

INTERVENTI DI ADEGUAMENTO DELLA DIGA DI GIUDEA
A GELLO NEL COMUNE DI PISTOIA (PT)



PROGETTO DEFINITIVO

Elaborato	Nome Elaborato:	Scala:
ET.04B	RELAZIONE SISMOTETTONICA, MODELLAZIONE SISMICA E ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE	
		Data: gennaio 2020

Settore: INGEGNERIE TOSCANE		Sede Firenze Via de' Sanctis, 49 Cod. Fiscale e P.I. 06111950488	
<small>Organizzazione dotata di Sistema di Gestione Integrato certificato secondo la norma ISO 9001 - ISO 14001 - OHSAS 18001 - SA8000</small>			
PROGETTAZIONE : PROGETTISTA - PROJECT MANAGER : ING. GIOVANNI SIMONELLI		COLLABORATORI : DOTT. GEOL. CARLO FERRI GEOM. MATTEO MASI	
GEOLOGO: DOTT. GEOL. FILIPPO LANDINI ESPROPRI: GEOM. ANDREA PATRIARCHI			
CONSULENTI TECNICI : WEST Systems ING. DAVID SETTESOLDI IdroGeo DOTT. GEOL. SIMONE FIASCHI 3 Tree ING. GIOVANNI CANNATA		COMMESSA I.T. : INGT-TPLPD-PBAAC252	
		RESPONSABILE COMMITTENTE : ING. CRISTIANO AGOSTINI	
DIRETTORE TECNICO INGEGNERIE TOSCANE : ING. PAOLO PIZZARRI		RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO : ING. LEONARDO ROSSI	

Rev.	Data	Descrizione / Motivo della revisione	Redatto	Controllato / Approvato
01	gennaio 2020	Prima Emissione	Fiaschi	Fiaschi

INDICE

1	INTRODUZIONE	3
2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	4
3	POTENZIALE SISMICO DELL'AREA	5
3.1	Parametri considerati	5
3.2	Zonazione sismogenetica ZS9 e mappa pericolosità sismica MPS04	6
3.3	Sismicità storica	7
3.4	Sismicità strumentale	10
3.5	Faglie attive e capaci	14
3.6	Contributi di dettaglio per la definizione del potenziale sismico dell'area	15
4	CONSIDERAZIONI SULL'ASSETTO SISMOTETTONICO DELL'AREA DI STUDIO	22
5	VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE DEL SITO E DEFINIZIONE DEI TEMPI DI RITORNO PER LE OPERE IN ESAME	23
5.1	VALUTAZIONE PERICOLOSITA' SISMICA	23
5.2	VALUTAZIONE TEMPO DI RITORNO TR	24
5.3	DEFINIZIONE DELLA TERNA DI VALORI a_g , F_0 , T^*C	24
5.4	EFFETTO DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE	25
6	EFFETTI DI SITO E AMPLIFICAZIONE LOCALE	26
6.1	Impostazione del Problema del Calcolo dell'amplificazione Locale	29
7	RISPOSTA SISMICA LOCALE	30
8	METODO DI CALCOLO ADOTTATO E DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO STRATA	31
8.1	METODO LINEARE EQUIVALENTE	31
8.2	PROCEDIMENTO ITERATIVO	33
9	INPUT	33
9.1	CURVE DI DECADIMENTO DEI MATERIALI	33
9.2	STRATIGRAFIA E CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI SINGOLI STRATI	33
9.3	ACCELEROGRAMMI E SPETTRI DI INPUT	34
10	SPETTRI OUTPUT	40
10.1	Verifiche diga	40
10.1.1	<i>SLO (TR = 120 anni)</i>	41
10.1.2	<i>SLD (TR = 201 anni)</i>	42
10.1.3	<i>SLV (TR = 1898 anni)</i>	43
10.1.4	<i>SLC (TR = 2475 anni)</i>	44
10.2	Scavi provvisionali diga	45
10.2.1	<i>SLD (TR = 35 anni)</i>	45
10.2.2	<i>SLV (TR = 332 anni)</i>	46
10.3	Verifiche scolmatore	47
10.3.1	<i>SLO (TR = 120 anni)</i>	47
10.3.2	<i>SLD (TR = 201 anni)</i>	48
10.3.3	<i>SLV (TR = 1898 anni)</i>	49
10.3.4	<i>SLC (TR = 2475 anni)</i>	50
10.4	Scavi provvisionali scolmatore	51
10.4.1	<i>SLD (TR = 35 anni)</i>	51
10.4.2	<i>SLV (TR = 332 anni)</i>	52
11	BIBLIOGRAFIA	53

ELENCO ALLEGATI

ALLEGATO 1: REPORT ANALISI RSL (SLO, TR = 120 anni; SLD, TR = 201 anni; SLV, TR = 1898 anni; SLC, TR = 2475 anni) – verifiche diga

ALLEGATO 2: REPORT ANALISI RSL (SLD, TR = 35 anni; SLV, TR = 332 anni) – scavi provvisionali diga

ALLEGATO 3: REPORT ANALISI RSL (SLO, TR = 120 anni; SLD, TR = 201 anni; SLV, TR = 1898 anni; SLC, TR = 2475 anni) – verifiche scolmatore

ALLEGATO 4: REPORT ANALISI RSL (SLD, TR = 35 anni; SLV, TR = 332 anni) – scavi provvisionali scolmatore

ALLEGATO 5: TABELLA SPETTRI DI RISPOSTA MEDI IN “g”: SLO, SLD, SLV e SLC – verifiche diga

ALLEGATO 6: TABELLA SPETTRI DI RISPOSTA MEDI IN “g”: SLD e SLV – scavi provvisionali diga

ALLEGATO 7: TABELLA SPETTRI DI RISPOSTA MEDI IN “g”: SLO, SLD, SLV e SLC – verifiche scolmatore

ALLEGATO 8: TABELLA SPETTRI DI RISPOSTA MEDI IN “g”: SLD e SLV – scavi provvisionali scolmatore

ALLEGATO 9: CARTELLA COMPRESSA CONTENENTE FILES OUTPUT ANALISI RSL (SLO, TR = 120 anni) - verifiche diga

ALLEGATO 10: CARTELLA COMPRESSA CONTENENTE FILES OUTPUT ANALISI RSL (SLD, TR = 201 anni) - verifiche diga

ALLEGATO 11: CARTELLA COMPRESSA CONTENENTE FILES OUTPUT ANALISI RSL (SLV, TR = 1898 anni) - verifiche diga

ALLEGATO 12: CARTELLA COMPRESSA CONTENENTE FILES OUTPUT ANALISI RSL (SLC, TR = 2475 anni) - verifiche diga

1 INTRODUZIONE

Su incarico della Soc. Acque S.p.a. vengono esposti e commentati i risultati dello studio eseguito per gli interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea in Loc. Gello nel Comune di Pistoia (PT).

Oltre alla normativa vigente il presente documento tiene conto delle integrazioni richieste dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti con comunicazione di Novembre 2018 e del parere espresso dall'Ufficio Tecnico per le Dighe di Firenze (nota prot. n.17336 del 26/07/2018).

Nei capitoli da 3 a 4, al fine dell'elaborazione di uno studio sismotettonico, sono stati presi in considerazione in considerazione la normativa vigente con la consultazione della zone sismogenetiche ZS9 (Meletti & Valensise, 2004) ed i valori di Peak Ground Acceleration (PGA).

La definizione della sismicità si è basata sui dati di sismicità storica, in un intervallo temporale dal 1005 fino al 2008, e i dati di sismicità strumentale per gli anni compresi tra il 1985 ed il 2019. Per l'analisi della sismicità recente strumentale è stato consultato il portale INGV-Centro Nazionale Terremoti (<http://cnt.rm.ingv.it/>), che dal 1° marzo 2017 ha sostituito il database ISIDe (Italian Seismological Instrumental and parametric Data-base: ISIDe Working Group, 2016).

Per quanto riguarda la presenza di faglie attive e capaci sono state consultate le banche dati ITHACA (Italy Hazard from CApable faults) e DISS versione 3.2.1 (Database of Individual Seismogenic Sources), nonché pubblicazioni scientifiche più recenti e relative alla pericolosità sismica dell'Appennino settentrionale (Mantovani et al., 2012; Martelli et al., 2017) allo scopo di verificare la presenza, in un'area prossima alla diga della Giudea ubicata in loc. Gello – Pistoia, di faglie capaci e sorgenti sismogeniche così come descritte e definite rispettivamente dal sito stesso dell'ISPRA (<http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/suolo-e-territorio-1/ithaca-catalogo-delle-faglie-capaci>) e dal sito dell'INGV (<http://diss.rm.ingv.it/diss/>).

Nel capitolo 5 sono stati calcolati i parametri relativi alla pericolosità sismica di base per gli stati limite previsti dalla normativa. Innanzitutto evidenziando tutti i parametri generali legati alla sismicità dell'area dell'intervento, per poi passare al livello di importanza delle opere.

Infine negli ultimi capitoli (da 6 a 10) è affrontata l'analisi di risposta sismica locale, dettagliando i dati utilizzati e le procedure utilizzate, oltre a fornire i risultati dei calcoli eseguiti.

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La normativa di riferimento per lo studio del problema in esame è:

- Decreto Ministeriale 17.01.2018

Testo Unitario - Norme Tecniche per le Costruzioni, Cap 7.11.3.1 (Risposta Sismica Locale).

- Consiglio Superiore Lavori Pubblici

Istruzioni per l'applicazione dell'“Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni” di cui al D.M. 17/01/2018 – Circolare Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 21 gennaio 2019, n.7.

- Decreto ministeriale 26.06.2014

Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse).

- M.I.T. - Dip. Per le infrastrutture, i sistemi informativi e statistici ministero delle infrastrutture e dei trasporti
– Dir. Generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche

Verifiche sismiche delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere complementari accessorie: istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26/06/2014 (NTD14) e al D.M. 17/01/2018 (NTC18).

- Consiglio Superiore Lavori Pubblici

Pericolosità sismica e criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale. – Allegato al voto n. 36 del 27/07/2007.

- Eurocodici in versione normata UNI

- Delibera GRT n.421 del 26/05/2014

Aggiornamento della deliberazione GRT n. 878 dell'8 ottobre 2012, recante “Aggiornamento della classificazione sismica regionale in attuazione dell'O.P.C.M. 3519/2006 ed ai sensi del D.M. 14.01.2008 – Revoca della DGRT 431/2006” e cessazione di efficacia dell'elenco dei Comuni a Maggior Rischio Sismico della Toscana (DGRT 841/2007).

3 POTENZIALE SISMICO DELL'AREA

3.1 Parametri considerati

Lo studio della sismicità si concentra in un intorno di circa 30 km di raggio intorno all'ubicazione della diga. Oltre alle note classificazioni sismiche in cui il territorio è suddiviso secondo le attuali normative vigenti, abbiamo analizzato i dati relativi alla sismicità storica e quelli relativi alla sismicità strumentale. I dati sismici di input consultati per la stesura della seguente relazione vengono qui di seguito elencati:

1. Normativa vigente

Zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti & Valensse, 2004; Meletti et al., 2008);

Peak Ground Acceleration (PGA) dell'area in base a MPS04 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/>; Gruppo di lavoro MPS, 2004; Stucchi et al., 2011);

2. Sismicità storica

Database Macrosismico Italiano (DBMI15);

Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15);

3. Sismicità strumentale

INGV-Centro Nazionale Terremoti;

4. Faglie attive e capaci

Banca dati delle faglie capaci ITHACA (ITaly HAZard from CAPable faults) e DISS versione 3.2.1 (Database of Individual Seismogenic Sources);

5. Contributi di dettaglio per la definizione del potenziale sismico dell'area (Martelli et al., 2017; Mantovani et al., 2012)

3.2 Zonazione sismogenetica ZS9 e mappa pericolosità sismica MPS04

In base alla consultazione della Zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004) l'area di interesse ricade all'interno della zona 916 (Figura 1).

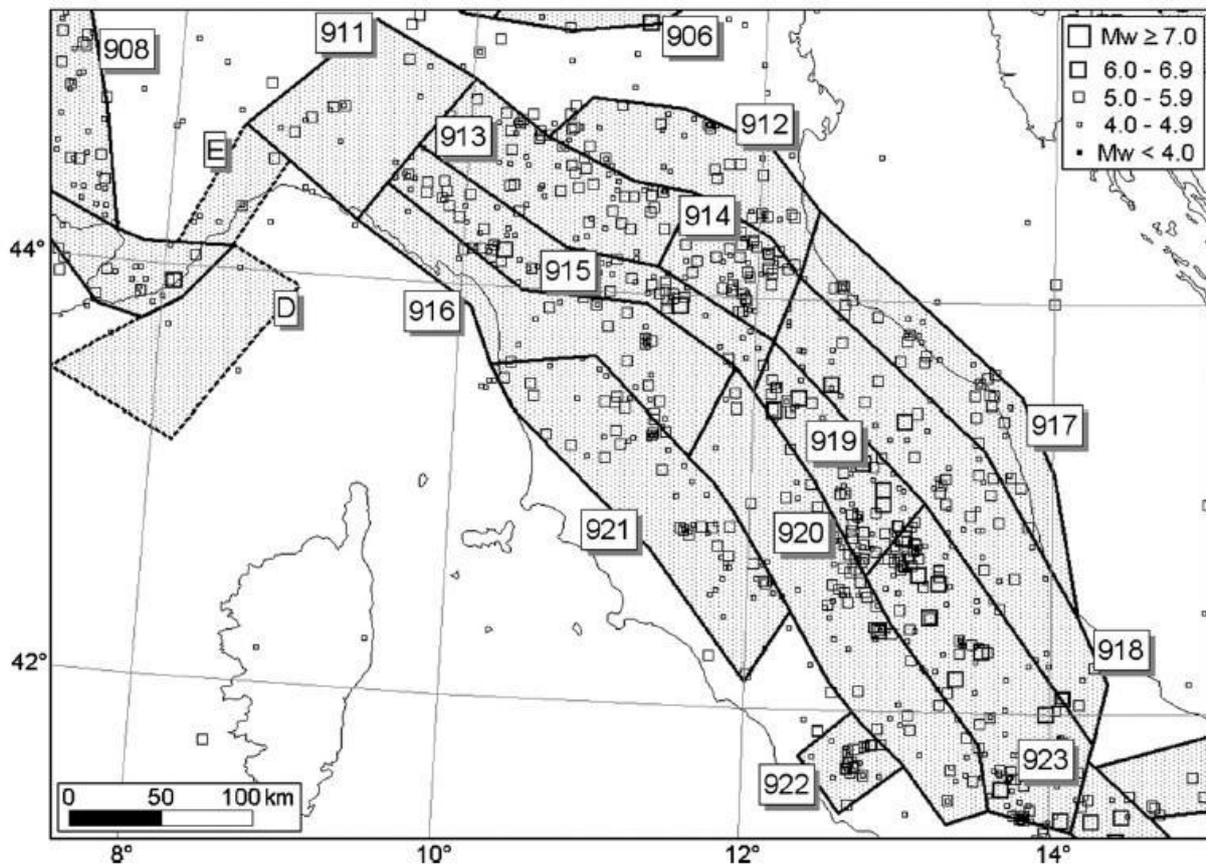


Figura 1. ZS9: Zone sorgente dell'Italia centrale (Meletti et al., 2008)

L'area oggetto di studio si localizza all'interno della zona sorgente "Versilia – Chianti" (916), che si colloca nella parte nord e nordoccidentale della Toscana, in corrispondenza del settore in distensione tirrenica secondo il modello sismotettonico di Meletti et al. (2000), che è caratterizzato da sismicità a bassa energia, che sporadicamente raggiunge valori di magnitudo elevati ($M_w > 5.5$).

La profondità efficace di questa sismicità è stata stimata in 6 km (basandosi su giudizio esperto), con meccanismo di fagliazione prevalentemente normale e una massima magnitudo osservata $M_w = 5.52$ (Meletti et al., 2008).

L'area di studio, benché facente parte interamente della zona sorgente 916 risulta poco distante dal limite della zona appena più settentrionale (915), dalla quale si differenzia per una maggiore profondità efficace (8 km) e valori di magnitudo osservata più alti ($M_w = 6.49$).

A questa sismicità sono associati valori di accelerazione massima del suolo (Peak Ground Acceleration - PGA) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, riferita ai suoli rigidi compresi tra 0.150 e 0.175.



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale

(riferimento: Ordinanza PCM del 20 marzo 2003 n.3274, All.1)

espressa in termini di accelerazione massima del suolo (a_{max})
con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni
riferita a suoli molto rigidi ($V_{s,u} > 800$ m/s; cat.A, All.2, 3.1)

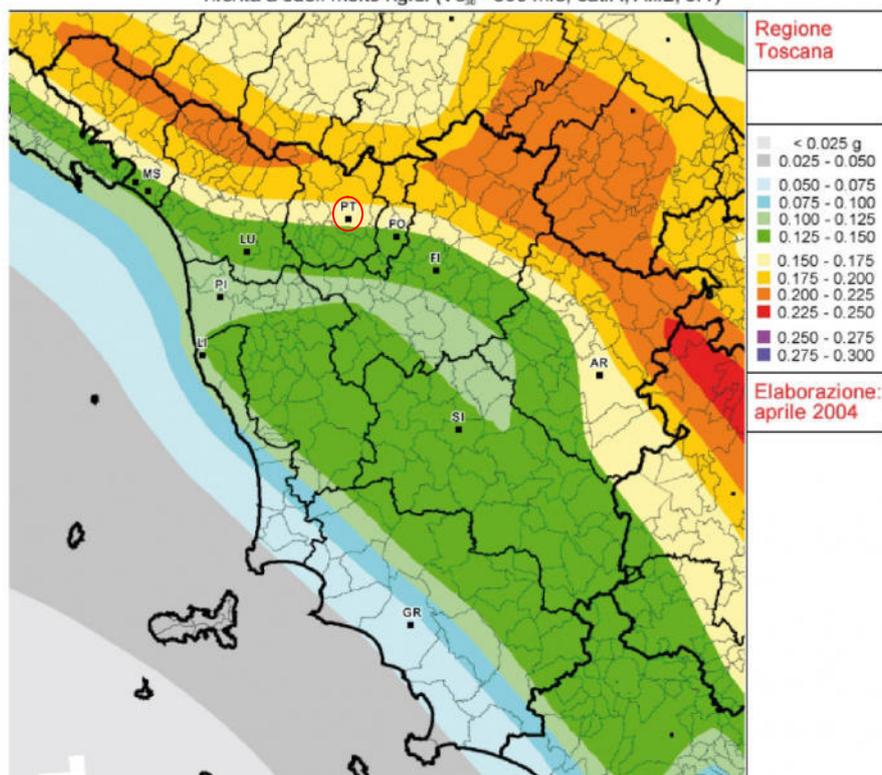


Figura 2. Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale (Ordinanza PCM del 28 aprile 2006 n.3519, All.1b) con il cerchio rosso è evidenziata l'area di interesse

La PGA è la misura della massima accelerazione del suolo (corrispondente al 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni) indotta del terremoto e viene misurata in accelerazione di gravità (g).

L'area in oggetto presenta PGA di fino ad un massimo di 0.174 g che caratterizza le zone di pericolosità sismica medio – elevata.

3.3 Sismicità storica

L'analisi della sismicità storica dell'area si basa sui dati disponibili online. Nel dettaglio, sono stati consultati il database macrosismico italiano 2015 (DBMI15) ed il catalogo parametrico del territorio italiano (CPTI15), al fine di individuare i terremoti storici documentati per il comune di Pistoia, per un totale di 91 eventi.

I dati ottenuti dalla consultazione della banca dati sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1. Eventi sismici riportati nella banca dati DBMI15 dell'INGV relativamente al comune di Pistoia. I campi delle tabelle descrivono: Int. - intensità macrosismica del terremoto avvertito nel comune di interesse; Year Mo Da Ho Mi Se – anno, mese, giorno, ora, minuti e secondi di accadimento dell'evento; Epicentral area – area epicentrale dell'evento sismico o area con i maggiori effetti macrosismici; NMDP - numero di dati di intensità macrosismica; Io - Intensità epicentrale

Effetti	<i>In occasione del terremoto del</i>				
Int.	Year Mo Da Ho Mi Se	Epicentral area	NMDP	Io	Mw
5	1005	Arezzo	4	6-7	4.86
6	1196	Pistoia	1	6	4.63
8	1293 03	Pistoia	1	8	5.56
5-6	1399 07 20 23	Appennino modenese	6	7	5.1
7-8	1527 10 04	Pistoia	1	7-8	5.33
5-6	1542 06 13 02 15	Mugello	46	9	6.02
5-6	1648 01 13 18	Pistoia	1	5-6	4.4
4	1727 03 09 11	Mugello	6	6-7	4.93
4-5	1729 06 23	Casentino	7	6	4.63
5	1731 12 09	Appennino pistoiese	3	4	3.7
F	1731 12 23	Appennino pistoiese	2	4	3.7
4	1740 03 06 05 40	Garfagnana	32	8	5.64
5	1746 07 23 18 15	Garfagnana	10	7	5.15
5	1759 03 18	Pistoia	1	5	4.16
5	1779 12 24 17	Appennino pistoiese	9	5-6	4.59
5	1779 12 31 16	Appennino pistoiese	3	5	4.16
4	1781 04 04 21 20	Faentino	96	9-10	6.12
F	1814 04 03	Costa pisano-livornese	4	6-7	5.12
6	1815 08 12	Pistoia	1	6	4.63
5	1843 10 25 03 30	Mugello	17	6-7	5.03
3	1846 08 14 12	Colline Pisane	121	9	6.04
3	1854 06 16 13 25	Imola	9	5	4.57
F	1864 03 15	Zocca	13	6-7	4.84
4-5	1864 12 11 17 40	Mugello	9	7	5.11
4	1869 06 25 13 58	Appennino bolognese	18	7-8	5.43
4	1870 10 30 18 34	Forlivese	41	8	5.61
2-3	1874 10 07	Imolese	60	7	4.96
3	1879 04 27 04 06	Appennino tosco-emiliano	20	7	5.03
F	1881 01 24 16 14	Bolognese	38	7	5.22
3	1881 09 28	Cesena	24	6-7	4.71
F	1885 02 26 20 48	Pianura Padana	78	6	5.01
4-5	1887 02 23 05 21 50.00	Liguria occidentale	1511	9	6.27
2	1887 11 14 05 48 05.00	Fiorentino	101	6	4.47
2-3	1891 06 07 01 06 14.00	Valle d'Ilasi	403	8-9	5.87
5	1895 05 18 19 55 12.00	Fiorentino	401	8	5.5
5	1895 08 07 19 49 32.00	Appennino tosco-emiliano	84	5	4.67
3	1895 10 25 00 24 58.00	Chianti	36	5-6	4.51
4-5	1896 07 08 01 51 28.00	Porretta Terme	17	5	4.37
F	1896 12 08 17 06 45.00	Sestola	26	5	4.33
4	1897 09 06 03 10 44.00	Valdarno inferiore	104	5-6	4.59
4	1897 12 18 07 24 20.00	Alta Valtiberina	132	7	5.09
4	1898 03 04 21 05	Parmense	313	7-8	5.37
5	1899 06 26 23 17 22.00	Valle del Bisenzio	138	7	5.02

4	1901 09 22 21 42 12.00	Valdelsa	35	6	4.68
2	1901 10 30 14 49 58.00	Garda occidentale	289	7-8	5.44
2-3	1902 03 05 07 06	Garfagnana	83	7	4.98
3	1903 07 27 03 46	Lunigiana	79	7-8	5.19
5-6	1904 06 10 11 15 28.00	Frignano	101	6	4.82
6	1904 11 17 05 02	Pistoiese	204	7	5.1
4	1909 01 13 00 45	Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
2-3	1909 08 25 00 22	Crete Senesi	259	7-8	5.34
3-4	1911 09 13 22 29 02.00	Chianti	115	7	5.08
3-4	1913 02 13 16 39	Corno alle Scale	26	5	4.18
5	1914 10 27 09 22	Lucchesia	660	7	5.63
2	1915 01 13 06 52 43.00	Marsica	1041	11	7.08
3	1916 05 17 12 50	Riminese	132	8	5.82
3	1916 08 16 07 06 14.00	Riminese	257	8	5.82
5	1919 06 29 15 06 13.00	Mugello	565	10	6.38
6-7	1920 09 07 05 55 40.00	Garfagnana	750	10	6.53
2-3	1922 08 02 21 13	Frignano	21	5	4.32
4	1924 06 12 21 03 48.00	Frignano	25	5-6	4.46
3	1929 05 11 19 23	Bolognese	64	6-7	5.29
4-5	1929 07 18 21 02	Mugello	56	6-7	4.96
4-5	1930 05 24 22 02	Appennino tosco-emiliano	43	5	4.91
3	1931 12 15 03 23	Mugello	35	6	4.62
4-5	1939 10 15 14 05	Garfagnana	62	6-7	4.96
2	1956 04 26 03 00 03.00	Appennino bolognese	89	6	4.74
2	1956 05 26 18 40	Appennino forlivese	76	7	4.99
2	1956 06 03 01 45 57.00	Appennino forlivese	62	6	4.51
4	1960 10 29 00 08 39.00	Mugello	69	7	4.91
3-4	1964 09 05 21 09	Appennino tosco-emiliano	22	5	4.35
4-5	1967 10 01 22 45 45.00	Pistoiese	8	4	4.04
5	1969 01 06 22 03 28.00	Appennino pistoiese	74	6-7	4.67
4	1972 10 25 21 56 11.31	Appennino settentrionale	198	5	4.87
4-5	1973 11 07 17 06 17.00	Pistoiese	9	4	4.06
4	1974 01 28 19 57 22.00	Appennino pistoiese	18	5	4.31
4	1975 04 04 09 10 53.00	Appennino pistoiese	6	4	4.07
4	1976 05 06 20 00 13.17	Friuli	770	9-10	6.45
F	1976 09 15 09 21 19.01	Friuli	54	8-9	5.95
5	1980 06 07 18 35 01.00	Garfagnana	102	6-7	4.64
F	1983 11 09 16 29 52.00	Parmense	850	6-7	5.04
2	1984 04 29 05 02 59.00	Umbria settentrionale	709	7	5.62
NF	1984 05 07 17 50	Monti della Meta	911	8	5.86
NF	1984 05 11 10 41 49.27	Monti della Meta	342	7	5.47
3	1995 10 10 06 54 21.72	Lunigiana	341	7	4.82
NF	1997 12 24 17 53 10.12	Garfagnana	98	5	4.33
4	1999 07 07 17 16 12.59	Frignano	32	5	4.67
2-3	2002 06 18 22 23 38.10	Frignano	186	4	4.3

F	2008 12 23 15 24 21.77	Parmense	291	6-7	5.36
3	2016 10 26 19 18 07.42	Valnerina	77		6.07
3	2016 10 30 06 40 17.32	Valnerina	379		6.61

Come rilevabile dalla Tabella 1 e dalla Figura 3 sottostante gli eventi sismici più significativi a Pistoia sono stati quelli del 1293 (Int = 8) e del 1527 (Int. = 7 – 8) entrambi localizzati a Pistoia; seguiti dal terremoto della Garfagnana del 1920, che a Pistoia ha avuto effetti di intensità pari a 6 – 7. In sintesi i maggiori valori di intensità macrosismica sono legati a terremoti locali di modesta magnitudo, mentre i grandi terremoti che si sono generati nell'Appennino hanno causato risentimenti più modesti.

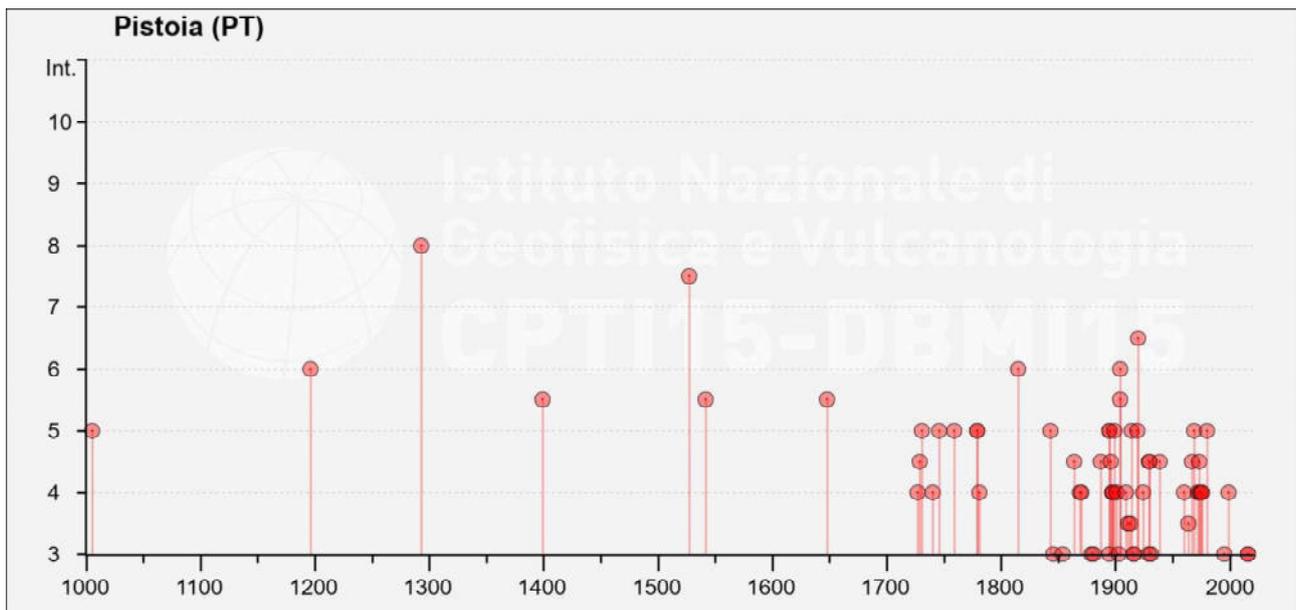


Figura 3. Grafico relativo agli eventi sismici riportati nella banca dati DBMI15 dell'INGV relativamente al comune di Pistoia

3.4 Sismicità strumentale

Relativamente alla sismicità strumentale è stata consultata la banca dati dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), che ha consentito di analizzare l'evoluzione recente della sismicità nell'area di interesse.

Il portale INGV-Centro Nazionale Terremoti ha sostituito l'Italian Seismological Instrumental and Parametric Data-Base (ISIDe) e contiene i dati parametrici di tutti i terremoti localizzati dalla sala di sorveglianza sismica dell'INGV di Roma. Si tratta di centinaia di migliaia di eventi avvenuti tra il 1 gennaio 1985 ed oggi. Per localizzare i terremoti vengono utilizzate più di 500 stazioni della Rete Sismica Nazionale (<http://terremoti.ingv.it/instruments>) gestita dall'INGV e di altre reti gestite da istituzioni ed enti internazionali e regionali.

Le localizzazioni di sala vengono poi riviste da operatori specializzati per produrre il Bollettino Sismico Italiano (<http://terremoti.ingv.it/help#BSI>) ed aggiornati all'interno del portale.

Nel tempo le modalità con le quali è stato fatto il bollettino sono cambiate e anche le magnitudo attribuite dagli analisti si sono modificate con il modificarsi della rete, che è passata da analogica a digitale da monocomponente a broad-band. Ad oggi vengono rivisti dal BSI solo gli eventi di $M \geq 1.5$.

Nel nostro studio tale banca dati è stata utilizzata nel periodo tra il marzo 1985 ed il 27/12/2019, in un intorno di 30 km dal punto di ubicazione della diga oggetto del presente studio.

Gli eventi estratti sono 3539 con magnitudo variabile tra 0.3 a 4.3 ed ipocentri che possono arrivare fino a quasi 67 km di profondità (per quelli localizzati nel versante emiliano dell'appennino). La distribuzione degli eventi sismici per classi di magnitudo è mostrata in Figura 4.

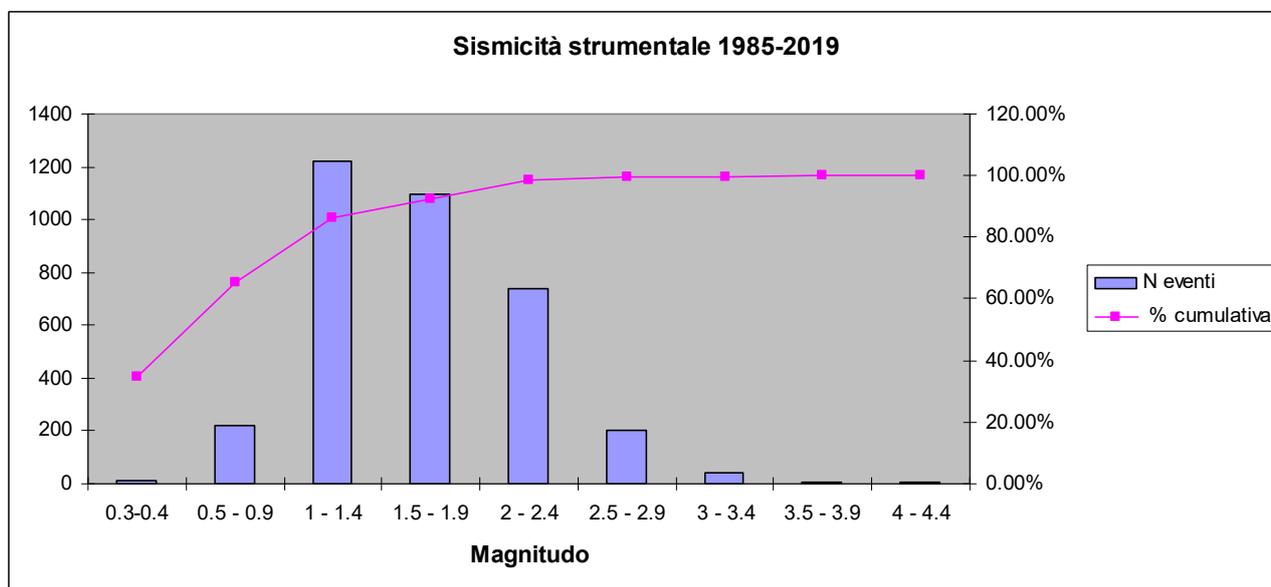


Figura 4. Grafico relativo agli eventi sismici registrati tra il 1895 ed il 2019 in un raggio di 30 km dall'area di studio (fonte dati: terremoti.ingv.it)

Dal grafico si può notare che oltre il 70 % degli eventi è caratterizzato dal magnitudo inferiore a 2, solo 51 eventi sul totale (meno del 2%) hanno una magnitudo maggiore di 3 e tra questi soltanto 4 hanno magnitudo superiore a 4.

Questi eventi hanno ipocentro variabile tra 10 e 23 km e sono localizzati ad una distanza compresa tra 20 e 30 km dall'area di studio(Figura 5).

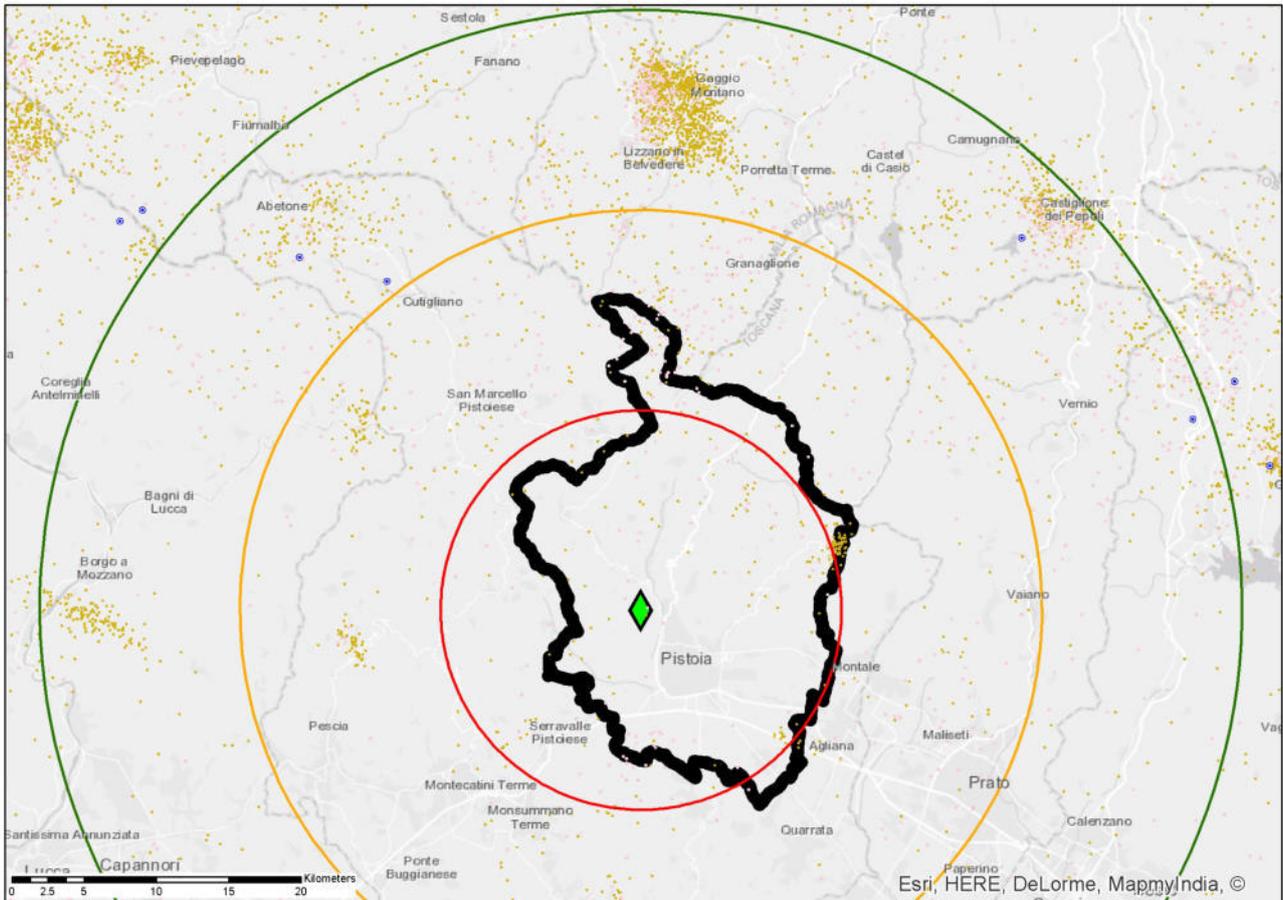


Figura 5. Eventi sismici registrati tra il 1895 ed il 2019 in un raggio di 30 km dall'area di studio (fonte dati: terremoti.ingv.it). Il punto in verde rappresenta l'ubicazione della diga oggetto di studio, il perimetro in nero il confine del comune di Pistoia, le circonferenze di colore rosso, arancio e verde corrispondono a distanze di 10, 20 e 30 km dal punto in verde. I punti in blu corrispondono a eventi sismici con magnitudo ≥ 4 , quelli in rosa a magnitudo tra 2 e 4, quelli marroni a magnitudo inferiori.

Dalla soprastante immagine emerge chiaramente come il maggior numero di eventi sismici si concentri in corrispondenza della dorsale appenninica, con frequenze maggiori sul versante emiliano (Lizzano in Belvedere, Gaggio Montano e Castiglion dei Pepoli), che su quello toscano (Cutigliano e Abetone).

Analisi del Potenziale sismico dell'area

Il grado di sismicità di un'area è definibile attraverso l'analisi della relazione Gutenberg-Richter sulla distribuzione di frequenza della magnitudo.

$$\log N = a - bM$$

Questa relazione esprime la magnitudo in funzione del logaritmo in base 10 del numero totale di terremoti in una determinata classe di magnitudo, dove N è il numero di eventi di una data magnitudo M , a e b sono costanti.

Si tratta di una legge a potenza che ha come carattere distintivo il fatto che tutte le aree sismiche hanno una relazione Gutenberg-Richter con pendenza b costante e molto vicina ad 1. La Gutenberg-Richter per l'area interessata dallo studio mostra un andamento che si discosta da quello teorico solo per magnitudo inferiori a 1. Questo è tipico dell'incompletezza della banca dati. Il massimo evento registrato nell'area di analisi ha magnitudo 4.3.

Una volta esclusi i dati relativi alla sismicità con magnitudo inferiore a 1.5 (non compreso) si ottiene un chiaro andamento rettilineo di con valore della costante $b=1.07$ vicino a quello previsto ($b=1$), come visibile chiaramente nel grafico di Figura 6.

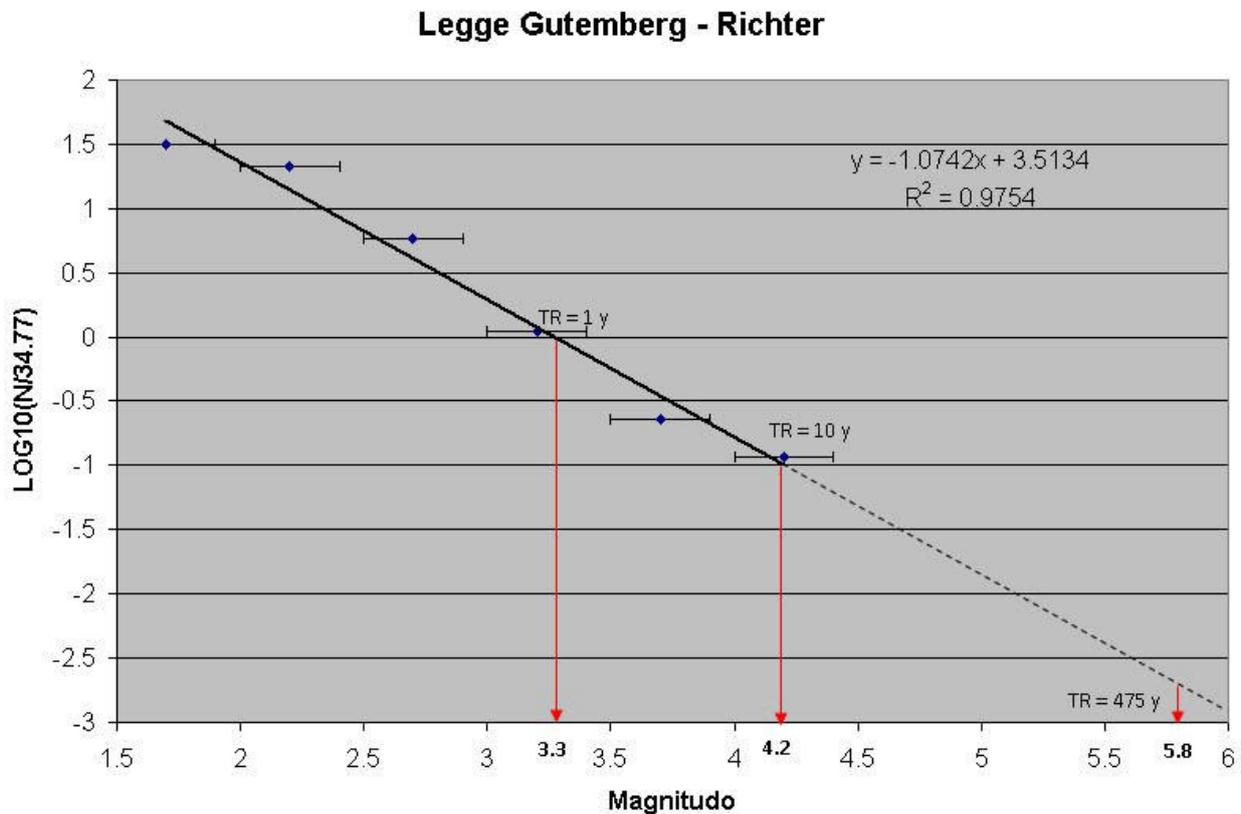


Figura 6. Curva Gutenberg – Richter ottenuta con gli eventi sismici aventi magnitudo ≥ 1.5 registrati tra il 1895 ed il 2019 in un raggio di 30 km dall'area di studio (fonte dati: terremoti.ingv.it). La linea di tendenza (la cui equazione è descritta in alto a destra) indica un andamento lineare con coefficiente $b=1.07$ molto vicino a quello previsto. Le frecce in rosso indicano le magnitudo calcolate per tempi di ritorno di 1, 10 e 475 anni

Valori del parametro b (pendenza della retta) molto più elevati (per esempio 2.5) indicano la presenza di numerosi terremoti di debole intensità rispetto a poche scosse di elevata intensità. ovvero condizioni anomale del rilascio sismico di un'area ed in genere si riscontrano in aree vulcaniche dove la sismicità non è totalmente legata al campo di stress regionale oppure in aree in cui è presente un "deficit" di rilascio energetico e quindi ad alto rischio sismico. La presenza quindi di un parametro $b = 1.07$ calcolato per l'area in oggetto indica condizioni totalmente "normali" e stabili nella liberazione dello stress regionale.

La relazione Gutenberg-Richter (G-R) consente anche di stimare le potenzialità sismiche di un'area tettonica ed effettuare delle previsioni sul grado di sismicità atteso. Ad esempio, nel nostro caso, attraverso l'analisi della G-R è possibile prevedere che l'area sarà mediamente interessata da 1 terremoto con magnitudo uguale 3.3 ogni anno il che equivale ad 1 terremoto di magnitudo 4.2 ogni 10 anni ($\log(N/34) = -1$). Calcoliamo quindi per l'area di studio un terremoto atteso con un periodo di ritorno di 475 anni con magnitudo pari a 5.8. Tale valore è del tutto coerente con la magnitudo massima media definita dalla ZS9 per la zona sorgente 916, tenuto conto anche del fatto che nel considerare gli eventi sismici in un raggio di 30 km, sono state inclusi anche eventi sismici relativi ad una zona sorgente (la 915) caratterizzata da una maggiore pericolosità sismica rispetto a quella dell'area oggetto di studio.

3.5 Faglie attive e capaci

Data l'importanza dell'opera oggetto del presente studio è necessario individuare la presenza di strutture sismogenetiche potenzialmente in grado di produrre fagliazione di superficie in corrispondenza dello sbarramento o delle opere di scarico e derivazione, chiarendo in tale eventualità, l'entità degli spostamenti attesi in termini probabilistici o di scenario.

A questo scopo sono state consultate le banche dati delle faglie capaci (ITHACA), disponibile dal sito di ISPRA, la banca dati DISS version 3.2 (Database of Individual Seismogenic Sources) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e sono state inoltre consultate pubblicazioni scientifiche quali Mantovani et al. (2012), Martelli et al. (2017).

Nel dettaglio, l'area si colloca in prossimità di strutture tettoniche e faglie capaci segnalate dalla banca dati ITHACA. In base a tale database, le faglie sono definite come lineamenti "capaci", che possono potenzialmente creare deformazione in superficie. Da tale database l'area di interesse in senso stretto è attraversata dalla faglia Firenze – Pistoia, avente direzione appenninica e da quella di Pistoia con direzione antiappenninica. Le due strutture si incontrano a circa 1 km a nord ovest dal bacino della Giudea.

Entrambe le faglie fanno parte del sistema di faglie Firenze – Pistoia, hanno cinematismo normale e sono state descritte da Ambrosetti et al. (1987). Per entrambe le strutture non si hanno notizie in bibliografia di evidenze superficiali, né della loro ultima attività.

Dalla consultazione della banca dati DISS è emerso invece quanto di seguito descritto.

Per quanto riguarda la sorgente sismogenetica più vicina (classificata come "sorgente sismogenetica discussa"), questa consiste nel sistema di faglie "Prato – Fiesole", proposto per la prima volta da Boccaletti et al. (2001) sulla base di evidenze geologiche. Come visibile in Figura 7 essa, escluso la parte occidentale, più vicina a Pistoia, coincide con la faglia capace Pistoia – Firenze descritta in precedenza.

Relativamente a questa sorgente sismogenetica non ci sono testimonianze in letteratura di scarpate strutturali in corrispondenza del contatto tra substrato e depositi sciolti e non sono mai state determinate larghezza e profondità della struttura.

La sorgente sismogenetica presenta caratteristiche cinematiche compatibili con i dati relativi alla tettonica regionale ed è presumibilmente responsabile degli eventi sismici aventi bassa magnitudo (storici e registrati strumentalmente) avvenuti nel comune di Pistoia o comunque nelle sue vicinanze.

Tuttavia in letteratura non si hanno notizie di fenomeni di fagliazione superficiale associati a questa struttura.

A distanze superiori ai 20 km dalla diga sono invece presenti sorgenti sismogenetiche sia composite, sia individuali.

A nord ovest è presente la sorgente sismogenetica della Garfagnana (composta da due sorgenti sismiche individuali: una settentrionale ed una meridionale) è ben documentata e descritta in letteratura e ad essa sono attribuiti terremoti di magnitudo massima $M_w = 6.4$.

A nord est invece ovest è presente la sorgente sismogenetica "Mugello – Città di Castello – Leonessa". In particolare nelle aree più prossime al comune di Pistoia questa è costituita da due sorgenti sismiche individuali entrambe ben descritte e documentate in letteratura.

La prima è quella del Mugello occidentale, responsabile del terremoto del 1542 (sulla base del quale viene adottato un valore di magnitudo $M_w = 5.9$ per questa sorgente) che a Pistoia registrò un'intensità macrosismica di 5 – 6; la seconda è quella del Mugello orientale, responsabile del sisma del 1919 (sulla base del quale viene adottato un valore di magnitudo $M_w = 6.2$ per questa sorgente) che a Pistoia registrò un'intensità macrosismica di 5.

Infine, a nord (a distanza maggiore di 30 km) è presente la sorgente sismogenetica "Bore-Montefeltro-Fabriano-Laga", interessante tutto il settore adriatico dell'appennino.

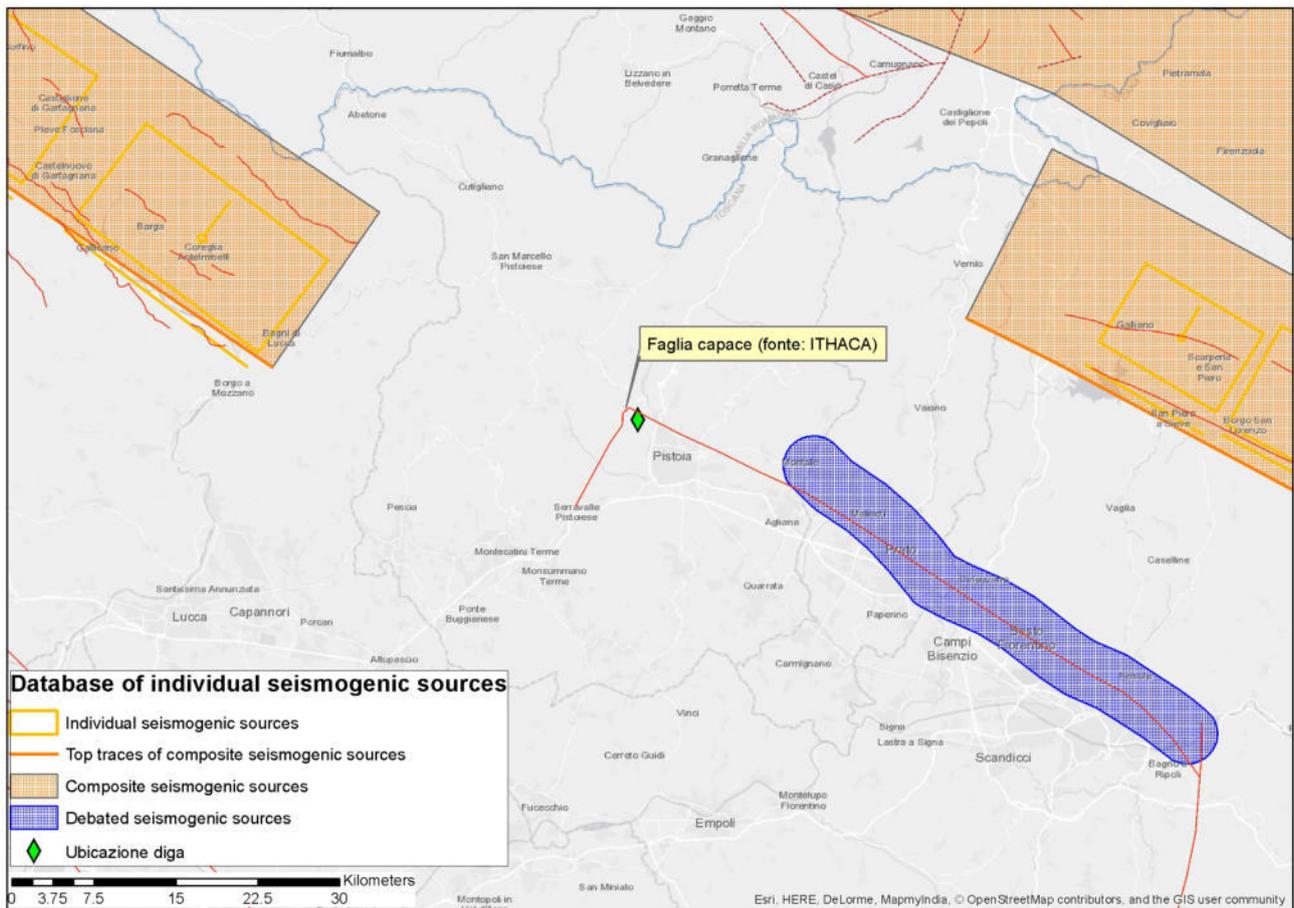


Figura 7. Estratto cartografico relativo all'ubicazione di faglie attive e capaci (fonte: DISS e ITHACA) nelle vicinanze dell'area di studio

3.6 Contributi di dettaglio per la definizione del potenziale sismico dell'area

Nel corso degli anni l'area dell'Appennino settentrionale è stata coinvolta in diversi studi di pericolosità sismica a scala regionale, che hanno interessato la Regione Toscana e la Regione Emilia – Romagna e le Università di Siena e Firenze.

Analisi 3D della pericolosità sismica dell'Appennino Settentrionale (Regione Emilia – Romagna, Università di Firenze)

Questo lavoro di Martelli et al. (2017) rappresenta il resoconto di numerosi attività di studio che hanno portato ad una nuova zonazione sismogenica, basata su una revisione della ZS9, anche sulla base dei numerosi dati strumentali acquisiti non disponibili al momento della redazione della la mappa di pericolosità sismica nazionale MPS04 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/>; Gruppo di lavoro MPS, 2004; Stucchi et al., 2011), basata appunto sulla zonazione sismogenica ZS9.

Sulla base di questa nuova zonazione sismogenetica (per la quale si veda la Figura 8), l'area oggetto di studio si viene a collocare nella zona 11 (Pistoia – Pisa), la quale comprende la piana di Pisa e la bassa valle dell'Arno, il settore occidentale del bacino di Firenze-Prato-Pistoia e l'Appennino pistoiese. Questa zona è caratterizzata da strutture orientate prevalentemente NE-SW, non sempre ben caratterizzate

dal punto di vista cinematico, e da strutture subverticali orientate NW-SE, immergenti a SW, con cinematica normale. Le profondità ipocentrali sono per lo più comprese tra 5 e 15 km; la magnitudo storica massima è $M \approx 5,7$, mentre quella massima stimata è 6.12 ± 0.38 .

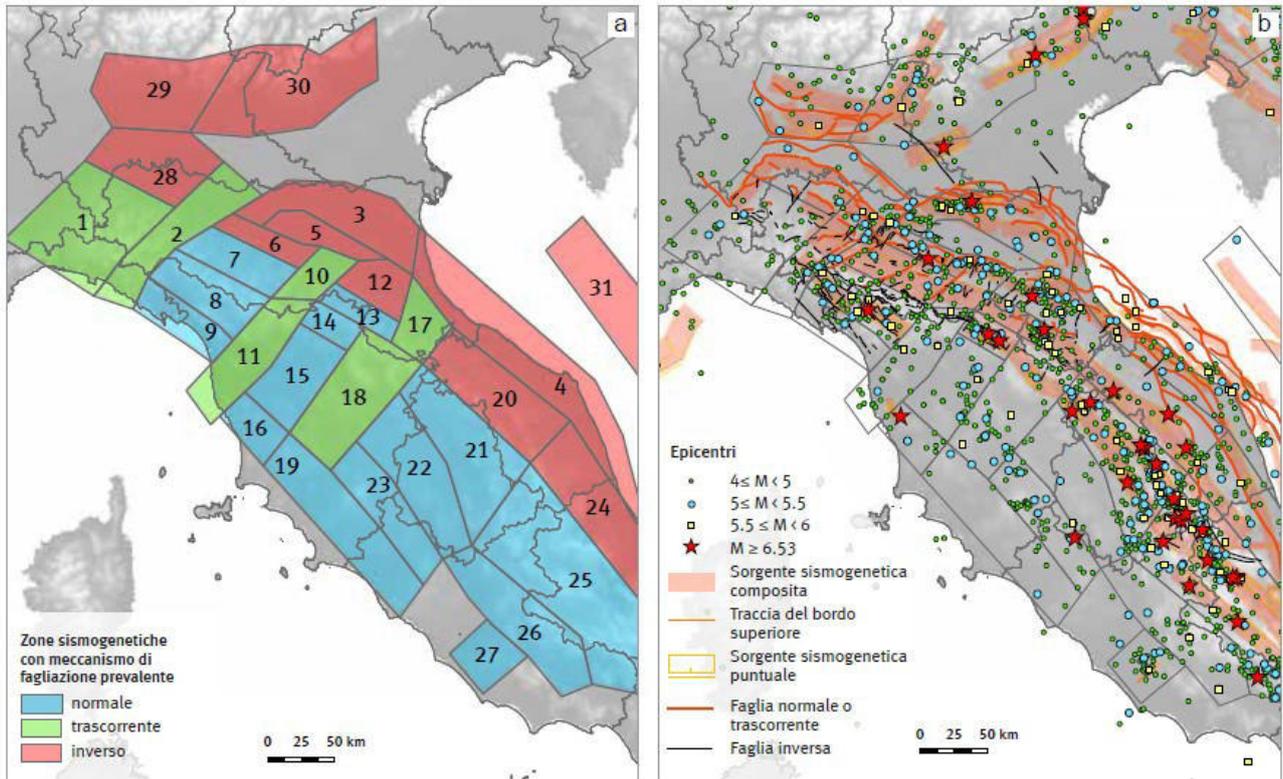


Figura 8. a) la nuova zonazione sismogenetica proposta per l'Appennino settentrionale e la Pianura Padana centrale e orientale; b) dati di riferimento (da Martelli et al., 2017a)

Tale importante lavoro di aggiornamento e revisione della pericolosità sismica, considerando peraltro sia sorgenti sismiche piane, sia sorgenti sismiche inclinate, ha messo in evidenza differenze significative nelle aree delle Pieghe Ferraresi, Appennino Emiliano, Appennino Romagnolo, Mugello. Tuttavia, come mostrato chiaramente in Figura 9, non si riscontra una variazione significativa della pericolosità sismica per l'area oggetto di studio, nonostante la ridefinizione della ZS di appartenenza.

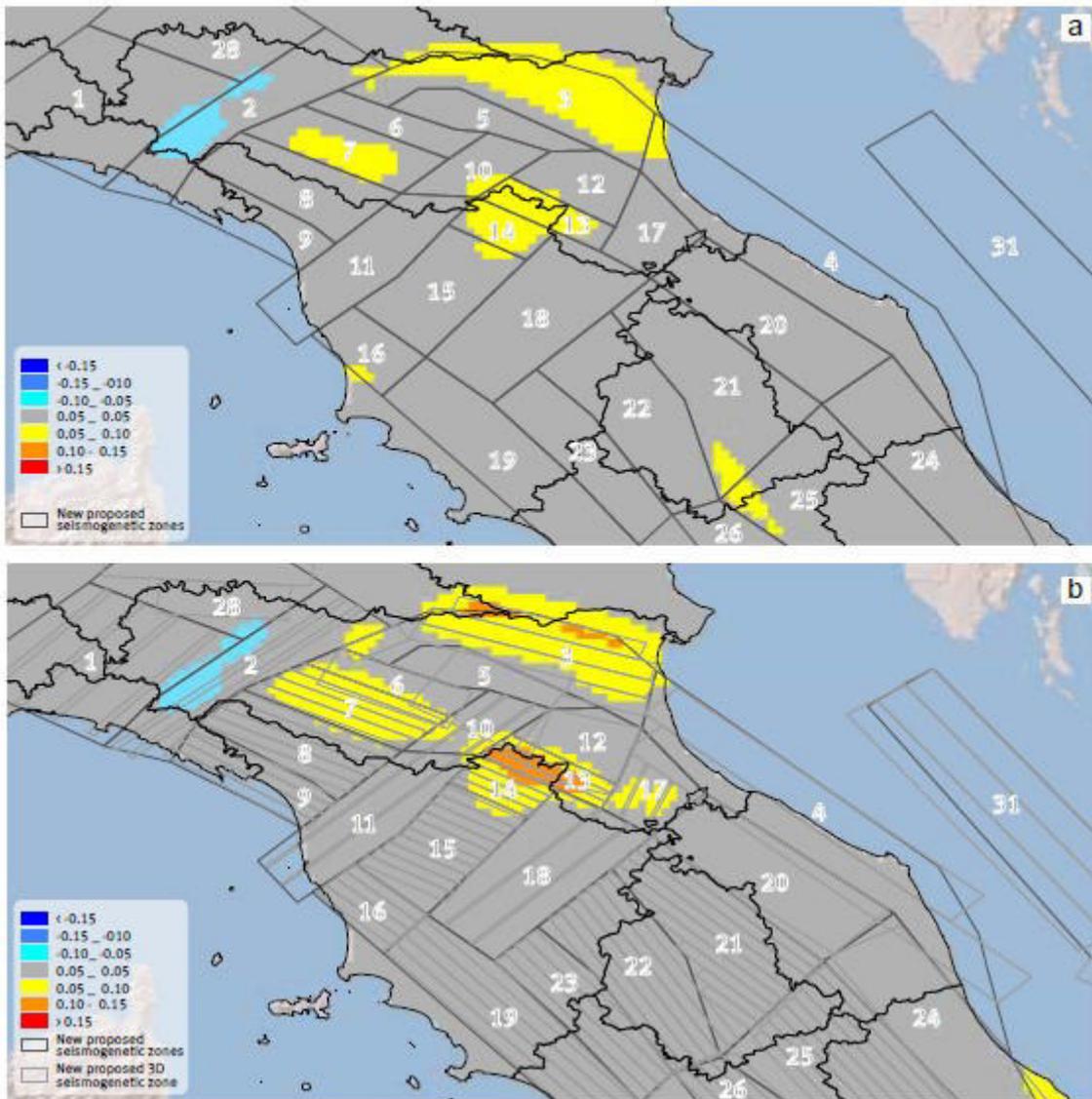


Figura 9. Confronto, in termini di differenza, fra le stime di PGA calcolate nel presente lavoro e quelle della mappa MPS04. Per il presente lavoro viene considerato: a) modello con sorgenti piane; b) modello con sorgenti inclinate (da Martelli et al., 2017a)

Potenzialità sismica della Toscana e definizione di criteri di priorità per interventi di prevenzione (Regione Toscana, Università di Siena)

Questo lavoro di Mantovani et al. (2012) è basato su un approccio diverso da quelli sinora descritti. Infatti alla base di questo lavoro sta il concetto che la storia sismica conosciuta non può essere considerata un campione rappresentativo dell'attività sismica futura nella zona esaminata, poiché in quanto i terremoti di cui abbiamo notizia sono solo una piccola parte di quelli avvenuti durante l'evoluzione geologica dell'Appennino settentrionale. Da ciò deriva l'esigenza del lavoro di Mantovani et al. (2012) di considerare la possibilità che altre scosse intense si verifichino in zone non colpite in precedenza (eventualità consistente con il fatto che molto raramente le scosse storiche hanno insistito sulla stessa faglia.). Sulla base di questa premessa, Mantovani et al. (2012) ritiene che una stima realistica della pericolosità debba tenere conto, oltre che della sismicità passata, anche dell'assetto tettonico, da cui è possibile evincere quali sono le zone deboli del sistema, dove ulteriori fratture potrebbero verificarsi.

Il risultato di questa procedura è rappresentato da una mappa delle intensità massime attese per ogni comune della Toscana.

Il modello sismo tettonico preso a riferimento da Mantovani et al. (2012) è riportato in Figura 10.

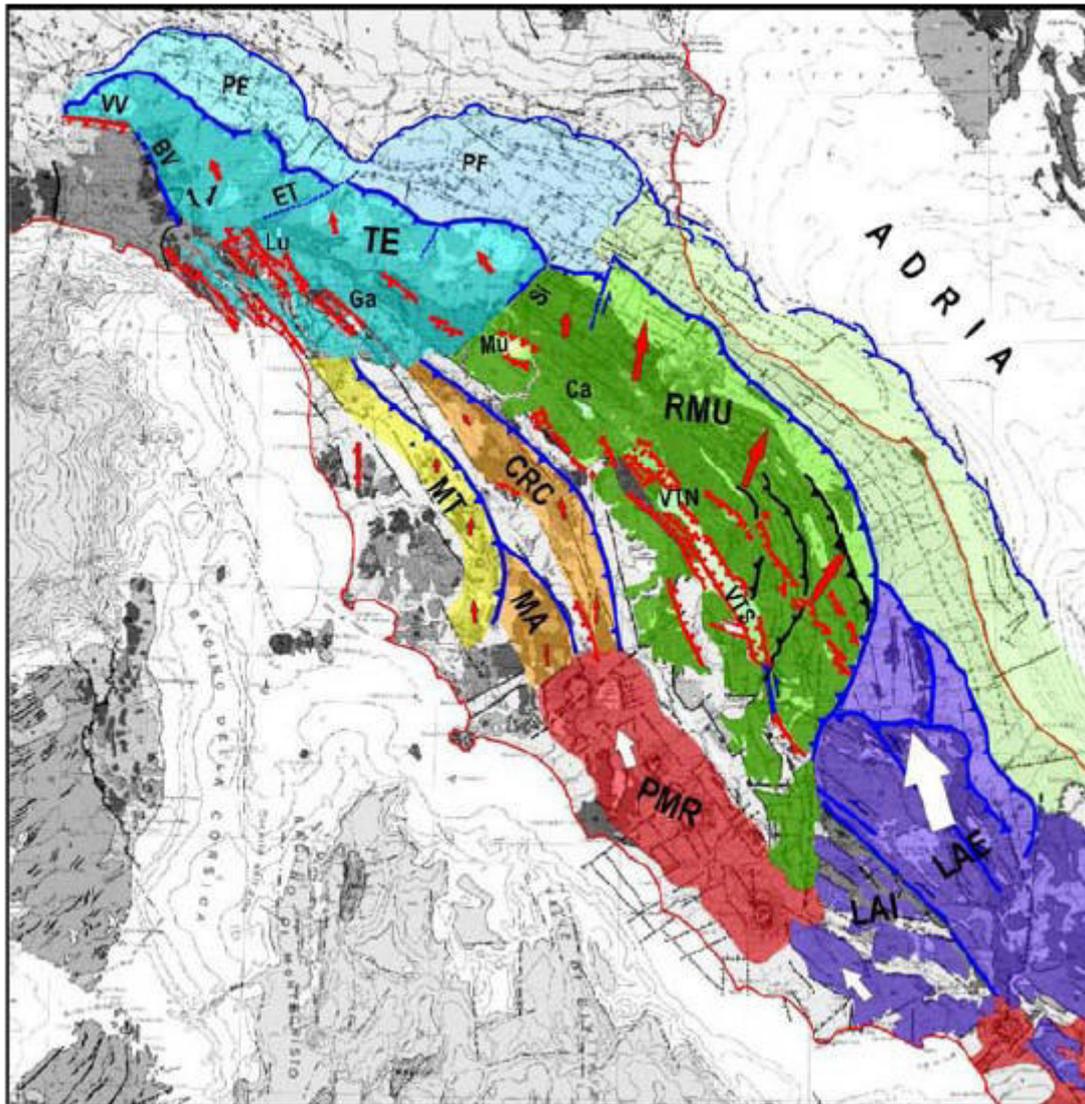


Figura 10. Schema tettonico/cinematico dell'Appennino settentrionale. In colore sono evidenziati i due settori principali in cui l'Appennino settentrionale è suddiviso: cuneo Romagna-Umbria-Marche (RMU, verde) e cuneo Toscana-Emilia (TE, blu). Il raccorciamento longitudinale della catena appenninica è causato dal contesto geodinamico a larga scala (Mantovani et alii, 2009). L'estrusione laterale dell'Appennino settentrionale (cunei RMU e TE) è causato dalla spinta (freccia grande) della parte esterna della piattaforma Laziale-Abruzzese (LAE). Una spinta longitudinale, ma meno intensa (freccie piccole), trasmessa dalla parte interna della piattaforma Laziale-Abruzzese (LAI), agisce sulle dorsali presenti nella Toscana occidentale (Chianti-Rapolano-Cetona= CRC, Medio Toscana= MT e Montalcino-Amiata= MA) e le fosse tra esse comprese, producendo deformazioni e attività sismica minori. Gli elementi tettonici estensionali sono in rosso, quelli compressionali e trascorrenti in blu. BV=zona sismica Bedonia-Varzi, Ca= Casentino, ET=sistema di faglie Enza-Taro, Ga=Garfagnana, Lu= Lunigiana, Mu= Mugello, PE,PF =Complessi sepolti delle Pieghe Emiliane e Ferraresi, PMR=Provincia Magmatica Romana, Si=Linea del Sillaro, VTN,VTS= Nord e Sud, VV= Zona sismica Villalvernia-Varzi. Da Mantovani et al. (2012)

L'area oggetto di studio è collocata da Mantovani et al. (2012) al confine tra la zona dell'Appennino Pistoiese e quella del "bacino Pistoia – Firenze", classificate entrambe tra le "potenziali zone sismiche minori", per le quali però non sono definite contorni precisi, poiché, per gli autori, presentano caratteristiche tettoniche non così ben definite da individuare una possibile zona sismogenica.

In base al modello sismotettonico proposto (Figura 11) la sismicità della zona dell'Appennino Pistoiese (Figura 11) si può imputare al regime estensionale/transtensionale che si sviluppa lungo il bordo interno (toscano) del settore orientale (Bolognese-Modenese) del cuneo TE, implicato in una progressiva estrusione verso la zona padana, sotto la spinta longitudinale del cuneo RMU. Questo segmento del margine interno si potrebbe quindi inquadrare come la prosecuzione della fascia tettonica Lunigiana-Garfagnana, con la differenza che in questa zona l'attività tettonica è più ridotta a causa del fatto che la velocità di migrazione del settore orientale di TE verso il dominio padano è minore rispetto a quella della parte occidentale del cuneo. La presenza di un regime estensionale in questa zona è suggerito dalla presenza di faglie normali orientate NO-SE nel settore montano a nord-ovest di Pistoia, dal bordo dei bacini di Lucca-Montecatone e Pistoia-Firenze sino all'Appennino modenese.

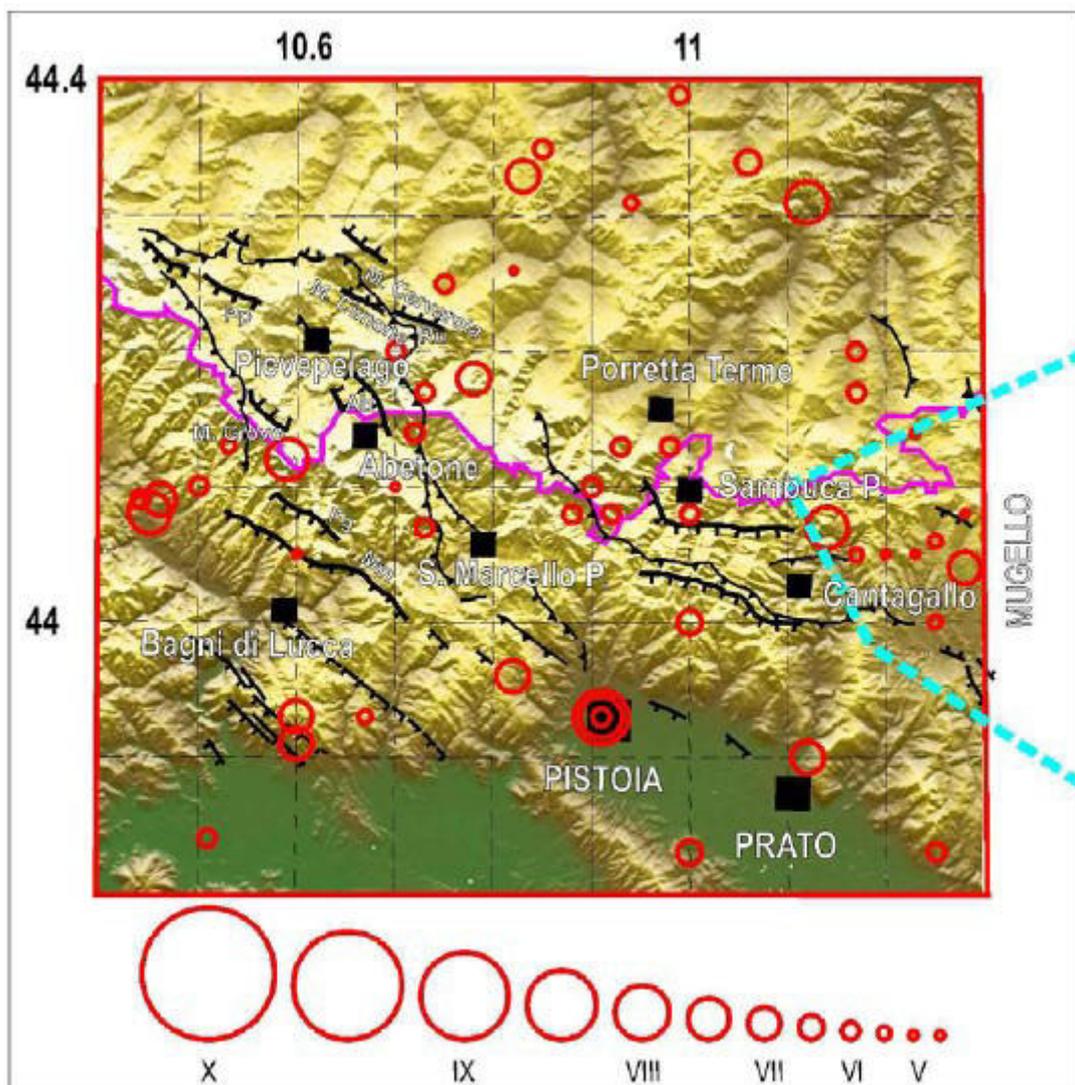


Figura 11. Particolare della zona dell'Appennino Pistoiese. I cerchi rossi indicano i terremoti avvenuti dopo il 1000 nell'Appennino pistoiese e dintorni. I principali elementi tettonici sono in nero. La linea celeste tratteggiata indica il confine della zona sismica Mugello. Da Mantovani et al. (2012)

La zona del bacino Pistoia – Firenze (Figura 12) corrisponde al vasto bacino fluvio-lacustre che dal margine dell'Appennino pistoiese si estende per circa 50 km verso sud-est, sino al bordo dei Monti del Chianti. L'attività sismotettonica di questa zona è interpretata come una deformazione estensionale secondaria più interna, sollecitata dal meccanismo che provoca la deformazione della parte settentrionale del cuneo RMU, nella zona di contatto con il cuneo TE (Figura 10).

Il contesto dinamico e tettonico è simile a quello della zona del Mugello, ma gli effetti attesi per questa zona sono meno intensi per la sua collocazione più interna rispetto alle strutture che sono maggiormente coinvolte nel progressivo spostamento dei cunei RMU e TE verso il dominio adriatico padano (Figura 10).

I principali lineamenti neotettonici affiorano al bordo tra il bacino sedimentario e le circostanti dorsali pre-neogene. Un primo insieme di lineamenti neotettonici è formato dalle faglie normali "appenniniche", con andamento NO-SE ed immersione generalmente verso SO. Particolarmente evidente è il sistema di faglie normali a Pistoia-Prato-Fiesole.

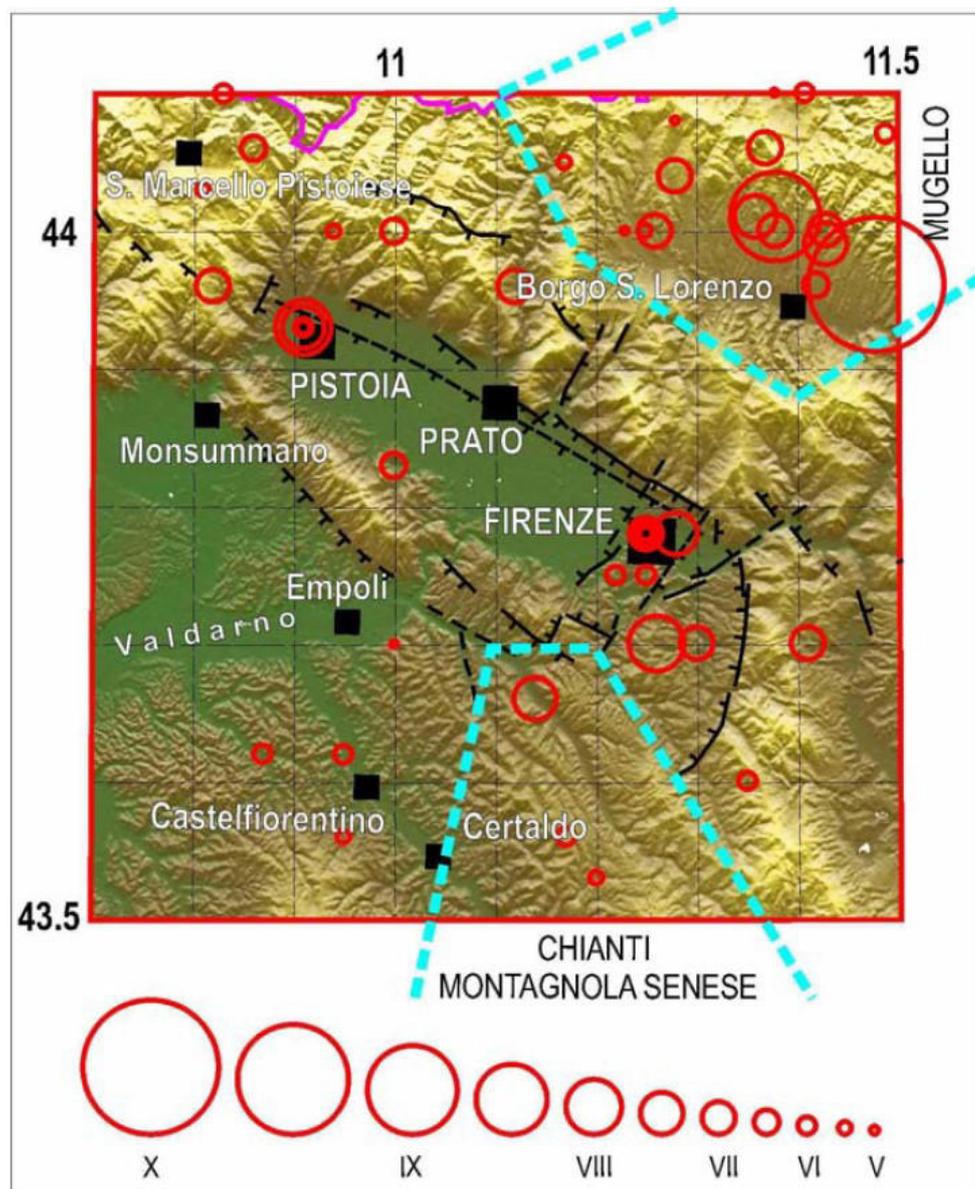


Figura 12. Particolare della zona del bacino Pistoia – Firenze. I cerchi rossi indicano i terremoti avvenuti dopo il 1000 nell'Appennino pistoiese e dintorni. I principali elementi tettonici sono in nero. La linea celeste tratteggiata indica il confine della zona sismica Mugello e Chianti Montagnola Senese. Da Mantovani et al. (2012)

Prodotto conclusivo del lavoro di Mantovani et al. (2012), ottenuto integrando i dati macrosismici con informazioni derivate dalle conoscenze acquisite sul quadro tettonico attuale, è rappresentato dalla carta di Figura 13, relativa alle massime intensità sismiche attese. Ciò al fine di tentare un riconoscimento delle zone del territorio toscano dove lo sviluppo dei processi deformativi attuali può portare all'attivazione di fratture che non sono associate a forti terremoti storici.

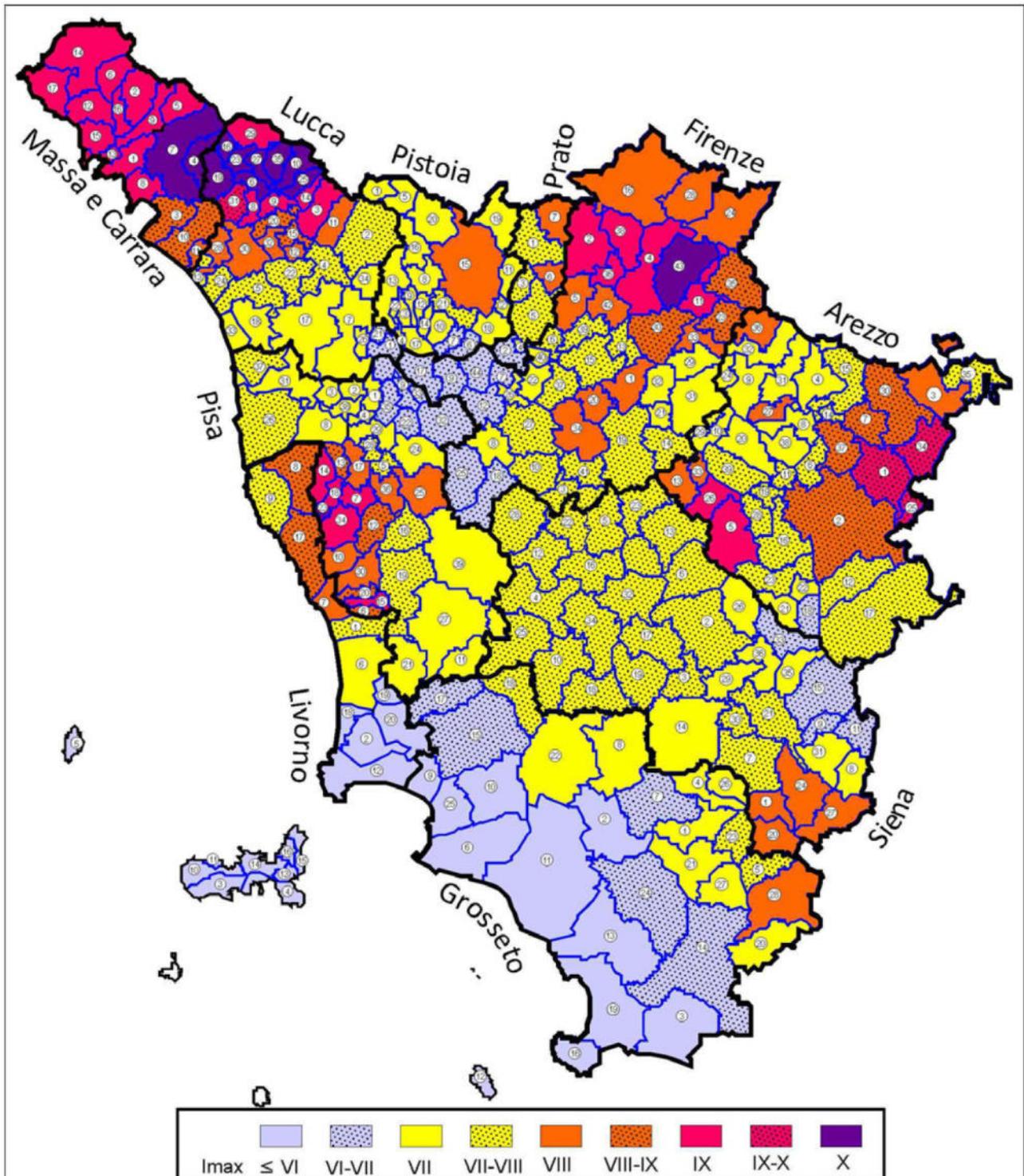


Figura 13. Intensità massima MCS assegnata ai comuni toscani in base alla procedura descritta da Mantovani et al. 2012 (fonte: Mantovani et al.,2012)

Come facilmente osservabile per quanto riguarda il comune di Pistoia, a differenza di numerose altre zone, lo studio di Mantovani et al. (2012) ha sostanzialmente confermato l'intensità macrosismica desumibile anche dai terremoti storici.

4 CONSIDERAZIONI SULL'ASSETTO SISMOTETTONICO DELL'AREA DI STUDIO

Alla luce di quanto descritto nei precedenti capitoli è possibile trarre le seguenti considerazioni finali riguardo alla stima della pericolosità sismica ed all'assetto sismotettonico dell'area di studio.

Benché siano trascorsi più di 10 anni dalla zonazione ZS9 e dalla mappa di pericolosità sismica nazionale MPS04 e studi più recenti ne abbiano proposto modifiche ed aggiornamenti, per quanto riguarda l'area oggetto del presente studio non si sono riscontrati elementi di novità tali da rendere la MPS04 non adeguata a rappresentare la pericolosità sismica di base dell'area in cui è ubicata la diga della Giudea.

Dalla consultazione delle banche dati e dalle informazioni di bibliografia relative alle faglie attive e capaci è emerso che le faglie interessanti l'area di studio in senso stretto (la faglia "Pistoia" e la faglia "Pistoia – Firenze"), pur essendo definite capaci, non sono inserite tra le sorgenti sismogenetiche attive (ad eccezione della parte orientale della Pistoia – Firenze, benché classificata tra le sorgenti "discusse").

Pertanto, considerato la sismicità storica e strumentale dell'area del comune di Pistoia e la letteratura scientifica anche molto recente consultata, non ci sono elementi tali da poter ritenere la faglia di Pistoia e quella di Pistoia – Firenze, in grado di generare fenomeni di fagliazione superficiale tali da dover richiedere una apposita modellazione ai fini della risposta sismica locale. Per le stesse ragioni si ritiene improbabile che tali strutture, pur presenti a poca distanza dalla diga, possano essere in grado di generare terremoti in grado di produrre accelerazioni al suolo (in particolar modo per quanto riguarda la componente verticale) più alte di quelle valutabili con gli ordinari metodi e strumenti di modellazione degli effetti di sito. In particolare nel presente elaborato (nei capitoli da 7 a 10) è descritto uno studio di risposta sismica locale monodimensionale, a partire dal quale il progettista ha ricavato le componenti verticali del moto secondo le relazioni presenti in normativa.

Infine, in ragione di quanto emerso dalla consultazione dei lavori di Martelli et al. (2017) e Mantovani et al. (2012), non si è ritenuto di procedere con l'elaborazione di un ulteriore modello sismo tettonico e di studio pericolosità sismica *ad hoc*, in quanto si sarebbe necessariamente basato sulle stesse informazioni e sui dati alla base degli approcci precedentemente descritti e sostanzialmente concordi tra loro almeno per l'area in studio, con l'unica variante del margine di discrezionalità per le scelte basate sul giudizio esperto dello scrivente.

Per tale motivo, basandosi anche su quanto specificato al punto 3.2.1 delle "Linee guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe, emanate dalla DG Dighe con nota prot. 21530 del 27.09.2017", per la definizione della pericolosità sismica di base (a partire dalla quale effettuare gli studi di risposta sismica locale) è stata adottata quella prevista dalla MPS04. Essa ha infatti alla base una mole di dati e di lavoro ben più robusta di quella che si sarebbe avuta con uno studio realizzato ad hoc e gli studi più recenti esaminati, benché a scala locale, non hanno mostrato punti di forza tali da giustificare l'utilizzo.

5 VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE DEL SITO E DEFINIZIONE DEI TEMPI DI RITORNO PER LE OPERE IN ESAME

5.1 VALUTAZIONE PERICOLOSITA' SISMICA

Le azioni sismiche di progetto sono state definite in primo luogo dalla valutazione della “pericolosità sismica di base” riferita al sito di costruzione.

La normativa adottata (D.M. 14/01/08 Testo Unico – Norme tecniche per le costruzioni e l'aggiornamento del D.M. 17/01/18) suddivide il territorio nazionale in un reticolo di punti di coordinate geografiche assegnate.

Per ogni punto del reticolo vengono assegnate le 9 terne di valori

a_g F_o T_c^*

per i periodi di ritorno (T_R) di riferimento dove:

a_g è l'accelerazione orizzontale massima al sito su suolo di riferimento rigido.

F_o è il valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale.

T_c^* è il periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Le opere rientrano nel seguente comune:

- **Comune di Pistoia**

La posizione geografica di riferimento di ogni comune rientra all'interno di una specifica quaterna di punti notevoli del reticolo.

Interpolando i valori si ottengono le terne di valori per i periodi di ritorno di riferimento specifiche per il sito in oggetto.

T_R [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_c^* [s]
30	0.055	2.482	0.249
50	0.069	2.461	0.262
72	0.081	2.465	0.266
101	0.096	2.426	0.269
140	0.110	2.417	0.272
201	0.126	2.414	0.279
475	0.174	2.402	0.286
975	0.223	2.399	0.291
2475	0.298	2.397	0.317

5.2 VALUTAZIONE TEMPO DI RITORNO TR

Per la scelta dei periodi di ritorno da utilizzare, intervengono 2 fattori: la valutazione del periodo di riferimento (V_r) e la probabilità di superamento dello stato limite di progetto, in altre parole la richiesta prestazionale che la struttura deve soddisfare.

Periodo di riferimento V_r

Il periodo di riferimento (V_r) dell'evento sismico viene definito (par n.2.4.3 – NTC 18) come prodotto tra la vita nominale (V_n) ed il coefficiente d'uso (C_u) ottenendo:

$$V_r = V_n \times C_u$$

Per quanto riguarda le opere oggetto di intervento:

- per quelle provvisoriale di scavo il termine V_n , definito al par 2.4.1 delle NTC 18, è stato preso pari a 10 anni;
- per le verifiche di diga e scolmatore, aventi importanza strategica, il termine V_n , definito al par 2.4.1 delle NTC 18, è stato preso pari a 100 anni.

La classe d'uso IV, definita al par 2.4.2, fornisce un coefficiente d'uso C_u pari a 2.

Per quanto detto il periodo di riferimento V_r assume valore:

$V_r = 35$ anni per gli scavi provvisoriale

$V_r = 200$ anni per diga e scolmatore

Probabilità di superamento dello stato limite richiesto

Gli stati limite della struttura sono raccolti nella successiva tabella suddivisa per stati limite di esercizio e stati limite ultimi:

STATI LIMITE		PVR
Stati limite di esercizio	SLO (operatività)	81%
	SLD (danno)	63%
Stati limite ultimi	SLV (salvaguardia della vita)	10%
	SLC (collasso)	5%

5.3 DEFINIZIONE DELLA TERNA DI VALORI A_G , F_0 , T^*C

In ultima analisi, le scelte progettuali introdotte ai due paragrafi precedenti, definiscono la massima accelerazione orizzontale al sito su suolo di riferimento rigido.

Per la valutazione dell'azione sismica sono state individuate, in seno all'area in studio, le coordinate geografiche di un punto baricentrale rispetto al sito di intervento:

Successivamente è stato possibile ottenere i valori dei parametri spettrali a_g , F_0 , T_c^* , propri del sito, tramite una media pesata effettuata con i valori relativi ai 4 più vicini nodi della griglia di accelerazioni mediante il programma "Spettri di risposta" del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (ver. 1.0.3).

Opere provvisionali

STATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_0 [-]	T_c^* [s]
SLO	30	0.055	2.482	0.249
SLD	35	0.059	2.476	0.253
SLV	332	0.152	2.407	0.283
SLC	682	0.197	2.401	0.288

Diga e scolmatore

STATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_0 [-]	T_c^* [s]
SLO	120	0.103	2.421	0.271
SLD	201	0.126	2.414	0.279
SLV	1898	0.274	2.398	0.309
SLC	2475	0.298	2.397	0.317

5.4 EFFETTO DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

Occorre valutare le condizioni geomorfologiche del sito che interessa le opere. Le NTC 18, individuano 2 parametri amplificativi dell'azione sismica, riferiti al tipo di sottosuolo ed alla condizione topografica.

Categoria di sottosuolo

Al punto 3.2.2 del D.M. 17/01/2018 (Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche), per la definizione dell'azione sismica di progetto si afferma che:

L'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3.

Data l'accelerazione a_g (per $T_R = 475$ anni) > 0.15 g e l'importanza strategica dell'opera oggetto del presente studio non è stato possibile utilizzare il metodo semplificato previsto al punto 3.2.2 del D.M. 17/01/2018.

Per il riferimento a tutti i dettagli relativi alle analisi di risposta sismica locale si rimanda ai successivi capitoli (da 6 a 10).

Condizione topografica

Per quanto attiene le condizioni topografiche, con riferimento alla tabella 3.2 III delle NTC 2018, considerando un territorio sostanzialmente pianeggiante, si considera una categoria T1.

6 EFFETTI DI SITO E AMPLIFICAZIONE LOCALE

In passato si è potuto osservare, a seguito di terremoti distruttivi, una distribuzione anomala del danneggiamento delle costruzioni, con forti differenziazioni fra zone contigue anche di modeste dimensioni.

Oltre alle intrinseche differenze della vulnerabilità sismica delle costruzioni ed alle differenti caratteristiche dinamiche delle stesse, tali cause possono essere attribuite principalmente alle modificazioni delle caratteristiche del moto sismico indotte da condizioni geologiche e geomorfologiche locali.

Il moto sismico in un determinato sito, infatti, è influenzato da tre parametri importanti:

- Il meccanismo di sorgente;
- La propagazione;
- La risposta sismica locale;

I primi due fattori dipendono fortemente dalle caratteristiche dell'evento sismico; questi variano in funzione delle caratteristiche della sorgente (magnitudo e tipo di rottura della faglia) e dalla distanza tra il sito in esame e la sorgente.

La risposta sismica locale è il risultato di interazioni tra le onde sismiche e le condizioni locali, cioè l'insieme delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche di depositi di terreno ed ammassi rocciosi e delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.

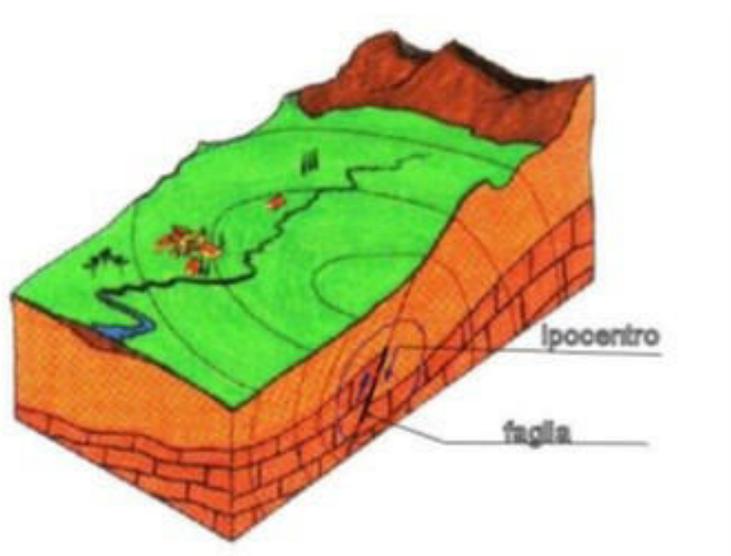


Figura 1. Schema della rottura del terreno e generazione e propagazione delle onde sismiche.

In altre parole le caratteristiche del sito sono le responsabili delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenze, che un moto sismico relativo ad una formazione rocciosa di base (terremoto di riferimento), subisce attraversando gli strati dal bedrock fino alla superficie (Lanzo G. et al.,1999).

Nella Figura 1 è rappresentato uno schema della rottura fragile del terreno in profondità con conseguente generazione di onde che si irradiano dall'ipocentro.

Se si ipotizza di avere installato un sismometro ad una grande distanza dall'ipocentro un possibile segnale registrato potrebbe essere quello mostrato nella Figura 2. Il segnale inizia con l'arrivo delle onde P caratterizzate da alte frequenze a bassa ampiezza. Successivamente arrivano le onde S che si propagano meno velocemente delle P e sono di frequenza più bassa e di maggiore ampiezza. Queste ultime sono in genere la causa dei maggiori danni. Le onde P e quelle S, come già descritto nel capitolo A sono chiamate onde di volume per distinguerle da quelle di superficie che sono più lente.



Figura 2. Tipico sismogramma registrato in superficie a grande distanza.

In generale si può dire che le onde generate dalla sorgente sismica sono di due differenti tipi, cioè quelle associate a stati deformativi di compressione-dilatazione volumetrica, dette onde P che si propagano con velocità V_p pari a:

$$V_p = \sqrt{\frac{M_v}{\rho}}$$

con:

$$M_v = \lambda + 2 G$$

dove:

- λ : modulo di Lamé del terreno;
- G : modulo elastico di taglio del terreno;
- ρ : densità di volume del terreno.

Per le onde P il moto oscillatorio delle particelle di terreno avviene parallelamente alla direzione di propagazione.

Le onde S sono associate a deformazione di taglio ed hanno una velocità V_s pari a:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Il moto delle particelle di terreno è in tal caso perpendicolare alla direzione di propagazione. Il campo di spostamenti, in genere, è scomposto in due componenti perpendicolari tra di loro: le onde SV polarizzate nel piano verticale contenente la sorgente e le onde SH polarizzate nel piano orizzontale (piano della superficie libera del terreno in direzione perpendicolare al precedente).

Per maggiore chiarezza, se si considera il piano π verticale e contenente la direzione di propagazione dell'onda incidente, il moto della particella di terreno perpendicolare a tale piano costituisce l'onda SH, viceversa il moto nel piano costituisce l'onda SV.

Le onde P e S arrivate in superficie possono trasformarsi parzialmente in onde di diverso tipo (P in S oppure S in P) oppure in onde superficiali chiamate così perché viaggiano in superficie attenuandosi rapidamente con la profondità. Queste ultime si differenziano in onde di Rayleigh quando il moto della particella di terreno è in un piano verticale oppure onde di Love quando il moto è in un piano orizzontale.

Con riferimento alla Figura 3, il fenomeno della propagazione delle onde può essere descritto come segue. Nella sua complessità morfologica, litologica e stratigrafica, un territorio può essere rappresentato come un insieme di formazioni superficiali, interessate dai loro fenomeni evolutivi tipici, poggianti su formazioni più profonde, i cui andamenti possono essere stati resi complessi fino alla creazione di affioramenti dai fenomeni tettonici ed orogenetici.

Prevalentemente, le formazioni profonde saranno costituite da rocce ignee o metamorfiche di origine sedimentaria, mentre quelle superficiali saranno di natura sedimentaria più recente, coerenti od incoerenti, e quindi di caratteristiche meccaniche ben differenziate rispetto alle prime.

Le onde sismiche che si sono generate in profondità, e che sono già caratterizzate diversamente a seconda del meccanismo proprio della sorgente, subiscono una serie di modificazioni ulteriori (riflessioni e rifrazioni) nell'attraversare la crosta terrestre e giungere fino alle formazioni di base per il sito. Ad una certa distanza dall'epicentro, e per una porzione di territorio ragionevolmente limitata, il moto sismico apparirà come un fronte d'onda uniforme propagantesi dal basso verso l'alto, con una certa angolazione rispetto alla verticale, che viene trasmesso dalle formazioni di base a quelle superficiali.

Il moto al suolo tende a non dipendere più solamente dal tipo di rottura della sorgente e a diventare il risultato di due ulteriori meccanismi eventualmente combinati:

- la propagazione delle onde sismiche all'interno delle formazioni di base e dalla conformazione delle frontiere della stessa;
- la risposta dinamica delle formazioni superficiali.

Tutto ciò comporta una non omogeneità del moto vibratorio in superficie che può cambiare da punto a punto anche a breve distanza. Sugli aspetti quantitativi e qualitativi del fenomeno hanno pertanto grande rilevanza diversi fattori quali la natura delle onde sismiche incidenti ed in particolare il meccanismo di sorgente, le diversità fra le caratteristiche meccaniche dei terreni attraversati, ed in particolare tra formazioni di base e superficiali, la conformazione e la giacitura degli strati, la presenza di falde idriche, l'entità dei fenomeni dissipativi ed altri ancora.

Al variare delle condizioni locali, il moto alla superficie risulterà quindi differente per quanto attiene ai suoi caratteri principali e cioè: ampiezza, contenuto in frequenza e durata. Si osserva che tutti e tre questi caratteri sono significativi e concorrono a causare il danneggiamento delle strutture e l'instabilità dei terreni (frane, cedimenti, liquefazioni).

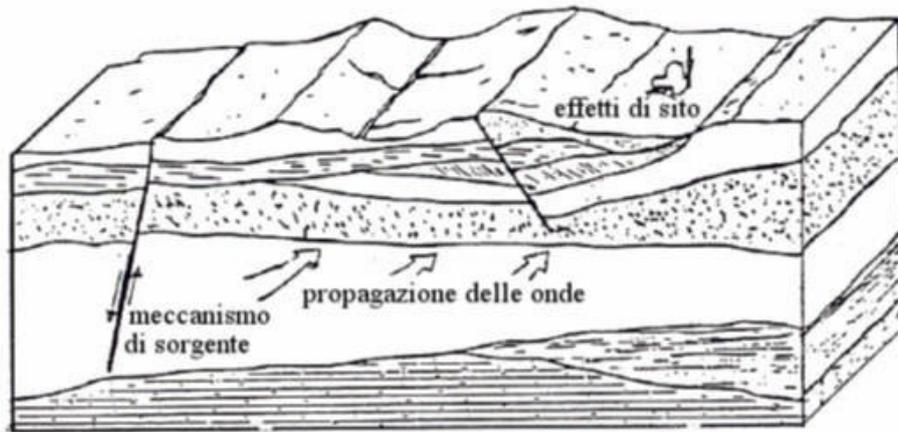


Figura 3. Schema di una situazione reale.

6.1 Impostazione del Problema del Calcolo dell'amplificazione Locale

Per illustrare gli aspetti principali del fenomeno della risposta sismica locale si paragoni il moto in corrispondenza di tre siti, indicati con A, B e C nella Figura 4, posti alla stessa distanza dalla sorgente sismica durante lo stesso evento sismico. Si supponga inoltre che il primo sito sia su un semispazio affiorante (per esempio roccia) e il secondo B su un deposito alluvionale posto al di sopra del semi spazio ed il terzo C su di un rilievo.

In corrispondenza della coltre alluvionale si verifica, rispetto al moto sul semi spazio affiorante, una amplificazione del moto in particolari campi di frequenza e una deamp1ificazione negli altri campi. Analogamente sul rilievo in C si verificheranno focalizzazioni oppure diradazioni di onde per effetto della forma del rilievo e della direzione di incidenza delle onde.

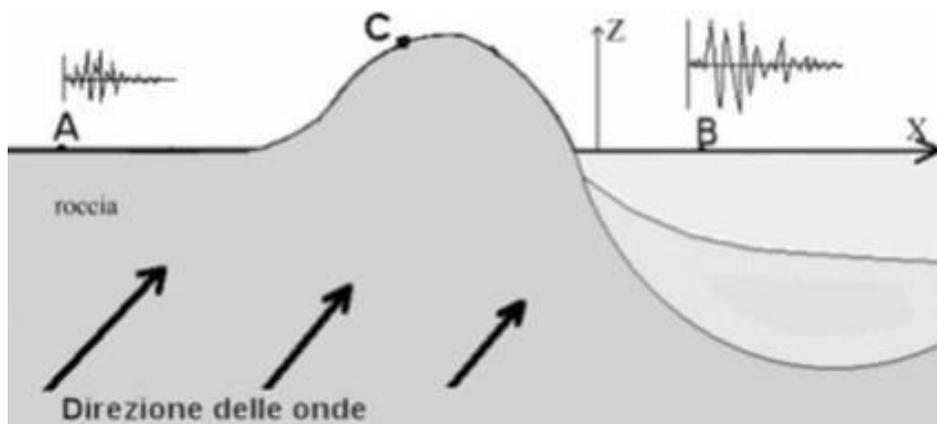


Figura 4. Schema della propagazione delle onde dalla sorgente e delle differenti condizioni locali.

In letteratura si parla di effetti stratigrafici o monodimensionali nel caso in cui le modifiche che il moto sismico subisce nel propagarsi in direzione prevalentemente verticale verso la superficie dal sottostante basamento roccioso siano essenzialmente attribuibili a fenomeni di filtraggio. L'amplificazione delle onde

sismiche dipende, in questo caso dalla stratigrafia del sottosuolo, dalle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni e del contenuto in frequenza del moto sismico.

Il termine “effetti di bacino” è utilizzato quando le onde incidenti incontrano una valle alluvionale; in tal caso ai fenomeni sopra descritti si sovrappongono quelli dovuti al manifestarsi di fenomeni complessi di interazione tra le onde, che possono sommarsi o elidersi a vicenda, e generazione di onde superficiali. Spesso ai bordi della valle si verificano maggiori amplificazioni, dette: “effetti di bordo”.

Con “effetti topografici” si intendono le modifiche delle caratteristiche del moto sismico causate essenzialmente da fenomeni di focalizzazione delle onde sismiche per effetto della particolare geometria della superficie (per es. la cresta di un rilievo o un canyon) e sono molto influenzati dalla lunghezza d'onda del moto incidente e dalla direzione di incidenza.

Lo scopo delle analisi di amplificazione sismica locale è quello di determinare il moto in B oppure in C una volta noto il moto nel sito di riferimento A. Tale moto di riferimento è in genere determinabile in via statistica (analisi di pericolosità) o deterministica dallo studio del meccanismo di rottura della sorgente nell'ipotesi che tra la sorgente stessa ed il sito in esame il mezzo sia omogeneo ed isotropo.

Come è facile immaginare le caratteristiche del moto in superficie sono fortemente influenzate, oltre che dalla geometria degli strati e delle loro proprietà meccaniche, anche dalle caratteristiche del moto incidente, cioè dalla direzione di propagazione, dal suo contenuto energetico e dalla direzione del moto delle particelle del terreno.

7 RISPOSTA SISMICA LOCALE

Come già detto in precedenza, il moto generato da un terremoto in un sito dipende dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.

Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, la risposta sismica locale consente di definire le modifiche che un segnale sismico subisce, a causa dei fattori anzidetti, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

I passi da seguire nello studio del problema della risposta sismica locale sono:

1. Definizione input sismico sia attraverso il codice di calcolo REXEL (Iervolino et al., 2010 - www.reluis.it/index.php?option=com_content&view=article&id=118&Itemid=105&lang=it)
2. Analisi di Risposta Sismica Locale;
 - 2.1 Inserimento sismostratigrafia di input (derivata da un'indagine di sismica in foro Down Hole);
 - 2.2 Esecuzione dell'analisi e restituzione grafica.

Le analisi numeriche che consentono di valutare gli effetti del sito nell'amplificazione delle onde sismiche possono essere distinte in:

- Analisi numeriche monodimensionali (come in questo caso);
- Analisi numeriche bidimensionali;
- Analisi numeriche tridimensionali.

Il primo approccio consente di definire una realistica risposta sismica stratigrafica di terreni non affetti da problematiche bidimensionali. Questo approccio è ritenuto la via ufficiale delle NTC 2018 (Cap. 3.2.2) e consente, in determinati casi e mediante il confronto con la relativa categoria di sottosuolo, elementi di risparmio rispetto all'approccio semplificato di normativa, poiché identifica amplificazione per intervalli di periodi solitamente più limitati rispetto a quelli di normativa.

Il secondo approccio è da preferire in quelle situazioni in cui il sottosuolo presenta una geometria variabile in cui, oltre alla profondità, è importante considerare un'altra delle due restanti dimensioni spaziali. Un

esempio di situazione che richiede l'utilizzo di modelli bidimensionali è il caso delle aree marginali delle valli alluvionali, in cui alle normali cause di amplificazione del moto sismico si sommano gli effetti di bordo connessi alla geometria del problema.

Il terzo approccio necessita di modelli complessi che richiedono capacità computazionali notevoli; solo recentemente iniziano ad avere una certa diffusione grazie al rapido sviluppo degli strumenti informatici. Il loro utilizzo è principalmente concentrato sulla valutazione delle amplificazioni in presenza di effetti morfologici, data l'importanza assunta in queste analisi dalla conoscenza precisa e dalla gestione di un modello tridimensionale del terreno.

8 METODO DI CALCOLO ADOTTATO E DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO STRATA

Il codice di calcolo STRATA (Kottke & Rathje, 2008, <https://github.com/arkottke/strata>) consente di effettuare una modellazione monodimensionale, nel dominio delle frequenze, in tensioni totali, utilizzando il metodo lineare equivalente.

8.1 METODO LINEARE EQUIVALENTE

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

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

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

Tale modello lineare equivalente, studia il comportamento tra tensione e deformazione del terreno basandosi sul modello di Kelvin-Voigt, illustrato in Fig.5. La tensione τ dipende dalla deformazione γ e dalla sua derivata $\dot{\gamma}$, secondo la relazione:

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

dove:

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

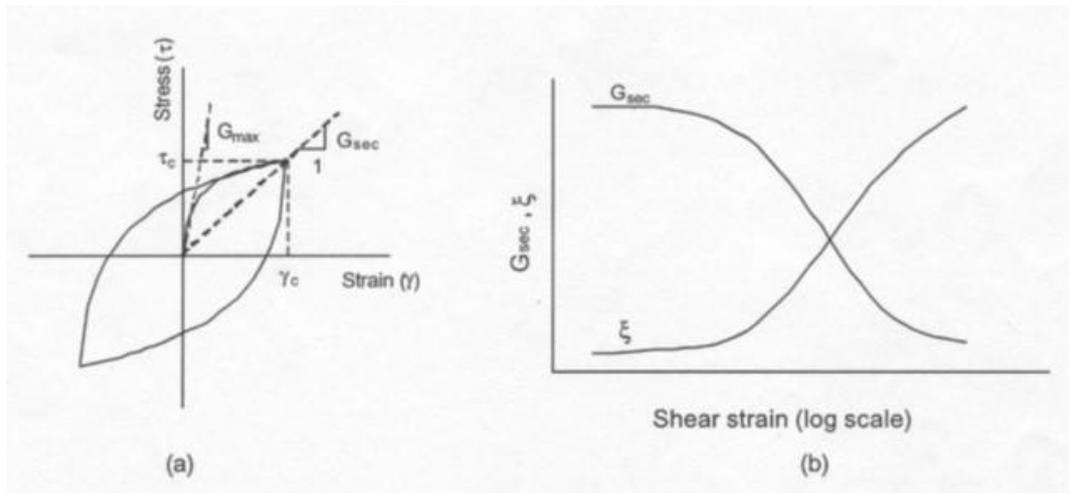


Figura 5. Modello lineare equivalente: (a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo.

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato in figura 5. Il modulo di taglio equivalente, G , è preso considerando il modulo di taglio secante G_s . È possibile notare come alla fine di un ciclo controllato e simmetrico di tensioni si ha:

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

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

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

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

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

dove:

- $\Delta W, diss$: quantità di energia dissipata, per unità di volume, dal terreno durante un ciclo di carico armonico;
- W, max : massima energia di deformazione, per unità di volume, immagazzinata dal terreno durante lo stesso ciclo di carico armonico.

8.2 PROCEDIMENTO ITERATIVO

La procedura iterativa che consente di ottenere la risposta non lineare del sistema consiste nell'eseguire una sequenza di analisi lineari, con aggiornamento iterativo dei parametri di rigidità e smorzamento, fino al raggiungimento di un prefissato criterio di convergenza. Facendo riferimento alla figura 6, lo schema della procedura iterativa su cui è basato il modello lineare equivalente, da applicare ad ogni strato in cui è stato discretizzato il profilo stratigrafico:

- definizione di curve $G=G(\gamma)$ e $D=D(\gamma)$ per i diversi strati;
- inizializzazione dei valori del modulo di taglio e del fattore di smorzamento ai livelli di piccole deformazioni (G_0 e D_0);
- calcolo della risposta dinamica del suolo e valutazione della deformazione massima a taglio in ogni strato (γ_1 , figura 7);
- aggiornamento dei valori $G_1=G(\gamma_1)$ e $D_1=D(\gamma_1)$;
- iterazione dei passi 3 e 4 fino a convergenza ($\gamma_{i-1} \sim \gamma_i$).

9 INPUT

Nei paragrafi successivi e nei 4 report allegati (1, 2, 3 e 4) vengono riportate le informazioni relative ai dati di input utilizzati per lo studio della risposta sismica locale.

9.1 CURVE DI DECADIMENTO DEI MATERIALI

All'aumentare del livello di deformazione angolare raggiunta dal terreno si ha una diminuzione del modulo di taglio G ed un aumento del rapporto di smorzamento D . Tale comportamento può essere descritto, per ogni tipo di materiale presente nella stratigrafia, da due curve di decadimento una relativa a G ed una D .

I dati delle curve di riferimento utilizzate nell'analisi sono riportati negli allegati 1, 2, 3 e 4.

Le curve di riferimento sono state ottenute:

- da informazioni di letteratura per lo strato più superficiale limoso (Idriss, 1990).
- dalla "Banca Dati Vel" della Regione Toscana (www.regione.toscana.it/-/banca-dati-vel) per lo strato di alterazione del substrato, scegliendo tutti i risultati di prove dinamiche di laboratorio eseguite su litologie analoghe a quelle affioranti nell'area in oggetto (substrato alterato prevalentemente argillitico).

9.2 STRATIGRAFIA E CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI SINGOLI STRATI

Sulla base del cosiddetto volume significativo di terreno interessato dalla diga oggetto di studio e dallo scolmatore, viene definita una stratigrafia di progetto che rappresenta l'andamento delle singole lenti di terreno in una sezione verticale.

Tale stratigrafia è stata desunta dai risultati di una prova sismica in foro di tipo down – hole realizzata nell'area di intervento (foro S1, gennaio 2007).

Per quanto riguarda la diga è stata presa a riferimento per intero la stratigrafia del suddetto down-hole (riportata negli allegati 1 e 2).

Per quanto riguarda invece lo scolmatore è stata considerata la stratigrafia a partire da -12 m da p.c. in S1 (gennaio 2007), in quanto sono previsti scavi per circa 12 m di spessore (la stratigrafia è riportata negli allegati 3 e 4).

9.3 ACCELEROGRAMMI E SPETTRI DI INPUT

Gli accelerogrammi di input relativi a tutti e gli stati limite (SLO, SLD, SLV e SLC) sono stati ottenuti utilizzando il codice di calcolo REXEL (Iervolino et al, 2010).

Attraverso questo codice di calcolo sono state ricercate combinazioni di 7 accelerogrammi naturali compatibili con gli spettri delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018) dalla banca dati dell'European Strong-motion Database (Ambraseys et al., 2002 - www.isesd.cv.ic.ac.uk/ESD/), considerando eventi con Magnitudo compresa tra 4 e 6.5 e distanza epicentrale inferiore a 20 km (come desunto dall'analisi di disaggregazione effettuata). Tali accelerogrammi hanno una scalatura in ampiezza compresa tra 0.5 e 2 e, per quanto riguarda la compatibilità con lo spettro di risposta di riferimento, l'ordinata spettrale media non presenta uno scarto in difetto maggiore del 10%, né uno in eccesso maggiore del 30% rispetto a quella dello spettro di riferimento nell'intervallo di periodo tra 0.15 e 2 secondi.

Nelle tabelle seguenti sono riportati i moti di input utilizzati nell'analisi di risposta sismica locale agli stati limite in esame, sia per quanto riguarda le verifiche di diga e scolmatore, sia per quanto riguarda gli scavi provvisionali della diga e sia per quelli dello scolmatore.

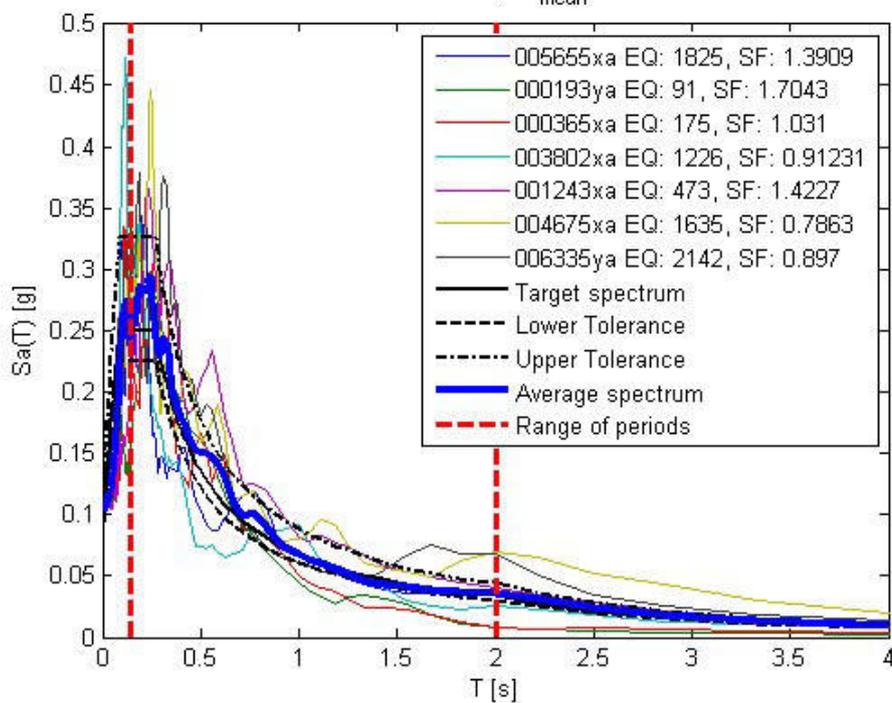
PGA e PGV degli accelerogrammi utilizzati sono riportati negli allegati da 1 a 4.

Verifiche diga e scolmatore

SLO (TR =120 anni)

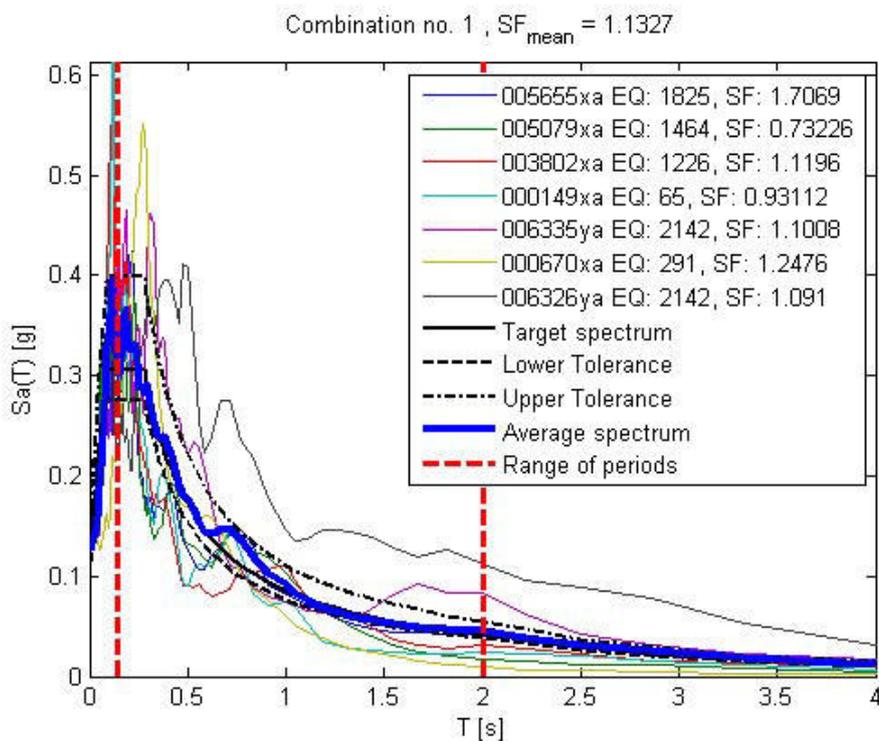
Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	Fault Mechanism	Epicentral Distance (km)
5655	1825	ST2950	NE of Banja Luka	13/08/1981	5.7	oblique	5655
193	91	ST64	Montenegro	09/04/1979	5.4	thrust	193
365	175	ST140	Lazio Abruzzo	07/05/1984	5.9	normal	365
3802	1226	ST2368	SE of Tirana	09/01/1988	5.9	thrust	3802
1243	473	ST575	Izmit (aftershock)	13/09/1999	5.8	oblique	1243
4675	1635	ST2487	South Iceland	17/06/2000	6.5	strike slip	4675
6335	2142	ST2557	South Iceland (aftershock)	21/06/2000	6.4	strike slip	6335

Combination no. 1 , $SF_{mean} = 1.1635$



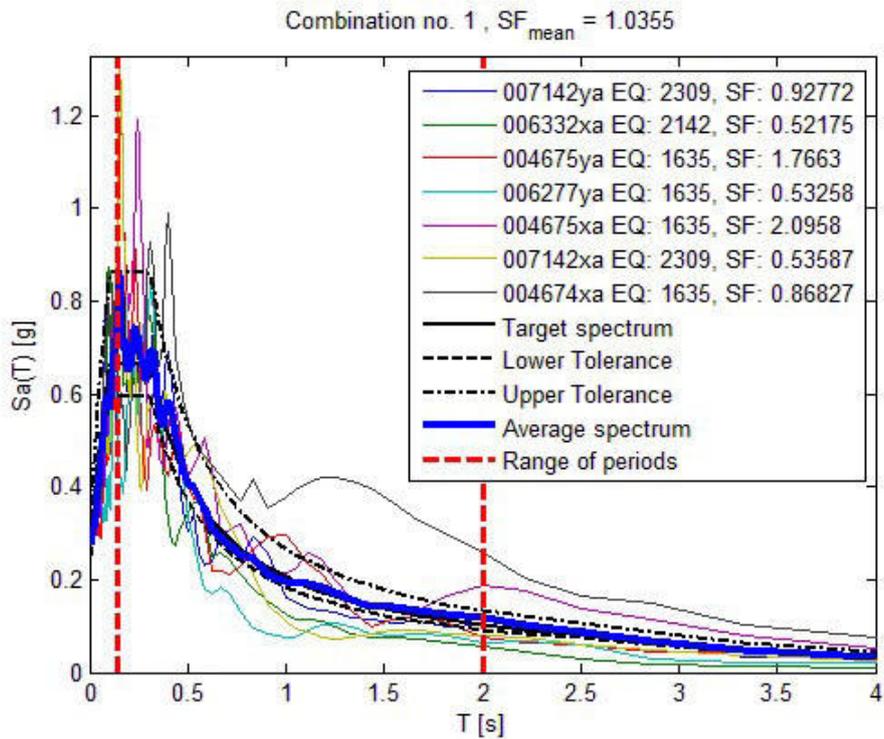
SLD (TR = 201 anni)

Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	Fault Mechanism	Epicentral Distance (km)
5655	1825	ST2950	NE of Banja Luka	13/08/1981	5.7	oblique	10
5079	1464	ST2552	Mt. Hengill Area	04/06/1998	5.4	strike slip	6
3802	1226	ST2368	SE of Tirana	09/01/1988	5.9	thrust	7
149	65	ST26	Friuli (aftershock)	15/09/1976	6	thrust	12
6335	2142	ST2557	South Iceland (aftershock)	21/06/2000	6.4	strike slip	15
670	291	ST238	Umbria Marche (aftershock)	06/10/1997	5.5	normal	20
6326	2142	ST2496	South Iceland (aftershock)	21/06/2000	6.4	strike slip	14



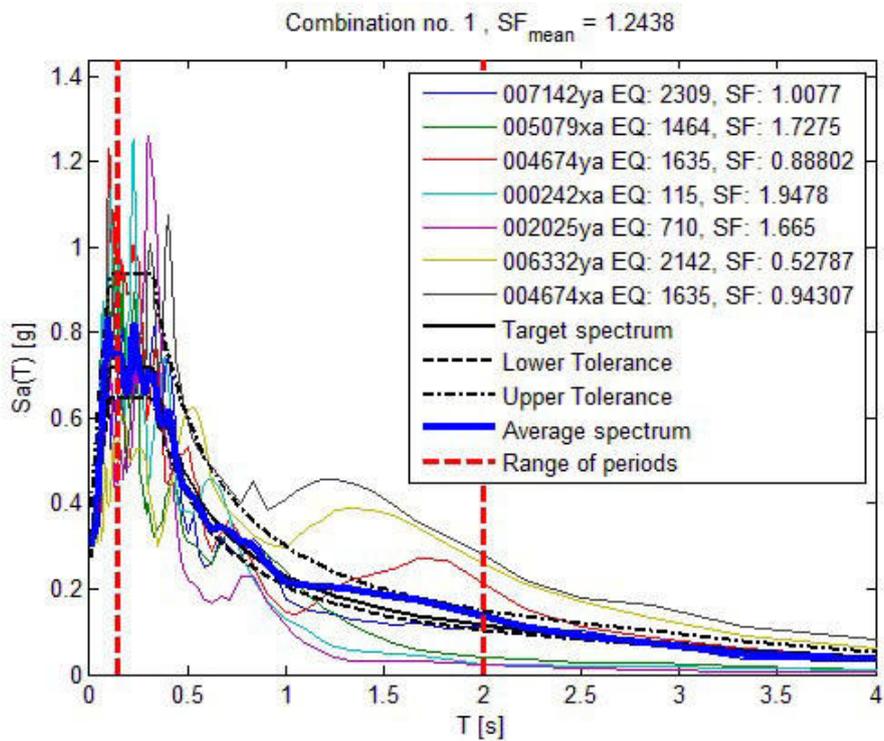
SLV (TR = 1898 anni)

Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	Fault Mechanism	Epicentral Distance (km)
7142	2309	ST539	Bingol	01/05/2003	6.3	strike slip	14
6332	2142	ST2483	South Iceland (aftershock)	21/06/2000	6.4	strike slip	6
4675	1635	ST2487	South Iceland	17/06/2000	6.5	strike slip	13
6277	1635	ST2558	South Iceland	17/06/2000	6.5	strike slip	15
4675	1635	ST2487	South Iceland	17/06/2000	6.5	strike slip	13
7142	2309	ST539	Bingol	01/05/2003	6.3	strike slip	14
4674	1635	ST2486	South Iceland	17/06/2000	6.5	strike slip	5



SLC (TR = 2475 anni)

Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	Fault Mechanism	Epicentral Distance (km)
7142	2309	ST539	Bingol	01/05/2003	6.3	strike slip	14
5079	1464	ST2552	Mt. Hengill Area	04/06/1998	5.4	strike slip	6
4674	1635	ST2486	South Iceland	17/06/2000	6.5	strike slip	5
242	115	ST225	Valnerina	19/09/1979	5.8	normal	5
2025	710	ST1357	Kremidia (aftershock)	25/10/1984	5	?	16
6332	2142	ST2483	South Iceland (aftershock)	21/06/2000	6.4	strike slip	6
4674	1635	ST2486	South Iceland	17/06/2000	6.5	strike slip	5

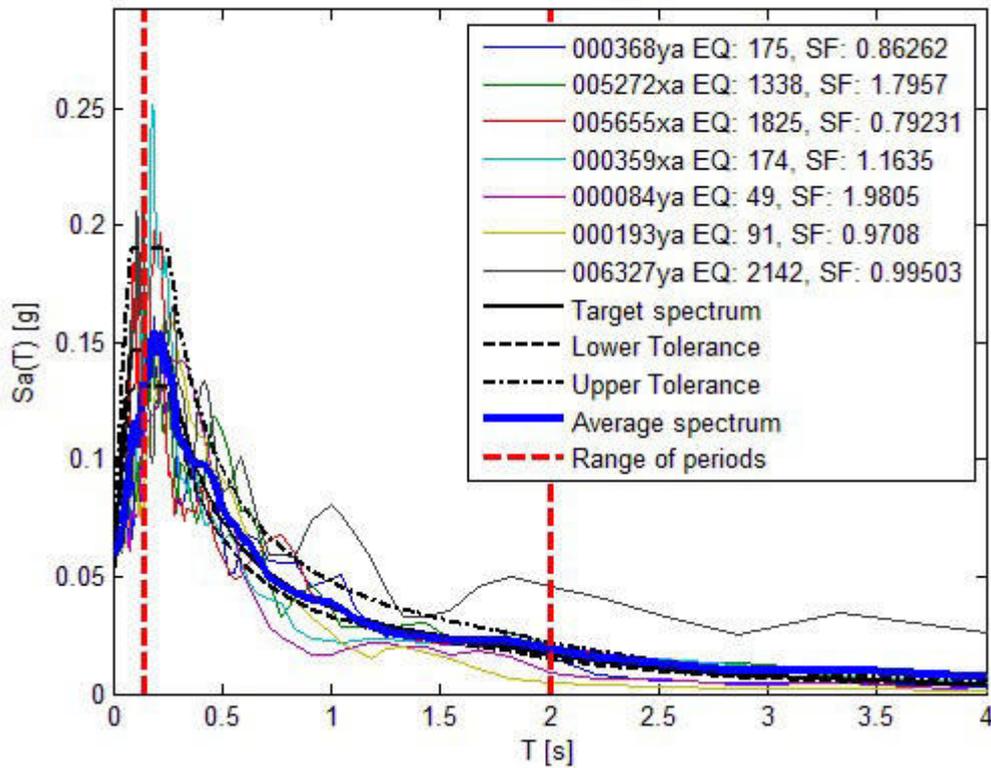


Scavi provvisionali diga e scolmatore

SLD (TR = 35 anni)

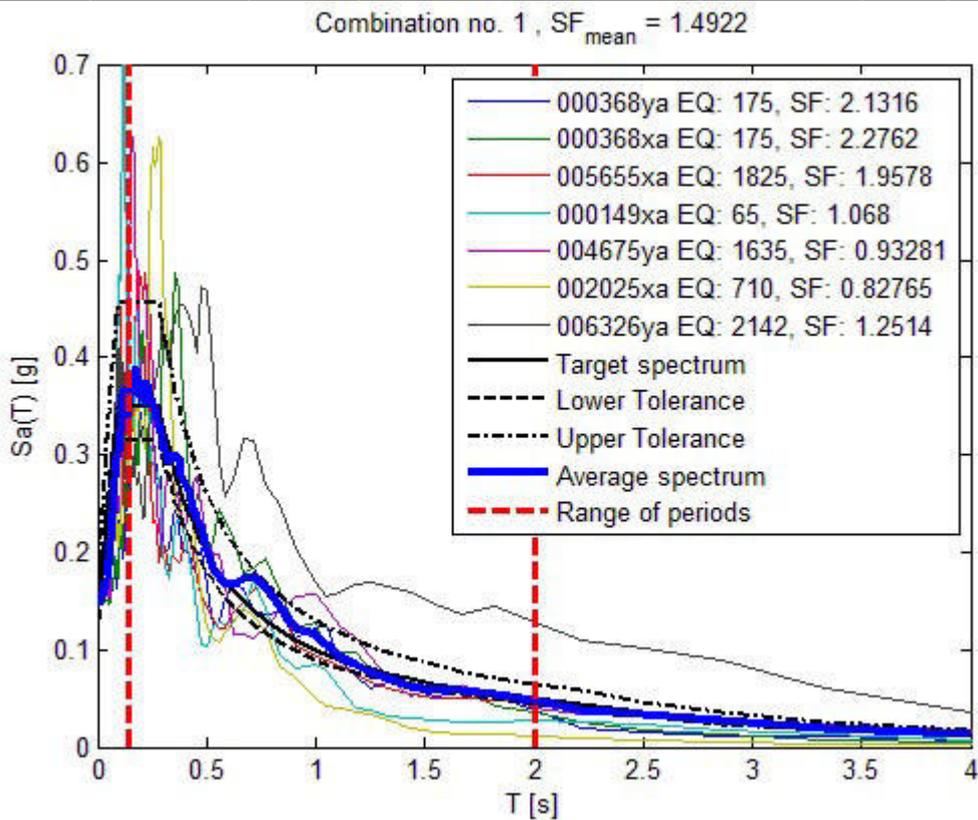
Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	Fault Mechanism	Epicentral Distance (km)
368	175	ST143	Lazio Abruzzo	07/05/1984	5.9	normal	22
5272	1338	ST2487	Mt. Vatnafjoll	25/05/1987	6	oblique	24
5655	1825	ST2950	NE of Banja Luka	13/08/1981	5.7	oblique	10
359	174	ST136	Umbria	29/04/1984	5.6	normal	17
84	49	ST20	Friuli (aftershock)	09/06/1976	4.5	thrust	14
193	91	ST64	Montenegro	09/04/1979	5.4	thrust	15
6327	2142	ST2552	South Iceland (aftershock)	21/06/2000	6.4	strike slip	24

Combination no. 1, $SF_{mean} = 1.2229$



SLV (TR = 332 anni)

Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	Fault Mechanism	Epicentral Distance (km)
368	175	ST143	Lazio Abruzzo	07/05/1984	5.9	normal	22
368	175	ST143	Lazio Abruzzo	07/05/1984	5.9	normal	22
5655	1825	ST2950	NE of Banja Luka	13/08/1981	5.7	oblique	10
149	65	ST26	Friuli (aftershock)	15/09/1976	6	thrust	12
4675	1635	ST2487	South Iceland	17/06/2000	6.5	strike slip	13
2025	710	ST1357	Kremidia (aftershock)	25/10/1984	5	?	16
6326	2142	ST2496	South Iceland (aftershock)	21/06/2000	6.4	strike slip	14



10 SPETTRI OUTPUT

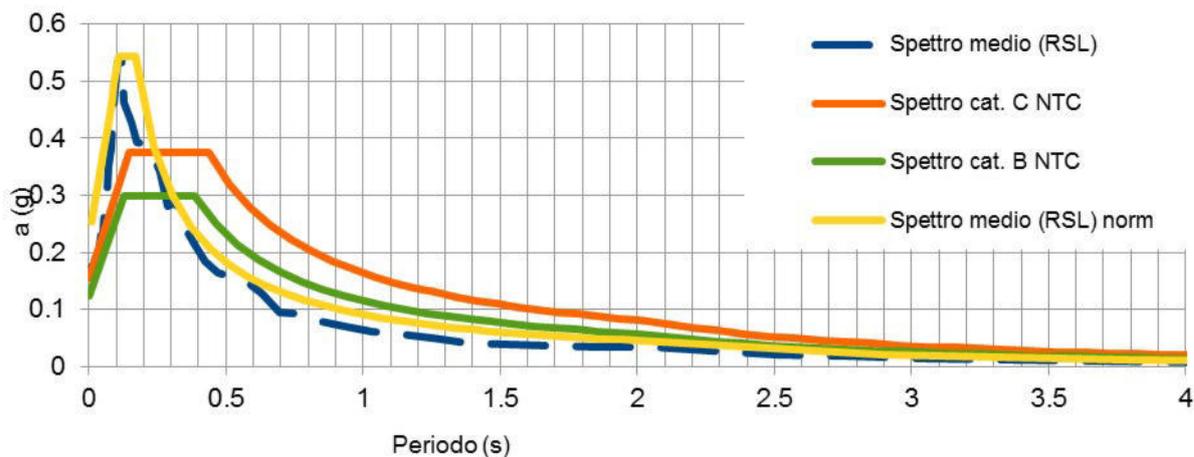
Nei paragrafi successivi vengono riportate le informazioni relative ai risultati del calcolo.

10.1 VERIFICHE DIGA

10.1.1 SLO (TR = 120 ANNI)

Di seguito viene riportato lo spettro di risposta in accelerazione, derivante dalla media degli spettri ottenuti dai 7 accelerogrammi utilizzati (per un tempo di ritorno di 120 anni). Si riporta inoltre il confronto con gli spettri di normativa per le categorie di sottosuolo B e C e lo spettro di risposta derivato dalla RSL normalizzato (ed i relativi parametri).

In allegato 5 è riportata la tabella con i valori di periodo (s) e accelerazione (g) dello spettro ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale, mentre nell'allegato 9 (cartella compressa) sono riportati i 7 accelerogrammi di output ottenuti.



Parametri indipendenti	
a (g)	0.103
F0	2.421
T*c (s)	0.271

Parametri dipendenti	
Tb (s)	0.110
Tc (s)	0.168
S	2.178

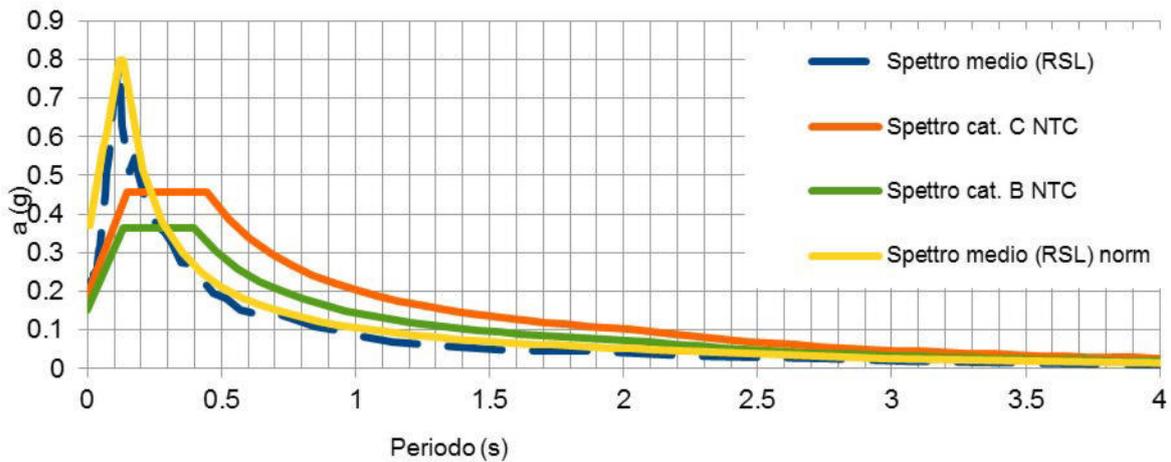
Come visibile dal grafico lo spettro da RSL (anche quello normalizzato) è sempre superiore a quello relativo alla categoria di sottosuolo B (corrispondente alla stratigrafia presa in considerazione per lo studio) per periodi <0.3 s ed anche alla categoria superiore (cat. C) per periodi < 0.23.

Lo spettro da RSL in ampiezza ha i valori massimi per $0.12 < T < 0.15$ s ed in generale si osservano le maggiori differenze rispetto agli spettri di normativa per periodi compatibili con le frequenze di risonanza del terreno deducibili da spessori e velocità delle coperture al di sopra del substrato sismico.

10.1.2 SLD (TR = 201 ANNI)

Di seguito viene riportato lo spettro di risposta in accelerazione, derivante dalla media degli spettri ottenuti dai 7 accelerogrammi utilizzati (per un tempo di ritorno di 201 anni). Si riporta inoltre il confronto con gli spettri di normativa per le categorie di sottosuolo B e C e lo spettro di risposta derivato dalla RSL normalizzato (ed i relativi parametri).

In allegato 5 è riportata la tabella con i valori di periodo (s) e accelerazione (g) dello spettro ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale, mentre nell'allegato 10 (cartella compressa) sono riportati i 7 accelerogrammi di output ottenuti.



Parametri indipendenti	
a (g)	0.126
F0	2.414
T*c (s)	0.279

Parametri dipendenti	
Tb (s)	0.117
Tc (s)	0.133
S	2.622

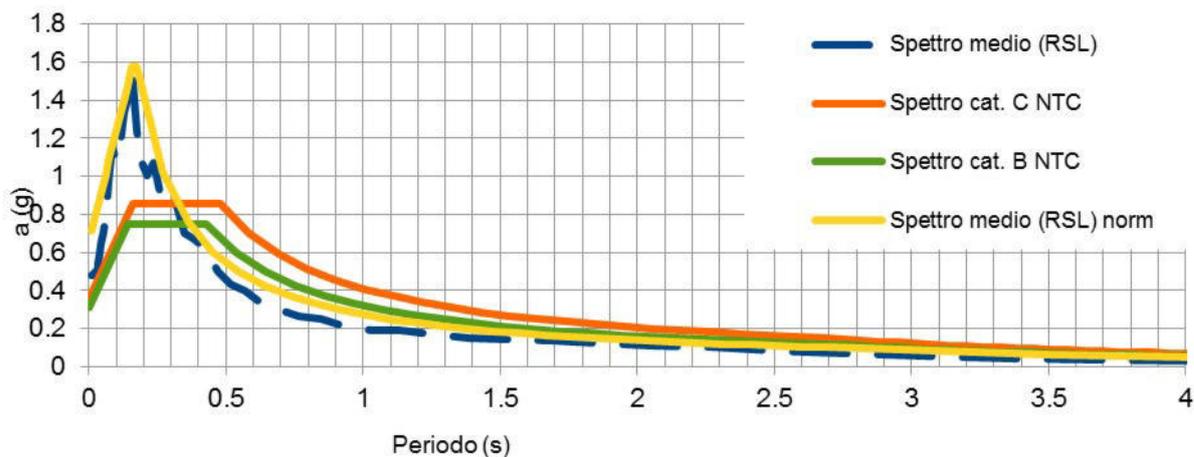
Come visibile dal grafico lo spettro da RSL (anche quello normalizzato) è sempre superiore a quello relativo alla categoria di sottosuolo B (corrispondente alla stratigrafia presa in considerazione per lo studio) per periodi <0.26 s ed anche alla categoria superiore (cat. C) per periodi < 0.21.

Lo spettro da RSL in ampiezza ha i valori massimi per $0.10 < T < 0.13$ s ed in generale si osservano le maggiori differenze rispetto agli spettri di normativa per periodi compatibili con le frequenze di risonanza del terreno deducibili da spessori e velocità delle coperture al di sopra del substrato sismico.

10.1.3 SLV (TR = 1898 ANNI)

Di seguito viene riportato lo spettro di risposta in accelerazione, derivante dalla media degli spettri ottenuti dai 7 accelerogrammi utilizzati (per un tempo di ritorno di 1898 anni). Si riporta inoltre il confronto con gli spettri di normativa per le categorie di sottosuolo B e C e lo spettro di risposta derivato dalla RSL normalizzato (ed i relativi parametri).

In allegato 5 è riportata la tabella con i valori di periodo (s) e accelerazione (g) dello spettro ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale, mentre nell'allegato 11 (cartella compressa) sono riportati i 7 accelerogrammi di output ottenuti.



Parametri indipendenti	
a (g)	0.274
F0	2.398
T*c (s)	0.309

Parametri dipendenti	
Tb (s)	0.158
Tc (s)	0.174
S	2.395

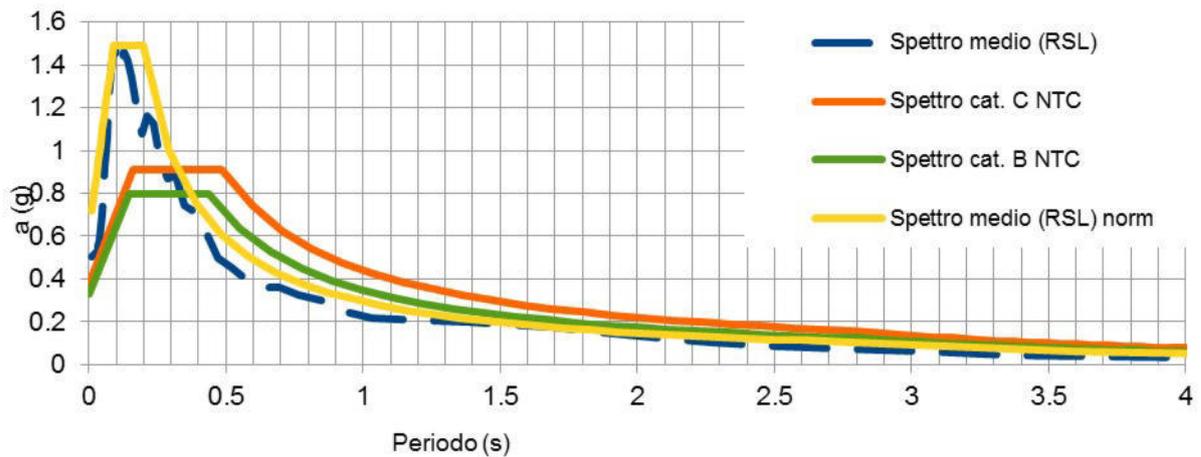
Come visibile dal grafico lo spettro da RSL (anche quello normalizzato) è sempre superiore a quello relativo alla categoria di sottosuolo B (corrispondente alla stratigrafia presa in considerazione per lo studio) per periodi <0.35 s ed anche alla categoria superiore (cat. C) per periodi < 0.31.

Lo spettro da RSL in ampiezza ha i valori massimi per $0.12 < T < 0.17$ s ed in generale si osservano le maggiori differenze rispetto agli spettri di normativa per periodi compatibili con le frequenze di risonanza del terreno deducibili da spessori e velocità delle coperture al di sopra del substrato sismico.

10.1.4 SLC (TR = 2475 ANNI)

Di seguito viene riportato lo spettro di risposta in accelerazione, derivante dalla media degli spettri ottenuti dai 7 accelerogrammi utilizzati (per un tempo di ritorno di 2475 anni). Si riporta inoltre il confronto con gli spettri di normativa per le categorie di sottosuolo B e C e lo spettro di risposta derivato dalla RSL normalizzato (ed i relativi parametri).

In allegato 5 è riportata la tabella con i valori di periodo (s) e accelerazione (g) dello spettro ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale, mentre nell'allegato 12 (cartella compressa) sono riportati i 7 accelerogrammi di output ottenuti.



Parametri indipendenti	
a (g)	0.298
F0	2.397
T*c (s)	0.317

Parametri dipendenti	
Tb (s)	0.091
Tc (s)	0.197
S	2.088

Come visibile dal grafico lo spettro da RSL (anche quello normalizzato) è sempre superiore a quello relativo alla categoria di sottosuolo B (corrispondente alla stratigrafia presa in considerazione per lo studio) per periodi <0.35 s ed anche alla categoria superiore (cat. C) per periodi < 0.28.

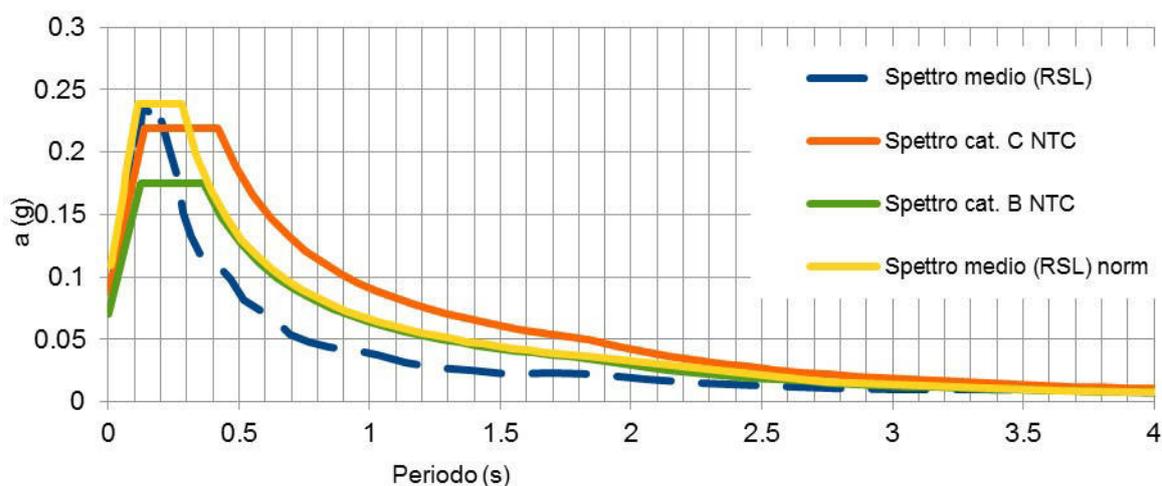
Lo spettro da RSL in ampiezza ha i valori massimi per $0.10 < T < 0.14$ s ed in generale si osservano le maggiori differenze rispetto agli spettri di normativa per periodi compatibili con le frequenze di risonanza del terreno deducibili da spessori e velocità delle coperture al di sopra del substrato sismico.

10.2 SCAVI PROVVISORIALI DIGA

10.2.1 SLD (TR = 35 ANNI)

Di seguito viene riportato lo spettro di risposta in accelerazione, derivante dalla media degli spettri ottenuti dai 7 accelerogrammi utilizzati (per un tempo di ritorno di 35 anni). Si riporta inoltre il confronto con gli spettri di normativa per le categorie di sottosuolo B e C e lo spettro di risposta derivato dalla RSL normalizzato (ed i relativi parametri).

In allegato 6 è riportata la tabella con i valori di periodo (s) e accelerazione (g) dello spettro ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale.



Parametri indipendenti		Parametri dipendenti	
a (g)	0.059	Tb (s)	0.112
F0	2.476	Tc (s)	0.279
T*c (s)	0.253	S	1.630

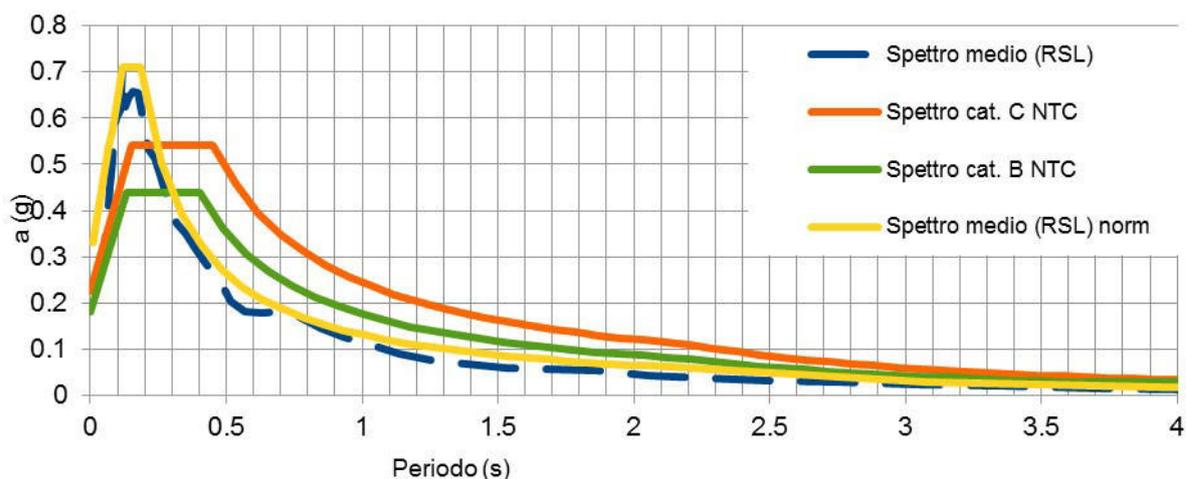
Come visibile dal grafico lo spettro da RSL è sempre superiore a quello relativo alla categoria di sottosuolo B (corrispondente alla stratigrafia presa in considerazione per lo studio) per periodi <0.25 s ed anche alla categoria superiore (cat. C) per periodi < 0.2 s. Lo spettro normalizzato da RSL è sempre superiore a quello relativo alla categoria di sottosuolo B (corrispondente alla stratigrafia presa in considerazione per lo studio) ed a quello per la e alla categoria superiore (cat. C) per periodi < 0.3 s.

Lo spettro da RSL in ampiezza ha i valori massimi per $0.10 < T < 0.17$ s.

10.2.2 SLV (TR = 332 ANNI)

Di seguito viene riportato lo spettro di risposta in accelerazione, derivante dalla media degli spettri ottenuti dai 7 accelerogrammi utilizzati (per un tempo di ritorno di 332 anni). Si riporta inoltre il confronto con gli spettri di normativa per le categorie di sottosuolo B e C e lo spettro di risposta derivato dalla RSL normalizzato (ed i relativi parametri).

In allegato 6 è riportata la tabella con i valori di periodo (s) e accelerazione (g) dello spettro ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale.



Parametri indipendenti	
a (g)	0.152
F0	2.407
T*c (s)	0.283

Parametri dipendenti	
Tb (s)	0.117
Tc (s)	0.186
S	1.940

Come visibile dal grafico lo spettro da RSL (così come quello normalizzato) è sempre superiore a quello relativo alla categoria di sottosuolo B (corrispondente alla stratigrafia presa in considerazione per lo studio) per periodi < 0.3 s ed anche alla categoria superiore (cat. C) per periodi < 0.25 s.

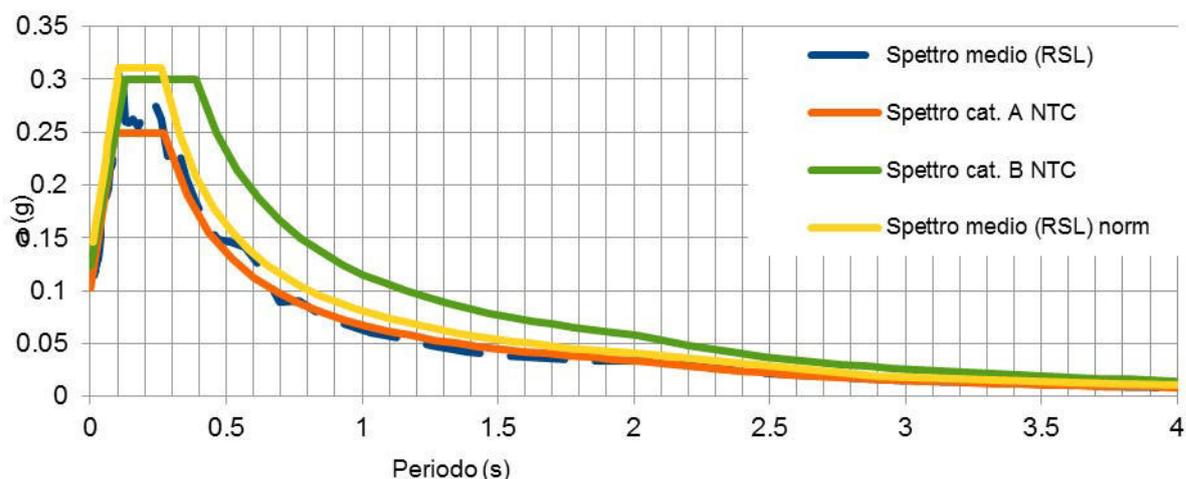
Lo spettro da RSL in ampiezza ha i valori massimi per $0.10 < T < 0.2$ s.

10.3 VERIFICHE SCOLMATORE

10.3.1 SLO (TR = 120 ANNI)

Di seguito viene riportato lo spettro di risposta in accelerazione, derivante dalla media degli spettri ottenuti dai 7 accelerogrammi utilizzati (per un tempo di ritorno di 120 anni). Si riporta inoltre il confronto con gli spettri di normativa per le categorie di sottosuolo A e B e lo spettro di risposta derivato dalla RSL normalizzato (ed i relativi parametri).

In allegato 7 è riportata la tabella con i valori di periodo (s) e accelerazione (g) dello spettro ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale.



Parametri indipendenti	
a (g)	0.103
F0	2.421
T*c (s)	0.271

Parametri dipendenti	
Tb (s)	0.106
Tc (s)	0.260
S	1.247

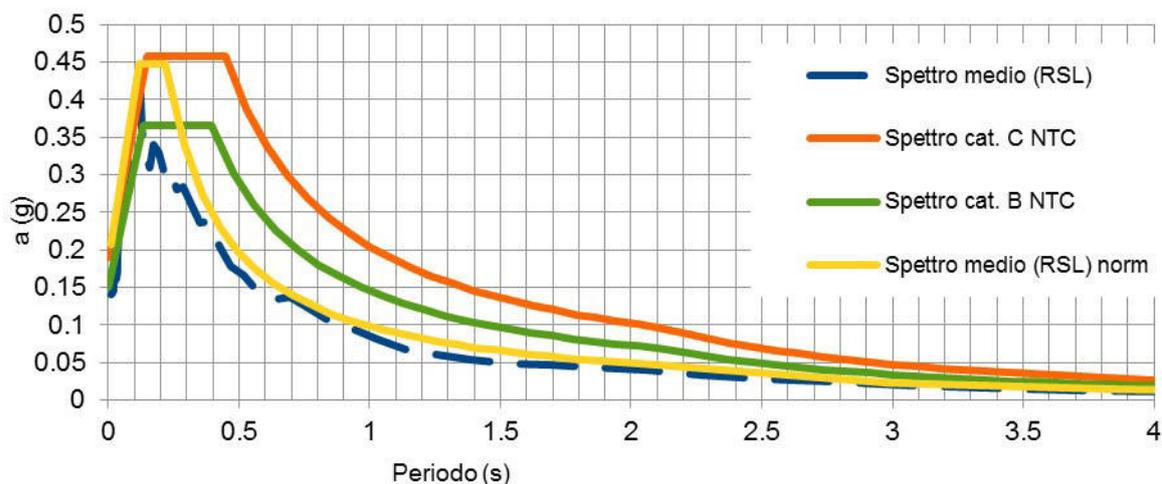
Come visibile dal grafico lo spettro da RSL ha accelerazioni di poco maggiori a quello della categoria di sottosuolo A e praticamente sempre inferiori a quello della categoria B. Lo spettro normalizzato ha valori di accelerazione più alti della categoria di sottosuolo B per periodi più bassi di circa 0.3 s.

Lo spettro da RSL in ampiezza ha i valori massimi per periodi di circa 0.1 s.

10.3.2 SLD (TR = 201 ANNI)

Di seguito viene riportato lo spettro di risposta in accelerazione, derivante dalla media degli spettri ottenuti dai 7 accelerogrammi utilizzati (per un tempo di ritorno di 201 anni). Si riporta inoltre il confronto con gli spettri di normativa per le categorie di sottosuolo B e C e lo spettro di risposta derivato dalla RSL normalizzato (ed i relativi parametri).

In allegato 7 è riportata la tabella con i valori di periodo (s) e accelerazione (g) dello spettro ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale.



Parametri indipendenti	
a (g)	0.126
F0	2.414
T*c (s)	0.279

Parametri dipendenti	
Tb (s)	0.117
Tc (s)	0.219
S	1.472

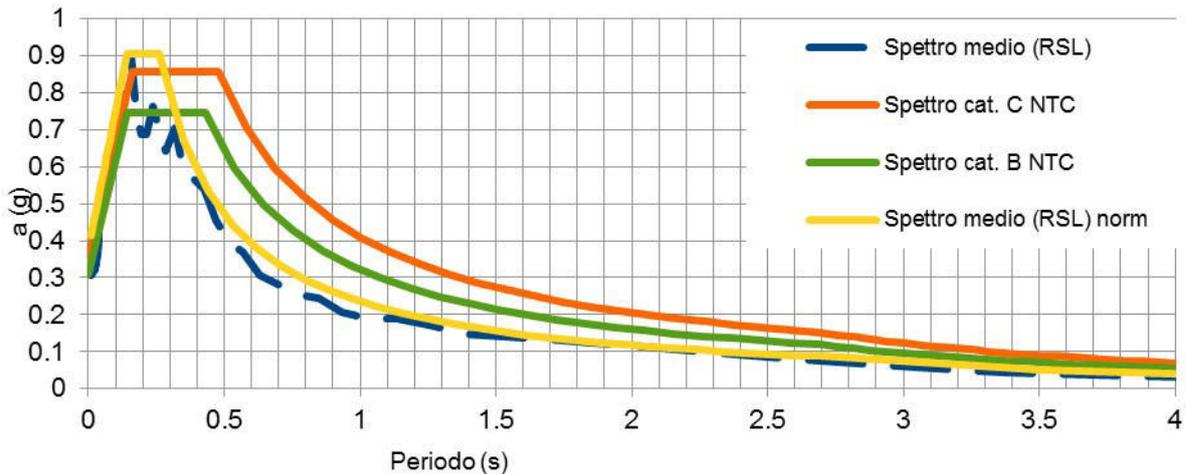
Come visibile dal grafico lo spettro da RSL è superiore a quello relativo alla categoria di sottosuolo B (corrispondente alla stratigrafia presa in considerazione per lo studio) per periodi <0.12 s, mentre quello normalizzato per periodi $T < 0.3$ s ed è praticamente sempre inferiore alla categoria superiore (cat. C).

Lo spettro da RSL in ampiezza ha i valori massimi per periodi di circa 0.12 s.

10.3.3 SLV (TR = 1898 ANNI)

Di seguito viene riportato lo spettro di risposta in accelerazione, derivante dalla media degli spettri ottenuti dai 7 accelerogrammi utilizzati (per un tempo di ritorno di 949 anni). Si riporta inoltre il confronto con gli spettri di normativa per le categorie di sottosuolo B e C lo spettro di risposta derivato dalla RSL normalizzato (ed i relativi parametri).

In allegato 7 è riportata la tabella con i valori di periodo (s) e accelerazione (g) dello spettro ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale.



Parametri indipendenti	
a (g)	0.274
F0	2.398
T*c (s)	0.309

Parametri dipendenti	
Tb (s)	0.141
Tc (s)	0.260
S	1.377

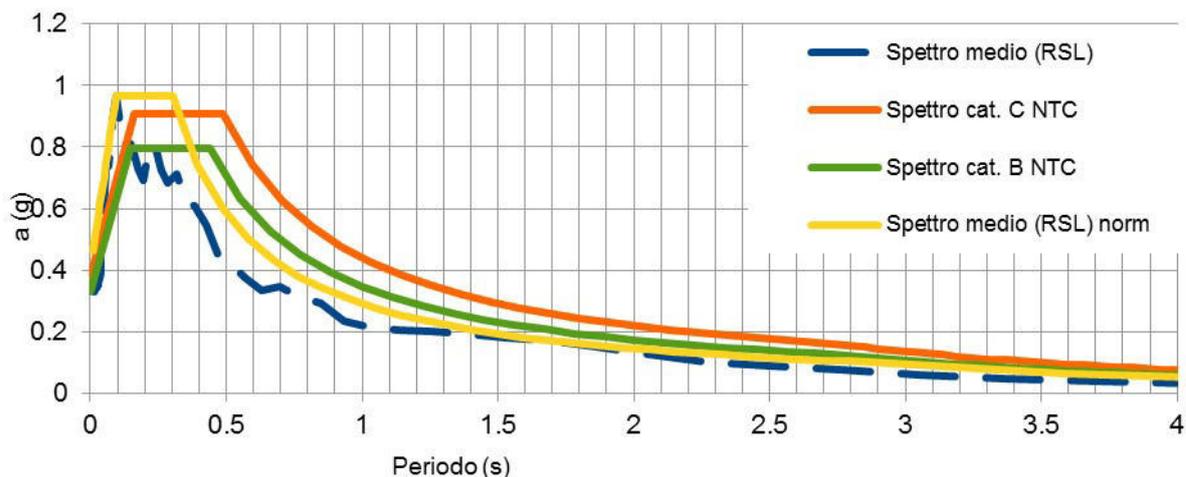
Come visibile dal grafico lo spettro da RSL (anche quello normalizzato) è sempre superiore a quello relativo alla categoria di sottosuolo B (corrispondente alla stratigrafia presa in considerazione per lo studio) rispettivamente per periodi <0.2 s e 0.3 s.

Lo spettro da RSL in ampiezza ha i valori massimi per 0.16 s.

10.3.4 SLC (TR = 2475 ANNI)

Di seguito viene riportato lo spettro di risposta in accelerazione, derivante dalla media degli spettri ottenuti dai 7 accelerogrammi utilizzati (per un tempo di ritorno di 1950 anni). Si riporta inoltre il confronto con gli spettri di normativa per le categorie di sottosuolo B e C e lo spettro di risposta derivato dalla RSL normalizzato (ed i relativi parametri).

In allegato 7 è riportata la tabella con i valori di periodo (s) e accelerazione (g) dello spettro ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale.



Parametri indipendenti	
a (g)	0.298
F0	2.397
T*c (s)	0.317

Parametri dipendenti	
Tb (s)	0.094
Tc (s)	0.302
S	1.352

Come visibile dal grafico lo spettro da RSL è superiore a quello relativo alla categoria di sottosuolo B (corrispondente alla stratigrafia presa in considerazione per lo studio) per periodi <0.15 s. Lo spettro normalizzato è invece superiore a quello relativo alla categoria B per periodi < 0.4 s.

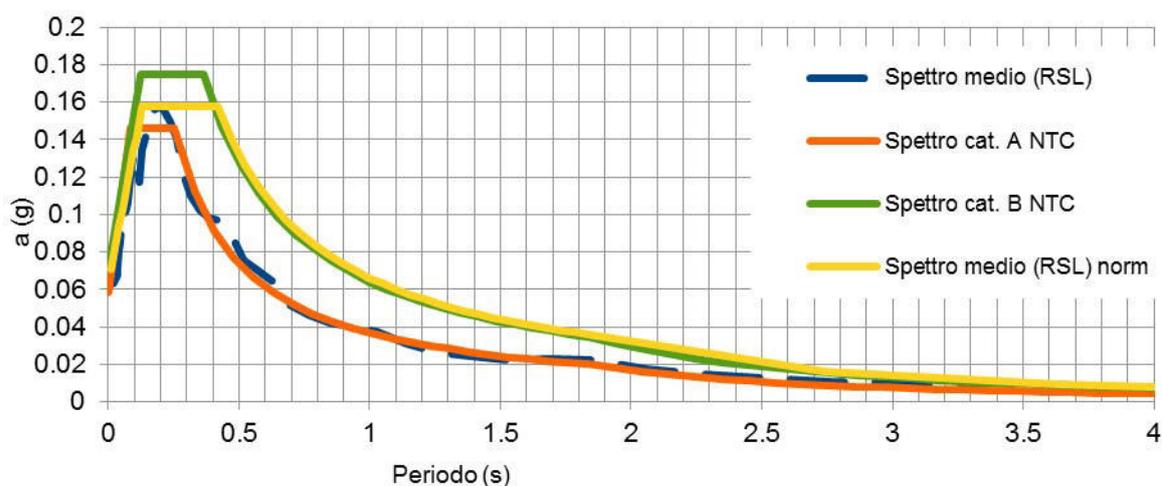
Lo spettro da RSL in ampiezza ha i valori massimi per periodi di circa 0.1 s

10.4 SCAVI PROVVISORIALI SCOLMATORE

10.4.1 SLD (TR = 35 ANNI)

Di seguito viene riportato lo spettro di risposta in accelerazione, derivante dalla media degli spettri ottenuti dai 7 accelerogrammi utilizzati (per un tempo di ritorno di 35 anni). Si riporta inoltre il confronto con gli spettri di normativa per le categorie di sottosuolo A e B e lo spettro di risposta derivato dalla RSL normalizzato (ed i relativi parametri).

In allegato 8 è riportata la tabella con i valori di periodo (s) e accelerazione (g) dello spettro ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale.



Parametri indipendenti		Parametri dipendenti	
a (g)	0.059	Tb (s)	0.129
F0	2.476	Tc (s)	0.419
T*c (s)	0.253	S	1.080

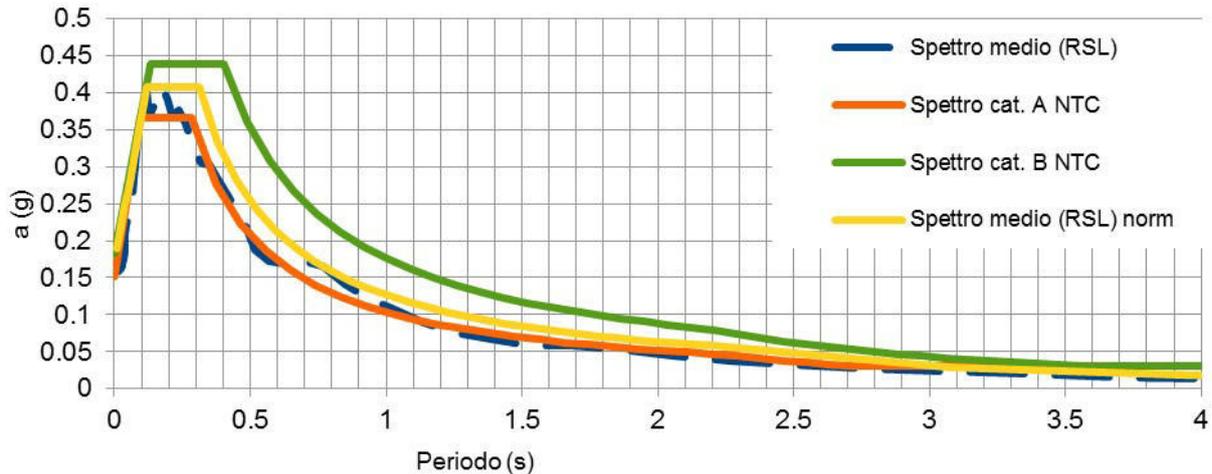
Come visibile dal grafico lo spettro da RSL ha un andamento del tutto simile a quella relativo alla categoria di sottosuolo A (tranne che per valori attorno a 0.2 s), mentre ha sempre valori di accelerazione inferiori a quello della categoria B.

Lo spettro da RSL in ampiezza ha i valori massimi per $T = 0.2$ s.

10.4.2 SLV (TR = 332 ANNI)

Di seguito viene riportato lo spettro di risposta in accelerazione, derivante dalla media degli spettri ottenuti dai 7 accelerogrammi utilizzati (per un tempo di ritorno di 332 anni). Si riporta inoltre il confronto con gli spettri di normativa per le categorie di sottosuolo A e B e lo spettro di risposta derivato dalla RSL normalizzato (ed i relativi parametri).

In allegato 8 è riportata la tabella con i valori di periodo (s) e accelerazione (g) dello spettro ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale.



Parametri indipendenti	
a (g)	0.152
F0	2.407
T*c (s)	0.283

Parametri dipendenti	
Tb (s)	0.120
Tc (s)	0.311
S	1.114

Come visibile dal grafico lo spettro da RSL ha un andamento del tutto simile a quella relativo alla categoria di sottosuolo A (tranne che per valori attorno a 0.2 s), mentre ha sempre valori di accelerazione inferiori a quello della categoria B.

Lo spettro da RSL in ampiezza ha i valori massimi per $T = 0.2$ s.

IdroGeo Service S.r.l.

Engineering and Consulting

Il Direttore Tecnico

Dott. Geol.

Alessandro MURRATZU

Il Tecnico Responsabile

Dott. Geol.

Simone FIASCHI

11 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.
- Ambrosetti P., Bosi C., Carraro F., Ciaranfi N., Panizza M., Papani G., Vezzani L., Zanferrari A. (1987): *Neotectonic Map of Italy, scale 1:500,000*. C.N.R.-P.F.G., Sottoprogetto Neotettonica, Fogli 1-6.
- Basili R., Valensise G., Vannoli P., Burrato P., Fracassi U., Mariano S., Tiberti M.M., Boschi E. (2008): *The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology*. Tectonophysics; doi:10.1016/j.tecto.2007.04.014
- Boccaletti M., Corti G., Gasperini P., Piccardi L., Vannucci G., Clemente S. (2001): *Active tectonics and seismic zonation of the urban area of Florence, Italy*. Pure Appl. Geophys., 158, 2313-2332.
- DISS Working Group (2018): *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1.
- Gruppo di Lavoro MPS (2004): *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile*. INGV, Milano - Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici.
- Idriss, I.M. (1990): *Response of Soft Soil Sites during Earthquakes*. Proc., H. Bolton Seed Memorial Symp., Vol. 2, BiTech Publishers, Vancouver, 273-290.
- Iervolino I., Galasso C., Cosenza E. (2009): *REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis*. Bulletin of Earthquake Engineering, 8:339-362. DOI 10.1007/s10518-009-9146-1.
- ISIDe Working Group. (2016). *Italian Seismological Instrumental and Parametric Database (ISIDe)*. <https://doi.org/10.13127/ISIDE>.
- ITHACA Working Group (2019). *ITHACA (ITaly HAZard from Capable faulting), A database of active capable faults of the Italian territory. Version December 2019*. ISPRA Geological Survey of Italy. Web Portal <http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/Mappatura.aspx>
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E., Antonucci A. (2019). *Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 2.0*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.2>.

- Martelli L., Ercolessi G., Sani F., Bonini M., Corti G., Santulin M., Tamaro A., Rebez A., Slejko D. (2017): *Analisi 3D della pericolosità sismica dell'appennino settentrionale: proposta di nuova zonazione sismogenica e analisi della pericolosità sulla base di un modello 3D delle sorgenti sismiche*. Rapporto conclusivo. Centro stampa Regione Emilia Romagna.
- Martelli L., Santulin M., Sani F., Tamaro A., Bonini M., Rebez A., Corti G., Slejko D. (2017b): *Seismic hazard of the Northern Apennines based on 3D seismic sources*. Journal of Seismology (2017) 21:1251-1275. DOI 10.1007/s10950-017-9665-1.
- Mantovani E., Babucci D., Tamburelli C., Viti M. (2009). *A review on the driving mechanism of the Tyrrhenian-Apennines system: Implications for the present seismotectonic setting in the Central-Northern Apennines*. Tectonophysics, 476, 22-40.
- Mantovani E., Viti M., Babucci D., Cenni N., Tamburelli C., Vannucchi A., Falciani F., Fianchisti G., Baglione M., D'Intinosante V., Fabbroni P. (2012): *Potenzialità sismica della Toscana e definizione di criteri per interventi di prevenzione*. Regione Toscana, Centro stampa Giunta Regione Toscana, Firenze, pagg. 140 (www.regione.toscana.it).
- Meletti C., Patacca E., Scandone P. (2000): *Construction of a seismotectonic model: the case of Italy*. Pure and Applied Geophysics 157, 11–35.
- Meletti C., Valensise G. (a cura di) (2004). *Zonazione sismogenica ZS9. In: Gruppo di Lavoro, Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003, Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile*. INGV, Milano - Roma, App. 2, 38 pp.
- Meletti C., Galadini F., Valensise G., Stucchi M., Basili R., Barba S., Vannucci G., Boschi E. (2008). *A seismic source zone model for the seismic hazard assessment of the Italian territory*. Tectonophysics, 450, 85–108.
- Kottke A. R., Rathje E. M. (2008): *Technical manual for Strata*. Report No.: 2008/10. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli, B., Gasperini P. (2019): *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 2.0*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.2>.
- Stucchi M., Meletti C., Montaldo V., Crowley H., Calvi G. M., Boschi E. (2011): *Seismic hazard assessment (2003–2009) for the Italian building code*. Bull. Seism. Soc. Am., 101, 1885–1911, doi: 10.1785/0120100130.

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello nel Comune di Pistoia (PT) – Progetto definitivo
Relazione sismotettonica, modellazione sismica e analisi di risposta sismica locale

ALLEGATO 1

REPORT ANALISI RSL (SLO, TR = 120 anni; SLD, TR = 201 anni; SLV, TR = 1898 anni; SLC, TR = 2475 anni)

Verifiche diga

ALLEGATO 2

REPORT ANALISI RSL (SLD, TR = 35 anni; SLV, TR = 332 anni)

Scavi provvisionali diga

ALLEGATO 3

**REPORT ANALISI RSL (SLO, TR = 120 anni; SLD, TR = 201 anni; SLV, TR = 1898 anni; SLC, TR = 2475 anni)
Verifiche scolmatore**

ALLEGATO 4

**REPORT ANALISI RSL (SLD, TR = 35 anni; SLV, TR = 332 anni)
Scavi provvisionali scolmatore**

ALLEGATO 5

**TABELLA SPETTRI DI RISPOSTA MEDI IN “g”:
 SLO, SLD, SLV e SLC – verifiche diga**

Periodo (s)	Spettro medio SLO	Spettro medio SLD	Spettro medio SLV	Spettro medio SLC
0.01	0.175376078	0.223396471	0.478580125	0.504780206
0.01103674	0.175712258	0.223857005	0.479255067	0.505407575
0.01218096	0.176130853	0.2244396	0.480074522	0.506144845
0.01344381	0.176659374	0.2251405	0.481093045	0.50703163
0.01483758	0.177289718	0.226044551	0.482346149	0.508179737
0.01637585	0.178175775	0.227189905	0.483893092	0.509570067
0.0180736	0.179356727	0.228754166	0.485823863	0.51135614
0.01994737	0.181050153	0.231020364	0.488171026	0.513499192
0.02201539	0.182769892	0.233518344	0.491106531	0.516261238
0.02429781	0.190901469	0.243564346	0.494871246	0.519855404
0.02681686	0.19180904	0.244997353	0.499932714	0.524555301
0.02959707	0.190681332	0.24477678	0.506708159	0.530465136
0.03266552	0.198022471	0.255100004	0.51822337	0.540507118
0.03605208	0.201111596	0.259018914	0.547075193	0.56077291
0.03978974	0.20877781	0.271829648	0.586432424	0.579869722
0.0439149	0.228252878	0.304665684	0.640978294	0.641135775
0.04846773	0.229465939	0.317274234	0.676458439	0.702465139
0.05349257	0.23934053	0.353522442	0.702569495	0.788197035
0.05903836	0.283529541	0.420269682	0.748372547	0.92156295
0.0651591	0.30856532	0.448107816	0.883086932	1.057050942
0.0719144	0.350052083	0.50722503	0.971400759	1.235696707
0.07937005	0.382584128	0.553068292	1.102172137	1.373323471
0.08759866	0.426875721	0.593729871	1.148545664	1.428800099
0.09668036	0.483069778	0.678038866	1.105163965	1.491400995
0.10670359	0.532389651	0.719701915	1.086974789	1.385318018
0.11776598	0.543071531	0.797614965	1.220549623	1.402873662
0.12997524	0.462725028	0.628431205	1.335559696	1.463057174
0.14345029	0.444893378	0.570979191	1.405551172	1.416084268
0.15832235	0.427197144	0.508224047	1.573770758	1.342130523
0.17473625	0.393129863	0.54541524	1.239276227	1.199319641
0.19285185	0.390184147	0.500083487	1.070295697	1.078135838
0.21284556	0.374436415	0.439455615	1.006642376	1.160698288
0.23491211	0.369117598	0.421303469	1.073312227	1.125341005
0.25926637	0.341892736	0.369341685	0.917862269	0.955967327
0.28614554	0.280796811	0.353377302	0.82400485	0.86694223
0.31581138	0.288253404	0.324494337	0.86704917	0.88416765
0.3485528	0.245833177	0.27570623	0.703286624	0.743500673

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello nel Comune di Pistoia (PT) – Progetto definitivo
 Relazione sismotettonica, modellazione sismica e analisi di risposta sismica locale

0.38468865	0.214658448	0.271915853	0.669097392	0.714851545
0.42457084	0.18420414	0.230881778	0.623311352	0.631038009
0.46858778	0.163265059	0.195634758	0.499392976	0.495317387
0.51716812	0.158451332	0.180916582	0.429551038	0.458903687
0.57078499	0.149801565	0.153375372	0.399070199	0.404665906
0.62996052	0.127845647	0.142041446	0.331917199	0.359015725
0.69527102	0.094858048	0.144041718	0.298791375	0.362308405
0.76735252	0.093722811	0.127640403	0.266387591	0.324155561
0.84690699	0.078963911	0.107673525	0.250630001	0.302538645
0.93470919	0.070767733	0.097869093	0.21078049	0.244587245
1.03161418	0.061749625	0.083479084	0.192689589	0.216379716
1.13856571	0.056495744	0.068997594	0.191074432	0.208777019
1.25660531	0.049522395	0.062187644	0.173618654	0.207074381
1.38688256	0.042008035	0.054970749	0.149696669	0.198155486
1.53066616	0.038479248	0.04919276	0.14110999	0.185344167
1.68935637	0.035815758	0.046651898	0.13342884	0.17387909
1.86449862	0.034131756	0.044474077	0.124464619	0.152731489
2.05779857	0.033283506	0.040320167	0.113062007	0.128183743
2.27113868	0.027097037	0.03340223	0.099855247	0.104505775
2.50659661	0.021825542	0.028348034	0.085290307	0.088427222
2.76646539	0.017596392	0.024550719	0.072135791	0.076625838
3.0532758	0.014207896	0.019475685	0.057725131	0.06096044
3.36982098	0.012705238	0.017066868	0.04519144	0.046678114
3.71918364	0.009517652	0.012545071	0.038406216	0.038662043
4.10476612	0.007569061	0.010392113	0.031304871	0.032592854
4.53032345	0.005009643	0.006569697	0.020781846	0.022801992
5	0.003587992	0.00484118	0.013933333	0.015375793

ALLEGATO 6

**TABELLA SPETTRI DI RISPOSTA MEDI IN “g”:
 SLD e SLV – scavi provvisionali diga**

Periodo (s)	Spettro medio SLD	Spettro medio SLV
0.01	0.093844584	0.238160844
0.01103674	0.093950629	0.238523672
0.01218096	0.094082035	0.238969657
0.01344381	0.094244328	0.239508916
0.01483758	0.094446901	0.240145006
0.01637585	0.094673362	0.240982958
0.0180736	0.09499835	0.242019783
0.01994737	0.095424523	0.243286745
0.02201539	0.095792722	0.244943137
0.02429781	0.09640236	0.24697226
0.02681686	0.097189709	0.24980754
0.02959707	0.098223166	0.253468516
0.03266552	0.099590839	0.258209081
0.03605208	0.101783256	0.265616495
0.03978974	0.106479931	0.275170509
0.0439149	0.110582439	0.284537717
0.04846773	0.120043218	0.304465344
0.05349257	0.121253956	0.322689812
0.05903836	0.139924025	0.3535415
0.0651591	0.160264511	0.411977187
0.0719144	0.170758663	0.451190149
0.07937005	0.187010326	0.508741562
0.08759866	0.205576682	0.565899419
0.09668036	0.218167538	0.599404083
0.10670359	0.216349884	0.617378385
0.11776598	0.204917948	0.709733315
0.12997524	0.233734396	0.625294969
0.14345029	0.234475883	0.646108758
0.15832235	0.231819736	0.657168577
0.17473625	0.238162941	0.65416028
0.19285185	0.232229962	0.594515978
0.21284556	0.217754106	0.532676534
0.23491211	0.1996985	0.515078403
0.25926637	0.182261467	0.468659173
0.28614554	0.151099156	0.423204495
0.31581138	0.132634756	0.372361668
0.3485528	0.119071709	0.35030637

0.38468865	0.111168	0.319482917
0.42457084	0.108215184	0.285024394
0.46858778	0.098036126	0.256027291
0.51716812	0.081268495	0.203845061
0.57078499	0.07435417	0.182324001
0.62996052	0.067308125	0.179662234
0.69527102	0.054064972	0.181339913
0.76735252	0.048327925	0.171175881
0.84690699	0.043793199	0.146165576
0.93470919	0.041388354	0.125809485
1.03161418	0.037946128	0.109704759
1.13856571	0.031731768	0.091428913
1.25660531	0.026818499	0.077344815
1.38688256	0.024912933	0.067744756
1.53066616	0.022278062	0.059390025
1.68935637	0.02323954	0.058115857
1.86449862	0.022215858	0.05387113
2.05779857	0.017899533	0.043971094
2.27113868	0.015210362	0.037610232
2.50659661	0.012982172	0.032720921
2.76646539	0.010797876	0.028109659
3.0532758	0.009955857	0.023720759
3.36982098	0.01038519	0.020624862
3.71918364	0.008626517	0.015183582
4.10476612	0.007223921	0.012777284
4.53032345	0.004691661	0.008065154
5	0.003357616	0.006255876

ALLEGATO 7

**TABELLA SPETTRI DI RISPOSTA MEDI IN “g”:
 SLO, SLD, SLV e SLC – verifiche scalmatore**

Periodo (s)	Spettro medio SLO	Spettro medio SLD	Spettro medio SLV	Spettro medio SLC
0.01	0.114168406	0.140565896	0.307906108	0.33081864
0.01103674	0.114418654	0.140882299	0.308568845	0.331462927
0.01218096	0.11474474	0.141278475	0.309387932	0.332259785
0.01344381	0.115282121	0.141944162	0.310406195	0.33325252
0.01483758	0.115981244	0.142831626	0.31167621	0.334481887
0.01637585	0.116933194	0.144032023	0.313274667	0.335952416
0.0180736	0.118332367	0.145796749	0.315341451	0.337833847
0.01994737	0.121286486	0.149510053	0.317921788	0.34019787
0.02201539	0.12506811	0.154111372	0.321315374	0.343594038
0.02429781	0.129821767	0.160042138	0.325935886	0.347697451
0.02681686	0.129610337	0.159790391	0.332895253	0.353039823
0.02959707	0.130355458	0.161092212	0.34302488	0.360361421
0.03266552	0.139135619	0.172669539	0.359883398	0.371446079
0.03605208	0.151947042	0.191003109	0.399622188	0.391882652
0.03978974	0.166527434	0.226458866	0.458299037	0.456675116
0.0439149	0.191730869	0.263728692	0.537908233	0.540073978
0.04846773	0.195356082	0.270708864	0.538297965	0.591510307
0.05349257	0.19329259	0.286336429	0.529872586	0.655512835
0.05903836	0.188317741	0.292691361	0.539511823	0.72995738
0.0651591	0.19733459	0.29026156	0.598315591	0.735803822
0.0719144	0.214247552	0.306555516	0.611785361	0.776817238
0.07937005	0.220451969	0.329390014	0.672471054	0.878307242
0.08759866	0.25260633	0.361226085	0.696812152	0.911129096
0.09668036	0.282636063	0.398893265	0.681050294	0.966050265
0.10670359	0.311024716	0.413361362	0.661034256	0.873291728
0.11776598	0.301455119	0.447866951	0.710743084	0.852909962
0.12997524	0.259566026	0.358053411	0.763339293	0.822121831
0.14345029	0.259141447	0.328043125	0.809802922	0.819846882
0.15832235	0.262510701	0.309626442	0.904664075	0.791230938
0.17473625	0.255255365	0.340883252	0.750747502	0.730363183
0.19285185	0.265722083	0.329518866	0.687201842	0.690816488
0.21284556	0.265017916	0.303580341	0.688060339	0.781967474
0.23491211	0.276292606	0.311072325	0.763862923	0.808757045
0.25926637	0.262832397	0.28121745	0.69688787	0.72414643
0.28614554	0.226630876	0.28309547	0.643792793	0.68529576
0.31581138	0.240178065	0.262423741	0.705536528	0.710672809
0.3485528	0.20761008	0.236515187	0.591916396	0.624594057

Interventi per l'incremento della sicurezza della diga di Giudea a Gello nel Comune di Pistoia (PT) – Progetto definitivo
 Relazione sismotettonica, modellazione sismica e analisi di risposta sismica locale

0.38468865	0.186335307	0.238133877	0.569938024	0.610256846
0.42457084	0.163519996	0.20618082	0.537148788	0.546567648
0.46858778	0.148997073	0.177708832	0.456499252	0.451626298
0.51716812	0.146369758	0.166398799	0.397515595	0.423016834
0.57078499	0.141217042	0.143853862	0.370048826	0.376494196
0.62996052	0.120470671	0.133205426	0.308132202	0.33599721
0.69527102	0.089769339	0.136432165	0.282219828	0.346142923
0.76735252	0.089814976	0.122717802	0.254674023	0.312635454
0.84690699	0.076491317	0.104248471	0.242815545	0.294791403
0.93470919	0.068879534	0.094800502	0.205252788	0.236828235
1.03161418	0.06017908	0.081268447	0.189193227	0.212668987
1.13856571	0.055143387	0.067105608	0.18788583	0.204871155
1.25660531	0.048583563	0.060852109	0.170272588	0.203487359
1.38688256	0.041376048	0.054020053	0.146859907	0.195201393
1.53066616	0.037936919	0.04850117	0.139208859	0.182796377
1.68935637	0.035349493	0.046088875	0.132208821	0.17252762
1.86449862	0.033859089	0.043996008	0.123605759	0.151566612
2.05779857	0.032884502	0.039960847	0.112207302	0.127201597
2.27113868	0.026897815	0.033084486	0.09934535	0.10390842
2.50659661	0.02167598	0.028129662	0.08489777	0.087840141
2.76646539	0.017424927	0.024358295	0.071742587	0.076241247
3.0532758	0.014087043	0.019313921	0.05741044	0.060718779
3.36982098	0.012620636	0.016948299	0.044935926	0.046426364
3.71918364	0.009440084	0.012450362	0.038136168	0.038445846
4.10476612	0.007498962	0.010319847	0.0311828	0.032415211
4.53032345	0.004951721	0.006497613	0.020664626	0.022632739
5	0.003542926	0.004780106	0.01383046	0.015166759

ALLEGATO 8

**TABELLA SPETTRI DI RISPOSTA MEDI IN “g”:
 SLD e SLV – scavi provvisionali scolmatore**

Periodo (s)	Spettro medio SLD	Spettro medio SLV
0.01	0.062908428	0.157951676
0.01103674	0.062968629	0.158137289
0.01218096	0.063042086	0.158367364
0.01344381	0.063135653	0.158641051
0.01483758	0.063251716	0.158964836
0.01637585	0.063383866	0.159392068
0.0180736	0.063607805	0.160041886
0.01994737	0.06398871	0.160895069
0.02201539	0.064284233	0.161962502
0.02429781	0.064741402	0.163412994
0.02681686	0.065393875	0.165242454
0.02959707	0.066367732	0.168151419
0.03266552	0.067954839	0.173369388
0.03605208	0.071609645	0.184196948
0.03978974	0.080311027	0.207790926
0.0439149	0.085256222	0.220763347
0.04846773	0.095411378	0.228315608
0.05349257	0.093502812	0.238319467
0.05903836	0.099570288	0.250736074
0.0651591	0.101121794	0.262191189
0.0719144	0.106364684	0.283230261
0.07937005	0.113903525	0.319338163
0.08759866	0.125976347	0.342889091
0.09668036	0.134023739	0.35315241
0.10670359	0.1295605	0.369099257
0.11776598	0.117184786	0.402695235
0.12997524	0.13415047	0.367409371
0.14345029	0.141851587	0.380668605
0.15832235	0.143020996	0.38917103
0.17473625	0.155793897	0.407466919
0.19285185	0.157781595	0.392631616
0.21284556	0.155809669	0.36796321
0.23491211	0.149313647	0.376011553
0.25926637	0.140393851	0.358402642
0.28614554	0.12189929	0.335376584
0.31581138	0.109985051	0.305185529
0.3485528	0.102453846	0.302304152

0.38468865	0.098264893	0.281741458
0.42457084	0.096985237	0.255840029
0.46858778	0.090116791	0.233259097
0.51716812	0.075867078	0.188387831
0.57078499	0.070339577	0.171790674
0.62996052	0.064014497	0.1691097
0.69527102	0.051516968	0.172696808
0.76735252	0.04645796	0.16487817
0.84690699	0.042188222	0.141349426
0.93470919	0.0402295	0.122044666
1.03161418	0.037331926	0.107363695
1.13856571	0.031059869	0.089442133
1.25660531	0.02647141	0.0756952
1.38688256	0.024595668	0.066509292
1.53066616	0.022073176	0.058689499
1.68935637	0.023017489	0.057427483
1.86449862	0.022062293	0.0532349
2.05779857	0.017740076	0.043631819
2.27113868	0.015121599	0.037298644
2.50659661	0.012917431	0.032544908
2.76646539	0.010732512	0.027922435
3.0532758	0.009905765	0.02355434
3.36982098	0.010338804	0.020486687
3.71918364	0.00859531	0.015114267
4.10476612	0.007200144	0.01273046
4.53032345	0.004665603	0.008023613
5	0.003336709	0.006210988