



## **INDICAZIONI SULLA VALUTAZIONE DELL'AMPLIFICAZIONE SISMICA IN RIFERIMENTO AGLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA DI III LIVELLO IN REGIONE TOSCANA**

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

La Microzonazione Sismica (di seguito MS) permette di simulare l'accadimento di un evento sismico compatibile con la pericolosità sismica di un determinato sito, valutandone i principali effetti tra cui le modificazioni apportate allo scuotimento del suolo dalle condizioni geologico-tecniche locali e dalle condizioni topografiche locali (valutazione degli effetti locali). Tali valutazioni possono essere effettuate mediante diversi livelli di approfondimento: dalle analisi di I Livello basate su un approccio qualitativo, fino allo studio parametrico rigoroso, proprio del III Livello.

Uno studio di microzonazione sismica di III Livello (di seguito MS3) prevede la disamina di tutti gli aspetti propri di una microzonazione sismica (stima dell'azione sismica e, quindi, dell'eventuale livello di amplificazione sismica e definizione delle aree di rispetto e/o suscettibilità per le aree instabili) mediante procedure avanzate finalizzate ad una parametrizzazione quantitativa.

Il documento tecnico di riferimento generale per la realizzazione degli studi è rappresentato dagli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" (di seguito indicato con la sigla ICMS) approvati il 13 novembre 2008 dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome. Nella sua interezza il documento nazionale intende costituire un elemento utile all'approfondimento della pericolosità sismica locale, necessario all'analisi del rischio sismico, applicabile ai settori della programmazione territoriale, della pianificazione urbanistica, della pianificazione dell'emergenza e della normativa tecnica per la progettazione. Il documento individua e determina criteri, metodi e procedure per l'esecuzione di azioni di microzonazione a diverse scale e con diversi livelli di approfondimento.

Gli ICMS sono stati aggiornati, modificati e implementati nel corso degli ultimi anni mediante la predisposizione di "Standard di rappresentazione e archiviazione informatica per la Microzonazione Sismica" (Commissione Tecnica per la microzonazione sismica – Versione 4.1 - ottobre 2017) e differenti linee guida per lo studio dei principali fenomeni di instabilità sismoindotta (liquefazione dinamica dei terreni, instabilità dei versanti e liquefazione dinamica dei terreni).

Di seguito si illustrano le modalità da seguire per la valutazione dell'amplificazione sismica nell'ambito di studi di Microzonazione Sismica di Terzo Livello in Regione Toscana e, conseguentemente, quali sono i prodotti di output richiesti e le procedure per un loro corretto utilizzo sia nella fase pianificatoria, sia per la conseguente fase edificatoria.

La valutazione dell'amplificazione sismica dovrà prevedere la realizzazione di analisi di risposta sismica locale (tipicamente in assetto bidimensionale) per le quali bisognerà definire un modello di input sia **sismologico** (selezione delle storie temporali di input), **geometrico** (determinazione dell'assetto geometrico sepolto e superficiale dei terreni interessati dallo studio di microzonazione sismica) e **fisico-meccanico** (parametrizzazione in chiave dinamica dei sismostrati oggetto delle analisi di RSL).

### **1. SELEZIONE DELLE STORIE TEMPORALI DI INPUT**

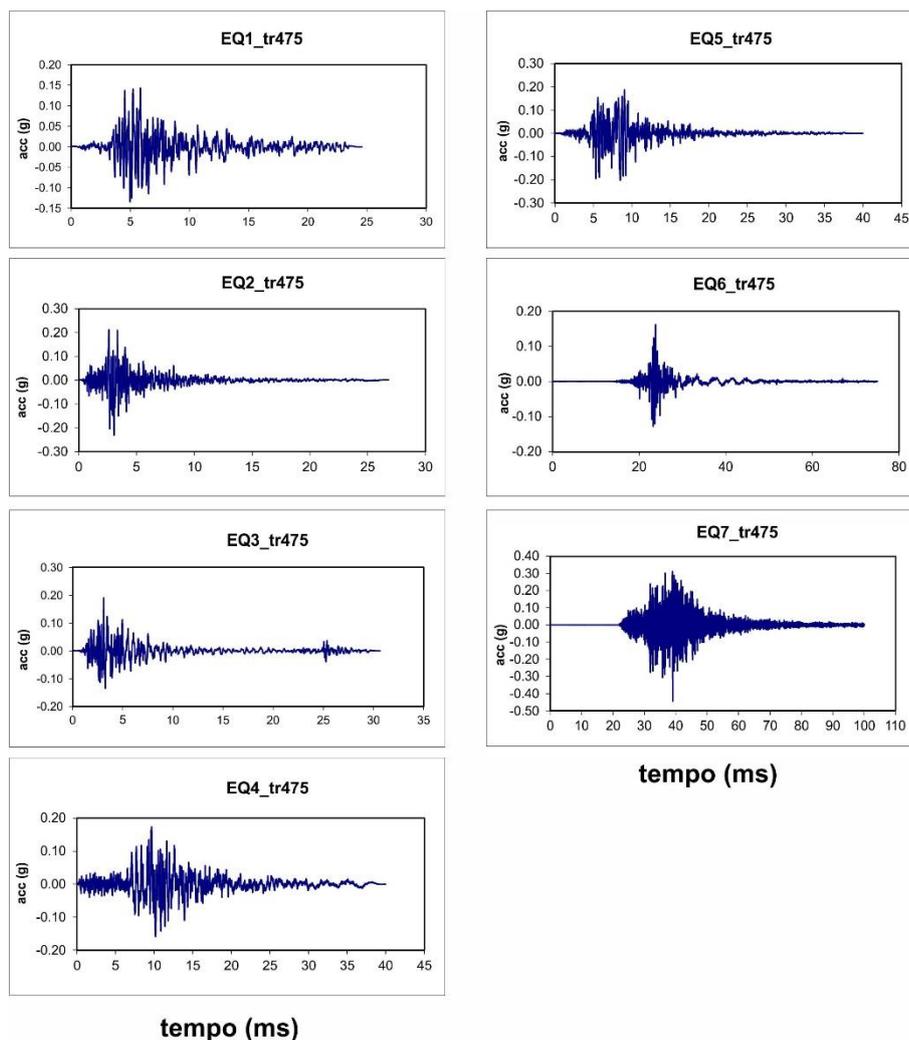
Per quanto attiene alla definizione delle serie temporali da utilizzare come input sismologico, esse dovranno essere ricavate mediante l'utilizzo del software regionale SCALCONA 3.0 (SCALing



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). Il **periodo di ritorno** ufficiale per la realizzazione di studi di MS3 sarà di **475 anni**. Inoltre, per le motivazioni espresse nei prossimi capitoli, le analisi di RSL andranno eseguite anche utilizzando una settupla di accelerogrammi naturali relativa ad un **periodo di ritorno di 50 anni**. La scelta di privilegiare settuple estratte mediante SCALCONA 3.0 (già utilizzato negli studi di MS3 realizzati in Toscana) deriva dalla necessità di avere omogeneità in termini di accelerogrammi di input, soprattutto per studi di MS3 di comuni attigui.

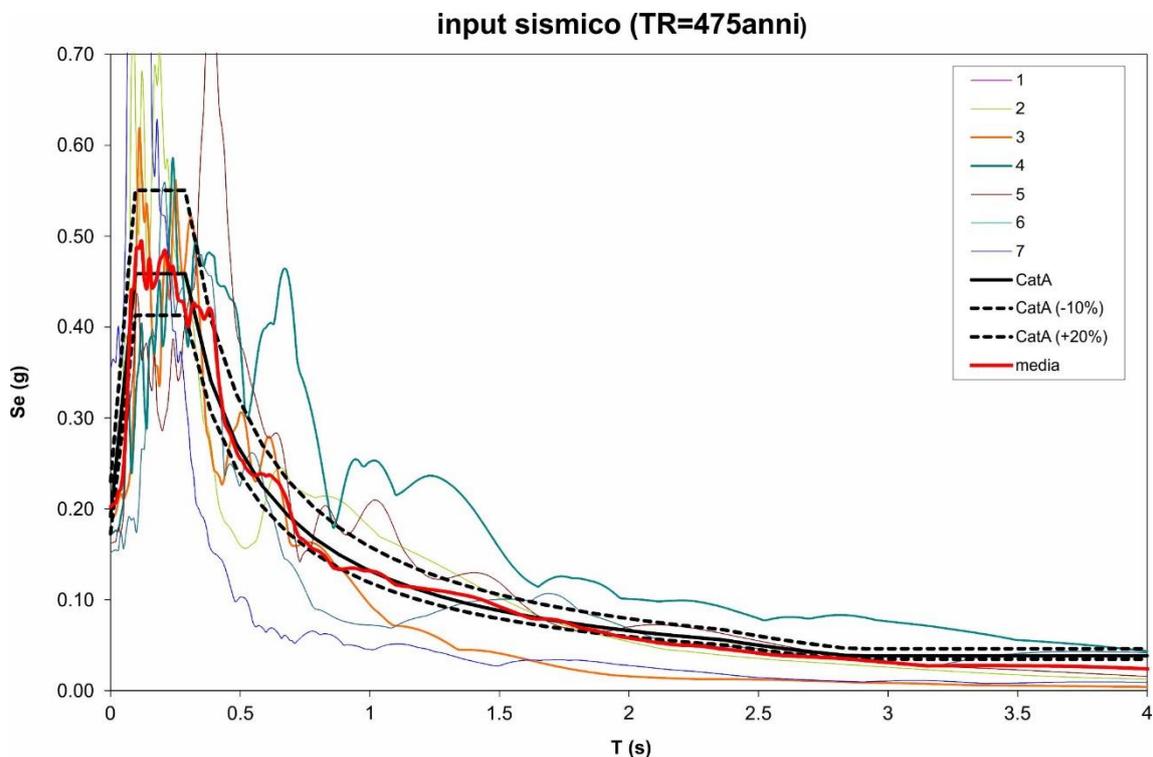
Dovranno essere scaricate settuple di accelerogrammi per i periodi di ritorno di 475 anni e 50 anni. Il primo periodo di ritorno è quello da utilizzare per le analisi di risposta sismica locale e per le eventuali analisi finalizzate alla parametrizzazione delle instabilità; sulla base di tali analisi andranno computati (secondo le modalità di seguito elencate) i fattori di amplificazione sismica. In figura 1 è riportano un esempio di settupla di accelerogrammi utilizzati per l'esecuzione di analisi di RSL per una MS3, di cui in figura 2 sono illustrati i rispettivi spettri di risposta.



**Fig. 1** – Esempio di input sismologico in termini di storie temporali in accelerazione utilizzato per studi di MS3



La seconda analisi (periodo di ritorno pari a 50 anni) servirà per la fase finale, relativa alla stima degli spettri caratteristici. L'estrazione delle serie temporali dovrà riferirsi alla sede comunale (qualora, come sovente accade, il centro abitato oggetto di studio sia capoluogo), oppure, nel caso di analisi condotte in corrispondenza di una frazione, bisognerà riferirsi al baricentro dell'area di studio.



**Fig. 2** – Spettri di risposta elastici relativi alla settupla di accelerogrammi riportata in figura 1. Con la curva rossa è indicato lo spettro medio, mentre con curva nera continua è riportato lo spettro target del sito (cat. A-T1)

Qualora dovessero insorgere problemi sull'utilizzo delle settuple estratte mediante il codice di calcolo SCALCONA 3.0 (una problematica potrebbe essere il superamento della soglia di deformazione volumetrica nelle analisi di RSL, se condotte mediante codici di calcolo operanti secondo un modello lineare-equivalente) sarà possibile rivolgersi ad altre procedure per l'estrazione degli accelerogrammi. Le storie temporali da utilizzare dovranno essere però di tipo naturale, poiché (come discusso in seguito) una delle finalità di uno studio di MS3 in Toscana prevede anche un possibile utilizzo dei risultati di output in fase progettuale. Per questa finalità, infatti, è necessario rimanere aderenti ai dettami delle vigenti NTC per le quali la stima dell'azione sismica di progetto mediante un approccio rigoroso (RSL) deve prevedere l'utilizzo in fase di input di storie temporali naturali (oltretutto segnali sintetici, il cui utilizzo allo stato attuale risulta molto limitato).

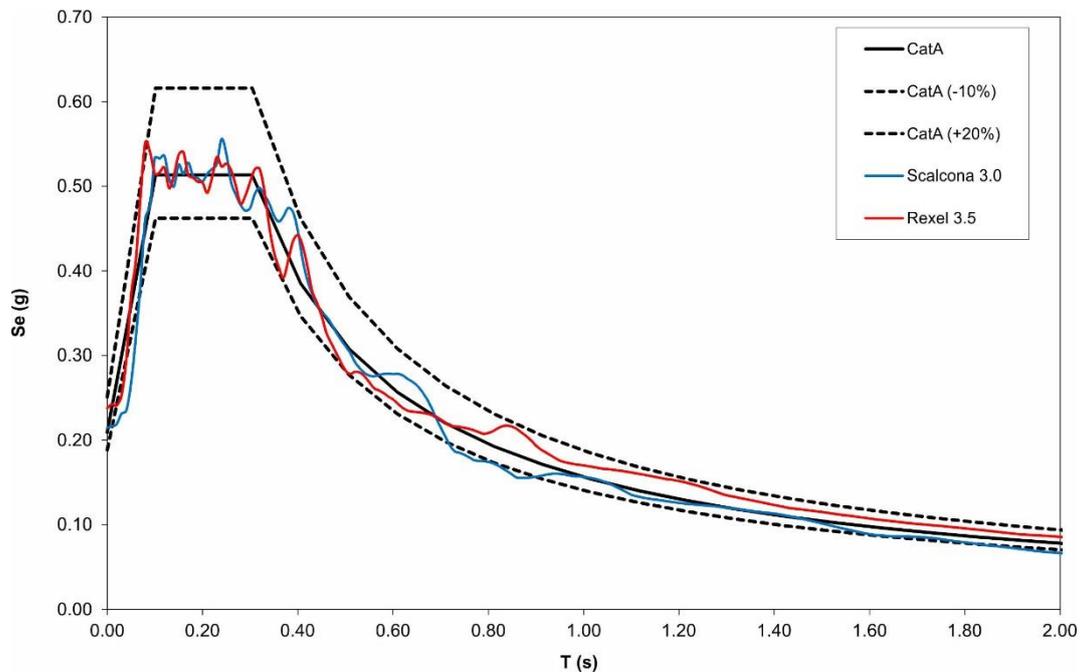
Il ricorso a differenti tipologie di definizione dell'input sismologico può essere effettuato anche per migliorarne le caratteristiche di idoneità in termini di spettrocompatibilità, sismocompatibilità e fattore di scala. Tale scelta andrà, comunque, concordata con l'Ufficio Prevenzione Sismica della Regione Toscana.

Ad esempio, in figura 3 è riportato il confronto tra gli spettri medi relativi a due differenti settuple di accelerogrammi, estratte mediante codici di calcolo differenti per la microzonazione sismica del medesimo centro abitato.



Sebbene le due settuple dimostrino entrambe una ottima spettrocompatibilità, si è deciso di utilizzare la settupla indicata in rosso (fonte Rexel 3.5, *Iervolino et al., 2010*), poiché l'altra settupla ha generato nelle analisi di RSL il superamento della soglia di deformazione volumetrica, fornendo risultati di output non attendibili.

Inoltre, in questo caso, 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. 3** – Confronto tra spettri di risposta medi relativi a due differenti settuple utilizzate per analisi di RSL nello stesso sito

## 2. DEFINIZIONE DELLA SEZIONE GEOLOGICO-TECNICA DI INPUT

Il modello geometrico da sottoporre ad analisi di risposta sismica locale dovrà essere rappresentato mediante sezioni geologico-tecniche sia desunte dalle sezioni utilizzate per la definizione del Modello Geologico di Riferimento della MS1 (con le quali dovranno concordare sia come assetto sismostratigrafico proposto sia come ubicazione in carta), sia di nuova realizzazione nell'ambito dell'implementazione dello studio di MS al terzo livello.

Dall'osservazione delle caratteristiche delle sezioni geologico-tecniche, il tecnico incaricato delle analisi di RSL potrà scegliere se l'assetto sismostratigrafico è concorde con la realizzazione di analisi monodimensionali (assenza di elementi geometrici superficiali e/o sepolti in grado di innescare fenomeni di amplificazione locale 2D o 3D) oppure necessita di analisi condotte perlomeno in assetto bidimensionale. In questo caso, potranno essere predisposte anche analisi monodimensionali da realizzare in corrispondenza dei punti di output dell'analisi 2D e da utilizzare come taratura delle analisi ufficiali. Le eventuali modifiche necessarie per l'adattamento delle sezioni geologico-tecniche da sottoporre ad analisi di RSL andranno concordate tra il geologo responsabile dello studio di MS ed il tecnico incaricato delle analisi di RSL.

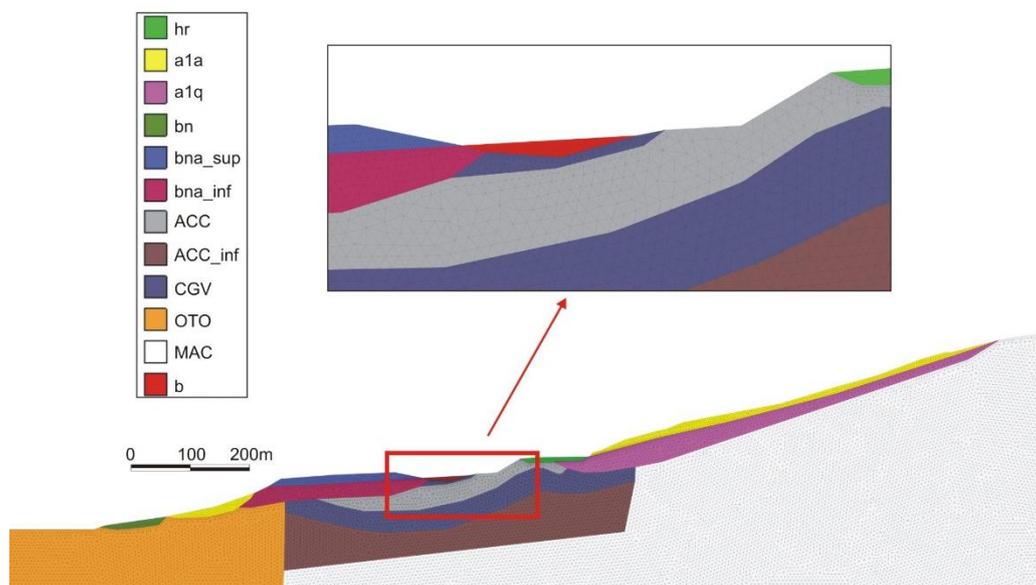
Inoltre, sempre in considerazione dell'assetto sismostratigrafico desunto dalla definizione del Modello Geologico di Riferimento, sarà scelto anche il tipo di approccio da utilizzare per le analisi



di RSL. Solitamente le analisi di Risposta Sismica Locale per studi di MS3 vengono condotte in assetto bidimensionale utilizzando approcci di tipo lineare-equivalente.

Il numero di sezioni da realizzare dovrà sia consentire una buona copertura in riferimento all'estensione dell'area di studio sia intercettare tutte le geometrie superficiali e/o sepolte in grado di influenzare la risposta sismica locale. 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 dello studio di MS ed indicati nel paragrafo 3):

- ❑ le geometrie dei litotipi investigati, così come desunto dalla ricostruzione del modello-geologico-tecnico;
- ❑ le condizioni di vincolo lungo i bordi dei modelli numerici.

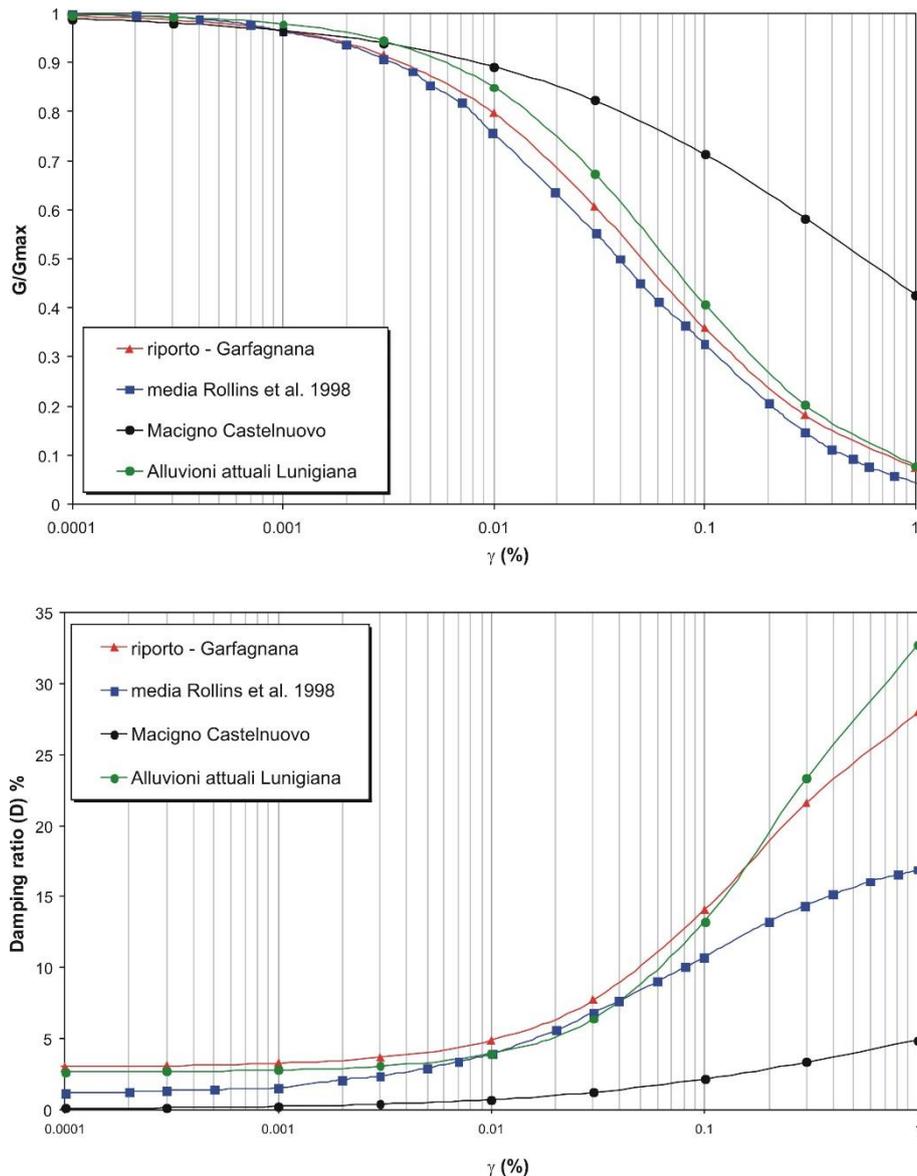


**Fig. 4** – Mesh agli elementi finiti relativa ad una sezione geologico-tecnica utilizzata per le analisi di risposta sismica bidimensionale nel centro abitato di Fivizzano (MS). Da Gruppo di Lavoro Fivizzano (2017)

In figura 4 è possibile osservare una sezione geologico-tecnica (Gruppo di Lavoro Fivizzano, 2017) sottoposta ad analisi di risposta sismica locale; le formazioni oggetto di studio sono state discretizzate mediante elementi finiti triangolari 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).



**Fig.5** – 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 (2017)

### 3. PARAMETRIZZAZIONE IN CHIAVE DINAMICA DEI TERRENI

L'esecuzione di analisi di risposta sismica locale prevede la parametrizzazione in chiave dinamica dei terreni oggetto di studio.

Qualora, come usualmente accade, si decida di ricorrere all'utilizzo di codici di calcolo 2D operanti in ambito lineare-equivalente, sarà necessario ottenere, per ognuno dei sismostrati da modellare, i seguenti parametri:

- ❑ Valori di  $V_p$  (velocità di propagazione delle onde di compressione) e di  $V_s$  (velocità di propagazione delle onde di taglio). Il valore di  $V_s$  (come indicato nel precedente paragrafo) servirà anche per determinare la dimensione ottimale della mesh con cui verrà discretizzata la sezione da modellare;
- ❑ Pesi di volume dei litotipi in oggetto;



- ❑ Curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato  $G(\gamma)$  e di incremento del rapporto di smorzamento  $D(\gamma)$  utilizzate per simulare il comportamento non lineare dei terreni mediante il legame costitutivo lineare equivalente.

Tali curve sono definite mediante prove geotecniche di laboratorio in campo dinamico (un esempio è visibile in fig. 5); 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  $G(\gamma)$  e  $D(\gamma)$  relative ai terreni indagati nelle aree a maggior pericolosità sismica della regione Toscana.

Come visibile in figura 6, 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.

**Fig.6** – Schermata del portale della banca dati del Programma VEL. a) Finestra di selezione dei criteri di ricerca delle curve dinamiche  $G(\gamma)$  e  $D(\gamma)$ ; b) Elenco di tutte le curve estrapolate sulla base dei criteri di ricerca adottati; c) finestra per il download delle curve medie

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).

Per quanto riguarda la scelta dei parametri da utilizzare per le analisi di RSL (in tabella 1 viene riportato un esempio riferito ad uno studio di MS3 di un comune del Mugello) si ritiene opportuno che essi vengano determinati sulla base di un'analisi statistica relativa alle indagini poste in corrispondenza di ognuna delle sezioni da modellare. Tuttavia, in contesti di limitata



estensione areale e/o in aree omogenee da un punto di vista sismostratigrafico, possono essere definiti valori medi univoci (per ogni sismostrato) da utilizzare per tutte le sezioni da analizzare.

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

sismostrato	Vp (m/s)	Vs (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 (a12)	1605	435	0.46	19.0	366611	lacustre_mugello
arenarie (PLO)	3225	1195	0.42	23.0	3349167	linear 1%

In fase di predisposizione del modello di input, si raccomanda di provvedere alla determinazione di un elevato numero di punti di output, necessari per una completa analisi dei risultati e per la successiva fase di estrapolazione dei dati.

In linea di massima si dovrà prevedere almeno un punto di output per ogni situazione sismostratigrafica individuata nella sezione da modellare (si può prendere come riferimento anche la distribuzione delle microzone omogenee della MS1, aggiornate sulla base delle nuove conoscenze acquisite dall'implementazione al III Livello) e, comunque, non meno di un punto di output ogni 100m.

Come indicato precedentemente, sarà necessario effettuare due distinte analisi: la prima utilizzando una settupla di storie temporali relativa ad un periodo di ritorno di 475 anni e la seconda al periodo di ritorno di 50 anni.

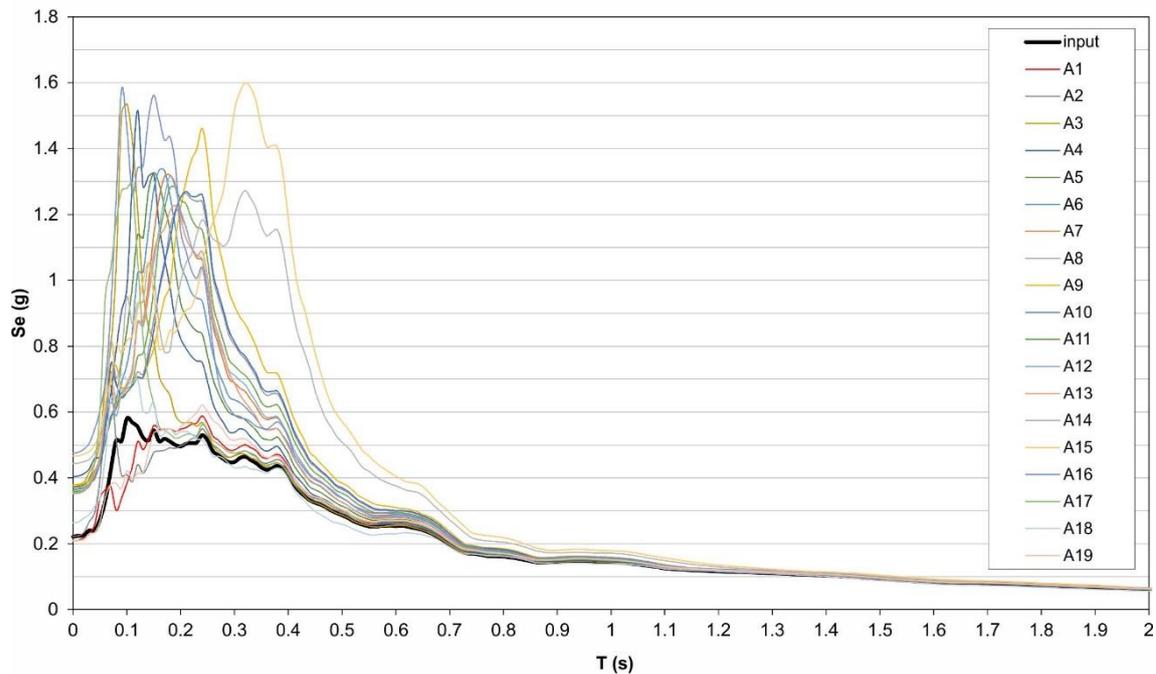
La prima analisi sarà quella ufficiale dello studio di MS3, da cui saranno estrapolati tutti i prodotti dello studio di Microzonazione (tipicamente spettri di risposta elastici e Fattori di Amplificazione). La seconda analisi, come descritto nei prossimi capitoli, sarà utilizzata esclusivamente per acquisire spettri medi caratteristici da utilizzare nella fase finale dello studio (indicazioni e strumenti per la progettazione edilizia).

#### 4. DATI DI OUTPUT

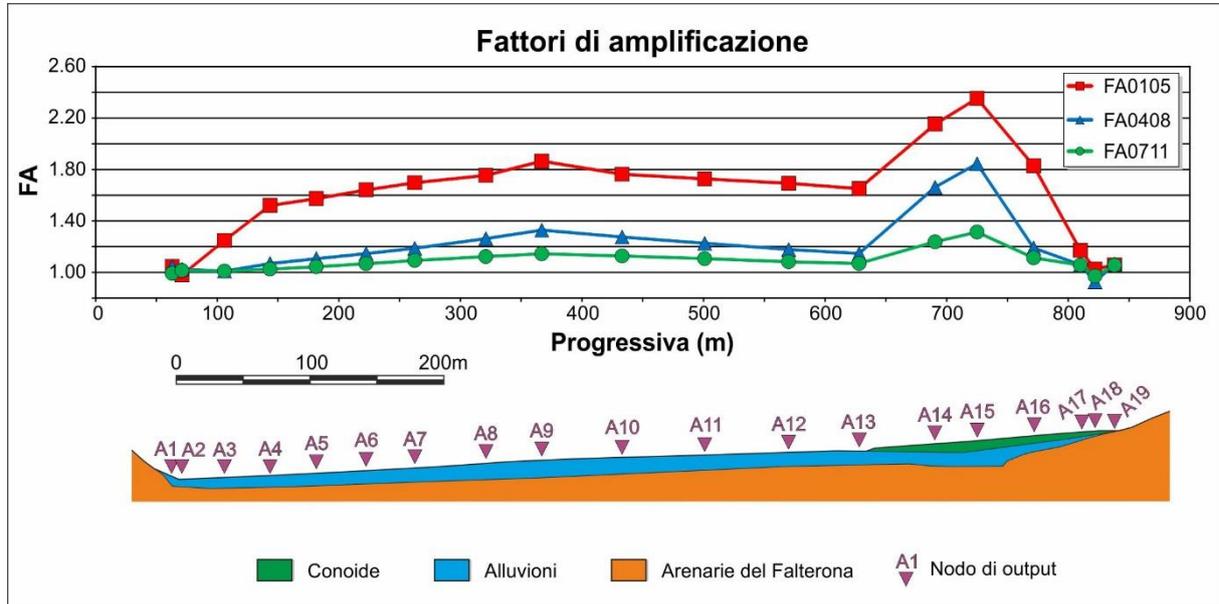
L'esecuzione di analisi di risposta sismica locale consente l'acquisizione di molteplici parametri e strumenti di output.



analisi di RSL - spettri medi di risposta elastici (damping=5%) da analisi bidimensionali



**Fig.7** – Spettri di risposta elastici relativi ad analisi di RSL in assetto bidimensionale. Oltre agli spettri di output relativi ai 19 nodi scelti per l'analisi della sezione è riportato con tratto nero più spesso anche lo spettro di risposta in input



**Fig.8** – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali lungo una sezione geologico-tecnica. I fattori derivano dagli spettri di risposta elastici rappresentati in figura 7

Nell'ambito degli studi di MS3, gli strumenti di output più diffusi sono gli spettri di risposta elastici (fig. 7) ed i fattori di amplificazione (fig. 8) derivati dall'analisi degli spettri.

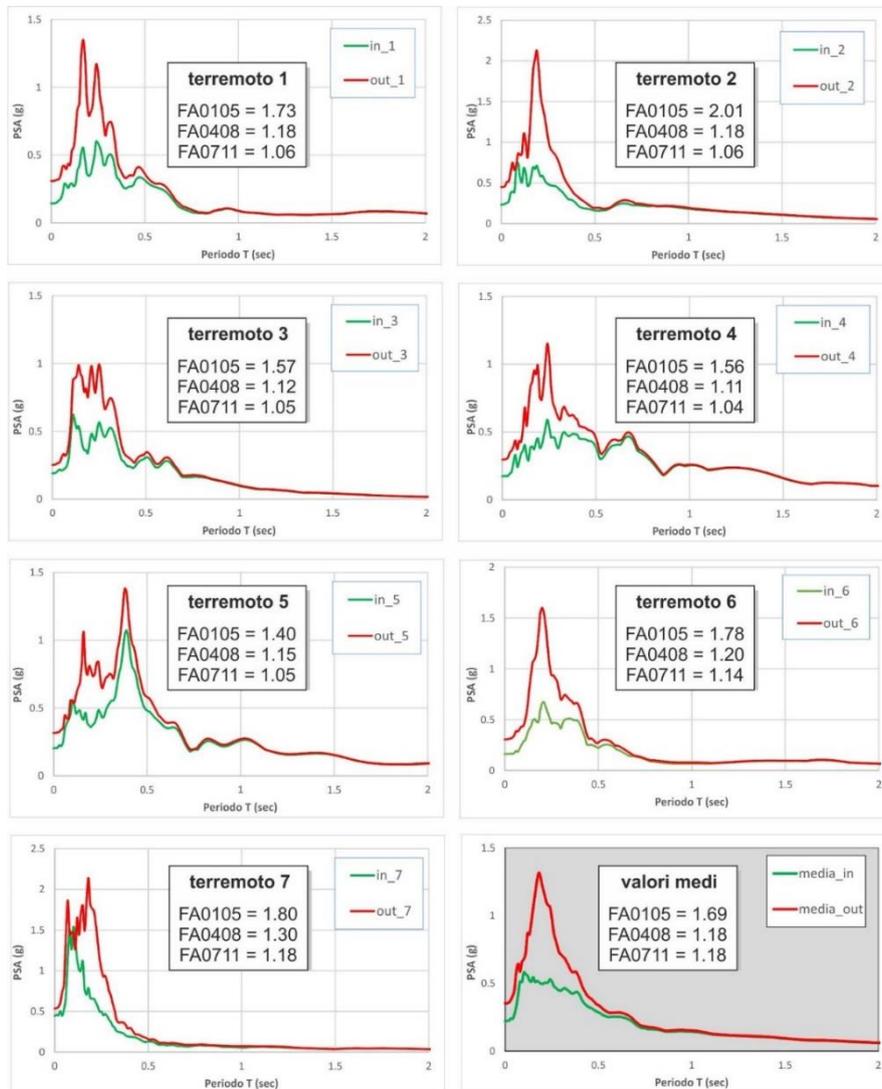


In particolare, come è possibile osservare in figura 8, i fattori di amplificazione utilizzati in riferimento ai più recenti Standard Nazionali sono:

$$FA_{0105} = \frac{\int_{0.1}^{0.5} PSA_{out}(T)dT}{\int_{0.1}^{0.5} PSA_{in}(T)dT} \quad (2)$$

$$FA_{0408} = \frac{\int_{0.4}^{0.8} PSA_{out}(T)dT}{\int_{0.4}^{0.8} PSA_{in}(T)dT} \quad (3)$$

$$FA_{0711} = \frac{\int_{0.7}^{1.1} PSA_{out}(T)dT}{\int_{0.7}^{1.1} PSA_{in}(T)dT} \quad (4)$$



**Fig.9** – Confronto in termini di spettri di risposta elastici tra i singoli accelerogrammi di output ed i rispettivi input, con indicazione dei valori dei fattori di amplificazione FA0105, FA0408 ed FA0711

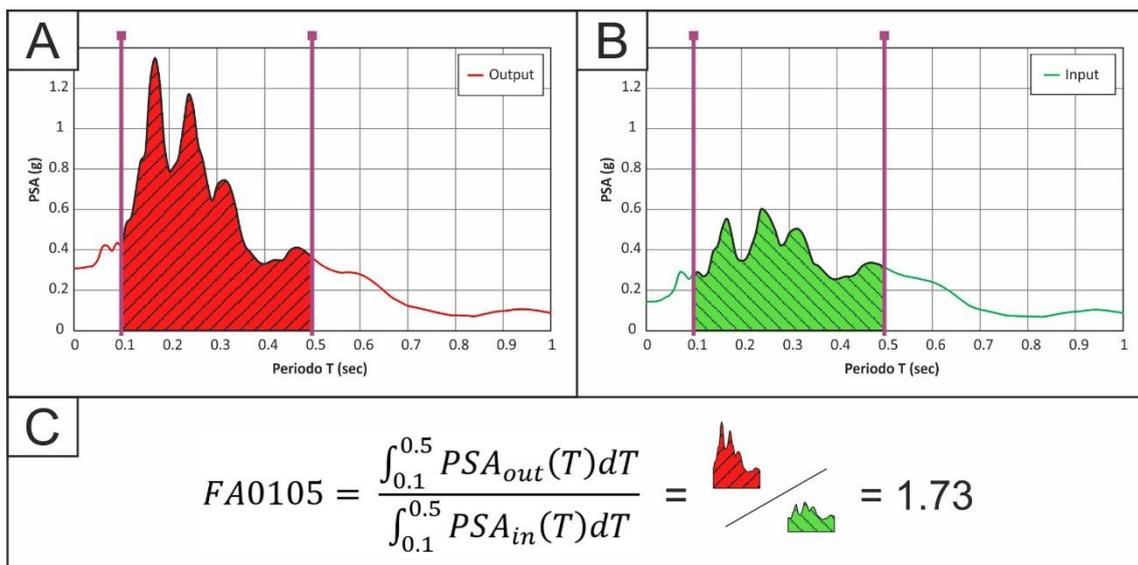


Partendo dallo spettro di risposta elastico in output, va effettuato il confronto tra gli integrali di output e di input, in riferimento a 3 differenti intervalli di periodo (formule n.2, 3 e 4). In figura 9 è illustrato graficamente il confronto in termini di spettri di risposta elastici tra i singoli accelerogrammi di output ed i rispettivi input, con indicazione dei valori dei fattori di amplificazione FA0105, FA0408 ed FA0711.

In figura 10, invece, è riportata la metodologia necessaria per il calcolo dei predetti fattori (nell'esempio viene indicata la procedura per il calcolo di FA0105, tenendo conto che per la stima degli altri fattori la procedura, variando il periodo di integrazione, è la medesima).

Si opera il calcolo dell'area sottesa dallo spettro di output (fig. 10a) nell'intervallo di periodi richiesto (nel nostro caso 0.1sec-0.5sec) e la si mette a rapporto con l'area sottesa dallo spettro di input (fig. 10B). Il valore risultante sarà corrispondente ad FA0105.

Qualora si adotti l'accortezza di discretizzare sia lo spettro di output sia lo spettro di input con passo di campionamento lineare ed omogeneo (si consiglia un passo di campionamento -  $\Delta t$  pari a **0.01sec**), è possibile semplificare l'operazione poiché, invece di effettuare un rapporto tra integrali (aree in figura), sarà possibile calcolare il fattore di amplificazione come rapporto tra sommatorie dei valori di pseudoaccelerazione (di seguito PSA) nell'intervallo di periodi necessario (sia per l'output sia per l'input).



**Fig.10** – Procedura per il calcolo del fattore di amplificazione FA0105

Si tenga presente che, analizzando la risposta sismica tramite l'utilizzo di settuple di accelerogrammi, **è assolutamente necessario effettuare il calcolo dei fattori di amplificazione sui singoli spettri di risposta** (da mettere a rapporto con il corrispondente spettro di input) **mediando successivamente i sette fattori determinati**. E' vietato, invece, il calcolo dei fattori di amplificazione direttamente sullo spettro medio, sebbene le differenze tra le 2 metodologie solitamente tendano ad essere contenute.

I risultati delle analisi di RSL dovranno essere organizzati mediante appositi fogli di calcolo e rappresentati in ambiente GIS.

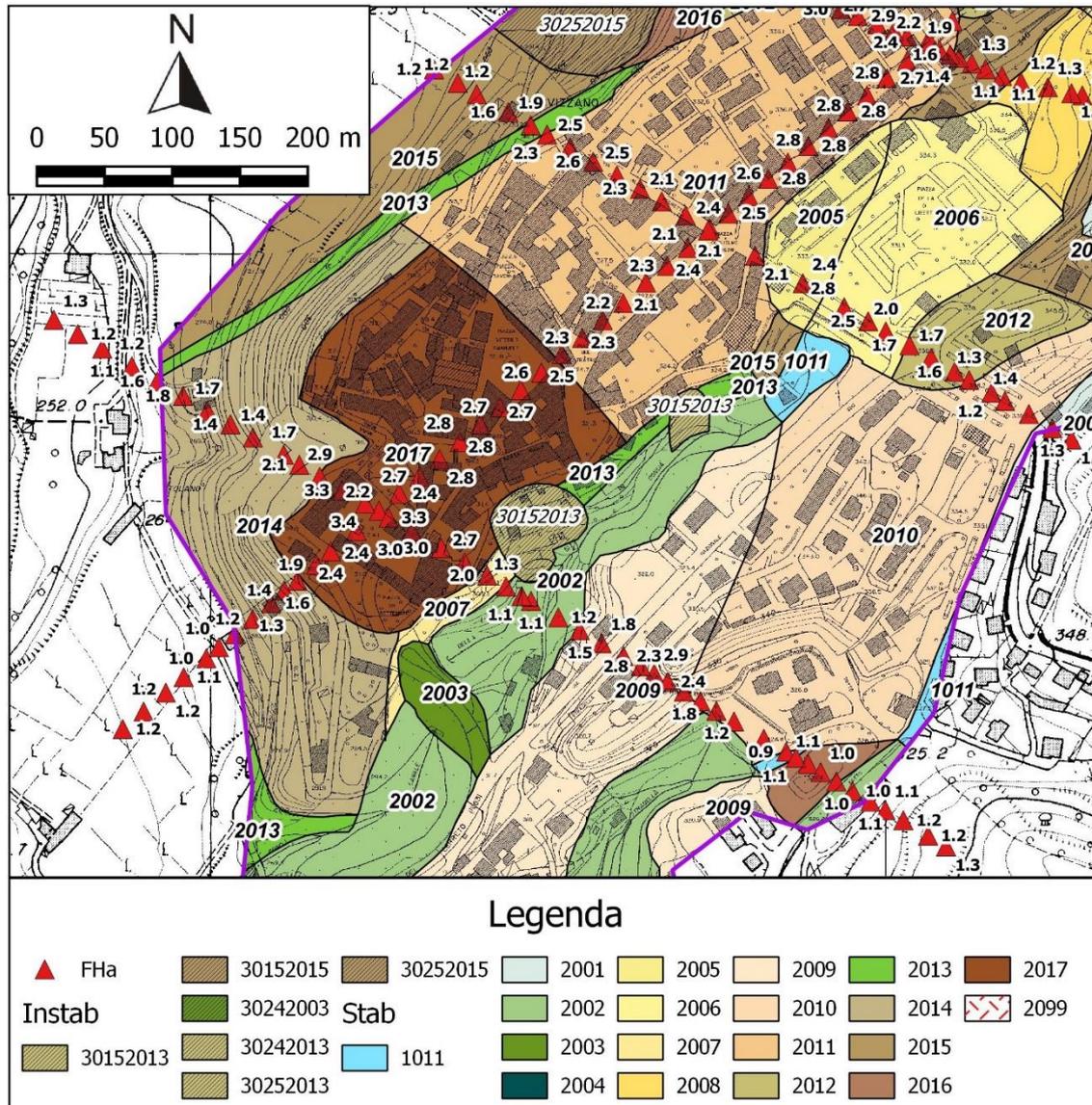
Infine, per poter verificare il contributo degli effetti bidimensionali sulla risposta sismica definita, bisognerà effettuare un confronto (in corrispondenza dei nodi più rappresentativi in sezione) con gli omologhi risultati derivanti da modellazione in ambiente monodimensionale.



## 5. RAPPRESENTAZIONE SU MAPPA ED ESTRAPOLAZIONE

Ai fini dell'estensione areale del dato, nei settori dell'area di studio non coperti dalle sezioni geologico-tecniche e, quindi, sprovvisti dei dati di output delle analisi numeriche, si dovrà ricorrere ad estrapolazione areale.

Tale processo, di per sé estremamente delicato ed esposto alla soggettività del soggetto realizzatore, deve essere effettuato mediante l'ausilio combinato della cartografia geologico-tecnica e della cartografia MOPS.



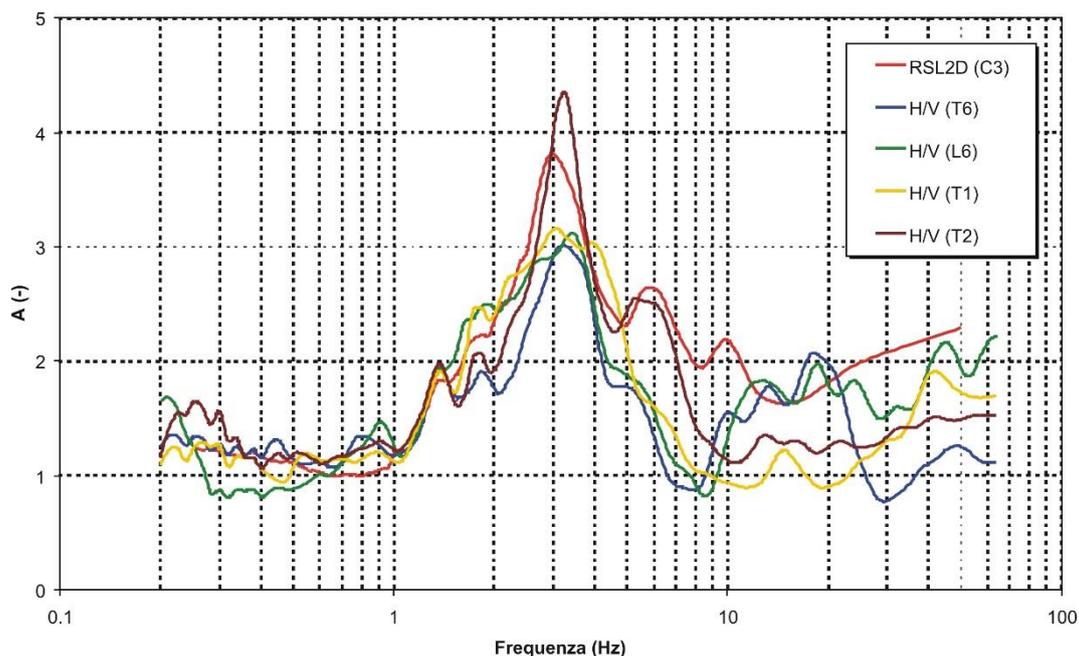
**Fig.11** – Sovrapposizione dei valori di FA0105 con le MOPS individuate nello studio di MS1. Da Gruppo di Lavoro Fivizzano (2017)

A tal proposito si tenga presente che in linea di massima può esistere una correlazione tra microzone relative ai due livelli di approfondimento (1 e 3), sebbene questo processo di correlazione (nell'ambito dell'estensione del dato) debba essere effettuato in maniera non automatica ma doverosamente critica.



Il modello logico su cui si può basare l'estrapolazione areale dei dati di amplificazione è il seguente:

- ❑ Rappresentazione su mappa di tutti i punti di output delle modellazioni dinamiche effettuate, con il relativo valore del fattore di amplificazione;
- ❑ Individuazione del contesto sismostratigrafico alla base di ogni valore di FA desunto;
- ❑ Identificazione sulle cartografie tematiche esistenti (in particolare geologico-tecniche e MOPS) di analoghe condizioni sismostratigrafiche su aree non coperte da analisi di risposta sismica locale (figura 11);
- ❑ Se in tali aree sono presenti, comunque, indagini sismiche attive e/o passive è opportuno, nel processo di estrapolazione, tener conto dei risultati di tali indagini;
- ❑ Raggruppamento di situazioni tipologiche ed amplificative simili mediante la discretizzazione dell'area in classi distinte da differenti intervalli di FA0105;
- ❑ Stima, in corrispondenza delle microzone individuate al punto precedente, dei fattori di amplificazione richiesti dagli Standard nazionali e regionali (FA0105, FA0408 ed FA0711);
- ❑ Rappresentazione della cartografia prodotta mediante software operante in ambiente GIS;
- ❑ Calcolo degli spettri medi per ogni microzona individuata nella MS3.



**Fig.12** – Confronto tra output di misure di microtremori a stazione singola (H/V) e funzione di amplificazione spettrale derivante da analisi di RSL. Da Gruppo di Lavoro Fivizzano (2017)

In figura 11 viene effettuata una sovrapposizione tra MOPS individuate nello studio di MS1 ed i valori di FA0105 stimati da analisi di RSL2D. La figura 12, invece, illustra il confronto tra output differenti (rapporti spettrali H/V da misure di microtremori e funzione di amplificazione spettrale derivante da analisi di RSL2D).

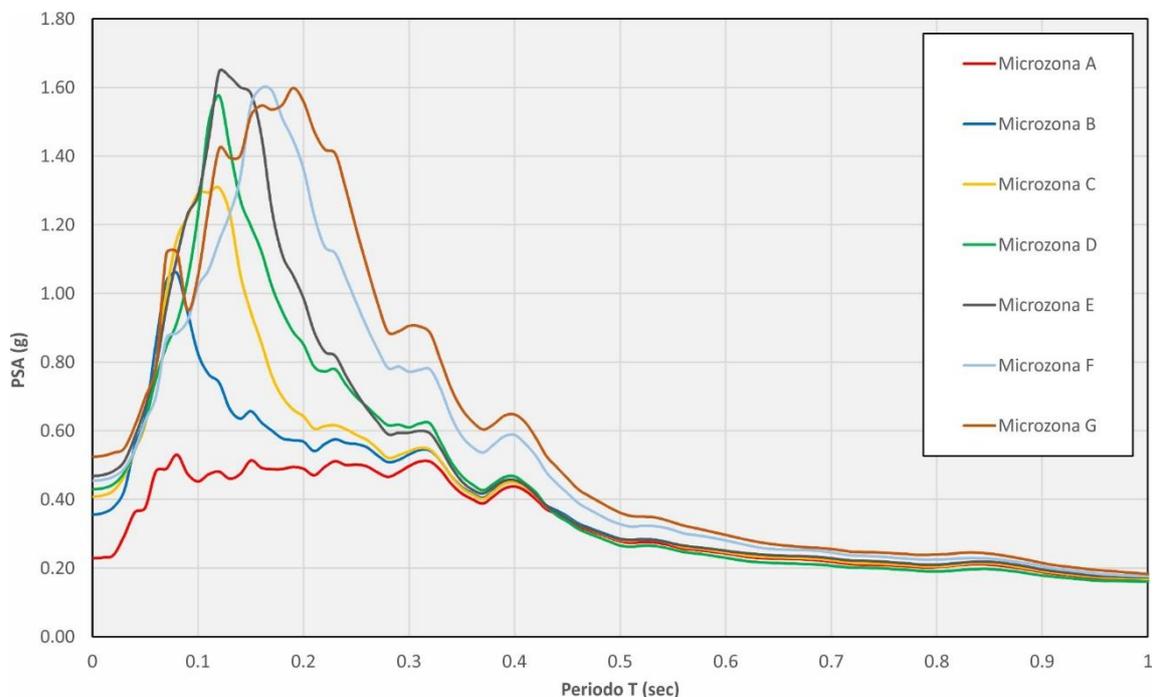
Al netto delle enormi differenze tra le metodologie, anche in termini di deformazione indotta nel terreno, il confronto (ottimale nel caso in figura) ha permesso di guidare l'estrapolazione dati e conseguente redazione della carta di MS3.



Sulla base delle esperienze maturate dall'Ufficio prevenzione sismica regionale nella redazione di studi di MS3 è possibile prevedere un'estrapolazione areale dei risultati basata principalmente sugli esiti delle analisi di RSL, con successivo controllo del risultato in riferimento all'estensione ed alla distribuzione delle MOPS e delle indagini di esplorazione del sottosuolo disponibili. Si tenga presente, però, che nel caso siano presenti pochi dati di output (aspetto sicuramente non positivo per l'esito dello studio e, quindi, da evitare in fase di programmazione delle analisi) non conviene operare un'estrapolazione areale svincolata dalle MOPS. Converrà, invece, rispettare i limiti delle microzone omogenee o, se necessario, operare una suddivisione nell'ambito della stessa MOPS in termini di amplificazione.

Si ricorda che, anche negli studi di MS3, **le microzone individuate**, oltre che essere omogenee sotto il profilo dell'amplificazione, dovranno riportare lo stesso **tipo\_z**, ovvero le **stesse caratteristiche sismostratigrafiche medie**.

Relativamente all'ultimo punto in elenco, come prescritto dalle specifiche tecniche nazionali, per ognuna delle microzone individuate, devono essere calcolati gli spettri di risposta elastici medi in termini di PSA, da consegnare in formato .txt secondo le specifiche richieste.



**Fig.13** – Spettri di risposta elastici medi in pseudoaccelerazione relativi alle microzone stabili suscettibili di amplificazione locale individuate nell'ambito di una MS3 nell'area del Mugello

## 7. INDICAZIONI DELLA MS3 PER LA GESTIONE DELLA FASE PROGETTUALE

E' in corso, in ambito regionale toscano, una revisione delle norme relative agli strumenti geologici a supporto della pianificazione urbanistica. Tale revisione discende dalle novità introdotte nella recente L.R. 65/2014 che introduce all'art.104 alcuni elementi di novità nell'ambito della prevenzione e mitigazione del rischio, tra cui quello sismico.

All'interno della revisione della norma, è stata prevista la possibilità di utilizzo diretto dei risultati della microzonazione sismica di terzo livello per la progettazione di opere ordinarie.

La realizzazione di studi di microzonazione sismica di terzo livello prevede, infatti, per la stima delle amplificazioni locali, la realizzazione di adeguate analisi di risposta sismica locale. Il



prodotto di output per tali analisi è solitamente costituito oltre che dai fattori di amplificazione, utilizzati per la quantificazione della minore o maggiore predisposizione dei terreni indagati all'amplificazione locale, anche da spettri di risposta elastici (caratterizzati da uno smorzamento del 5%).

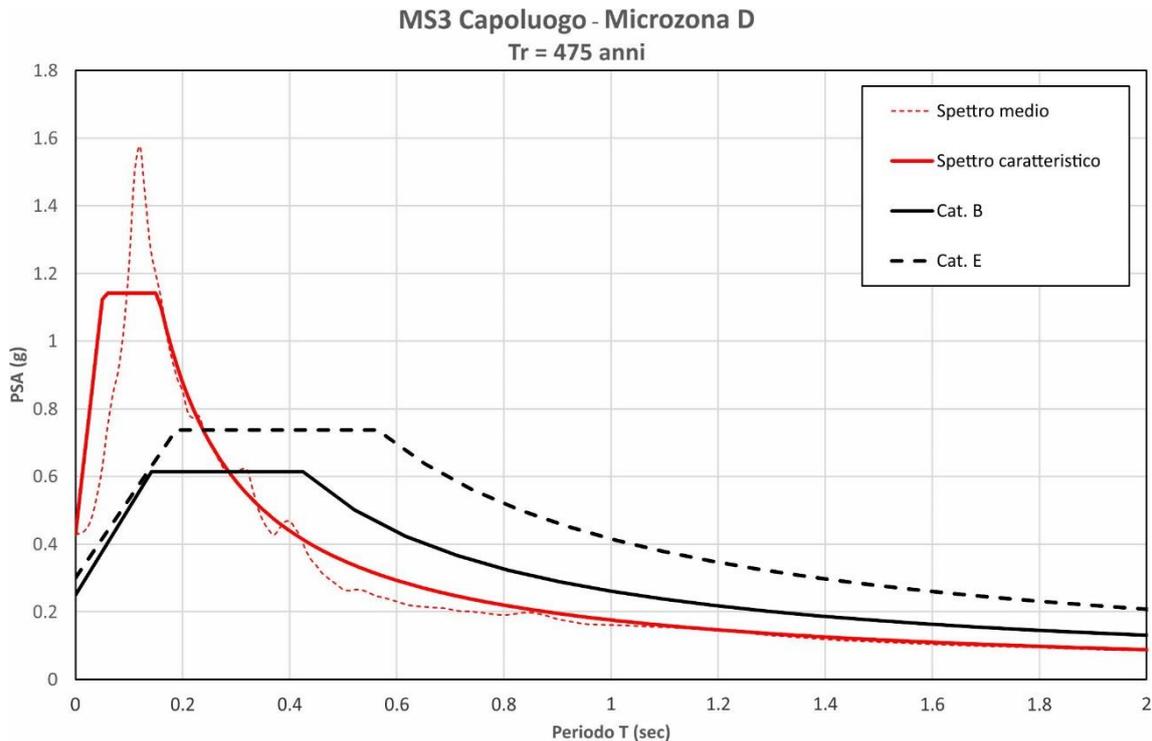
In aree di studio in cui la MS3 restituisce microzone stabili con amplificazione con limitata estensione areale ed in cui è presente una dettagliata definizione dell'azione sismica sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo, è possibile (in aggiunta a quanto previsto dagli ICMS) fornire per ogni microzona strumenti utili a rappresentare in quel determinato ambito areale l'azione sismica di progetto.

La metodologia (oggi operativa mediante Ordinanza n.55 nelle fasi di ricostruzione delle aree del Centro Italia colpite dai sismi del 2016) verte, quindi, sulla definizione di una procedura finalizzata alla definizione di spettri di risposta elastici, direttamente derivanti dagli studi di microzonazione sismica, da utilizzare nelle fasi progettuali successive a quella pianificatoria.

Effettuate le analisi di risposta sismica locale (tipicamente per un  $T_r=475$  anni) è possibile, realizzata la carta di microzonazione sismica di terzo livello, pervenire alla definizione di spettri "caratteristici", prevedendo i seguenti step:

- 1) Raggruppare per ogni microzona individuata (caratterizzata da un valore omogeneo del Fattore di amplificazione scelto) tutti gli spettri di risposta elastici di output ricadenti in essa, ricavandone lo spettro medio (in fig. 13 sono rappresentati gli spettri medi associati alle 7 microzone omogenee individuate in una MS3);
- 2) Operare la regolarizzazione dello spettro medio. Questa operazione permette di definire sia uno spettro di forma simile a quelli semplificati di normativa sia, di conseguenza, i suoi parametri dipendenti (**S**, **T<sub>b</sub>** e **T<sub>c</sub>**), mentre i parametri indipendenti sono fissati, come noto, dalla localizzazione del sito e dalle scelte progettuali alla base funzione della progettazione. La regolarizzazione dello spettro viene effettuata secondo le procedure illustrate negli ICMS 2008 e meglio specificate da Pergalani e Compagnoni (2013). In sintesi, secondo tale metodo, dallo spettro medio si ricavano i valori di **T<sub>A</sub>** (periodo per il quale è massimo il valore in accelerazione), **S<sub>A</sub>** (valore medio dello spettro in accelerazione per periodi compresi tra **0.5T<sub>A</sub>** ed **1.5T<sub>A</sub>**), **T<sub>V</sub>** (periodo per il quale è massimo il valore in pseudovelocità), **S<sub>V</sub>** (valore medio dello spettro in pseudovelocità per periodi compresi tra **0.8T<sub>V</sub>** ed **1.2T<sub>V</sub>**). Ricavati tali valori si determinerà l'estensione del plateau (tratto dello spettro con accelerazione costante) tenendo conto che **T<sub>c</sub> = 2π\*(S<sub>V</sub>/S<sub>A</sub>)** e **T<sub>b</sub> = 1/3T<sub>c</sub>**. Noti i parametri indipendenti dalle condizioni di sito (**a<sub>g</sub>** e **T<sub>d</sub>**) è possibile, infine, ricavare il parametro **S** come **a<sub>max</sub>/a<sub>g</sub>** dove **a<sub>max</sub>** è calcolata da analisi di risposta locale. Il parametro **F<sub>0</sub>**, indipendente dalle condizioni sismostratigrafiche del sito secondo l'approccio semplificato delle **NTC2018**, nel presente metodo viene reso, invece, dipendente dalle condizioni geologiche locali con valore pari al rapporto tra **S<sub>A</sub>** ed **a<sub>max</sub>** (accelerazione di ancoraggio dello spettro caratteristico). Lo spettro così regolarizzato è visibile in verde nell'esempio di figura 14, dove è messo a confronto con gli spettri semplificati di normativa (relativi alle categorie di sottosuolo B ed E) più attinenti alle condizioni sismostratigrafiche della microzona individuata nell'esempio di figura 14.

Questo spettro si riferisce ad un **periodo di ritorno di 475 anni** e, pertanto, può essere paragonato allo spettro semplificato di normativa relativo all'azione sismica per lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (**SLV**) per un edificio "ordinario" (Vita nominale **VN = 50 anni** e **Classe d'uso CU = II**).



**Fig.14** – Spettro caratteristico normalizzato secondo la procedura descritta nel testo, relativo alla microzona D per un comune del Mugello e per un periodo di ritorno pari a 475 anni a confronto con gli spettri semplificati di normativa più attinenti alle caratteristiche sismostratigrafiche della microzona in oggetto

Regularizzato lo spettro è possibile produrre un file .txt (in figura 15 il file .txt relativo allo spettro caratteristico rappresentato in figura) in cui saranno indicati nelle prime 3 righe (header) i dati d'origine dello spettro ed i parametri indipendenti e dipendenti desunti a seguito della regolarizzazione dello spettro medio.

Oltre all'analisi "ufficiale" della MS3, caratterizzata da un periodo di ritorno tipicamente di 475 anni (come per il centro abitato di Fivizzano) ed utile per la progettazione di opere con vita nominale  $V_n=50$ anni e classe d'uso II per lo Stato Limite Ultimo (usualmente Salvaguardia della Vita, **SLV**), bisognerà realizzare analoghe analisi imponendo come input sismico accelerogrammi spettro-compatibili e sismo-compatibili per periodi di ritorno propri dello Stato Limite di Esercizio (di solito Stato limite di Danno, **SLD**), che nel caso specifico corrispondono ad un **Tr=50 anni**. Operando con la medesima procedura precedentemente illustrata, sarà possibile ricavare spettri caratteristici normalizzati utilizzabili per rappresentare l'azione sismica allo SLE.

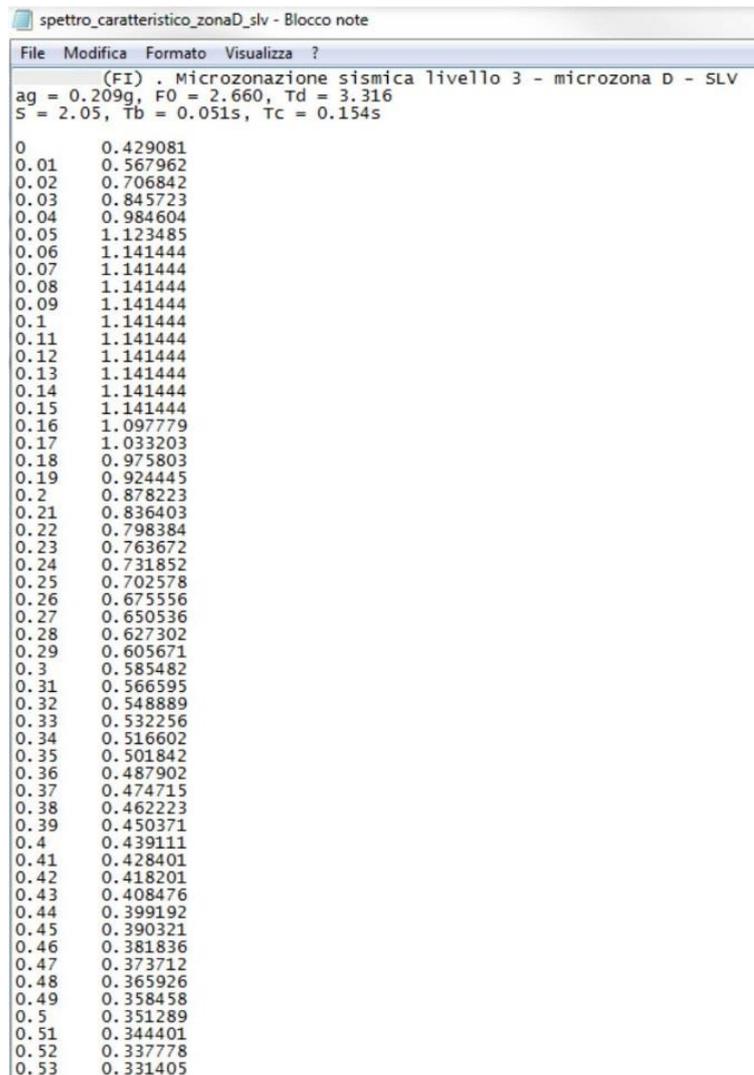
Infine, preme sottolineare alcune regole base per un corretto utilizzo degli spettri caratteristici:

- ❑ Si ritiene opportuno che tale approccio sia consentito per progetti caratterizzati al massimo da **classe d'uso II** (opere ordinarie). Per opere caratterizzate da classe d'uso superiore (opere strategiche e rilevanti) e ricadenti in aree definite a elevata pericolosità sismica sarà necessario rendere obbligatoria la stima dell'azione sismica di progetto mediante adeguate analisi di risposta sismica locale;
- ❑ L'utilizzo degli spettri caratteristici dovrà essere vincolato alla verifica, a cura del professionista incaricato della stima dell'azione sismica di progetto, della conformità del modello di sottosuolo (in termini di affidabilità, significatività e rappresentatività delle analisi effettuate) in corrispondenza del sito di progetto con quello tipico della microzona,

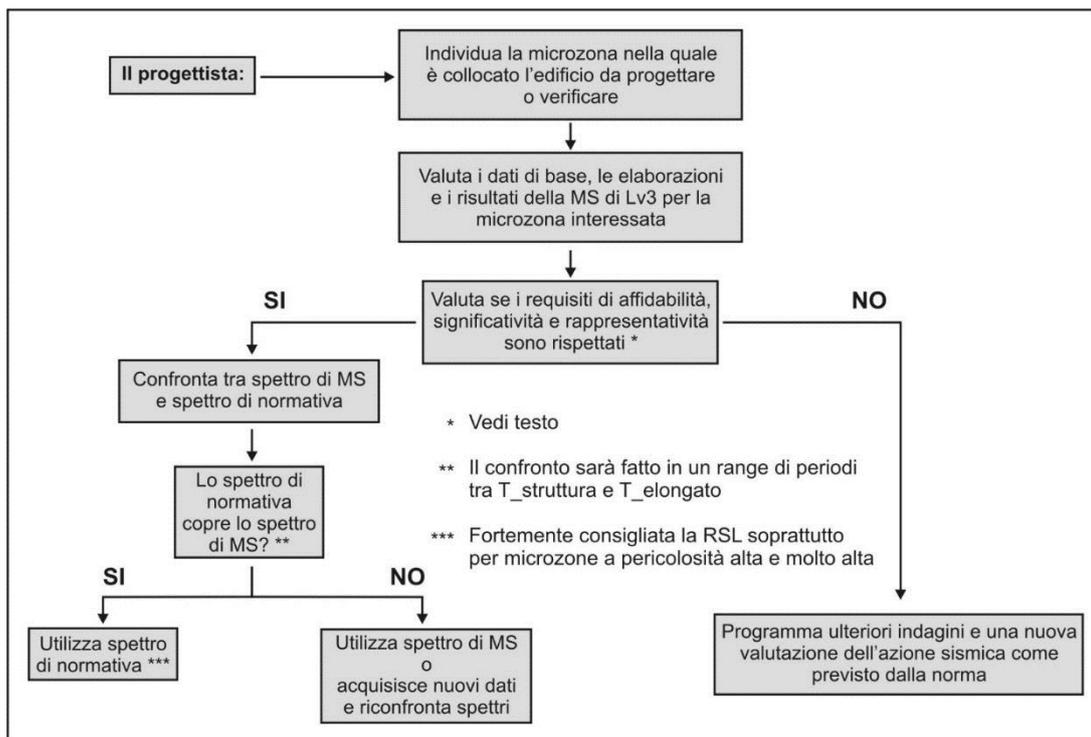


anche in riferimento alla quota di riferimento dell'opera in progetto (quota di imposta delle fondazioni);

- ❑ L'uso degli spettri caratteristici dovrebbe essere, inoltre, subordinato al rispetto di un indice di qualità, opportunamente definito, che valuti la qualità degli studi di livello 3 in particolare in ragione della densità e qualità delle indagini geotecniche e geofisiche utilizzate per la definizione del modello di sottosuolo. Un esempio di procedura di valutazione dell'opportunità di utilizzo degli spettri caratteristici può essere riassunta nel diagramma di flusso in figura 16;
- ❑ Se i valori dei periodi di ritorno di progetto corrispondono a quelli utilizzati per le analisi di livello 3 sarà possibile utilizzare direttamente i dati presenti nel file .txt (fig. 16). In alternativa, per piccole variazioni del periodo di ritorno (ad esempio il passaggio dall'azione sismica propria dello **SLD** a quella per **SLO**), assumendo quindi lo stesso grado di non linearità nel comportamento dei terreni, si potranno utilizzare i parametri dipendenti presenti nella "header" del file testo (**S**, **F0**, **TB**, **TC**) combinandoli con i parametri indipendenti (**ag**, **TD**) propri della scelta progettuale.



**Fig.15** – Spettro caratteristico normalizzato secondo la procedura descritta nel testo, relativo alla microzona D per un comune del Mugello e per un periodo di ritorno pari a 475 anni a confronto con gli spettri



**Fig. 16** – Diagramma di flusso della procedura per il possibile utilizzo degli spettri di risposta caratteristici (risultato della MS di livello 3) nella progettazione o verifica degli edifici. Da Gruppo di Lavoro Fivizzano (2017)

**Tab. 2** – Parametri dipendenti relativi agli spettri di risposta caratteristici ( $T_r=475$  anni), desunti a seguito del processo di normalizzazione. Da Gruppo di Lavoro Fivizzano (2017)

**Fivizzano (MS)**  
**Microzonazione sismica di 3°livello - SLU ( $T_r=475$  anni)**  
**Spettri caratteristici delle microzone stabili - parametri**

$a_g = 0.200g, T^*c = 0.279s$					
microzona	F0 (-)	S (-)	Tb (s)	Tc (s)	Td (s)
A	2.518	0.929	0.107	0.320	2.343
B	2.430	1.201	0.087	0.261	2.560
C	2.819	1.349	0.079	0.238	2.680
D	3.026	1.582	0.077	0.232	2.866
E	3.052	1.612	0.104	0.311	2.889
F	3.102	1.854	0.101	0.302	3.083
G	3.091	1.977	0.114	0.341	3.181
H	3.263	2.049	0.116	0.349	3.239
I	3.335	2.202	0.120	0.361	3.361
L	3.240	2.499	0.119	0.358	3.599



**Tab. 3** – Parametri dipendenti relativi agli spettri di risposta caratteristici ( $T_r=50$  anni), desunti a seguito del processo di normalizzazione. Da Gruppo di Lavoro Fivizzano (2017)

**Fivizzano (MS)**

**Microzonazione sismica di 3° livello - SLE ( $T_r=50$  anni)**

**Spettri caratteristici delle microzone stabili - parametri**

<b><math>a_g = 0.079g, T^*c = 0.251s</math></b>					
<b>microzona</b>	<b>F0 (-)</b>	<b>S (-)</b>	<b>Tb (s)</b>	<b>Tc (s)</b>	<b>Td (s)</b>
A	2.913	0.822	0.102	0.306	1.860
B	2.661	1.090	0.089	0.266	1.945
C	3.186	1.294	0.072	0.217	2.009
D	3.346	1.569	0.072	0.215	2.096
E	3.334	1.639	0.084	0.251	2.118
F	3.346	1.856	0.086	0.257	2.186
G	3.421	1.959	0.091	0.274	2.219
H	3.441	2.001	0.100	0.300	2.232
I	3.449	2.143	0.104	0.312	2.277
L	3.392	2.344	0.103	0.308	2.341

La progettazione di opere ricadenti in **classe d'uso I e II** ai sensi delle NTC 2018, caratterizzate da uno stato limite corrispondente ad un medesimo periodo di ritorno dello spettro rappresentativo, può avvalersi direttamente di tale spettro, previa verifica della maggior cautela, stabilita in base al valore di accelerazione spettrale per il/i periodo/i di interesse dell'opera, rispetto a quanto ricavabile in termini di spettro di risposta elastico dall'applicazione delle categorie semplificate di sottosuolo. Andrà comunque sempre verificata la reale corrispondenza delle condizioni geologico-tecniche del sito rispetto al contesto riportato nello studio di MS.

La normalizzazione di uno spettro di risposta permette la determinazione immediata di tutti i parametri (dipendenti ed indipendenti) che ne caratterizzano l'aspetto. Nelle tabelle 2 e 3 sono riportati i parametri per **SLV ( $T_r=475$  anni)** e **SLD ( $T_r=50$  anni)** relativi alla MS3 di Fivizzano (MS).

## **BIBLIOGRAFIA**

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.

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".

Commissione tecnica MS3907 (2014). *Microzonazione sismica. Standard di rappresentazione e archiviazione informatica, versione 4.0*, giugno 2015; Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale, Roma. [http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/commissione\\_opcm\\_3907.wp](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/commissione_opcm_3907.wp)



- Commissione tecnica MS3907 (2015a). *Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, Microzonazione sismica, Statistiche, dicembre 2014*, Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale, Roma. [[http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/commissione\\_opcm\\_3907.wp](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/commissione_opcm_3907.wp)]
- Commissione tecnica MS3907 (2015b). *Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC)*. Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale, Roma. [[http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/commissione\\_opcm\\_3907.wp](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/commissione_opcm_3907.wp)]
- Commissione tecnica MS3907; 2015c. *Commissione Tecnica per la microzonazione sismica, Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni (LQ)*. Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale, Roma. [[http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/commissione\\_opcm\\_3907.wp](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/commissione_opcm_3907.wp)]
- Commissione tecnica per la Microzonazione sismica (2016). *Microzonazione sismica – Statistiche dicembre 2015. Versione 1.0*. Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale. Roma, gennaio 2016.
- Commissione tecnica per la Microzonazione sismica (2016). *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica. Versione 4.0b*. Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale. Roma, ottobre 2015.
- D'Intinosante V. & GdL Fivizzano (2014). *Definizione del modello integrato di sottosuolo propedeutico alla realizzazione di studi di microzonazione sismica di livello 3 nel centro abitato di Fivizzano (MS)*. Atti del XXXIII Convegno Nazionale GNGTS, Bologna.
- 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 Fivizzano (2017). *Microzonazione sismica di livello 3: il caso del centro abitato di Fivizzano (MS)*. Roma, 2017.
- 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.
- Gruppo di Lavoro MS-AQ (2010). *Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana*. Regione Abruzzo – Dipartimento della Protezione Civile, L'Aquila, 3 vol. e Cd-rom.
- Housner G.W. (1959). *Behaviour of structures during earthquakes*. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. ASCE, Vol.85, N. EM14, pp. 109-129.
- 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.
- 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.
- 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*.
- Rota M., Zuccolo E., Taverna L., Corigliano M., Lai C.G. & Penna A. (2012). *Mesozonation 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.



Ufficio Prevenzione sismica – Regione Toscana (2018). *MICROZONAZIONE SISMICA REGIONALE Redazione delle specifiche tecniche regionali per l'elaborazione di indagini e studi di microzonazione sismica e prescrizioni per le analisi della Condizione Limite per l'Emergenza*

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.