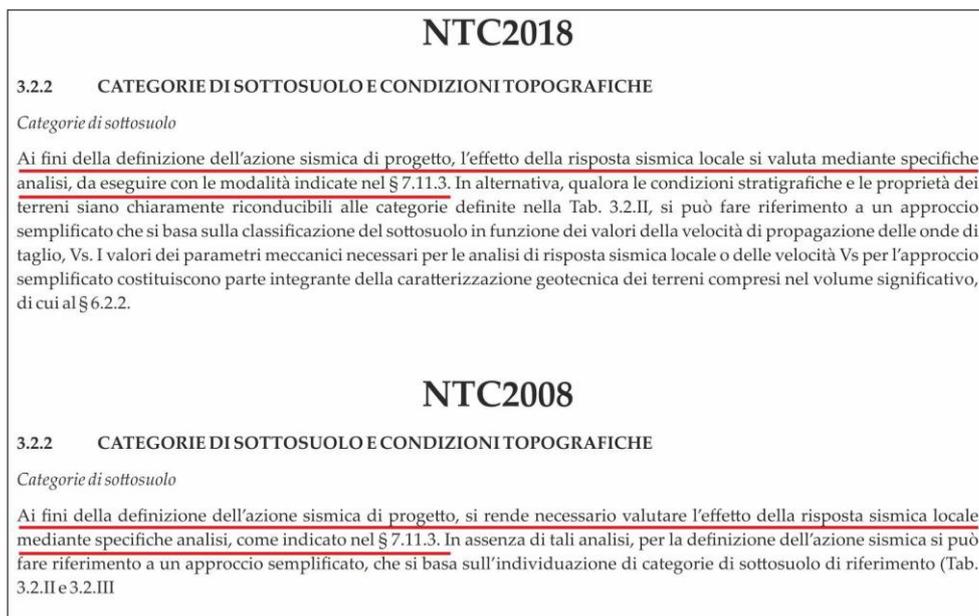




## INDICAZIONI SULLA REALIZZAZIONE E RAPPRESENTAZIONE DELLE ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE PER LA PROGETTAZIONE IN REGIONE TOSCANA

A CURA DI VITTORIO D'INTINOSANTE - UFFICIO PREVENZIONE SISMICA, SETTORE SISMICA – REGIONE TOSCANA

La valutazione dell'azione sismica mediante analisi specifiche di risposta sismica locale (di seguito RSL) permette di definire una realistica valutazione dell'amplificazione locale del sito. Tale approccio, definibile "rigoroso", è la via ufficiale di stima dell'azione sismica per le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni che, in alternativa all'approccio rigoroso, propongono per determinate casistiche semplici l'utilizzo di spettri di risposta semplificati.



**Fig. 1** – Indicazione sul testo delle vigenti NTC (2018) e delle precedenti (2008) delle analisi di RSL come via principale per la stima dell'azione sismica di progetto

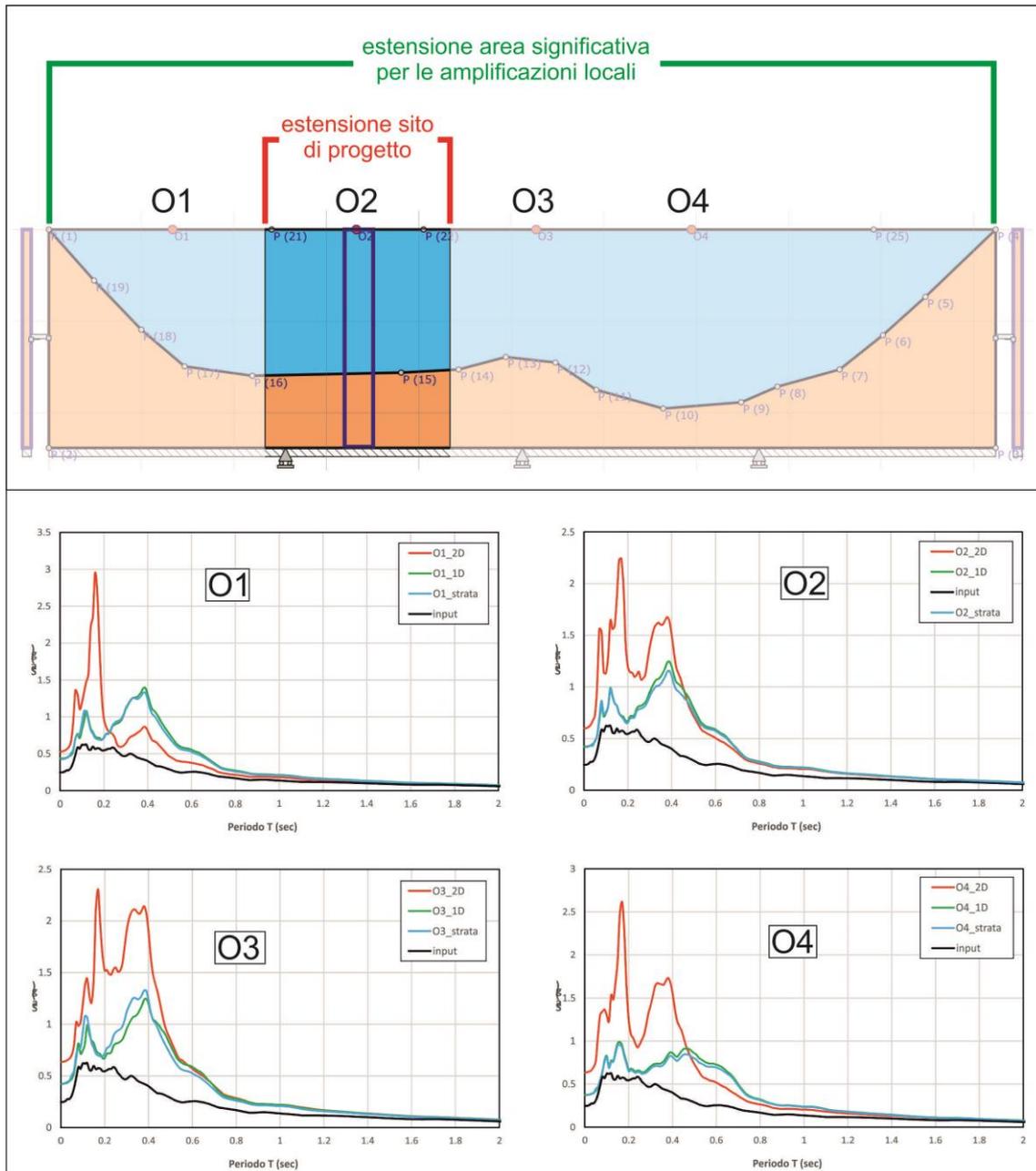
La presenza alla base dell'amplificazione locale sia di aspetti sismostratigrafici (esistenza di contrasti d'impedenza sismica nel profilo sismostratigrafico del sito) sia di geometrie superficiali e/o sepolte (aspetti bidimensionali) indurrà all'utilizzo di codici di calcolo 2D.

L'esistenza dei soli aspetti sismostratigrafici consentirà, invece, di ricorrere ad approcci di tipo monodimensionale, per i quali si presume la presenza di un assetto sismostratigrafico del sito di tipo piano-parallelo. Tale valutazione dovrà essere svolta non solo in riferimento al sito di progetto, ma considerando un intorno significativo per ciò che concerne l'attivazione di fenomeni amplificativi di tipo bidimensionale.

Ad esempio, come visibile in figura 2, il sito di progetto, sebbene presenti limitatamente alla sua estensione un modello sismostratigrafico rapportabile ad un contesto 1D, deve essere analizzato mediante analisi 2D, poiché esso è collocato nell'ambito di una valle alluvionale, dove è plausibile l'attivazione di fenomeni amplificativi bidimensionali. Infatti, dal confronto tra i risultati 2D ed 1D in termini di spettri di risposta in corrispondenza dei medesimi nodi, è possibile notare l'enorme differenza sia come valori di pseudoaccelerazione sia per quanto concerne gli intervalli di periodo in cui si concentra maggiormente l'amplificazione.



Invece, laddove vi è assenza di effetti bidimensionali, sussistono differenze minime (se non trascurabili) tra spettri di risposta elastici 2D ed 1D (figura 3).



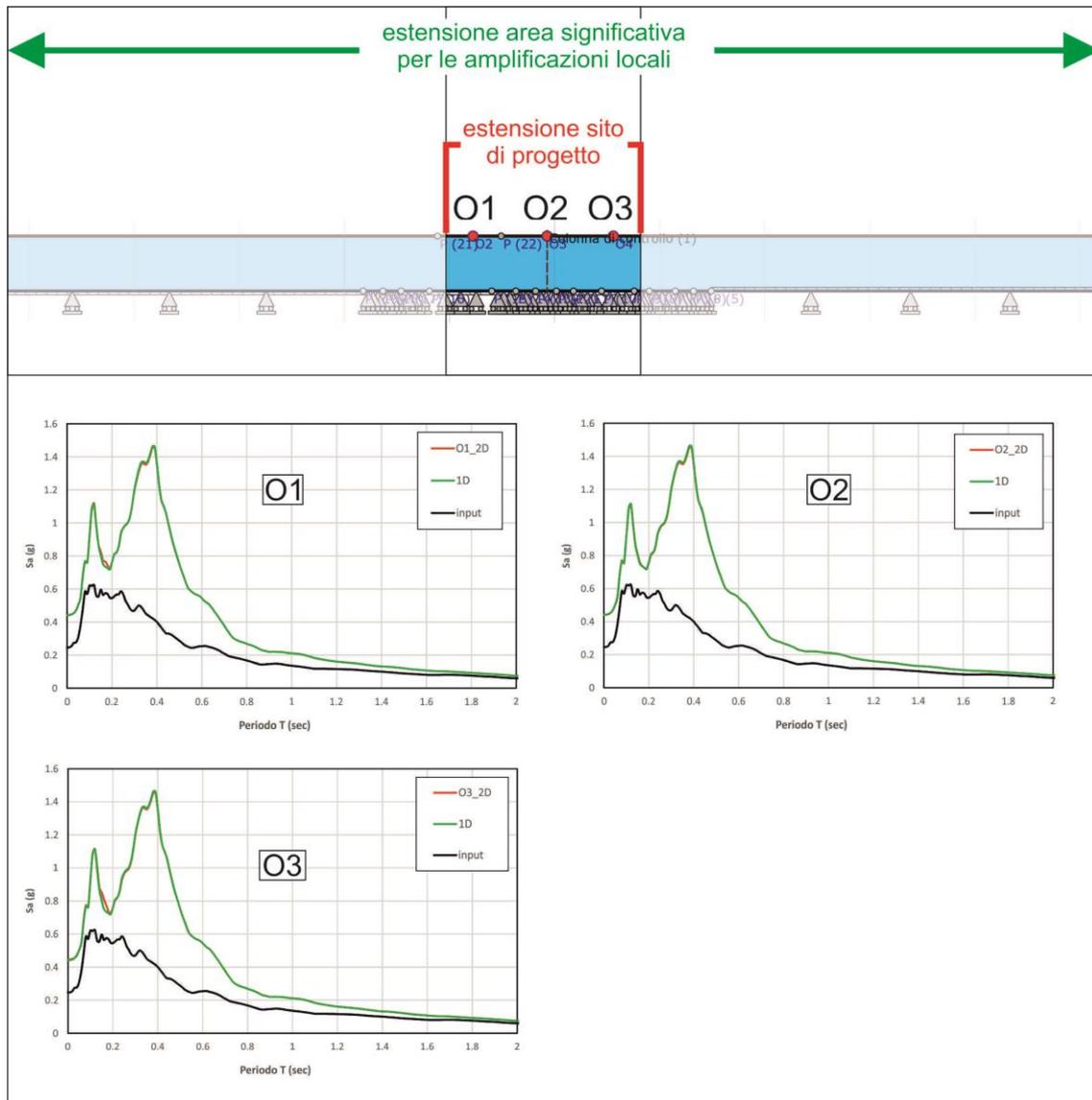
**Fig. 2** – Sito apparentemente adatto ad un approccio monodimensionale, ma all'interno di un contesto alluvionale predisponente all'attivazione di effetti bidimensionali (si noti la differenza tra gli spettri rossi derivanti da analisi 2D e spettri blu e verdi, relativi a modellazioni 1D effettuate mediante differenti softwares)

Al fine di operare una prima valutazione qualitativa sulla possibile insorgenza di effetti bidimensionali (oltre naturalmente alla verifica degli aspetti topografici come previsto dalle vigenti NTC) è possibile riferirsi alla relazione di Bard e Bouchon (1985):

$$\frac{h}{l} \leq \frac{0.65}{\sqrt{C_V - 1}} \quad (1)$$



dove:  $h$  è lo spessore dei depositi di copertura,  $l$  è la semilarghezza della valle e  $C_v$  è il rapporto tra  $V_s$  del substrato e  $V_s$  media delle coperture.



**Fig. 3** – Sito con assetto sismostratigrafico adatto ad un approccio monodimensionale; al contrario di quanto visibile in figura 2, la differenza tra gli spettri rossi 2D e gli spettri verdi, relativi ad una modellazione 1D è praticamente inesistente

Se la relazione è rispettata, si può presumere l'assenza di effetti di natura bidimensionale.

La forma della valle, le peculiari geometrie dei bordi ed i rapporti d'impedenza sismica tra coperture e substrato condizionano e differenziano, poi, la risposta sismica locale all'interno della valle (Gruppo di Lavoro "Abachi", 2015).

La realizzazione di un'analisi di RSL, che sia essa condotta in ambito monodimensionale o bidimensionale, richiede tre elementi imprescindibili:

1. Un **input sismologico**, che prevalentemente è composto da una settupla di accelerogrammi naturali, adeguatamente scelti sulla base della pericolosità sismica del sito;



2. Un **modello sismostratigrafico** derivante dalla definizione del Modello Geologico di Riferimento (**MGR**) mediante apposite indagini di superficie e profonde;
3. Un **modello numerico** in grado di simulare, in maniera semplificata, il comportamento del terreno in oggetto.

### 1. SCELTA DELL'INPUT SISMOLOGICO

Esistono 3 differenti tipologie di accelerogrammi: naturali, artificiali e sintetici. Questi ultimi hanno peculiari procedure di definizione, che ne relegano l'utilizzo da parte di tecnici esperti, poiché richiedono conoscenze dettagliate sulla possibile sorgente sismica e sul suo modello fisico.

Per ciò che riguarda le prime due tipologie di accelerogrammi, l'utilizzo di quelli artificiali comporta una maggior facilità di analisi rispetto all'utilizzo di accelerogrammi naturali ed, inoltre, i primi sono definibili in maniera più agevole dei secondi.

Tuttavia, come già riportato nelle NTC2008, anche le Vigenti Norme non consentono l'utilizzo di storie temporali artificiali nelle analisi dinamiche di opere e sistemi geotecnici, a cui afferiscono le attività in oggetto (Cap. 3.2.3.6).

Pertanto, come da comune prassi nella progettazione edilizia, vengono utilizzate storie temporali registrate, presenti in banche dati nazionali e/o internazionali, selezionate mediante le condizioni di sismocompatibilità (attinenza nei confronti della pericolosità sismica del sito e dello stile tettonico dell'area) e spettrocompatibilità nei confronti dello spettro target del sito (categoria A – T1), che rappresenta la stima semplificata della pericolosità sismica di base del sito.

Relativamente all'utilizzo di accelerogrammi naturali, le NTC2018 riportano in sintesi le seguenti prescrizioni:

4. L'uso di accelerogrammi (o meglio storie temporali) registrati è ammesso, a condizione che la loro scelta sia rappresentativa della sismicità del sito e adeguatamente giustificata in base alle caratteristiche sismogenetiche della sorgente, alle condizioni del sito di registrazione, alla magnitudo, alla distanza dalla sorgente e alla accelerazione orizzontale attesa al sito;
5. Le storie temporali del moto del terreno registrate devono essere selezionate e scalate in modo tale che i relativi spettri di risposta approssimino gli spettri di risposta elastici nel campo dei periodi propri di vibrazione di interesse per il problema in esame;
6. Utilizzare le condizioni di compatibilità spettrale media definite per i segnali artificiali anche per quelli naturali, avendo cura in ogni caso di rispettare le condizioni geologiche di sito e di scegliere accelerogrammi il cui spettro è, per quanto possibile, generalmente simile a quello di riferimento;
7. Gli accelerogrammi possono essere scalati linearmente in ampiezza limitando il fattore di scala nel caso di segnali provenienti da eventi di piccola magnitudo;
8. Gli effetti sulla struttura sono rappresentati dai valori medi degli effetti più sfavorevoli ottenuti dalle analisi (se si utilizzano almeno **sette diversi gruppi di accelerogrammi**) o dai valori più sfavorevoli degli effetti, in caso di utilizzo di meno di 7 storie temporali;
9. In nessun caso si possono adottare meno di **tre gruppi di accelerogrammi**.

Esistono, al giorno d'oggi, differenti software in grado di coadiuvare l'utente nella fase di selezione delle storie temporali da utilizzare per le analisi di RSL. Essi, in prima istanza, possono essere suddivisi in tre categorie:

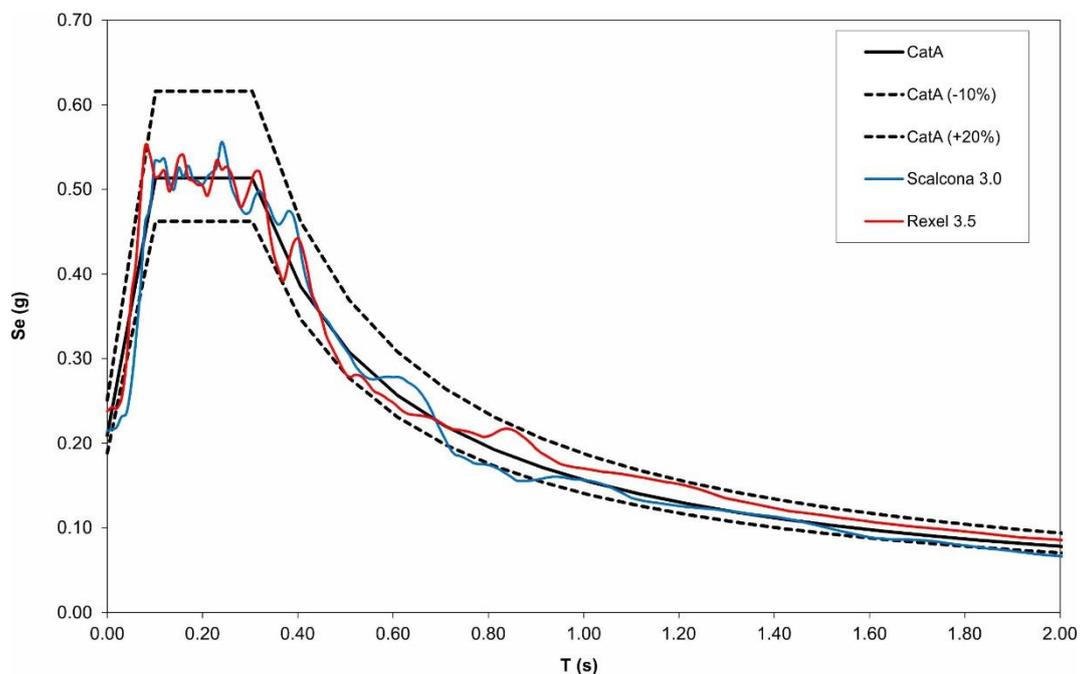


- ❑ **Automatici:** estrema facilità computazionale a cui si contrappone, però, sia la presenza di soluzioni limitate in numero sia l'impossibilità da parte dell'utente di controllare il dato;
- ❑ **Semplificati:** in questo caso l'onere computazionale è maggiore in riferimento alla categoria precedente, poiché è l'utente a dover compiere scelte su alcune modalità di ricerca e filtri da effettuare nei criteri di selezione. Il controllo del dato può essere definito parziale;
- ❑ **Approfonditi:** si tratta di interfacce avanzate di selezione delle storie temporali, in cui l'onere computazionale è elevata ma con il vantaggio di ottenere un controllo totale sul dato di output e sulle modalità di selezione, con l'ulteriore vantaggio di lavorare sempre in riferimento a banche dati aggiornate.

**La scelta delle fonti, delle procedure e, conseguentemente, dei software per la selezione dell'input sismologico è ovviamente lasciata alla libertà del tecnico incaricato.**

Tuttavia, si segnala la presenza in Regione Toscana, del software regionale SCALCONA 3.0 (SCALing of COmpatible Natural Accelerograms), scaricabile al link: <http://www.regione.toscana.it/-/accelerogrammi-di-riferimento-per-la-toscana>.

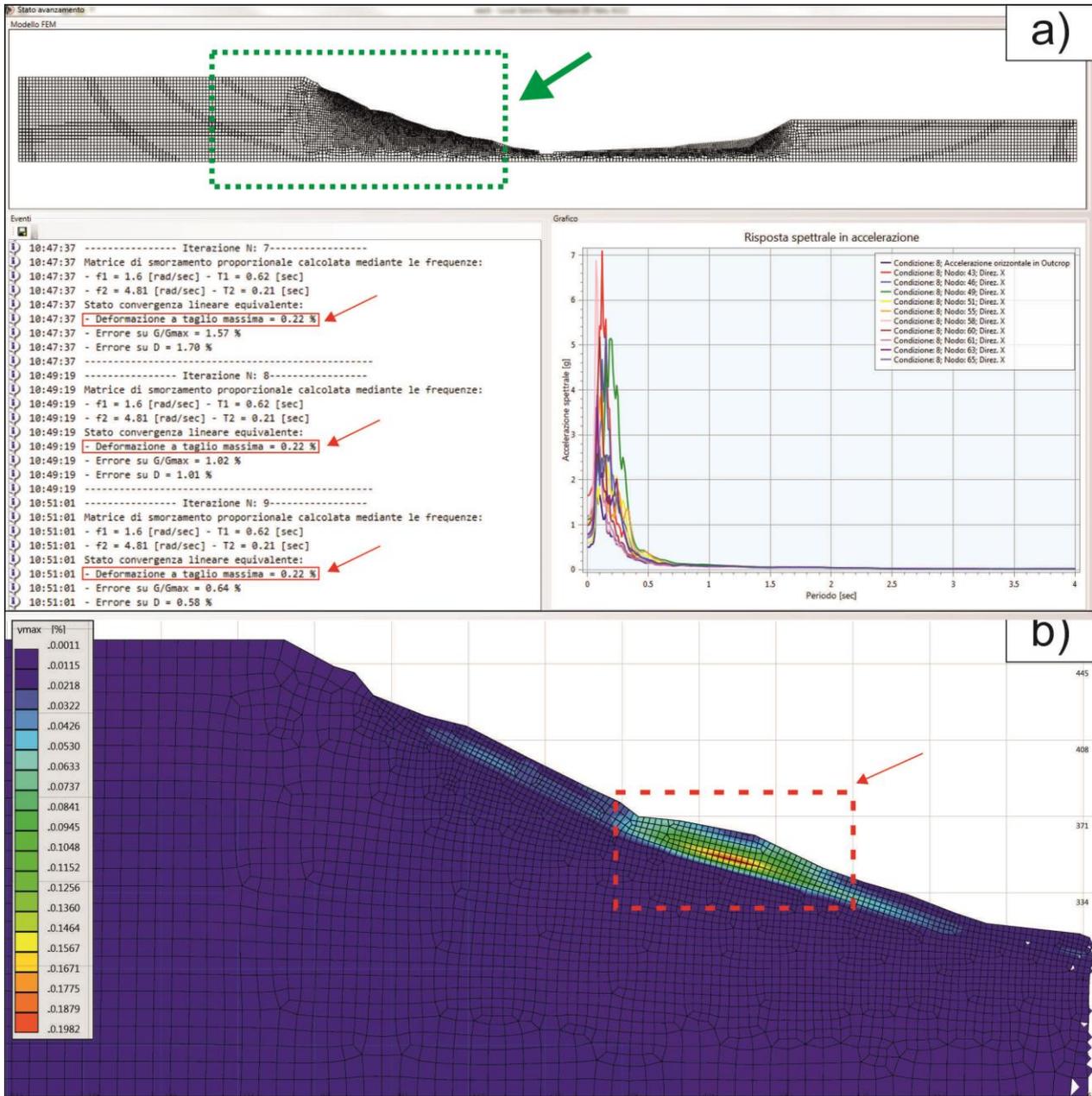
Tale codice di calcolo è stato definito mediante la procedura messa a punto dall'Università di Pavia nell'ambito di un Accordo di Collaborazione Scientifica con la Regione Toscana. (Zuccolo et al., 2011; Rota et al., 2012; Zuccolo et al., 2012; Zuccolo et al., 2014). In particolare, per tutto il territorio toscano, è possibile selezionare differenti periodi di ritorno (ossia 30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 712 e 949 anni).



**Fig. 4** – Confronto tra spettri di risposta medi relativi a due differenti settuple utilizzate per analisi di RSL nello stesso sito



In assenza del periodo di ritorno desiderato e qualora dovessero insorgere problemi sull'utilizzo delle settuple estratte mediante il codice di calcolo SCALCONA 3.0 sarà necessario rivolgersi ad altre procedure per l'estrazione degli accelerogrammi. Una problematica potrebbe essere la **deformazione di soglia volumetrica ( $\gamma_p$ )** nelle analisi di RSL, se condotte mediante codici di calcolo operanti secondo un modello lineare-equivalente. Tale soglia segna il passaggio dal campo delle deformazioni elastiche non lineari a quello delle deformazioni elasto-plastiche.



**Fig. 5** – Confronto tra spettri di risposta medi relativi a due differenti settuple utilizzate per analisi di RSL nello stesso sito

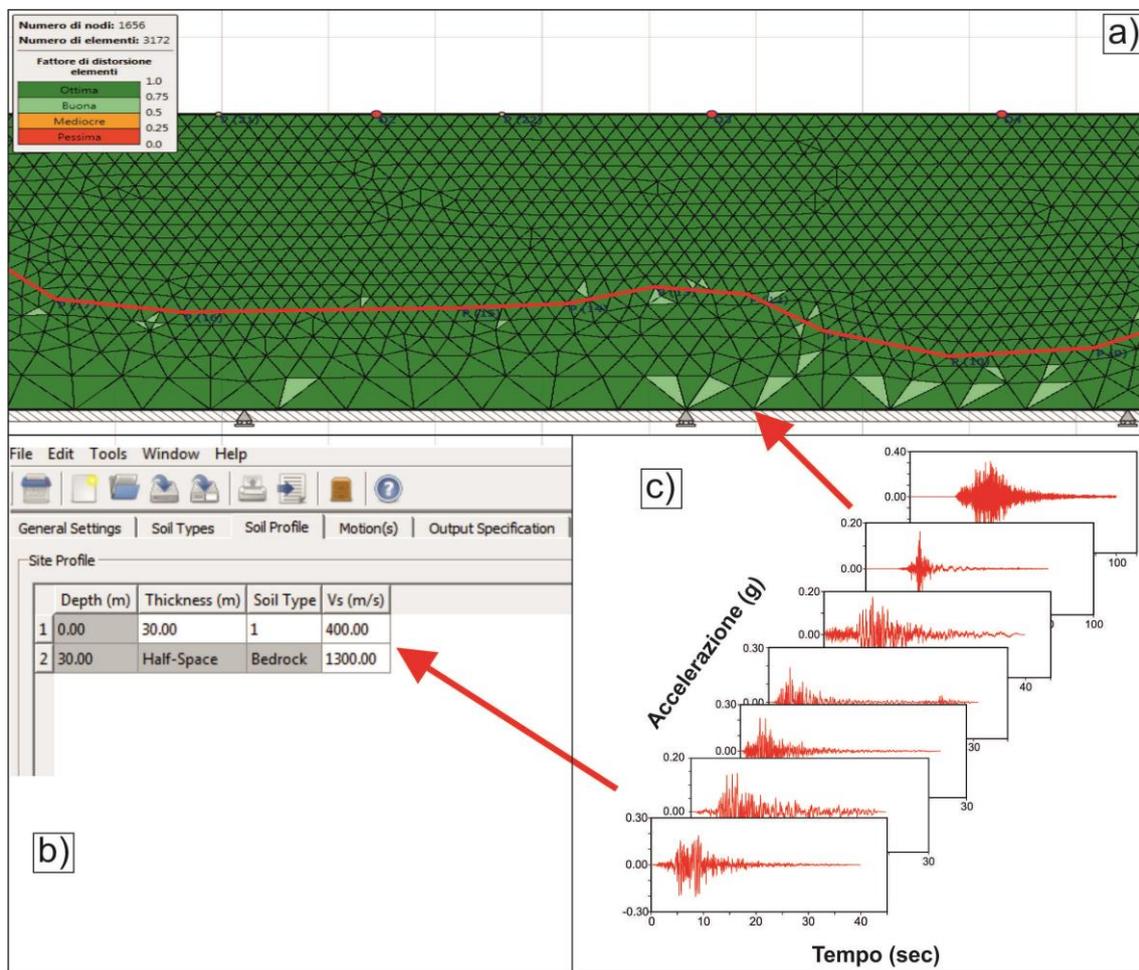
In questi casi, essendo i risultati dell'analisi non affidabili, le opzioni sono due: sostituire le storie temporali che generano tale deformazione rieseguendo l'analisi controllando al termine il nuovo valore di deformazione raggiunto, oppure eseguire l'analisi utilizzando un codice di calcolo



più idoneo (ad esempio softwares di analisi di RSL operanti in campo plastico e non in campo lineare-equivalente).

In figura 4 sono illustrati e messi a confronto gli spettri medi di input, derivanti da due differenti modalità di estrazione (Scalcona 3.0 con curva blu e Rexel 3.5 con curva rossa) ma entrambi spettrocompatibili con lo spettro di cat. A-T1 del sito. L'utilizzo della settupla derivante da Scalcona 3.0, in questo caso, ha generato un (seppur limitato) superamento della soglia volumetrica (figura 5), risolto rieseguendo l'analisi con la settupla di storie temporali estratte mediante Rexel 3.5.

Il ricorso a differenti tipologie di definizione dell'input sismologico può essere effettuato anche per migliorarne le caratteristiche di idoneità in termini di spettrocompatibilità, sismocompatibilità e fattore di scala. Infatti, in riferimento al confronto in figura 4, si è migliorato anche il fattore di scala medio, pari a 2.1 per Scalcona 3.0 (parametro non modificabile dall'operatore) e ad 1 per Rexel 3.5.



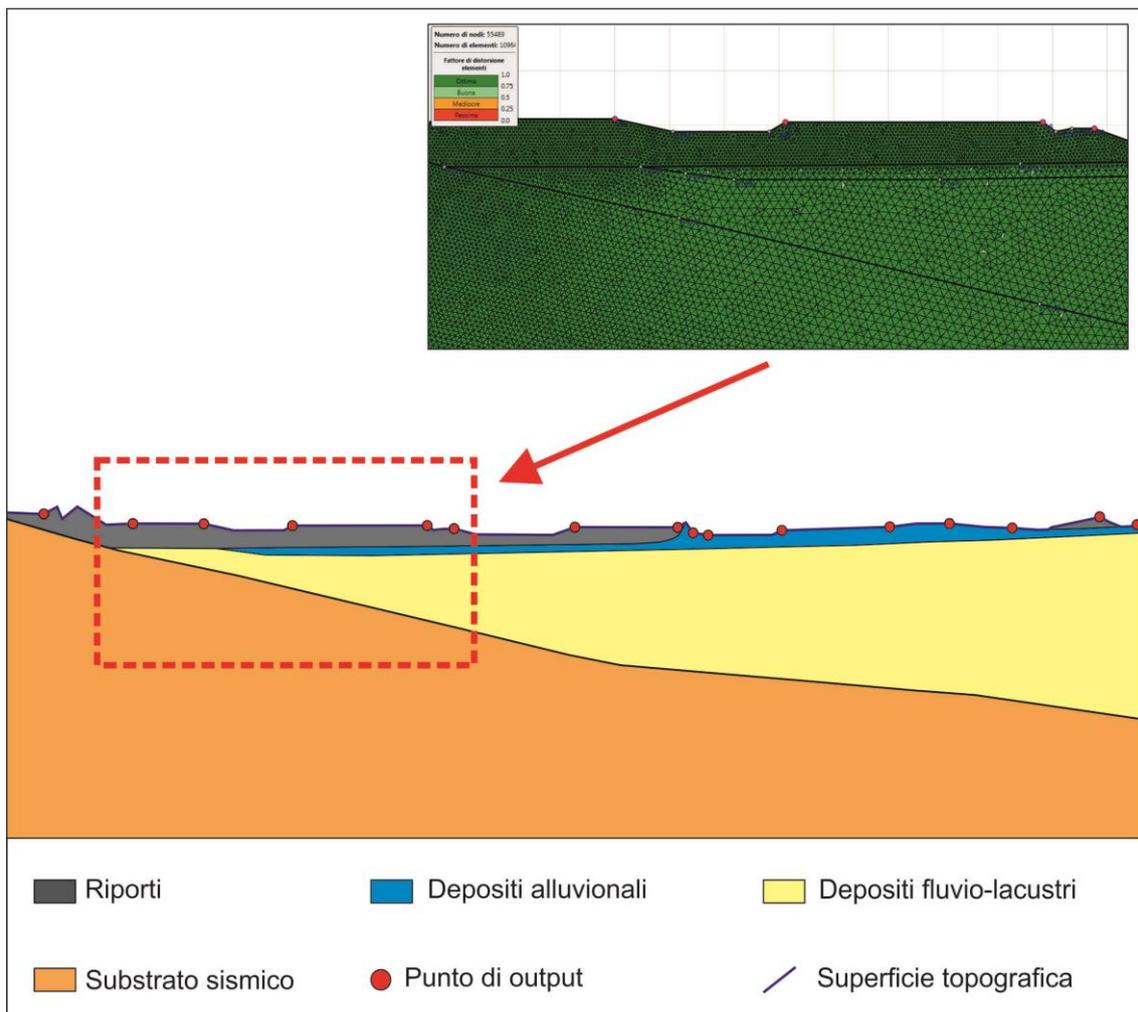
**Fig. 6** – Livello di imposizione dell'input sismico in (a) corrispondenza della base trasmittente per una sezione 2D elaborata con Lsr2D (<http://www.stacec.com>) e (b) in riferimento al tetto del substrato sismico per un'analisi 1D realizzata mediante software Strata. L'input sismico è costituito da una settupla di accelerogrammi naturali estratti sulla base dei criteri di sismocompatibilità e spettrocompatibilità (c)



A prescindere dalla fonte utilizzata, le storie temporali selezionate come input sismologico in un'analisi di RSL, adeguatamente scalate (se necessario e/o se il software di estrazione non compia in automatico tale operazione come, ad esempio, Scalcona 3.0) vanno caricate nel software utilizzato per l'analisi di RSL e poste in corrispondenza dell'interfaccia tra substrato e coperture. Tuttavia, le geometrie sepolte articolate, quali le valli, presentano bedrock che si approfondiscono ed arrivano a volte, più o meno gradualmente, in superficie.

Pertanto, la geometria variabile del bedrock non consente di individuare una sola profondità di deconvoluzione. In questi casi, si considera uno spessore di roccia (di alcuni metri e dello stesso tipo del bedrock) al di sotto dello strato di bedrock più profondo che si prolunga lateralmente, costituendo una vera e propria frontiera orizzontale inferiore a cui verrà applicato l'input.

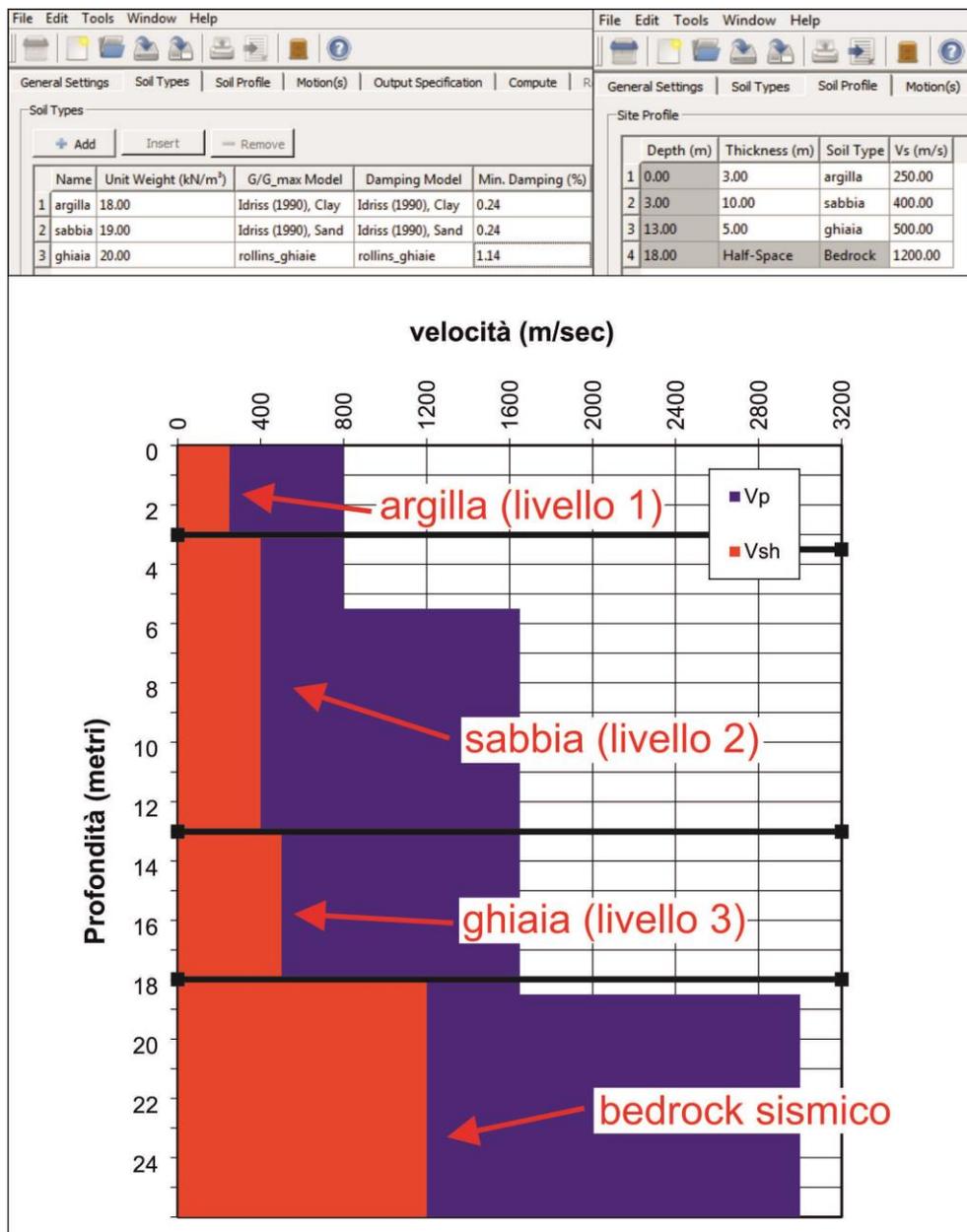
In figura 6 è visibile il livello di imposizione degli input sismici in corrispondenza della base trasmittente di una sezione bidimensionale (fig. 6a) e del tetto del substrato sismico in un profilo sismostratigrafico monodimensionale (fig. 6b).



**Fig. 7** – Sezione geologico-tecnica utilizzata per l'esecuzione di analisi di RSL 2D mediante il codice di calcolo LSR2D (<http://www.stacec.com>). Nel riquadro è possibile notare la discretizzazione in mesh triangolari, necessaria per l'esecuzione dell'analisi mediante approccio agli elementi finiti

## 2. DEFINIZIONE DEL MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO DI INPUT

Il modello geometrico da sottoporre ad analisi di risposta sismica locale dovrà derivare dalla definizione del Modello Geologico di Riferimento per il sito in esame e potrà essere rappresentato da una o più sezioni geologico-tecniche nel caso di analisi di tipo bidimensionale (figura 7) oppure (qualora il modello del sito sia concorde con un assetto stratigrafico di tipo piano-parallelo) da un profilo sismostratigrafico 1D, come visibile in figura 8.

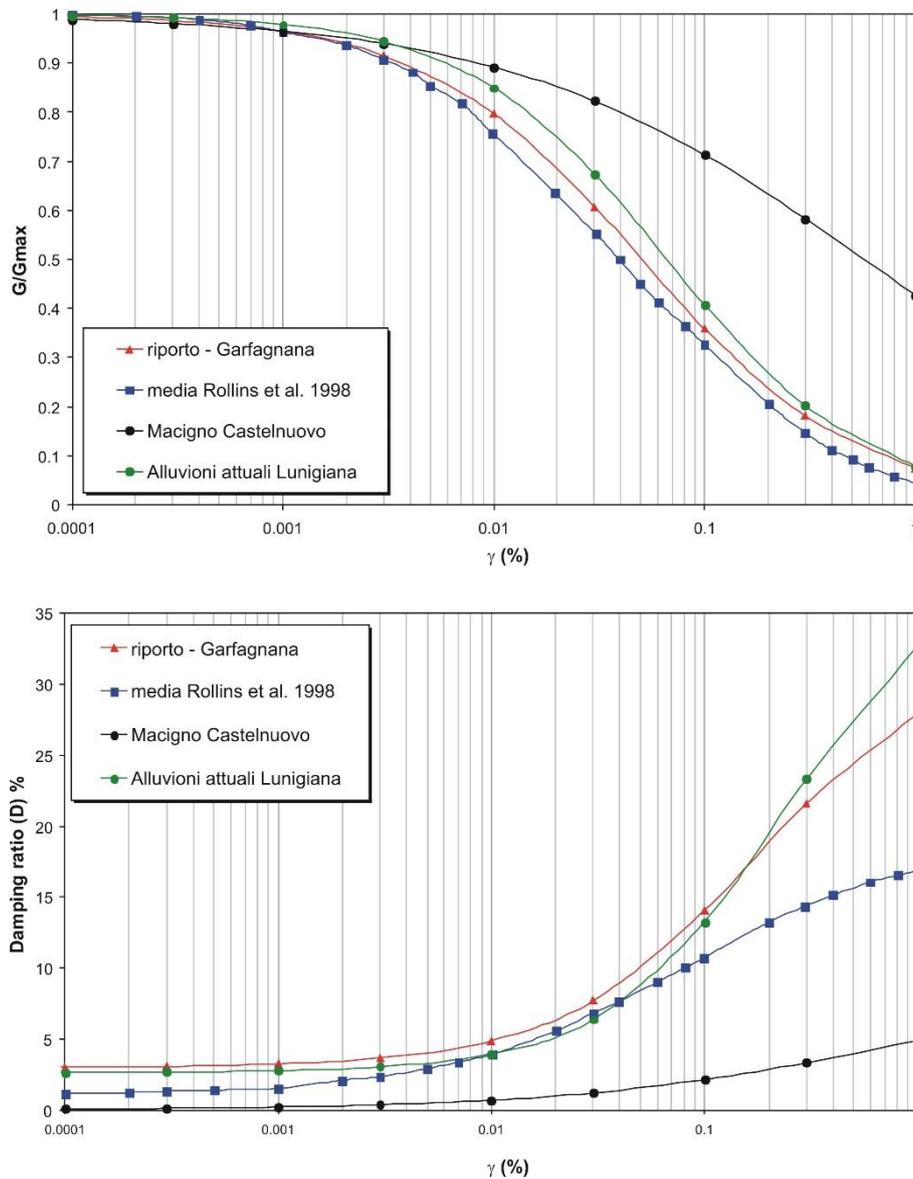


**Fig. 8** – Profilo sismostratigrafico utilizzato per l'esecuzione di analisi di RSL 1D mediante il codice di calcolo Strata (Kottke & Rathje, 2008)

Inoltre, sempre in considerazione dell'assetto sismostratigrafico desunto dalla definizione del Modello Geologico di Riferimento, sarà scelto anche il tipo di approccio da utilizzare per le analisi di RSL. Solitamente le analisi di Risposta Sismica Locale vengono condotte utilizzando approcci di tipo lineare-equivalente.



Tale approccio simula il comportamento non lineare del terreno utilizzando le curve  $G-\gamma$  e  $D-\gamma$  associate ad ogni tipologia di terreno.



**Fig.9** – Curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato  $G(\gamma)$  e di incremento del rapporto di smorzamento  $D(\gamma)$  con la deformazione tangenziale utilizzate nella MS3 di Fivizzano (MS). Da Gruppo di Lavoro Fivizzano (2019)

Il modulo di taglio  $G$  e il fattore di smorzatore  $D$  vengono fatti dipendere dal livello della deformazione tangenziale  $\gamma$  indotta dalle sollecitazioni sismiche. A partire dai valori iniziali dei parametri di rigidezza e smorzamento con una prima analisi si determina un primo valore caratteristico (o effettivo) della deformazione tangenziale  $\gamma_{eff}$ . Dalle curve  $G/G_0-\gamma$  e  $D-\gamma$  si determinano nuovi valori di  $G$  e  $D$  e si esegue una nuova analisi determinando un nuovo valore caratteristico. Il procedimento viene ripetuto fino a quando lo scarto percentuale tra i valori di  $G$ ,  $D$  e  $\gamma_{eff}$  viene ritenuto arbitrariamente accettabile. (Gruppo di Lavoro Fivizzano, 2019).

Pertanto, i parametri necessari per la realizzazione di un'analisi di RSL (tenendo conto di un approccio di tipo lineare-equivalente) sono:



- ❑ Valori di **V<sub>s</sub>** (velocità di propagazione delle onde di taglio). Tale parametro servirà sia per descrivere il comportamento del terreno in campo dinamico (essendo legato alla definizione del modulo di taglio G) sia per determinare la dimensione ottimale della mesh (con cui verrà discretizzata la sezione da modellare) o dello spessore dei sottostrati in un'analisi monodimensionale;
- ❑ Valori di **V<sub>p</sub>** (velocità di propagazione delle onde di compressione) necessari nel caso di un **approccio bidimensionale** agli elementi finiti, poiché per ogni elemento sarà necessario indicare il valore del coefficiente di Poisson dinamico (definito da V<sub>p</sub> e V<sub>s</sub>) legato alle modalità di deformazione dell'elemento stesso;
- ❑ Pesi di volume dei litotipi in oggetto;
- ❑ Curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato G(γ) e di incremento del rapporto di smorzamento D(γ) utilizzate per simulare il comportamento non lineare dei terreni mediante il legame costitutivo lineare equivalente.



**Fig.10** – Schermata del portale della banca dati del Programma VEL. a) Finestra di selezione dei criteri di ricerca delle curve dinamiche G(γ) e D(γ); b) Elenco di tutte le curve estrapolate sulla base dei criteri di ricerca adottati; c) finestra per il download delle curve medie

Tali curve sono definite mediante prove geotecniche di laboratorio in campo dinamico (un esempio è visibile in fig. 9); in alternativa è possibile, conoscendo le caratteristiche litologiche del sismostrato in oggetto, estrapolare tali curve da banche dati nazionali o internazionali.

A tal proposito, si segnala che sul portale delle indagini del Progetto VEL – Regione Toscana, reperibile al link:

<http://150.217.73.23/BancaDatiVEL/#>

sono disponibili quasi 300 curve G(γ) e D(γ) relative ai terreni indagati nelle aree a maggior pericolosità sismica della regione Toscana.

Come visibile in figura 10, la selezione può essere effettuata su base litologica o formazionale, avendo anche la possibilità di indicare una specifica area tra quelle indagate. In figura è riportato un esempio di selezione relativa alle alluvioni terrazzate dell'area del Mugello.



Effettuata la selezione è possibile consultare le singole coppie di curve  $G(\gamma)$  e  $D(\gamma)$  con il riferimento al sondaggio da cui è stato prelevato il campione sottoposto a prova dinamica di laboratorio (prevalentemente prove di colonna risonante), oppure effettuare il download delle curve medie, elaborate secondo il metodo di Yokota (Yokota et al. 1981).

In tabella 1 è presentata una tabella riepilogativa di tutti i parametri necessari per la realizzazione di un'analisi di RSL in assetto bidimensionale secondo un modello lineare-equivalente. Si tenga presente che il valore di velocità  $V_p$ , nel caso di analisi monodimensionali, può non essere direttamente necessario all'analisi.

**Tab.1** – Esempio di parametrizzazione dinamica necessaria per analisi di RSL bidimensionali secondo un approccio lineare-equivalente

sismostrato	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	Rapporto di Poisson	Peso di volume (kN/mc)	Modulo di taglio G (kPa)	curve dinamiche $G(\gamma)$ e $D(\gamma)$
riporti (h)	455	185	0.40	17.0	59329	riporti_mugello
conoide (m)	1800	380	0.48	19.0	279765	conoidi_VEL
colluvioni (b8)	390	190	0.34	18.0	66260	colluvi_mugello
alluvioni (SIV1/SIV3)	1105	405	0.42	18.0	301062	alluvioni_sanpiero
detrito versante (a)	780	290	0.42	18.0	154362	ghiaie_rollins1998
lacustre (al2)	1605	435	0.46	19.0	366611	lacustre_mugello
arenarie (PLO)	3225	1195	0.42	23.0	3349167	linear 1%

La caratterizzazione fisico-meccanica deve essere completa a partire dalla quota di riferimento ai sensi delle vigenti NTC (ad esempio il piano di imposta delle fondazioni) fino all'interfaccia coperture-substrato, livello sul quale porre i terremoti di input.

In figura 7 abbiamo osservato una sezione geologico-tecnica sottoposta ad analisi di risposta sismica locale; le formazioni oggetto di studio sono state discretizzate mediante elementi finiti triangolari (riquadro in alto a destra) le cui dimensioni massime sono state selezionate secondo la regola (Kuhlemeyer e Lysmer, 1973):

$$D_{max} = \lambda / k = (T V_s)/k \quad (1)$$

dove  $V_s$  è la velocità di propagazione delle onde di taglio (ricavata dalle indagini geofisiche dirette ed illustrate nei precedenti capitoli) e  $T$  è il periodo corrispondente alla più corta onda sismica propagabile e posto pari a 0.05s (frequenza massima propagata pari a 20Hz). Tale periodo è quindi il minor periodo per cui si può ritenere attendibile il dato di output. Il coefficiente  $k$  è stato posto pari a 8 (Lanzo & Silvestri, 1999).

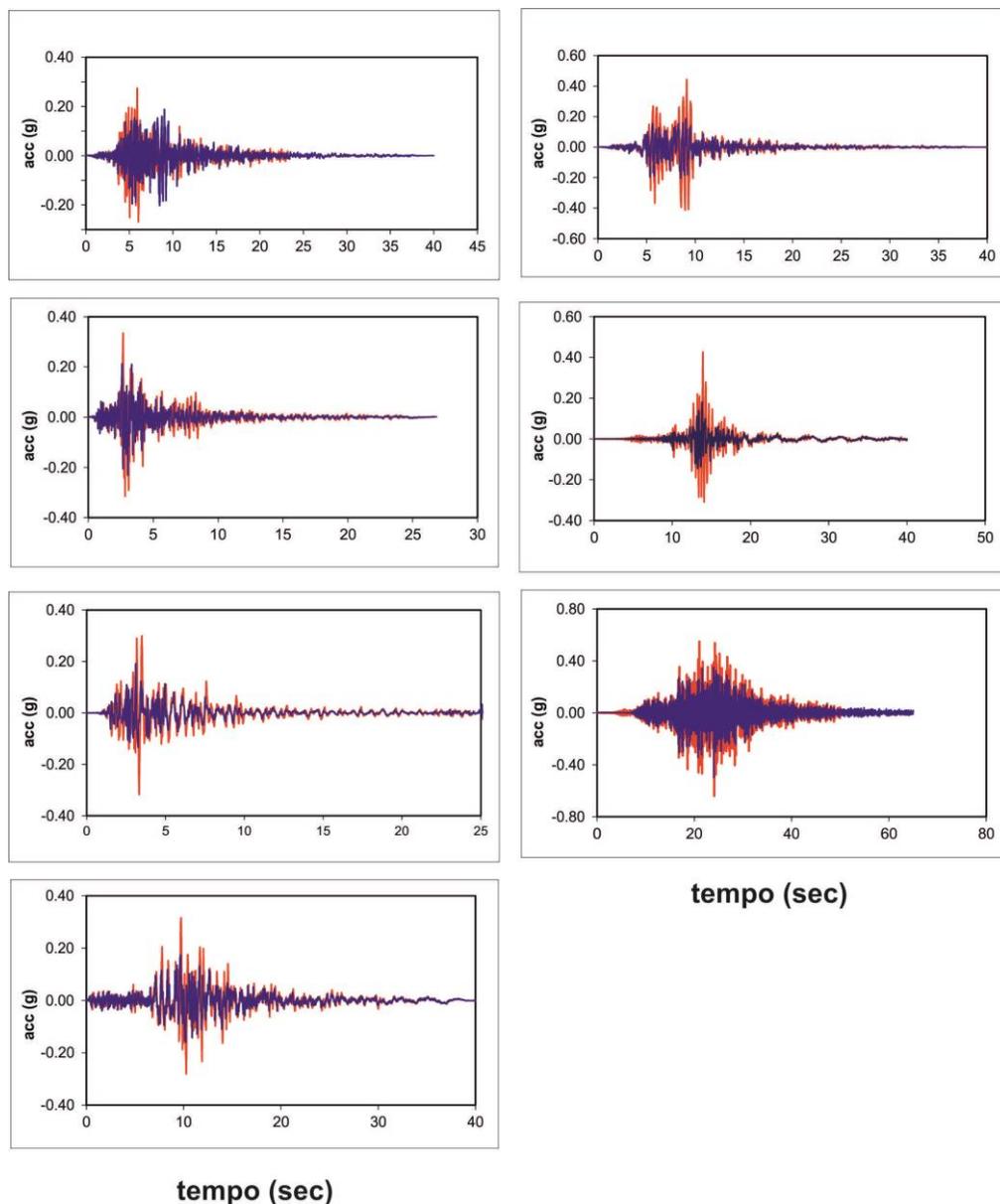
Nella trasposizione del modello geologico-tecnico delle sezioni in modelli numerici 2D sarà necessario definire (oltre che i valori dei parametri fisico-meccanici derivati dalla campagna di esplorazione del sottosuolo a corredo del progetto):

- ❑ Le geometrie dei litotipi investigati, così come desunto dalla ricostruzione del modello geologico-tecnico;
- ❑ Le condizioni di vincolo lungo i bordi dei modelli numerici. Infatti, in assetto 2D bisogna valutare le condizioni di bordo, inserendo vincoli di oscillazione impedita, smorzatori e/o



colonne free-field al fine di evitare che l'energia sismica irradiata dalla base trasmittente (limite inferiore in cui vengono posti gli accelerogrammi di input) venga riflessa dai bordi della sezione, reimmettendosi nello spazio indagato e fornendo amplificazioni elevate e non realistiche.

Una buona regola è quella di "estendere" ogni lato della sezione di una distanza pari alla semi larghezza della sezione stessa. Tale approccio, in presenza di terreni con non trascurabile dissipazione, riesce a gestire le anomalie in corrispondenza dei bordi allontanandoli dall'area d'interesse. La possibilità di utilizzare colonne free-field riduce di molto l'estensione dovuta, che in corrispondenza di terreni con basso damping dovrebbe essere molto elevata con conseguenti oneri computazionali molto alti.

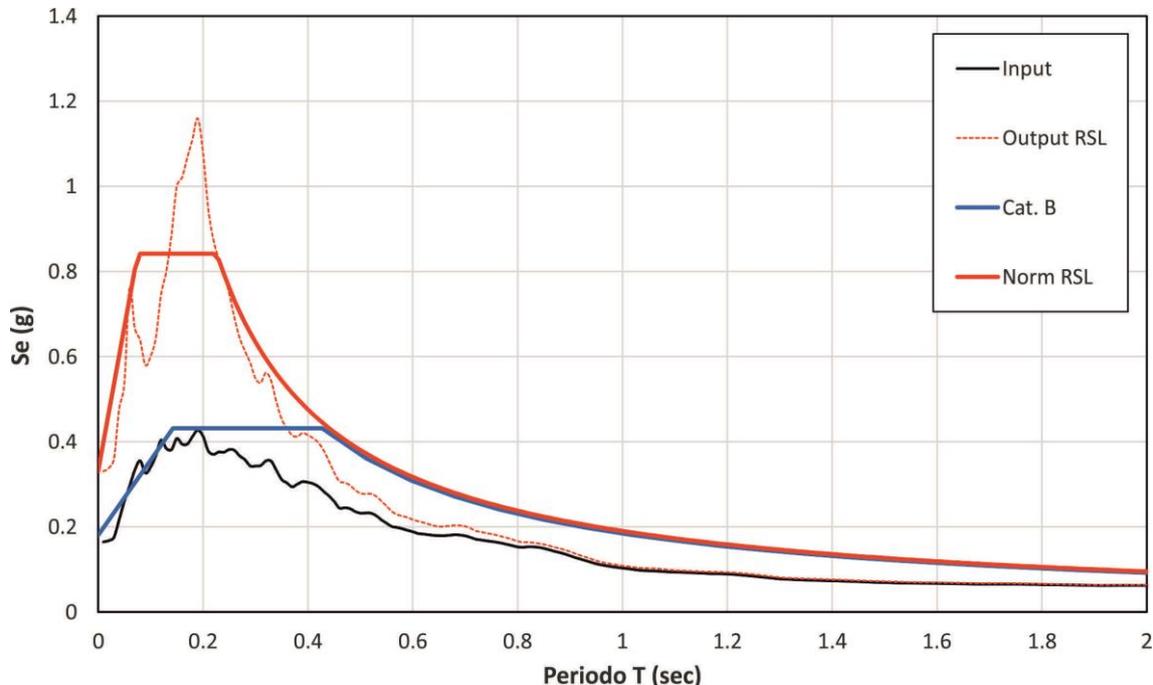


**Fig.11** – Confronto tra output (curve rosse) ed input (curve blu) in termini di storie temporali per una settupla di accelerogrammi, utilizzata come input sismico per un'analisi di RSL



### 3. DATI DI OUTPUT

L'attività finale, una volta estrapolati dal software di analisi di RSL i dati di output, sarà quella di rappresentare tali risultati mediante importazione e graficizzazione tramite apposito foglio di calcolo.



**Fig.12** – Confronto tra output (curve rosse) ed input (curva nera) in termini di spettri di risposta elastici. E' riportato anche lo spettro elastico semplificato relativo alla Categoria di sottosuolo corrispondente al profilo sismostratigrafico analizzato

La rappresentazione dovrà riguardare, per ciò che concerne i parametri di input delle analisi ed i relativi software utilizzati, almeno i seguenti dati:

- Definizione scelta progettuale (**Vn, Cu, Stati Limite**) ed ubicazione del sito;
- Determinazione dell'**accelerazione di base** ed in generale dei parametri indipendenti;
- Parametri di **disaggregazione**;
- Modalità di estrazione degli input sismici e loro rappresentazione. Indicazione del **codice di calcolo** utilizzato e del **fattore di scala medio finale**;
- Indicazione della sismostratigrafia utilizzata nell'analisi (**vs, spessori, peso di volume e tipologia materiali**) e **curve G/G0 e D**;
- Indicazione del tipo di **software di analisi di RSL** e certificazione del grado di qualità in output dell'analisi (ad esempio l'**errore residuo**).

Nel prossimo capitolo sarà presentato un esempio di analisi di RSL in cui verranno riportati ed illustrati tutti gli aspetti elencati.

L'esecuzione di analisi di risposta sismica locale consente la determinazione di molteplici parametri e strumenti di output per ognuno degli stati limite richiesti dallo strutturista sulla base delle scelte progettuali di sua competenza, quali ad esempio: le storie temporali di output, gli spettri di risposta elastici, gli spettri normalizzati e quelli di progetto oltre che i valori puntuali di accelerazione al sito ( $a_{max}$ ) e su basamento rigido ( $a_g$ ).



L'azione sismica, ai sensi delle vigenti NTC, è valutata mediante accelerogrammi (o meglio storie temporali) di output utilizzati per l'esecuzione sulla struttura in esame di analisi dinamiche non lineari.

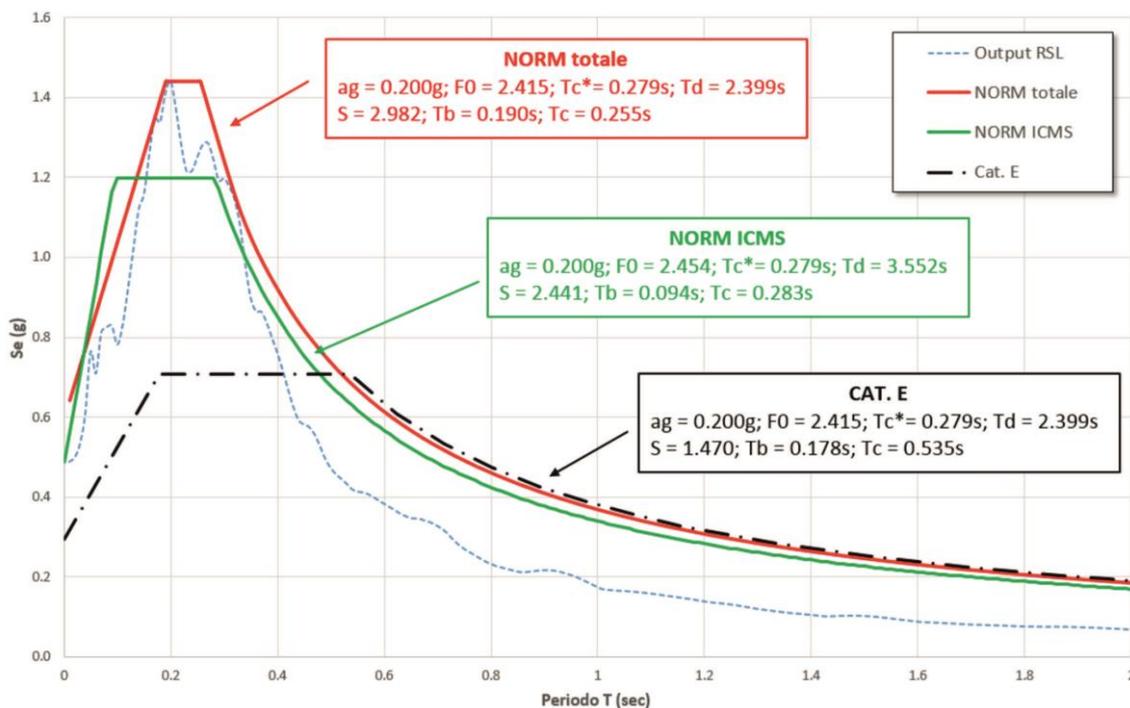
Le storie temporali, solitamente costituite da 7 accelerogrammi, non devono essere mediate, ma fornite separatamente allo strutturista (figura 11). Inoltre, a corredo dell'analisi, bisogna rappresentare lo spettro elastico (smorzamento convenzionale al 5%) a confronto con quello di input (spettro medio delle 7 storie temporali utilizzate come input sismologico) e, se possibile, con lo spettro semplificato di normativa.

Nella maggior parte dei casi, però, la valutazione dell'azione sismica viene effettuata mediante spettri di risposta. In questo caso, oltre che lo spettro elastico di output (da confrontare sempre con il suo omologo di input e lo spettro semplificato di normativa come riportato in figura 12), può essere richiesto anche lo spettro normalizzato.

La normalizzazione è una procedura che permette di trasformare uno spettro di RSL in uno spettro con andamento regolarizzato, simile a quello degli spettri semplificati di normativa

Sono presenti differenti metodi di normalizzazione, i cui principali sono:

1. **Normalizzazione totale:** in cui lo spettro di RSL nella sua interezza viene sottoposto a normalizzazione (il tratto ad accelerazione costante detto plateau comprende tutto il picco in pseudoaccelerazione);
2. **Normalizzazione su spettri lisciati:** in cui viene applicata la normalizzazione totale, ma su uno spettro a cui è stata applicata una "lisciatura" detta smoothing;
3. **Normalizzazione ICMS:** si applicano le formule per il calcolo dei fattori FA ed FV (ICMS, 2008) secondo la procedura sviluppata da Pergalani e Compagnoni (2013) e, successivamente, nell'ambito della MS3 di Fivizzano (GdL Fivizzano, 2017).



**Fig.13** – Confronto tra differenti modalità di normalizzazione (totale in rosso ed ICMS in verde) di uno stesso spettro di RSL. E' presentato anche lo spettro semplificato di normativa che, come succede sovente, tende a sottostimare l'azione sismica di progetto

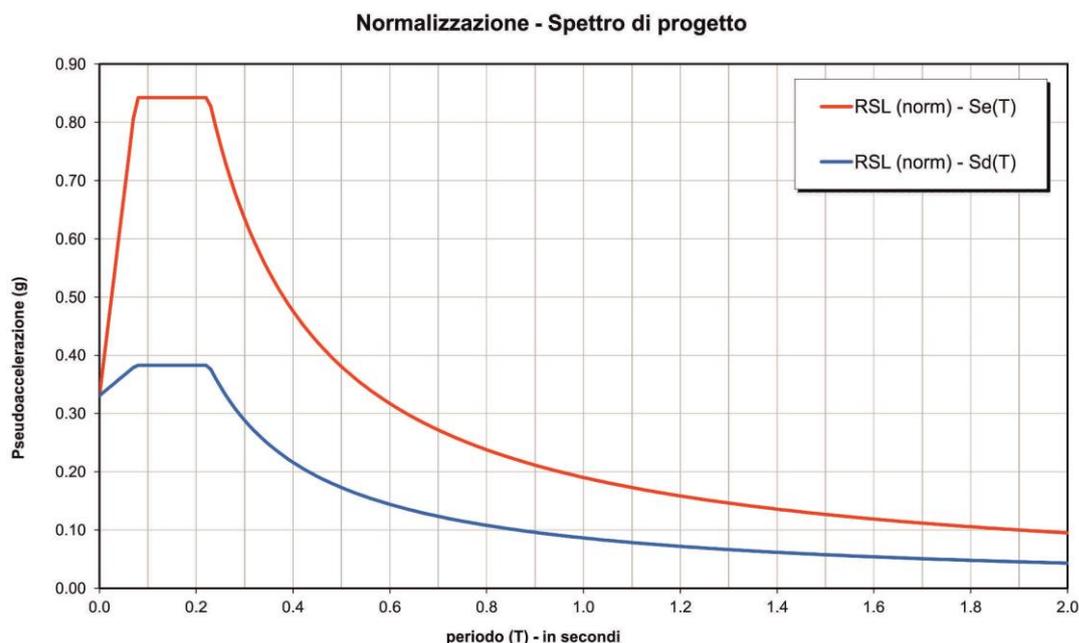


Pur non essendoci in regione Toscana obblighi normativi e/o regolamentari per la scelta di un metodo di normalizzazione rispetto ad un altro, si ritiene preferibile l'opzione n.3 (Normalizzazione ICMS) perlomeno per due motivi: il primo è legato alla migliore coerenza statistica dell'approccio, in cui l'elevazione e l'ampiezza del plateau sono determinate sulla base del valore medio in pseudoaccelerazione ed in pseudovelocità nell'intorno significativo del valore spettrale di picco; la normalizzazione totale, dovendo inglobare tutto lo spettro, tende a sovrastimare molto il tratto iniziale dello spettro, compreso il valore di  $a_{max}$  (corrispondente all'ancoraggio dello spettro). Il secondo motivo riguarda il fatto che il predetto metodo di normalizzazione è l'unico per il quale si abbia un riferimento normativo (Ord. n. 55 del 24/04/2018 emanata dal Commissario Straordinario per la ricostruzione – Sisma 2016).

Lo spettro di progetto (figura 14), in cui si tiene conto dell'inerzia della struttura mediante la sostituzione nelle formule del cap. 3.2.3.2.1 del valore di  $\eta$  con  $1/q$  (dove  $q$  è il fattore di comportamento della struttura) è **competenza dello strutturista**. Esso, se derivante da RSL, può essere determinato mediante le seguenti operazioni:

- Acquisizione dallo strutturista del valore di  $q$ ;
- Normalizzazione dello spettro elastico;
- Sostituzione nelle 4 formule che definiscono i 4 differenti tratti dello spettro di  $\eta$  con  $1/q$ .

Nelle figure relative all'esempio illustrato nel successivo capitolo sarà possibile osservare i dati di output da rappresentare.



**Fig.14** – Rappresentazione dello spettro elastico normalizzato (curva rossa) e del corrispondente spettro di progetto ( $q=2.2$ ) rappresentato con curva blu

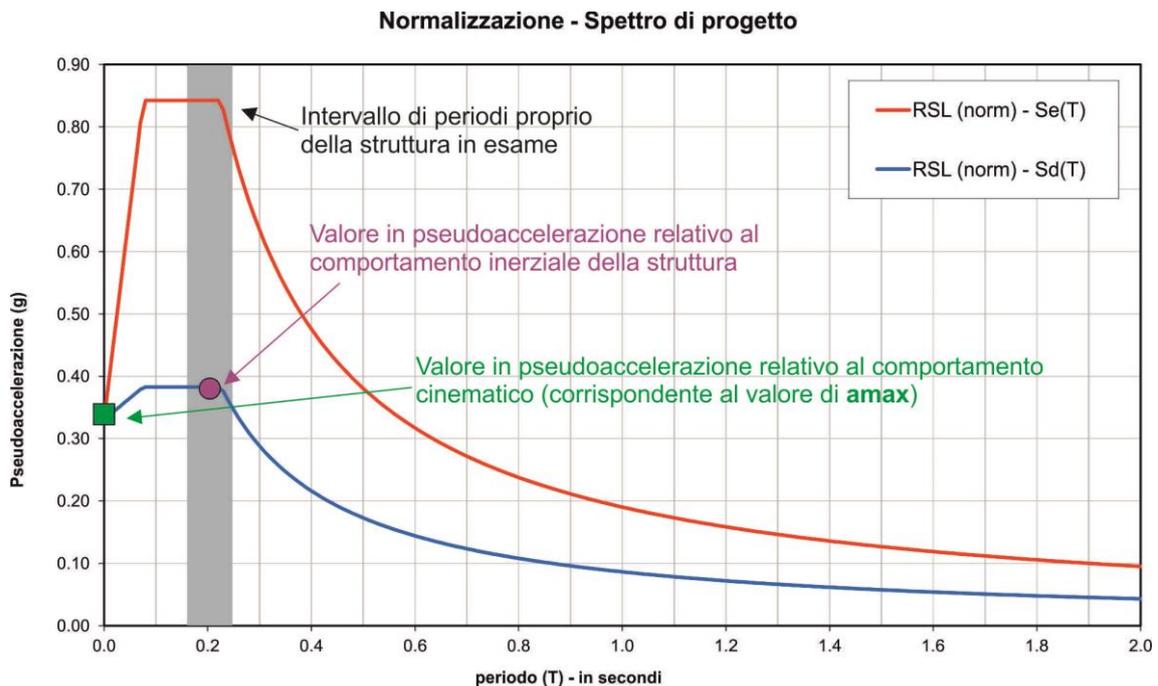
A volte, erroneamente, si è portati a ritenere l'area del picco in pseudoaccelerazione come la parte più importante di uno spettro di risposta. In verità, bisogna per prima cosa verificare la finalità nell'ambito della progettazione del valore in accelerazione da desumere.

Se è necessario studiare il comportamento cinematico dell'opera (ad esempio per valutare la spinta su un muro di sostegno o per l'esecuzione di un'analisi di stabilità) bisognerà estrapolare



il valore di ancoraggio dello spettro (accelerazione per un periodo  $T$  pari a 0), rappresentato in figura 15 dal quadrato verde. La scelta di calcolare tale valore dallo spettro elastico o dallo spettro di progetto è influente, poiché il valore di ancoraggio sarà sempre lo stesso.

Se, invece, bisogna fornire allo strutturista il valore di pseudoaccelerazione utile per descrivere l'azione sismica di progetto di una struttura in elevazione, stimato il periodo proprio dell'opera (o, meglio, l'intervallo di periodi) bisognerà indicare il valore di pseudoaccelerazione sullo spettro di progetto ( $S_d$ ).

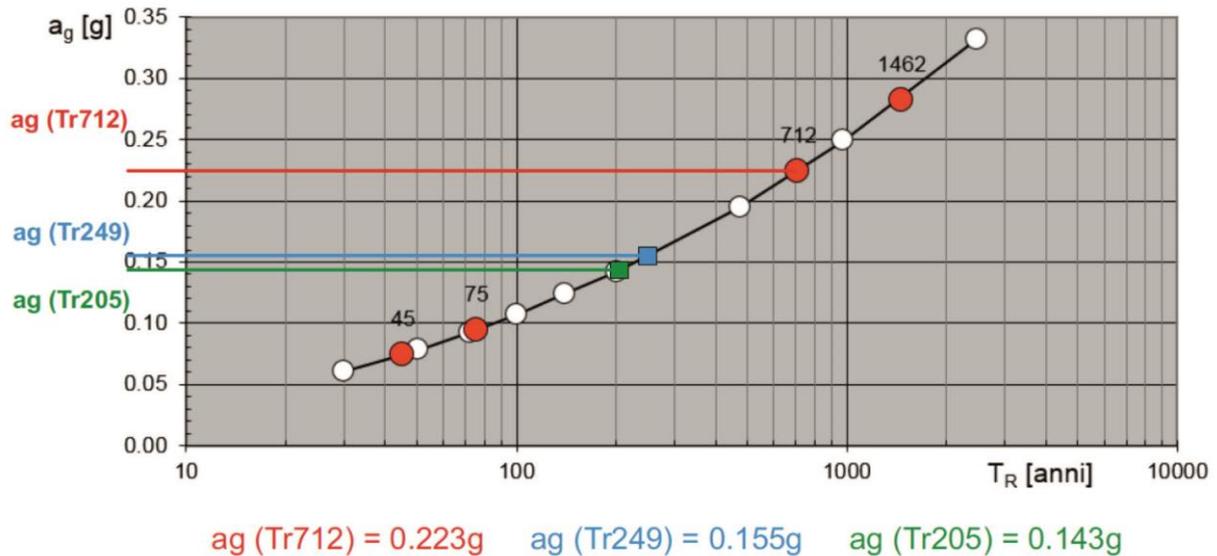


**Fig.15** – Estrapolazione sullo spettro di fig. 14 del valore di accelerazione per l'analisi cinematica (quadrato verde) e dell'effetto inerziale (cerchio viola)

Infine, nel caso l'azione sismica da fornire sia legata ad un miglioramento sismico, come noto non si dovrà prendere l'intera azione sismica, ma una quota parte legata alla percentuale di miglioramento.

Questa condizione, per un'analisi di Risposta Sismica Locale, crea alcune problematiche non trascurabili di esecuzione. Escludendo a priori la possibilità di scalare linearmente lo spettro di RSL proporzionalmente alla percentuale di miglioramento, la procedura più corretta da un punto di vista scientifico sembra la seguente: eseguire l'analisi utilizzando nella procedura di estrapolazione dell'input sismico uno spettro definito dall'utente e derivante dalla scalatura proporzionale al miglioramento. Pertanto, la scalatura viene effettuata prima di eseguire l'analisi e non alla fine e sullo spettro target e non su quello di output.

Nel caso non sia possibile eseguire quest'operazione sullo spettro target (sono pochi i software in grado di ottemperare alla richiesta di eseguire la ricerca partendo da uno spettro target definito dall'utente) e si è costretti ad effettuare una scalatura, si consiglia di utilizzare la curva di variabilità di  $a_g$  con il periodo di ritorno  $T_r$  (figura 16) per stimare il nuovo valore di  $a_g$  e, sulla base del rapporto con  $a_g$  originaria, effettuare la scalatura.



**Fig.16** – Curva di variabilità di  $a_g$  con  $T_R$

#### 4. ESEMPIO DI RELAZIONE PER UN'ANALISI DI RSL A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE EDILIZIA

In questo esempio applicativo simuleremo la realizzazione di uno studio di RSL a corredo della progettazione di un'opera rilevante, posta nell'area comunale di Firenze.

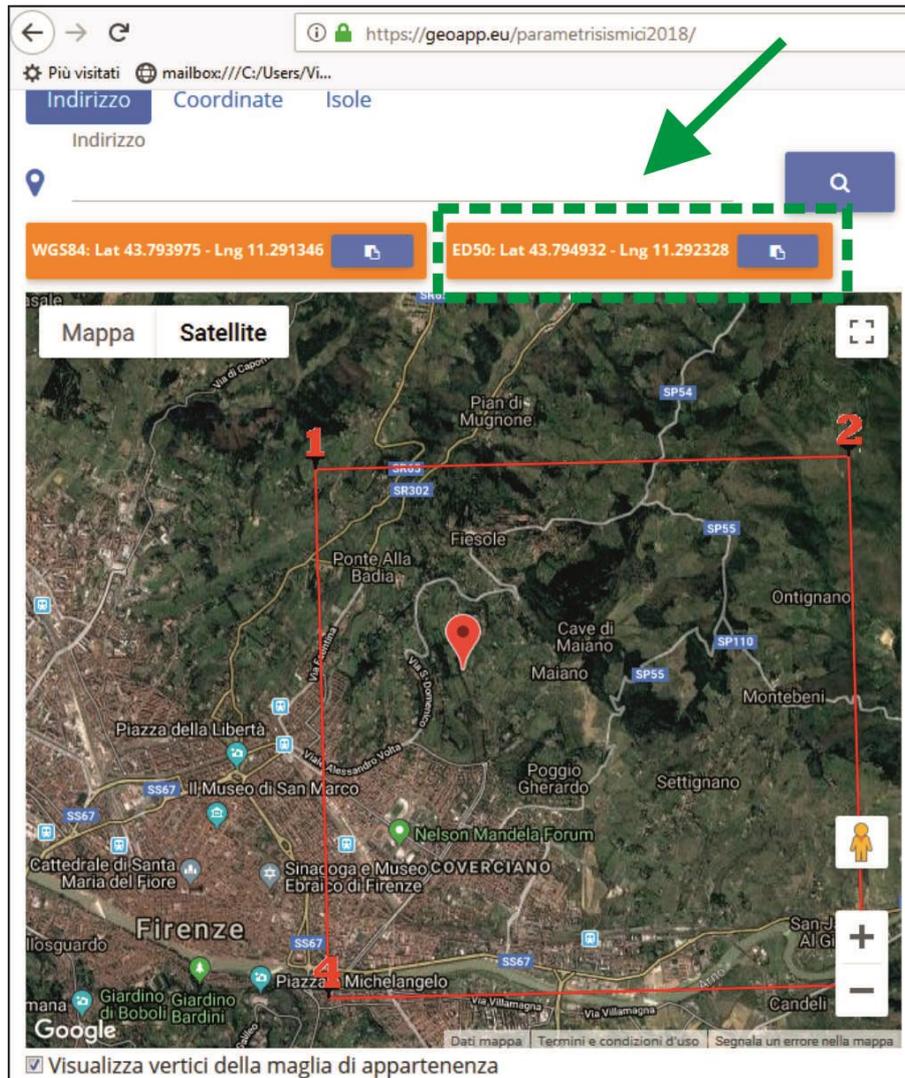
L'esempio ha la finalità di illustrare tutte le procedure e gli elaborati che, a detta dello scrivente, devono essere parte di una relazione sulla Risposta Sismica Locale.

Abbiamo ipotizzato che la strategia progettuale preveda l'analisi dell'azione sismica in riferimento a due stati limite (SLV ed SLD). La Tabella 2 riporta i parametri d'ingresso, necessari per definire l'azione sismica di input ed i parametri indipendenti (localizzazione e scelte progettuali) e, quindi, iniziare un'analisi di RSL.

L'esempio sarà incentrato prevalentemente sull'analisi allo SLV, tenendo conto, però, che le procedure di analisi degli altri stati limite sono sostanzialmente le medesime.

**Tab. 2**

Coordinate (ED50)	LAT: 43.795; LON: 11.292			
Vita Nominale ( $V_n$ )	50 anni			
Coefficiente d'uso ( $C_u$ )	1.5			
Vita di riferimento ( $V_r$ )	75 anni			
Stati limite considerati	SLD ed SLV			
Periodi di ritorno	75 anni (SLD) e 712 anni (SLV)			
<b>Tabella parametrizzazione</b>		<b><math>a_g</math> (g)</b>	<b>F0</b>	<b>T*c</b>
	<b>SLD</b>	0.067	2.577	0.278
	<b>SLV</b>	0.154	2.410	0.308
<b>Dati di disaggregazione</b>	<b>SLD</b>	Disaggregazione automatizzata in Scalcona		
	<b>SLV</b>			



**Fig.17** – Localizzazione del sito

Il progetto prevede l'edificazione di una struttura che riveste il carattere di rilevanza (scuola, casa di cura, o in generale un luogo che sarà deputato ad affollamenti significativi) nel territorio comunale di Firenze.

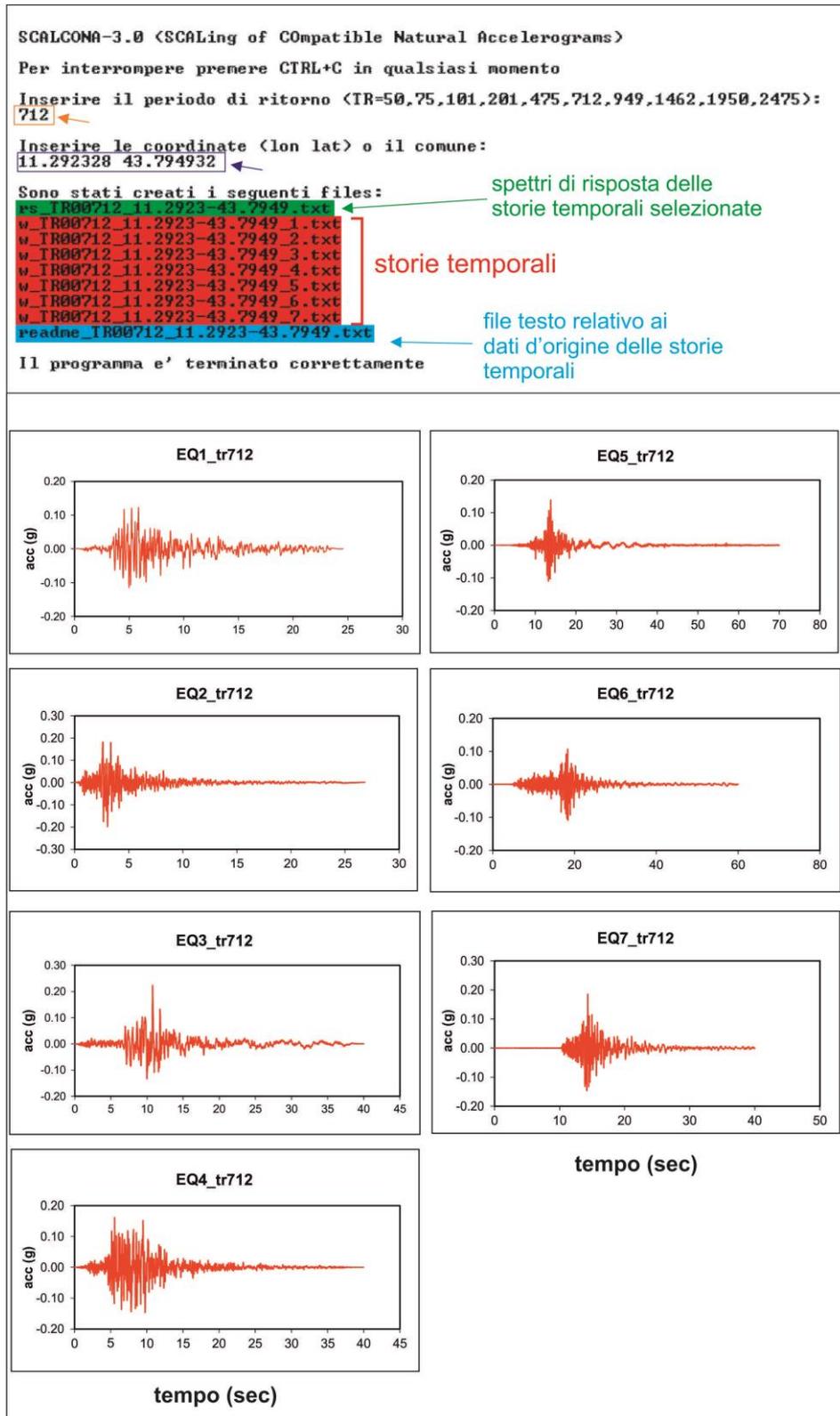
Sulla base dei parametri di input, illustrati in tabella 2, è stato definito lo spettro target del sito, sul quale basare i vincoli di spettrocompatibilità necessari per le vigenti NTC nella procedura corretta di definizione dell'input sismologico (storie temporali di input).

Per la selezione delle storie temporali di input si è utilizzato il software regionale Scalcona 3.0 (Zuccolo et al., 2011; Rota et al., 2012; Zuccolo et al., 2012; Zuccolo et al., 2014), che utilizza e scala opportunamente i risultati della selezione degli accelerogrammi, consentendo di restituire, per il sito e periodo di ritorno di interesse, un gruppo di 7 accelerogrammi che soddisfano i requisiti di spettro-compatibilità prescritti dalle vigenti NTC. Gli accelerogrammi possono essere selezionati con procedura semplificata per ciascun punto interno ai territori di studio e per ciascuno dei 9 periodi di ritorno considerati nelle NTC (ossia 30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 975 e 2475 anni).

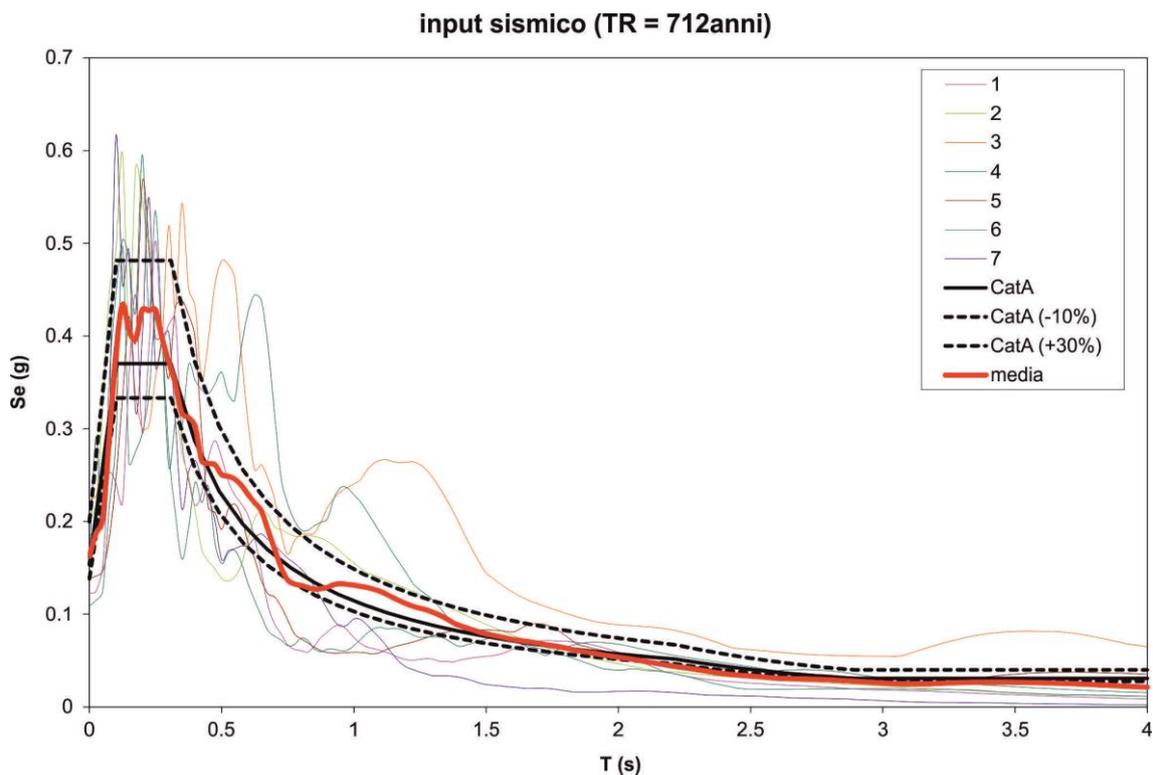
In figura 18 sono rappresentati sia gli accelerogrammi di input sia la schermata in ambiente DOS di Scalcona 3.0, dove sono illustrati tutti i prodotti di output del software. Maggiori informazioni sono reperibili al link:



<http://www.regione.toscana.it/-/accelerogrammi-di-riferimento-per-la-progettazione>



**Fig.18** – Input sismologico (storie temporali in accelerazione)



**Fig.19** – Input sismico espresso in termini di spettri di risposta elastici

La figura 19 illustra l’input sismologico in termini di spettri di risposta elastici; in figura è possibile osservare la spettrocompatibilità dello spettro medio, rappresentato con curva rossa, contenuto fino a circa 2 sec di periodo all’interno dell’area compresa tra l’estremo superiore e quello inferiore dello scarto residuo associato allo spettro target (curva nera continua). Le analisi di risposta sismica locale in oggetto fanno riferimento ad un input sismico relativo ad un periodo di ritorno di 712 anni. In tabella 3 sono indicate le principali caratteristiche delle sette storie temporali in accelerazione selezionate dal software Scalcona 3.0.

**Tabella 3**

Magnitude (Mw)	Epic.Distance (km)	Scaling Factor	Source File_Name
6.2	29.9	1.60%	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.70%	NGA-West2 RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
6.93	92.21	2.67%	NGA-West2 RSN788_LOMAP_PJH045.AT2
6.69	38.07	1.14%	NGA-West2 RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2
6.6	31	0.55%	KiK-net SMNH100010061330.EW2
6.6	62	1.48%	KiK-net SAGH050503201053.NS2
5.4	13.2	2.43%	ESM IT.AQP..HNN.D.20090407.174737.C.ACC.ASC
<b>media</b>	<b>6.3</b>	<b>39.85</b>	<b>1.65</b>



Definiti i 7 moti di input sismico, si è provveduto mediante il codice di calcolo Strata (Kottke and Rathje, 2008) all'esecuzione delle analisi monodimensionali.

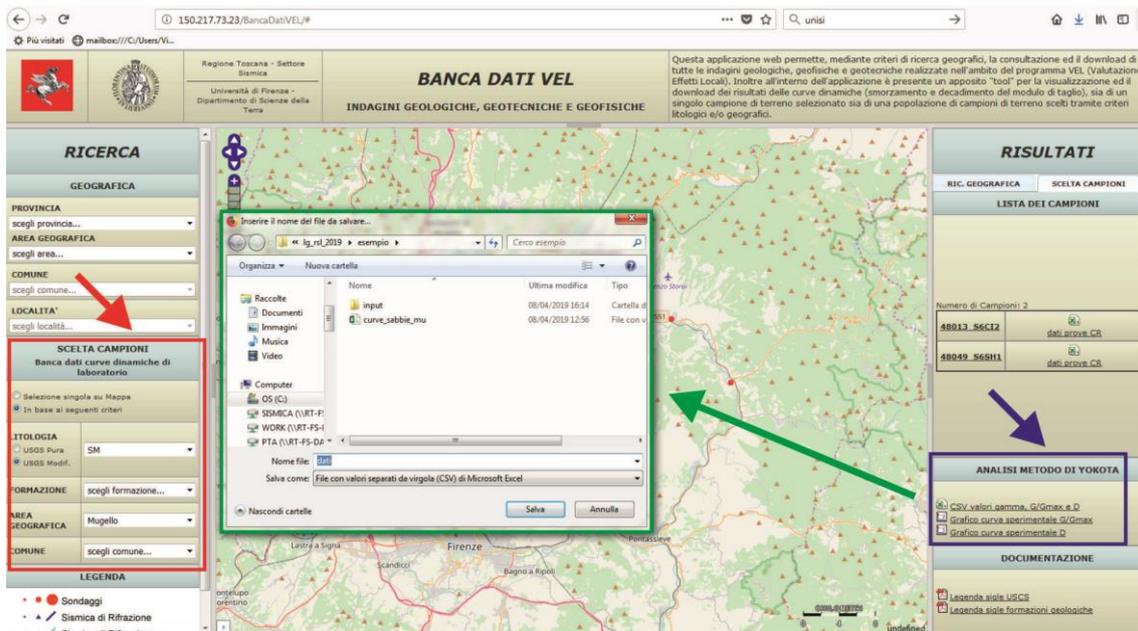
Strata calcola la risposta sismica di un deposito stratificato orizzontalmente, a comportamento visco-elastico lineare, poggiante su bedrock deformabile a superficie orizzontale, soggetto alla propagazione verticale di onde di taglio. Il codice opera nel dominio delle frequenze analogamente al codice SHAKE e sue successive modificazioni (Schnabel et. Al. 1972, Idriss & Sun, 1992), senz'altro il codice di calcolo per analisi monodimensionali più conosciuto e diffuso.

**Tabella 3**

Sismostrato	Prof. (m)	Vs (m/s)	Densità Gamma (kN/m3)	Natura terreno
1	0 – 5	250	19.0	Sabbie limose
2	5 – 20	500	20.0	Ghiaie
3	>20	1200	24.0	Substrato sismico rigido

Il comportamento non lineare del terreno viene simulato attraverso un'analisi lineare equivalente. Il modulo di taglio  $G$  e il fattore di smorzatore  $D$  vengono fatti dipendere dal livello della deformazione tangenziale  $\gamma$  indotta dalle sollecitazioni sismiche.

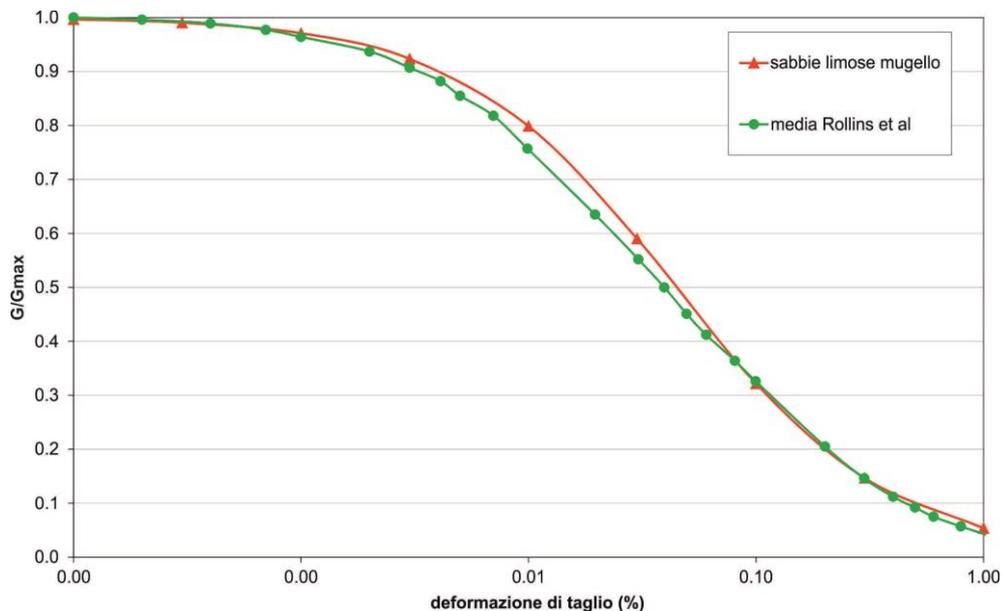
A partire dai valori iniziali dei parametri di rigidezza e smorzamento con una prima analisi si determina un primo valore caratteristico (o effettivo) della deformazione tangenziale  $\gamma_{eff}$ . Dalle curve  $G/G_0-\gamma$  e  $D-\gamma$  si determinano nuovi valori di  $G$  e  $D$  e si esegue una nuova analisi determinando un nuovo valore caratteristico. Il procedimento viene ripetuto fino a quando lo scarto percentuale tra i valori di  $G$ ,  $D$  e  $\gamma_{eff}$  viene ritenuto arbitrariamente accettabile.



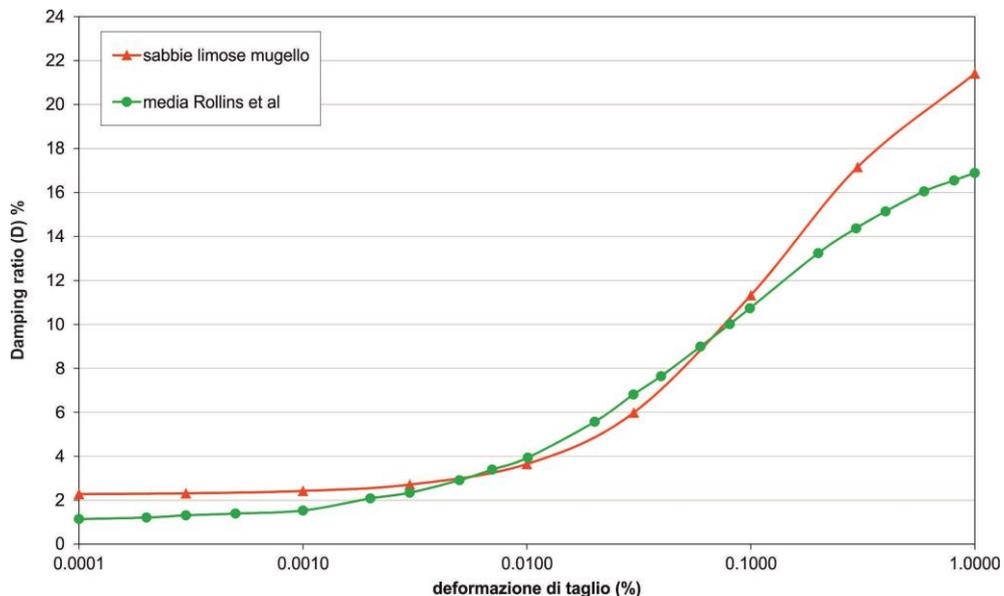
**Fig.20** – Pagina della Banca dati VEL con illustrazione della procedura di estrazione delle curve  $G-\gamma$  e  $D-\gamma$



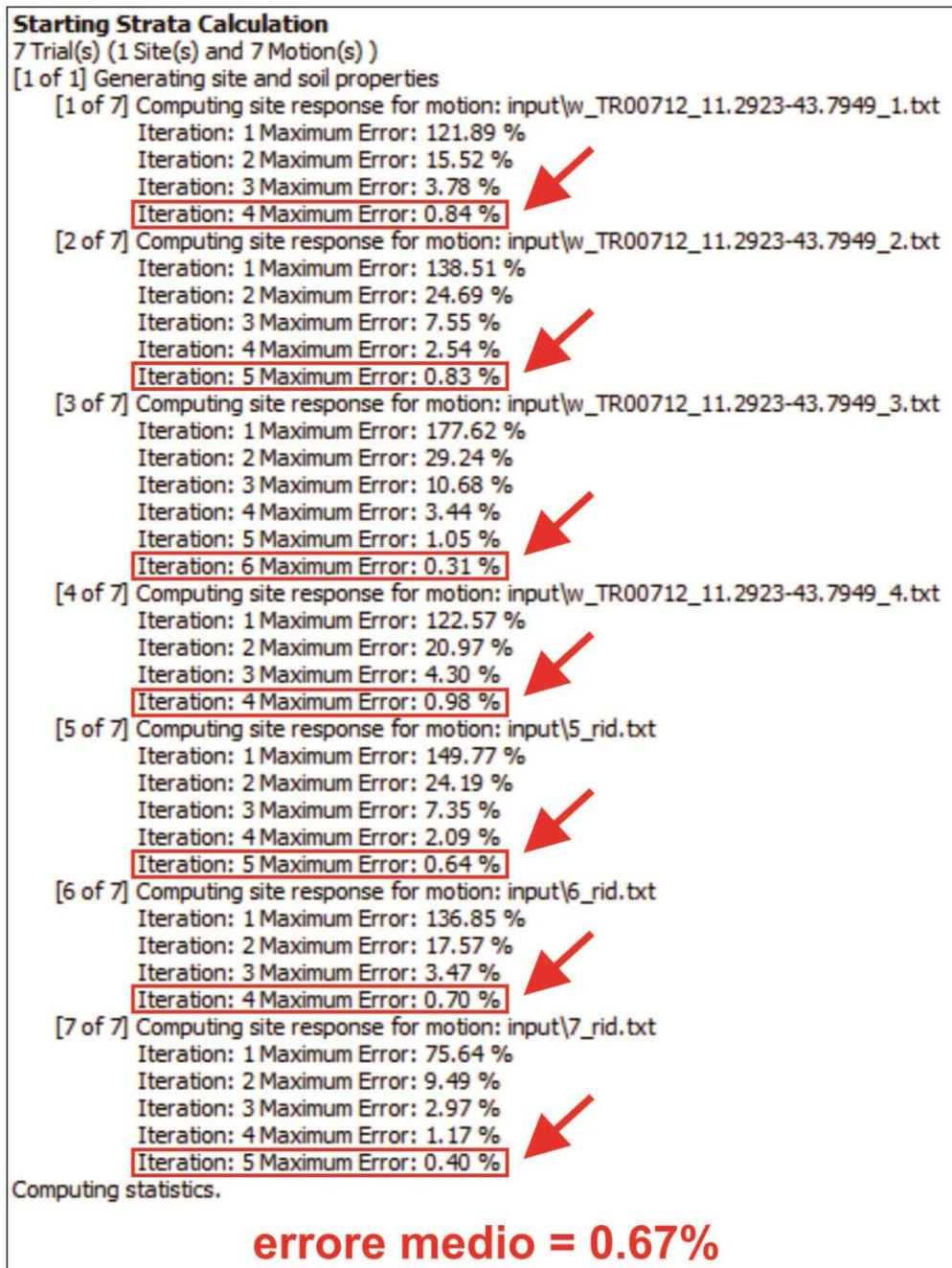
Le caratteristiche sismostratigrafiche del terreno sono rappresentate in tabella 4. Un codice di calcolo che agisca in un contesto monodimensionale e con approccio lineare-equivalente richiede come parametri di input sia **spessori** e **Vs** dei sismostrati individuati sia **peso di volume** e **natura dei terreni** indagati. La natura dei terreni è importante, qualora non siano disponibili curve G- $\gamma$  e D- $\gamma$  appositamente definite per il sito in esame, per la scelta da letteratura delle curve più appropriate alle litologie presenti ed, eventualmente, alle loro principali proprietà geotecniche.



**Fig.21** – Curve G-G0 utilizzate per l'analisi di RSL



**Fig.22** – Curve D utilizzate per l'analisi di RSL



**Fig.23–** Errore residuo dell’analisi di RSL, che testimonia la convergenza delle analisi effettuate, catturato dalla pagina “**compute**” del software Strata

Per quanto riguarda la selezione delle curve G-y e D-y, in assenza di specifiche analisi sui terreni oggetto d’indagine, si è fatto ricorso a curve di bibliografia. Mentre per il secondo sismostrato, di natura ghiaiosa, è stata adoperata la curva di Rollins et al. (1998), per la selezione della curva più idonea per il sismostrato 1 (sabbie limose) è stata utilizzata la banca dati del Programma regionale VEL (fig 20), la quale (oltre che dare accesso a prove geofisiche e geotecniche di esplorazione del sottosuolo ed ai relativi risultati), possiede uno specifico tool per la selezione di curve dinamiche tra le circa 250 disponibili per i comuni toscani a maggior pericolosità sismica di base, indagati in ambito VEL.



Per prima cosa (riquadro rosso) bisogna scegliere il criterio di selezione basato sulle caratteristiche litologiche e/o formazionali e sulla definizione dell'area d'interesse. Successivamente il portale fornisce tutti i campioni che rientrano nei criteri di ricerca, dando la possibilità di scaricare la curva media (secondo la procedura di Yokota et al, 1981) come illustrato dai riquadri blu e verde in fig. 20.

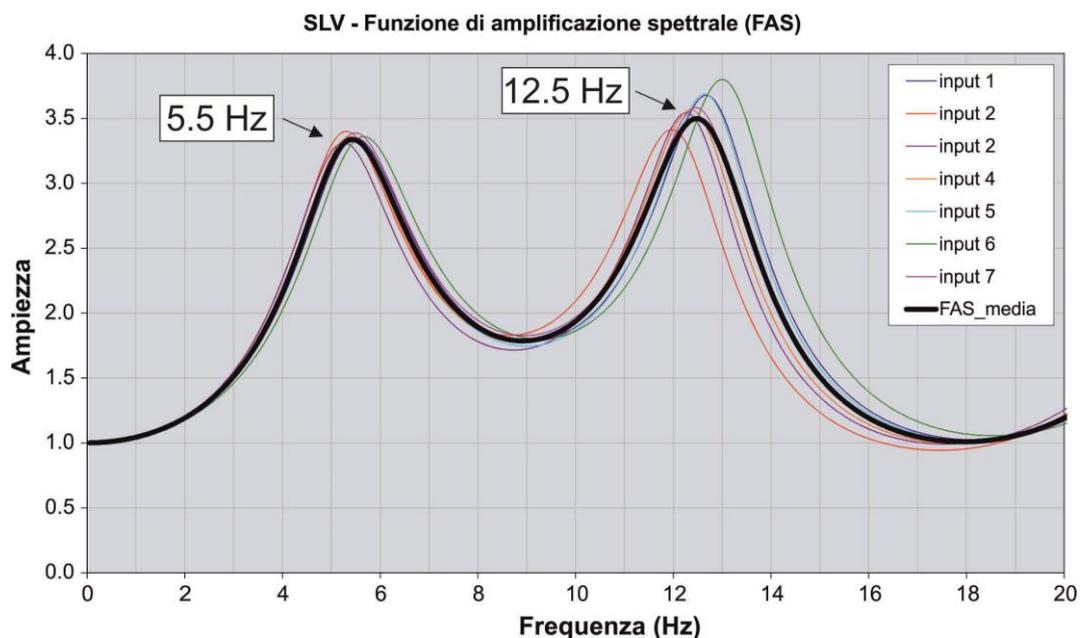
Le curve G- $\gamma$  e D- $\gamma$  sono visibili rispettivamente nelle figure 21 e 22. Per il substrato sismico, ritenuto rigido sulla base della sua parametrizzazione, è stato considerato un damping D lineare e pari allo 0.5%.

In fase di definizione dell'input, è stato imposto al software un errore residuo massimo del **1%** per un numero massimo di **30** iterazioni; in figura 23 è illustrata una schermata di Strata relativa ad una delle analisi effettuate, in cui è possibile evincere come l'errore residuo dell'analisi abbia raggiunto dopo solo 4-6 iterazioni un valore abbondantemente al di sotto della soglia imposta). Tale aspetto, da **dichiarare** o **certificare** nella **relazione tecnica**, è la prova del fatto che l'analisi abbia raggiunto la convergenza necessaria al fine di garantire l'affidabilità del dato prodotto.

**Si ricorda che l'affidabilità del dato di output è strettamente collegata alla bontà ed alla completezza dei dati di input.**

Di seguito si illustrano i risultati dell'analisi di risposta sismica locale 1D in tutti i formati che, a giudizio dello scrivente, possono essere funzionali alla strategia di progettazione adottata ed alla chiara rappresentazione del fenomeno di amplificazione (o deamplificazione) locale analizzato.

In figura 24 è riportata la Funzione di Amplificazione Spettrale del sito. La FAS è considerabile la "firma" del sito, ovvero la rappresentazione spettrale di come le particolari caratteristiche sismostratigrafiche del profilo modellato influiscano (per ognuna delle frequenze considerate) sulla modifica dell'input sismico. Essa è data, quindi, dal rapporto tra l'output e l'input ed è rappresentata in figura per ognuno dei sette terremoti costituenti l'input sismico e come valore medio (curva nera più spessa).



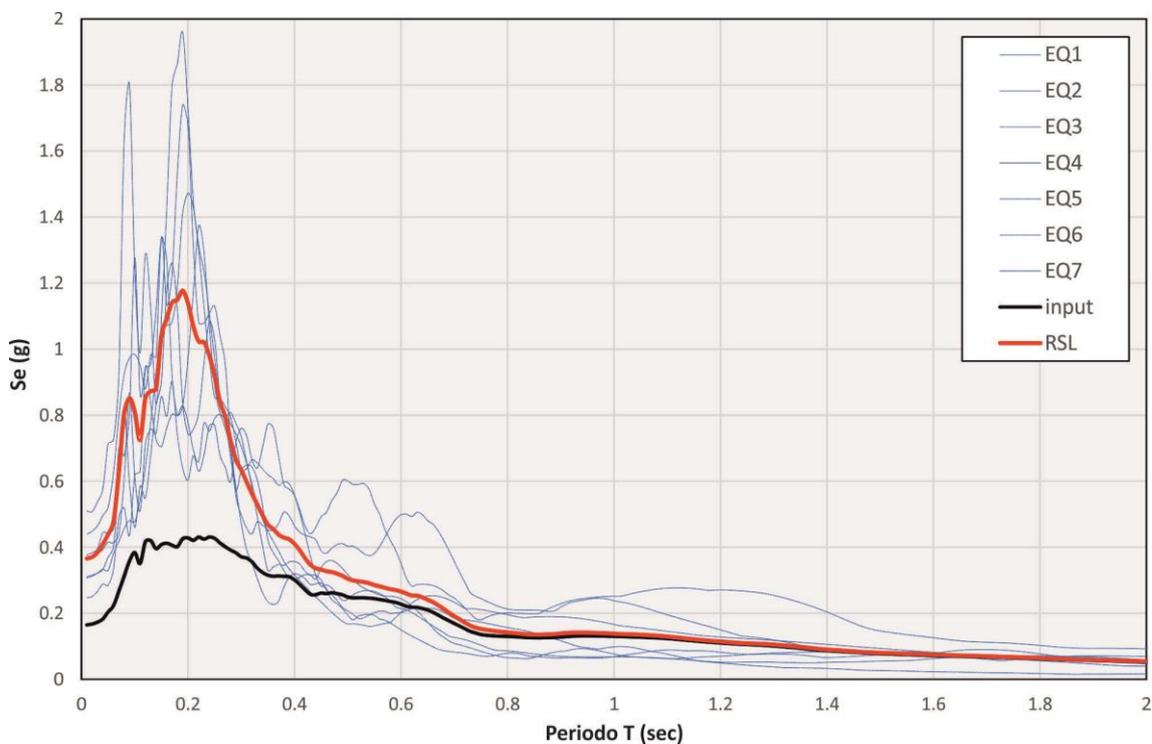
**Fig.24** – Funzioni di amplificazione spettrale (FAS) per SLV



In figura si nota con chiarezza la presenza di due chiari picchi, compatibili con i due contrasti d'impedenza individuati nel profilo sismostratigrafico del sito. In particolare, il picco caratterizzato dal minor valore di frequenza (5.5 Hz) è correlabile con il contrasto tra substrato sismico e coperture, mentre il picco a 12.5 Hz, più elevato ma con frequenze potenzialmente meno dannose per le strutture ordinarie, è riferibile al contrasto d'impedenza tra i sismostrati 1 e 2 (tabella 3).

La FAS non è richiesta obbligatoriamente tra i prodotti di output di un'analisi di RSL, poiché non è strumento utilizzato dallo strutturista, anche se tale elaborato ha la capacità di illustrare in maniera immediata ed intuitiva le caratteristiche di risposta sismica locale del sito.

La figura 25 illustra i risultati dell'analisi in termini di spettro di risposta elastico medio ( $D=5\%$ ). Dal confronto con lo spettro medio di input, si evince la non trascurabile amplificazione con totalità dell'energia sismica compresa entro circa 0.6 sec di periodo.



**Fig.25** – Spettri di risposta elastici in output (SLV). In rosso lo spettro medio

Tale distribuzione dell'energia sismica è perfettamente compatibile con un contrasto d'impedenza sismostratigrafico elevato e "superficiale", ovvero con spessore non elevato delle coperture sismiche.

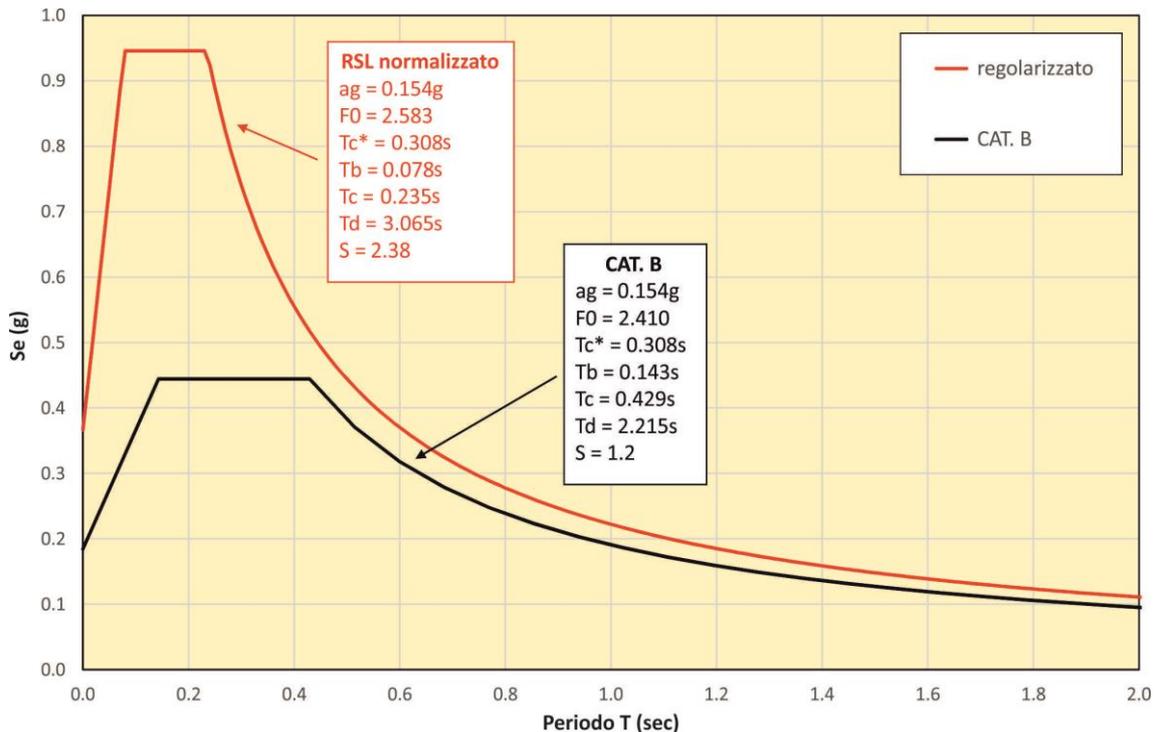
Lo spettro di output dell'analisi di RSL è stato regolarizzato, ovvero ricondotto ad una forma simile a quella relativa all'approccio semplificato di normativa. La regolarizzazione dello spettro viene effettuata secondo le procedure illustrate negli ICMS 2008 e meglio specificate da Pergalani e Compagnoni (2013) e Gruppo di Lavoro Fivizzano (2019).

In sintesi, secondo tale metodo, dallo spettro medio si ricavano i valori di **TA** (periodo per il quale è massimo il valore in accelerazione), **SA** (valore medio dello spettro in accelerazione per periodi compresi tra 0.5TA ed 1.5TA), **TV** (periodo per il quale è massimo il valore in pseudovelocità), **SV** (valore medio dello spettro in pseudovelocità per periodi compresi tra 0.8TV ed 1.2TV).



Ricavati tali valori si determinerà l'estensione del plateau (tratto dello spettro con accelerazione costante) tenendo conto che  $T_c = 2\pi \cdot (SV/SA)$  e  $T_b = 1/3T_c$ . Noti i parametri indipendenti dalle condizioni di sito è possibile, infine, ricavare il parametro **S** come  $amax/ag$  dove  $amax$  è calcolata da analisi di risposta locale.

La procedura di normalizzazione è illustrata in maniera dettagliata anche nell'Appendice 1 dell'Ordinanza n.55 del 24 aprile 2018 a firma del Commissario Straordinario per il Sisma 2016.

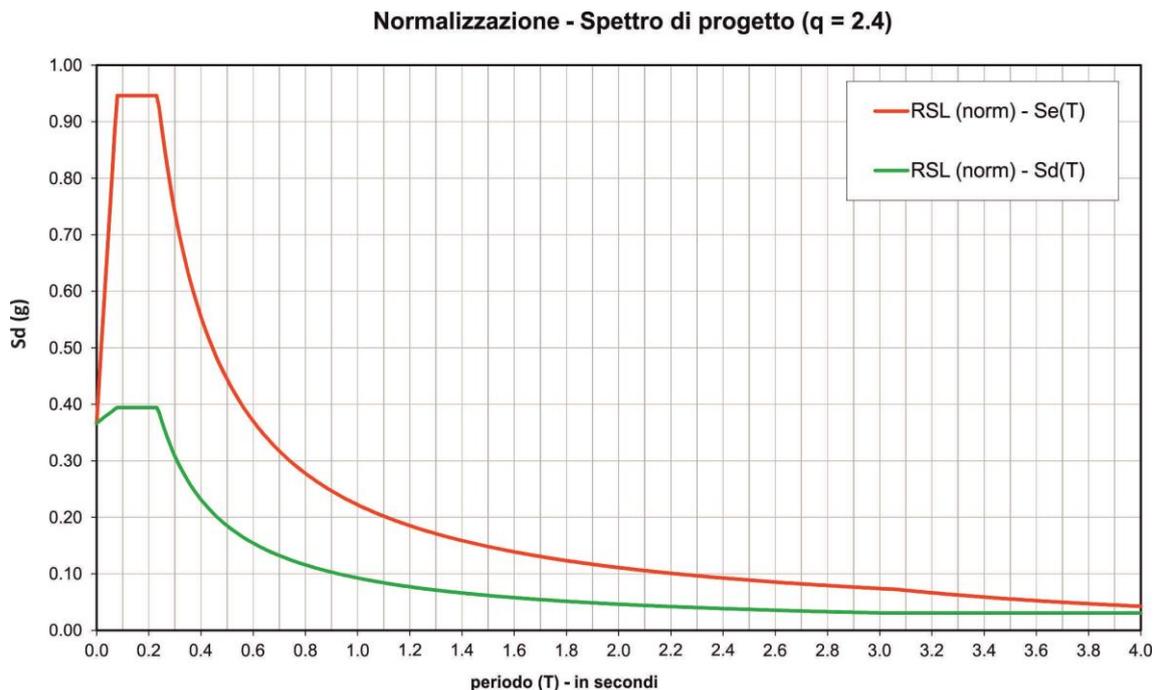


**Fig.26** – Spettro di risposta elastico (SLV) regolarizzato a confronto con l'omologo spettro relativo all'approccio semplificato di normativa (Categoria B)

Il parametro **F0**, indipendente dalle condizioni sismostratigrafiche del sito secondo l'approccio semplificato delle NTC2008, nel presente metodo, invece, viene reso dipendente dalle condizioni geologiche locali con valore pari al rapporto tra **SA** ed **amax** (accelerazione di ancoraggio dello spettro). Per ognuno dei due spettri in figura 26 è fornito un prospetto dei parametri sismici da fornire allo strutturista.

La regolarizzazione dello spettro elastico permette, inoltre, di calcolare in maniera agile lo spettro di progetto. Tale elaborato, **di competenza esclusiva dello strutturista**, viene computato definendo il valore del **fattore di comportamento (q)** e operando le sostituzioni indicate al Cap. 3.2.3.5 delle NTC18 per le analisi lineari, statiche o dinamiche.

In figura 27 è riportato lo spettro di progetto definito a partire dallo spettro elastico regolarizzato e considerando un fattore di comportamento  $q = 2.4$ . Come è possibile notare in figura, il valore di ancoraggio (corrispondente ad  $amax$ ) sarà il medesimo per i due spettri, poiché nelle condizione di periodo  $T = 0$  sec si prende in considerazione l'azione sismica in corrispondenza del terreno, dove la capacità dissipativa della struttura non entra in gioco.



**Fig.27** – Spettro di progetto (SLV) a confronto con il suo spettro elastico regolarizzato

La realizzazione di analisi di RSL permette, naturalmente, di ottenere un output in termini di storie temporali, necessario nel caso di analisi strutturali non lineari.

In questi accelerogrammi (solitamente nel numero di 7) sono presenti gli eventuali incrementi in termini di scuotimento atteso, dovuti alla presenza di amplificazione locale. Per il caso in esame, le storie temporali di output (accelerogrammi) sono illustrate in figura 28, dove è operato anche un confronto con i segnali di input.

Gli spettri di risposta elastici relativi ai 7 terremoti di input illustrati in figura 28 sono quelli rappresentati in figura 25 con tratto azzurro.

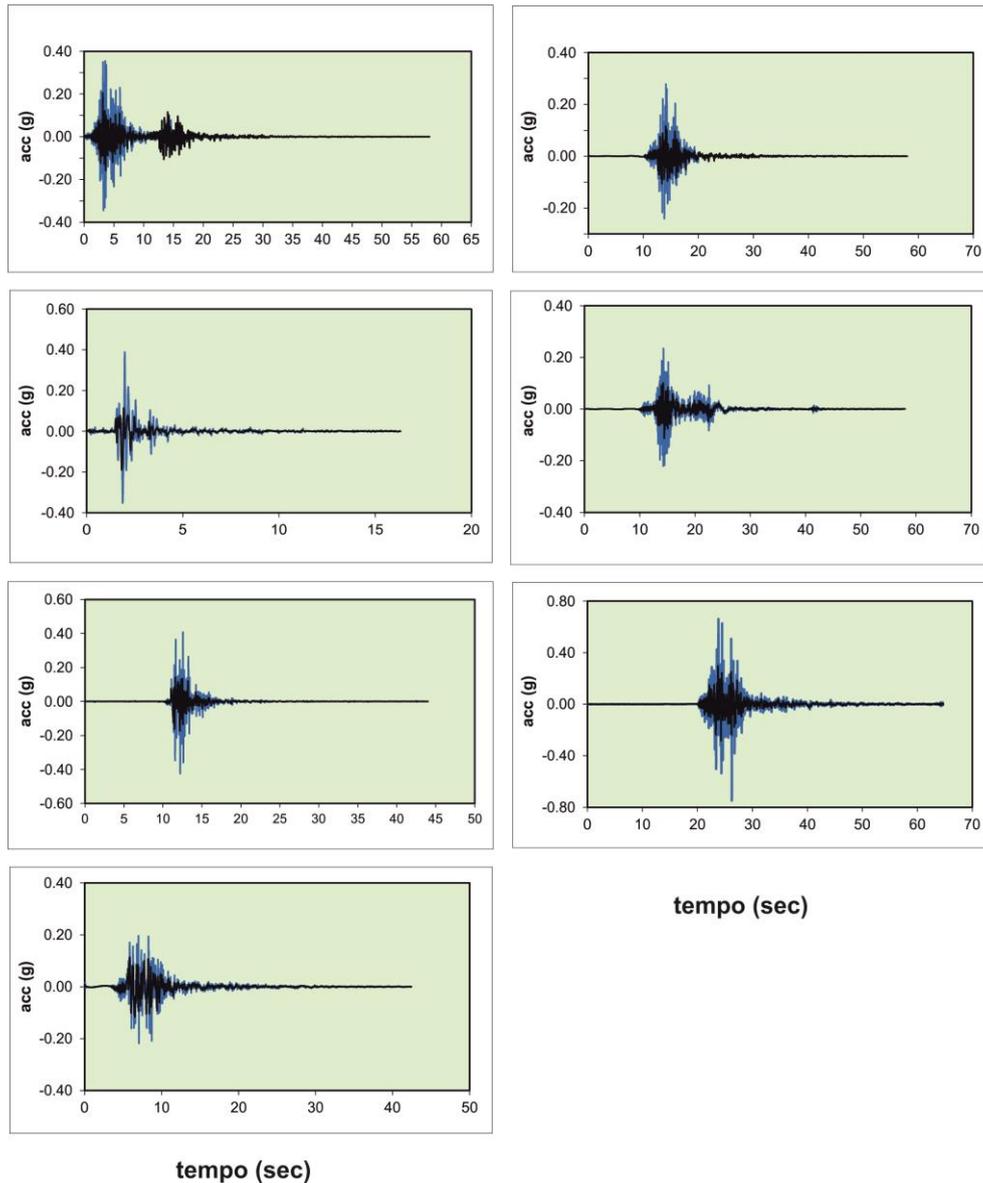
La figura 29 riporta l'evoluzione della massima deformazione di taglio (di cui una similare verifica in assetto 2D è riportata in figura 5). Tale elaborato è utile per rendicontare il non superamento della soglia volumetrica ( $\gamma_P$ ), che, in assenza di valutazioni più accurate, può essere posta pari allo 0.1%.

Nel nostro caso, anche considerando la deviazione standard associata al dato, si è ben al di sotto della predetta soglia.

Inoltre, in figura 30 sono riportati gli esiti dell'analisi 1D, relativa al medesimo contesto sismostratigrafico, ma per un periodo di ritorno di 75 anni, corrispondente per l'opera in oggetto, allo Stato Lime di Danno (SLD).

Infine, sono stati calcolati, a partire dal valore di  $a_{max}$  e secondo quanto prescritto al Cap. 7.11.6.2.1 delle NTC18, i coefficienti sismici necessari per la verifica di un ipotetico muro di sostegno, parte integrante del progetto descritto nel presente rapporto.

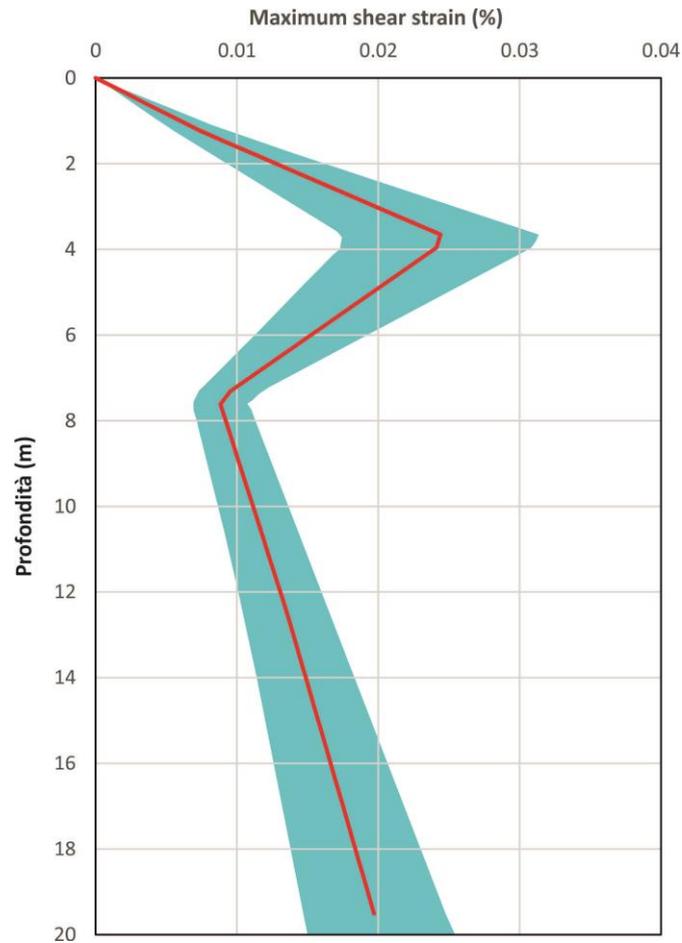
Tali coefficienti sono illustrati in tabella 4, dove sono messi a confronto con gli omologhi risultanti dall'approccio semplificato di normativa (Cat. B).



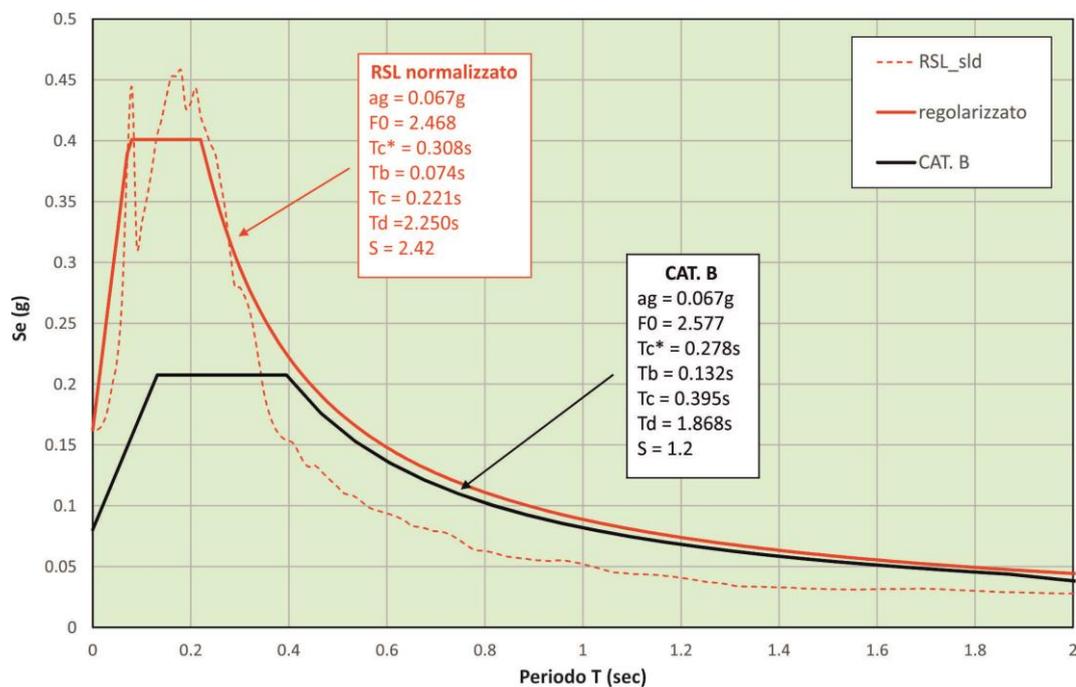
**Fig.28** – Storie temporali di output in accelerazione (curve azzurre) a confronto con gli omologhi accelerogrammi di input (curve nere)

**Tabella 4** –Coefficienti sismici per i quali è presentato un confronto tra RSL ed approccio semplificato delle NTC

		amax (g)	amax (m/s <sup>2</sup> )	Beta	Kh	Kv
RSL	SLV	0.367	3.600	0.24	0.088	0.044
	SLD	0.162	1.589	0.18	0.029	0.015
Cat. B	SLV	0.185	1.815	0.24	0.044	0.022
	SLD	0.080	0.785	0.18	0.014	0.007



**Fig.29** – Profilo di variazione della massima deformazione di taglio associata all'analisi di RSL

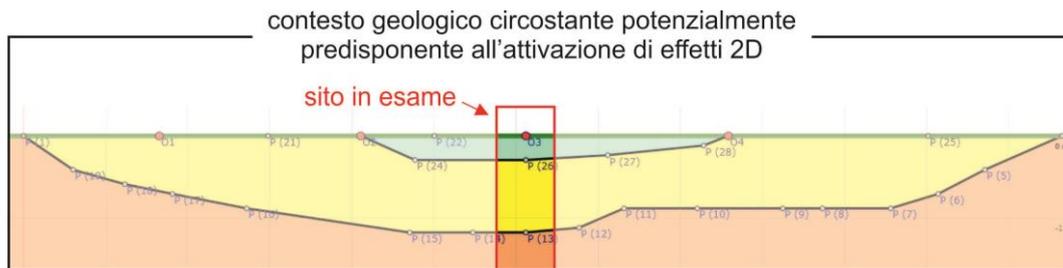


**Fig.30** – Spettri di risposta di output (originale e regolarizzato) relativi all'analisi di RSL allo Stato Limite di Danno (SLD) a confronto con l'omologo spettro relativo all'approccio semplificato di normativa (Categoria B)

## 5. RACCOMANDAZIONI FINALI

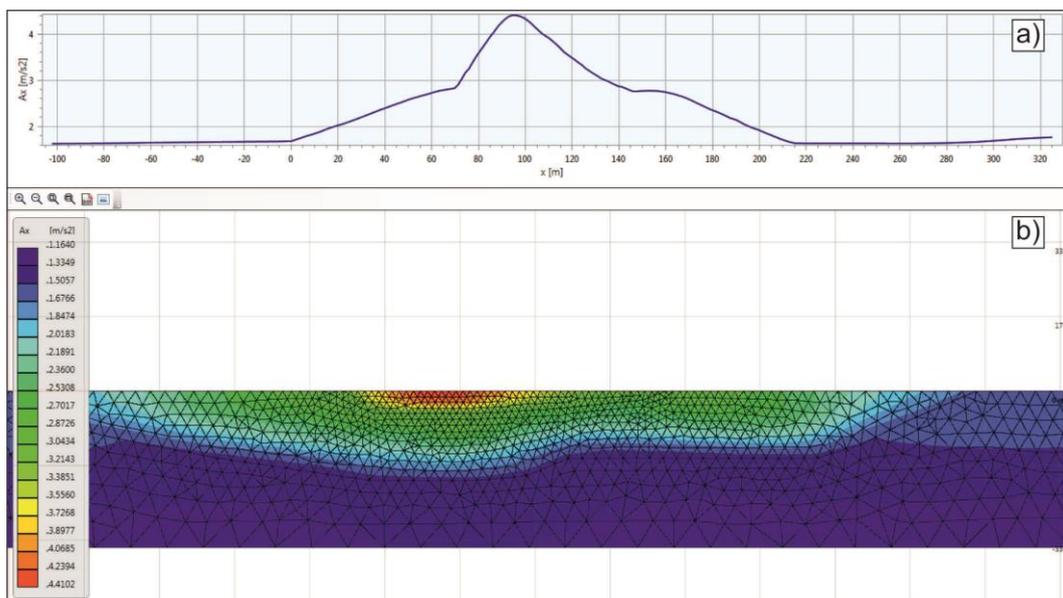
Nell'esempio illustrato nel precedente paragrafo si è realizzata un'analisi di risposta sismica locale in assetto monodimensionale e, pertanto, viene ritenuto realistico un modello sismostratigrafico in cui vi è assenza di effetti di amplificazione sismica 2D.

Qualora quest'ultima assunzione non fosse realistica, si tenga presente che con molta probabilità gli esiti dell'analisi 1D offriranno una sottostima in termini di azione sismica (che sia essa rappresentata mediante storie temporali, sia intesa in termini di spettri di risposta), poiché non in grado di rappresentare (neanche in maniera semplificata) gli effetti bidimensionali.



**Fig.31** – Ipotesi di presenza del sito di progetto all'interno di un contesto bidimensionale

In figura 31 viene presentato l'assetto sismostratigrafico dell'area indagata mediante analisi 1D nel precedente paragrafo, in cui però sono palesi nell'intorno del sito di progetto geometrie predisponenti all'attivazione di effetti di amplificazione locale di tipo bidimensionale. Infatti, in figura 32 si può osservare la distribuzione (sulla superficie topografica in alto ed in tutto il semispazio indagato in basso) dei valori di PGA o accelerazione massima ( $a_{max}$ ).

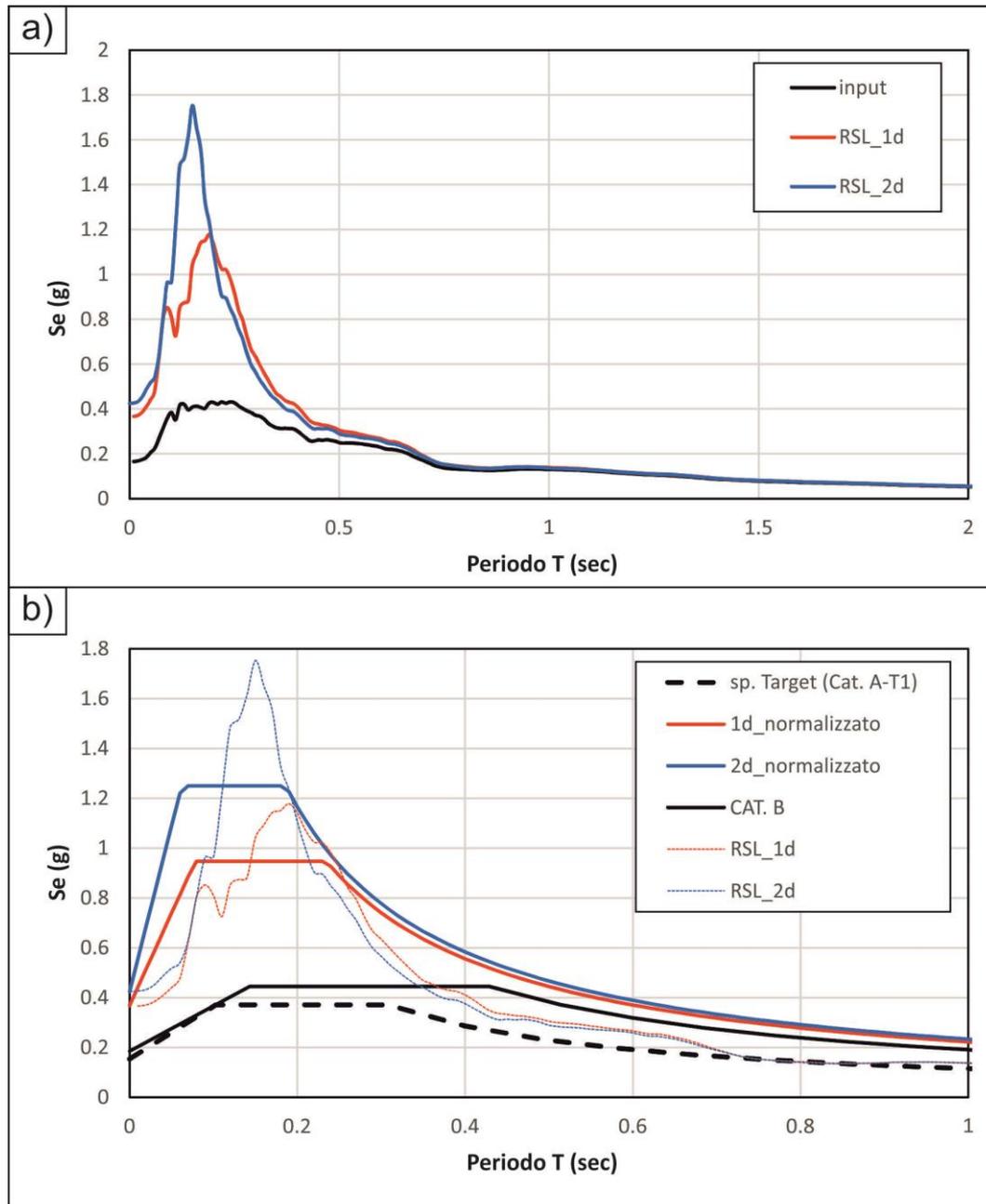


**Fig.32** – Risposta sismica locale dell'area rappresentata nella figura precedente: a) profilo di  $a_{max}$ ; b) valore medio di  $a_{max}$  per ogni cella della mesh (il dato di accelerazione è in m/sec<sup>2</sup>)



Dalla figura è palese l'insorgenza di effetti di focalizzazione (picco in fig. 32a e area in rosso in fig. 32b) tipici di amplificazioni perlomeno di natura bidimensionale.

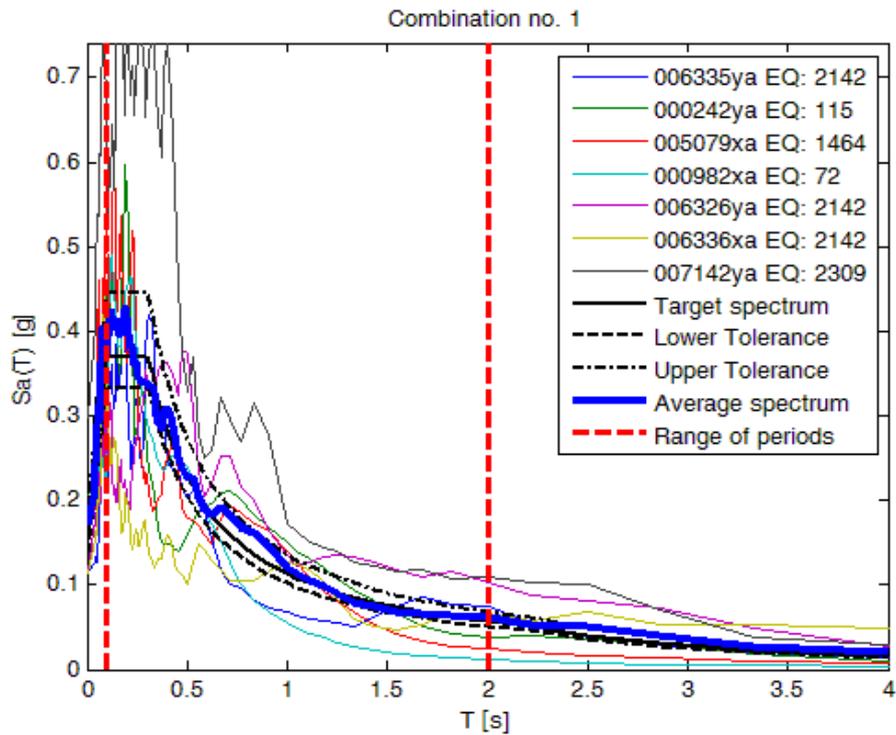
Infatti, analogamente a quanto illustrato in figura 2, dal confronto tra lo spettro bidimensionale e quello monodimensionale si evince in figura 33 una notevole sottostima nell'utilizzo dell'approccio 1D (anche in termini di spettro normalizzato), proprio dovuta alla presenza di effetti 2D nel sito in esame.



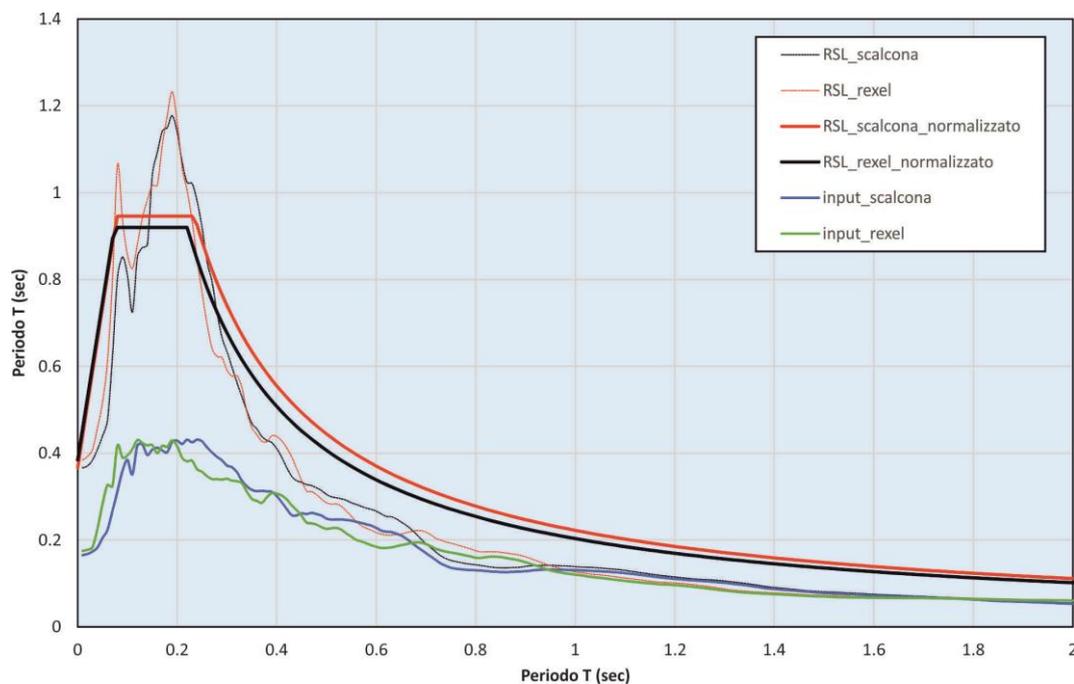
**Fig.33** – Confronto tra approccio 1D e 2D per il caso in oggetto. La presenza di un assetto 2D comporta l'esistenza di amplificazioni legate ad effetti bidimensionali sepolti, in grado di aumentare l'entità dello spettro di risposta: a) spettri di RSL mono e bidimensionali a confronto con l'input; b) confronto tra gli spettri regolarizzati e l'approccio semplificato di normativa (categoria B)



Immaginiamo, infine, di utilizzare una settupla di storie temporali alternativa all'approccio proposto da Scalcona 3.0 a causa di problemi di convergenza nell'utilizzo delle storie temporali di input (come nel caso illustrato in figura 5) oppure per aumentare le caratteristiche in termini di spettrocompatibilità e sismocompatibilità.



**Fig.34** – Input sismologico relativo alle condizioni di tabella 3, estratto mediante il software Rexel 3.5 (Iervolino et al., 2010)



**Fig.35** – Confronto tra gli spettri di output elaborati partendo da differenti settuple di accelerogrammi di input



Nel caso in esame, mediante il codice di calcolo Rexel 3.5 (Iervolino et al., 2010) è stata selezionata una settupla di accelerogrammi compatibili con le caratteristiche del progetto (fig. 34). Viene anche migliorato il fattore di scala medio, che è pari ad 1 nel caso dell'estrazione mediante Rexel 3.5, mentre con Scalcona 3.0 è pari a 1.65 e non è modificabile.

Il cambio di accelerogrammi non produce grandi variazioni in termini di spettri di output (anche normalizzati), con una differenza che tende ad essere minima (fig. 35). Per esempio, per quanto riguarda il massimo valore in pseudoaccelerazione (corrispondente all'entità del tratto ad accelerazione costante detto anche plateau) la differenza è pari a circa il 3%.

## BIBLIOGRAFIA

Acunzo G., Pagliaroli A., Scasserra G. (2014). *In-Spector: un software di supporto alla selezione di accelerogrammi naturali spettrocompatibili per analisi geotecniche e strutturali*. 33° Convegno Nazionale GNGTS, Bologna 25-27 novembre 2014, volume 2, 107-114, ISBN: 978-88-940442-2-5.

Ambraseys, N., Smit, P., Sigbjornsson, R., Suhadolc, P. and Margaris, B. (2002). *Internet-Site for European Strong-Motion Data*. European Commission, Research-Directorate General, Environment and Climate Programme <http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/ESD/>

Baglione M., D'Intinosante V. & Fabbroni P. (2015). *La conoscenza del rischio sismico attraverso gli studi di microzonazione sismica della regione Toscana: risultati, strumenti e metodologie proposte per la pianificazione territoriale*. Atti del XXXIV Convegno Nazionale GNGTS, Trieste.

Bard P.-Y., Bouchon M. (1985). *The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys*. Bulletin of the Seismological Society of America, 75: 519-541.

Circolare NTC (2009). Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti approvata dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici "Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008".

D'Intinosante V. & GdL Fivizzano (2015a). *Analisi di risposta sismica locale del centro abitato di Fivizzano (MS)*. Atti del XXXIV Convegno Nazionale GNGTS, Trieste.

D'Intinosante V. & GdL Fivizzano (2015b). *La microzonazione sismica nel centro abitato di Fivizzano (MS)*. Atti del XXXIV Convegno Nazionale GNGTS, Trieste.

Gruppo di lavoro "Abachi" (2015). *Applicabilità degli abachi per la microzonazione sismica di livello 2*. Atti del XXXIV Convegno Nazionale GNGTS, Trieste.

Gruppo di Lavoro Fivizzano (2019). *Microzonazione sismica di livello 3: il caso del centro abitato di Fivizzano (MS)*. Roma, 2019.

Gruppo di lavoro MS (2008). *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle regioni e delle Province autonome. Dipartimento della protezione civile, Roma. 3 vol. e Dvd.

Hudson, M., Idriss, I.M. & Beikae, M. (1994). *QUAD4M: a computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base*. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California Davis, Davis California.

Idriss I.M. & Sun J.I. (1992). *SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits*. User's Guide, University of California, Davis, California.

Idriss, I.M., Lysmer, J., Hwang, R. & Seed, H. B. (1973). *QUAD-4: A computer Program for Evaluating the Seismic Response of Soil Structures by Variable Damping Finite Element*. Procedures, Earthquake Engineering Research Center, Report N. EERC 73-16, University of California, Berkeley.

Iervolino, I., Galasso, C., Cosenza, E. (2010). *REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis*. Bulletin of Earthquake Engineering, 8:339-362, 2010. DOI 10.1007/s10518-009-9146-1.

Kottke A.R. & Rathje E.M. (2008). Technical manual for Strata. University of California, Berkeley.



- Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer. J. (1973) *Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems*. Journal of the Soil Dynamics Division, 99, 421-427.
- Lanzo G. & Silvestri F. (1999). *Risposta sismica locale, teoria ed esperienze*. Argomenti di ingegneria geotecnica. Hevelius Edizioni srl, Benevento.
- ORDINANZA N.55 del Commissario Straordinario Ricostruzione Sisma 2016 (2018). *Disciplina per la delocalizzazione temporanea delle attività economiche o produttive e dei servizi pubblici danneggiati dal sisma eseguiti e conclusi in data anteriore a quella di entrata in vigore del decreto legge n.189 del 2016. Modifiche alle ordinanze n.24 del 12 maggio 2017, n.39 dell'8 settembre 2017 e n.51 del 29 marzo 2018. Proroga del termine di cui all'articolo 8, comma 4, del decreto – legge 17 ottobre 2016, n.189, convertito con modificazioni dalla legge 15 dicembre 2016, n.229 e s.m.i. Termine per il deposito delle schede AeDES*.
- Pergalani F. & Compagnoni M. (2013). Microzonazione sismica di Umbertide: analisi numerica. Atti del XXXII Convegno Nazionale GNGTS, Trieste.
- Rollins, K. P., Peterson, K. T., and Weaver, T., J. (1998). *Lateral Load Behavior of Full-Scale Pile Group in Clay*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(6), 468-478.
- Rota M., Zuccolo E., Taverna L., Corigliano M., Lai C.G. & Penna A. (2012). Meso-zonation of the Italian territory for the definition of real spectrum-compatible accelerograms. Bull Earthquake Eng (2012) 10:1357–1375. DOI 10.1007/s10518-012-9369-4.
- Schnabel P.B., Lysmer J. & Seed H.B. (1972). *SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*. Report No. EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Yokota, K., Imai, T., and Konno, M. (1981). *Dynamic deformation characteristics of soils determined by laboratory tests*. Tokyo OYO Technical Reports, no.3, 13-37
- Zuccolo E., Corigliano M., Taverna L. & Lai C.G. (2011). *Meso-zonazione di un territorio per la definizione di accelerogrammi reali spettro-compatibili*. XIV Convegno ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia". Bari, 18 - 22 settembre 2011.
- Zuccolo E., Rota M., Lai C.G., Taverna L., Corigliano M. & Penna A. (2012). *Definition of Spectrum-Compatible Natural Records for the Italian Territory*. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, 24-28 september 2012.
- Zuccolo E., Corigliano M. & Lai C.G. (2014). *Selection of spectrum- and seismo-compatible accelerograms for the Tuscany region in Central Italy*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 66, 305-313.