



ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE 1D PER LA STIMA DELL'AZIONE SISMICA NELLE ZONE DI SUSCETTIBILITA' PER LIQUEFAZIONE PER LA MS DI EMPOLI (FI)

UFFICIO PREVENZIONE SISMICA, SETTORE SISMICA – REGIONE TOSCANA

(MAGGIO 2023)

Nell'ambito dello studio di MS2 di Empoli, cofinanziato con Ocdpc 780/2021, si è reso necessario svolgere degli approfondimenti di terzo livello in corrispondenza di un'area soggetta alla problematica della liquefazione dinamica dei terreni.

Quest'area, ubicata a nord del centro abitato del capoluogo comunale (fig.1), è stata oggetto di opportune indagini e verifiche, a seguito delle quali è passata da zona di attenzione (secondo l'approccio qualitativo del primo livello) a zona di suscettibilità per liquefazione.

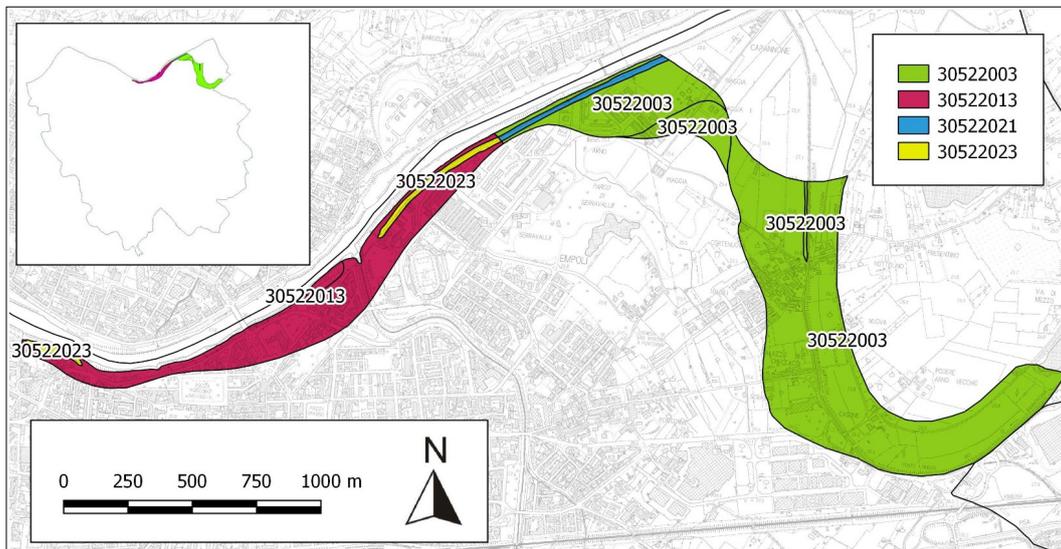


Fig. 1 – Ubicazione dell'area oggetto di studio con indicazione del codice tipo_i

In ottemperanza a quanto prescritto dagli Standard Nazionali di rappresentazione e archiviazione informatica (Versione 4.2 - Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, 2020) per queste aree è necessario pervenire alla valutazione dell'azione sismica mediante le procedure consone all'approfondimento di terzo livello, ovvero tramite l'esecuzione di analisi di risposta sismica locale e la restituzione non solo dei fattori di amplificazione, ma anche degli spettri di risposta elastici rappresentativi delle differenti tipologie sismostratigrafiche.

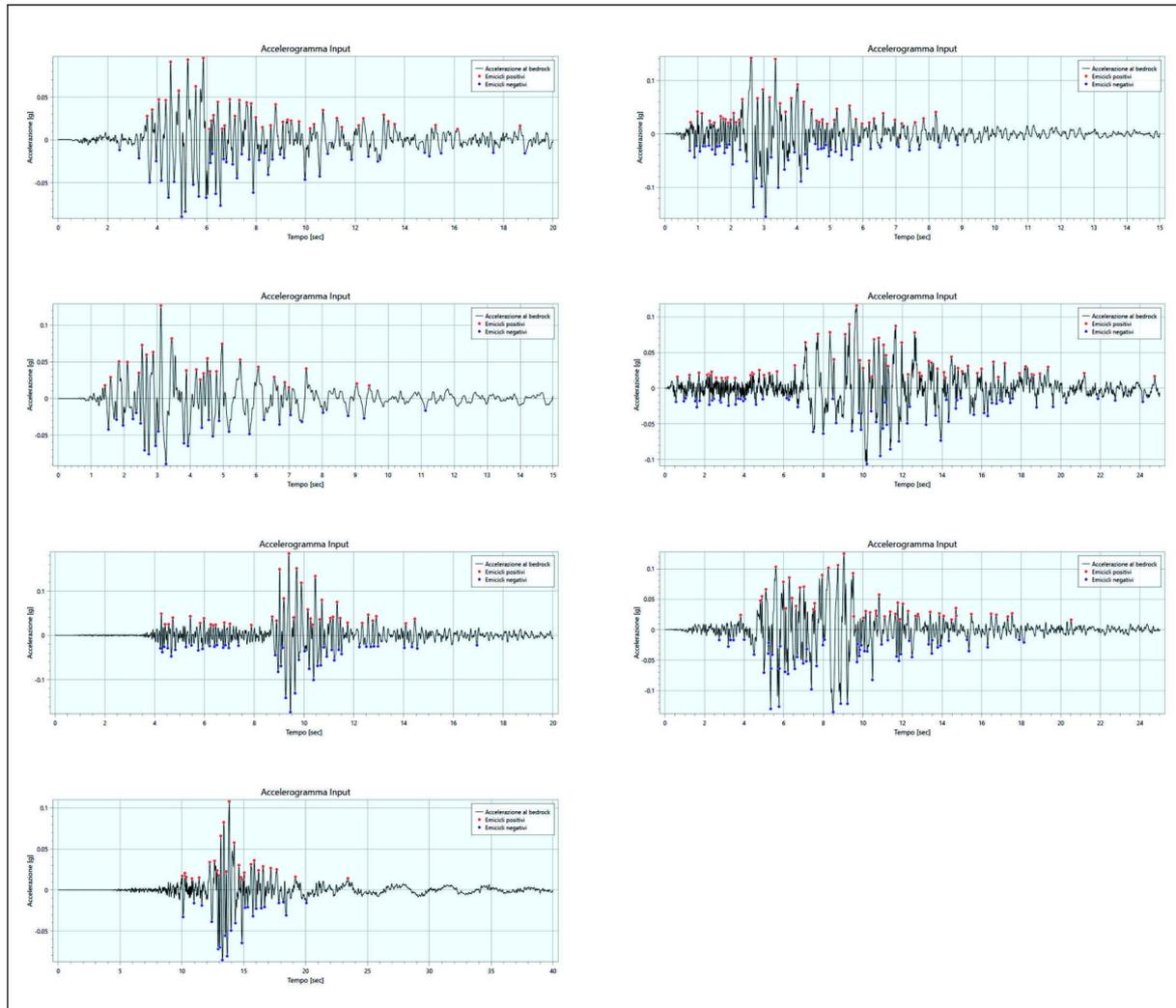


Fig. 2 – Input sismico in termini di storie temporali in accelerazione utilizzato per studi di MS3 per un $T_r=475$ anni. Fonte SCALCONA 3.0

Tab.1 – Principali caratteristiche sismologiche della settupla utilizzata

Magnitudo (Mw)	Distanza epicentrale (km)	Fattore di scala	Nome codice evento
6.20	29.90	1.25	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.33	NGA-West2 RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
5.90	10.10	1.27	ESM IT.ATN..HNN.D.19840507.174943.C.ACC.ASC
6.93	83.53	2.14	NGA-West2 RSN804_LOMAP_SSF115.AT2
5.40	50.40	2.78	ESM A.STRS..HNE.D.19901216.154540.C.ACC.ASC
6.69	38.07	0.90	NGA-West2 RSN1091_NORTHV_VAS000.AT2
6.60	31.00	0.43	KiK-net SMNH100010061330.EW2



L'area in oggetto fa riferimento a 4 differenti tipologie stratigrafiche, codificate nello studio di MS con i codici 2003, 2013, 2021 e 2023. Le colonne sismostratigrafiche, utilizzate come input per le analisi in oggetto, sono state definite grazie al contributo integrato delle informazioni stratigrafiche illustrate nella carta delle MOPS e delle indagini geofisiche allegate allo studio di MS.

Le 4 stratigrafie sono molto simili tra loro: la 2003 e la 2013 differiscono solo per la presenza di un livello coesivo tra le sabbie e le ghiaie di natura alluvionale (presente nella prima ed assente nella seconda). La microzona 2021, invece, ha la stessa stratigrafia della 2003, ma con presenza superficiale di depositi di riporto. Analogamente, la 2023 ha la medesima stratigrafia della 2013, con aggiunta del livello di riporto antropico superficiale

L'input sismico, invece, è stato estratto mediante il codice di calcolo 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 una 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 utilizzato come da prassi in questo ambito è stato 475 anni.

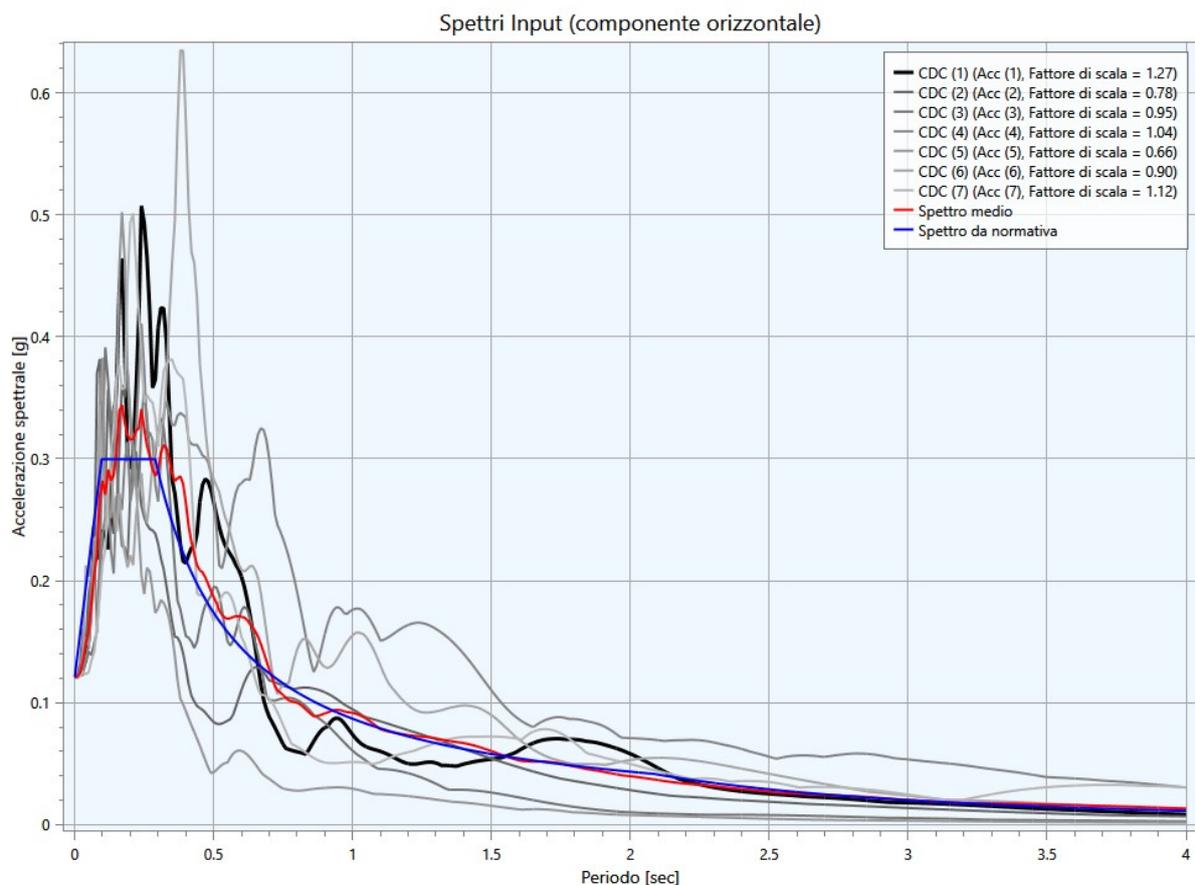


Fig. 3 – Spettri di risposta elastici relativi alla settupla di accelerogrammi riportata in figura 1. Con la curva rossa è indicato lo spettro medio, mentre con curva blu è riportato lo spettro target del sito (cat. A-T1)



In figura 2 è possibile osservare l'input sismico in termini di accelerogrammi mentre la figura 3 illustra l'input come spettri di risposta elastici. La tabella 1, invece, riporta i principali elementi sismologici collegati alla settupla selezionata (codice evento, magnitudo, distanza epicentrale e fattore di scala).

Tab.2 – Parametrizzazione dinamica dei litotipi investigati per la microzona definita 2003, finalizzata all'esecuzione di analisi di RSL monodimensionali secondo un modello lineare-equivalente

Litologia	Spessore (m)	Vs (m/s)	Rapporto Poisson	Peso di volume (kN/mc)	Modulo di taglio G (kPa)	curve dinamiche (G/G0 e D)
SC	10	240	0.49	18.63	109423	EPRI 93 – 0-20ft
ML	5	270	0.49	18.63	138488	EPRI 93 – PI=10
GW	3	340	0.48	19.12	225382	Rollins ghiaie
IS	40	400	0.48	19.61	319942	Idriss 1990 – Clay
	40	500	0.47	19.61	499909	
	40	600	0.46	20.59	755844	
	40	700	0.44	20.59	1028787	
Substrato sismico	-	800	0.42	21.57	1407678	lineare

Tab.3 – Parametrizzazione dinamica dei litotipi investigati per la microzona definita 2021, finalizzata all'esecuzione di analisi di RSL monodimensionali secondo un modello lineare-equivalente

Litologia	Spessore (m)	Vs (m/s)	Rapporto Poisson	Peso di volume (kN/mc)	Modulo di taglio G (kPa)	curve dinamiche (G/G0 e D)
RI	3	200	0.48	16.61	67749	Riporti Toscana
SC	10	240	0.49	18.63	109423	EPRI 93 – 0-20ft
ML	5	270	0.49	18.63	138488	EPRI 93 – PI=10
GW	3	340	0.48	19.12	225382	Rollins ghiaie
IS	40	400	0.48	19.61	319942	Idriss 1990 – Clay
	40	500	0.47	19.61	499909	
	40	600	0.46	20.59	755844	
	40	700	0.44	20.59	1028787	
Substrato sismico	-	800	0.42	21.57	1407678	lineare

Tab.4 – Parametrizzazione dinamica dei litotipi investigati per la microzona definita 2013, finalizzata all'esecuzione di analisi di RSL monodimensionali secondo un modello lineare-equivalente

Litologia	Spessore (m)	Vs (m/s)	Rapporto Poisson	Peso di volume (kN/mc)	Modulo di taglio G (kPa)	curve dinamiche (G/G0 e D)
SC	10	240	0.49	18.63	109423	EPRI 93 – 0-20ft
GW	9	340	0.48	19.12	225382	Rollins ghiaie
IS	40	400	0.48	19.61	319942	Idriss 1990 – Clay
	40	500	0.47	19.61	499909	
	40	600	0.46	20.59	755844	
	40	700	0.44	20.59	1028787	
Substrato sismico	-	800	0.42	21.57	1407678	lineare



Tab.5 – Parametrizzazione dinamica dei litotipi investigati per la microzona definita 2023, finalizzata all'esecuzione di analisi di RSL monodimensionali secondo un modello lineare-equivalente

Litologia	Spessore (m)	Vs (m/s)	Rapporto Poisson	Peso di volume (kN/mc)	Modulo di taglio G (kPa)	curve dinamiche (G/G0 e D)
RI	3	200	0.48	16.61	67749	Riporti Toscana
SC	10	240	0.49	18.63	109423	EPRI 93 – 0-20ft
GW	9	340	0.48	19.12	225382	Rollins ghiaie
IS	40	400	0.48	19.61	319942	Idriss 1990 – Clay
	40	500	0.47	19.61	499909	
	40	600	0.46	20.59	755844	
	40	700	0.44	20.59	1028787	
Substrato sismico	-	800	0.42	21.57	1407678	lineare

Le tabelle dalla 2 alla 5 illustrano, invece, le quattro differenti sismostratigrafie utilizzate per le analisi di RSL. Tali stratigrafie, riferite ad assetti profondi (il bedrock sismico può essere supposto a profondità superiori a 100m dal p.c.) offrono una buona affidabilità solo per le prime decine di metri, mentre presentano una non trascurabile incertezza per il livelli più profondi.

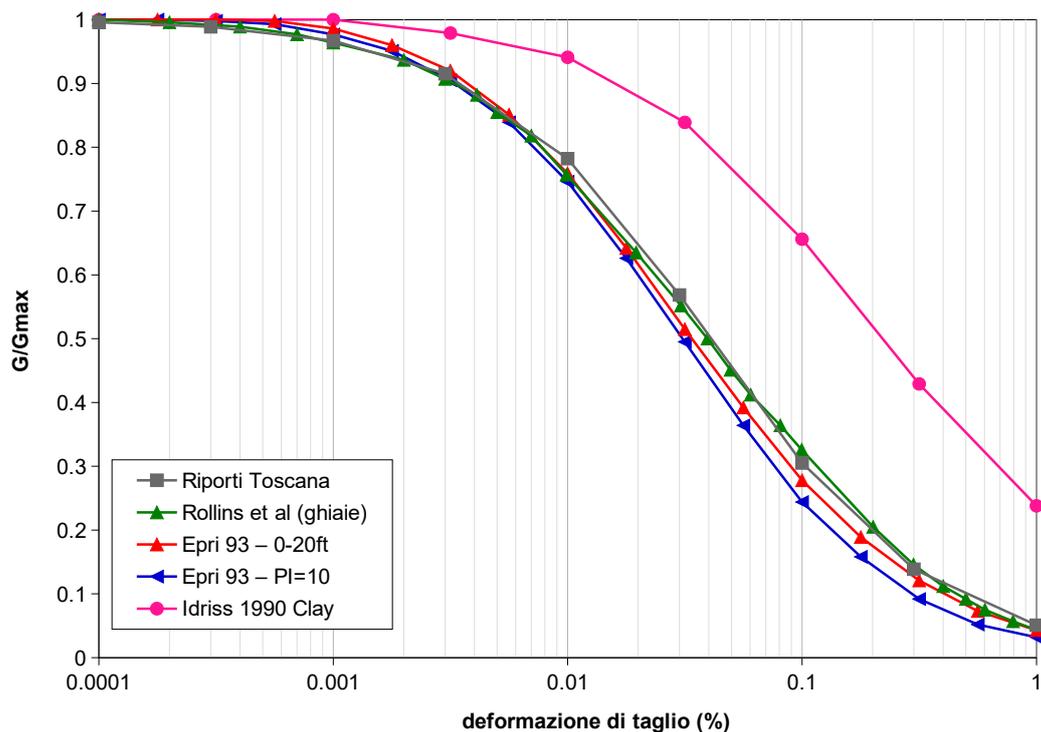


Fig.4 – Curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato $G(\gamma)$ con la deformazione tangenziale utilizzate nel presente studio

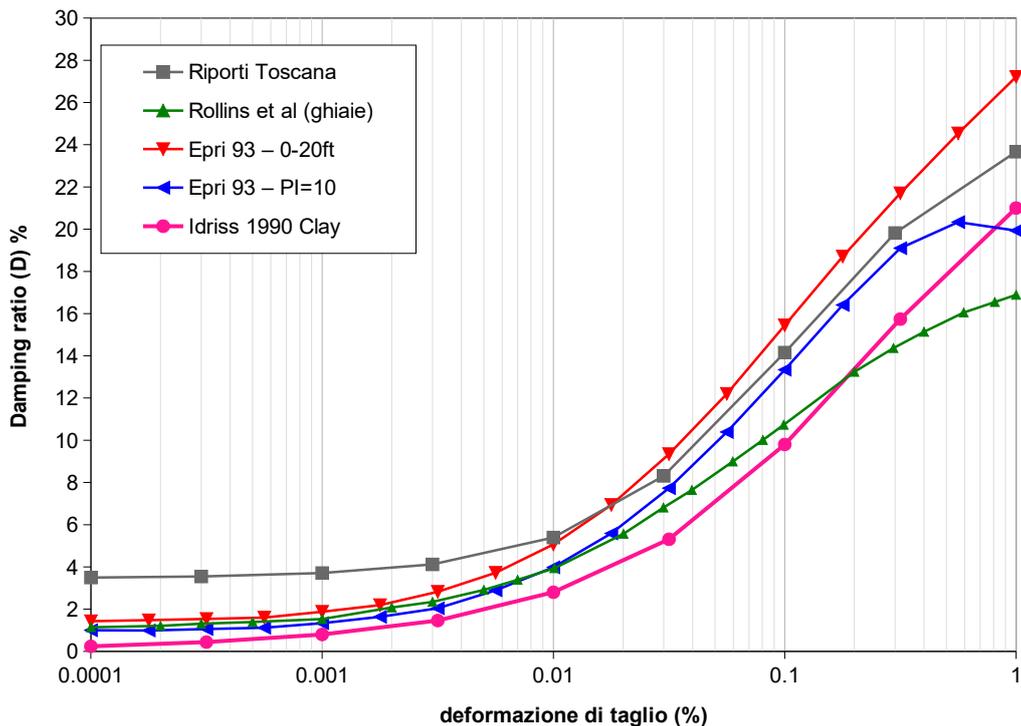


Fig.5 – Curve di di incremento del rapporto di smorzamento $D(\gamma)$ con la deformazione tangenziale utilizzate nel presente studio

Le analisi di modellazione dinamica in assetto monodimensionale sono state condotte mediante il software agli elementi finiti LSR2D della Stacec. Esso consente di definire il comportamento dinamico del terreno con un modello lineare equivalente, il quale si basa su parametri rappresentativi delle proprietà elastiche ed isteretiche dei terreni in funzione della deformazione di taglio. Nei modelli lineari equivalenti, pur attenendosi ad una formulazione lineare "a tratti", si considerano gli effetti di non linearità e di dissipazione.

Infatti, l'approccio di tipo lineare-equivalente delle analisi di RSL, impone la scelta per ogni litotipo indagato di curve dinamiche (G/G_0 e D) in grado di simulare parzialmente il comportamento non lineare del terreno. Le curve utilizzate sono visibili nelle figure 4 e 5. Ai litotipi ascrivibili al substrato sismico, invece, il software in assetto 1D attribuisce un comportamento di tipo lineare.

Le 4 analisi di RSL hanno restituito, compatibilmente con quanto teoricamente presumibile e con quanto rilevabile dalla campagna di misure H/V, degli spettri di risposta elastici simili tra loro e caratterizzati da amplificazione sismica elevata, confermando in termini di frequenze quanto desumibile dalla campagna di misure H/V. Nell'area di Empoli è presente in maniera diffusa un contrasto d'impedenza superficiale (vedasi la carta delle frequenze) e solo in una misura, eseguita nel centro abitato di Empoli, viene rilevato un contrasto profondo, piccato a circa 0.9Hz. In figura 6, a titolo d'esempio, è illustrata la funzione di amplificazione spettrale (FAS) relativa alla settupla di output per la verticale 2013. Nella figura sono illustrati i picchi principali (0.9Hz e 3-4Hz) compatibili con gli esiti delle misure H/V.

Poichè i 4 spettri (relativi a stratigrafie simili) sono simili tra loro, si è scelto di fornire per l'approfondimento di terzo livello un solo spettro medio di riferimento, ricavato come media dei 4 output ottenuti e rappresentato in figura 7 con curva rossa.



I fattori di amplificazione medi, riportati in tabella 6 alla colonna "zs_media", sono stati inseriti negli shapefile del terzo livello, a sostituzione dei precedenti fattori definiti mediante le procedure semplificate del secondo livello, nei confronti dei quali si nota una buona confrontabilità.



Fig.7 – Spettri medi in pseudoaccelerazione per i quattro siti indagati. La curva rossa illustra lo spettro medio dei 4 estrapolati, utilizzato per la definizione dell'azione sismica nel presente studio. La curva nera, invece, rappresenta lo spettro di input

Lo spettro medio (curva rossa in fig. 7) è stato trasformato nel formato richiesto dagli Standard Nazionali e posto nella cartella MS23/spettri sia come spettro in accelerazione sia in termini di spettro in velocità.

La settupla degli accelerogrammi di input, invece, è stata salvata nella cartella Indagini/documenti/accelerogrammi

Tab.6 – Valori dei fattori di amplificazione desunti dalle 3 verticali analizzate

	2003	2021	2013	2023	ZS_media
FA0105	1.89	1.86	1.83	1.92	1.88
FA0408	1.94	2.10	1.76	1.96	1.94
FA0711	1.82	1.91	1.75	1.83	1.83



In figura 8 sono illustrati gli spettri normalizzati delle singole verticali ed il loro spettro medio a confronto con lo spettro di cat.C.

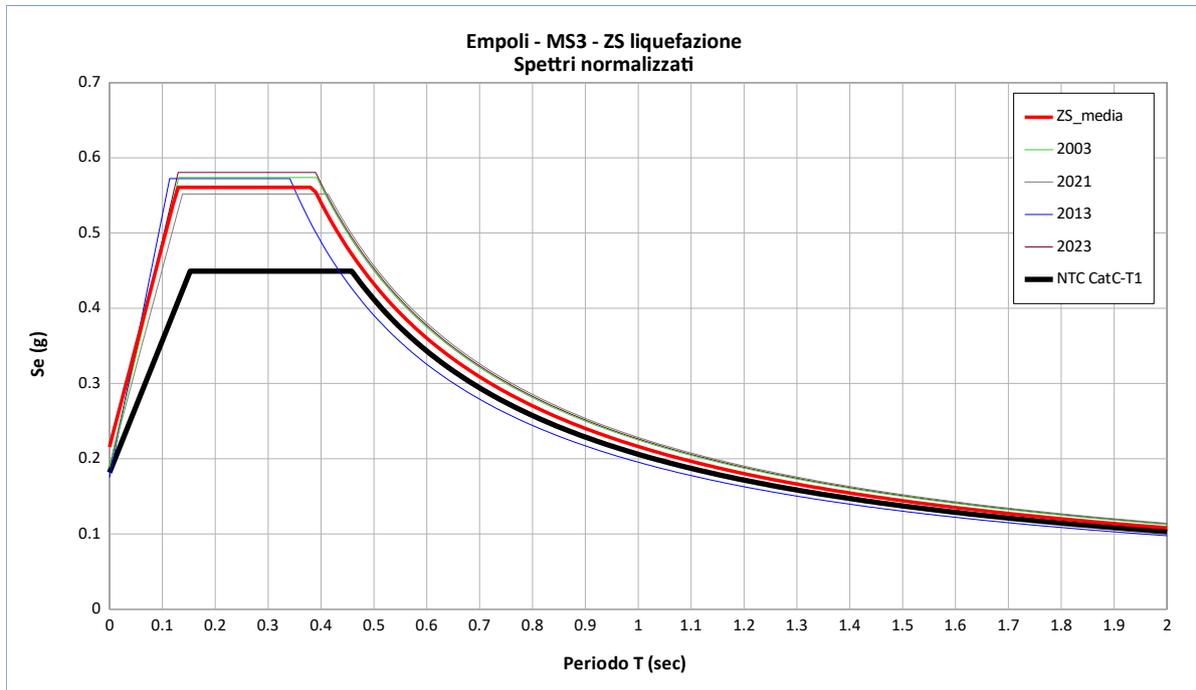


Fig.8 – Spettri di risposta elastici di figura 7 normalizzati secondo le procedure ICMS

Lo spettro di RSL si dimostra più cautelativo di quello semplificato di normativa. Tuttavia, l'elevata profondità del bedrock sismico determina una non trascurabile incertezza dell'input sismostratigrafico, ben conosciuto solo per profondità di 15-30m dal p.c.

BIBLIOGRAFIA

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 per la Microzonazione sismica (2018). *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismoindotte (FR)*. Versione 2.1. Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale. Roma, 2018.

Commissione tecnica per la Microzonazione sismica (2020). *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica*. Versione 4.2. Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale. Roma, dicembre 2020.

Commissione tecnica per la Microzonazione sismica (2022). *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazione*. Versione 2.0. Dipartimento delle Protezione Civile Nazionale. Roma, 2022.

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.

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.