

Spett. EDIL IMPIANTI 2 S.r.l.

RELAZIONE GEOLOGICA
ALLEGATA AL PIANO URBANISTICO ATTUATIVO,
AMBITO APC.N.2.2. SOCIETA' EDIL IMPIANTI 2 S.R.L.
PER LA REALIZZAZIONE DI STRUTTURE COMMERCIALI,
SU AREA POSTA PRESSO VIA A. COSTA - VIA EMILIA OVEST,
IN COMUNE DI SANTARCANGELO - RN –
CON VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DI SITO.

ALLEGATO 1 – Relazione di MZS III° Livello e RSL



**STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA
Dott. Geol. LORENZO DEL MASCHIO**

Via Camogli 59 - 41125 Modena
Tel 347/4128277 - Fax 059/394816
e-mail delmaschio.l@alice.it
PEC delmaschio.l@epap.sicurezza postale.it

**COMUNE DI SANTARCANGELO
PROVINCIA DI RIMINI**

OGGETTO:

**STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI III LIVELLO E ANALISI DI
RISPOSTA SISMICA LOCALE (RSL) PER IL PUA DI INIZIATIVA PRIVATA
AMBITO APC.N 2.2 VIA COSTA/VIA EMILIA OVEST IN COMUNE DI
SANTARCANGELO DI ROMAGNA**

LOCALITÀ:

Santarcangelo di Romagna - Via Emilia Ovest/Via A. Costa/Via Morigi

COMMITTENTE

Edil Impianti2 Srl

OTTOBRE 2021




Dott.
LORENZO
DEL MASCHIO
Geologo
A.P. n. 1725


INDICE GENERALE

1. PREMESSA	1
2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DELL'AREA	1
a. Riferimenti cartografici	1
b. Copertura aerofotogrammetrica	1
3. INQUADRAMENTO NORMATIVO	3
4. INDAGINI REALIZZATE	4
5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO	5
6. CARATTERIZZAZIONE GEOFISICA DEL SITO	10
a. Considerazioni generali	10
b. Indagini geofisiche	11
b1. Prova di superficie di sismica passiva a stazione singola HV	11
b2. Prove di superficie di sismica passiva in array bidimensionale ESAC	14
b3. Analisi congiunta prove ESAC+HV	18
7. PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE E LOCALE	20
a. Sismicità delle aree di interesse	20
b. Sismicità storica delle aree di intervento	22
c. Individuazione della pericolosità sismica del sito	27
d. Ricostruzione del profilo sismo-stratigrafico del sito	30
e. Risposta sismica locale (RSL)	31
e1. Premessa	31
e2. Ricostruzione del modello sismo-stratigrafico del sottosuolo	34
e3. Definizione del modello di calcolo	43
e4. Definizione del moto di input (scelta delle azioni sismiche)	50
e5. Risultati della modellazione	55
f. III Livello di approfondimento - DGR 630/2019 e DGR 476/2021 RER	60
8. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	62
9. ALLEGATI	67

1. PREMESSA

Su incarico del Dott. Geol. Franco Battistini, è stato redatto lo studio per il PUA di iniziativa privata APC.N 2.2 in comune di Santarcangelo di Romagna.

L'indagine è stata effettuata mediante reperimento di materiale bibliografico conoscitivo, sopralluoghi, rilievi diretti sul sito e indagini sismiche.

Detta relazione viene realizzata per la progettazione esecutiva delle opere da realizzarsi, in ottemperanza sia alle procedure definite nella Delibera della Giunta Regionale 476/2021 "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017)", sia delle Norme tecniche per le costruzioni D.M. 17 gennaio 2018.

Tale studio si avvale anche dei dati geologici e geognostici elaborati ed acquisiti per lo studio Geologico redatto dal Dott. Geol. Franco Battistini sempre per il progetto in oggetto.

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO - AMMINISTRATIVO

L'area di intervento è ubicata in Santarcangelo di Romagna, Via Emilia ovest/Via A. Costa/Via Morigi
I principali riferimenti sono:

a. Riferimenti cartografici (fig. 2.1 - 2.2)

C.T.R.: Tavola 256SO (1:25.000);
Sezione 256100 (1:10.000);
Elemento 256103 (1:5000).

b. Copertura aereofotogrammetrica

- Foto aeree RER 1954
- Foto aeree RER 1973-1978
- Ortofoto digitali AIMA 1996
- Ortofoto digitali Terraitaly 2000
- Ortofoto digitali QB 2003
- Ortofoto AGEA-RER 2008
- Ortofoto AGEA-RER 2011

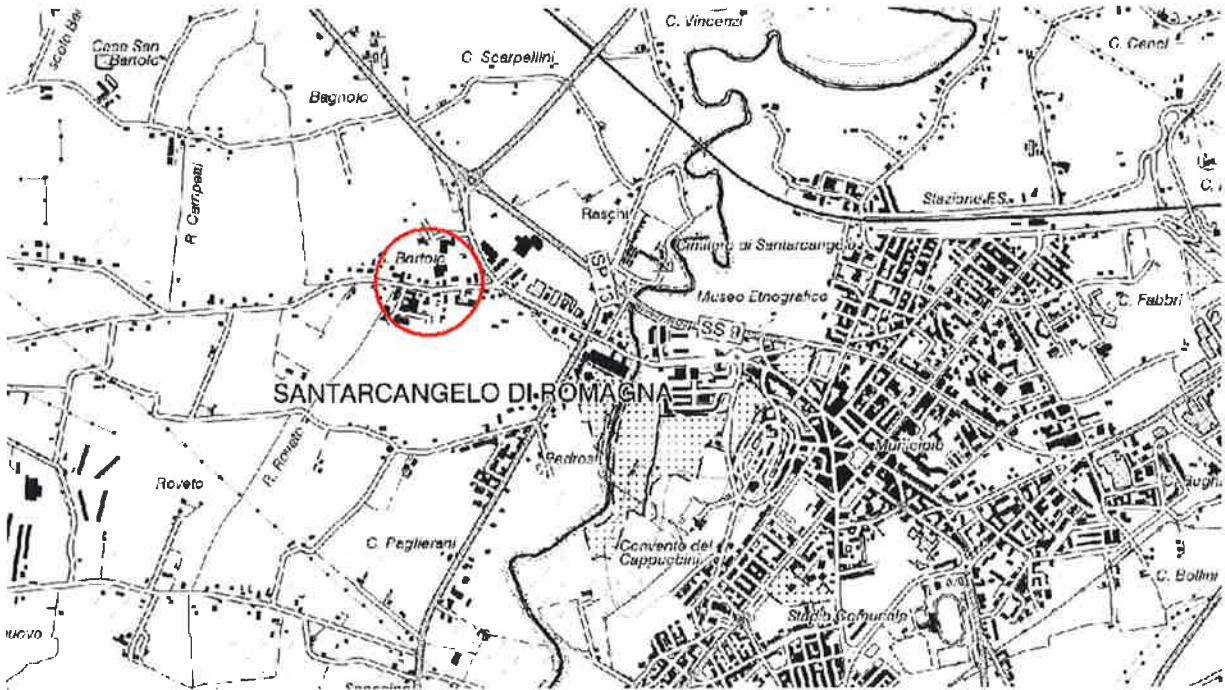


Figura 2.1: Localizzazione area di indagine su C.T.R. a scala 1:25.000.

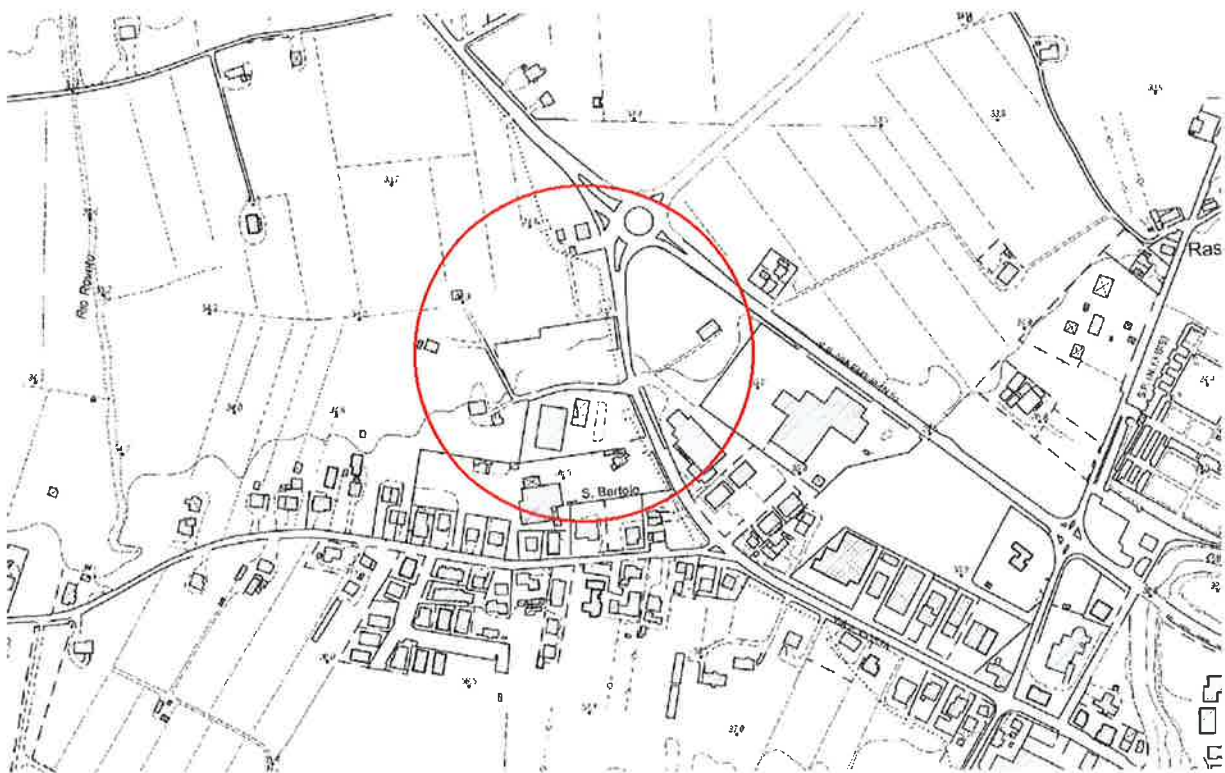


Figura 2.2: Localizzazione area di indagine su C.T.R. a scala 1:5.000.

3. INQUADRAMENTO NORMATIVO

- **D.P.R. 380/2001**

- **Ordinanza P.C.M. n. 3274 del 20.3.2003**

Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.

- **Eurocodice 7**

Progettazione geotecnica - Parte 1: Regole generali.

- **Eurocodice 8**

Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture - Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

- **D.M. 17 Gennaio 2018**

Norme Tecniche per le costruzioni.

- **Circolare n. 7 del 21/01/2019**

- **L.R. 19/2008**

“Norme per la riduzione del rischio sismico”

- **L.R. 24/2017**

“Disciplina regionale sulla tutela e l’uso del territorio”

- **D.G.R. 630/2019**

“Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017)”

- **D.G.R. 476/2021**

“Aggiornamento dell’atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, l.r. n. 24/2017)” di cui alla deliberazione della giunta regionale 29 aprile 2019, n. 630.”

4. INDAGINI REALIZZATE

Al fine di determinare le caratteristiche sismiche dei terreni di fondazione si è provveduto a reperire tutte le informazioni provenienti da indagini sismiche (ESAC e HV) eseguite nell'area di intervento (figura 4.1):

- n. 1 indagine sismica passiva di microtremori (HV);
- n. 1 indagine sismica passiva in array 2D (ESAC);

Le indagini sismiche sono state eseguite dal Dott. Geol. Lorenzo Del Maschio.

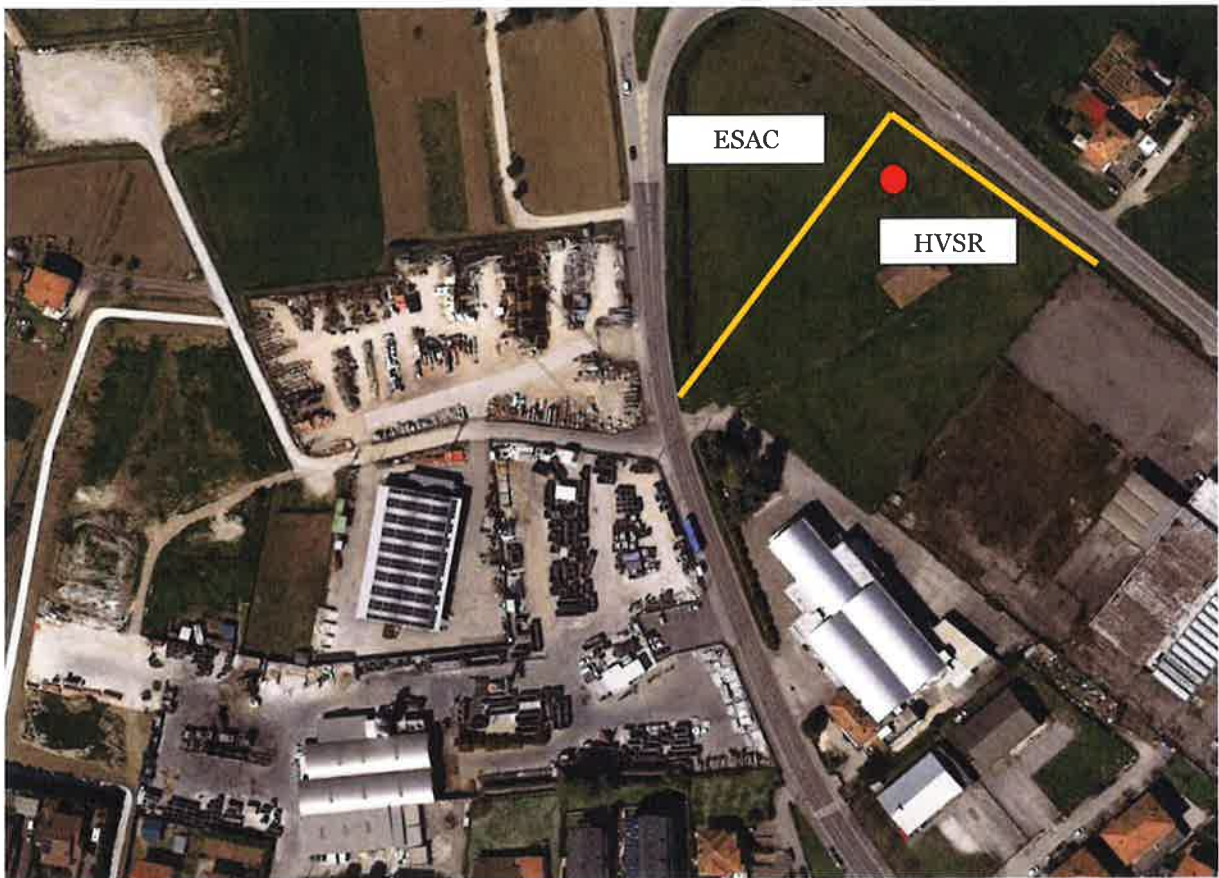


Figura 4.1: Ubicazione delle indagini sismiche.

5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

Per la caratterizzazione geologica del sito si fa riferimento alla campagna geognostica eseguita a corredo della relazione geologica redatta per il progetto in oggetto (Dott. Battistini 2021) ed in particolare:

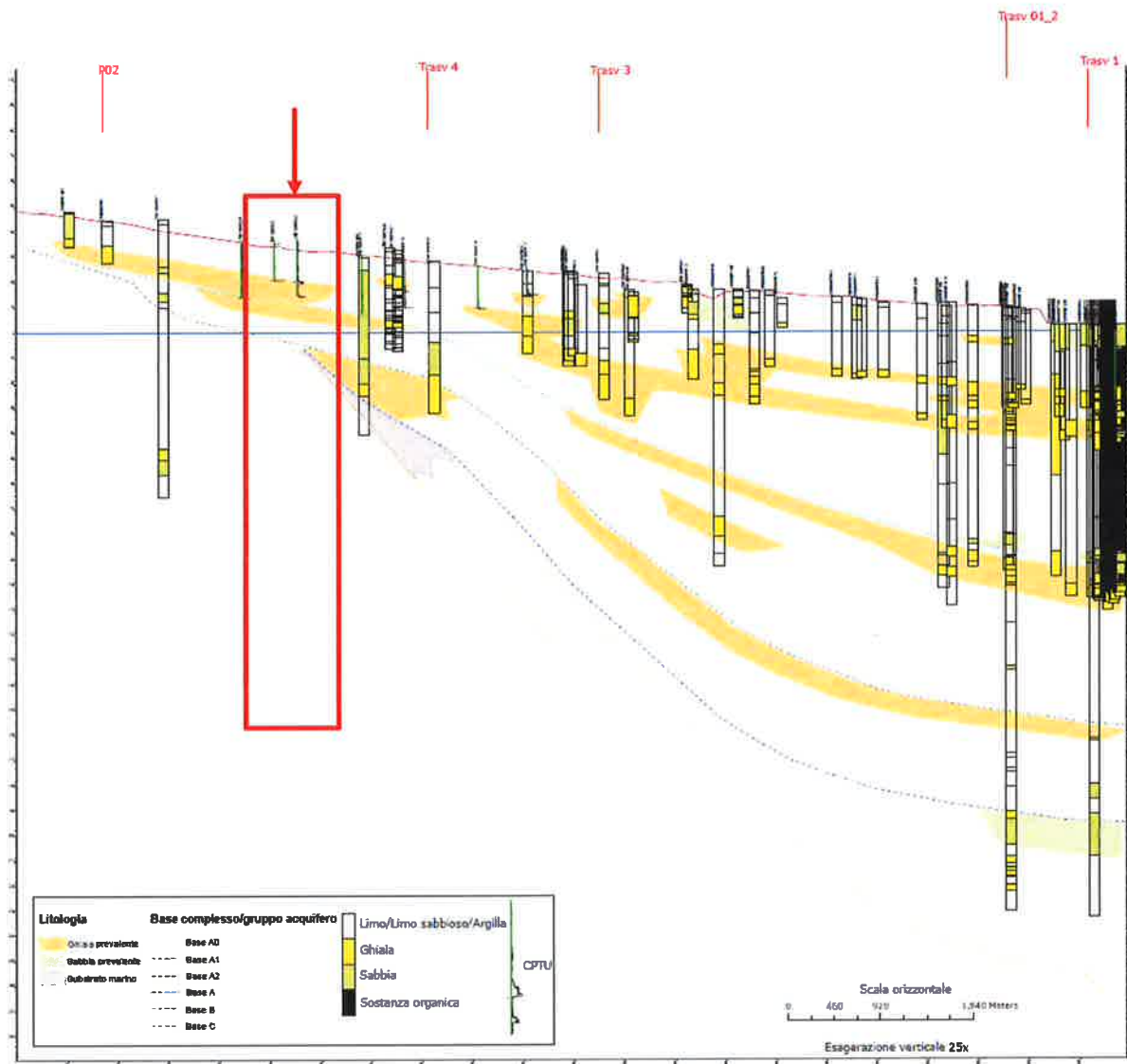
- materiale bibliografico (sezioni geologiche e prove geognostiche della pianura emiliano romagnola a cura del Servizio Geologico sismico e dei Suoli);
- realizzazione di n. 9 prove penetrometriche statiche meccaniche tipo CPTm;
- realizzazione di n. 1 prova penetrometrica statica elettrica tipo CPTe;

Il modello geologico di riferimento e l'assetto stratigrafico generale derivanti dalla campagna di indagini geognostiche svolta (Luglio-Ottobre 2021) individua, complessivamente i seguenti livelli litologici, così definiti sulla base dei rapporti stratigrafici e delle caratteristiche geomeccaniche competenti:

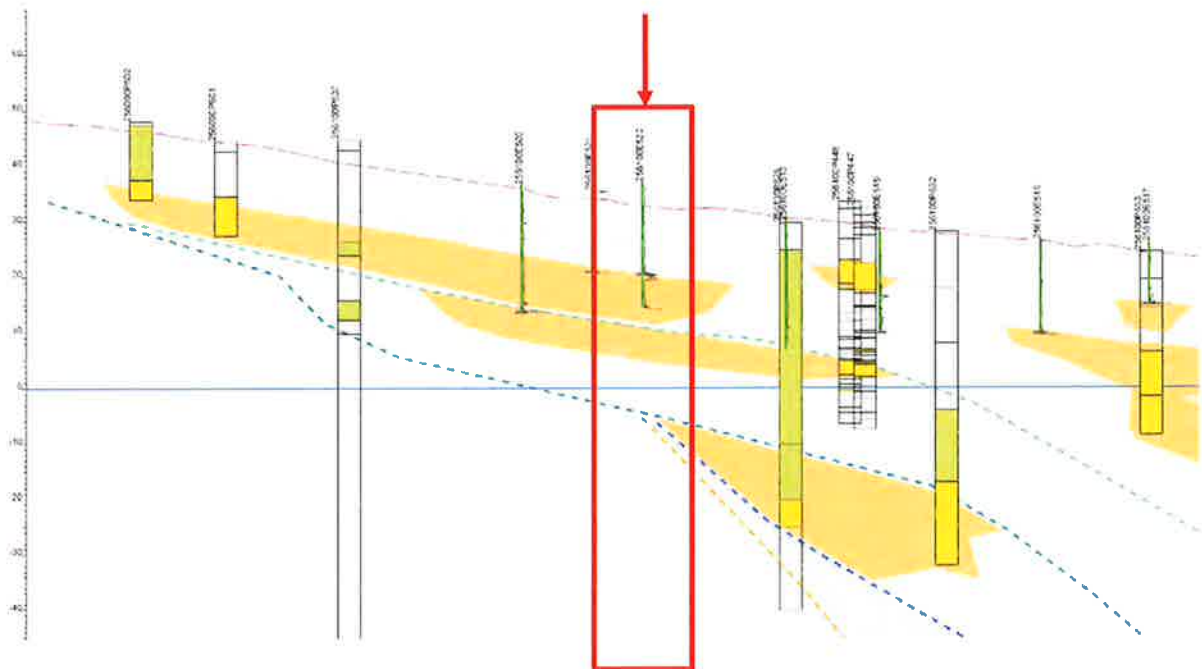
Sono stati individuati, complessivamente, n° 3 intervalli geo - litologici, così definiti sulla base dei rapporti stratigrafici e delle caratteristiche geomeccaniche competenti:

- **Litotipo 1: Livello superficiale e/o terreno di riporto.** Terreni fortemente antropizzati e/o terreni di riporto di differente natura litologica, eterogenei, a tessitura prevalente limo - argillosa con sottili venature sabbiose. Grado di addensamento e coesione, estremamente variabili. Presenza locale di inerti compattati per sottofondi stradali. Caratteristiche geomeccaniche variabili e generalmente scadenti;
- **Litotipo 2. Limi con argille a vario grado di consistenza.** Depositi alluvionali mediamente consistenti con caratteristiche geotecniche sufficienti - discrete ed a contenuta compressibilità. Depositi la cui genesi è riconducibile ad ambienti di piana inondabile intercalati ai livelli ghiaiosi. Presenza di livelli decimetrici discontinui a maggior contenuto sabbioso, di limi argillosi più compressibili e di limi con argilla a maggiore compattezza;
- **Litotipo 3. Limi con argille, consistenti.** Depositi alluvionali analoghi ai litotipi sovrastanti, consistenti, con caratteristiche geotecniche discrete ed a ridotta compressibilità. Depositi la cui genesi è riconducibile ad ambienti di piana inondabile intercalati ai livelli ghiaiosi. Presenza di livelli decimetrici discontinui a maggior contenuto sabbioso, di limi argillosi più compressibili e di limi con argilla a maggiore compattezza;
- **Litotipo 4. Ghiaie alluvionali.** Orizzonti da decimetrici a metrici di depositi alluvionali di conoide dei Fiumi Parecchia ed Uso, costituite da ghiaie e ghiaie sabbiose a granulometria da media a grossa, a spigoli arrotondati. Matrice limo - argillosa variabile in funzione della tipologia di facies deposizionale. Talora presenza di lenti metriche limo - argillose discontinue ed a varie altezze del litotipo. La continuità dei vari orizzonti è anch'essa variabile in funzione dell'ambiente deposizionale; di sovente limitata in quanto essi non sono correlabili se non a piccola o media scala. Il litotipo presenta caratteristiche di compattezza ed addensamento elevate, scarsa compressibilità ed è dotato generalmente di caratteristiche geomeccaniche da buone ad ottime.

Nei fori di sondaggio delle prove penetrometriche, completati con la posa di tubi piezometrici, è stata rilevata la presenza di un livello freatico alla profondità di -2.00 m. dall'attuale p.c.



Sezione 151 (in rosso l'area di intervento).



Particolare della Sezione 151 (in rosso l'area di intervento).

Il modello geologico di riferimento che si deduce è quello rappresentato da uno spessore di sedimenti deposti in ambiente e dominio continentale di 60-80 m, interdigerati in giacitura suborizzontale al di sopra dei depositi di origine marina (in discordanza angolare per superficie erosiva) che rappresentano il substrato e costituiscono le strutture tettoniche sepolte legate all'orogenesi appenninica.

6. CARATTERIZZAZIONE GEOFISICA DEL SITO

a. Considerazioni generali

Al fine di caratterizzare il sottosuolo più approfonditamente dal punto di vista geofisico finalizzato allo studio di RSL, con l'individuazione dei profili di velocità delle onde di taglio ed i contrasti di impedenza sismica che condizionano il modo di amplificare delle onde elastiche nel terreno, sull'area di intervento, sono state condotte le seguenti prove geofisiche di caratterizzazione dinamica, sia in foro di sondaggio che di superficie:

- n. 1 prova di superficie di sismica passiva a stazione singola tipo HV con sensore a bassa frequenza (2Hz);
- n. 1 prova di superficie di sismica passiva in array bidimensionale ESAC.

Per una miglior definizione del profilo di velocità delle Onde di taglio V_s con la profondità si è provveduto ad utilizzare tecniche di elaborazione congiunta necessarie per ottenere il miglior risultato possibile data l'incertezza e l'indeterminazione di alcune delle tecniche sopra utilizzate..

Le tecnologie geofisiche utilizzate, data l'omogeneità stratigrafica dei siti, si ritengono sufficienti a caratterizzare adeguatamente il sottosuolo in condizioni monodimensionali. Le prove geofisiche, unitamente alle prove geognostiche di correlazione, hanno consentito di valutare l'omogeneità strutturale/geofisica delle aree, il posizionamento del bedrock sismico nonché le frequenze di risonanza del sito.

b. Indagini geofisiche

b1. Prova di superficie di sismica passiva a stazione singola tipo HV

La metodologia, chiamata anche tecnica di Nakamura (1989), è stata introdotta da Nogoshi e Igarashi (1971) sulla base degli studi di Kanai e Tanaka (1961). Questa tecnica si basa essenzialmente sul rapporto spettrale H/V di rumore ambientale (seismic noise) e permette di valutare gli effetti locali di sito. Si assume che i microtremori (il cosiddetto rumore di fondo registrabile in qualunque momento posizionando un sensore sismico sul terreno) consistano principalmente di un tipo di onde superficiali, le onde di Rayleigh, che si propagano in un singolo strato sovrastante su semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione al sito.

Per l'applicazione e l'interpretazione di questa tecnica è fondamentale una buona conoscenza dell'ingegneria sismologica combinata con un background di informazioni relative alle caratteristiche geologiche, geofisiche e geotecniche del sito. Questa metodologia presenta il vantaggio di poter essere adoperata pressoché ovunque, purché siano garantite l'assenza di forti vibrazioni indotte da attività umane nelle vicinanze del punto di misura. Il metodo è generalmente applicato per studi di microzonazione e per valutare la risposta sismica locale.

La tecnica HVSR è stata oggetto del progetto di ricerca SESAME (Site EffectS assessment using AMBient Excitations) ed a questo si rimanda per le linee guida della tecnica H/V spectral ratio (<http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/index.htm>) e fornisce quindi importanti informazioni sui terreni di indagine relativamente alle frequenze naturali e di risonanza.

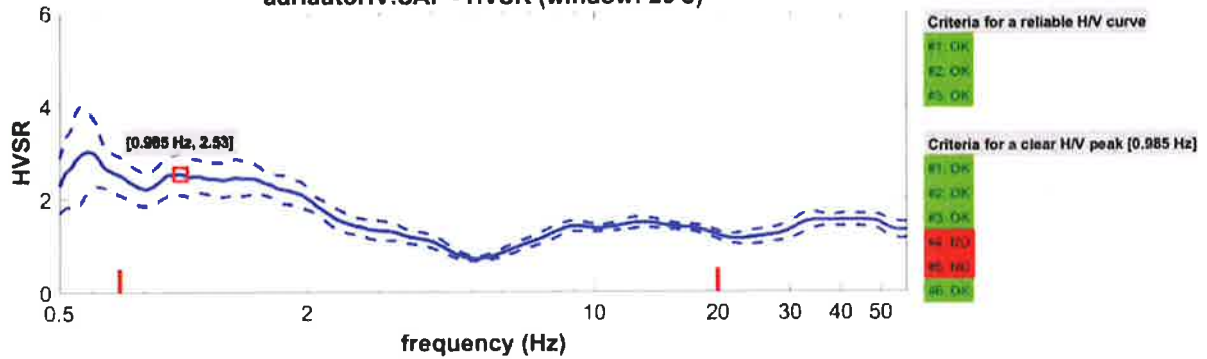
La misura di microtremore ambientale è stata effettuata per mezzo di un registratore sismico Gemini 2, con freq. propria 2 Hz, acquisitore a 24 bit, prodotto dalla ditta PASI srl.

Il registratore è composto da una terna di velocimetri, i quali trasmettono il segnale ad un sistema di acquisizione digitale a basso rumore. Lo strumento è stato posizionato correttamente (tramite bolla sferica e piedini regolabili) sul terreno; inizia l'acquisizione dei microtremori: i modi di vibrare del terreno vengono amplificati, convertiti in forma digitale, organizzati e salvati su una memoria digitale. Successivamente i dati vengono archiviati ed elaborati con sw WinMasw Acd 2020 in funzione delle specifiche tipologie di analisi e restituzione.

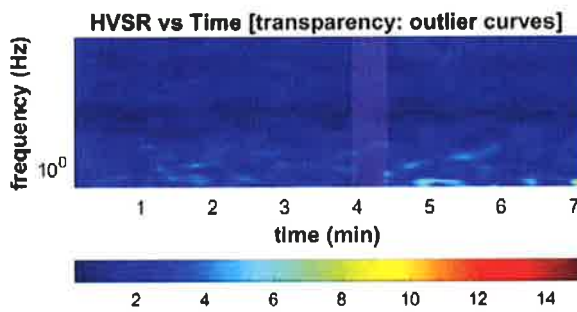
Le risultanze dell'elaborazione sono presentate mediante graficazione dei rapporti spettrali H/V e delle SINGLE COMPONENT SPECTRA, ovvero l'andamento delle singole componenti nelle tre direzioni (N-S_E-O_Verticale):

Strumento: Gemini2 - PASI Srl
 Inizio registrazione: 11/10/19 Fine registrazione: 11/10/19
 Nomi canali: NORTH-SOUTH; EAST-WEST; UP-DOWN
 Durata registrazione: 0h25'00". Analizzato 0h10'6" tracciato (selezione manuale)
 Freq. campionamento: 200 Hz
 Lunghezza finestre: 20 s
 Tipo di lisciamento: Triangular window
 Lisciamento: 10%

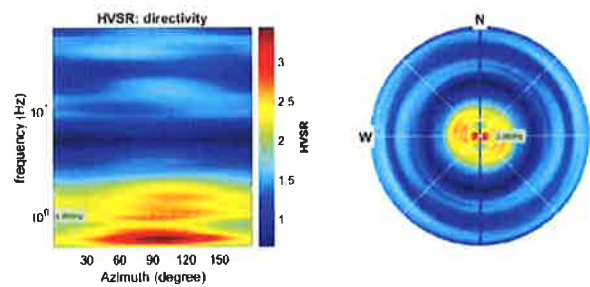
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE
adriautoHV.SAF - HVSr (window: 20 s)



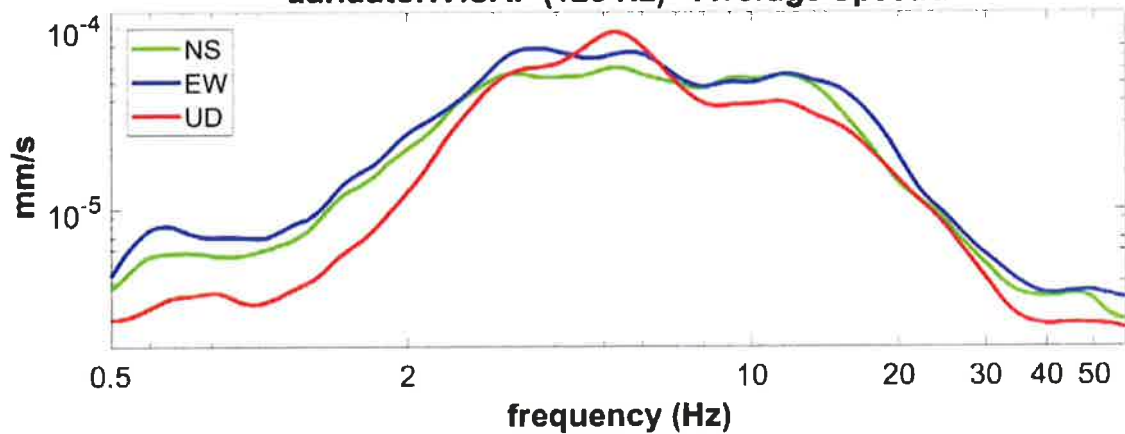
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI
adriautoHV.SAF (128 Hz) - Average Spectra



Secondo le linee guida SESAME, 2005.

<p><i>0.5-30.0Hz frequency range</i> Peak frequency (Hz): 1.0 (± 0.3) Peak HVSR value: 2.5 (± 0.4)</p>
--

Criteri per una curva H/V affidabile [Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]			
$f_0 > 10 / L_w$	$1.0 > 0.5$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$847 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$		OK	
Criteri per un picco H/V chiaro [Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]			
Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.3 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	3.3 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.5 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$			NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.326 < 0.148$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$1.114 < 2$	OK	

<p>L_w n_w $n_c = L_w n_w f_0$ f f_0 σ_f $\varepsilon(f_0)$ A_0 $A_{H/V}(f)$ f^- f^+ $\sigma_A(f)$ $\sigma_{\log H/V}(f)$ $\theta(f_0)$</p>	<p>lunghezza della finestra numero di finestre usate nell'analisi numero di cicli significativi frequenza attuale frequenza del picco H/V deviazione standard della frequenza del picco H/V valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0 ampiezza della curva H/V alla frequenza f frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$ frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$ deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$ valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$</p>
---	--

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$					
Intervallo di freq. [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

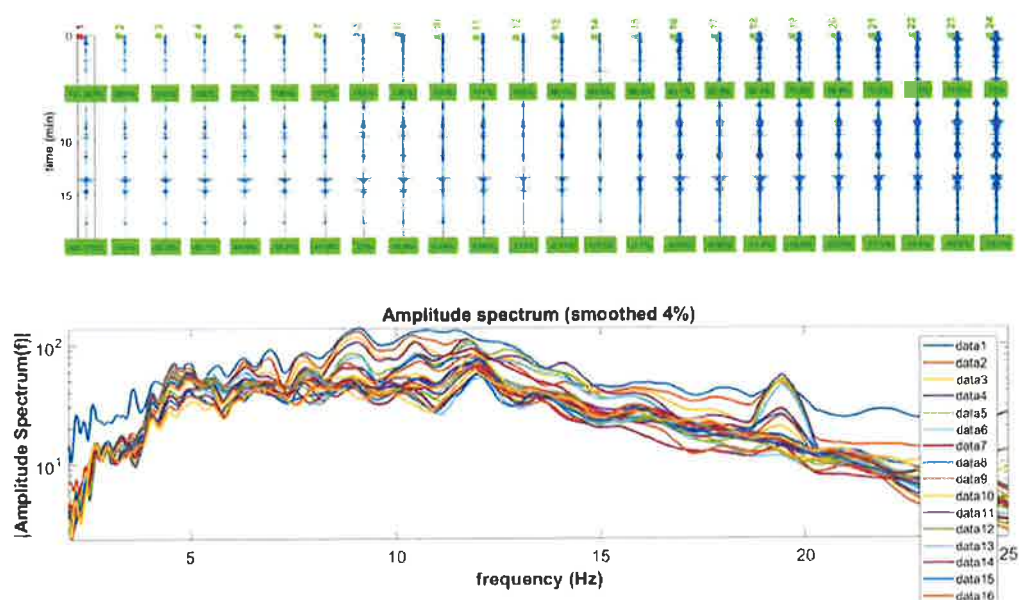
b2. Prove di superficie di sismica passiva in array bidimensionale ESAC

L'antenna sismica (seismic array) è una configurazione di sensori sismici distribuiti secondo geometrie bidimensionali variabili sull'area di indagine (Okada, 2003). Le registrazioni di rumore effettuate dai singoli sensori vengono combinate mediante una tecnica denominata ESAC (Okada, 2003) che mette in evidenza la coerenza di fase delle varie registrazioni. Se si utilizzano solo sensori verticali, la componente del segnale identificata da questo sistema di acquisizione risulta essenzialmente costituita dalla combinazione dei diversi modi di vibrazione delle onde di Rayleigh. In linea di principio, non esistono limitazioni alla profondità di esplorazione di questo metodo di analisi.

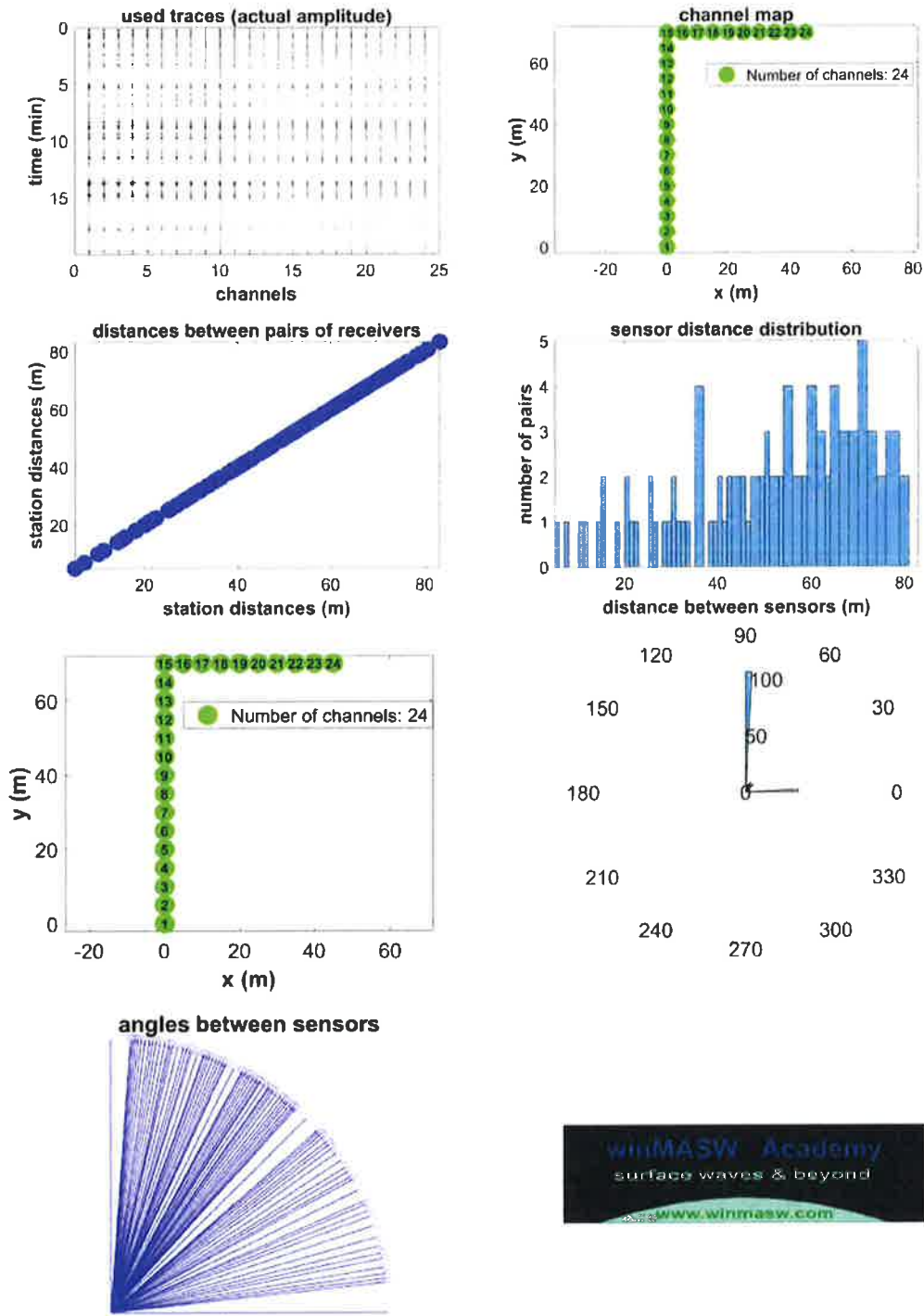
In realtà, le condizioni sperimentali e/o le caratteristiche strumentali impongono inevitabili vincoli. Si può assumere che massima profondità di esplorazione anche in condizioni ottimali sia dell'ordine di grandezza della diametro dell'array (da D a 2D circa). Anche la frequenza propria dei sensori utilizzati limita la profondità di esplorazione. In generale, per stendimenti con diametro di 50 metri e velocità delle onde S dell'ordine di qualche centinaio di metri al secondo l'uso di geofoni con frequenza propria dell'ordine di 4,5 Hz, risulta adeguato. Infine, anche la struttura di velocità del sottosuolo indagato può talora porre importanti limitazioni. Infatti, in presenza di forti variazioni di impedenza sismica in corrispondenza della transizione fra i sedimenti soffici superficiali e il basamento rigido, l'energia associata alle onde superficiali tende a concentrarsi nella parte più superficiale del terreno rendendo la curva di dispersione sostanzialmente insensibile alle caratteristiche del basamento.

Analisi onde Rayleigh (Config. spaziale ad array bidimensionale e frequenza di campionamento a 200 Hz)

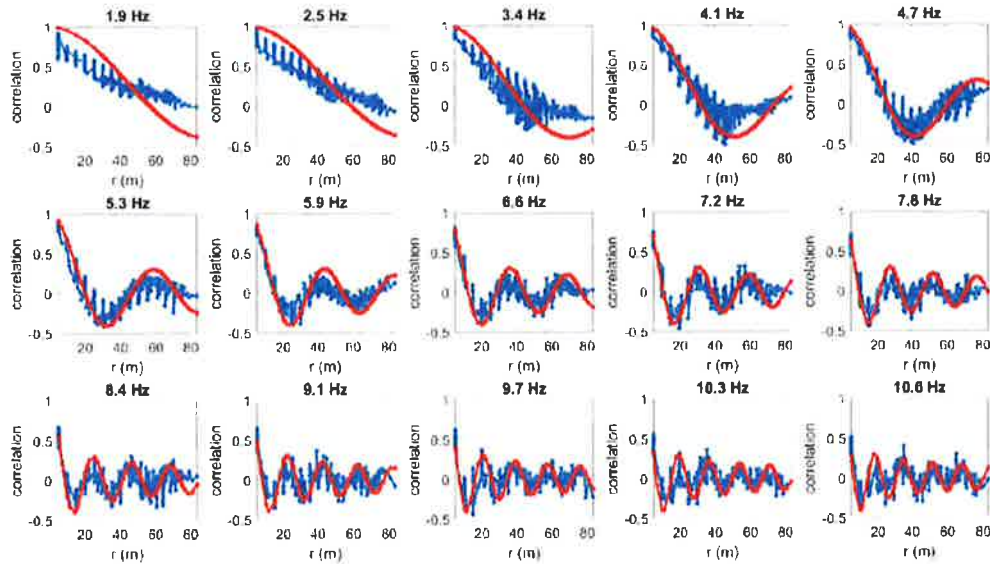
Analisi della dispersione delle onde di Rayleigh (velocità di fase) secondo la tecnica passiva ESAC, grazie alla quale è possibile delineare la curva di dispersione delle onde di Rayleigh.



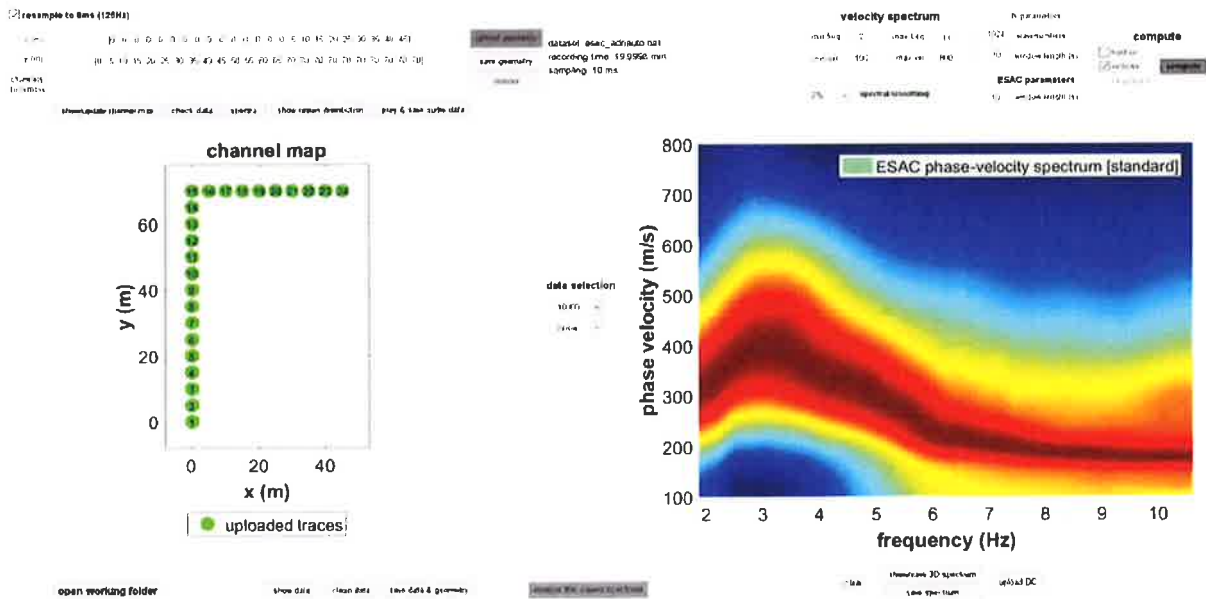
Controllo preliminare della qualità dei dati acquisiti.

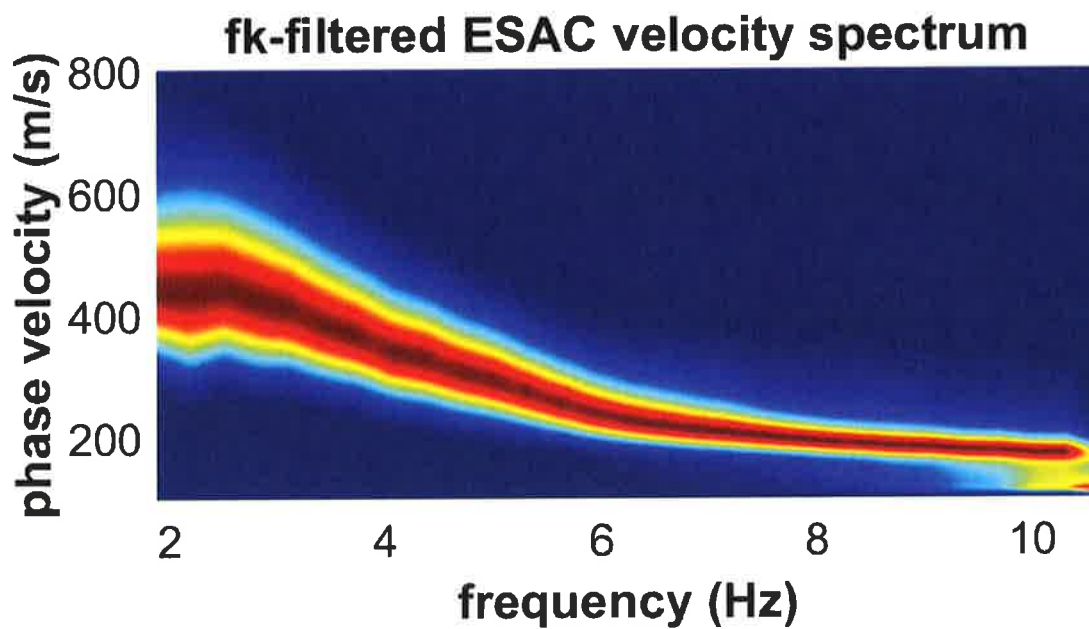


Da sinistra a destra: dati passivi multicanale (geofoni verticali HG da 4.5Hz), geometria dell'acquisizione e distribuzione della spaziatura dei canali utilizzati.



Coefficienti di correlazione tra le coppie di canali utilizzati per l'analisi ESAC per 15 frequenze (indicate) prese a campione.





Risultato finale riassuntivo dell'analisi ESAC: i colori riportano lo spettro di velocità con evidenziata la curva di dispersione effettiva filtrata.

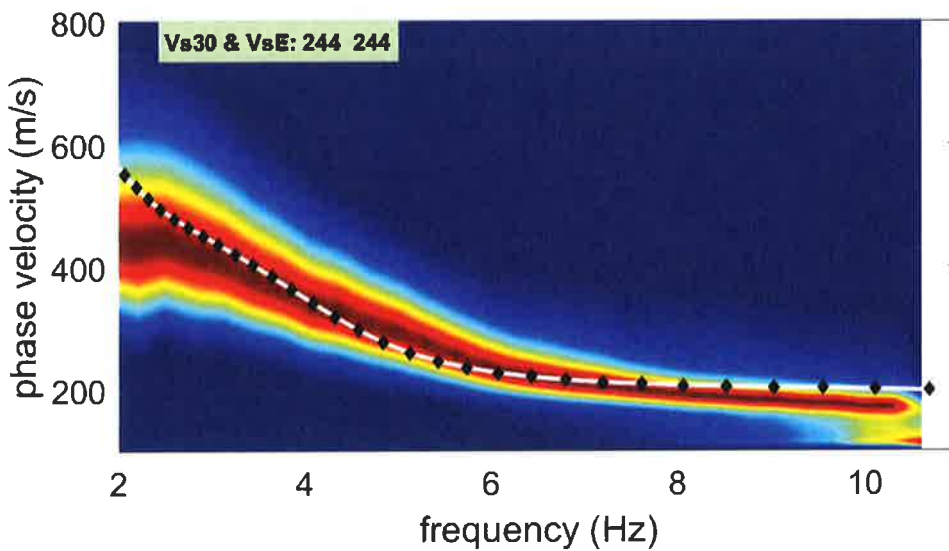
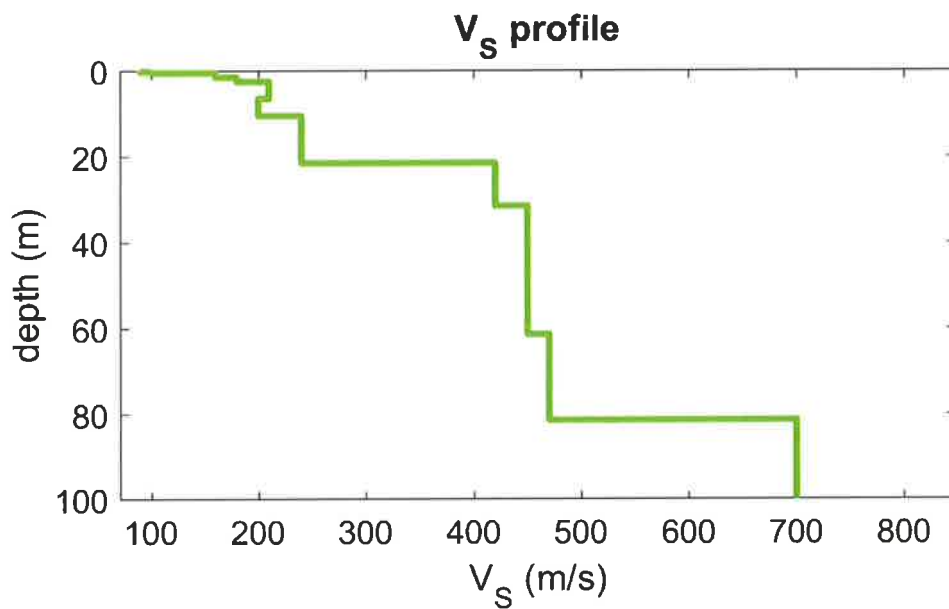
b3. Analisi congiunta prove ESAC+HV

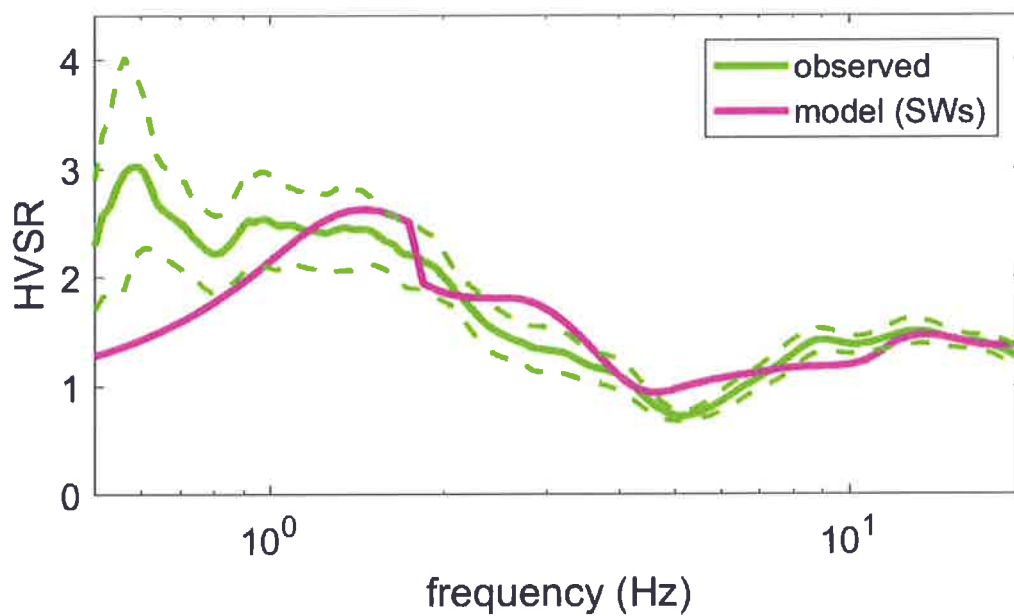
Sul sito di indagine sono state eseguite 1 acquisizioni HVSR ed 1 acquisizione ESAC.

L'analisi consiste nell'inversione congiunta (riportati i dati pertinenti al "minimum distance model") dei dati derivanti dalle singole indagini e dalla prova HVSR e dalla curva di dispersione effettiva derivante dall'analisi ESAC.

Relativamente al profilo di V_s con la profondità, abbiamo che:

- ESAC + HV





Mean model

Vs (m/s): 90, 100, 160, 180, 210, 200, 240, 420, 450, 470, 700, 800

Thickness (m): 0.3, 0.3, 1.0, 1.0, 4.0, 4.0, 11.0, 10.0, 30.0, 20.0, 40.0

VsEq /Vs30 (m/s): 244

PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE E LOCALE

a. Sismicità delle aree di interesse

L'appennino romagnolo è sinteticamente costituito da una catena principale e da una fascia marginale. La catena principale presenta uno stile tettonico ad ampie strutture (pieghe fagliate, accavallamenti, ecc) con dominante orientamento appenninico: la successione è continua dal Langhiano al Messiniano per oltre 3.000 mt di spessore e cioè dalla Formazione Marnoso-arenacea romagnola con passaggio da una sedimentazione torbiditica ad una di ambiente lagunare a sedimentazione chimica e meccanica.

L'intera area risulta delimitata a SE dalla coltre della Val Marecchia, dove due megacolte gravitative si estendono trasversalmente fino alla pianura: la prima della fine del Tortoniano presenta numerosi ed ingenti esotici derivanti dai complessi "tosco-emiliani"; la seconda, originatasi per smembramento della prima dopo il sollevamento del paleoappennino interno nel pliocene inferiore, segue la regressione deposizionale (depositi marini per lo più di fase regressiva in Val Marecchia dello spessore anche di 1.700 mt) della successione pliocenica deposta sull'alloctono. Ad essa succedono le ultime spinte e faglie ad orientamento appenninico trasversale che hanno variamente dislocato i contatti della colata sia con il paleoautoctono che con il mesoautoctono e neoautoctono. Segue il ciclo pliocenico medio-superiore marino anch'esso con fase regressiva dominante e spessori anch'essi notevoli ed un successivo ciclo pleistocenico inferiore marino sul cui tetto poggiano i depositi continentali-litorali del ciclo pleistocenico inferiore medio, dagli spessori variabili tra 50 e 1.200 m.

Gli eventi orogenetici che hanno portato alla successione stratigrafica attuale sono riconducibili alle spinte tettoniche, avvenute secondo direzione SW-NE, di origine appenninica e che hanno determinato, verso la fine del Miocene l'innalzamento dei depositi pliocenici. La linea di costa era collocata abbastanza vicino al limite di spartiacque che corrispondeva alla linea di cerniera tra aree in sollevamento e aree subsidenti.

Tale linea era interrotta da faglie trasversali ad andamento antiappenninico (oggi ancora sismicamente attive) su cui si sono impostati gli assi di erosione fluviale di cui si segnalano, per il territorio comunale, quelli del Fiume Uso, Marecchia, Ausa e Marano. Pertanto si può dire che il bordo appenninico esterno e l'attuale fascia costiera sono il prodotto del sistema ad embrici e accavallamenti che ha regolato e regola il sollevamento e lo sviluppo della catena appenninica. Secondo le recenti ricerche dell'AGIP (Pieri e Groppi, 1981) la Pianura Padana meridionale costituisce una stretta fascia allungata parallelamente ai rilievi del bordo appenninico entro cui si è verificato un consistente accumulo di depositi soprattutto in periodo neogenico. La presenza di strutture tettoniche sepolte drappeggiate ed annegate da tali depositi, storicamente ipotizzata, è stata accertata attraverso la realizzazione di "sezioni sismiche". Lungo il bordo appenninico esterno e la fascia di pianura antistante, gli elementi strutturali accatastati vengono a formare un prisma di accrezione che per la complessa interferenza tra l'attività tettonica e quella sedimentaria assume i caratteri di una pronunciata fossa tettonica (Scandone, 1980) denominata "Avanfossa appenninico-adriatica" (Ori, Roveri e Vannoni, 1986).

L'intrecciarsi di complessi meccanismi sedimentari e tettonici hanno dato luogo alla formazione di bacini alla fronte e sulla parte retrostante degli accavallamenti traslando con essi all'interno della avanfossa.

Il risultato finale è quello di un consistente impilamento di sedimenti caratteristici della successione sedimentaria plio-peistocenica.

Allo stato attuale la normativa di riferimento in materia sismica risulta essere il D.M. 17 gennaio 2018 recante "norme tecniche per le costruzioni", entrato in vigore a partire dal 22 marzo 2018.

La classificazione sismica dei comuni della regione Emilia-Romagna introdotta ai sensi del punto 3 dell'Allegato 1 dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 maggio 2003, prevede che il territorio nazionale sia suddiviso in quattro zone sismiche, caratterizzate da quattro diversi valori di accelerazione (a_g).

Nell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 aprile 2006 "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formulazione degli elenchi delle medesime zone" all'allegato 1.A" sono individuate quattro zone sismiche orizzontale massima convenzionale su suolo di tipo A, ai quali ancorare lo spettro di risposta elastico.

Ciascuna zona è individuata mediante valori di accelerazione massima al suolo a_g , con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, riferiti a suoli rigidi caratterizzati da $V_{s30} > 800 \text{ m/s}$ secondo lo schema seguente. I valori di accelerazione delle quattro zone sismiche sono maggiormente specificati rispetto all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 secondo la schema di seguito proposto (tabella 7.1):

Tabella 7.1: Valori di accelerazione al suolo a_g

Zona	Accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni (a_g) – OPCM 3519	Accelerazione orizzontale massima convenzionale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico (a_g) – OPCM 3472
1	$0.25 < a_g \leq 0.35 \text{ g}$	0.35 g
2	$0.15 < a_g \leq 0.25 \text{ g}$	0.25 g
3	$0.05 < a_g \leq 0.15 \text{ g}$	0.15 g
4	$\leq 0.05 \text{ g}$	0.05 g

Di seguito si riportano le classificazioni della sismicità dei comuni interessati dagli interventi in base alle vecchie normative e ovviamente anche in base alla nuova e vigente classificazione proposta dall'OPCM 3274/2003 e s.m.i (tabella 7.2).

Tabella 7.2: Classificazione della sismicità del comune e valore dell'accelerazione al suolo a_g

Comune	Classificazione sismica (Decreti fino al 1984)	Classificazione sismica OPCM 3274/2003	a_g
Santarcangelo	II	2	0.25 g

b. Sismicità storica delle aree di intervento

Nella tabella 7.3 sono riportati i dati storici del comune di Santarcangelo di Romagna, definiti nel Gruppo di lavoro CPTI (2015) Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2015 (CPTI15), INGV, Bologna con aggiornamento DBMI15 (dicembre 2015) reperibile all'indirizzo web <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>

Effetti		In occasione del terremoto del								
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
6-7	1672	04	14	15	45		Riminese	92	8	5.59
5	1875	03	17	23	51		Costa romagnola	144	8	5.74
NF	1904	11	17	05	02		Pistoiese	204	7	5.10
4	1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
3	1911	02	19	07	18	3	Forlivese	181	7	5.26
3	1911	03	20	15	47		Forlivese	25	6	5.09
5	1911	03	26	13	51		Riminese	9	5	5.04
3	1914	10	27	09	22		Lucchesia	660	7	5.63
3-4	1915	01	13	06	52	4	Marsica	1041	11	7.08
7	1916	05	17	12	50		Riminese	132	8	5.82
6	1916	06	16	01	27		Riminese	17	6	4.82
7	1916	08	16	07	06	1	Riminese	257	8	5.82
3	1917	04	26	09	35	5	Alta Valtiberina	134	9-10	5.99
4	1918	11	10	15	12	2	Appennino forlivese	187	9	5.96
4-5	1919	06	29	15	06	1	Mugello	565	10	6.38
3	1920	09	07	05	55	4	Garfagnana	750	10	6.53
3-4	1924	01	02	08	55	1	Senigallia	76	7-8	5.48
4	1930	10	30	07	13		Senigallia	268	8	5.83
4	1953	12	14	07	11	0	Appennino forlivese	48	5-6	4.70
4	1961	05	08	22	45	5	Forlivese	40	5	4.37
NF	1969	08	09	09	20	5	Appennino tosco-romagnolo	33	5	4.20
NF	1970	09	26	16	42	2	Cesenate	18	4-5	3.93
4	1980	11	23	18	34	5	Irpinia-Basilicata	1394	10	6.81
NF	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04
NF	1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
NF	1993	11	07	23	21	1	Cesenate	36	4-5	3.95
NF	1993	11	09	13	46	2	Cesenate	28	4-5	3.93

NF	📄	1997 09 26 00 33 1	Appennino umbro-marchigiano	760	7-8	5.66
4	📄	1997 09 26 09 40 2	Appennino umbro-marchigiano	869	8-9	5.97
NF	📄	1999 01 25 22 45 5	Appennino forlivese	97	5	4.36
NF	📄	2000 05 06 22 07 0	Faentino	85	5	4.08
NF	📄	2000 05 08 12 29 5	Faentino	126	5	4.67
NF	📄	2000 05 10 16 52 1	Faentino	151	5-6	4.82
3-4	📄	2000 08 01 02 34 3	Montefeltro	84	5-6	4.27
NF	📄	2001 11 26 00 56 5	Casentino	211	5-6	4.63
NF	📄	2002 11 02 10 57 4	Ferrarese	79	4	4.21
NF	📄	2003 12 07 10 20 3	Forlivese	165	5	4.18
NF	📄	2006 10 21 07 04 1	Anconetano	287	5	4.21

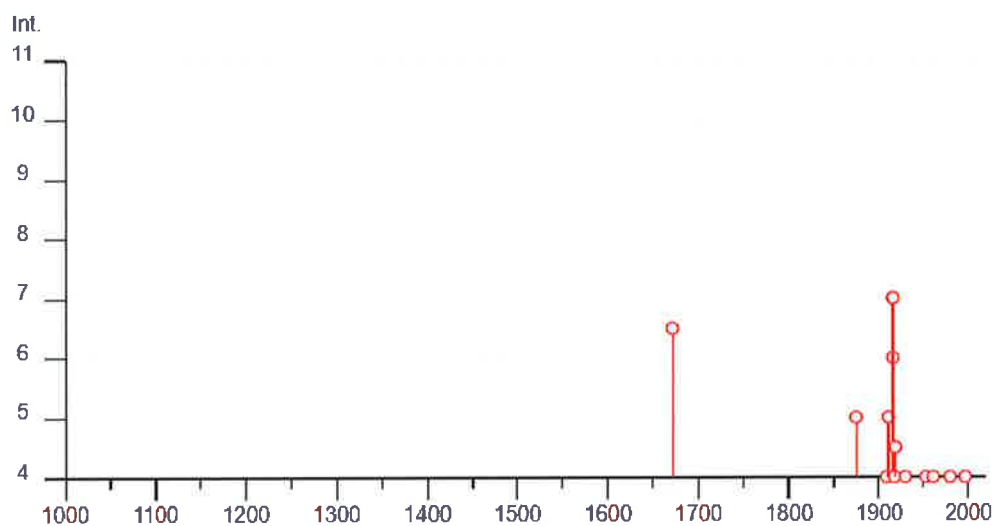


Tabella 7.3: Storia sismica del comune di Santarcangelo di Romagna (Rn).

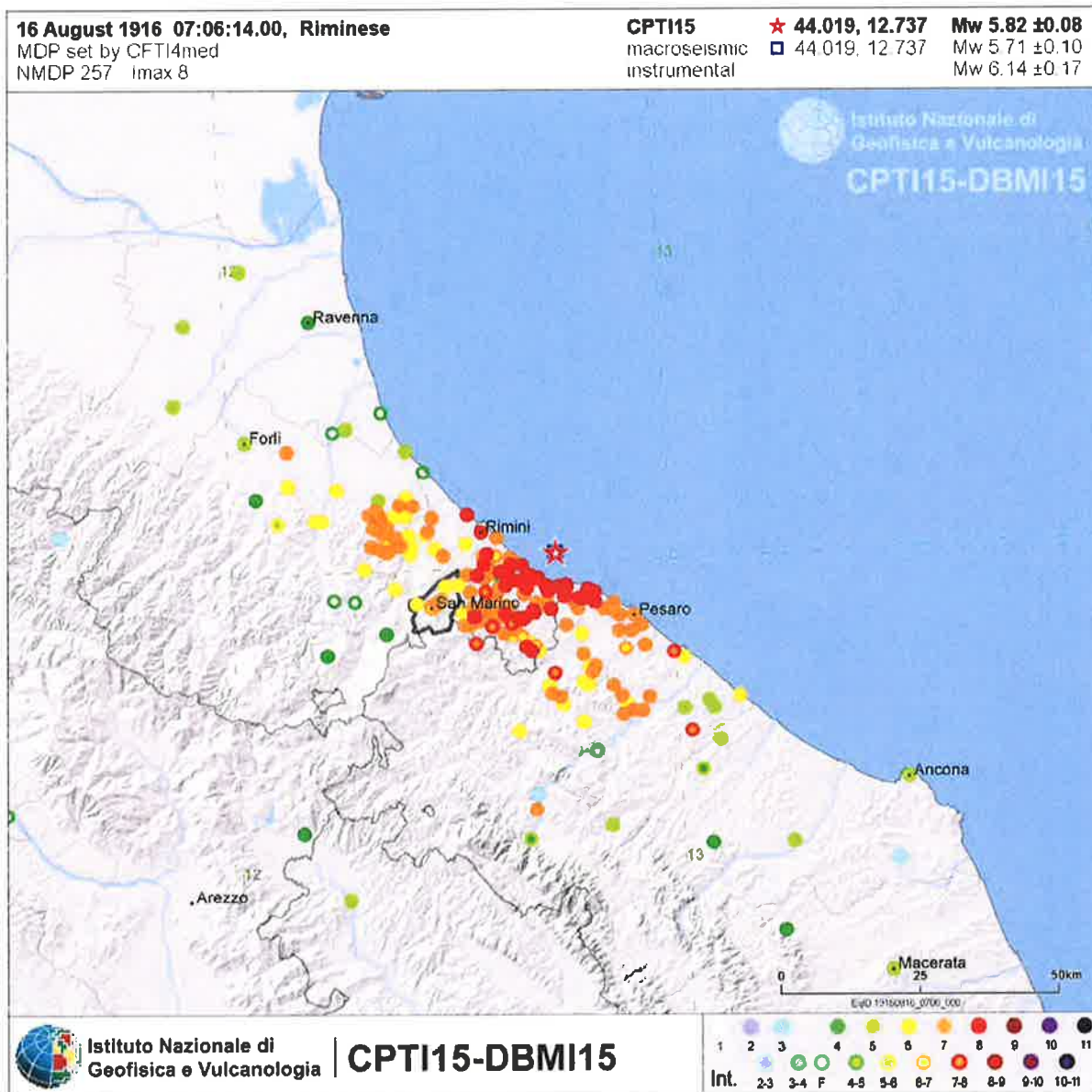


Figura 7.1: Cartografia storica in cui si evidenzia la distribuzione delle intensità relative all'evento sismico di riferimento.

Sulla scorta di tali cataloghi nonché di più approfondite informazioni storico-scientifiche e di studi su modelli geodinamici e crostali l'INGV ha sviluppato un database delle sorgenti sismogenetiche attive denominato DISS3, contenente potenziali fonti per i terremoti più grandi di 5,5 M in Italia e nelle aree circostanti:

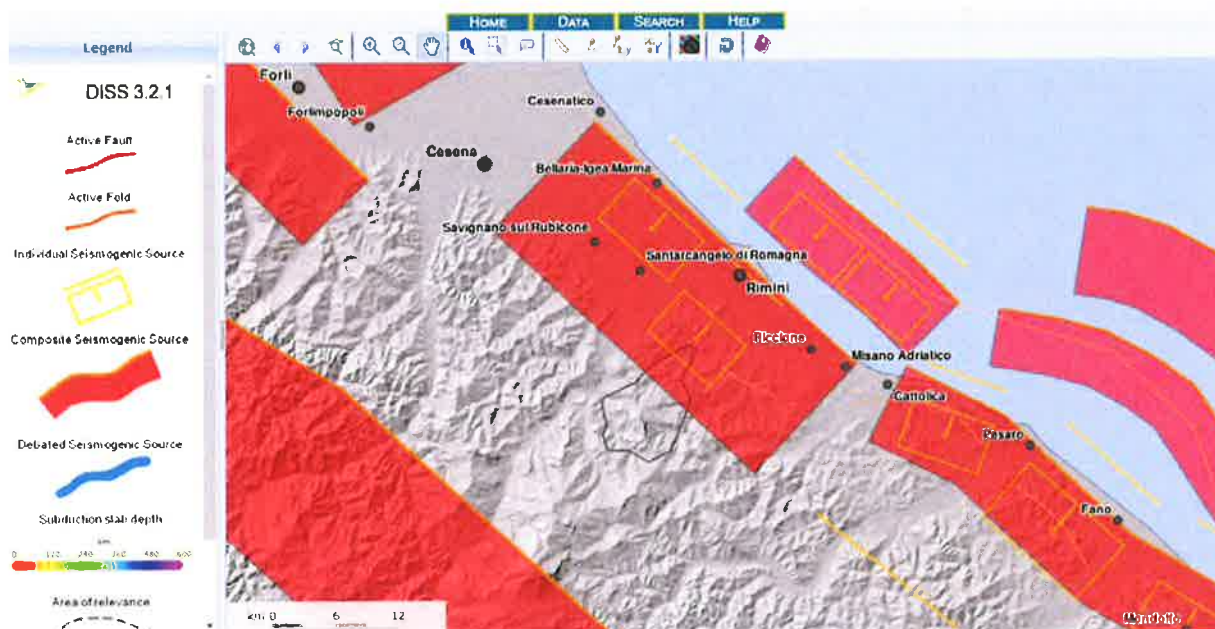


Figura 7.2: Stralcio cartografico con distribuzione regionale degli eventi e delle sorgenti sismogenetiche

In particolare, il territorio di Santarcangelo ricade nell'area della sorgente sismogenica composta ITCSo39 Riminese onshore, che secondo il DISS Working Group (2015), è capace di generare terremoti $M_w=5,9$ ed in prossimità della sorgente sismogenetica ICSO30 Riminese offshore che secondo il DISS Working Group (2015), è capace di generare terremoti $M_w=6,1$

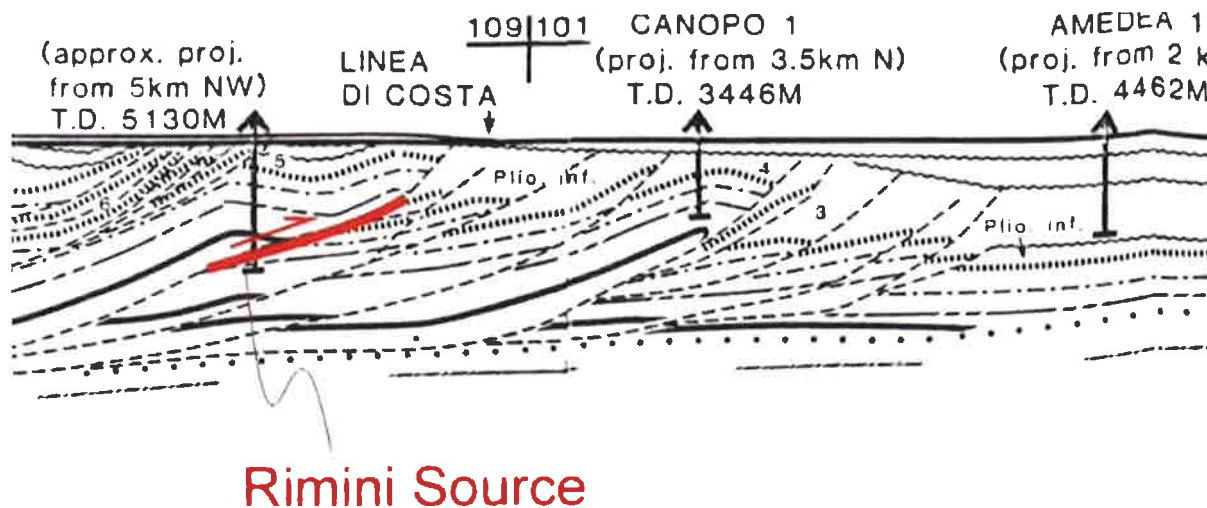
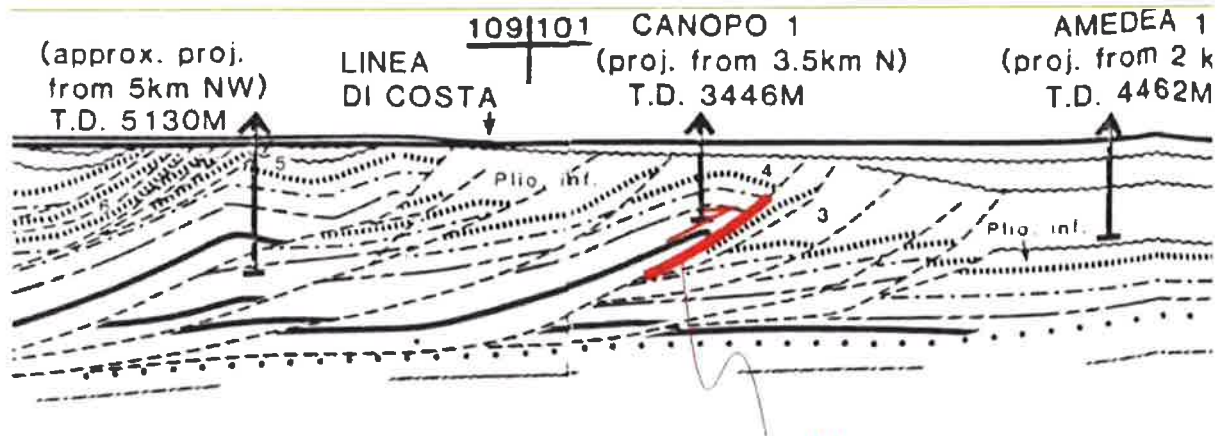


Figura 7.3: Sorgente sismogenetica ITC039 - Riminese "on-shore" proiettata su Sezione Amedea-M.te.Amiata di Bally et al. [1986].



Rimini offshore North Source

Figura 7.4: Sorgente sismogenetica ITC030 - Riminese "off-shore" proiettata su Sezione Amedea-M.te.Amiata di Bally et al. [1986].

c. Individuazione della pericolosità sismica del sito

Di seguito si riportano i dati salienti per la definizione della pericolosità sismica del sito che sono stati inseriti nel foglio di calcolo "Spetti NTC v. 1.03" scaricabile dal sito del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (<http://www.infrastrutture.gov.it/consuplp/>).

FASE 1 - Individuazione della pericolosità del sito

FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO

Ricerca per coordinate

LONGITUDINE: 12.43426 LATTUDINE: 44.071022

Ricerca per comune

REGIONE: Emilia-Romagna PROVINCIA: Rimini COMUNE: Rimini

Elaborazioni grafiche

Grafici spettri di risposta

Variabilità dei parametri

Elaborazioni numeriche

Tabella parametri

Nodi del reticolo intorno al sito

km 7.5

18743 18744

-7.5 7.5 km

18905 18906

-7.5

Reticolo di riferimento

Controllo sul reticolo

Sito esterno al reticolo

Interpolazione su 3 nodi

Interpolazione corretta

Interpolazione

media ponderata

FASE 2 - Scelta della strategia di progettazione

FASE 2. SCELTA DELLA STRATEGIA DI PROGETTAZIONE

Vita nominale della costruzione (in anni) - V_N info

Coefficiente d'uso della costruzione - c_U info

Valori di progetto

Periodo di riferimento per la costruzione (in anni) - V_R info

Periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (in anni) - T_R info

Stati limite di esercizio - SLE	SLO - $P_{VR} = 81\%$	45
	SLD - $P_{VR} = 63\%$	75
Stati limite ultimi - SLU	SLV - $P_{VR} = 10\%$	712
	SLC - $P_{VR} = 5\%$	1462

Elaborazioni

Grafici parametri azione ➔

Grafici spettri di risposta ➔

Tabella parametri azione ➔

Strategia di progettazione

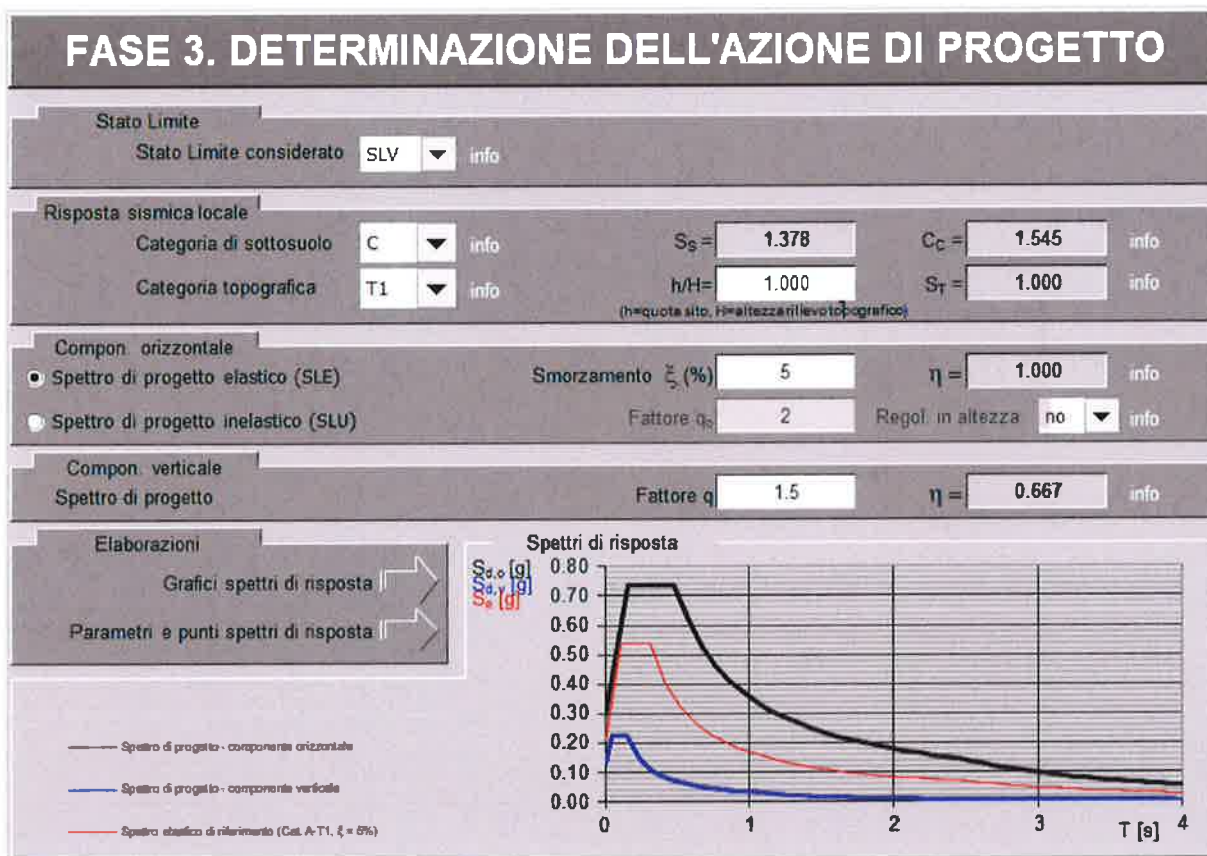
LEGENDA GRAFICO

-----□----- Strategia per costruzioni ordinarie - - - - ■ - - - - Strategia scelta

STATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_c^* [s]
SLO	45	0.064	2.445	0.282
SLD	75	0.082	2.486	0.284
SLV	712	0.215	2.489	0.310
SLC	1462	0.281	2.476	0.321

Tabella 3.4: Valori dei parametri a_g , F_o , T_c^* per i periodi di ritorno T_R associati a ciascuno Stato Limite.

FASE 3 – Determinazione dell'azione di progetto



e. Risposta sismica locale (RSL)

e1. Premessa

Per il sito di indagine è stato effettuato lo studio dell'analisi di risposta sismica locale (RSL) finalizzata alla valutazione dell'azione sismica in superficie.

Tale analisi costituisce lo studio di "riferimento" del sito in esame, i cui risultati sono stati conseguiti opportunamente nei confronti delle SLV per strutture ordinarie (Classe III).

Si ricorda che le norme NTC2018 al Paragrafo 3.2.2 recitano: "Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, VS. I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità VS per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2.....".

Dal punto di vista strettamente fisico, per analisi di risposta sismica locale si intende la valutazione quantitativa delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza subite da un moto sismico, relativo ad una formazione rocciosa di base (R), attraversando gli strati di terreno sovrastanti fino alla superficie (S).

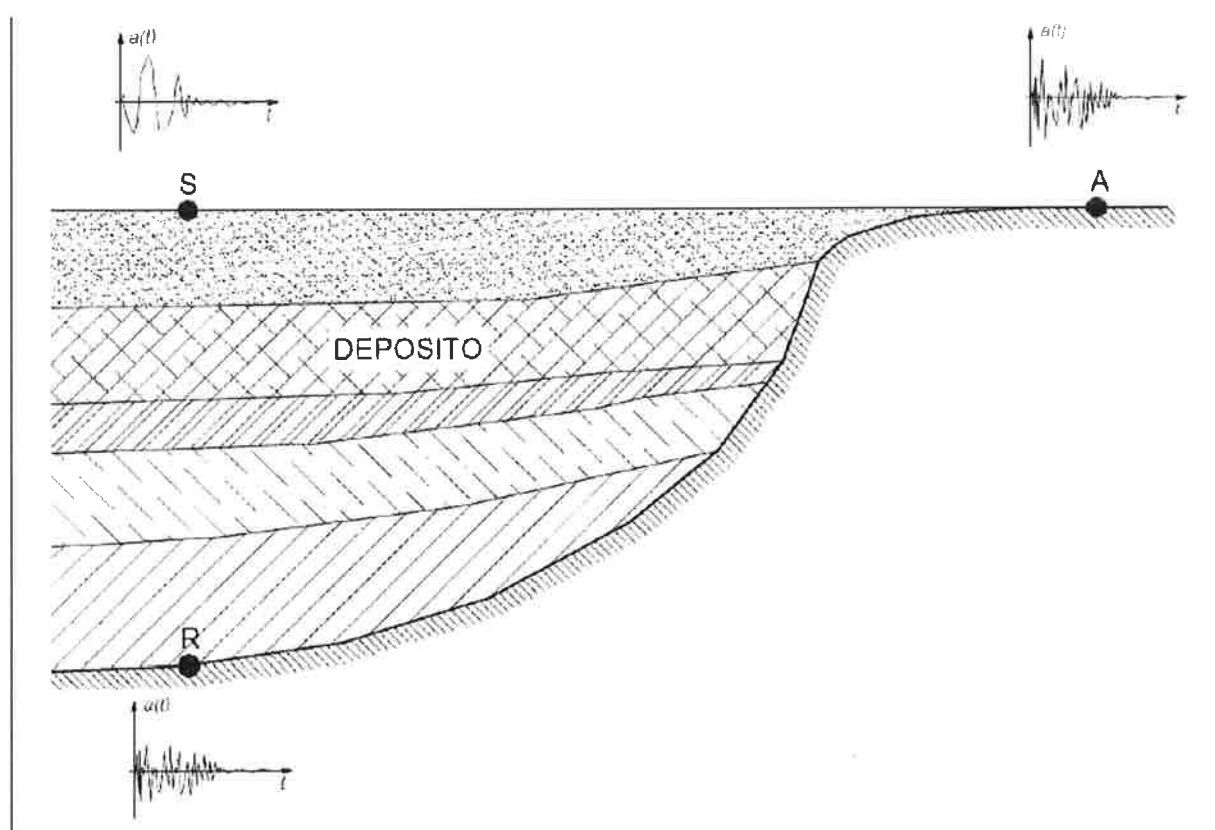


Figura 7.6: Schema di riferimento per la valutazione della risposta sismica locale.

Dal punto di vista tecnico, è forse più significativa una valutazione alternativa di tale fenomeno, cioè quella che assume come moto sismico di riferimento quello relativo ad un ipotetico (o reale) affioramento della formazione rocciosa di base (A). La valutazione quantitativa della risposta sismica locale può quindi effettuarsi sulla base del confronto tra le diverse grandezze rappresentative del moto sismico alla superficie del terreno e quello di riferimento (roccia di base o affiorante), nel dominio del tempo o delle frequenze. Nel dominio del tempo un parametro spesso utilizzato è il fattore di amplificazione:

$$FA = \frac{a_{max,S}}{a_{max,A}}$$

dove $a_{max,S}$ rappresenta l'accelerazione massima registrata sulla superficie del deposito e $a_{max,A}$ l'accelerazione massima sulla roccia affiorante. Tale fattore può risultare maggiore o minore dell'unità identificando un effetto di amplificazione o di smorzamento. Il fattore di amplificazione così definito però ha il limite di non descrivere l'effetto di "filtraggio" esercitato dal deposito nei confronti del moto sismico di riferimento, ma si limita a descriverne soltanto gli effetti di amplificazione in termini di ampiezza. Operando nel dominio delle frequenze, un parametro spesso utilizzato ed in grado di superare i limiti del fattore di amplificazione è la cosiddetta funzione di trasferimento:

$$H(f) = \frac{F_S(f)}{F_A(f)}$$

dove $F_S(f)$ ed $F_A(f)$ sono entrambe funzioni complesse della frequenza e rappresentano rispettivamente lo spettro di Fourier del moto in superficie al deposito e lo spettro di Fourier del moto su roccia affiorante. Entrambe i termini del rapporto sono funzioni complesse e pertanto anche il loro rapporto (funzione di trasferimento) risulta una funzione complessa; è utile far riferimento al modulo di tale funzione (spettro di ampiezza) detto *funzione di amplificazione*:

$$A(f) = |H(f)|$$

Dal punto di vista fisico tale funzione è in grado di indicare quali componenti del moto sismico (in termini di frequenza), rispetto al moto di riferimento, sono state amplificate ed in che rapporto e quali componenti sono state smorzate. Tuttavia, è necessario osservare che è lecito applicare il principio di sovrapposizione degli effetti, e quindi le trasformate di Fourier, solo se la risposta meccanica del terreno è governata da leggi costitutive di tipo lineare. In tali ipotesi, la funzione di amplificazione è una proprietà della geometria del sito e delle caratteristiche meccaniche dei materiali che lo costituiscono.

Operando nel dominio delle frequenze, nota la funzione di trasferimento, è possibile ottenere, mediante un'operazione detta di *convoluzione*, il moto in superficie a partire dal moto di riferimento.

$$F_S(f) = H(f) F_A(f)$$

Questo significa che il moto in superficie ottenuto è fortemente condizionato dal contenuto in frequenza del moto di riferimento, il quale a sua volta è caratterizzato da contenuti in frequenza dipendenti da

meccanismo di sorgente, magnitudo e percorso di propagazione. Si osservi inoltre, che la risposta meccanica di un sottosuolo reale non è affatto lineare e pertanto la funzione di trasferimento non può essere univoca, ma dipendente dal livello deformativo raggiunto dal terreno e quindi dalle caratteristiche del moto sismico che lo attraversa. In altre parole, se l'energia del moto sismico che attraversa il deposito è bassa, il livello deformativo raggiunto sarà lieve e viceversa se l'energia del moto è elevata; nei due casi le funzioni di trasferimento risultano differenti.

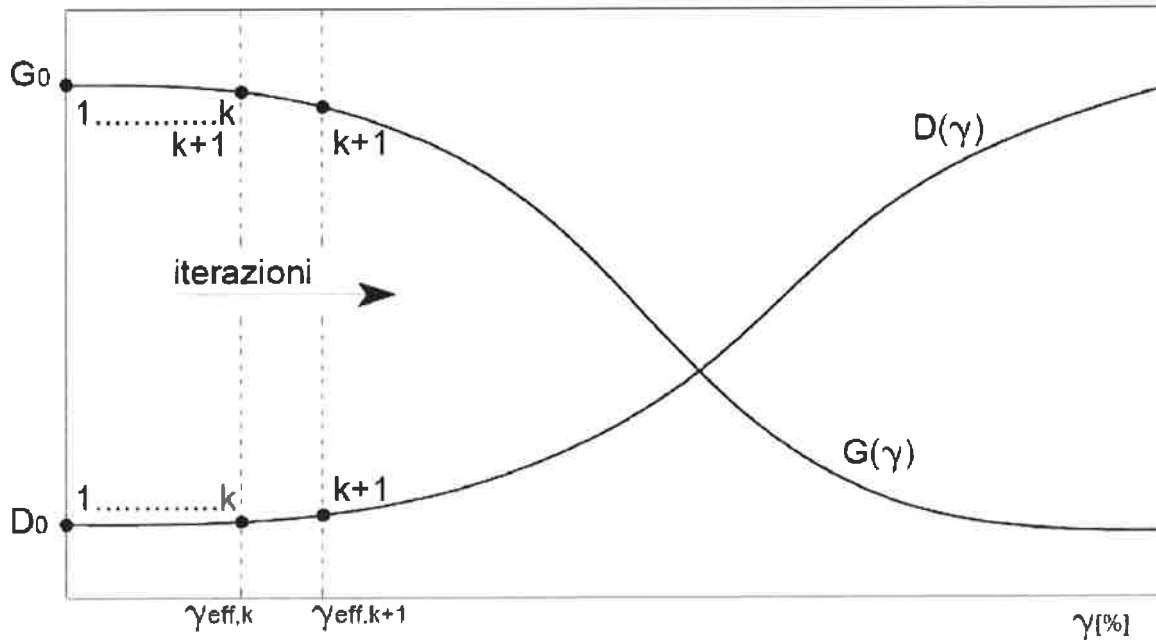
Pertanto, dovendo tener conto del comportamento non lineare del terreno, oltre che di aspetti legati alla topografia o alla morfologia sepolta, nei casi pratici è necessario ricorrere a delle procedure numeriche. Le possibili procedure utilizzate per tener conto del legame costitutivo non lineare nella soluzione dell'equilibrio dinamico del sistema di equazioni si distinguono in:

- *Analisi lineare equivalente* che consiste nell'esecuzione di una serie di analisi lineari complete che utilizzano dei parametri di rigidità e smorzamento secanti dei materiali, i quali vengono aggiornati fino al soddisfacimento di un certo criterio di convergenza;
- *Analisi non lineare incrementale* che consiste nell'integrazione passo-passo delle equazioni del moto ottenute nel rispetto dei legami costitutivi non lineari del terreno.

Mentre il primo schema di analisi si presta ad una soluzione sia nel dominio del tempo che nel dominio delle frequenze, il secondo schema di analisi ricerca necessariamente la soluzione nel dominio del tempo, vista l'impossibilità di applicare il principio di sovrapposizione degli effetti e quindi l'analisi di Fourier.

Lo schema lineare equivalente è largamente adottato nella pratica professionale in quanto rappresenta il giusto compromesso tra l'accuratezza dei risultati ottenuti e l'onere computazionale. Sono infatti numerosi i codici di calcolo che adottano tale schema indipendentemente che si tratti di un problema monodimensionale, bidimensionale o tridimensionale. L'algoritmo lineare equivalente può essere sintetizzato nei seguenti passi:

- Si assumono dei valori iniziali per i moduli elastici e per i rapporti di smorzamento viscoso dei materiali;
- A partire dal terremoto di riferimento, schematizzato come accelerogramma in ingresso, si integrano le equazioni del moto dinamico in modo da ottenere le deformazioni massime γ_{max} in ogni punto del modello;
- Dalle deformazioni massime si ottengono le deformazioni effettive mediante la relazione $\gamma_{eff} = \beta \gamma_{max}$ (β : rapporto di deformazione effettiva dipendente dalla magnitudo dell'evento sismico e variabile tra 0.5 e 0.7);
- Dalle deformazioni effettive, mediante le curve che descrivono la non linearità del terreno (Figura sottostante), vengono ottenuti i valori aggiornati dei moduli di taglio e dei rapporti di smorzamento viscoso;



- Con i valori dei parametri dei materiali così ottenuti si ritorna al punto 2. fintanto che non risulta soddisfatto il seguente criterio di convergenza:

$$|\gamma_{eff}^k - \gamma_{eff}^{k-1}| \leq toll$$

dove con l'indice k indica la generica iterazione e $toll$ un valore di tolleranza massimo assunto per le deformazioni a taglio.

L'analisi di RSL è stata condotta secondo i seguenti step:

e2. Ricostruzione del modello sismo-stratigrafico del sottosuolo.

La ricostruzione accurata del modello sismo e geologico-tecnico è desumibile dal paragrafo precedente, che ha permesso anche la ricostruzione del profilo di velocità delle onde di taglio fino al substrato di terreno molto rigido caratterizzato dalla velocità delle onde di taglio > 800 m/s. E' stato utilizzato un modello deterministico poiché nonostante le incertezze negli strati più profondi si ritiene che la ricostruzione del modello sismo stratigrafico sia congrua con le evidenze sperimentali misurate.

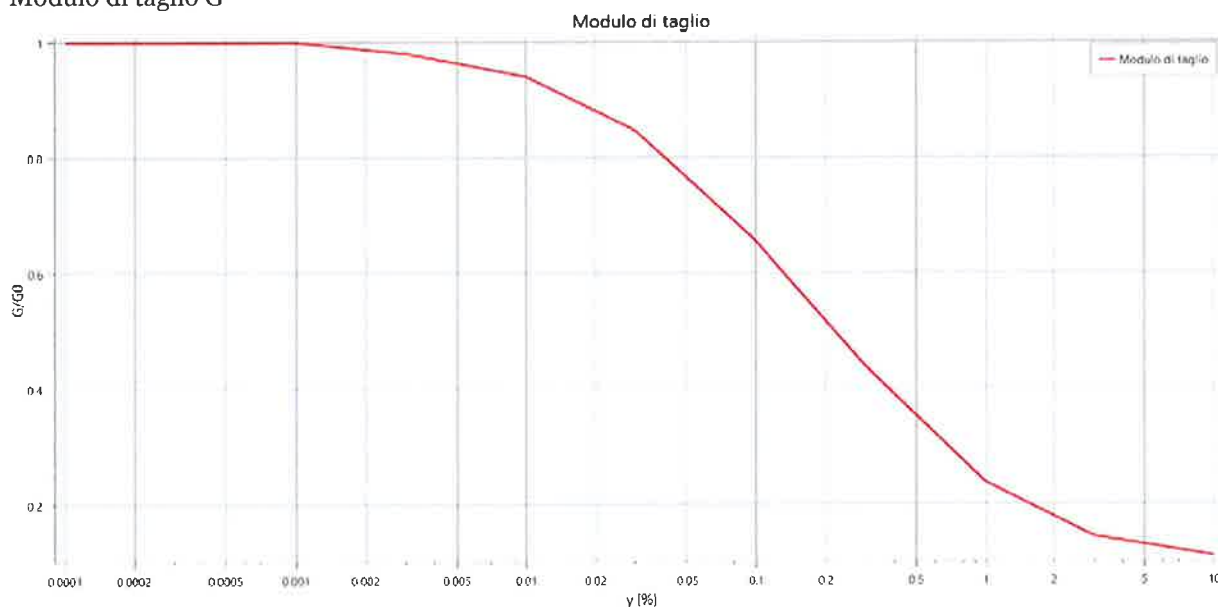
	Strato	Spessore [m]	ρ [Kg/m ³]	Vs [m/s]	Ni	Modello geotecnico
1	Strato (1)	10.00	1900.00	200.00	0.48	Clay Seed & Sun (1989)
2	Strato (2)	10.00	1900.00	240.00	0.45	Idriss (1990), Clay
3	Strato (3)	2.00	2000.00	260.00	0.40	Idriss (1990), Sand
4	Strato (4)	3.00	1900.00	245.00	0.40	Idriss (1990), Clay
5	Strato (5)	6.00	1900.00	320.00	0.40	Idriss (1990), Sand
6	Strato (6)	9.00	2000.00	380.00	0.40	Idriss (1990), Sand
7	Strato (7)	10.00	2000.00	420.00	0.40	EPRI (93), 50-120 ft
8	Strato (8)	15.00	2000.00	500.00	0.40	EPRI (93), 120-250 ft

Per definire il comportamento non lineare dei terreni di fondazione sottoposti a carichi ciclici si è fatto riferimento, non avendo effettuate indagini dinamiche di laboratorio, a curve disponibili in letteratura sulle stesse tipologie di materiali e, ove disponibili, prelevate anche alle stesse profondità.

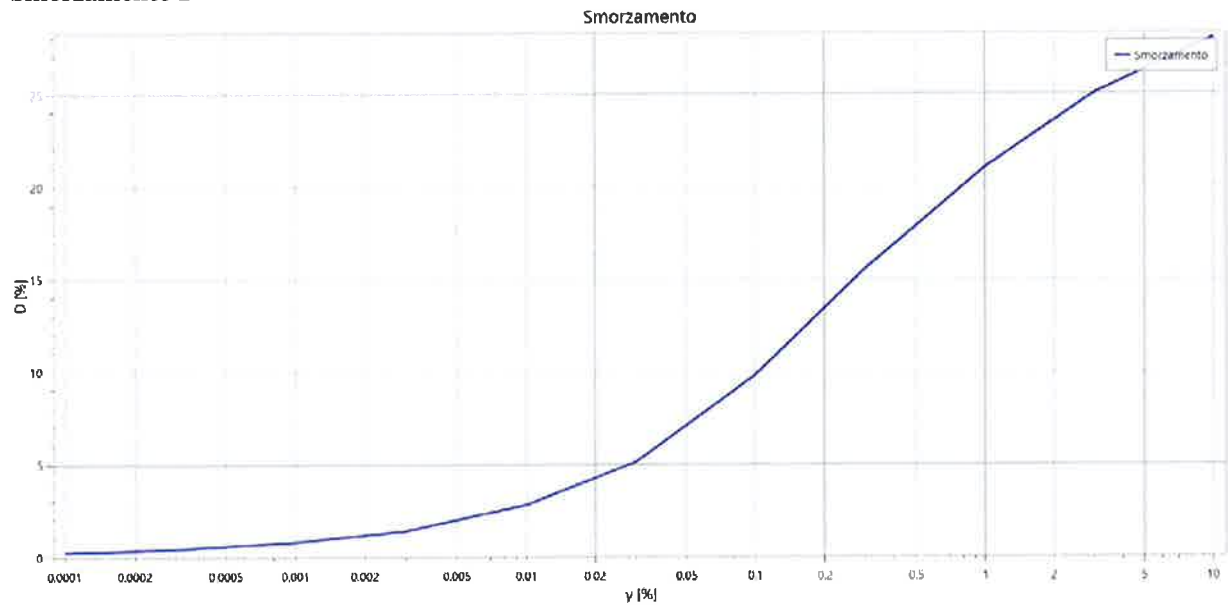
In particolare per gli strati in cui è stato discretizzato il terreno fino al bedrock sismico si sono utilizzate le seguenti curve di degrado dei materiali (in termini di Modulo di taglio e Fattore di smorzamento all'aumentare della deformazione):

Strato 1

Modulo di taglio G

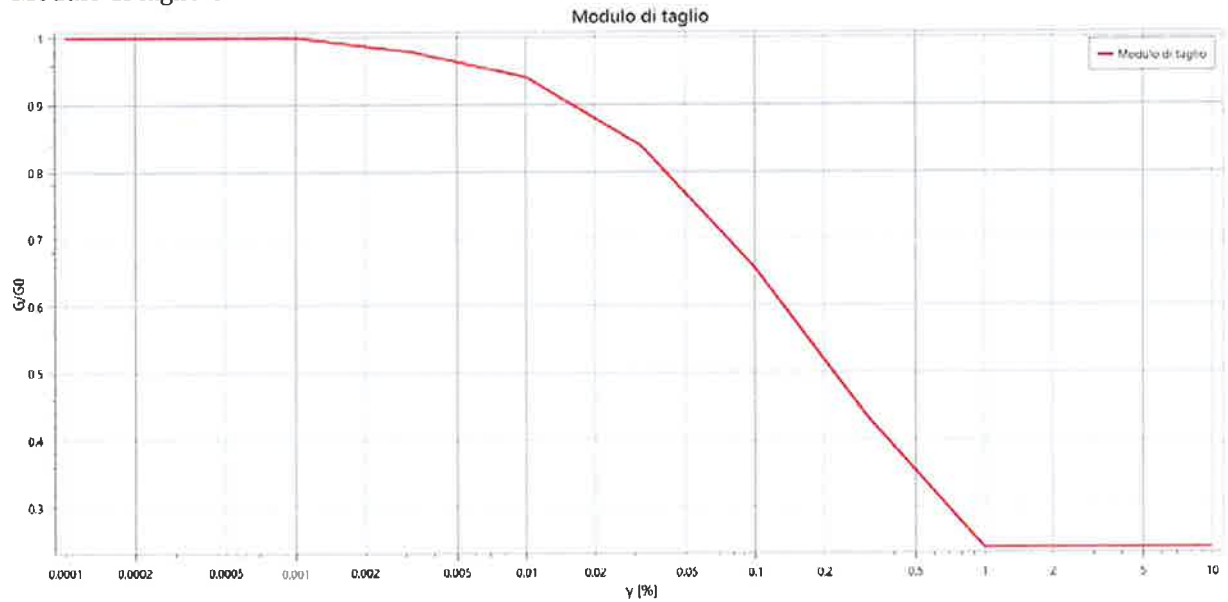


Smorzamento D

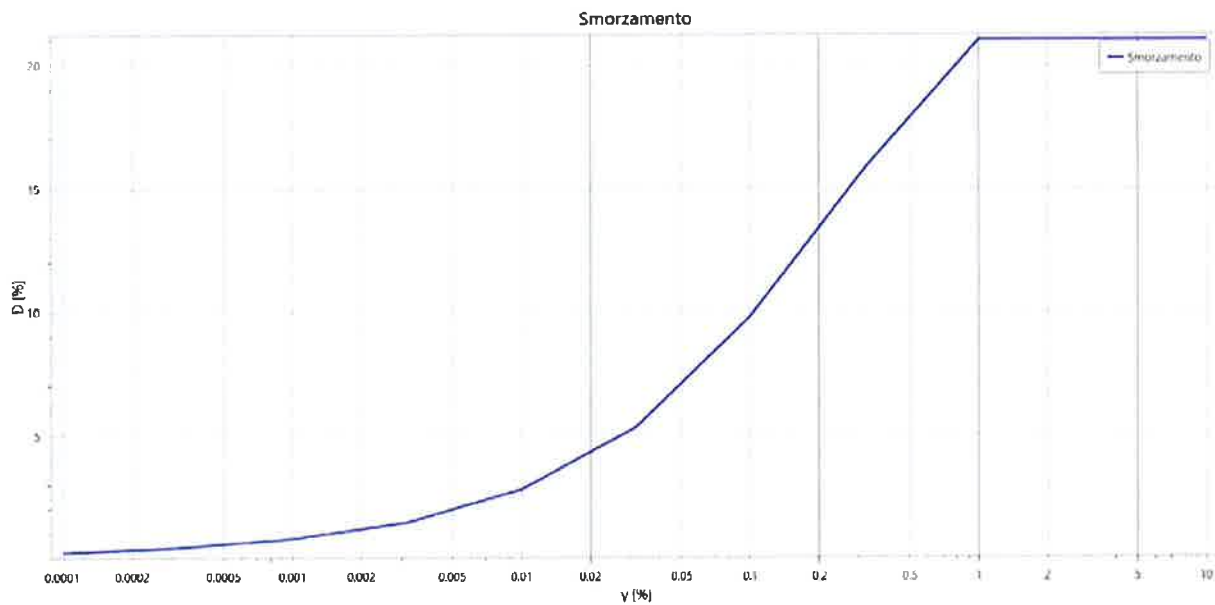


Strato 2

Modulo di taglio G

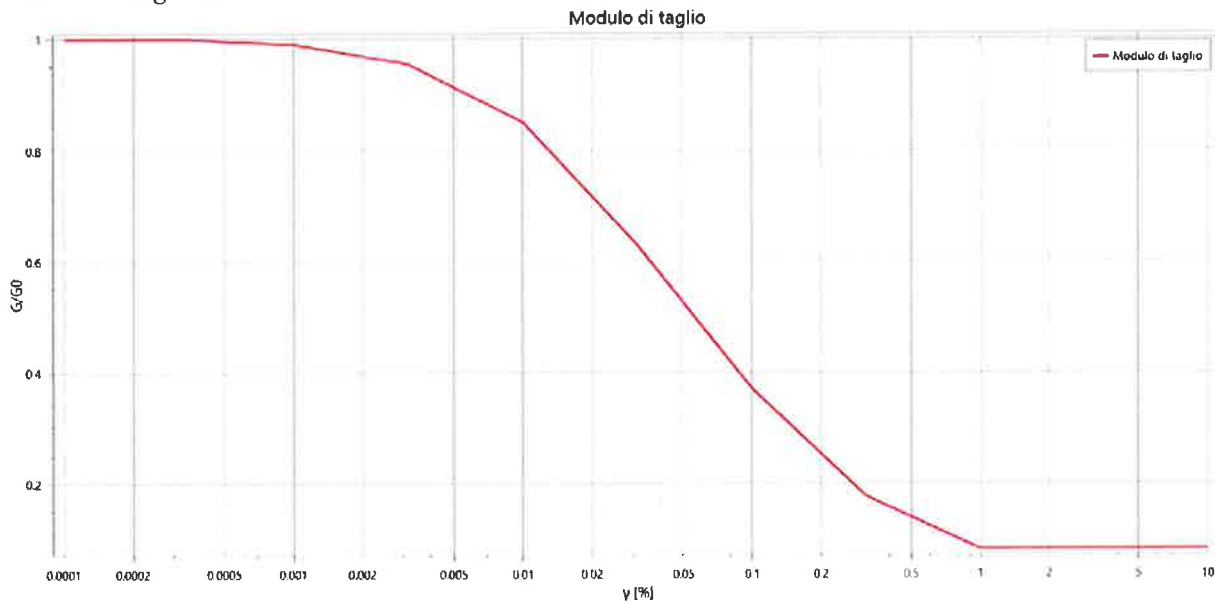


Smorzamento

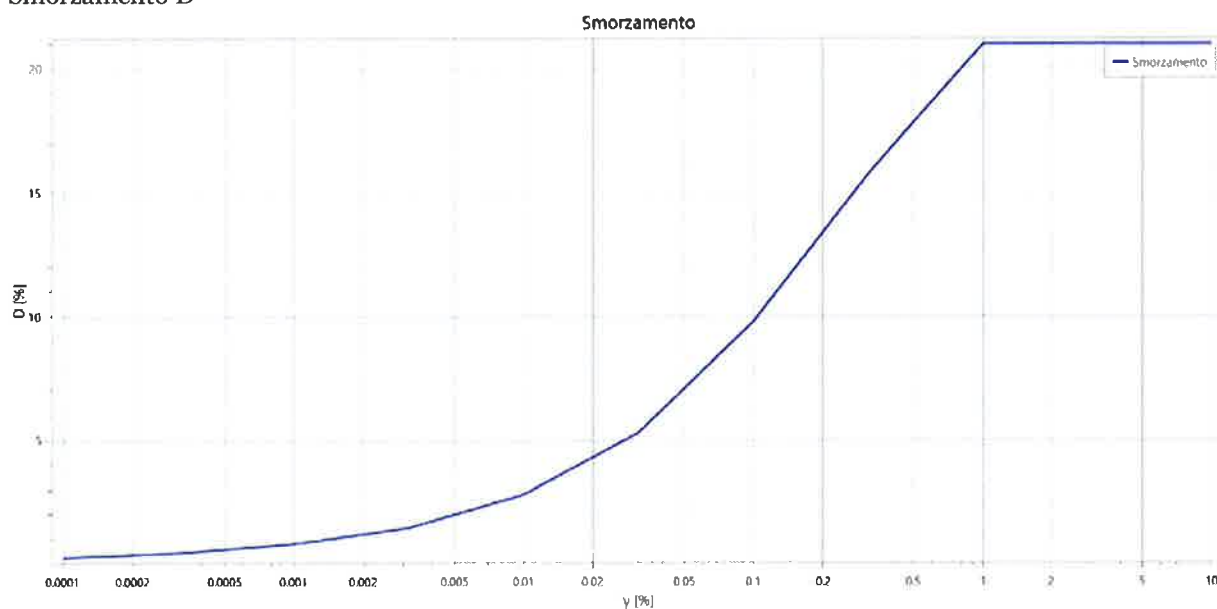


Strato 3

Modulo di taglio G

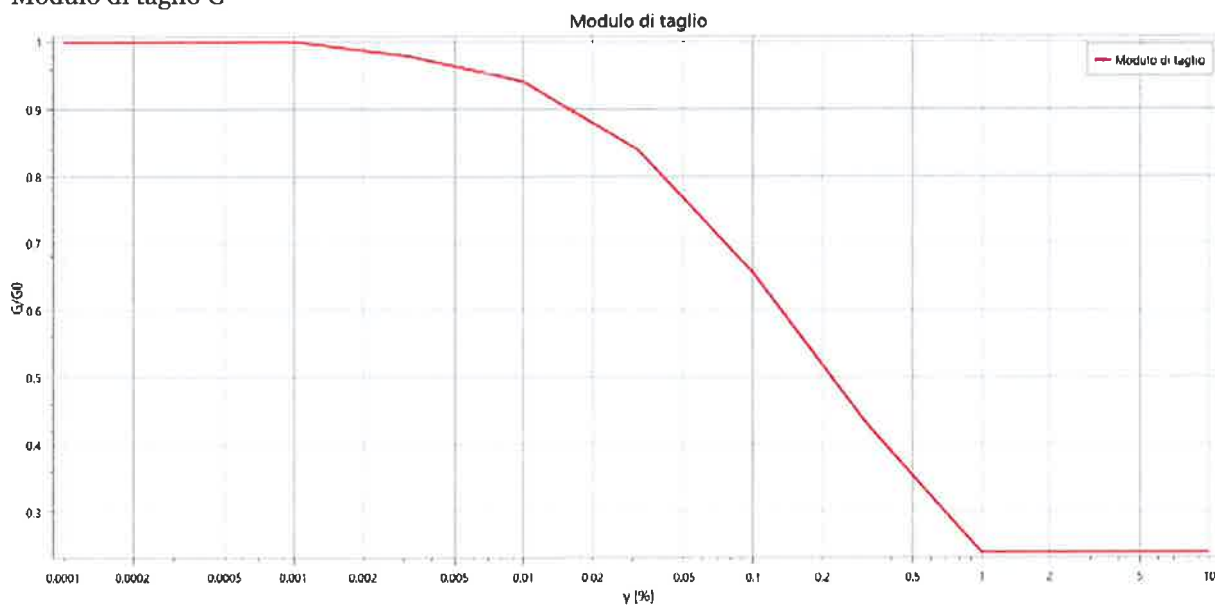


Smorzamento D

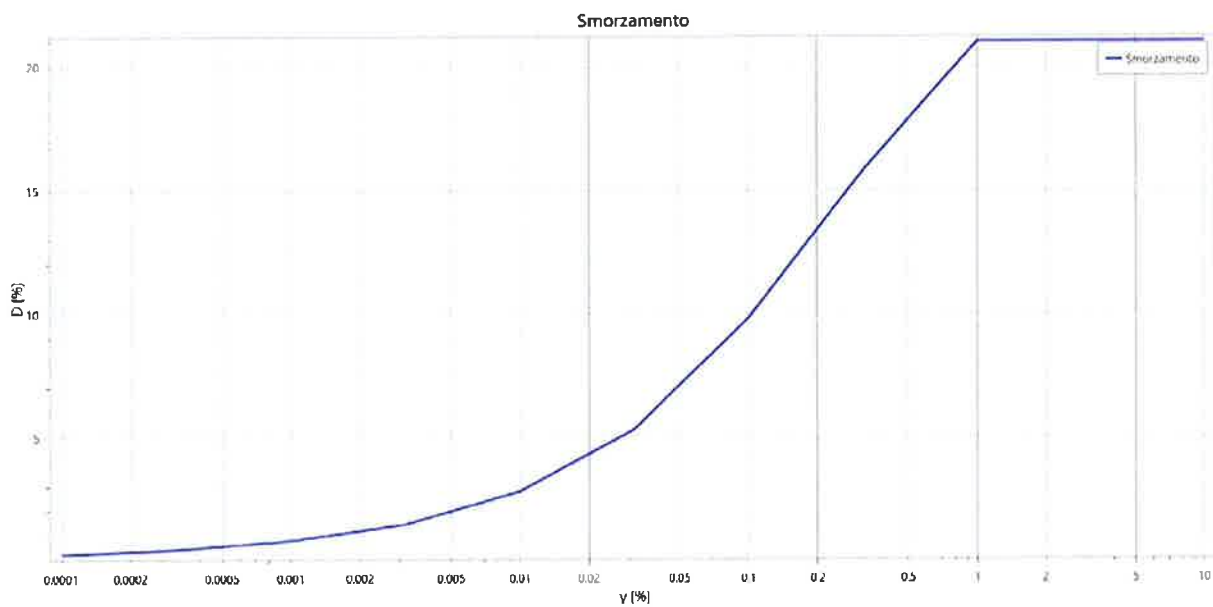


Strato 4

Modulo di taglio G

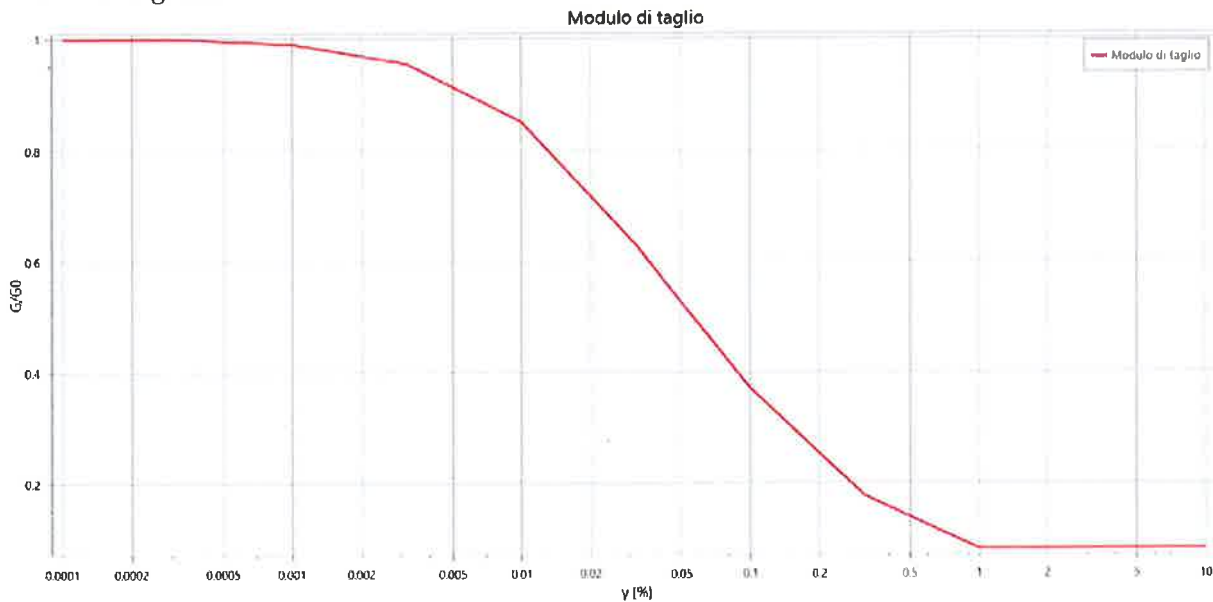


Smorzamento D

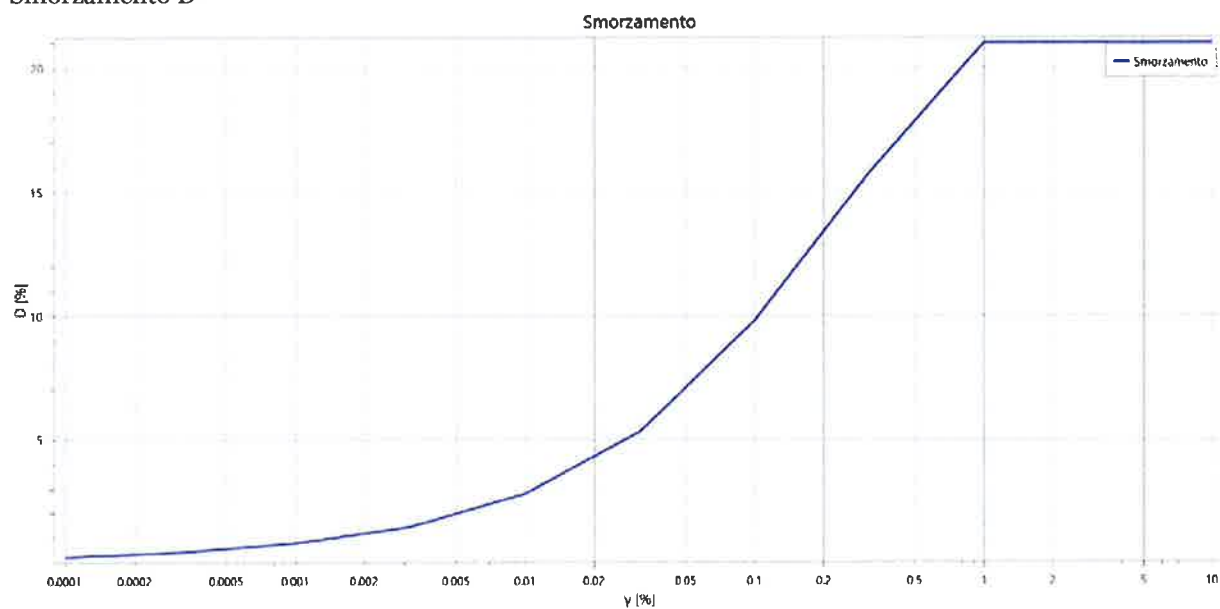


Strato 5

Modulo di taglio G

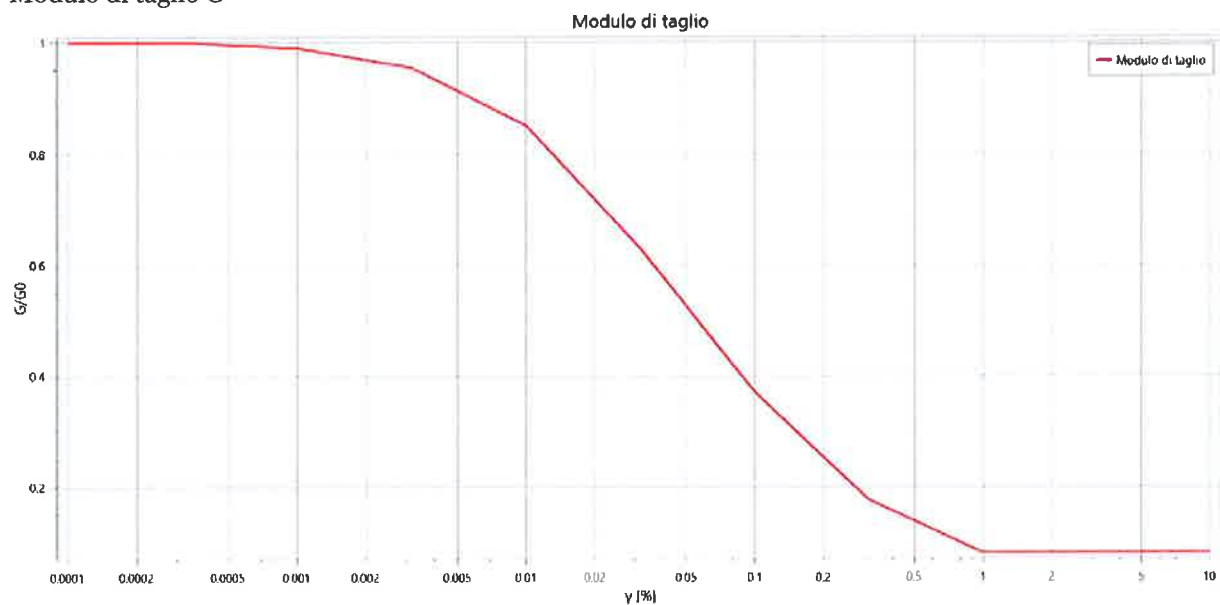


Smorzamento D

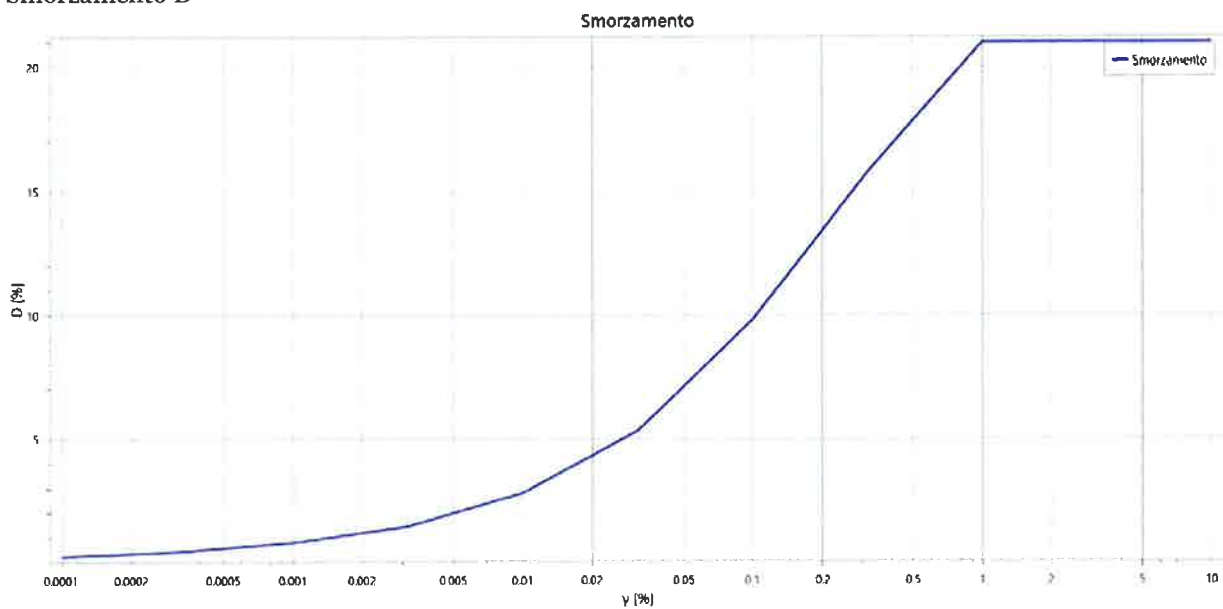


Strato 6

Modulo di taglio G

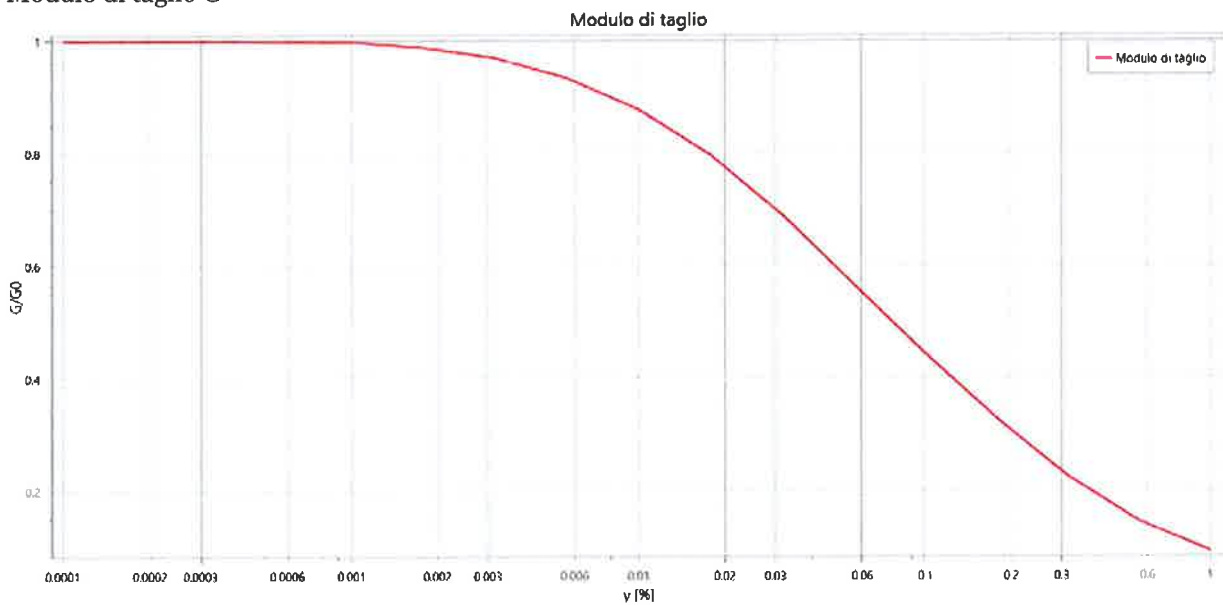


Smorzamento D

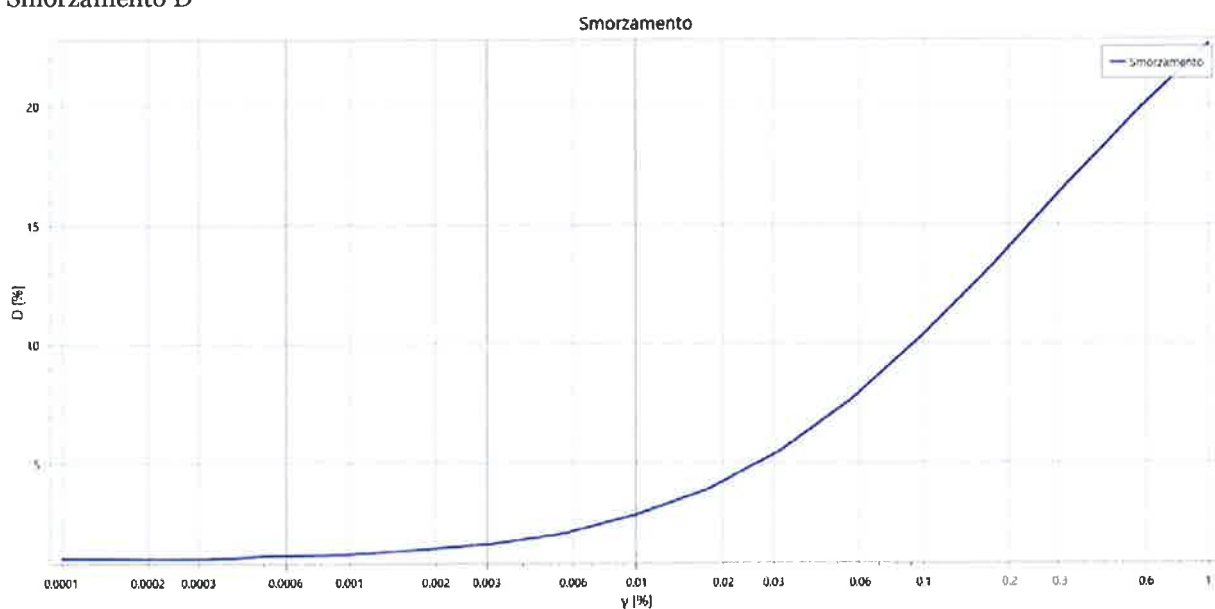


Strato 7

Modulo di taglio G

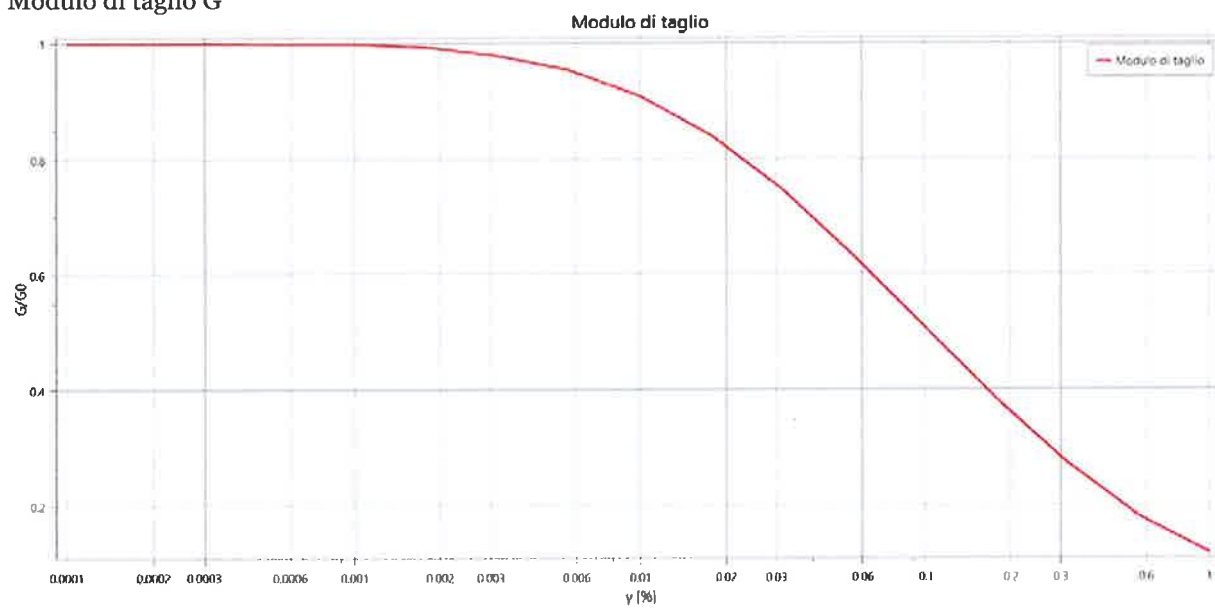


Smorzamento D

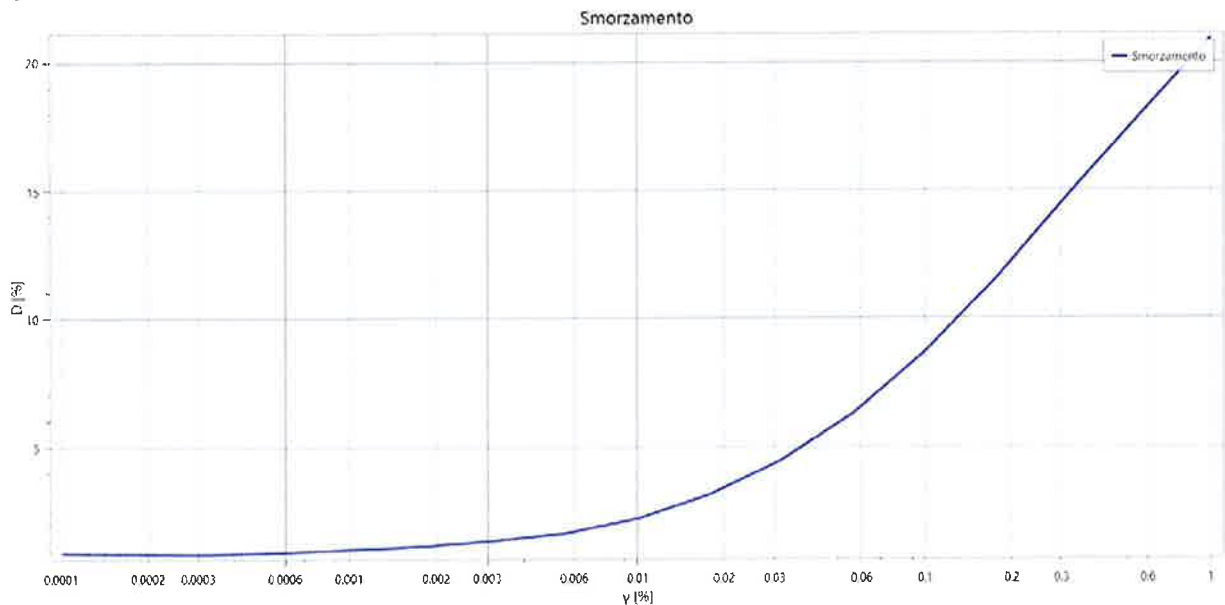


Strato 8

Modulo di taglio G



Smorzamento D



e3. Definizione del modello di calcolo

Il codice di calcolo adottato per le simulazioni numeriche è LSR2D - Stacec Srl. Tale codice consente di ottenere una soluzione numerica del problema di propagazione delle onde sismiche in un modello mono (1D) o bidimensionale (2D), il cui schema di analisi adottato è quello lineare equivalente nel dominio del tempo e le equazioni del moto vengono assemblate mediante il metodo degli elementi finiti nell'ipotesi di materiale viscoelastico in tensioni totali.

Nel modello bidimensionale (2D) il deposito viene discretizzato in una mesh di elementi di forma triangolare o quadrangolare, consentendo una efficace modellazione della variazione geometrica del contatto deposito-basamento, così come delle irregolarità della superficie topografica e dei contatti stratigrafici.

La scelta della griglia di calcolo rappresenta un punto fondamentale dell'analisi in quanto da essa dipende l'accuratezza della soluzione. In generale è possibile affermare che tanto più è fitta la mesh tanto più sarà accurata la soluzione, tuttavia una mesh troppo fitta fa aumentare notevolmente gli oneri computazionali; per contro una mesh troppo grossolana si traduce in un filtraggio delle componenti di alta frequenza poiché le piccole lunghezze d'onda non possono essere adeguatamente modellate da nodi troppo distanti tra loro. A tal proposito è stato scelto che la dimensione di ogni elemento non sia inferiore ad $1/8$ della più piccola lunghezza d'onda considerata nell'analisi:

$$p \leq \frac{1}{8} \frac{V_s}{f_{\max}}$$

dove V_s è la velocità di propagazione delle onde del materiale costituente l'elemento e f_{\max} è la massima frequenza considerata nell'analisi (in genere 20-25 Hz).

Il moto sismico di input u''_b viene applicato simultaneamente a tutti i nodi della base sotto forma di onde trasversali SV e/o onde di compressione P (in plane motion) con direzione di propagazione verticale ed ha il significato fisico di un moto registrato su affioramento piano del basamento (outcropping bedrock). Per tenere conto della perdita di energia per radiazione alla base del modello sono presenti degli smorzatori viscosi lineari aventi costanti di smorzamento pari a:

$$c_x = \rho_b V_{s,b}$$

$$c_y = \rho_b V_{p,b}$$

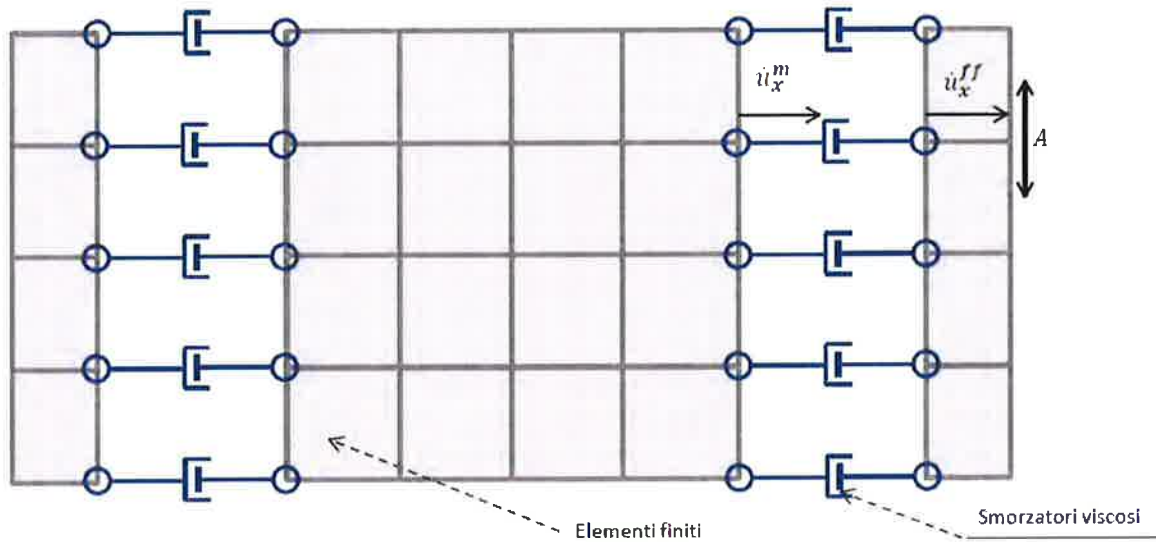
Nel sistema di equazioni globale tali coefficienti vengono assemblati all'interno della matrice di smorzamento Cb .

Gli spostamenti in corrispondenza delle frontiere laterali del modello dovrebbero essere uguali a quelli di una colonna di terreno isolata in condizioni di campo libero. Se lo smorzamento del terreno è relativamente alto, tale condizione può essere raggiunta semplicemente allontanando di una certa distanza dalla regione di interesse le frontiere laterali ed assegnando delle restrizioni cinematiche nei confronti della componente verticale (condizione 1). Tuttavia, se lo smorzamento del terreno è basso la distanza necessaria per il raggiungimento della condizione desiderata risulta molto elevata, producendo un notevole incremento dei costi computazionali. Un metodo alternativo, è quello di "applicare" il moto di campo libero in modo tale che le frontiere agiscano come un sistema in grado di assorbire le onde riflesse che altrimenti verrebbero artificialmente reintrodotti nel modello. Nel codice LSR2D questo è implementato mediante l'accoppiamento di smorzatori viscosi tra i nodi delle frontiere laterali del modello e i nodi di opportune colonne di terreno monodimensionali (colonne free-field) in grado di descrivere il moto in condizioni di campo libero. Le coordinate dei nodi delle frontiere laterali del modello e delle colonne free-field sono uguali. È necessario, per il corretto funzionamento di tali condizioni al contorno, che le frontiere laterali del modello siano perfettamente verticali. Le forze interne agli smorzatori vengono ottenute mediante le seguenti equazioni:

$$F_x = -\rho V_p (\dot{u}_x^m - \dot{u}_x^{ff}) A \quad (1)$$

$$F_y = -\rho V_s (\dot{u}_y^m - \dot{u}_y^{ff}) A \quad (2)$$

- ρ : densità di massa del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- V_p : velocità delle onde P del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- V_s : velocità delle onde S del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- A : area di influenza relativa al nodo su cui agisce lo smorzatore;
- \dot{u}_x^m : velocità del nodo del modello in direzione x;
- \dot{u}_y^m : velocità del nodo del modello in direzione y;
- \dot{u}_x^{ff} : velocità del nodo della colonna free-field in direzione x;
- \dot{u}_y^{ff} : velocità del nodo della colonna free-field in direzione y.



Le componenti della velocità dei nodi delle colonne laterali ad ogni istante di tempo vengono ottenute mediante una soluzione numerica monodimensionale a masse concentrate dell'equazione di propagazione delle onde. Tale soluzione è affidata ad un processo di calcolo che opera in parallelo rispetto a quello impiegato per la soluzione del modello principale. In altre parole, per il generico passo di integrazione temporale, vengono dapprima ottenute le componenti delle velocità delle colonne di campo libero attraverso la soluzione 1D, per poi essere convertite in carichi applicati al modello principale mediante le equazioni (1) e (2). Tali forze vengono assemblate all'interno del vettore $F_{ff}(t)$ presente al secondo membro delle equazioni globali del moto.

Le risposta dissipativa del terreno viene modellata mediante il modello lineare viscoso e quindi, dal punto di vista matematico, attraverso la matrice di smorzamento globale C_e . Essa viene ottenuta mediante una procedura di assemblaggio delle matrici locali di smorzamento degli elementi finiti presenti nel modello, le quali al loro volta sono ottenute mediante lo schema di smorzamento classico (alla Rayleigh). Per elemento i -esimo, questo prevede:

$$C_i = \alpha_{R,i}M_i + \beta_{R,i}K_i$$

dove $\alpha_{R,i}$ e $\beta_{R,i}$ sono i coefficienti di Rayleigh, M_i e K_i rispettivamente la matrice di massa e di rigidità del singolo elemento finito.

I coefficienti di Rayleigh per il singolo elemento vengono determinati sulla base di due pulsazioni angolari globali ω_n e ω_m mediante le seguenti relazioni:

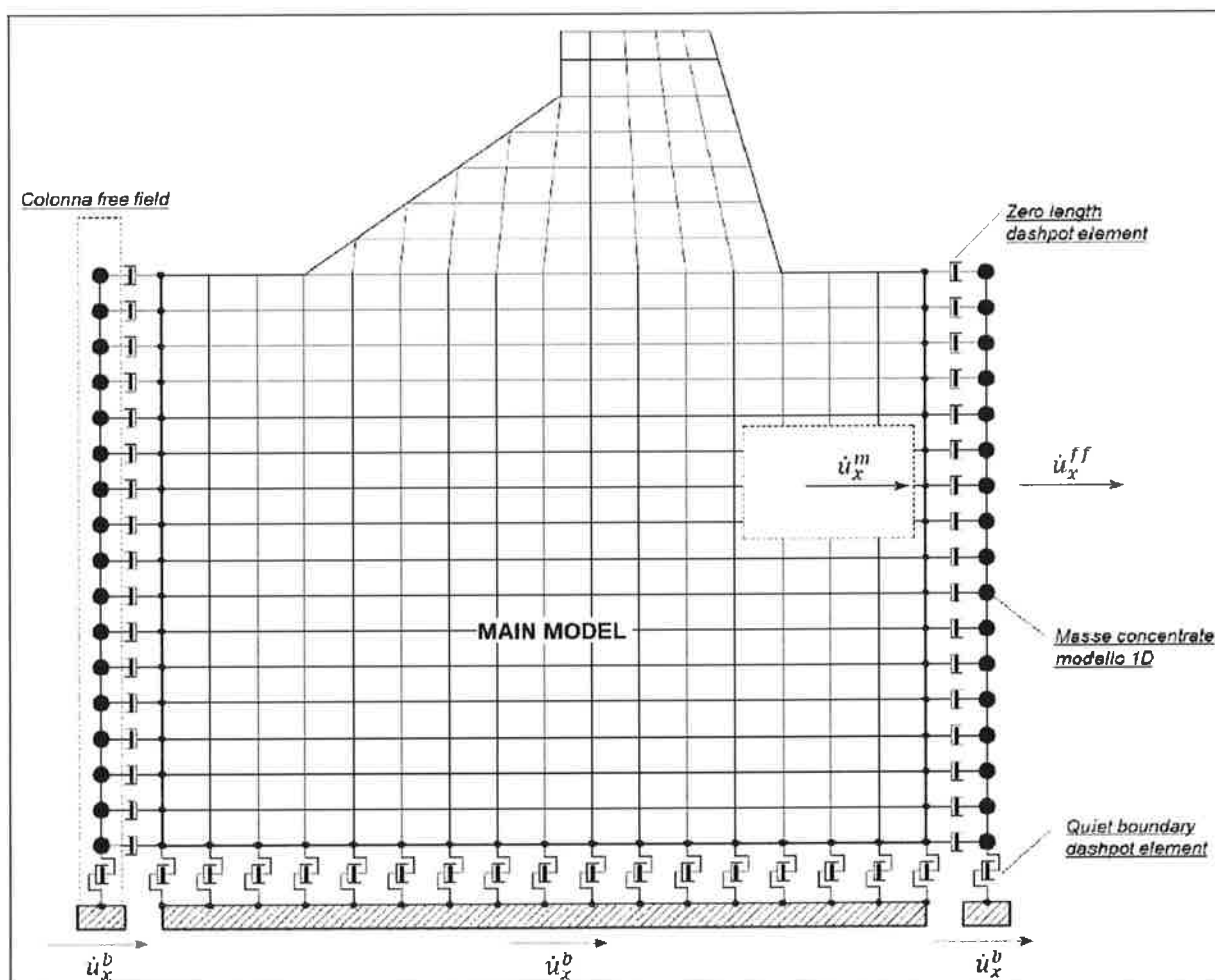
$$\alpha_{R,i} = \xi_i \frac{2 \omega_n \omega_m}{\omega_n + \omega_m}$$

$$\beta_{R,i} = \xi_i \frac{2}{\omega_n + \omega_m}$$

dove:

- ξ_i : rapporto di smorzamento viscoso dell' i -esimo elemento finito;
- ω_n : prima frequenza naturale circolare dell'intero deposito (calcolata mediante analisi modale dal solutore);
- $\omega_m = n \omega_n$: essendo n l'intero dispari che approssima per eccesso il rapporto tra la frequenza predominante dell'input sismico ω_l e la frequenza ω_n .

La schematizzazione del modello agli elementi finiti adottato dal codice di calcolo LSR2D è riportata nella figura sottostante,



l'equilibrio dinamico globale per tale sistema può essere espresso mediante la seguente relazione:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} + (\mathbf{C}_e + \mathbf{C}_b) \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \mathbf{u} = -\mathbf{M} \mathbf{I}_x \ddot{u}_{b,x}(t) - \mathbf{M} \mathbf{I}_y \ddot{u}_{b,y}(t) + \mathbf{F}_{ff}(t)$$

dove:

- \mathbf{M} : matrice di massa globale del sistema;
- \mathbf{C}_e : matrice di smorzamento globale del sistema relativa agli elementi finiti;
- \mathbf{C}_b : matrice di smorzamento globale del sistema relativa agli smorzatori viscosi presenti alla base del modello;
- \mathbf{K} : matrice di rigidezza globale del sistema;
- $\ddot{\mathbf{u}}$: vettore delle accelerazioni globali del sistema;
- $\dot{\mathbf{u}}$: vettore delle velocità globali del sistema;
- \mathbf{u} : vettore degli spostamenti globali del sistema;
- \mathbf{I}_x : vettore globale di trascinamento in direzione orizzontale;
- \mathbf{I}_y : vettore globale di trascinamento in direzione verticale;
- $\ddot{u}_{b,x}(t)$: storia temporale in direzione orizzontale dell'accelerazione in input;
- $\ddot{u}_{b,y}(t)$: storia temporale in direzione verticale dell'accelerazione in input;
- $\mathbf{F}_{ff}(t)$: forze dinamiche dovute alle condizioni free-field.

La soluzione delle equazioni del moto all' n -simo istante di tempo viene ottenuta mediante un algoritmo di integrazione diretta nel dominio del tempo (metodo di Newmark). I metodi di integrazione facenti parti della famiglia dei metodi di Newmark si basano sulle seguenti espressioni:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_{n-1} + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{u}_{n-1} + \gamma \ddot{u}_n]$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta t \dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - 2\beta) \ddot{u}_{n-1} + 2\ddot{u}_n]$$

Nel codice di calcolo LSR2D viene utilizzato il metodo CAA (Constant Average Acceleration Method) che risulta incondizionatamente stabile e non introduce alcun damping numerico nella soluzione [Hughes, 1987]. In tal caso i coefficienti del γ e β valgono rispettivamente 0.5 e 0.25.

Riscrivendo l'equazione del moto nella seguente forma:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{p}$$

l'algoritmo di soluzione numerica viene di seguito illustrato.

Note le condizioni iniziali in termini di spostamento e di velocità, si determina l'accelerazione iniziale attraverso la relazione:

$$\ddot{u}_0 = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{p}_0 - \mathbf{C} \dot{u}_0 - \mathbf{K} u_0)$$

Assegnata l'ampiezza Δt dell'intervallo di integrazione, si calcolano le seguenti costanti:

$$\bar{K} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} M + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} C + K; \quad A = \frac{1}{\beta \Delta t} M + \frac{\gamma}{\beta} C; \quad B = \frac{1}{2\beta} M + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) C$$

Per ogni intervallo di integrazione si calcolano le quantità:

$$\Delta \hat{p}_n = \Delta p_n + A \dot{u}_n + B \ddot{u}_n; \quad \Delta u_n = \frac{\Delta \hat{p}_n}{\bar{K}}$$

$$\Delta \dot{u}_n = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta u_n - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_n - \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \ddot{u}_n; \quad \Delta \ddot{u}_n = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \Delta u_n - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_n - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_n$$

da cui si ottiene:

$$u_{n+1} = u_n + \Delta u_n; \quad \dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \Delta \dot{u}_n; \quad \ddot{u}_{n+1} = \ddot{u}_n + \Delta \ddot{u}_n$$

Sostituendo n con $n+1$, si ripete il procedimento per il successivo intervallo di integrazione, e così via per tutti gli istanti di tempo.

Nel modello monodimensionale (1D), qui adottato, il deposito è rappresentato da una colonna di terreno utilizzando un modello di propagazione lineare delle onde, con proprietà dinamiche del terreno variabili in funzione del livello deformativo. Si basa anch'esso sul codice SHAKE ed è possibile eseguire analisi lineari elastiche, dove le proprietà del terreno sono mantenute costanti, oppure analisi equivalenti lineari dove le proprietà elastiche e lo smorzamento vengono fatte variare a seconda della curva di decadimento del terreno scelto. Il codice di calcolo non permette di eseguire analisi non lineari ed inoltre lavora esclusivamente in termini di tensioni totali.

Il comportamento meccanico dei terreni sotto l'effetto di carichi ciclici ad elevata frequenza è alquanto complesso e caratterizzato da marcata non linearità, accumulo di deformazioni permanenti, dissipazione di energia e degradazione progressiva delle caratteristiche meccaniche per effetto del numero di cicli di carico applicati. In presenza di fluido interstiziale, alle suddette problematiche si aggiunge l'accumulo di sovrappressioni interstiziali in condizioni di drenaggio impedito o parziale, che sono comunque le più frequenti, in considerazione della velocità di applicazione del carico.

La modellazione di tali fenomeni richiede l'utilizzo di legami costitutivi complessi, che oltretutto difficilmente riescono a riprodurre simultaneamente tutte le specificità del comportamento dei terreni. Per tale ragione spesso si preferisce fare riferimento a modelli costitutivi semplificati che, pur non essendo rigorosi, riescono a riprodurre il comportamento in modo adeguato in riferimento alla specifica applicazione.

In particolare, per quanto riguarda la risposta sismica dei depositi, l'approccio visco-elastico lineare equivalente rappresenta un valido compromesso tra semplificazione delle analisi ed accuratezza dei risultati. La strategia consiste sostanzialmente nel fare riferimento alle soluzioni visco-elastiche lineari per la propagazione delle onde sismiche adeguando in modo iterativo i parametri costitutivi in funzione del livello deformativo indotto dal moto sismico nel terreno.

Tale modello lineare equivalente, studia il comportamento tra tensione e deformazione del terreno basandosi sul modello di Kelvin-Voigt, illustrato in figura sottostante. La tensione τ dipende dalla deformazione γ e dalla sua derivata $\dot{\gamma}$, secondo la relazione:

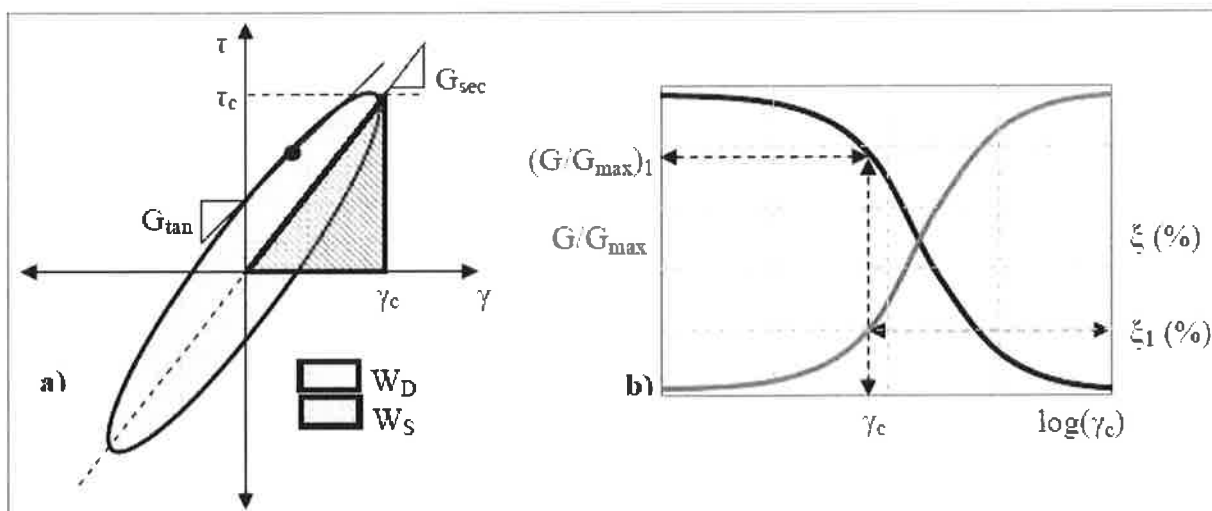
$$\tau = G \gamma + \eta \dot{\gamma}$$

dove:

- G : Modulo di taglio;
- η : viscosità del mezzo.

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato in figura. Il modulo di taglio equivalente, G , è preso considerando il modulo di taglio secante G_s . È possibile notare come alla fine di un ciclo controllato e simmetrico di tensioni si ha:

$$G_s = \frac{\tau_c}{\gamma_c}$$



Modello lineare equivalente; a) ciclo di isteresi; b) curve di non linearità

La curva G_s - γ non può avere una forma arbitraria ma deriva dalla curva τ - γ e sussiste seguente relazione:

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = G_s(\gamma) + \frac{dG_s}{d\gamma} \gamma \geq 0$$

La descrizione del comportamento meccanico dei terreni nei confronti dei carichi ciclici non può peraltro prescindere dalla dissipazione intrinseca di energia che si verifica durante i cicli di carico-scarico. Il parametro di riferimento a tal riguardo è costituito dal coefficiente di smorzamento D , definito come:

$$D = \frac{1}{4 \pi} \frac{\Delta W^{dissp}}{W^{max}}$$

dove:

ΔW^{dissp} : quantità di energia dissipata, per unità di volume, dal terreno durante un ciclo di carico armonico;

W^{max} : massima energia di deformazione, per unità di volume, immagazzinata dal terreno durante lo stesso ciclo di carico armonico.

In definitiva la risposta non lineare del terreno tramite il modello viscoelastico lineare equivalente viene riassunta mediante delle curve di riduzione del modulo di taglio e di incremento del rapporto di smorzamento

La procedura iterativa che consente di ottenere la risposta non lineare del sistema consiste nell'eseguire una sequenza di analisi lineari, con aggiornamento iterativo dei parametri di rigidità e smorzamento, fino al raggiungimento di un prefissato criterio di convergenza. Facendo riferimento alla stratigrafia inserita, lo schema della procedura iterativa su cui è basato il modello lineare equivalente, da applicare ad ogni strato in cui è stato discretizzato il profilo stratigrafico:

- 1) definizione di curve $G=G(\gamma)$ e $D=D(\gamma)$ per i diversi strati;
- 2) inizializzazione dei valori del modulo di taglio e del fattore di smorzamento ai livelli di piccole deformazioni (G_0 e D_0);
- 3) calcolo della risposta dinamica del suolo e valutazione della deformazione massima a taglio in ogni strato;
- 4) aggiornamento dei valori $G_1=G(\gamma_1)$ e $D_1=D(\gamma_1)$;
- 5) iterazione dei passi 3 e 4 fino a convergenza ($\gamma_{i-1} \sim \gamma_i$).

Il programma permette di ricavare diversi dati di output come lo spettro di risposta in termini di accelerazione, velocità e spostamento in superficie, deformazioni e sforzi di taglio e molti altri dati utili allo svolgimento dell'analisi sismica locale.

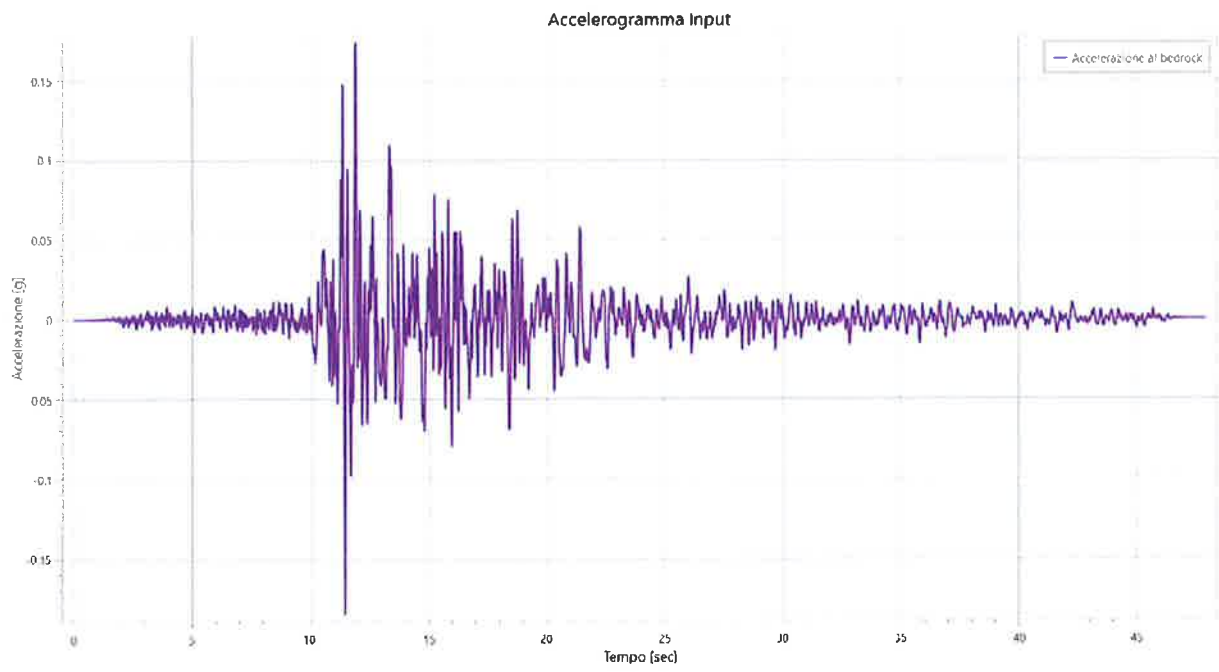
In base agli output di interesse definiti nella scheda precedente il programma restituisce i risultati dell'analisi, sia in versione grafica che tabulare.

e4. Definizione del moto di input (scelta delle azioni sismiche)

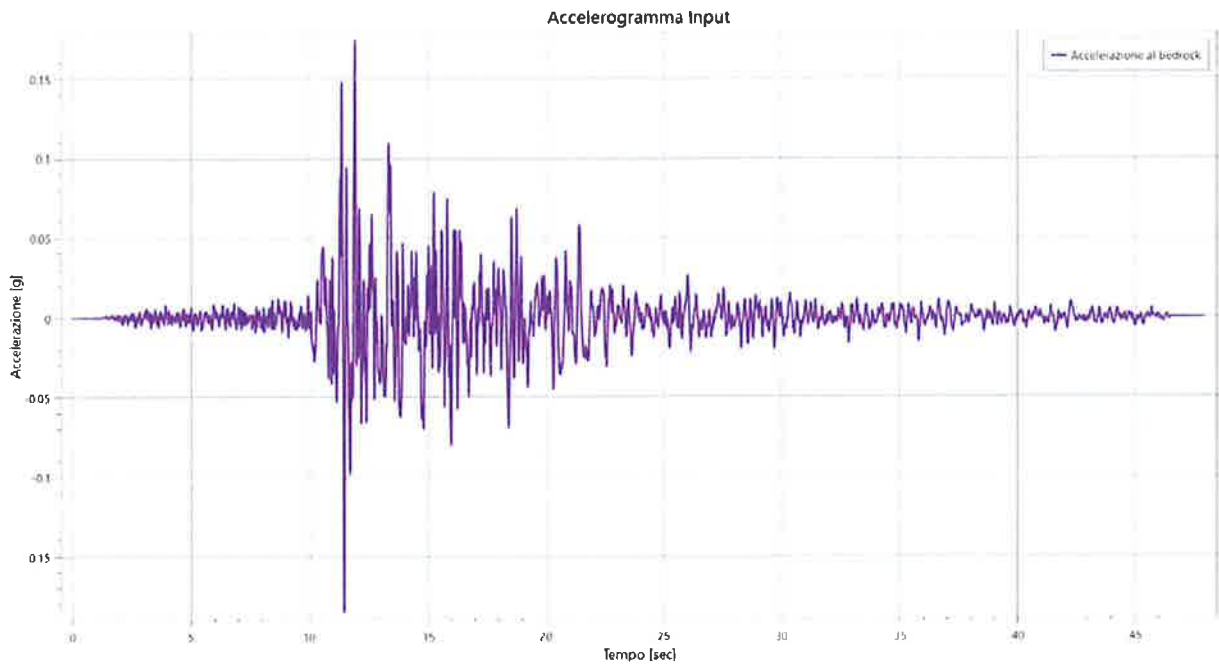
Sulla base delle indicazioni fornite ai paragrafi 3.2.3.6 e 7.11.3.1 contenute nelle NTC 18 e di quelle contenute in ICMS 2008 si è provveduto ad utilizzare accelerogrammi naturali (il numero minimo che consente di far riferimento ai valori medi dei risultati) selezionati da banche accelerometriche digitali imponendo i criteri di scelta e spettro-compatibilità imposti dalle NTC 18.

Per la selezione delle combinazioni degli accelerogrammi naturali compatibili con gli spettri da normativa si è utilizzato il programma SEISM-HOME, sviluppato da EUCENTRE che permette di ottenere l'input sismico da utilizzare per analisi dinamiche non lineari, per un qualsiasi sito del territorio italiano e per il periodo di ritorno di 475 anni. L'input sismico è definito in termini di un gruppo di sette accelerogrammi reali, registrati su roccia, spettro-compatibili in media agli spettri di normativa definiti nelle NTC18.

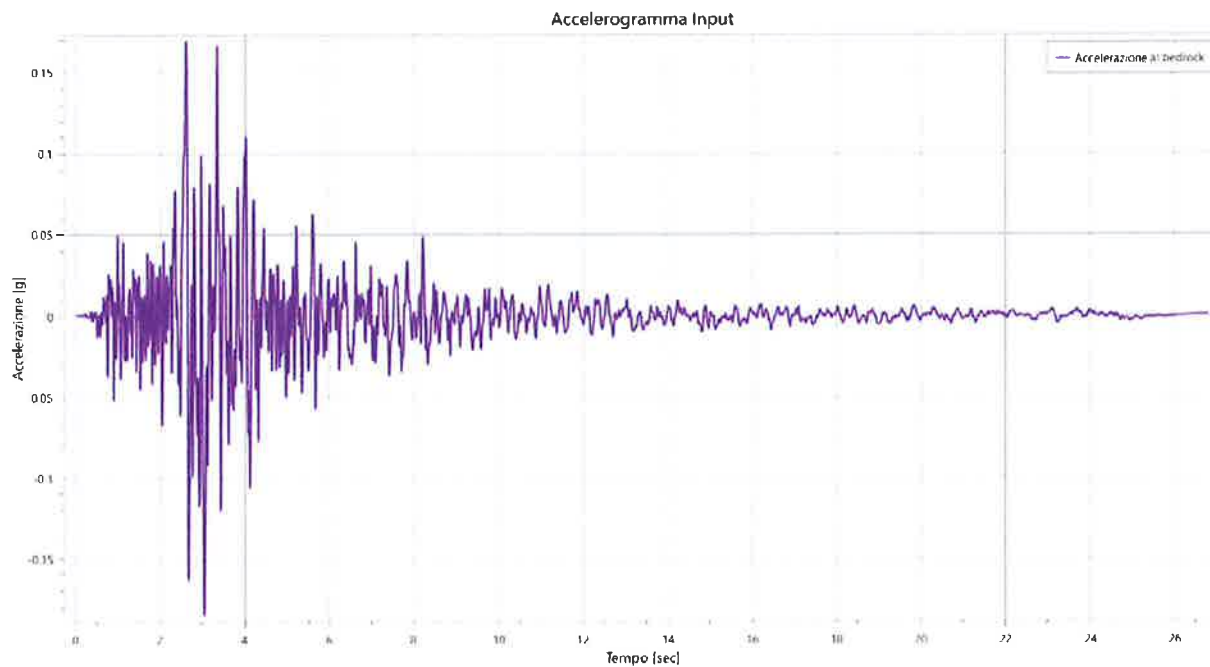
Si riporta nella tabella sottostante il set di accelerogrammi utilizzato:



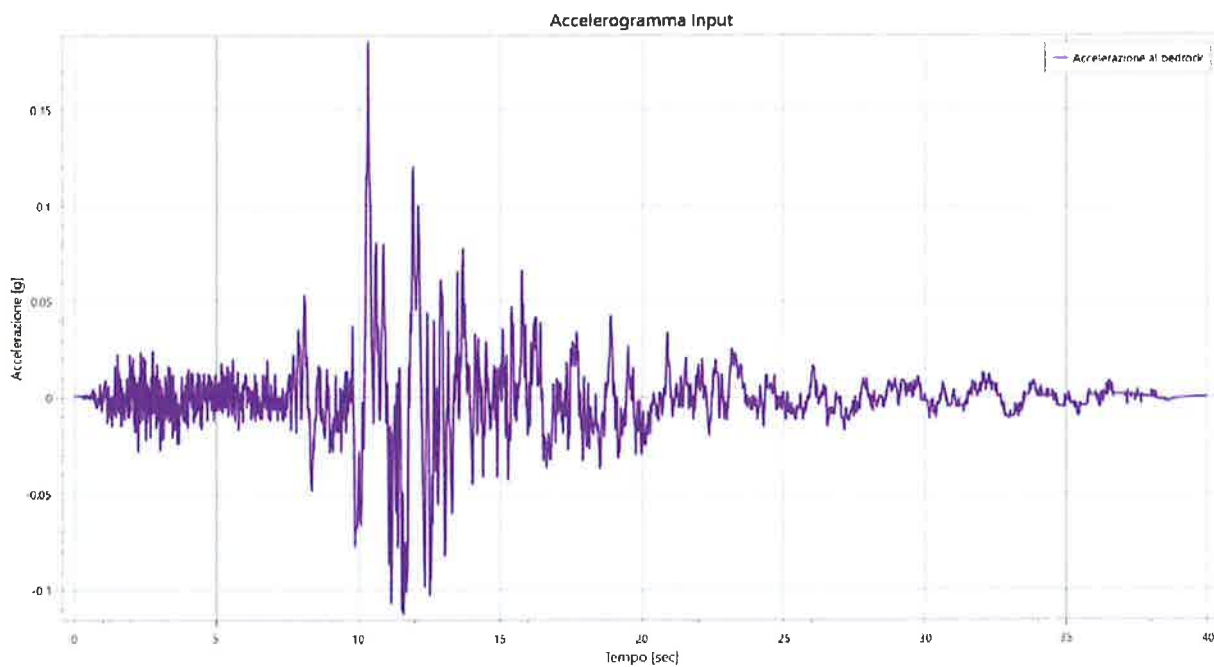
ESM EU.HRZ..HNE



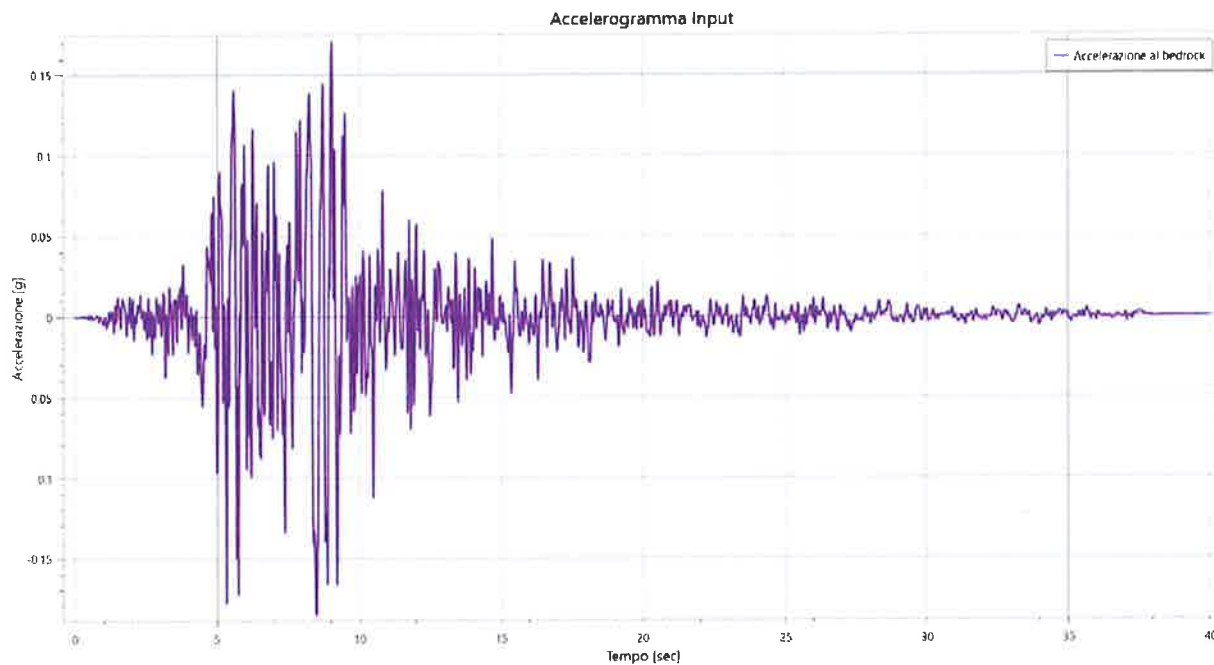
NGA RSN146



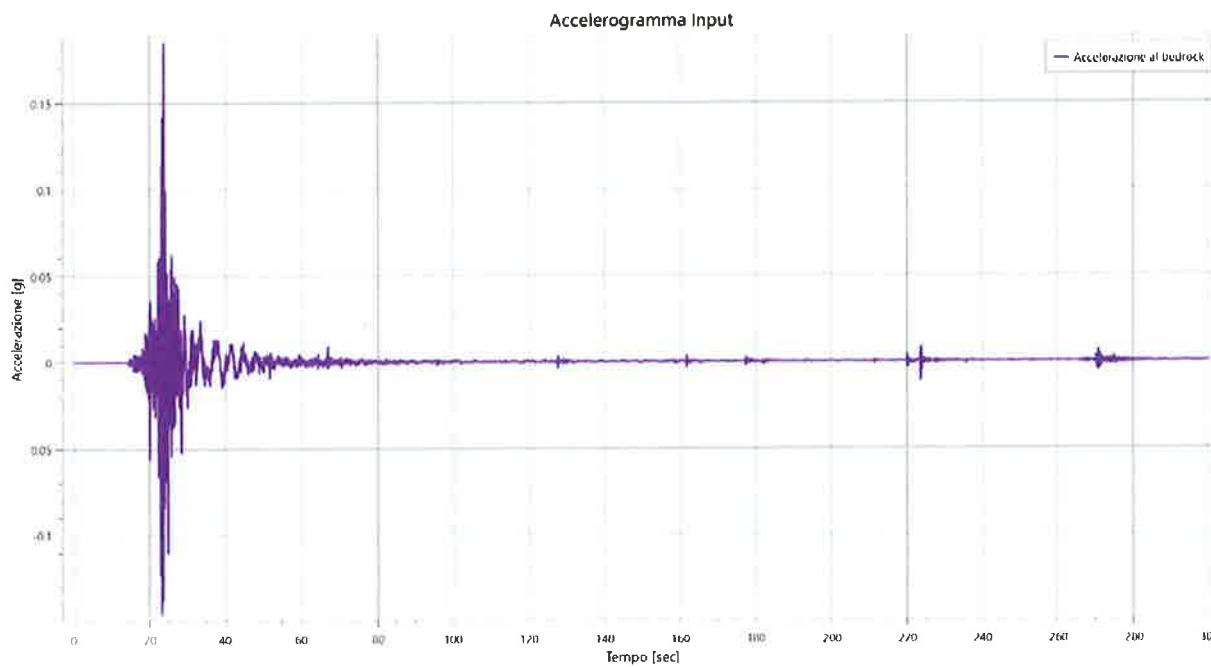
NGA RSN797



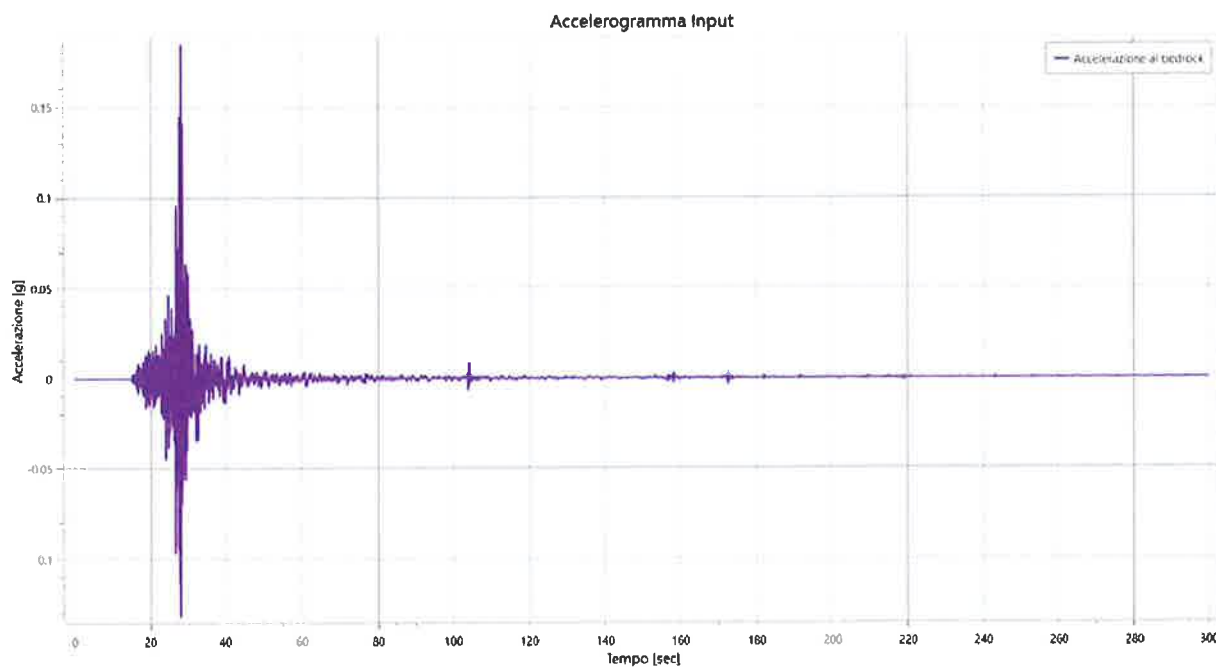
NGA RSN1091



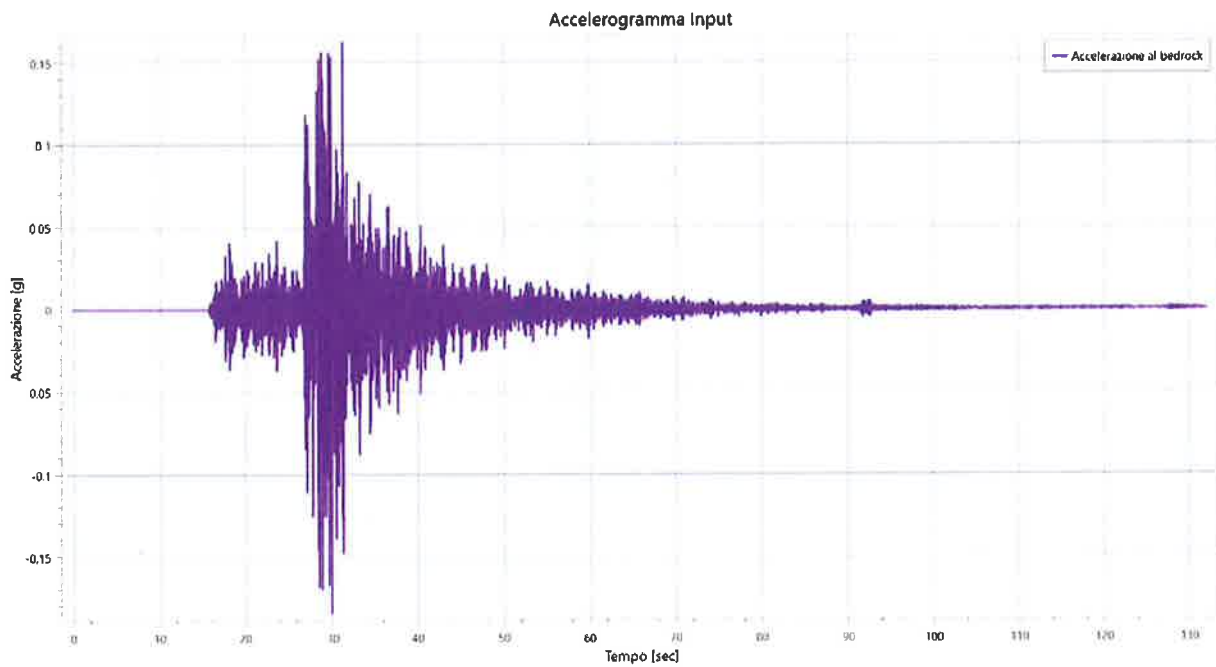
KiKnet SMN



KiKnet SAGH



KiKnet MYGH



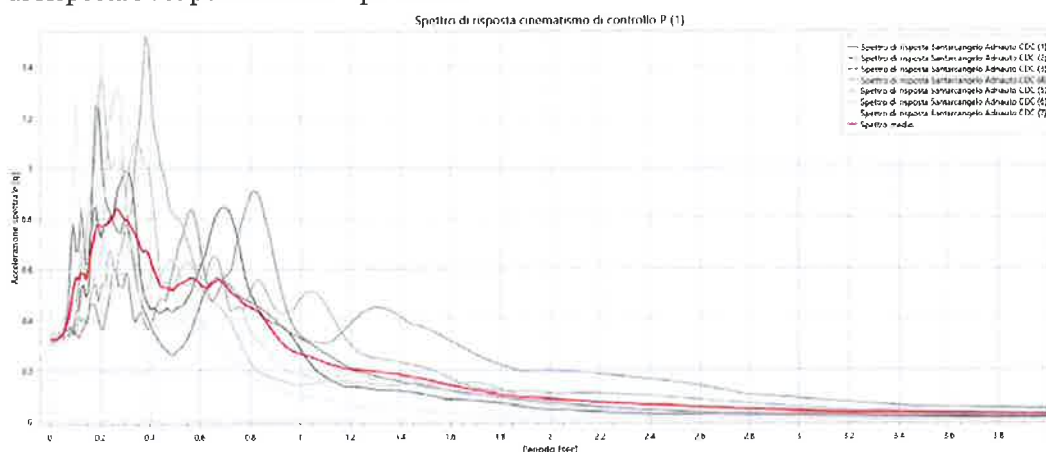
e5. Risultati della modellazione

Il codice fornisce una notevole quantità di risultati di output (iterazioni eseguite dal programma: accelerazione, velocità e spostamenti in superficie in funzione del tempo; max accelerazioni, velocità e spostamento in superficie; deformazione e sforzo di taglio in corrispondenza di uno strato desiderato in funzione del tempo; funzione di amplificazione; frequenza di massima amplificazione; spettro di Fourier; spettro di risposta in accelerazione, velocità e spostamento in funzione del periodo).

Nel presente lavoro di risposta sismica locale si intende fornire gli accelerogrammi di output e i relativi spettri elastici di risposta in accelerazione.

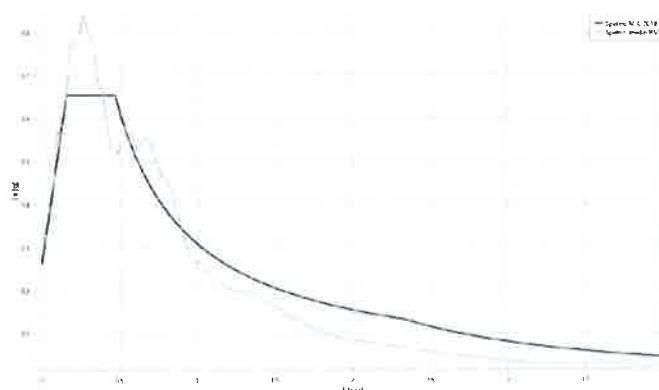
Di seguito si riportano gli spettri ottenuti per le varie analisi effettuate ed in sovrapposizione grafica il rispettivo spettro medio. Tale spettro viene ottenuto mediante una media dei singoli spettri relativi alle varie condizioni di carico presenti per ogni analisi.

Spettri di risposta in superficie in campo di free-field



Spettri di accelerazione desunti dall'analisi di Risposta sismica locale. In rosso, come richiesto da normativa è rappresentato lo spettro medio dei 7 accelerogrammi naturali di input

Si riporta di seguito il confronto tra lo spettro medio desunto dalle analisi di RSL e lo spettro semplificato di normativa per una categoria di sottosuolo di tipo "C" da NTC18.



Confronto tra lo spettri medio desunto dall'analisi di RSL e lo spettro semplificato di normativa per una categoria di sottosuolo di tipo "C" da NTC18

Si riporta di seguito il confronto tra lo spettro medio desunto dalle analisi di RSL, lo spettro semplificato di normativa per una categoria di sottosuolo di tipo "C" da NTC18 e lo spettro normalizzato con l'approccio rigoroso secondo l'Ordinanza n.55 del 24 aprile 2018 del Commissario del Governo per la Ricostruzione nei territori interessati dal sisma del 24 agosto 2016.

In particolare, tale procedura fornisce i parametri per l'inserimento dello spettro elastico all'interno di codici di calcolo per l'analisi strutturale finalizzati alla progettazione delle strutture in zona sismica. Tali parametri sono:

- S coefficiente di amplificazione che tiene conto delle condizioni stratigrafiche e delle condizioni topografiche da cui è possibile stimare $a_{max} = S a_g$ dove a_{max} e a_g rappresentano rispettivamente l'accelerazione d'ancoraggio dello spettro di risposta con effetti di sito e l'accelerazione orizzontale massima su suolo di tipo A;
- T_B è il periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- T_C è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro;
- T_D è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro;
- F_0 fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima, su sito di riferimento rigido orizzontale.

Di seguito vengono riportati i vari steps della procedura:

- a) Si calcola lo spettro di pseudoaccelerazione (S_A) e si determina il periodo proprio (T_A) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudoaccelerazione;
- b) Si calcola il valore medio dello spettro ($S_{A,m}$) nell'intorno di T_A tra $0.5 T_A$ e $1.5 T_A$, questo valore sarà assunto come valore costante del tratto ad accelerazione costante dello spettro standard:

$$S_{A,m} = \frac{1}{T_A} \int_{0.5 T_A}^{1.5 T_A} S_A(T) dT$$

- c) Si determina lo spettro di pseudovelocità (S_V) a partire da quello di accelerazione, moltiplicando le ordinate spettrali di quest'ultimo per l'inverso della corrispondente frequenza circolare $\omega = 2\pi/T$:

$$S_V(T) = S_A(T) \frac{T}{2\pi}$$

e quindi si individua il periodo (T_V) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudovelocità;

- d) Si calcola il valore medio dello spettro ($S_{V,m}$) nell'intorno di T_V nell'intorno tra $0.8 T_V$ e $1.2 T_V$:

$$S_{V,m} = \frac{1}{0.4 T_V} \int_{0.8 T_V}^{1.2 T_V} S_V(T) dT$$

- e) Si determina il periodo in corrispondenza del quale si incontrano i due rami dello spettro ad accelerazione costante e velocità costante:

$$T_C = 2\pi \frac{S_{V,m}}{S_{A,m}}$$

- f) Si determina $T_B = \frac{1}{3} T_C$, $T_D = 4.0 \frac{a_g}{a} + 1.6$ ed $S = \frac{a_{max}}{a_g}$ con a_{max} punto di ancoraggio a $T=0$ dello spettro di output. Poiché il valore di a_{max} non è generalmente fornito nello spettro delle simulazioni numeriche si procede per estrapolazione lineare, secondo la seguente equazione:

$$a_{max} = \left(\frac{S_e(T = 0.01s)}{S_{A,m}} - \frac{0.01}{T_B} \right) \left(\frac{S_{A,m}}{1 - \frac{0.01}{T_B}} \right)$$

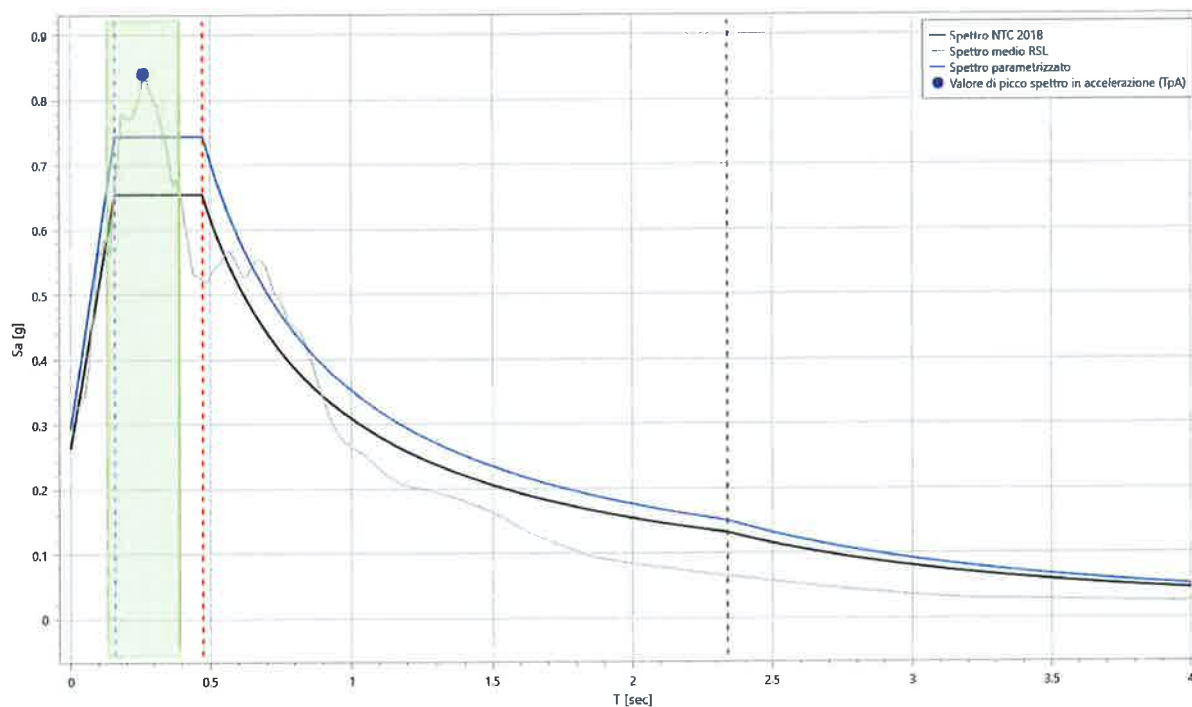
con $S_e(T = 0.01s)$ ordinata dello spettro di accelerazione per $T = 0.01s$, primo valore del periodo nello spettro elastico delle simulazioni numeriche.

Infine, una volta stabilito lo smorzamento di riferimento ξ , le ordinate dello spettro in pseudo-accelerazione vengono ottenute mediante le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} 0 \leq T \leq T_B & S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \\ T_B \leq T \leq T_C & S_e(T) = a_g S \eta F_0 \\ T_C \leq T \leq T_D & S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left(\frac{T_C}{T} \right) \\ T \leq T_D & S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right) \end{aligned}$$

- nelle quali:
- T periodo proprio di vibrazione;
- η è il fattore che altera lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali B diversi dal 5%, mediante la relazione:

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0.55$$



Approccio semplificato NTC 2018

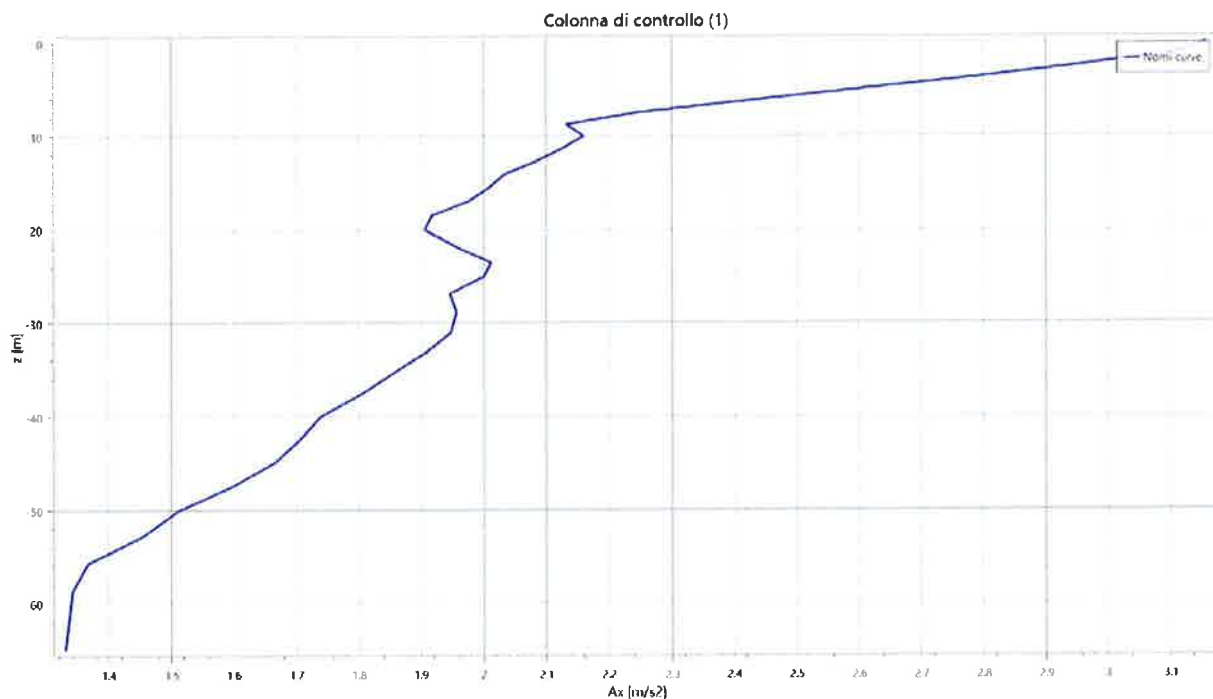
<i>Ag [g]</i>	0.185
<i>F0</i>	2.484
<i>Tc*</i>	0.303
<i>Categoria stratigrafica</i>	C ▾
<i>Categoria topografica</i>	T1 ▾

Parametrizzazione RSL

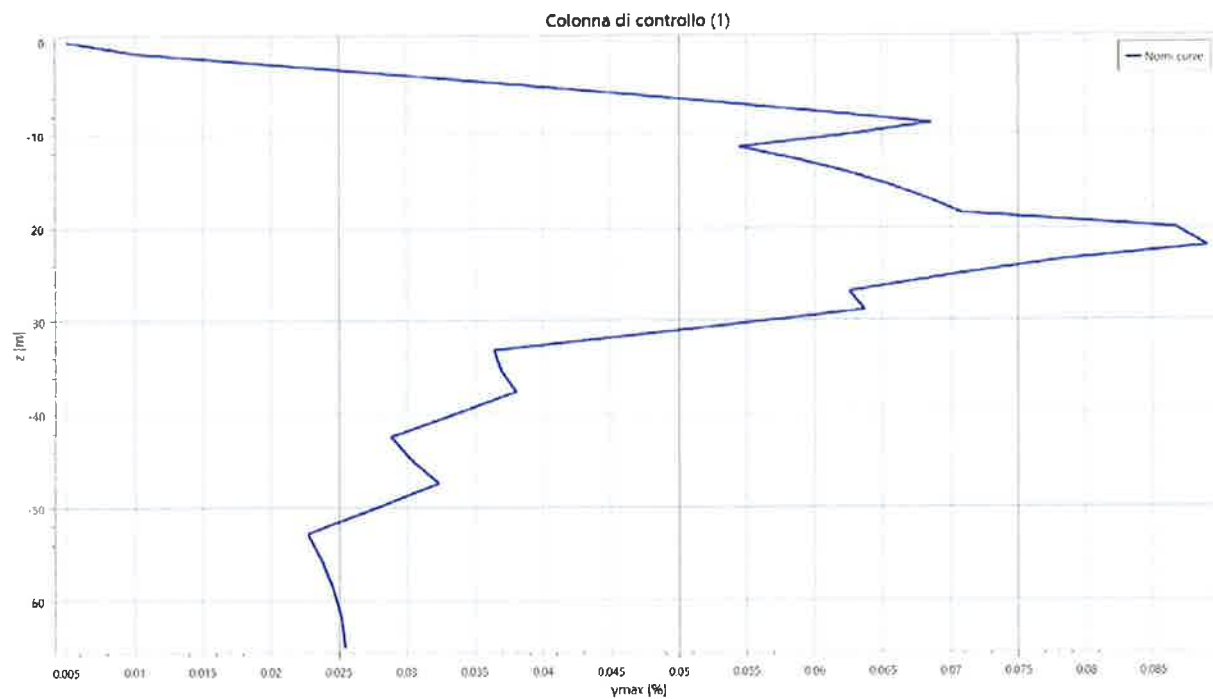
<i>TpA [sec]</i>	0.260
<i>0.5 TpA [sec]</i>	0.130
<i>1.5 TpA [sec]</i>	0.390
<i>Sa,medio [g]</i>	0.744
<i>TpV [sec]</i>	0.690
<i>0.8 TpV [sec]</i>	0.552
<i>1.2 TpV [sec]</i>	0.828
<i>Sv,medio [g*s]</i>	0.056
amax	0.294
F0	2.527
S	1.591
Tb [sec]	0.158
Tc [sec]	0.473
Td [sec]	2.340
Parametrizza	

Si forniscono in allegato tutti i punti dello spettro medio desunto da RSL

Si riportano di seguito i profili con la profondità dell'accelerazione e delle deformazioni da utile supporto nell'analisi del sistema fondazionale della struttura.



Profilo A max (m/s²) con la profondità



Profilo Deformazioni (%) con la profondità

- III Livello di approfondimento - DGR 630/2019 e DGR 476/2021 Regione Emilia-Romagna

Sulla base delle indicazioni contenute nella DGR 630/2019 e DGR 476/2021, per l'area oggetto dell'intervento è stata effettuata analisi di RSL per via analitica utilizzando sia le informazioni dedotte dalle indagini sismiche di caratterizzazione del sottosuolo sia il moto sismico descritto precedentemente.

La normativa di cui sopra prevede per l'area in oggetto:

- la perimetrazione dettagliata, a scala almeno 1:10.000 (preferibilmente di maggior dettaglio) delle aree indagate e i valori indicativi della pericolosità locale (indice di liquefazione, grado di stabilità, cedimenti attesi, ...);
- nel caso di analisi di risposta sismica locale, gli spettri di risposta riferiti a tali aree, per un periodo di ritorno $TR = 949$ anni con smorzamento $\xi = 5\%$ e le mappe di amplificazione in termini di PGA, SA1, SA2, SA3, SA4, SI1, SI2, SI3, HSM e H0408, H0711, H0515, ovvero lo scuotimento in accelerazione (cm/s²) atteso al sito per gli intervalli di periodi $0,4s \leq T \leq 0,8s$, $0,7s \leq T \leq 1,1s$ e $0,5s \leq T \leq 1,5s$.

Nell'area oggetto della variante non sussistono problemi di liquefazione, di stabilità e di cedimenti attesi. I valori dello spettro di risposta riferito all'area è stato descritto nel paragrafo precedente e si riportano di seguito i valori di amplificazione di:

- Il fattore di amplificazione in termini di picco di accelerazione (FPGA), definito come il rapporto tra l'accelerazione massima in superficie ed il valore di riferimento per il sito su suolo rigido

$$PGA - FPGA = 1.71$$

- Il fattore di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in pseudoaccelerazione (FA) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s, 0.7-1.1 s e 0.5-1.5 s per i due spettri indicati (superficie e suolo rigido)

$$SA1 - FA0105 = 1.74$$

$$SA2 - FA0408 = 2.26$$

$$SA3 - FA0711 = 2.33$$

$$SA4 - FA0515 = 2.17$$

- Il fattore di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in pseudovelocità (FH) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido. In sostanza viene calcolato il rapporto degli indici di Housner negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.5-1.0 s e 0.5-1.5 s, per i due spettri indicati (superficie e suolo rigido)

$$SI1 - FH0105 = 1.73$$

$$SI2 - FH0510 = 2.37$$

$$SI3 - FH0515 = 2.14$$

8. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

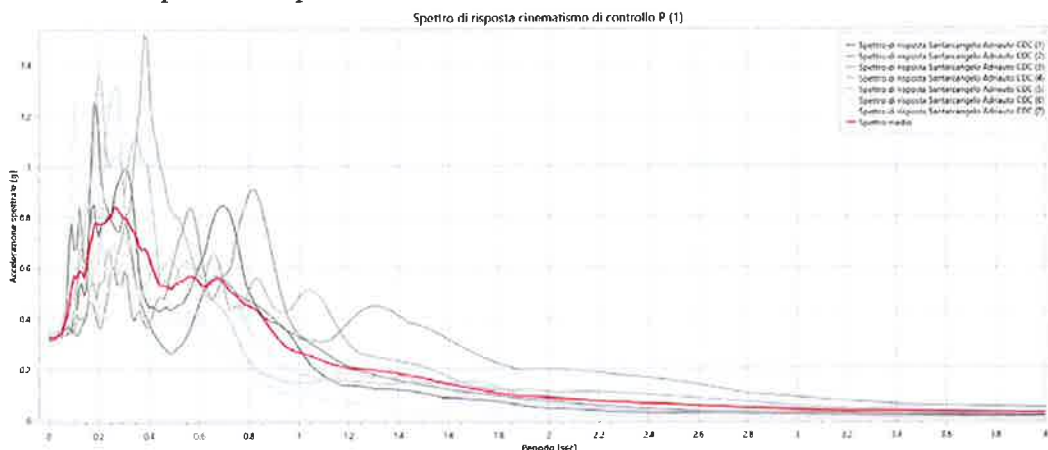
Lo studio condotto ha permesso di delineare i principali aspetti sismici significativi ai fini della realizzazione del PUA di iniziativa privata APC.N 2.2 a Santarcangelo. Il quadro di questi aspetti ha portato alle seguenti considerazioni:

1. Dal punto di vista sismico risulta che il comune di Santarcangelo (RN), è stato dichiarato sismico e iscritto nella Zona 2 della OPCM 3274/2003 e s.m.i;
2. Al fine di determinare le caratteristiche sismiche dei terreni presenti necessari per le analisi di Risposta sismica locale si è provveduto a reperire tutte le informazioni provenienti dalle indagini sismiche eseguite nelle aree di intervento ed in particolare le indagini eseguite sono state:
 - n. 1 indagine sismica passiva di microtremori (HV);
 - n. 1 indagine sismica passiva in array 2D (ESAC).
3. Il modello geologico di riferimento e l'assetto stratigrafico generale derivanti dalla campagna di indagini geognostiche svolta (Luglio-Ottobre 2021) individua, complessivamente i seguenti livelli litologici, così definiti sulla base dei rapporti stratigrafici e delle caratteristiche geomeccaniche competenti:
 - **Litotipo 1: Livello superficiale e/o terreno di riporto.** Terreni fortemente antropizzati e/o terreni di riporto di differente natura litologica, eterogenei, a tessitura prevalente limo - argillosa con sottili venature sabbiose. Grado di addensamento e coesione, estremamente variabili. Presenza locale di inerti compattati per sottofondi stradali. Caratteristiche geomeccaniche variabili e generalmente scadenti;
 - **Litotipo 2. Limi con argille a vario grado di consistenza.** Depositi alluvionali mediamente consistenti con caratteristiche geotecniche sufficienti - discrete ed a contenuta compressibilità. Depositi la cui genesi è riconducibile ad ambienti di piana inondabile intercalati ai livelli ghiaiosi. Presenza di livelli decimetrici discontinui a maggior contenuto sabbioso, di limi argillosi più compressibili e di limi con argilla a maggiore compattezza;
 - **Litotipo 3. Limi con argille, consistenti.** Depositi alluvionali analoghi ai litotipi sovrastanti, consistenti, con caratteristiche geotecniche discrete ed a ridotta compressibilità. Depositi la cui genesi è riconducibile ad ambienti di piana inondabile intercalati ai livelli ghiaiosi. Presenza di livelli decimetrici discontinui a maggior contenuto sabbioso, di limi argillosi più compressibili e di limi con argilla a maggiore compattezza;
 - **Litotipo 4. Ghiaie alluvionali.** Orizzonti da decimetrici a metrici di depositi alluvionali di conoide dei Fiumi Parecchia ed Uso, costituite da ghiaie e ghiaie sabbiose a granulometria da media a grossa, a spigoli arrotondati. Matrice limo - argillosa variabile in funzione della tipologia di facies deposizionale. Talora presenza di lenti metriche limo - argillose discontinue ed a varie altezze del litotipo. La continuità dei vari orizzonti è anch'essa variabile in funzione dell'ambiente deposizionale; di sovente limitata in quanto essi non sono correlabili se non a piccola o media scala. Il litotipo presenta caratteristiche di compattezza ed addensamento elevate, scarsa compressibilità ed è dotato generalmente di caratteristiche geomeccaniche da buone ad ottime.

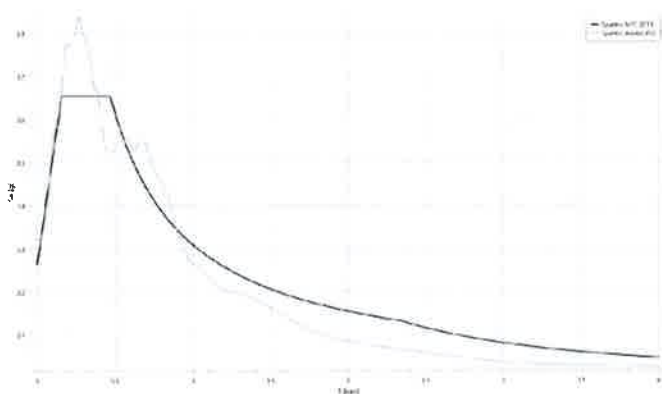
Nei fori di sondaggio delle prove penetrometriche, completati con la posa di tubi piezometrici, è stata rilevata la presenza di un livello freatico alla profondità di -2.00 mt. dall'attuale p.c.

4. L'analisi di risposta sismica locale (RSL) condotta ha evidenziato che:

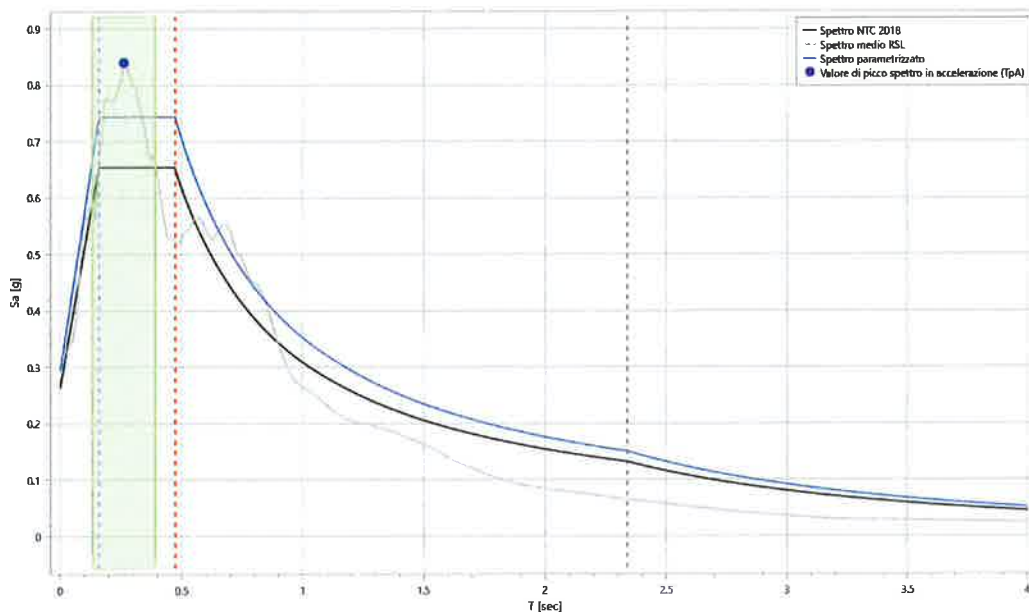
I valori dello spettro di risposta medio riferito all'area di intervento sono:



Spettri di accelerazione desunti dall'analisi di Risposta sismica locale. In rosso, come richiesto da normativa è rappresentato lo spettro medio dei 7 accelerogrammi naturali di input



Confronto tra lo spettro medio desunto dall'analisi di RSL e lo spettro semplificato di normativa per una categoria di sottosuolo di tipo "C" da NTC18



Confronto tra lo spettro medio desunto dalle analisi di RSL, lo spettro semplificato di normativa per una categoria di sottosuolo di tipo “C” da NTC18 e lo spettro normalizzato con l’approccio rigoroso secondo l’Ordinanza n.55 del 24 aprile 2018 del Commissario del Governo per la Ricostruzione nei territori interessati dal sisma del 24 agosto 2016.

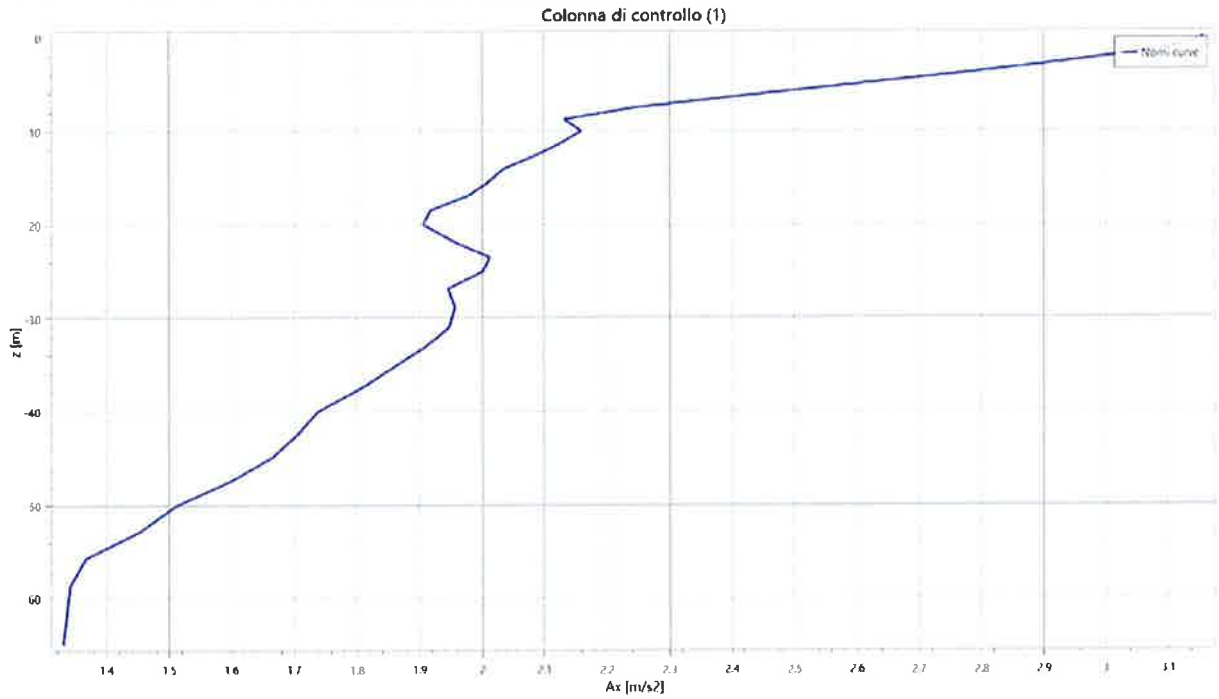
Approccio semplificato NTC 2018

<i>Ag [g]</i>	0.185
<i>FO</i>	2.484
<i>Tc*</i>	0.303
<i>Categoria stratigrafica</i>	C
<i>Categoria topografica</i>	T1

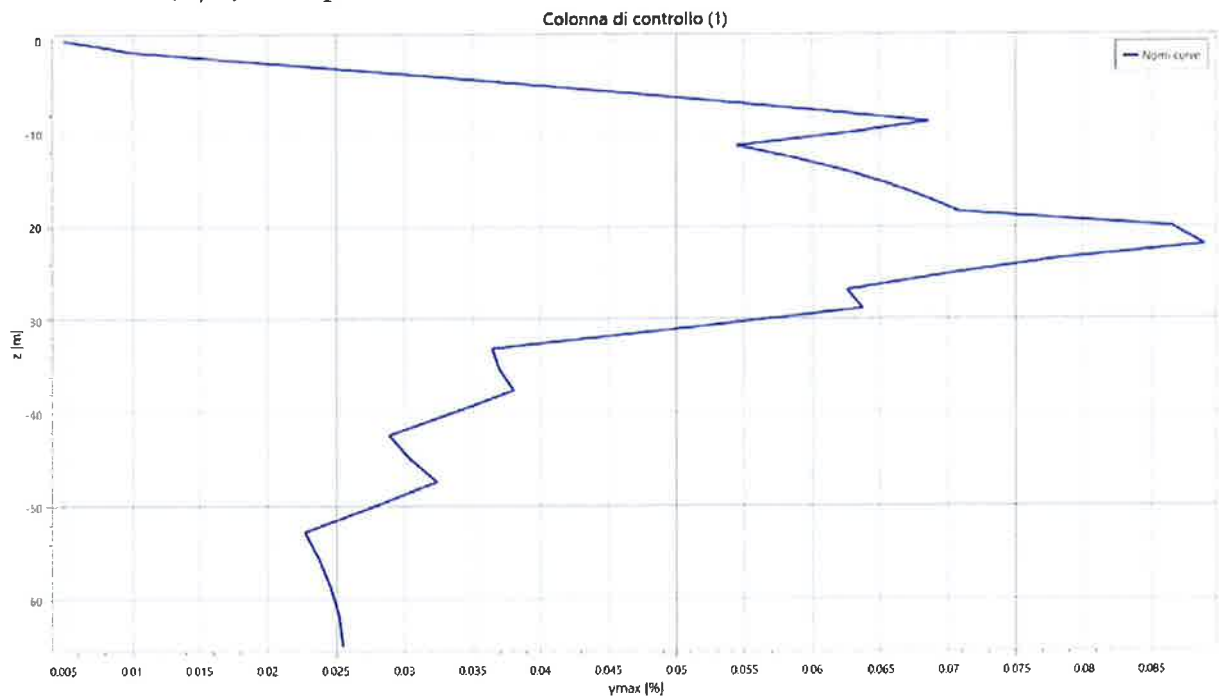
Parametrizzazione RSL

<i>TpA [sec]</i>	0.260
<i>0.5 TpA [sec]</i>	0.130
<i>1.5 TpA [sec]</i>	0.390
<i>Sa,medio [g]</i>	0.744
<i>TpV [sec]</i>	0.690
<i>0.8 TpV [sec]</i>	0.552
<i>1.2 TpV [sec]</i>	0.828
<i>Sv,medio [g*s]</i>	0.056
amax	0.294
FO	2.527
S	1.591
Tb [sec]	0.158
Tc [sec]	0.473
Td [sec]	2.340
Parametrizza	

Si riportano di seguito i profili con la profondità dell'accelerazione e delle deformazioni da utile supporto nell'analisi del sistema fondazionale della struttura.



Profilo A max (m/s²) con la profondità



Profilo Deformazioni (%) con la profondità

5. I valori di amplificazione richiesti dalla DGR 630/2019 e DGR 476/2021 sono:

- Il fattore di amplificazione in termini di picco di accelerazione (FPGA), definito come il rapporto tra l'accelerazione massima in superficie ed il valore di riferimento per il sito su suolo rigido

$$PGA - FPGA = 1.71$$

- Il fattore di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in pseudoaccelerazione (FA) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s, 0.7-1.1 s e 0.5-1.5 s per i due spettri indicati (superficie e suolo rigido)

$$SA1 - FA0105 = 1.74$$

$$SA2 - FA0408 = 2.26$$

$$SA3 - FA0711 = 2.33$$

$$SA4 - FA0515 = 2.17$$

- Il fattore di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in pseudovelocità (FH) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido. In sostanza viene calcolato il rapporto degli indici di Housner negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.5-1.0 s e 0.5-1.5 s, per i due spettri indicati (superficie e suolo rigido)

$$SI1 - FH0105 = 1.73$$

$$SI2 - FH0510 = 2.37$$

$$SI3 - FH0515 = 2.14$$

- il valore di H_{XX} , che rappresenta lo scuotimento atteso in valore assoluto (accelerazione in cm/s^2), dato dal prodotto del parametro Acceleration Spectrum Intensity (ASI_{PU}), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione, diviso per ΔT e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione calcolato per lo stesso intervallo di periodi

$$H_{ms} = 654.50 \text{ cm/s}^2$$

$$H_{0408} = 534.93 \text{ cm/s}^2$$

$$H_{0711} = 412.71 \text{ cm/s}^2$$

$$H_{0515} = 327.01 \text{ cm/s}^2$$

Modena, ottobre 2021

Dott. Geol. Lorenzo Del Maschio
(A.P. n° 1725 Ordine dei Geologi della Regione Lazio)

9. ALLEGATI

- Punti spettro medio da analisi RSL;

Punti Spettro medio analisi RSL

T (s)	a(g)
0.00000000	0.322139366
0.01000000	0.322884872
0.02000000	0.325202498
0.03000000	0.329425914
0.04000000	0.337015335
0.05000000	0.344856120
0.06000000	0.375671779
0.07000000	0.412521213
0.08000000	0.472524143
0.09000000	0.528711764
0.10000000	0.569982617
0.11000000	0.560597242
0.12000000	0.586766620
0.13000000	0.584435345
0.14000000	0.560216039
0.15000000	0.612780092
0.16000000	0.680247303
0.17000000	0.711666533
0.18000000	0.771249773
0.19000000	0.778118102
0.20000000	0.769578333
0.21000000	0.773390054
0.22000000	0.774690200
0.23000000	0.783568382
0.24000000	0.795159138
0.25000000	0.810038137
0.26000000	0.840541048
0.27000000	0.837074030
0.28000000	0.820533155
0.29000000	0.807274393
0.30000000	0.795281406
0.31000000	0.791632393
0.32000000	0.770435594
0.33000000	0.752801101
0.34000000	0.738172464
0.35000000	0.713999248
0.36000000	0.684005629
0.37000000	0.667966261
0.38000000	0.677178778
0.39000000	0.664490158
0.40000000	0.635923625
0.41000000	0.604685662
0.42000000	0.582189482
0.43000000	0.556630623
0.44000000	0.529869369
0.45000000	0.530683527
0.46000000	0.527991728
0.47000000	0.523992811
0.48000000	0.520153129
0.49000000	0.519371953
0.50000000	0.529616925
0.51000000	0.538447655
0.52000000	0.543808874
0.53000000	0.545454473
0.54000000	0.552870686
0.55000000	0.561834279
0.56000000	0.566099632
0.57000000	0.565222787
0.58000000	0.559232016
0.59000000	0.549802432
0.60000000	0.540260181
0.61000000	0.532537204
0.62000000	0.525968225
0.63000000	0.529910447
0.64000000	0.537453390
0.65000000	0.546425916

0.660000000	0.552817227
0.670000000	0.555357362
0.680000000	0.553408209
0.690000000	0.546680075
0.700000000	0.536481468
0.710000000	0.522713778
0.720000000	0.508689660
0.730000000	0.501529463
0.740000000	0.496079944
0.750000000	0.488196521
0.760000000	0.477829226
0.770000000	0.465250326
0.780000000	0.456560950
0.790000000	0.452351081
0.800000000	0.448642932
0.810000000	0.444854587
0.820000000	0.439609363
0.830000000	0.431876707
0.840000000	0.421125702
0.850000000	0.408393579
0.860000000	0.394189548
0.870000000	0.380455728
0.880000000	0.366340671
0.890000000	0.352296236
0.900000000	0.339058111
0.910000000	0.326637592
0.920000000	0.315150376
0.930000000	0.304666010
0.940000000	0.295177648
0.950000000	0.287435990
0.960000000	0.280615948
0.970000000	0.274771431
0.980000000	0.271067723
0.990000000	0.267946556
1.000000000	0.265057393
1.010000000	0.262266648
1.020000000	0.259540572
1.030000000	0.256435593
1.040000000	0.253394257
1.050000000	0.249830496
1.060000000	0.246158424
1.070000000	0.242232921
1.080000000	0.238268259
1.090000000	0.234545456
1.100000000	0.230462868
1.110000000	0.226479561
1.120000000	0.222995567
1.130000000	0.219814440
1.140000000	0.217035991
1.150000000	0.214277558
1.160000000	0.211729949
1.170000000	0.209241757
1.180000000	0.207538200
1.190000000	0.206020329
1.200000000	0.204584355
1.210000000	0.203210449
1.220000000	0.202221234
1.230000000	0.201368583
1.240000000	0.200683274
1.250000000	0.199913590
1.260000000	0.199036587
1.270000000	0.198012066
1.280000000	0.196825663
1.290000000	0.195457559
1.300000000	0.193894430
1.310000000	0.192448205
1.320000000	0.191703657
1.330000000	0.190769615
1.340000000	0.189683799

1.350000000	0.188404030
1.360000000	0.187083789
1.370000000	0.185836329
1.380000000	0.184402260
1.390000000	0.182857783
1.400000000	0.181131769
1.410000000	0.179263256
1.420000000	0.177290115
1.430000000	0.175286773
1.440000000	0.173456413
1.450000000	0.172160078
1.460000000	0.170716591
1.470000000	0.169119942
1.480000000	0.167405401
1.490000000	0.165526157
1.500000000	0.163521986
1.510000000	0.161451538
1.520000000	0.159237876
1.530000000	0.156899560
1.540000000	0.154456626
1.550000000	0.151960176
1.560000000	0.149410495
1.570000000	0.146800071
1.580000000	0.144183523
1.590000000	0.141908364
1.600000000	0.139599297
1.610000000	0.137276701
1.620000000	0.135127079
1.630000000	0.133475197
1.640000000	0.131745385
1.650000000	0.129961828
1.660000000	0.128128606
1.670000000	0.126262807
1.680000000	0.124382671
1.690000000	0.122496536
1.700000000	0.120609913
1.710000000	0.118721041
1.720000000	0.116828774
1.730000000	0.114934709
1.740000000	0.113044832
1.750000000	0.111250821
1.760000000	0.109648705
1.770000000	0.108052831
1.780000000	0.106463623
1.790000000	0.104882081
1.800000000	0.103302714
1.810000000	0.101722054
1.820000000	0.100136957
1.830000000	0.098548797
1.840000000	0.096987274
1.850000000	0.095834746
1.860000000	0.094688116
1.870000000	0.093544789
1.880000000	0.092512793
1.890000000	0.091802038
1.900000000	0.091090668
1.910000000	0.090388698
1.920000000	0.089683803
1.930000000	0.088967876
1.940000000	0.088241346
1.950000000	0.087496979
1.960000000	0.086761954
1.970000000	0.086115669
1.980000000	0.085449363
1.990000000	0.084757601
2.000000000	0.084047077
2.010000000	0.083321670
2.020000000	0.082591220
2.030000000	0.081922566

2.040000000	0.081456250
2.050000000	0.080979527
2.060000000	0.080490183
2.070000000	0.079992784
2.080000000	0.079483060
2.090000000	0.078966115
2.100000000	0.078436448
2.110000000	0.077896107
2.120000000	0.077343433
2.130000000	0.076779437
2.140000000	0.076203524
2.150000000	0.075617103
2.160000000	0.075020185
2.170000000	0.074414530
2.180000000	0.073801403
2.190000000	0.073181431
2.200000000	0.072553652
2.210000000	0.071922453
2.220000000	0.071283428
2.230000000	0.070644371
2.240000000	0.070003253
2.250000000	0.069453234
2.260000000	0.068967750
2.270000000	0.068463001
2.280000000	0.067942838
2.290000000	0.067405185
2.300000000	0.066854206
2.310000000	0.066286861
2.320000000	0.065794511
2.330000000	0.065288217
2.340000000	0.064753880
2.350000000	0.064196676
2.360000000	0.063617422
2.370000000	0.063183585
2.380000000	0.062809970
2.390000000	0.062417661
2.400000000	0.062008462
2.410000000	0.061580660
2.420000000	0.061134079
2.430000000	0.060671271
2.440000000	0.060189035
2.450000000	0.059690936
2.460000000	0.059175454
2.470000000	0.058662306
2.480000000	0.058213972
2.490000000	0.057749156
2.500000000	0.057273678
2.510000000	0.056785674
2.520000000	0.056290384
2.530000000	0.055791354
2.540000000	0.055294748
2.550000000	0.054793267
2.560000000	0.054285364
2.570000000	0.053764163
2.580000000	0.053231083
2.590000000	0.052682985
2.600000000	0.052122167
2.610000000	0.051547338
2.620000000	0.050959982
2.630000000	0.050454532
2.640000000	0.049986897
2.650000000	0.049520256
2.660000000	0.049058911
2.670000000	0.048594346
2.680000000	0.048124201
2.690000000	0.047647048
2.700000000	0.047164753
2.710000000	0.046675785
2.720000000	0.046206874

2.730000000	0.045746606
2.740000000	0.045279976
2.750000000	0.044808822
2.760000000	0.044333290
2.770000000	0.043853709
2.780000000	0.043371164
2.790000000	0.042885777
2.800000000	0.042482586
2.810000000	0.042178511
2.820000000	0.041869127
2.830000000	0.041556073
2.840000000	0.041238511
2.850000000	0.040918542
2.860000000	0.040596182
2.870000000	0.040273633
2.880000000	0.039948776
2.890000000	0.039624221
2.900000000	0.039297071
2.910000000	0.038967667
2.920000000	0.038636334
2.930000000	0.038302944
2.940000000	0.037968113
2.950000000	0.037631354
2.960000000	0.037294074
2.970000000	0.036955377
2.980000000	0.036616765
2.990000000	0.036277526
3.000000000	0.035938695
3.010000000	0.035600158
3.020000000	0.035262651
3.030000000	0.034926015
3.040000000	0.034590203
3.050000000	0.034255811
3.060000000	0.033922236
3.070000000	0.033590562
3.080000000	0.033259999
3.090000000	0.032931506
3.100000000	0.032604790
3.110000000	0.032279831
3.120000000	0.031957331
3.130000000	0.031636889
3.140000000	0.031332355
3.150000000	0.031059869
3.160000000	0.030789475
3.170000000	0.030521074
3.180000000	0.030255085
3.190000000	0.029991468
3.200000000	0.029730000
3.210000000	0.029547838
3.220000000	0.029420516
3.230000000	0.029320760
3.240000000	0.029228241
3.250000000	0.029136923
3.260000000	0.029046328
3.270000000	0.028956076
3.280000000	0.028890389
3.290000000	0.028863933
3.300000000	0.028837085
3.310000000	0.028808696
3.320000000	0.028778879
3.330000000	0.028747727
3.340000000	0.028715371
3.350000000	0.028681025
3.360000000	0.028644239
3.370000000	0.028604660
3.380000000	0.028562444
3.390000000	0.028517328
3.400000000	0.028469537
3.410000000	0.028419376

3.420000000	0.028367189
3.430000000	0.028342871
3.440000000	0.028317690
3.450000000	0.028289684
3.460000000	0.028258454
3.470000000	0.028223661
3.480000000	0.028185282
3.490000000	0.028143163
3.500000000	0.028097233
3.510000000	0.028048305
3.520000000	0.027999139
3.530000000	0.027947028
3.540000000	0.027892176
3.550000000	0.027835049
3.560000000	0.027775954
3.570000000	0.027715058
3.580000000	0.027652514
3.590000000	0.027588165
3.600000000	0.027521964
3.610000000	0.027453983
3.620000000	0.027384574
3.630000000	0.027313787
3.640000000	0.027242267
3.650000000	0.027169311
3.660000000	0.027094418
3.670000000	0.027017689
3.680000000	0.026939035
3.690000000	0.026858703
3.700000000	0.026776848
3.710000000	0.026693513
3.720000000	0.026608329
3.730000000	0.026521187
3.740000000	0.026431599
3.750000000	0.026339682
3.760000000	0.026245323
3.770000000	0.026163196
3.780000000	0.026085437
3.790000000	0.026008055
3.800000000	0.025928729
3.810000000	0.025847774
3.820000000	0.025765160
3.830000000	0.025680859
3.840000000	0.025594265
3.850000000	0.025504738
3.860000000	0.025412155
3.870000000	0.025328221
3.880000000	0.025246063
3.890000000	0.025161623
3.900000000	0.025074754
3.910000000	0.024985559
3.920000000	0.024893987
3.930000000	0.024799895
3.940000000	0.024703396
3.950000000	0.024604573
3.960000000	0.024503829
3.970000000	0.024447093
3.980000000	0.024400674
3.990000000	0.024353224
4.000000000	0.024305564