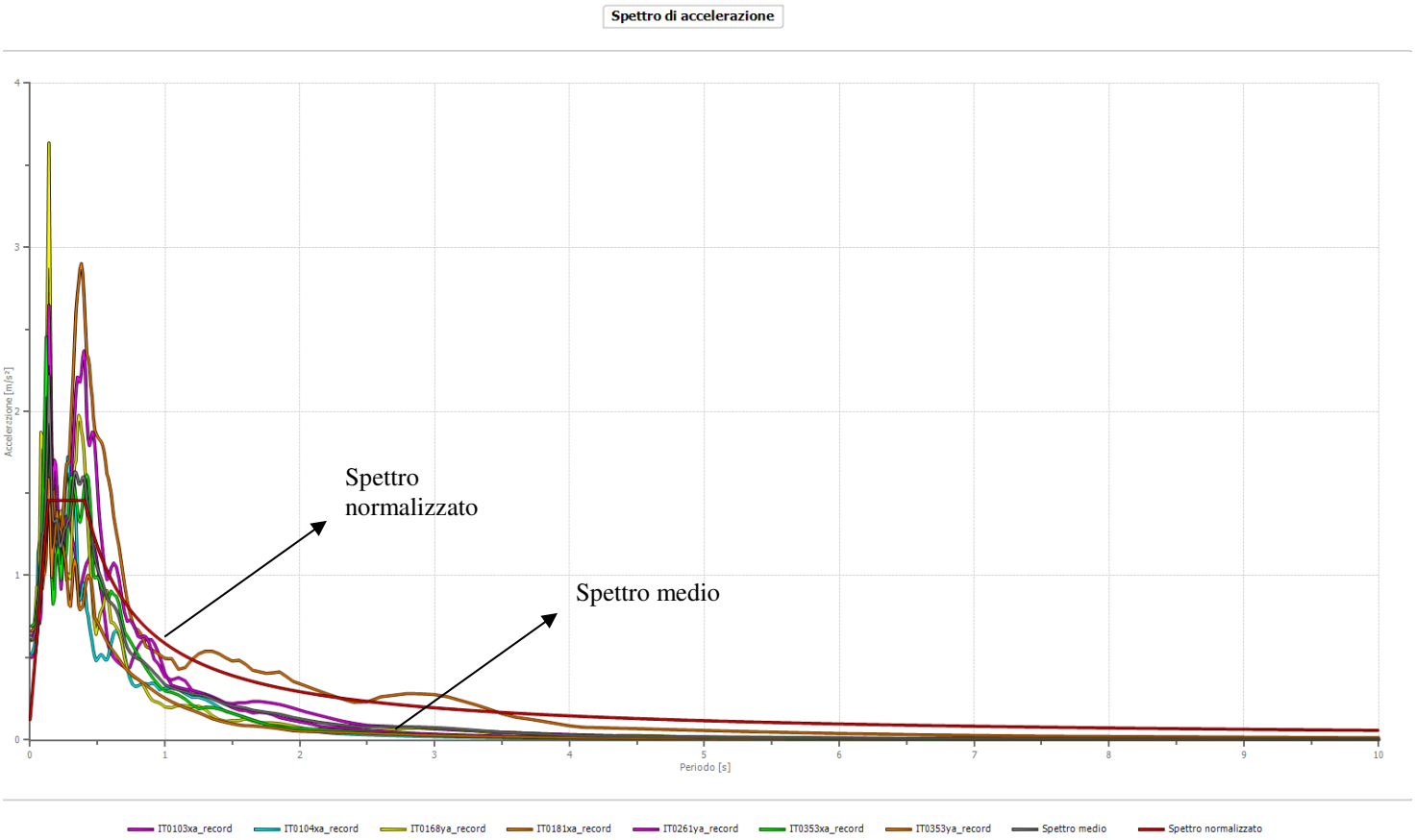
Strato 6: da -120.0 m calcari e calcari marnosi e selciferi della successione Umbro Marchigiana ; Vs > 800 m/s.

Si è poi proceduto alla valutazione dell'amplificazione massima valutata sulla scorta degli accelerogrammi estratti dal programma Rexel 4.5 ed applicando la funzione della trasformata di Fourier allo strato 6 (ovvero al bedrock roccioso) si è riproceduto al calcolo del fattore di amplificazione Fa e Fv mediante il software RSL III della Geostru. I risultati dei fattori di amplificazione sono qui sotto riportati.

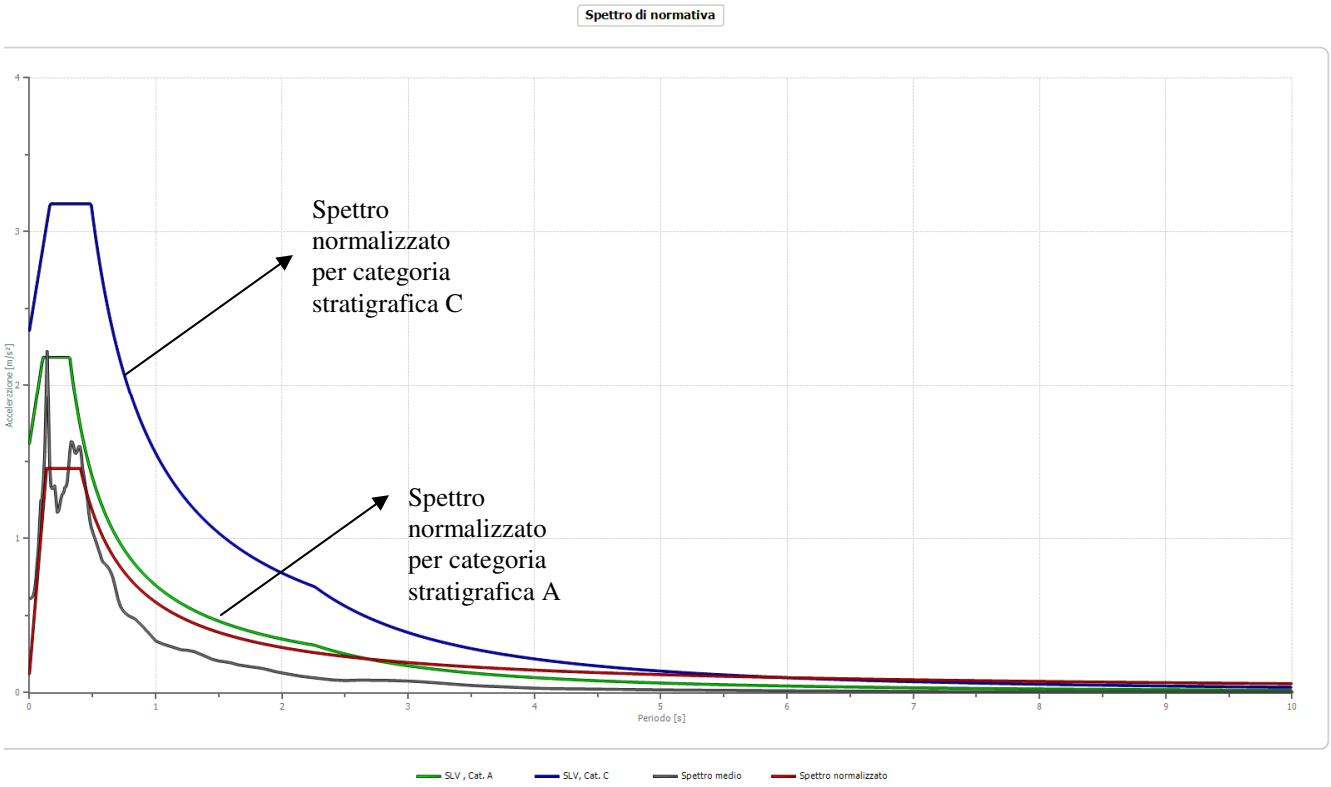
Fa 1.620 [-]
Fv 1.763 [-]

I valori calcolati sono superiori rispetto ai precedenti valori di Fa determinati dallo studio del Politecnico di Milano, tuttavia sono da considerarsi cautelativi e più corretti in quanto specifici per il sito di studio rispetto all'estrapolazione dei dati effettuata nella precedente perizia di febbraio, dove cui si faceva riferimento alla fascia di territorio indagata dal Politecnico di Milano.

A seguire viene riportato il grafico degli spettri di confronto tra gli accelerogrammi importati nel programma di calcolo, lo spettro medio del sito specifico di studio (in grigio) e lo spettro normalizzato (in rosso).



Successivamente è stato confrontato lo spettro medio ricavato e quello normalizzato (in rosso) con lo spettro di normativa previsto e calcolato per il sito oggetto di Piano Attuativo - su categoria di suolo di tipo C (in blu) - così come determinato mediante indagini di sismica a rifrazione MASW.



7 - CONCLUSIONI

Il presente studio di Microzonazione sismica di III livello è stato redatto per il Piano Attuativo di iniziativa privata, Zona C5, relativo ad insediamenti residenziali di espansione e Zona Gv per spazi pubblici attrezzati per impianti sportivi, comprese tra Via del Centenario e Via del Rivo, proponente la ditta Impresa Ponteggia snc.

I dati qui esposti aggiornano le precedenti relazioni di studio e correggono un errore grafico riscontrato nella precedente versione della perizia di microzonazione sismica (di febbraio 2013) ove è stato indicato un orizzonte ghiaioso nella porzione basale delle stratigrafie, anziché sabbie e sabbie limose effettivamente intercettate dai carotaggi.

Inoltre nel periodo intercorso tra la precedente perizia e la presente è stata eseguita un'ulteriore indagine sismica di misurazione del rumore di fondo – HVSR con la quale è stato possibile individuare la frequenza di picco del sito e relativo rapporto H/V, il cui risultato ha fornito una frequenza H/V pari a 3 Hz -+ 0.2 Hz, corrispondente a profondità del bedrock pari a circa 30 m dal piano campagna.

Il software Rexel 3.5 ha fornito i 7 accelegrammi di riferimento per il sito di interesse; questi accelerogrammi sono stati utilizzati per la successiva valutazione della risposta sismica locale (RSL) mediante il software Geostru RSLIII, si è quindi calcolato il Fattore di Amplificazione specifico dell'area (dato puntuale rispetto ai valori indicati nella precedente perizia ove venivano utilizzati i valori tabellati del Dipartimento di Protezione Civile). I valori ottenuti indicano un **Fa= 1.620 ed un Fv = 1.763.** Essi risultano più alti dei valori indicati dal Politecnico di Milano, (che indicava valori inferiori all'unità almeno nel periodo 0.1-0.5 s) ed anche rispetto ai valori dalle tabelle del Dipartimento di Protezione Civile. Questa differenza è spiegabile nel fatto che la sismostratigrafia determinata per questo studio è diversa dal modello sismostratigrafico del Politecnico di Milano. Le differenze sono principalmente nel fatto che i risultati odierni tengono conto di un bedrock like a velocità Vs di 550 m/s, prossime a quelle tipiche del substrato roccioso, a partire da -30m circa dal piano di campagna, e con bedrock roccioso s.s. a -120 m. Il Politecnico aveva indicato la presenza di bedrock a -150 m di profondità, quindi con una condizione sismostratigrafica deamplificante.

Si ritiene più cautelativo il risultato ottenuto con il codice di calcolo RSL III qui commentato, anche ai fini della progettazione delle relative strutture edilizie, anche considerando i dati geofisici e stratigrafici a supporto degli studi geotematici fin qui svolti per il Pino Attuativo in oggetto.

dott. Paolo Paccara - Geologo
Ordine dei Geologi dell'Umbria
Iscrizione Albo Professionale n° 219.

ORDINE DEI GEOLOGI DELLA REGIONE UMBRIA
PACCARA PAOLO
ALBO 219

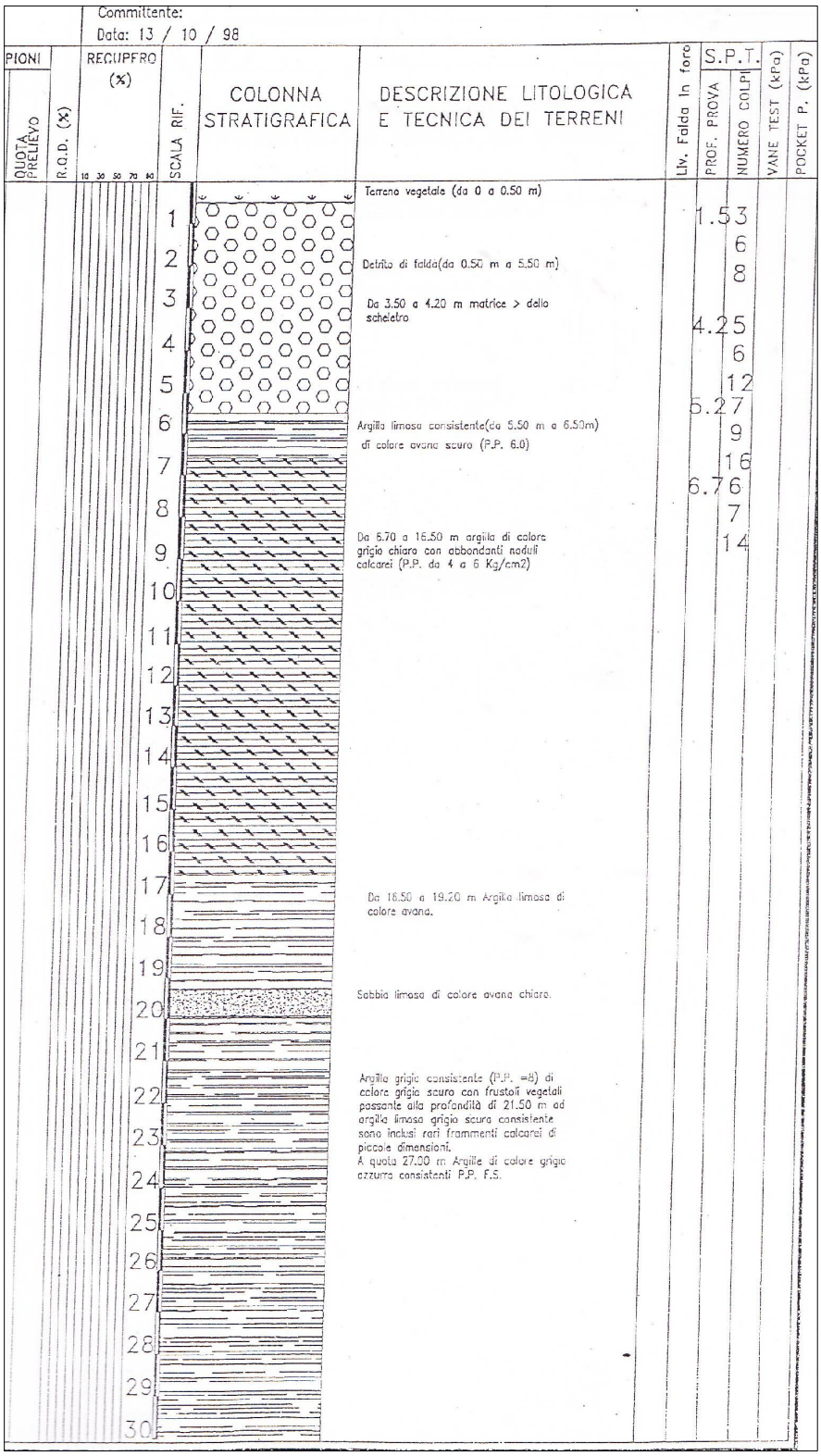
ALLEGATI:

- Elaborazione prova H/V
- Estratto e tabulati di calcolo RSL III GEOSTRU
- Stratigrafia carotaggio loc. il Tulipano, dalla raccolta di stratigrafie e dati geognostici Sez Terni 346040 per il progetto di MSS della zona colpita dal sisma del 2000 Narni Regione Umbria.
- Sezione stratigrafica estratta dal Volume "Studi sulla vulnerabilità degli Acquiferi: La conca Ternana" pitagora ed. 1992

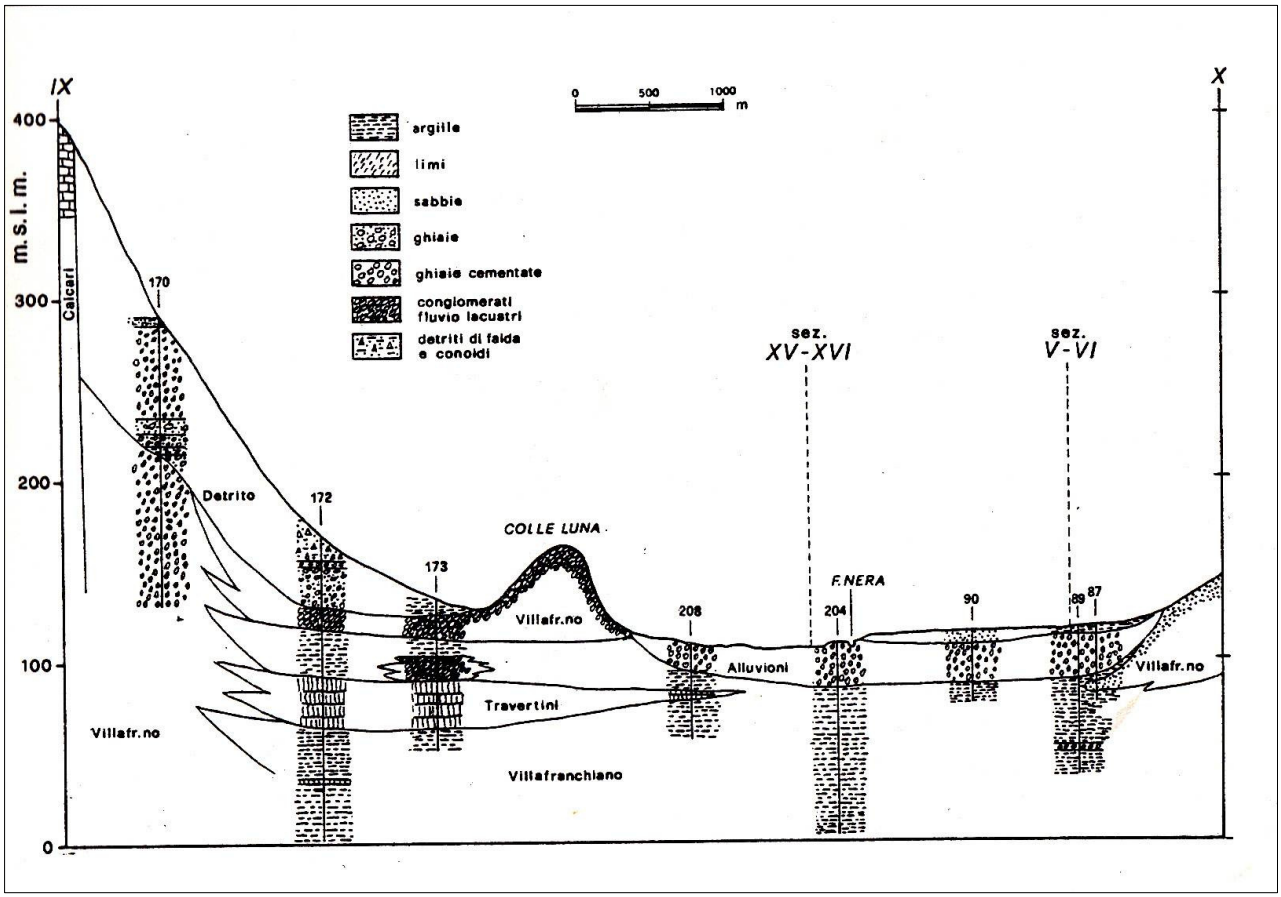
ALLEGATI AL TESTO

Stratigrafia carotaggio loc. il Tulipano,

‘Raccolta di stratigrafie e dati geognostici Sez Terni 346040’
Progetto di MSS della zona colpita dal sisma del 2000 Narni Regione Umbria.



Sezione stratigrafica estratta dal Volume
"Studi sulla vulnerabilità degli Acquiferi: La conca Ternana" pitagora ed. 1992



PIANO ATTUATIVO
IMPRESA PONTEGGIA

Sito: Via del Centenario (TR)

Indagine geofisica tramite tecnica HVSR

data: aprile 2013

Cenni sulla teoria della tecnica HVSR

La tecnica HVSR permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito. Successivamente, come ulteriore sviluppo, la stima del parametro normativo Vs30 attraverso un processo di inversione del problema iniziale. Le ipotesi alla base della tecnica sono: una concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz); assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze; le sorgenti di rumore sono uniformemente distribuite intorno alla stazione di registrazione. Se queste sono soddisfatte, la tecnica può essere suddivisa nelle fasi che vengono di seguito illustrate.

Si esegue una registrazione del rumore ambientale lungo tre direzioni ortogonali tra loro (x,y,z) con una singola stazione. Tale registrazione deve essere effettuate, secondo le indicazioni del progetto SESAME, per una durata non inferiore ai 20 minuti.

Si esegue un'operazione detta di windowing, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di prefissata durata. Secondo le indicazioni del succitato progetto SESAME tale dimensione, detta Long Period, deve essere almeno pari ai 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre "long", che sono sincronizzate fra le tracce.

Queste finestre vengono filtrate in base a dei criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione.

Per ciascuna delle finestre rimanenti, quindi ritenute valide, viene valutato lo spettro di Fourier. Quest'ultimo viene sottoposto a tapering e/o lisciamento secondo una delle varie tecniche note in letteratura e ritenute all'uopo idonee.

Successivamente si prendono in considerazione gli spettri delle finestre relative alle tracce orizzontali in coppia. Ovvero, ogni spettro di una finestra per esempio della direzione X, ha il suo corrispettivo per le finestre nella direzione Y, vale a dire che sono relative a finestre temporali sincrone. Per ognuna di queste coppie viene eseguita una somma tra le componenti in frequenza secondo un determinato criterio che può essere, ad esempio, una semplice media aritmetica o una somma euclidea.

Per ciascuna coppia di cui sopra, esiste lo spettro nella direzione verticale Z, ovvero relativo alla finestra temporale sincrona a quelle della coppia. Ogni componente in frequenza di questo spettro viene usato come denominatore nel rapporto con quello della suddetta coppia. Questo permette quindi di ottenere il ricercato rapporto spettrale H/V per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l'operazione di windowing.

Eseguendo per ciascuna frequenza di tali rapporti spettrali una media sulle varie finestre, si ottiene il rapporto spettrale H/V medio, la cui frequenza di picco (frequenza in cui è localizzato il massimo valore assunto dal rapporto medio stesso) rappresenta la deducibile stima della frequenza naturale di vibrazione del sito.

L'ulteriore ipotesi che questo rapporto spettrale possa ritenersi una buona approssimazione dell'ellitticità del modo fondamentale della propagazione delle onde di Rayleigh, permette di confrontare questi due al fine di ottenere una stima del profilo stratigrafico. Tale procedura, detta di inversione, consente di definire il profilo sostanzialmente in termini di spessore e velocità delle onde di taglio. Avendo quindi una stima del profilo della velocità delle onde di taglio, è possibile valutarne il parametro normativo Vs30.

Dati generali

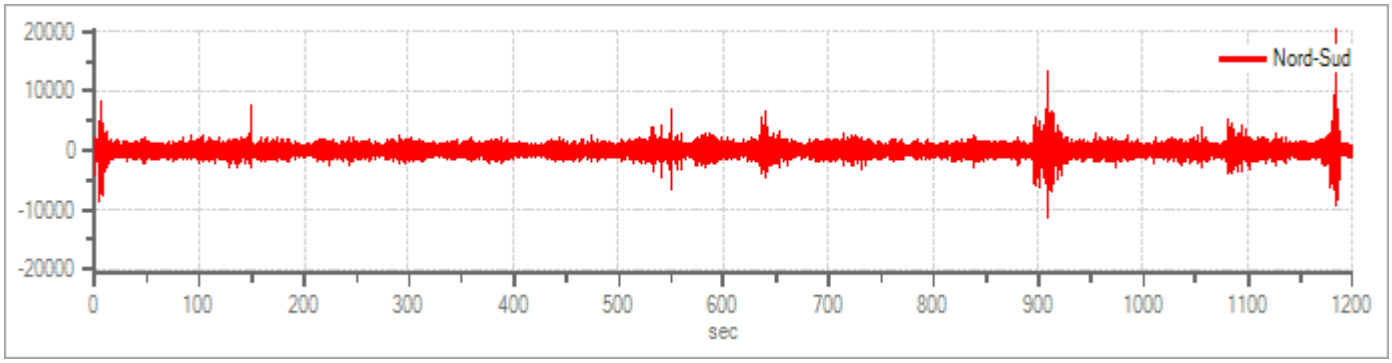
Nome progetto:	PIANO ATTUATIVO PONTEGGIA
Committente:	
Cantiere:	VIA DEL CENTENARIO
Località:	TERNI
Operatore:	
Responsabile:	
Data:	17/03/2013 00:00:00
Zona:	VIA DEL CENTENARIO. TERNI
Latitudine:	42.5824155
Longitudine:	12.6148135

Tracce in input

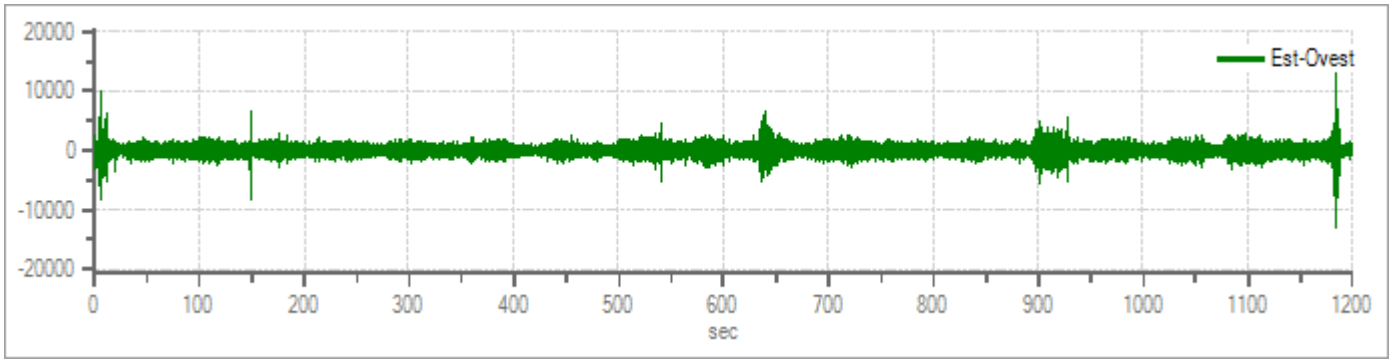
Dati riepilogativi:

Numero tracce:	3
Durata registrazione:	1200 s
Frequenza di campionamento:	300,00 Hz
Numero campioni:	360000
Direzioni tracce:	Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

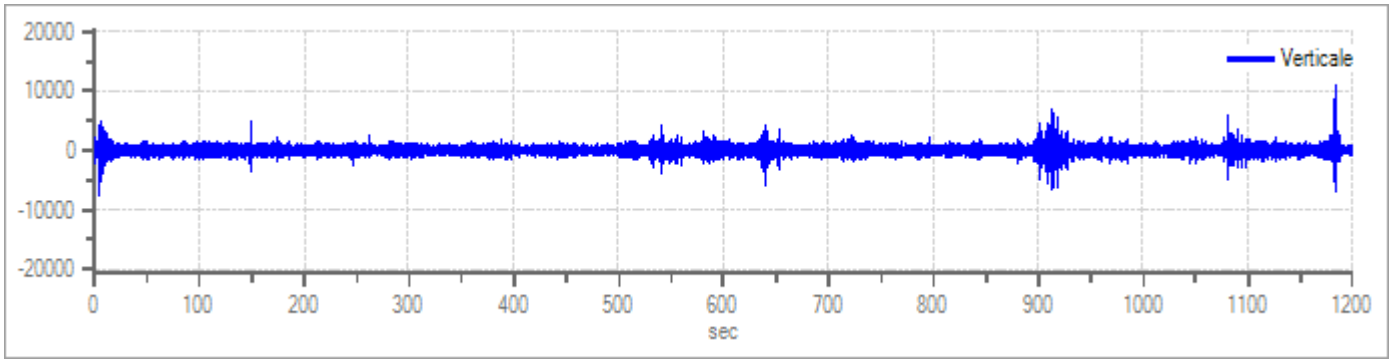
Grafici tracce:



Traccia in direzione Nord-Sud



Traccia in direzione Est-Ovest



Traccia in direzione Verticale

Finestre selezionate

Dati riepilogativi:

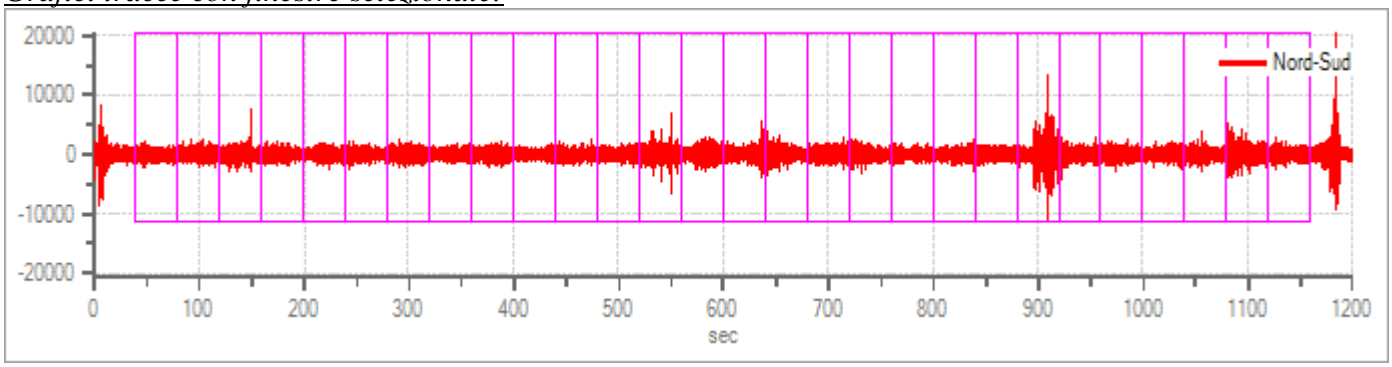
Numero totale finestre selezionate: 28
Numero finestre incluse nel calcolo: 26
Dimensione temporale finestre: 40,000 s
Tipo di lisciamento: Triagolare proporzionale
Percentuale di lisciamento: 10,00 %

Tabella finestre:

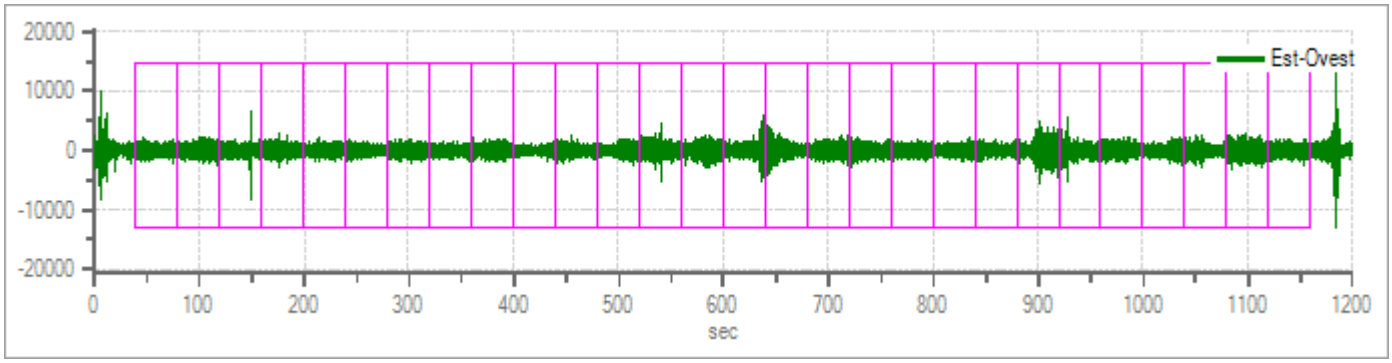
Numero finestra	Istante iniziale	Istante finale	Selezione
1	40	80	Inclusa
2	80	120	Inclusa
3	120	160	Inclusa
4	160	200	Inclusa
5	200	240	Inclusa
6	240	280	Inclusa
7	280	320	Inclusa
8	320	360	Esclusa
9	360	400	Inclusa
10	400	440	Inclusa
11	440	480	Inclusa
12	480	520	Esclusa
13	520	560	Inclusa
14	560	600	Inclusa
15	600	640	Inclusa
16	640	680	Inclusa
17	680	720	Inclusa
18	720	760	Inclusa
19	760	800	Inclusa
20	800	840	Inclusa
21	840	880	Inclusa
22	880	920	Inclusa
23	920	960	Inclusa
24	960	1000	Inclusa
25	1000	1040	Inclusa

26	1040	1080	Inclusa
27	1080	1120	Inclusa
28	1120	1160	Inclusa

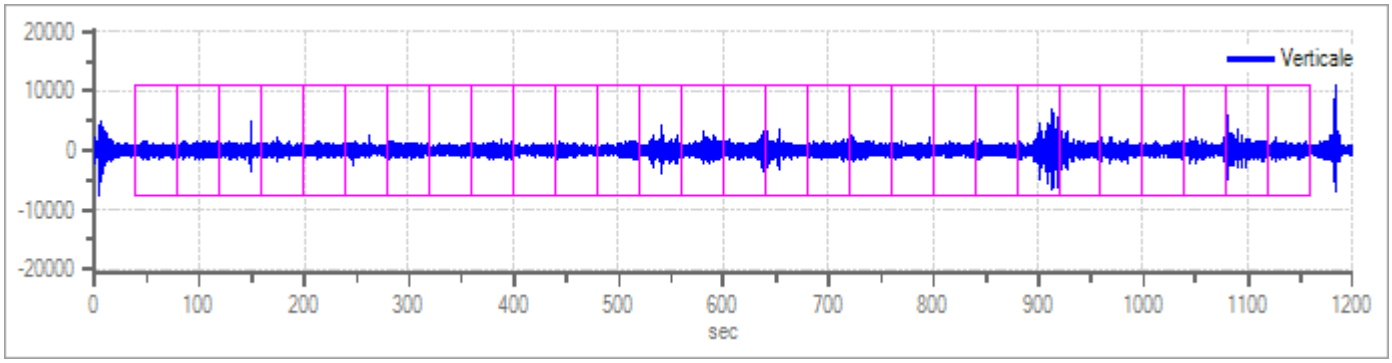
Grafici tracce con finestre selezionate:



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

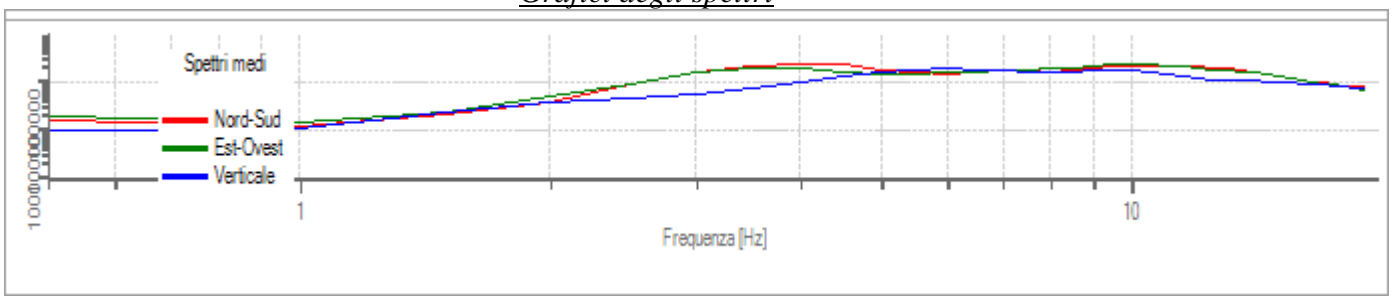


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

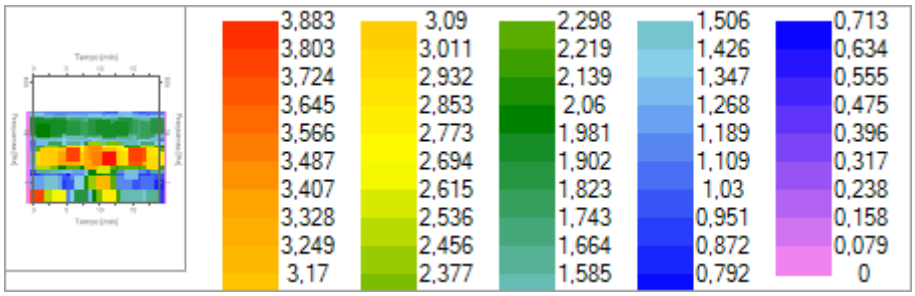


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

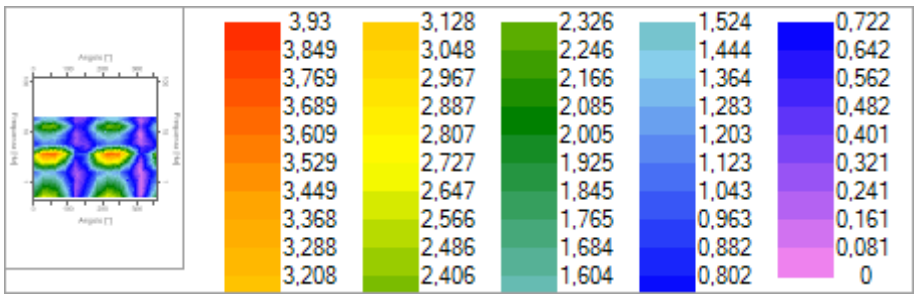
Grafici degli spettri



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

Rapporto spettrale H/V

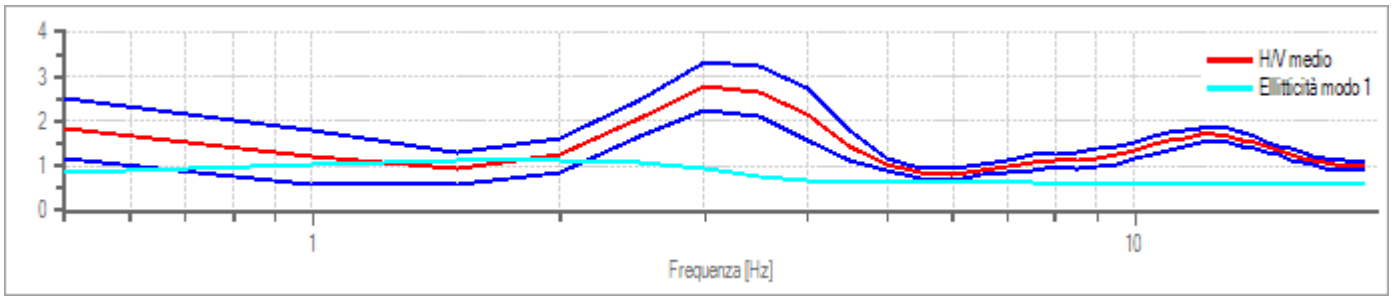
Dati riepilogativi:

Frequenza massima:	19,80 Hz
Frequenza minima:	0,50 Hz
Passo frequenze:	0,50 Hz
Tipo lisciamento::	Triagolare proporzionale
Percentuale di lisciamento:	10,00 %
Tipo di somma direzionale:	Media aritmetica

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: 3,00 Hz ±0,20 Hz

Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intevallo di fiducia

Verifiche SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2 \quad per \quad 0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0 \quad se \quad f_0 > 0.5H$	Ok
$\sigma_A(f) < 3 \quad per \quad 0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0 \quad se \quad f_0 < 0.5H$	
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

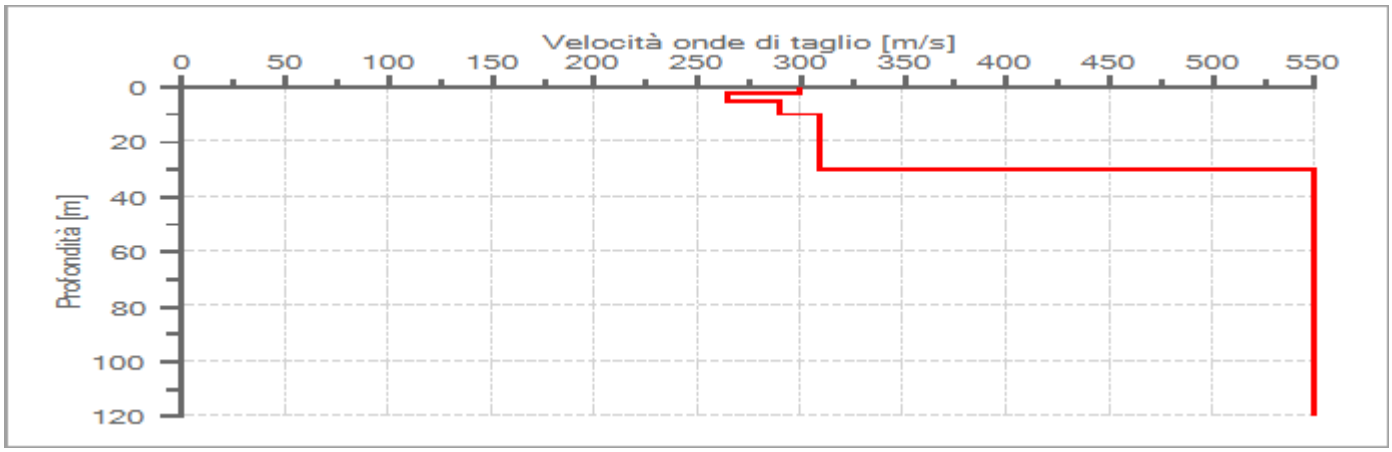
Modello stratigrafico

Dati riepilogativi:

Numero strati: 5
Frequenza del picco dell'ellitticità: 2,00 Hz
Valore di disadattamento: 0,68
Valore Vs30: 300,94 m/s

Dati della stratigrafia:

Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso per Unità di Vol. [kN/m^3]	Coeff. di Poisson	Velocità onde di taglio [m/s]
1	0	2,5	17,5	0,35	300
2	2,5	3	17	0,3	265
3	5,5	4,5	18	0,3	290
4	10	20	19	0,25	310
5	30	90	20	0,2	550



Profilo delle velocità delle onde di taglio.

PIANO ATTUATIVO

IMPRESA PONTEGGIA

Sito: Via del Centenario (TR)

Pericolosità sismica di base

DATA: APRILE 2013

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:

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

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:

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

che sostituita nella (1) pone

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

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

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

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

$$G^* = G(1 + 2i\xi) \tag{5}$$

avendo posto

$$\eta = \frac{2G}{\omega}\xi \tag{6}$$

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:

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

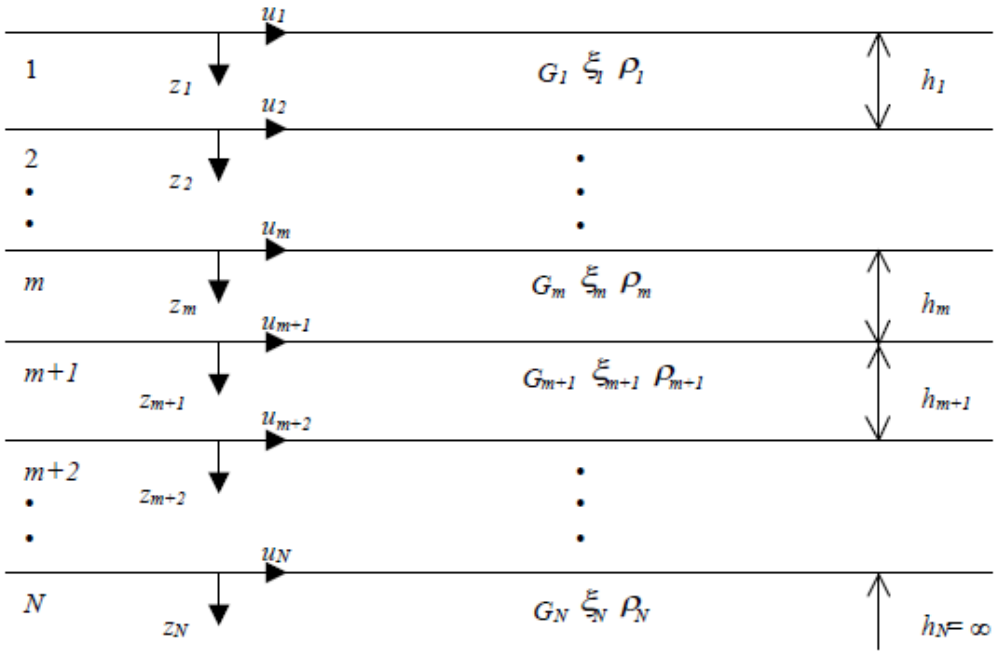


Figura 1: Esempio di stratigrafia per riferimento.

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:

$$k^* = \omega\sqrt{\frac{\rho}{G^*}} \tag{8}$$

Il taglio invece è dato da:

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

$$\tau_m(h_m,t) = ik_m^* G_m^* \left[E_m e^{ik_m^* h_m} - Fe^{ik^* h_m}\right] e^{i\omega t} \tag{15}$$

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

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

ovvero

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

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

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

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

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

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

Poiché in superficie il taglio è nullo,

$$\tau_1(0, t) = ik_1^* G_1^* \left[E_1 - F1\right] e^{i\omega t} = 0$$

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:

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

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,

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

(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*:

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

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

$$\gamma(z,t) = \frac{\partial u}{\partial z} = ik^*\left(Ee^{ik^+ z} - Fe^{-ik^+ z}\right)e^{i\omega t} \tag{24}$$

E la corrispondente tensione tangenziale, dalla seguente espressione:

$$\tau(z,t) = G^* \gamma(z,t) \tag{25}$$

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.

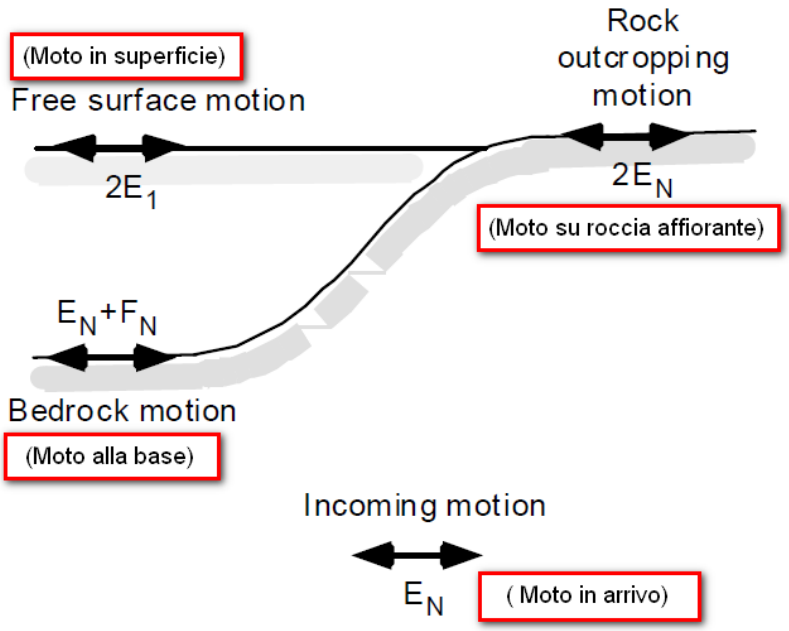


Figura 2: Schema di riferimento e terminologia utilizzata.

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:

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

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:

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

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

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

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

dove G_{max} è dato dalla relazione

$$G_{max} = \rho V_s^2 \tag{28}$$

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.

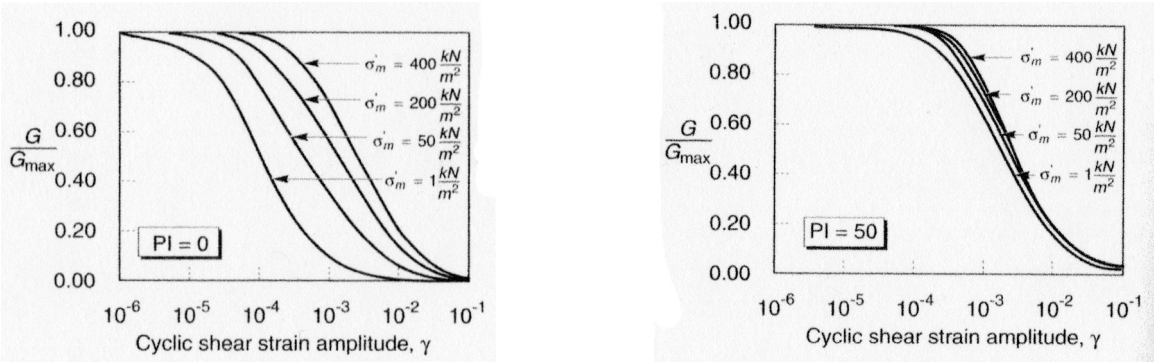


Figura 2: Influenza della pressione di confinamento e della plasticità sul modulo di deformazione al taglio.

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

$$\xi = 0.333\,\frac{1+exp\left(-0.0145\,PI^{1.3}\right)}{2}\left[0.586\left(\frac{G}{G_{max}}\right)^2 - 1.547\frac{G}{G_{max}} + 1\right] \tag{29}$$

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

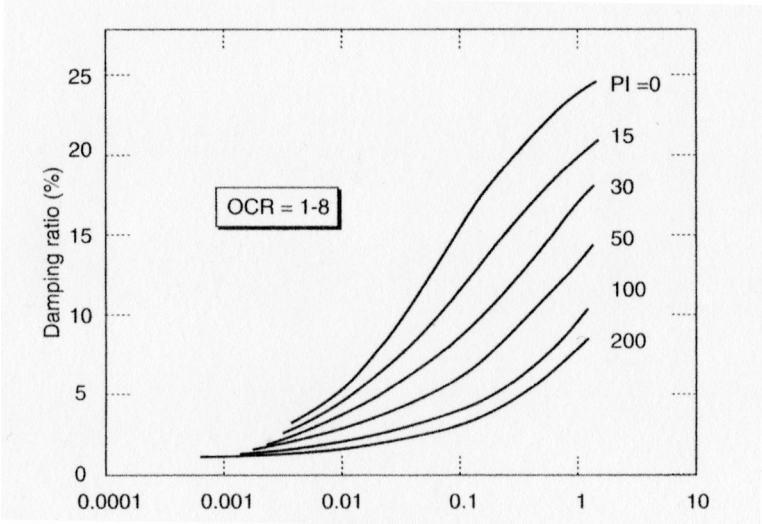


Figura 3: Influenza della plasticità sul coefficiente di smorzamento viscoso.

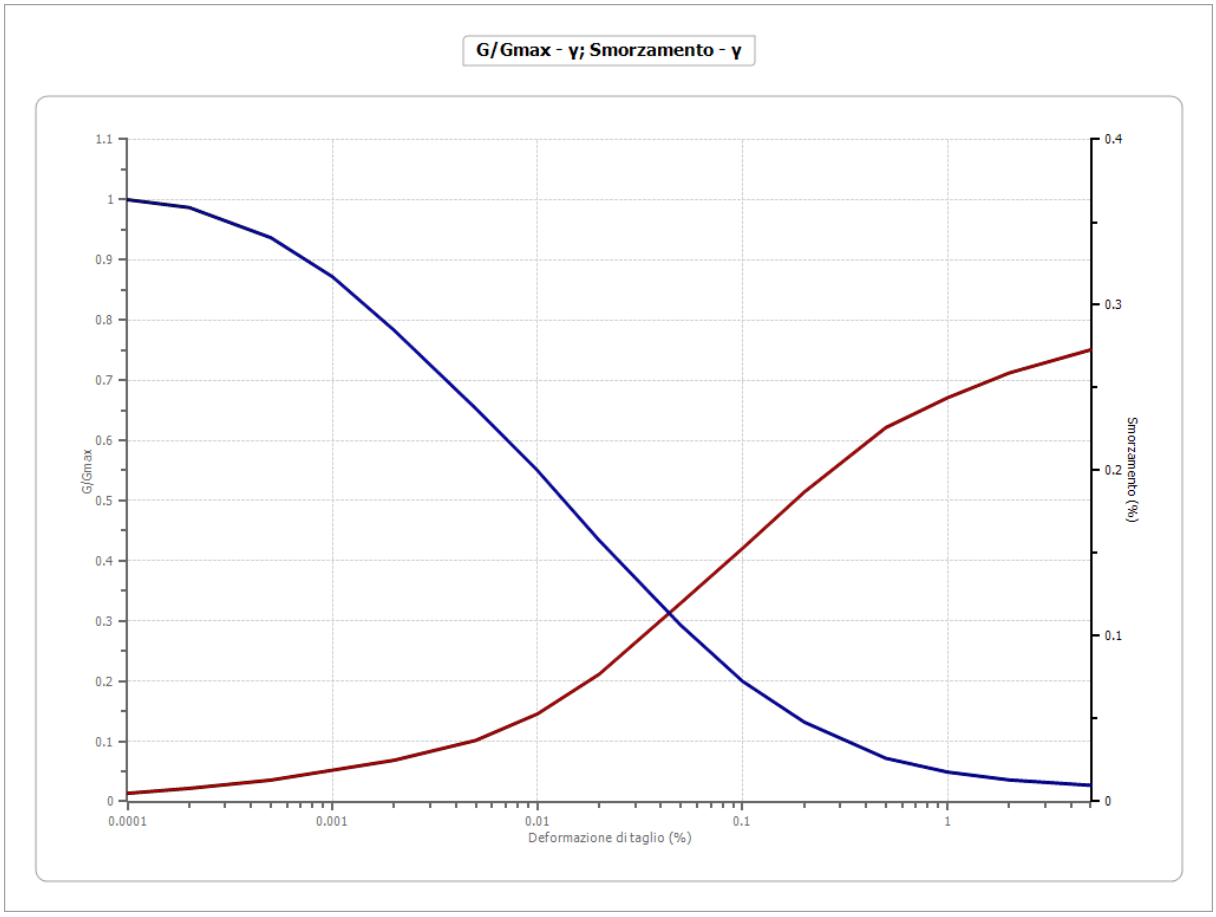
Dati generali

Descrizione	PIANO ATTUATIVO PONTEGGIA
Cantiere	VIA DEL CENTENARIO
Data della prova	d.C./03/2013
Via	VIA DEL CENTENARIO, TERNI
Latitudine	42,5837364[°]
Longitudine	12,6121969[°]

Terreni

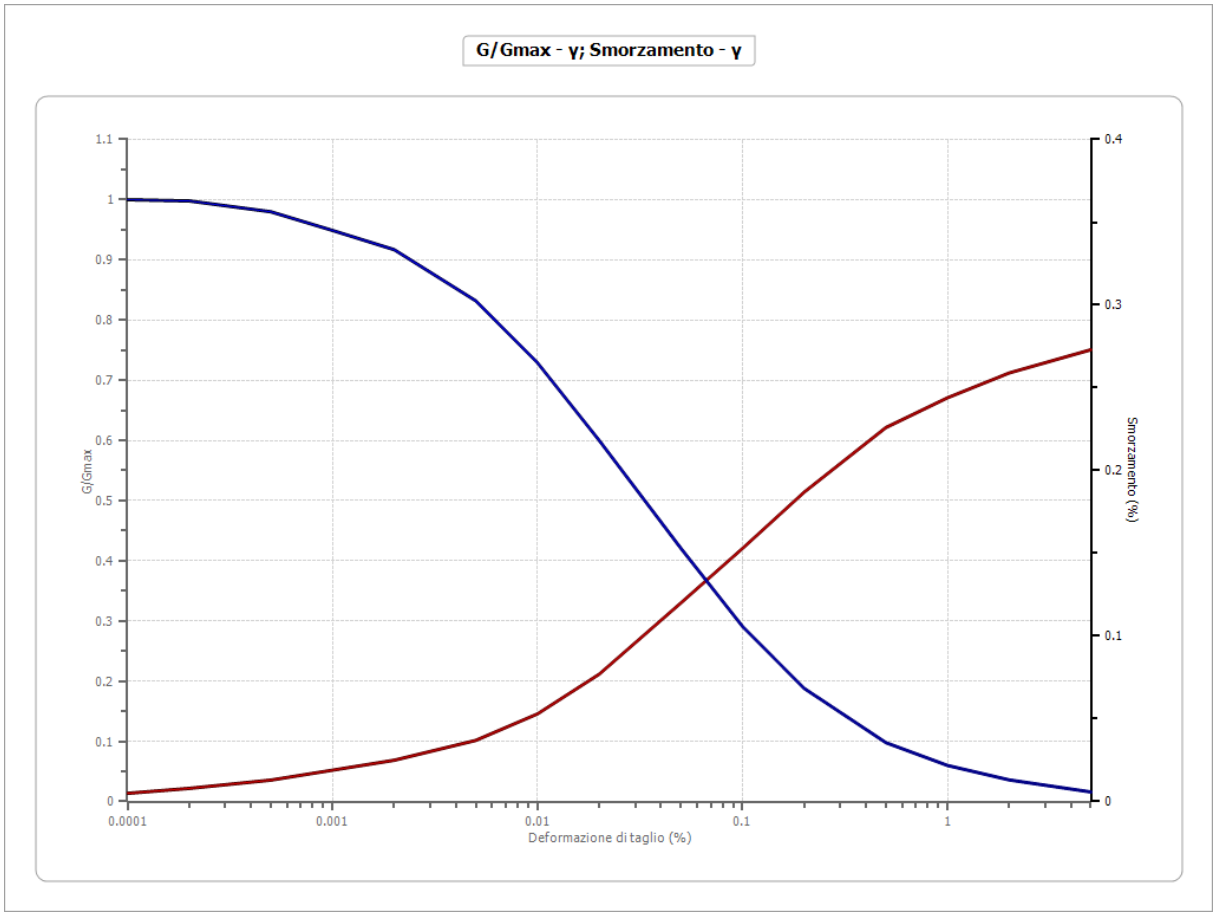
Seed et al. (1986) Gravel

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.0001	1.000	0.0001	0.005
0.0002	0.987	0.0002	0.008
0.0005	0.937	0.0005	0.013
0.001	0.872	0.001	0.019
0.002	0.783	0.002	0.025
0.005	0.653	0.005	0.037
0.010	0.550	0.010	0.053
0.020	0.434	0.020	0.077
0.050	0.293	0.050	0.120
0.100	0.200	0.100	0.153
0.200	0.132	0.200	0.187
0.500	0.072	0.500	0.226
1.000	0.049	1.000	0.244
2.000	0.036	2.000	0.259
5.000	0.027	5.000	0.273



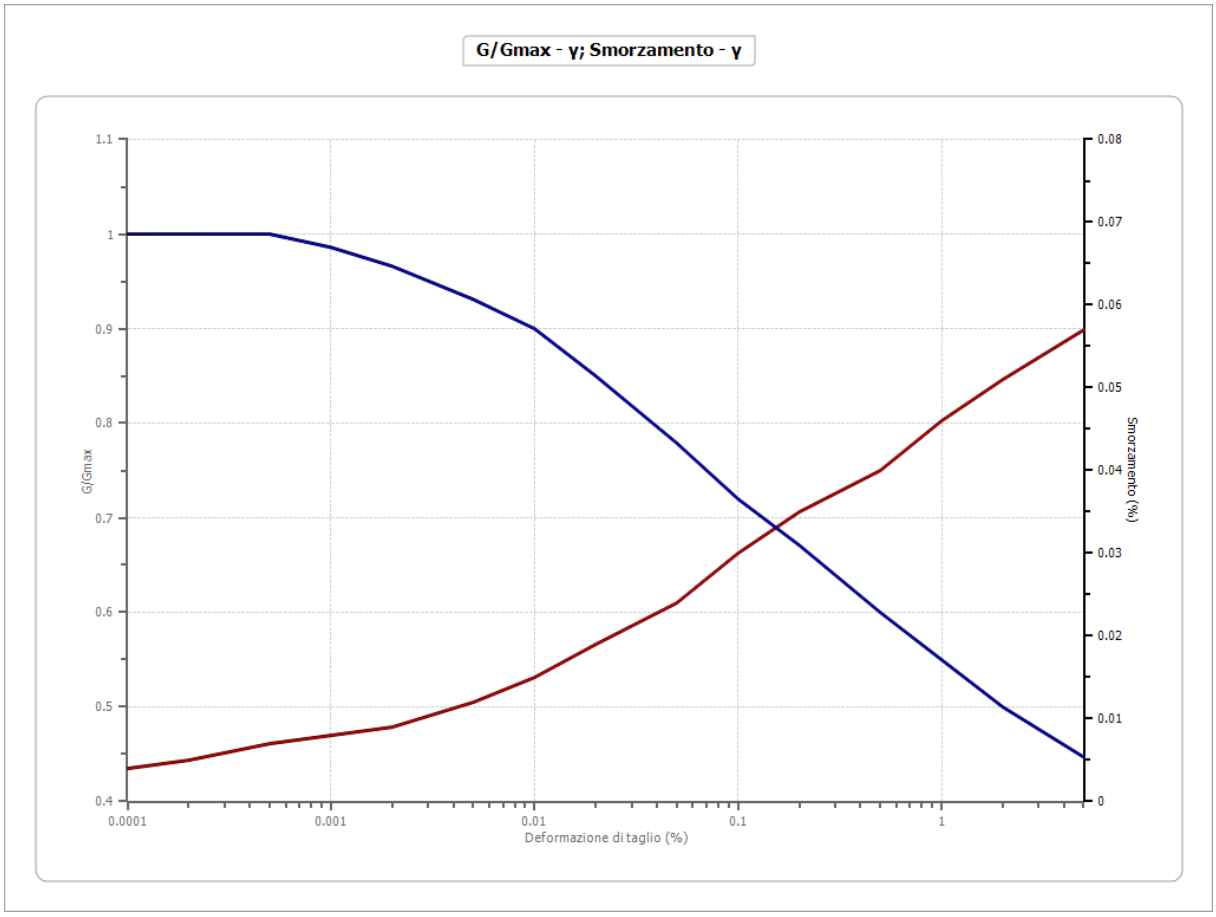
Seed et al. (1986) Sand - Average

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.0001	1.000	0.0001	0.005
0.0002	0.998	0.0002	0.008
0.0005	0.980	0.0005	0.013
0.001	0.949	0.001	0.019
0.002	0.917	0.002	0.025
0.005	0.832	0.005	0.037
0.010	0.729	0.010	0.053
0.020	0.600	0.020	0.077
0.050	0.421	0.050	0.120
0.100	0.291	0.100	0.153
0.200	0.188	0.200	0.187
0.500	0.098	0.500	0.226
1.000	0.060	1.000	0.244
2.000	0.036	2.000	0.259
5.000	0.016	5.000	0.273



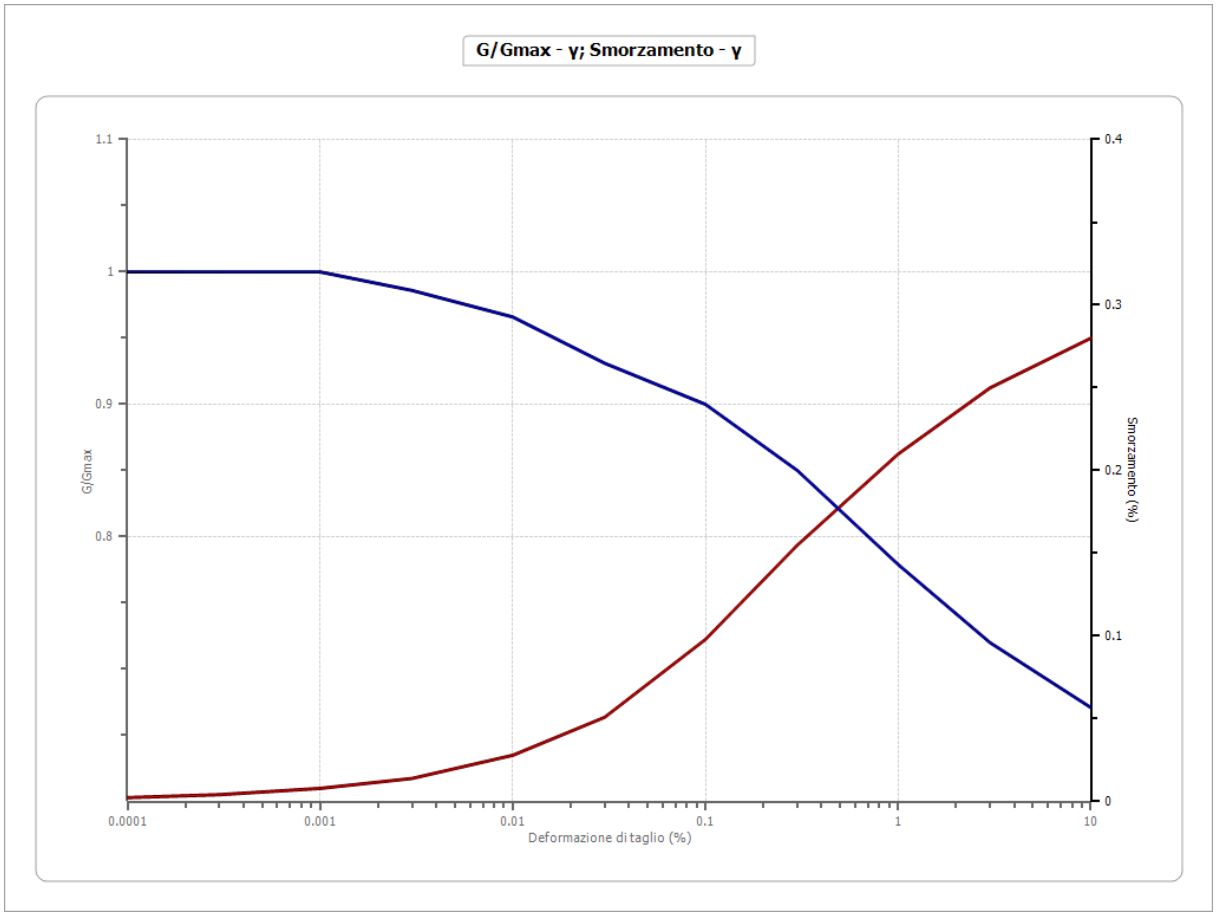
Idriss (1990) Rock

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.0001	1.000	0.0001	0.004
0.0002	1.000	0.0002	0.005
0.0005	1.000	0.0005	0.007
0.001	0.986	0.001	0.008
0.002	0.966	0.002	0.009
0.005	0.931	0.005	0.012
0.010	0.900	0.010	0.015
0.020	0.850	0.020	0.019
0.050	0.779	0.050	0.024
0.100	0.720	0.100	0.030
0.200	0.671	0.200	0.035
0.500	0.600	0.500	0.040
1.000	0.550	1.000	0.046
2.000	0.500	2.000	0.051
5.000	0.447	5.000	0.057



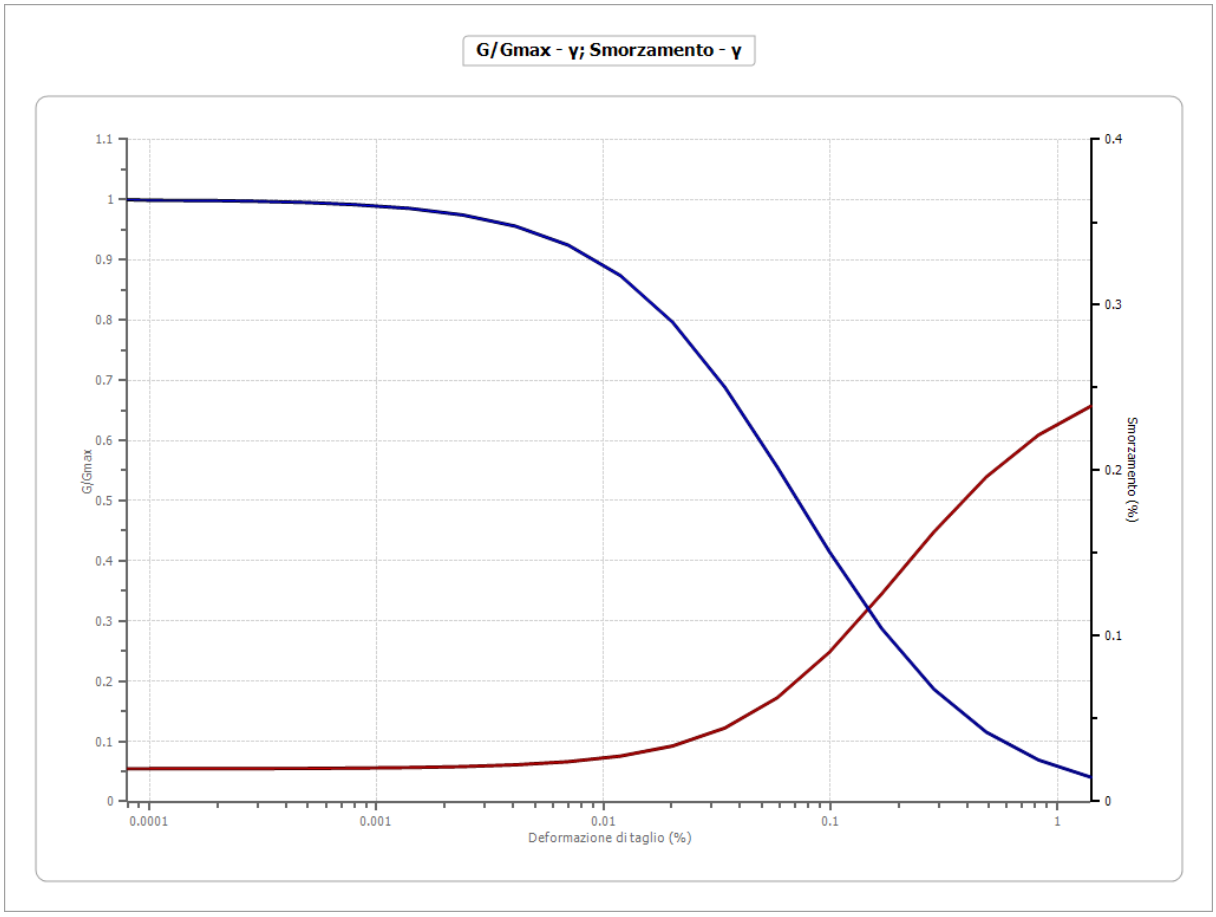
Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.0001	1.000	0.0001	0.0024
0.0003	1.000	0.0003	0.0042
0.001	1.000	0.001	0.008
0.003	0.986	0.003	0.014
0.010	0.966	0.010	0.028
0.030	0.931	0.030	0.051
0.100	0.900	0.100	0.098
0.300	0.850	0.300	0.155
1.000	0.779	1.000	0.210
3.000	0.720	3.000	0.250
10.000	0.671	10.000	0.280



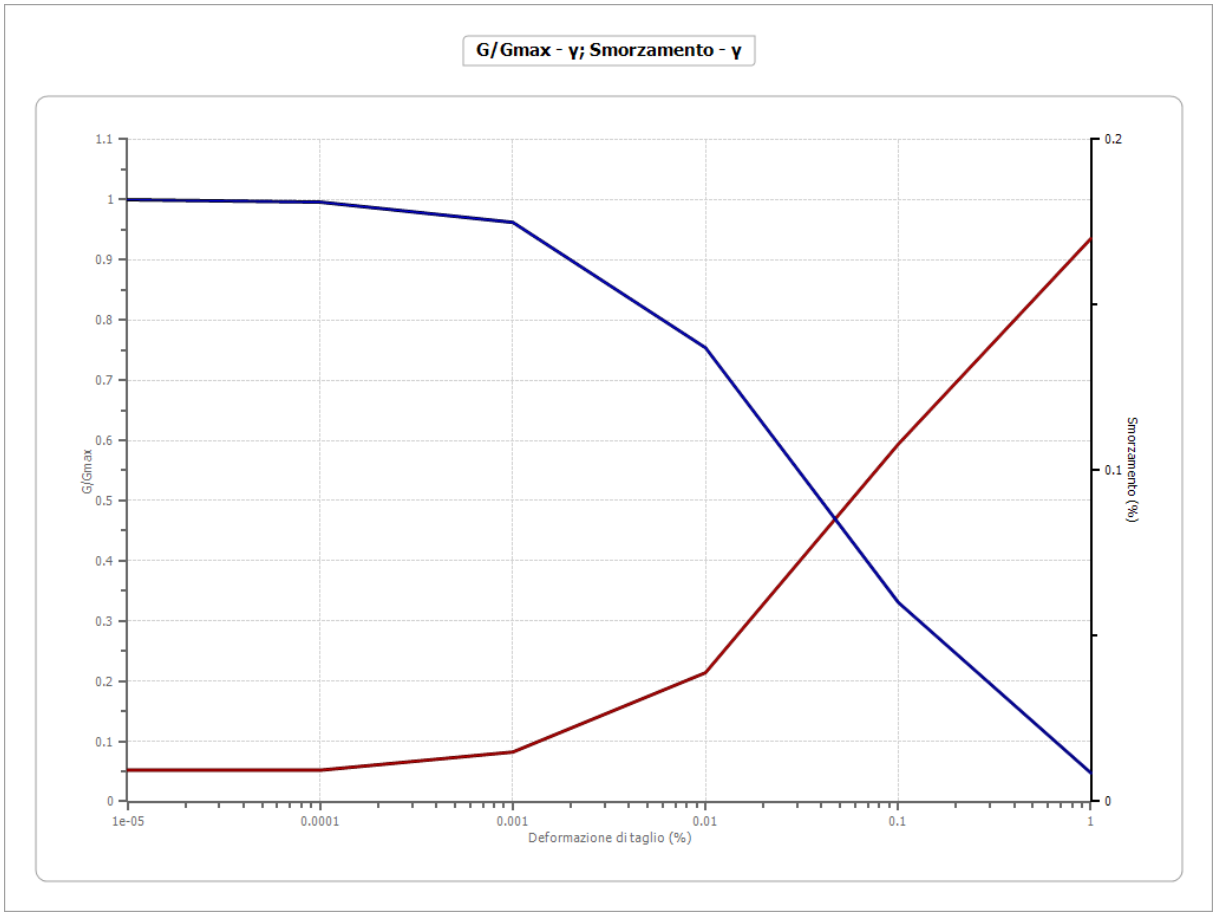
Lombardia - Limi sabbiosi

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.00008	1.000	0.00008	0.019826
0.0001	0.99915	0.0001	0.01987
0.0002	0.9985	0.0002	0.019903
0.0003	0.9974	0.0003	0.019962
0.0005	0.9953	0.0005	0.020067
0.0008	0.9918	0.0008	0.020253
0.0014	0.98555	0.0014	0.020583
0.0024	0.97465	0.0024	0.021171
0.0041	0.956	0.0041	0.02222
0.007	0.9246	0.007	0.024103
0.0119	0.87385	0.0119	0.027498
0.0202	0.7964	0.0202	0.033617
0.0343	0.6886	0.0343	0.044464
0.0583	0.556	0.0583	0.062701
0.099	0.41535	0.099	0.090215
0.1684	0.2876	0.1684	0.125506
0.2862	0.1867	0.2862	0.162968
0.4866	0.11545	0.4866	0.196163
0.8272	0.0691	0.8272	0.22153
1.4063	0.0405	1.4063	0.238929



Lombardia - Ghiaie

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.00001	1.000	0.00001	0.009488
0.0001	0.996	0.0001	0.009488
0.001	0.9624	0.001	0.014981
0.010	0.754	0.010	0.038938
0.100	0.3311	0.100	0.107935
1.000	0.0476	1.000	0.170087

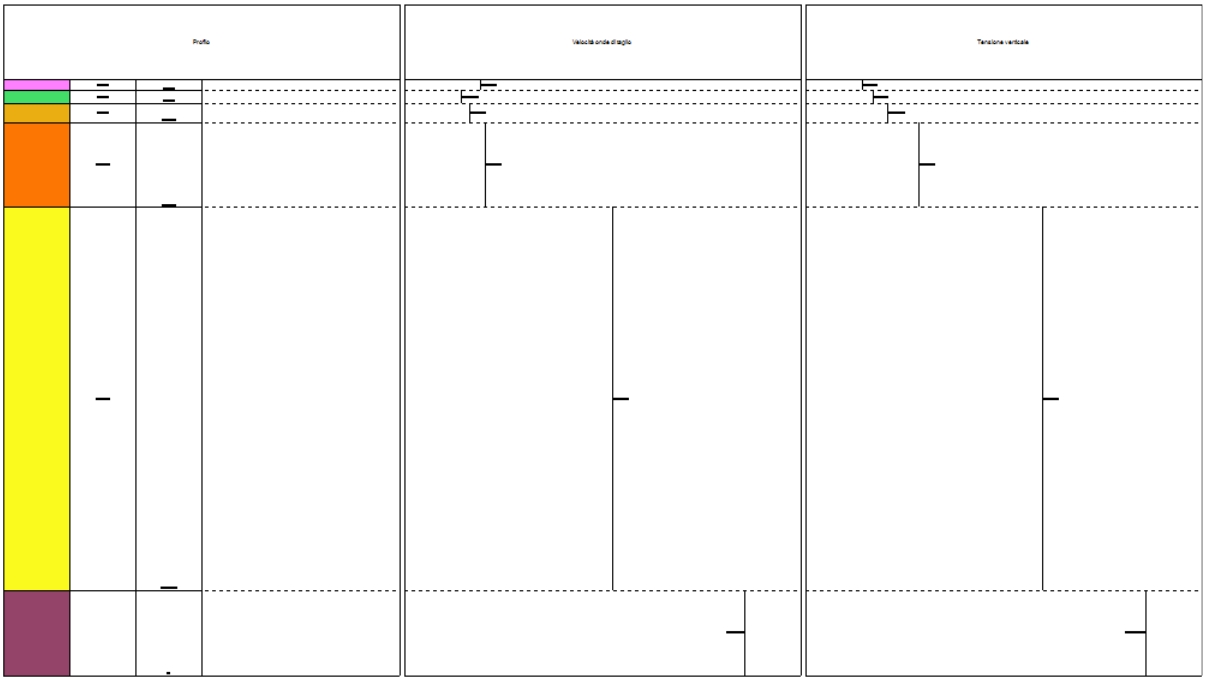


Stratigrafia

n.	Descrizione	Profondità [m]	Spessore [m]	Terreno	Numero sottostrati	Gmax [MPa]	Smorzamento critico [%]	Peso unità vol. [kN/m³]	Vs [m/s]	Tensione verticale [kPa]
1		--	2.5	Lombardia - Ghiaie	0	160.55	--	17.5	300.0	21.9
2		2.5	3.0	Seed et al. (1986) Gravel	0	121.69	--	17.0	265.0	69.3
3		5.5	4.5	Seed et al. (1986) Sand - Average	0	151.85	--	19.0	280.0	137.5
4		10.0	20.0	Lombardia - Limi sabbiosi	0	186.13	--	19.0	310.0	272.2
5		30.0	90.0	Idriss (1990)	0	616.72	--	20.0	550.0	822.6

				Clay (Seed and Sun 1989)						
6		oo	--	Idriss (1990) Rock	0	1435.27	--	22.0	800.0	1281.2

Strato con falda: 3
Strato rilevamento accelerogramma: 6 Affiorante



Elaborazione

Numero di iterazioni 8
Rapporto tra deformazione a taglio effettiva e deformazione massima 0.5
Tipo di modulo elastico Shake 91
Massmio errore percentuale di convergenza 5.37 E-02

Fattori di amplificazione

Tai	0.200 [s]
Tvi	1.650 [s]
Tao	0.340 [s]
Tvo	0.410 [s]
Sami	0.732 [m/s²]
Svmi	0.046 [m/s]
Samo	1.185 [m/s²]

Svmo	0.081 [m/s]
Fa	**1.620 [-]**
Fv	**1.763 [-]**
TB	0.142 [s]
TC	0.427 [s]
SA(0)	0.081 [m/s²]
SA(TB)	1.185 [m/s²]

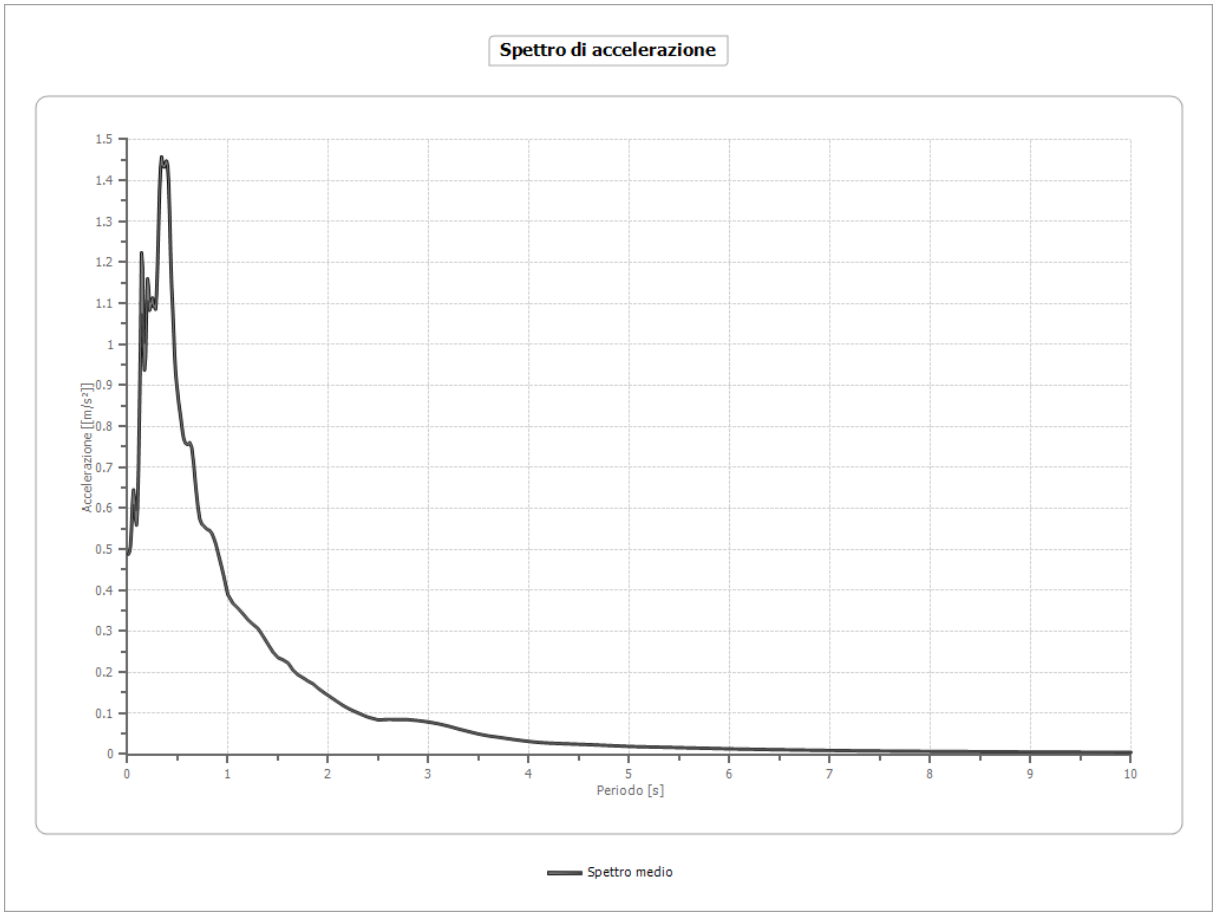
Fattori di amplificazione su intensità spettrale

Periodo minino [s]	Periodo massimo [s]	Int. Housner input [m]	Int. Housner output [m]	Int. Housner input/output [m]	FA

Spettro medio

Periodo [s]	Accelerazione [m/s²]	Periodo [s]	Accelerazione [m/s²]	Periodo [s]	Accelerazione [m/s²]	Periodo [s]	Accelerazione [m/s²]	Periodo [s]	Accelerazione [m/s²]
0.01	0.4881	0.33	1.4309	0.72	0.5747	1.90	0.1609	4.60	0.0236
0.02	0.4942	0.34	1.4576	0.74	0.5620	1.95	0.1520	4.70	0.0225
0.03	0.5075	0.35	1.4406	0.76	0.5573	2.00	0.1436	4.80	0.0215
0.04	0.5474	0.36	1.4335	0.78	0.5521	2.05	0.1353	4.90	0.0204
0.05	0.6104	0.37	1.4328	0.80	0.5481	2.10	0.1269	5.00	0.0193
0.06	0.6454	0.38	1.4437	0.82	0.5462	2.15	0.1189	5.10	0.0186
0.07	0.6226	0.39	1.4481	0.84	0.5394	2.20	0.1120	5.20	0.0180
0.08	0.5744	0.40	1.4342	0.86	0.5275	2.25	0.1061	5.40	0.0169
0.09	0.5592	0.41	1.3960	0.88	0.5131	2.30	0.1008	5.60	0.0157
0.10	0.6002	0.42	1.3195	0.90	0.4938	2.35	0.0953	5.80	0.0145
0.11	0.6972	0.43	1.2163	0.92	0.4742	2.40	0.0904	6.00	0.0134
0.12	0.8433	0.44	1.1448	0.94	0.4546	2.50	0.0838	6.20	0.0124
0.13	1.0034	0.45	1.0916	0.96	0.4346	2.60	0.0853	6.40	0.0115
0.14	1.2240	0.46	1.0339	0.98	0.4118	2.70	0.0847	6.60	0.0108
0.15	1.1885	0.47	0.9735	1.00	0.3897	2.80	0.0845	6.80	0.0100
0.16	0.9968	0.48	0.9302	1.05	0.3686	2.90	0.0821	7.00	0.0095
0.17	0.9373	0.49	0.9036	1.10	0.3567	3.00	0.0788	7.20	0.0088
0.18	0.9708	0.50	0.8818	1.15	0.3431	3.10	0.0744	7.40	0.0083
0.19	1.0821	0.51	0.8588	1.20	0.3285	3.20	0.0686	7.60	0.0079
0.20	1.1604	0.52	0.8413	1.25	0.3171	3.30	0.0618	7.80	0.0075
0.21	1.1392	0.53	0.8229	1.30	0.3072	3.40	0.0554	8.00	0.0071
0.22	1.0831	0.54	0.8037	1.35	0.2887	3.50	0.0495	8.50	0.0065
0.23	1.0916	0.55	0.7850	1.40	0.2689	3.60	0.0447	9.00	0.0058
0.24	1.1041	0.56	0.7709	1.45	0.2494	3.70	0.0415	9.50	0.0053
0.25	1.1136	0.57	0.7637	1.50	0.2360	3.80	0.0379	10.00	0.0048
0.26	1.0922	0.58	0.7584	1.55	0.2304	3.90	0.0344		
0.27	1.0951	0.60	0.7558	1.60	0.2230	4.00	0.0314		
0.28	1.0858	0.62	0.7607	1.65	0.2052	4.10	0.0290		
0.29	1.1219	0.64	0.7491	1.70	0.1938	4.20	0.0274		
0.30	1.1933	0.66	0.7085	1.75	0.1866	4.30	0.0263		
0.31	1.2859	0.68	0.6531	1.80	0.1785	4.40	0.0255		

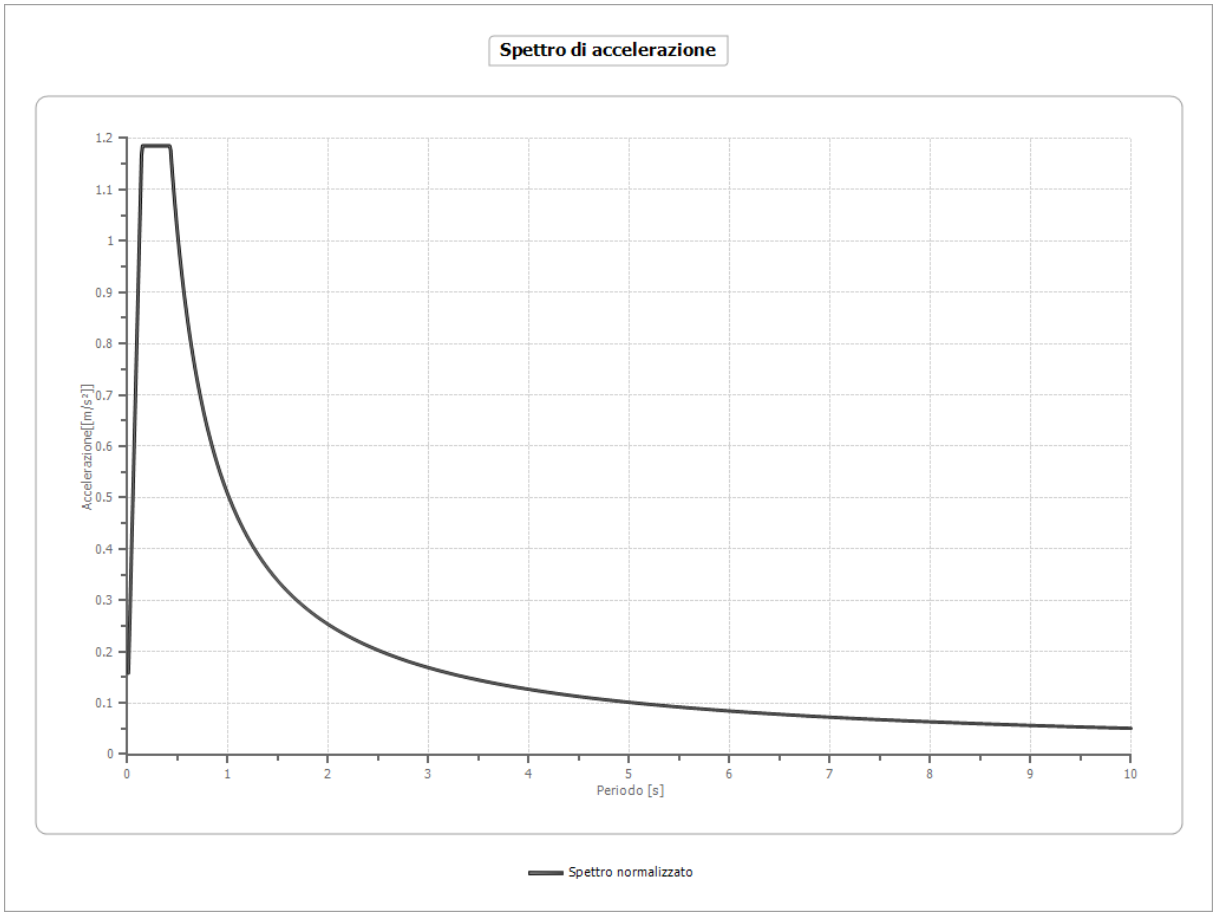
0.32	1.3757	0.70	0.6076	1.85	0.1719	4.50	0.0246		



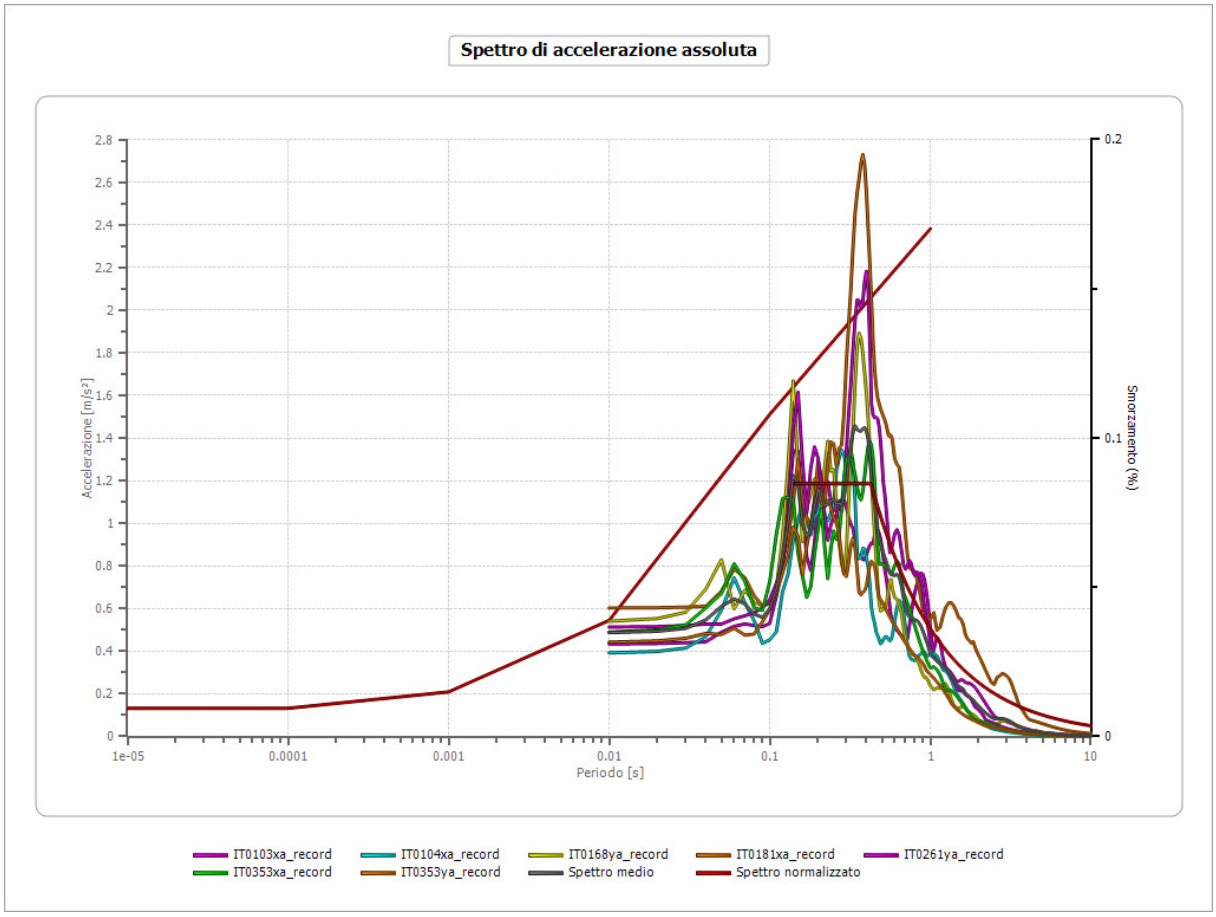
Spettro normalizzato

Periodo [s]	Accelerazione [m/s²]	Periodo [s]	Accelerazione [m/s²]	Periodo [s]	Accelerazione [m/s²]	Periodo [s]	Accelerazione [m/s²]	Periodo [s]	Accelerazione [m/s²]
0.01	0.1582	0.33	1.1854	0.72	0.7032	1.90	0.2665	4.60	0.1101
0.02	0.2358	0.34	1.1854	0.74	0.6842	1.95	0.2597	4.70	0.1077
0.03	0.3134	0.35	1.1854	0.76	0.6662	2.00	0.2532	4.80	0.1055
0.04	0.3910	0.36	1.1854	0.78	0.6492	2.05	0.2470	4.90	0.1033
0.05	0.4686	0.37	1.1854	0.80	0.6329	2.10	0.2411	5.00	0.1013
0.06	0.5462	0.38	1.1854	0.82	0.6175	2.15	0.2355	5.10	0.0993
0.07	0.6238	0.39	1.1854	0.84	0.6028	2.20	0.2302	5.20	0.0974
0.08	0.7014	0.40	1.1854	0.86	0.5888	2.25	0.2250	5.40	0.0938
0.09	0.7790	0.41	1.1854	0.88	0.5754	2.30	0.2201	5.60	0.0904
0.10	0.8566	0.42	1.1854	0.90	0.5626	2.35	0.2155	5.80	0.0873
0.11	0.9342	0.43	1.1775	0.92	0.5504	2.40	0.2110	6.00	0.0844
0.12	1.0118	0.44	1.1508	0.94	0.5387	2.50	0.2025	6.20	0.0817
0.13	1.0894	0.45	1.1252	0.96	0.5274	2.60	0.1947	6.40	0.0791
0.14	1.1670	0.46	1.1007	0.98	0.5167	2.70	0.1875	6.60	0.0767
0.15	1.1854	0.47	1.0773	1.00	0.5063	2.80	0.1808	6.80	0.0745
0.16	1.1854	0.48	1.0549	1.05	0.4822	2.90	0.1746	7.00	0.0723
0.17	1.1854	0.49	1.0333	1.10	0.4603	3.00	0.1688	7.20	0.0703

0.18	1.1854	0.50	1.0127	1.15	0.4403	3.10	0.1633	7.40	0.0684
0.19	1.1854	0.51	0.9928	1.20	0.4219	3.20	0.1582	7.60	0.0666
0.20	1.1854	0.52	0.9737	1.25	0.4051	3.30	0.1534	7.80	0.0649
0.21	1.1854	0.53	0.9554	1.30	0.3895	3.40	0.1489	8.00	0.0633
0.22	1.1854	0.54	0.9377	1.35	0.3751	3.50	0.1447	8.50	0.0596
0.23	1.1854	0.55	0.9206	1.40	0.3617	3.60	0.1406	9.00	0.0563
0.24	1.1854	0.56	0.9042	1.45	0.3492	3.70	0.1368	9.50	0.0533
0.25	1.1854	0.57	0.8883	1.50	0.3376	3.80	0.1332	10.00	0.0506
0.26	1.1854	0.58	0.8730	1.55	0.3267	3.90	0.1298		
0.27	1.1854	0.60	0.8439	1.60	0.3165	4.00	0.1266		
0.28	1.1854	0.62	0.8167	1.65	0.3069	4.10	0.1235		
0.29	1.1854	0.64	0.7912	1.70	0.2978	4.20	0.1206		
0.30	1.1854	0.66	0.7672	1.75	0.2893	4.30	0.1178		
0.31	1.1854	0.68	0.7446	1.80	0.2813	4.40	0.1151		
0.32	1.1854	0.70	0.7233	1.85	0.2737	4.50	0.1125		



Confronto tra gli spettri



Confronto spettro normativa

	Operatività SLO Cat. A	Danno SLD Cat. A	Salvaguardia vita SLV Cat. A	Prev. collasso SLC Cat. A	Operatività SLO Cat. C	Danno SLD Cat. C	Salvaguardia vita SLV Cat. C	Prev. collasso SLC Cat. C
Tr [anni]	30	50	475	975	30	50	475	975
ag [m/s²]	0.559	0.687	1.619	2.021	0.559	0.687	1.619	2.021
Fo	2.507	2.496	2.453	2.48	2.507	2.496	2.453	2.48
Tc* [s]	0.269	0.281	0.319	0.331	0.269	0.281	0.319	0.331
Ss	1.00	1.00	1.00	1.00	1.50	1.50	1.46	1.39
St	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.62	1.60	1.53	1.51
TB [s]	0.090	0.094	0.106	0.110	0.145	0.150	0.163	0.167
TC [s]	0.269	0.281	0.319	0.331	0.436	0.449	0.488	0.501
TD [s]	1.828	1.880	2.260	2.424	1.828	1.880	2.260	2.424
Se(0) [m/s²]	0.559	0.687	1.619	2.021	0.839	1.030	2.359	2.816
Se(TB) [m/s²]	0.771	0.943	2.184	2.756	1.157	1.414	3.182	3.841