

IMPIANTO DI RIGOSO – DIGA DI LAGO BALLANO E LAGO VERDE: SERVIZI DI PROGETTAZIONE



RECUPERO DELLA DIGA DI LAGO BALLANO PROGETTO DEFINITIVO



TITOLO

CODICE OPERASTUDIO SISMOTETTONICO EANALISI DI PERICOLOSITA' SISMICACODICE ELABORATOR005

REVISIONE	DATA	NOTE
2	19/05/2023	Seconda revisione in seguito all'Istruttoria della DGD del 15/09/2022





Contratto:	n° 1401366462
Oggetto:	IMPIANTO DI RIGOSO - DIGA DI LAGO BALLANO E LAGO VERDE: SERVIZI DI PROGETTAZIONE
Data contratto:	05 Giugno 2020
Durata:	36 mesi
Cliente:	Enel Green Power S.p.A.
Gestore del Contratto	Ing. Federica Cella
Gestione Tecnica	Ing. Luca Dal Canto
ATI:	STUDIO SPERI Società di ingegneria S.r.l. (Mandataria) Frosio Next S.r.l. (Mandante) Waterways S.r.l. (Consulente)
ATI PM:	Gianluca Gatto
ATI Staff	Federico Bisci, Gioele Filippi, Piero Civollani, Fabrizio Cassone, Simone Di Lorenzo, Alessandro Ferrera, Luciano Serra, Luigi Papetti, Matteo Rebuschi, Caterina Frosio

Storia del documento

Revisione	Data	Redatto	Verificato	Approvato	Note
0	27/11/2020	CIV, PAS	GGA	GLU	Prima emissione
1	28/04/2022	Piero Civollani Francesco Passaro Federico Bisci Gioele Filippi	Gianluca Gatto	Giorgio Lupoi	Revisione a seguito dei commenti ENEL
2	19/05/2023	Piero Civollani Francesco Passaro Federico Bisci Gioele Filippi	Gianluca Gatto	Giorgio Lupoi	Seconda revisione in seguito all'Istruttoria della DGD.

STUDIO SPERI Società di ingegneria S.r.I. e **Frosio Next S.r.I.** non si assumono alcuna responsabilità per l'utilizzo da parte di terzi di risultati o metodi presentati in questo rapporto.

Le Società sottolineano inoltre che varie sezioni di questo rapporto si basano su dati forniti da o provenienti da fonti di terze parti. **STUDIO SPERI Società di ingegneria S.r.I.** e **Frosio Next S.r.I.** non si assumono alcuna responsabilità per perdite o danni subiti dal cliente o da terzi a causa di errori o inesattezze in tali dati da terze parti





INDICE

1.	INTF	RODUZIONE	
2.	PER	COLOSITÀ SISMICA DI NORMATIVA7	
3.	STO	RIA DELLA SISMICITÀ DEL SITO E DELLA DIGA13	
4.	CAR	ATTERIZZAZIONE SISMOTETTONICA DELL'AREA17	
4	.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO STRUTTURALE	17
4	.2	QUADRO SISMOTETTONICO DELLE REGIONI DELLA GARFAGNANA E LUNIGIANA	19
4	.3	SORGENTI SISMOGENETICHE	24
5.	STU	DIO SISMOTETTONICO E ANALISI PROBABILISTICA DI PERICOLOSITA' SISMICA	
5	.1	Modello sismotettonico	32
	5.1.1	Introduzione	32
	5.1.2	Modello di zonazione	33
	5.1.3	Catalogo CPTI15	34
	5.1.4	Tassi per classi di magnitudo	36
	5.1.5	Distribuzione di Gutenberg-Richter	39
5	.2	ANALISI DI PERICOLOSITÀ SISMICA	42
	5.2.1	Leggi di attenuazione	42
	5.2.2	Curve di pericolosità	43
	5.2.3	Spettri a pericolosità uniforme	46
	5.2.4	Confronto con gli spettri di norma	51
6.	ANA	LISI DETERMINISTICA DI PERICOLOSITA' SISMICA	
6	.1	INTRODUZIONE	55
6	.2	DATABASE DI SORGENTI SISMOGENETICHE INDIVIDUALI DISS	55
6	.3	LEGGI DI ATTENUAZIONE	55
6	.4	RISULTATI DELL'ANALISI DETERMINISTICA DI PERICOLOSITÀ SISMICA	55
7.	CON	FRONTO DEI RISULTATI DELL'ANALISI DI PERICOLOSITÀ	
7	.1	DATI DEL CONFRONTO	57
7	.2	CONFRONTO PER STATO LIMITE DI DANNO	58
7	.3	CONFRONTO PER STATO LIMITE DI COLLASSO	60
8.	CON	CLUSIONI	
BIB	LIOGF	AFIA	









1. INTRODUZIONE

Il presente rapporto riporta i risultati dello **studio sismotettonico** e dell'**analisi di pericolosità sismica** per il progetto definitivo di miglioramento sismico e di recupero della diga di Lago Ballano (PR).

Questa versione del rapporto risulta essere la prima revisione del documento originario, effettuata in seguito all'Istruttoria della Direzione Generale Dighe (DGD) del 15/09/2022. Per semplicità di trattazione, le parti modificate rispetto alla prima emissione, sono riportate evidenziate in ciano.

L'impianto di ritenuta è situato in corrispondenza del Rio della Barca, nel Comune di Monchio delle Corti (PR). Il serbatoio ha lo scopo di regolare le portate del Torrente Rio della Barca per la produzione di energia elettrica della centrale di Rigoso.

Lo sbarramento, costruito nel 1907-1908, attualmente è costituito da una diga a gravità con un'altezza di 20.00 m e volume di invaso di 1.27 Mm³. Tali caratteristiche inquadrano la diga nella come "diga di competenza del Servizio Nazionale Dighe", ai sensi della normativa tecnica nazionale (MinLLPP95), e come "grande diga", conseguentemente l'opera ricade nella categoria delle "dighe di importanza strategica" (NTD14, Par. C.7.7.2). In seguito agli interventi previsti dal presente progetto definitivo, la diga risulterà avere un'altezza pari a 9,70 m e un volume d'invasi pari a 0,60 Mm³. Tali caratteristiche comporteranno il declassamento dell'opera a "diga di competenza regionale" (MinLLPP95) e a "diga di dimensioni contenute". Quanto previsto non modifica il comportamento strutturale dell'opera, che rimane quello di una diga a gravità. Pertanto, gli interventi in progetto non ricadono nell'obbligo normativo di eseguire l' adeguamento sismico (NTD14, Par. H.2.1).

Le coordinate geografiche della linea mediana del coronamento della Diga di Ballano in corrispondenza del punto centrale sono:

- LATITUDINE, **44,36950**°
- LONGITUDINE, **10,10204**°

L'opera di sbarramento in oggetto è ubicata in **zona sismica 2.**

Di seguito si riporta la vista aerea dell'opera di sbarramento unitamente ad alcune fotografie del corpo diga (Figura 1.1, Figura 1.2 e Figura 1.3).







Figura 1.1 Vista aerea dell'opera di sbarramento







Figura 1.2. Foto del corpo diga: lato monte



Figura 1.3. Foto del corpo diga: lato valle

Il presente studio è stato redatto in accordo alle normative vigenti con particolare riferimento alle indicazioni delle "Linee guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe" redatto congiuntamente dall'INGV e MIT-DG DIGHE nel 2017.

Sono stati assunti per lo studio i seguenti dati di input.

- Vita nominale (V_N): 50 anni (progetto di miglioramento);
- Coefficiente d'uso della costruzione (Cu): 2,0 (diga di importanza strategica in virtù dell'uso prevalentemente idroelettrico);





- Periodo di riferimento (V_R) = 100 anni;
- Periodo di ritorno allo SLD (T_R SLD) = 100 anni;
- Periodo di ritorno allo SLC (T_R SLC) = 1'946 anni.

La relazione, nei primi capitoli, descrive la pericolosità sismica prevista dalla normativa tecnica (capitolo 2) e presenta la storia della sismicità dell'area (capitolo 3) con particolare riferimento al comportamento dello sbarramento in occasione dei passati terremoti.

Nel capitolo 4 si presentano i risultati dello studio di inquadramento sismotettonico partendo da un'analisi della macroarea in cui è inserito lo sbarramento sino all'individuazione delle sorgenti sismogenetiche più prossime all'impianto.

Nel capitolo 5 si presentano il modello sismotettonico adottato e i risultati delle analisi di pericolosità sismica effettuate con approccio probabilistico.

Nel capitolo 6 si presentano i risultati dell'analisi deterministica di pericolosità sismica effettuata sulla sorgente sismogenetica più significativa risultante dall'inquadramento sismotettonico.

Nel capitolo 7 si riporta un confronto dei risultati delle analisi di pericolosità svolte con approccio probabilistico e presenta la scelta degli spettri di riferimento adottati per i differenti Stati Limite.





2. PERICOLOSITÀ SISMICA DI NORMATIVA

La nuova classificazione sismica della Regione Emilia-Romagna, adottata con DGR 1164 del 23/07/2018, in accordo con la classificazione nazionale, inserisce il comune di Monchio delle Corti, in cui ricade la diga in esame, nella **zona sismica 2**.

Dalle Mappe Interattive di Pericolosità Sismica dell'INGV l'accelerazione orizzontale massima al sito per un periodo di ritorno pari a 475 anni è variabile tra **0,200 g e 0,225 g**, come riportato in Figura 2.1.



Figura 2.1. Zonazione sismica dell'Emilia-Romagna secondo la DGR 1164 del 23/07/2018; nel riquadro rosso è riportata l'ubicazione del Comune di Monchio delle Corti (a sinistra). Mappa Interattiva di Pericolosità Sismica dell'INGV con valori di accelerazione prevista per un tempo di ritorno di 475 anni su scala locale (a destra); il puntatore indica la posizione della diga di Lago Ballano

In Figura 2.2 sono riportate le accelerazioni orizzontali di base in funzione delle frequenze annuali di superamento.

In Figura 2.3 è riportata la disaggregazione dell'accelerazione orizzontale di base in funzione della distanza e della magnitudo di un sisma con probabilità d'eccedenza del 10% in 50 anni.

In Figura 2.4 sono riportati gli spettri di risposta a pericolosità uniforme dell'accelerazione orizzontale per diversi valori di probabilità di eccedenza in 50 anni.

Istitu Valori di a(g 8	to Nazionale di Geofisica e Vulcanologia () per diverse frequenze annuali di supera dinate del punto lat: 44.3873, lon: 10.1328, ID: 17157)	ento	Frequenza annuale	(Coordinate del punt	a(g) to lat: 44.3873, lon: 1	LO.1328, ID: 17157)
0,1	◆ 16° pero ◆ 50° pero	ntile	ui superamento	16º percentile	50° percentile	84º percentile
3	• 84° perc	ntile	0.0004	0.2810	0.3414	0.3915
100			0.0010	0.2171	0.2576	0.2919
i supe			0.0021	0.1751	0.2013	0.2280
uale d			0.0050	0.1318	0.1481	0.1631
oto			0.0071	0.1155	0.1272	0.1408
o'o			0.0099	0.1016	0.1098	0.1217
Ë :			0.0139	0.0886	0.0949	0.1027
			0.0200	0.0714	0.0801	0.0878
0,0100	0,1000	1,0000	0.0333	0.0498	0.0625	0.0690







																			Disa	ggregazi	one del (Coordi	valore d nate del p	i a(g) co ounto lat:	n probat 44.3873,	o ilita' di e lon: 10.1	ccedenz	za del 10 17157)	1% in 50	anni
			Istitu	Jt.o N	əzic	onale	e di	Geo	fis	ica	e١	ulc	anol	ogi	а			Distanza in km					N	lagnitud	0				
D	isag	greg	azione	e del	val	lore	di	a(g)	co	n p	oba	bil	ita'	di	ecc	eder	nza		3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0
			(Coc	ordinate	de1	punto	10% lat:	44.387	50 3. 1	ann. on: 10	.1328). ID	17157	0				0-10	0.000	15.600	31.300	19.400	10.000	4.320	0.479	0.000	0.000	0.000	0.000
	۲								T									10-20	0.000	0.870	3.850	4.960	4.110	2.400	0.356	0.000	0.000	0.000	0.000
	£	+	_		_	-	+		+	-	_	-		+				20-30	0.000	0.000	0.029	0.444	0.811	0.658	0.124	0.000	0.000	0.000	0.000
	<u>.</u> –		_				-		+-	-		-	_	+				30-40	0.000	0.000	0.000	0.005	0.084	0.126	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000
	2 F		_				_		+	_		_	_	+				40-50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.022	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000
	•						_		_			_	_	_				50-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
월	ΩĒ.													_				60-70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
gnit	°.																	70-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Hai	9																	80-90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	o o																	90-100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0 0																	100-110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	4																	110-120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	4								1					+				120-130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		20		10	60	80	5	100	1	120	14	.0	160		180	20	0	130-140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	÷.					-	dist	anza	(kn)									140-150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
																		150-160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0	1 2	345	7	9	11	15	2	0	25		30		40		559	%	160-170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	r t																	170-180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		-																180-190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
			0	Contril	outo	perc	entu	iale a	lla p	peric	olos	ita'						190-200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Figura 2.3. Grafico e tabella della disaggregazione dell'accelerazione orizzontale di base in funzione della distanza e della magnitudo di un sisma con probabilità di superamento del 10% in 50 anni per la diga di Lago Ballano



Figura 2.4. Grafico e tabella degli spettri di risposta a pericolosità uniforme dell'accelerazione orizzontale per diversi valori di probabilità di eccedenza in 50 anni per la diga di Lago Ballano





Nel caso in esame, come riportato in introduzione, si considera una vita nominale pari a 50 anni e un coefficiente d'uso pari a 2,0 (dia di importanza normale) e gli stati limite di interesse sono lo stato limite di danno, SLD, cui corrisponde un periodo di ritorno di 100 anni e lo stato limite di collasso, SLC, cui corrisponde un periodo di ritorno di 1946 anni.

A scopo di completezza vengono presentati i risultati relativi a periodi di ritorno di 50 anni, 101 anni, 201 anni, 475 anni, 975 anni, 1950 anni e 2475 anni.

Per la definizione della pericolosità sismica per il sito specifico si è operato per interpolazione sui dati disponibili, prendendo in considerazione la componente orizzontale del moto sismico per i periodi di ritorno richiesti.

Tabella 2.1. Valori delle accelerazioni spettrali con componente orizzontale del moto sismico per il sito e per i periodi di ritorno di 50, 101, 201, 475, 975, 1950 e 2475 anni

T _R [anni]	50	101	201	475	975	1950	2475
Pr [%]	64%	39%	22%	10%	5%	3%	2%
PGA [g]	0,081	0,111	0,149	0,203	0,261	0,322	0,346

I risultati (periodo di ritorno pari a 50 anni, 101 anni, 201 anni, 475 anni, 975 anni, 1950 anni, 2475 anni), riportati in Figura 2.5 e in Tabella 2.2, sono:



Figura 2.5. Pericolosità sismica secondo la normativa vigente NTC 2018 con componente orizzontale del moto sismico per periodi di ritorno pari a 50, 101, 201, 475, 975, 1950 e 2475 anni





	Tr = 50 anni	Tr = 101 anni	Tr = 201 anni	Tr = 475 anni	Tr = 975 anni	Tr = 1950 anni	Tr = 2475 anni
T	Sa	Sa	Sa	Sa	Sa	Sa	Sa
(s)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
0.000	0.081	0.111	0.149	0.203	0.260	0.321	0.345
0.084	0.198	0.268	0.355	0.485	0.623	0.770	0.828
0.252	0.198	0.268	0.355	0.485	0.623	0.770	0.828
0.331	0.150	0.203	0.266	0.357	0.448	0.551	0.591
0.411	0.121	0.163	0.213	0.283	0.350	0.429	0.460
0.490	0.101	0.136	0.178	0.234	0.287	0.351	0.376
0.570	0.087	0.117	0.152	0.199	0.243	0.298	0.318
0.649	0.077	0.103	0.133	0.174	0.211	0.258	0.276
0.729	0.068	0.091	0.118	0.154	0.186	0.228	0.244
0.809	0.062	0.082	0.107	0.138	0.167	0.204	0.218
0.888	0.056	0.075	0.097	0.125	0.151	0.184	0.197
0.968	0.051	0.069	0.089	0.115	0.138	0.168	0.180
1.047	0.048	0.063	0.082	0.106	0.127	0.155	0.166
1.127	0.044	0.059	0.076	0.098	0.118	0.144	0.153
1.206	0.041	0.055	0.071	0.092	0.110	0.134	0.143
1.286	0.039	0.052	0.067	0.086	0.103	0.125	0.134
1.366	0.036	0.049	0.063	0.081	0.096	0.117	0.125
1.445	0.034	0.046	0.059	0.076	0.091	0.111	0.118
1.525	0.033	0.044	0.056	0.072	0.086	0.105	0.112
1.604	0.031	0.041	0.053	0.068	0.082	0.099	0.106
1.684	0.030	0.039	0.051	0.065	0.078	0.095	0.101
1.763	0.028	0.038	0.048	0.062	0.074	0.090	0.096
1.843	0.027	0.036	0.046	0.059	0.071	0.086	0.092
1.923	0.026	0.035	0.044	0.057	0.068	0.083	0.088
2.022	0.023	0.032	0.041	0.053	0.064	0.080	0.085
2.120	0.021	0.029	0.038	0.050	0.062	0.077	0.083
2.219	0.019	0.027	0.036	0.048	0.059	0.074	0.080
2.318	0.018	0.025	0.033	0.045	0.056	0.072	0.078
2.417	0.016	0.023	0.031	0.043	0.054	0.069	0.075
2.516	0.015	0.021	0.029	0.041	0.052	0.067	0.073
2.615	0.014	0.020	0.027	0.041	0.052	0.065	0.071
2.714	0.013	0.019	0.026	0.041	0.052	0.064	0.069
2.813	0.012	0.017	0.024	0.041	0.052	0.064	0.069
2.912	0.011	0.016	0.023	0.041	0.052	0.064	0.069
3.011	0.011	0.015	0.022	0.041	0.052	0.064	0.069
3.110	0.010	0.014	0.021	0.041	0.052	0.064	0.069
3.209	0.009	0.014	0.020	0.041	0.052	0.064	0.069
3.308	0.009	0.013	0.019	0.041	0.052	0.064	0.069
3.406	0.008	0.012	0.018	0.041	0.052	0.064	0.069
3.505	0.008	0.012	0.017	0.041	0.052	0.064	0.069
3.604	0.007	0.011	0.016	0.041	0.052	0.064	0.069
3.703	0.007	0.010	0.015	0.041	0.052	0.064	0.069
3.802	0.007	0.010	0.015	0.041	0.052	0.064	0.069
3.901	0.006	0.009	0.014	0.041	0.052	0.064	0.069
4.000	0.006	0.009	0.013	0.041	0.052	0.064	0.069

Tabella 2.2. Valori delle accelerazioni spettrali con componente orizzontale del moto sismico per il sito e per i periodi di ritorno di interesse

Infine, si riportano i valori delle accelerazioni spettrali con componente verticale del moto sismico, calcolata in modo analogo alla componente orizzontale.





Tabella 2.3. Valori delle accelerazioni spettrali con componente verticale del moto sismico per il sito e per i periodi di ritorno di 50, 101, 201, 475, 975, 1950 e 2475 anni

T _R [anni]	50	101	201	475	975	1950	2475
Pr [%]	64%	39%	22%	10%	5%	3%	2%
PGA [g]	0,031	0,050	0,078	0,124	0,180	0,246	0,274
Tr = 50 and	ni —	-Tr = 101 ann	i —	-Tr = 201 ar	ini –	—Tr = 475 c	anni
Ir = 975 dr	10	- ir = 1950 dhi	ni —	-1r = 24/5 d	nni		
0.80							
(5) 0.60 g 0.40							
0.20							
0.00 0.	20 0.40	0.60 0.8	30 1.00 T (s)	1.20	1.40 1.6	0 1.80	2.00

Figura 2.6. Pericolosità sismica secondo la normativa vigente NTC 2018 con componente verticale del moto sismico per periodi di ritorno pari a 50, 101, 201, 475, 975, 1950 e 2475 anni





	Tr = 50 anni	Tr = 101 anni	Tr = 201 anni	Tr = 475 anni	Tr = 975 anni	Tr = 1950 anni	Tr = 2475 anni
Т	Sa	Sa	Sa	Sa	Sa	Sa	Sa
(s)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
0.000	0.031	0.050	0.077	0.123	0.179	0.245	0.273
0.084	0.076	0.121	0.185	0.295	0.429	0.588	0.656
0.252	0.076	0.121	0.185	0.295	0.429	0.588	0.656
0.331	0.048	0.077	0.118	0.188	0.274	0.376	0.419
0.411	0.036	0.057	0.087	0.138	0.201	0.276	0.308
0.490	0.028	0.045	0.069	0.109	0.159	0.218	0.243
0.570	0.023	0.037	0.057	0.090	0.131	0.180	0.201
0.649	0.020	0.031	0.048	0.077	0.112	0.153	0.171
0.729	0.017	0.027	0.042	0.067	0.097	0.134	0.149
0.809	0.015	0.024	0.037	0.059	0.086	0.118	0.132
0.888	0.014	0.022	0.033	0.053	0.077	0.106	0.119
0.968	0.012	0.020	0.030	0.048	0.070	0.096	0.108
1.047	0.011	0.018	0.028	0.044	0.064	0.088	0.098
1.127	0.010	0.015	0.023	0.037	0.054	0.074	0.082
1.206	0.008	0.013	0.020	0.031	0.046	0.063	0.070
1.286	0.007	0.011	0.017	0.027	0.039	0.054	0.060
1.366	0.006	0.010	0.015	0.023	0.034	0.047	0.052
1.445	0.005	0.008	0.013	0.020	0.030	0.041	0.046
1.525	0.005	0.007	0.011	0.018	0.026	0.036	0.040
1.604	0.004	0.007	0.010	0.016	0.023	0.032	0.036
1.684	0.004	0.006	0.009	0.014	0.021	0.029	0.032
1.763	0.003	0.005	0.008	0.013	0.019	0.026	0.029
1.843	0.003	0.005	0.007	0.012	0.017	0.024	0.026
1.923	0.003	0.004	0.007	0.011	0.016	0.021	0.024
2.022	0.003	0.004	0.006	0.010	0.014	0.020	0.022
2.120	0.002	0.004	0.006	0.009	0.013	0.018	0.020
2.219	0.002	0.003	0.005	0.008	0.012	0.017	0.018
2.318	0.002	0.003	0.005	0.008	0.011	0.015	0.017
2.417	0.002	0.003	0.004	0.007	0.010	0.014	0.016
2.516	0.002	0.003	0.004	0.007	0.010	0.013	0.015
2.615	0.002	0.003	0.004	0.006	0.009	0.012	0.014
2.714	0.001	0.002	0.004	0.006	0.008	0.011	0.013
2.813	0.001	0.002	0.003	0.005	0.008	0.011	0.012
2.912	0.001	0.002	0.003	0.005	0.007	0.010	0.011
3.011	0.001	0.002	0.003	0.005	0.007	0.009	0.010
3.110	0.001	0.002	0.003	0.004	0.006	0.009	0.010
3.209	0.001	0.002	0.003	0.004	0.006	0.008	0.009
3.308	0.001	0.002	0.002	0.004	0.006	0.008	0.009
3.406	0.001	0.002	0.002	0.004	0.005	0.007	0.008
3.505	0.001	0.001	0.002	0.004	0.005	0.007	0.008
3.604	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.007	0.007
3.703	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.006	0.007
3.802	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.006	0.007
3.901	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.006	0.006
4.000	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.006	0.006

Tabella 2.4. Valori delle accelerazioni spettrali con componente verticale del moto sismico per il sito e per i periodi di ritorno di interesse





3. STORIA DELLA SISMICITÀ DEL SITO E DELLA DIGA

In questo capitolo è presentata una analisi storica degli eventi sismici occorsi nell'area del sito basata sui dati contenuti nell'ultimo Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15, Rovida et al 2016).

In Figura 3.1 e Figura 3.2 sono rappresentati tutti gli eventi del Catalogo con Magnitudo Momento (M_w) pari o superiore a 4 e con epicentro entro 100 km dal sito.

Dalle figure emerge che il sito è interessato da una **sismicità elevata e diffusa** con eventi di magnitudo elevata (maggiore di 5) a distanze ravvicinate (inferiori a 25 km).

Per ogni evento sismico è stata, quindi, stimata l'accelerazione al sito per mezzo della legge di attenuazione di Sabetta & Pugliese (1996).

Nella Tabella 3.1 e nella Figura 3.3 sono riportati i soli eventi cosiddetti significativi cioè quelli che hanno generato un'accelerazione orizzontale di base (stimata) maggiore di 0,05 g.

Dall'analisi degli eventi significativi emerge che:

- l'intervallo temporale tra due eventi significativi si riduce con il progredire degli anni per via della maggior completezza del catalogo, sino ad arrivare ad intervalli dell'ordine di una decina di anni;
- l'evento più significativo che ha interessato la diga è il terremoto della Garfagnana del 1920 con magnitudo 6,53 e distanza pari a 24,9 km, massima intensità macrosismica (lo) 10 MCS ed accelerazione stimata pari a 0,13 g.
- Questo evento presenta una accelerazione equivalente a quella della normativa NTC 2018 per un periodo di ritorno pari a 140 anni.







Figura 3.1. Distribuzione dei sismi con Mw≥4 in funzione della distanza epicentrale (minore di 100 km)



Figura 3.2. Mappa della distribuzione dei sismi tratti dal CPTI15 classificati in funzione della distanza dalla diga e della magnitudo







Figura 3.3. Eventi significativi che hanno interessato il sito con un valore di PGA almeno superiore a 0,05 g Distribuzione della magnitudo in funzione dell'anno (in alto) e della distanza (al centro); intensità dell'azione sismica al sito in funzione dell'anno (in basso)





N	Year	EpicentralArea	MainRef	Lat	Lon	Depth (km)	lo (MCS)	Mw	ErMw	Distance (km)	a (g)
1	1481	Lunigiana	CFTI4med	44.274	10.130		8	5.60	0.41	10.86	0.1289
2	1545	Val di Taro	CFTI4med	44.473	9.825		7-8	5.38	0.42	24.83	0.0506
3	1790	Lunigiana	MOLAL008	44.354	9.909		7	5.10	0.46	15.44	0.0625
4	1834	Val di Taro-Lunigiana	CFTI4med	44.432	9.859		9	5.96	0.11	20.52	0.0986
5	1837	Lunigiana	CFTI4med	44.175	10.182		9	5.94	0.14	22.56	0.0886
6	1878	Lunigiana	ENEL988	44.218	10.037		6-7	4.98	0.40	17.63	0.0501
7	1893	Appennino parmense	CAMAL011b	44.376	10.130		4-5	4.04	0.20	2.34	0.0758
8	1903	Lunigiana	ENEL988	44.329	9.953		7-8	5.19	0.12	12.68	0.0803
9	1920	Garfagnana	POST985	44.250	10.283		6	5.61	0.14	19.61	0.0768
10	1920	Garfagnana	CFTI4med	44.185	10.278		10	6.53	0.08	24.86	0.1322
11	1920	Garfagnana	POST985	44.250	10.283		6	5.18	0.16	19.61	0.0536
12	1986	Lunigiana	CSTI1.1	44.277	10.125	5.0	5	4.46	0.10	10.46	0.0513
13	1995	Lunigiana	CSTI1.1	44.366	10.006	13.0	5	4.20	0.11	7.64	0.0524
14	2012	Appennino parmense	BSINGV	44.523	10.009	72.4		5.05	0.07	18.59	0.0505

Tabella 3.1. Elenco dei terremoti che hanno prodotto un'accelerazione al sito d'interesse significativa

L'evento più significativo, tra quelli riportati nel catalogo CPTI15 che hanno interessato l'impianto (evidenziati in giallo in Tabella 3.1), è quello della Garfagnana del 1920 (magnitudo di 6,53 e distanza di 24,9 km), con accelerazione stimata pari a 0,13 g. Tale accelerazione, con riferimento alla classificazione normativa, corrisponde ad un evento con periodo di ritorno di circa 140 anni.





4. CARATTERIZZAZIONE SISMOTETTONICA DELL'AREA

4.1 Inquadramento geologico strutturale

Dal punto di vista geologico, il sito di Lago Ballano è ubicato nel settore nord-occidentale dell'Appennino settentrionale e, in particolare, a nord-est della Lunigiana, nel versante nordorientale della dorsale appenninica, in posizione molto prossima dello spartiacque regionale.

L'Appennino settentrionale è parte di una catena a thrust e pieghe, originatasi durante il Terziario per l'accavallamento di unità riferibili al dominio interno ligure (unità Liguride e sub-liguride), di origine oceanica, sui domini esterni toscani (Falda Toscana) ed umbro-marchigiani (Carmignani e Kligfield, 1990; Carmignani et al., 2006; Figura 4.1).

Nel settore ad ovest dell'attuale spartiacque appenninico, i processi estensionali hanno causato la creazione di bacini intramontani (Martini e Sagri, 1993; Argnani et al., 2003), la cui iniziale formazione è messa in relazione all'attività di faglie estensionali a basso angolo immergenti verso NE e verso SW (Carmignani e Kligfield, 1990; Barchi et al., 1998; Argnani et al., 2003). Tra i bacini estensionali, quelli situati più ad ovest si sono individuati fino dal tardo Miocene e sono caratterizzati da un riempimento continentale che evolve verso facies marine (Miocene finale-Pliocene), mentre i bacini più orientali (includenti quelli della Lunigiana) si sono formati nel Plio-Quaternario e sono stati sede di sedimentazione di successioni continentali fluviali e lacustri (Bernini e Papani, 2002; Martini e Sagri, 1993). I depositi marino-continentali pliocenici ospitati nei graben sono stati, quindi, incisi dalla rete idrografica, che si è approfondita in risposta al sollevamento quaternario dell'orogene (Bartolini et al., 1982).

La diga di Lago Ballano e il lago omonimo sono ubicati nella dorsale di M. Orsaro-M. Acuto che, come alto morfostrutturale, borda verso NE il graben della Lunigiana. La dorsale è costituita, nella parte assiale, dalla successione riferita in letteratura all'unità tettonica della Falda Toscana (ad es. Carmignani e Kligfield, 1990; Bernini e Papani, 2002; Carmignani et al., 2006; Bonini e Pertusati, 2011; ISPRA, 2016; Molli et al., 2018), rappresentata dai terreni della Formazione del Macigno (ISPRA, 2016).







Figura 4.1 Schema tettonico dell'Appennino settentrionale. Da Martelli et al. (2017). Il simbolo giallo indica l'ubicazione dello sbarramento, a nord-est della Lunigiana





4.2 Quadro sismotettonico delle regioni della Garfagnana e Lunigiana

L'area della Lunigiana corrisponde ad una delle regioni più attive sismicamente dell'Appennino settentrionale. Essa ricade nell'area epicentrale di numerosi terremoti storici di intensità da moderata a forte (Rovida et al., 2019; <u>https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/</u>; Figura 4.2)), tra i quali i più intensi sono avvenuti nel 1481 (Mw = 5.6), 1834 (Mw = 5.96), 1837 (Mw = 5.94), e nel 1920.

In particolare, la sequenza sismica del 1920 è stata caratterizzata da due eventi con magnitudo da moderata a forte, avvenuti rispettivamente il 6 settembre (Mw = 5,61) e il 7 settembre (Mw = 6,53).



Figura 4.2 Sismicità storica della Lunigiana, da CPTI15-DBMI15 (<u>https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-</u> <u>DBMI15/</u>), con indicazione dei principali terremoti storici. Il simbolo giallo indica l'ubicazione della diga di Lago Ballano (da CPTI15-DBMI15; <u>https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/</u>)





Nelle seguenti immagini (da Figura 4.3 a Figura 4.7) sono riportate le intensità macrosismiche per i principali eventi sismici che hanno interessato l'area di Lago Ballano, derivate dal Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2015 (Rovida et al., 2019) e dalla letteratura scientifica. In particolare, sono riportati gli eventi del 1481, nel 1834, nel 1837 e nel 1920. Come si può notare, le intensità macrosismiche registrate in aree prossime al sito di Lago Ballano hanno raggiunto anche il IX grado della scala Mercalli-Cancani-Sieberg (terremoto del 1920, Mw 6,53).



Figura 4.3 Carta dell'intensità macrosismica associata al terremoto del 1481 (Mw = 5.6). Il sito di Lago Ballano è indicato dalla stella nera (da CPTI15-DBMI15; <u>https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/</u>)

homepage > consulta	azione per terremoto (CPTI	15) > cons	ultazione per	località (DBMI15
Terremoti in elenco: 36 (filtra	əti).			800
Anno Me Gi Ho Mi Se Ar	sa spicentrale		NNDF IS	Na Land
1481 05 07 14 15 Lu	nigiana		6.8	5.60
1527 10 04 Pi	atoia		1 7-8	5.33 - 9
1545 06 09 15 45 Va	l di Taro		5 7-8	5.38
1547 02 10 13 20 Re	griano		77	5.10
1600 10 28 Re	drip nell'Emilia		1 7-8	5.33
1740 03 06 05 40 Gm	rfagnana		32.8	5.64
1746 07 23 18 15 Ga	rfaqnana		10 7	5.15
1767 01 21 07 45 Lu	nigiana		10 7	5.27
1790 07 26 Lu	nigiana		3.7	5,10
1811 07 15 22 44 No	denese-Reggiano		19 6-7	5.13
1818 12 05 18 55 Pa	CTIGLER		26 7	5.24
1831 09 11 18 15 pi	anura emiliana		25 7-8	5.48
1832 03 13 03 30 Re	ggiano		57 7-8	5.51
1834 02 14 13 15 Ve	l di Tero-Lunigiana		112 9	5196
1834 07 04 00 45 Va	l di Tero-Lunigiana		24 6-7	5.08
Val di Taro-Lunigiana			1	C. F.
EqtD 18340214_1315_000				
24 14	t Lon to Mai E	- Maria	Instand	
roll Ld	Loss ID MW E		Turonu.	
X CPTI15 CFTI4med 44	.432 9.859 MM 9 5.96 ±	0,11 Mam		
Macro CFTI4med 44	.432 9.859 bx0 9 5.96 ±	0.11 bxn		
MDP set di CFT14med		(altre info	rmazioni sul t	terremotoj
NMDP 112 Imax 9 MCS				
PlaceID Localita	5= L	at Lon	Int	
17 42658 Cavezzana d'	Antena é	4.436 9.93	8 8	100
rT 35565 Pontolo	6	4.497 5.82	15 Đ	
17_42648 Cargalla Inf	ariors 4	4.423 8.91	3 8-9	200
17 71789 La Berra	55.4	4.423 5.88	1 B-9	
tT 42672 Argangin	4	4.391 9.90	12 8	
17_42627 Hassons		4.386 9.84	4 8	
17_35543 Borgo Val di	Taro é	4,488 9.76	5 B	
IT_42632 Bratto	4	4.453 5.84	18 B	
IT_42633 Casalina	4	4.418 9.95	17 B	
IT_42372 Filettiere	4	4.331 9.93	16 B	
17_42642 Grondola	4	4.415 5.85	3 B	
17_42645 Guinadi	6	4.425 9.83	15 B	
IT_42625 Navola	4	4.431 9.81	7 8	

Figura 4.4 Carta dell'intensità macrosismica associata al terremoto del 1834 (Mw = 5.96). Il sito di Lago Ballano è indicato dalla stella nera (da CPTI15-DBMI15; https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/)







Figura 4.5 Carta dell'intensità macrosismica associata al terremoto del 1837 (Mw = 5.94). Il sito di Lago Ballano è indicato dalla stella nera (da CPTI15-DBMI15; <u>https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/</u>)



Figura 4.6 Carta dell'intensità macrosismica associata al terremoto del 1920 (Mw = 6.53). Il sito di Lago Ballano è indicato dalla stella nera (da CPTI15-DBMI15; <u>https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/</u>)







Figura 4.7 Carta dell'intensità macrosismica associata al terremoto del 1920 (Mw = 6.53). Il sito di Lago Ballano è indicato dalla stella nera (da CPTI15-DBMI15; <u>https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/</u>)

Negli ultimi decenni, la regione in esame è stata interessata da sciami sismici e più terremoti di moderata energia quali quelli avvenuti nel 1995 (con M 4,9) e 2006 in Lunigiana, nel 2000 e gennaio 4.8) in Garfagnana, e quello del giugno 2013 (M 5,1) al confine 2013 (M Lunigiana-Garfagnana (Pezzo et al., 2014; Stramondo et al., 2014; Scafidi et al., 2015; ISIDe working group, 2016; Figura 4.8). Eva et al. (2014), dall'analisi della sismicità registrata nella zona occidentale dell'Appennino settentrionale nel periodo 1999–2011, evidenziano che essa interessa la Lunigiana e si concentra lungo la terminazione settentrionale della dorsale delle Apuane, mentre in Garfagnana si localizzano pochi eventi interposti tra i settori nord e sud della Valle del Serchio Scafidi et al. (2015), dall'analisi della sismicità della regione occidentale dell'Appennino settentrionale nel periodo 1982-2013 (Figura 4.9), evidenziano che i più forti terremoti (1995 e giugno 2013) degli ultimi decenni, come i principali terremoti storici, si localizzano al margine settentrionale delle Alpi Apuane; a sud di quel settore un'altra area sismica si individua nella zona di giunzione tra i sistemi di faglia della Garfagnana nord e sud, dove si sono localizzate le sequenze del 2000 e del gennaio 2013 (vedi anche ISIDe working group, 2016; Figura 4.8).

L'esame degli eventi sismici che hanno interessato la Lunigiana dal 1985 evidenzia una microsismicità nelle vicinanze del sito dello sbarramento di Lago Ballano, con magnitudo massima pari a 2,3 (Figura 4.9).







Figura 4.8 Sismicità nella Lunigiana dal 1° gennaio 1985 al 28 Marzo 2020. Da database ISIDe (ISIDe working group, 2016) - <u>http://cnt.rm.ingv.it/</u>. Il sito relativo allo sbarramento di Lago Ballano è mostrato nell'ellisse giallo



Figura 4.9 Ubicazione e date delle più significative sequenze sismiche (con più di 20 eventi in 24 ore) che hanno interessato l'Italia nordoccidentale tra il 1982 e il 2013. Le sequenze del 2000 e 2013 sono localizzate nel margine orientale della Valle del Serchio. Da Scafidi et al. (2015)





4.3 Sorgenti sismogenetiche

La sismicità delle regioni della Lunigiana e Garfagnana è attribuita da più autori al campo di stress estensionale con direzione di estensione NE-SW, riconosciuto attivo nella regione da dati sismologici, GPS e misure di stress in pozzi (ad es., Montone et al., 2004; Pondrelli et al., 2006; Chiarabba et al., 2005; Devoti et al., 2011). In particolare, i meccanismi focali indicano che la sismicità, come quella di tutta la fascia tirrenico-assiale della catena appenninica, è riferibile ad un regime prevalentemente estensionale, guidato da una estensione orientata in direzione NE-SW (Figura 4.10) e i dati GPS relativi all'intero Appennino settentrionale (Serpelloni et al., 2006; Devoti et al., 2011; Bennett et al., 2012; Cenni et al., 2012) indicano in generale movimenti orizzontali verso N-NE. In particolare, dai valori degli spostamenti orizzontali, Viti et al. (2015) distinguono, nell'intero Appennino settentrionale, tre fasce parallele all'asse della catena: la zona interna, con velocità minime (0,5÷2 mm/a) verso E÷ENE nella parte ligure e tra NW e NE nella parte tirrenica; la zona assiale, comprendente l'alto Appennino tosco-emiliano e tosco-romagnolo e i bacini intermontani toscani, con velocità di 1÷3 mm/a verso N÷NNE; la zona esterna, comprendente i fronti padani sepolti e il basso appennino emiliano-romagnolo, caratterizzata da velocità nell'ordine di 2÷6 mm/a verso NNE÷NE, con i valori maggiori nella parte centrale e in quella orientale.



Figura 4.10 Sismicità nel periodo 1976-2002 e meccanismi focali dei terremoti con M ≥ 4.5. Da Chiarabba et al. (2005)

Il regime estensionale guidato da estensione NE-SW è ritenuto responsabile dell'attivazione dei sistemi di faglie estensionali localizzati ai bordi del graben della Val di Magra e alla zona di faglia di direzione NE-SW (o E-W, per alcuni autori) che separa il graben della Lunigiana, a nord, da quello della Garfagnana, a sud (Barchi et al., 1998; Boncio et al., 2000; Eva et al., 2014; DISS Working Group, 2018).





I sistemi di faglie che bordano verso occidente i graben della Lunigiana e Garfagnana, sono interpretati come la terminazione occidentale di un sistema regionale di faglie a basso angolo con immersione verso NE (Etrurian Fault System in Boncio et al., 2000) che si estende lungo l'intero Appennino centro-settentrionale (Barchi et al., 1998; Boncio et al., 2000; Figura 4.11), considerato attivo e responsabile della sismicità storica e recente della regione (Boncio et al., 2000).



Figura 4.11 Assetto tettonico e sismicità dell'Appennino settentrionale e dei bacini toscani, con indicazione dell'Etrurian Fault System (EFS). Sono evidenziati gli epicentri dei terremoti del 1837 e 1920. Figure tratte da Boncio et al. (2000)

con tale interpretazione, i compilatori del In sostanziale accordo database DISS (http://diss.rm.ingv.it/dissnet/) attribuiscono la sismicità dell'area della Garfagnana e di quella della Lunigiana all'attività di due sistemi di faglie normali con direzione NW-SE e immersione verso NE, che danno luogo alle sorgenti sismogenetiche composite ITCS026 - Lunigiana (a nord) e ITCS083 -Garfagnana (a sud) (Figura 4.12). Le sorgenti individuali appartenenti alla ITCS026 – Lunigiana più prossime al sito dell'impianto sono le sorgenti ITIS067 – Aulla e ITIS085 – Pontremoli, di cui alla prima è associato il terremoto del 1481 e alla seconda quello del 1834 (vedi schede in Figura 4.13 e Figura 4.14); invece, la sorgente individuale appartenente alla ITCS083 - Garfagnana prossima al sito d'interesse è la ITIS050 - Garfagnana North, a cui è associato il terremoto del 1920 (vedi scheda in Figura 4.15).

La sorgente composita ITCS026 – Lunigiana è interpretata, sulla base dei risultati dello studio condotto dall'unità di ricerca coordinata dal Prof. Paolo Scandone nell'ambito dei Progetti INGV-DPC S2 (<u>report non reperito con il presente studio</u>), come una struttura estensionale immergente a basso angolo verso NE corrispondente alla master fault del graben della Lunigiana (le faglie immergenti verso SW sono interpretate come antitetiche) e classificata come "faglia con attività recente"; essa corrisponde al sistema di Mulazzo di Bernini e Papani (2002) (DISS Working Group, 2018; <u>http://diss.rm.ingv.it/diss.net/</u>).

La sorgente composita ITCS083 – Garfagnana è, analogamente, una struttura estensionale situata nel bordo sudoccidentale della Valle del Serchio, che immerge a basso angolo verso NE e





corrisponde alla master fault del graben della Garfagnana (DISS Working Group, 2018; <u>http://diss.rm.ingv.it/dissnet/</u>).



Figura 4.12 Strutture sismogenetiche nella regione d'interesse: in giallo la sorgente individuale ITIS085 – Pontremoli, in marrone la sorgente individuale ITIS067 – Aulla, appartenenti alla sorgente composita ITCS026 – Lunigiana; in viola la sorgente individuale ITIS050 – Garfagnana North, appartenente alla sorgente composita ITCS083 – Garfagnana. L'ubicazione del sito dello sbarramento di Lago Ballano è indicata dal simbolo giallo. Fonte: INGV, Database DISS, http://diss.rm.ingv.it/dissnet/





	Istituto Nazionale di Geofisica Database of Individual 9	e Vulcanologi Seismogen	a ic Sour	DISS version
ser: Guest LOGIN	Batabase of Individual	Seisiniogen		HOME MAP SEARCH HE
	INDIVIDUAL SEISMOGENIC	SOURCES		
GEOLOGICAL GEOPHYSICAL SOURCES		<u>es</u> ¥ <u>Refer</u>	ENCES V	User Comments
SEISMOGENIC	General Information			
COMPOSITE	DISS-ID	ITIS085		
SEISMOGENIC	Name	Pontremoli		
SOURCES	Compiler(s)	Burrato P.(1), V	/annoli P.(1), Gambini S.(1)
DEBATED SEISMOGENIC	Contributor(s)	Burrato P.(1), V E.(1), Valensis	/annoli P.(1 e G.(1)), Gambini S.(1), Basili R.(1), Baroux
SOURCES	Affiliation(s)	1) Istituto Nazio Tettonofisica; V	onale di Ge /ia di Vigna	ofisica e Vulcanologia; Sismologia e Murata, 605, 00143 Roma, Italy
ZONES	Created	01-Nov-2005		
	Updated	02-Oct-2007		
	Display map	SE 🕺		
USER	Related sources	ITCS026		
COMMENTS	Parametric Information			
	PARAMETER		QUALITY	EVIDENCE
	Location [Lat/Lon]	44.37 / 9.91	OD	Based on geological data.
	Length [km]	7.1	OD	Based on geological and geomorphological data.
	Width [km]	5.9	ER	Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994).
	Min depth [km]	2.0	OD	Based on geological and seismological data.
	Max depth [km]	5.9	OD	Based on geological and seismological data.
	Strike [deg]	329	LD	Based on geological data from various authors.
	Dip [deg]	42	LD	Based on seismological data from Solarino (2007).
	Rake [deg]	270	LD	Based on geological data from various authors.
	Slip Per Event [m]	0.3	ER	Calculated from Mo using the relationship from Hanks and Kanamori (1979).
	Slip rate [mm/y] minmax	0.11.0	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
	Recurrence [y] min max	3003000	EJ	Inferred from slip rate and average displacement.
	Magnitude [Mw]	5.7	LD	Value adopted from the historical earthquake catalogue CPTI04.
	LD=LITERATURE DATA; OD=ORIGINAL DATA; E	R=EMPIRICAL RELATION	ISHIP; AR=ANA	LYTICAL RELATIONSHIP; EJ=EXPERT JUDGEMENT;
	INFORMATION ABOUT THE A	SSOCIATED FAI	RTHQUAK	ES
	Latest Earthquake	14 Feb 1834		CPTI04.
	Penultimate Earthquake	Unknown		See "Commentary" for
				internation.

Figura 4.13 Informazioni generali e parametri della sorgente ITIS085 – Pontremoli. Fonte: INGV, Database DISS, <u>http://diss.rm.ingv.it/dissnet/</u>





	Istituto Nazionale di Geol Database of Individ	isica e Vulcai Jal Seismo	nologia Daenic So	ources DISS version 3
User: Guest Login			90	Home Map Search Help
	INDIVIDUAL SEISMOGENIC	SOURCES	?	
GEOLOGICAL GEOPHYSICAL SOURCES INDIVIDUAL SEISMOGENIC	Commentary Pict	<u>ures</u> R ef	ERENCES ¥	User Comments
Sources	GENERAL INFORMATION			
COMPOSITE	DISS-ID	ITIS067		
SEISMOGENIC	Name Compiler(e)	Aulla		
	Complier(s)	Burrato P.(1)		
DEBATED SEISMOGENIC SOURCES	Affiliation(s)	1) Istituto Nazior Tettopofisica: Via	ale di Geofisi di Vigna Mur	ca e Vulcanologia; Sismologia e
COORCES	Created	02-Oct-2007	a vigna wa	ala, 666, 66146 Roma, hary
SUBDUCTION ZONES	Updated	02-Oct-2007		
	Display map	🐖 🔀		
	Related sources	ITCS026		
USER COMMENTS				
	PARAMETRIC INFORMATION			
	PARAMETER		QUALITY	Evidence
080	Location [Lat/Lon]	44.22 / 10.03	OD	Primarily based on the location of the associated historical earthquake.
	Length [km]	9.0	OD	Based on geological, geomorphological and seismological data.
	Width [km]	7.0	OD	Based on geological, geomorphological and seismological data.
	Min depth [km]	1.0	OD	Based on geological, geomorphological and seismological data.
	Max depth [km]	5.5	OD	Based on geological, geomorphological and seismological data.
	Strike [deg]	320	OD	Based on geological data from various authors.
	Dip [deg]	40	OD	Based on seismological data from Solarino (2007).
	Rake [deg]	270	LD	Based on geological data from various authors.
	Slip Per Event [m]	0.3	ER	Calculated from Mo using the relationship from Hanks and Kanamori (1979).
	Slip rate [mm/y] min… max	0.11.0	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
	Recurrence [y] min max	3003000	EJ	Inferred from slip rate and average displacement.
	Magnitude [Mw]	5.8	LD	Value adopted from the historical earthquake catalogue CPTI04.
	LD=LITERATURE DATA; OD=ORIGINAL DATA;	ER=EMPIRICAL RELATIONS	IP; AR=ANALYTICAL	Relationship;EJ=Expert Judgement;
	INFORMATION ABOUT THE		RTHQUAKES	
	Latest Earthquake	05 May 1481		CPTI04
	Penultimate Earthquake	Unknown		See "Commentary" for information
	Continuate Cartilyudke	ONKIOWI		See commentary for mornation.

Figura 4.14 Informazioni generali e parametri della sorgente ITISO67 – Aulla. Fonte: INGV, Database DISS, <u>http://diss.rm.ingv.it/dissnet/</u>





	Database of Individ	ual Seism	oaenic S		
Guest L LOGIN			ogenic S	HOME MAP SEARCH HEL	
. ouest <u></u>			050		
	INDIVIDUAL SEISMOG	ENIC SOUR	CES		
EOLOGICAL OPHYSICAL SOURCES NDIVIDUAL	Commentary P	ICTURES ¥	Reference	CES V USER COMMENTS	
SOURCES	GENERAL INFORMATIO	N			
OMPOSITE	DISS-ID	ITIS050			
ISMOGENIC	Name	Garfagnana Nor	rth		
SOURCES	Compiler(s)	Vannucci G.(1),	Valensise G.((2)	
Denizen	Contributor(s)	Vannucci G.(1),	Valensise G.((2)	
DEBATED EISMOGENIC SOURCES	Affiliation(s)	 Donato Creti, 12, 40128 Bologna, Italy Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Sismologia e Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Sismologia e Tettonofisica; Via di Vigna Murata, 605, 00143 Roma, Italy 			
	Created	31-Oct-2001			
ZONES	Updated	31-Oct-2001			
	Display map	🗺 🔀			
	Related sources	ITCS083			
COMMENTS	PARAMETRIC INFORMA				
	FARAMETRIC INFORMA	TION			
	PARAMETRIC INFORMA	TION R	QUALITY	Evidence	
	PARAMETRIC INFORMA PARAMETER Location [Lat/Lon]	44.18 / 10.32	QUALITY LD	EVIDENCE Primarily based on the location of the associated historical earthquake.	
	PARAMETRIC INFORMA PARAMETER Location [Lat/Lon] Length [km]	44.18 / 10.32 18.0	QUALITY LD OD	EVIDENCE Primarily based on the location of the associated historical earthquake. Based on geological and geomorphological data.	
OSO EV NO SA	PARAMETRIC INFORMA PARAMETER Location [Lat/Lon] Length [km] Width [km]	44.18 / 10.32 18.0 11.3	QUALITY LD OD ER	EVIDENCE Primarily based on the location of the associated historical earthquake. Based on geological and geomorphological data. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994).	
V NO SA	PARAMETRIC INFORMA PARAMETER Location [Lat/Lon] Length [km] Width [km] Min depth [km]	44.18 / 10.32 18.0 11.3 1.0	QUALITY LD OD ER OD	EVIDENCE Primarily based on the location of the associated historical earthquake. Based on geological and geomorphological data. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). Based on geological and geomorphological data.	
NO SA	PARAMETRIC INFORMA PARAMETER Location [Lat/Lon] Length [km] Width [km] Min depth [km] Max depth [km]	44.18 / 10.32 18.0 11.3 1.0 8.3	QUALITY LD OD ER OD AR	EVIDENCE Primarily based on the location of the associated historical earthquake. Based on geological and geomorphological data. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). Based on geological and geomorphological data. Derived from dip, width and min depth.	
NO SA	PARAMETRIC INFORMA PARAMETER Location [Lat/Lon] Length [km] Width [km] Min depth [km] Max depth [km] Strike [deg]	44.18 / 10.32 18.0 11.3 1.0 8.3 305	QUALITY LD OD ER OD AR OD	EVIDENCE Primarily based on the location of the associated historical earthquake. Based on geological and geomorphological data. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). Based on geological and geomorphological data. Derived from dip, width and min depth. Based on geological and geomorphological data.	
NO SA	PARAMETRIC INFORMA PARAMETER Location [Lat/Lon] Length [km] Width [km] Min depth [km] Max depth [km] Strike [deg] Dip [deg]	44.18 / 10.32 18.0 11.3 1.0 8.3 305 40	QUALITY LD OD ER OD AR OD OD	EviDENCE Primarily based on the location of the associated historical earthquake. Based on geological and geomorphological data. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). Based on geological and geomorphological data. Derived from dip, width and min depth. Based on geological and geomorphological data. Based on geological and geomorphological data.	
NO SA	PARAMETRIC INFORMA PARAMETER Location [Lat/Lon] Length [km] Width [km] Min depth [km] Max depth [km] Strike [deg] Dip [deg] Rake [deg]	44.18 / 10.32 18.0 11.3 1.0 8.3 305 40 270	QUALITY LD OD ER OD AR OD AR OD EJ	EviDENCE Primarily based on the location of the associated historical earthquake. Based on geological and geomorphological data. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). Based on geological and geomorphological data. Derived from dip, width and min depth. Based on geological and geomorphological data. Based on geological and geomorphological data. Inferred from geological data.	
NO SA	PARAMETRIC INFORMA PARAMETER Location [Lat/Lon] Length [km] Width [km] Min depth [km] Max depth [km] Strike [deg] Dip [deg] Rake [deg] Slip Per Event [m]	44.18 / 10.32 18.0 11.3 1.0 8.3 305 40 270 0.79	QUALITY LD OD ER OD AR OD AR OD EJ ER	EviDence Primarily based on the location of the associated historical earthquake. Based on geological and geomorphological data. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). Based on geological and geomorphological data. Derived from dip, width and min depth. Based on geological and geomorphological data. Based on geological and geomorphological data. Inferred from geological data. Calculated from Mo using the relationship from Hanks and Kanamori (1979).	
NO SA	PARAMETRIC INFORMA PARAMETER Location [Lat/Lon] Length [km] Width [km] Min depth [km] Max depth [km] Strike [deg] Dip [deg] Rake [deg] Slip Per Event [m] Slip rate [mm/y] min max	44.18 / 10.32 18.0 11.3 1.0 8.3 305 40 270 0.79 0.11.0	QUALITY LD OD ER OD AR OD CD EJ ER EJ	EviDENCE Primarily based on the location of the associated historical earthquake. Based on geological and geomorphological data. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). Based on geological and geomorphological data. Derived from dip, width and min depth. Based on geological and geomorphological data. Inferred from geological and geomorphological data. Inferred from geological data. Calculated from Mo using the relationship from Hanks and Kanamori (1979). Unknown, values assumed from geodynamic constraints.	
O SO BY NO SA	PARAMETRIC INFORMA PARAMETER Location [Lat/Lon] Length [km] Width [km] Min depth [km] Max depth [km] Strike [deg] Dip [deg] Rake [deg] Slip Per Event [m] Slip rate [mm/y] min max Recurrence [y] min max	44.18 / 10.32 18.0 11.3 1.0 8.3 305 40 270 0.79 0.11.0 7907900	QUALITY LD OD ER OD AR OD CD EJ ER EJ	EviDence Primarily based on the location of the associated historical earthquake. Based on geological and geomorphological data. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). Based on geological and geomorphological data. Derived from dip, width and min depth. Based on geological and geomorphological data. Derived from dip, width and min depth. Based on geological and geomorphological data. Inferred from geological data. Inferred from geological data. Calculated from Mo using the relationship from Hanks and Kanamori (1979). Unknown, values assumed from geodynamic constraints. Inferred from slip rate and average displacement.	
D SO BY NG SA	PARAMETRIC INFORMAL PARAMETER Location [Lat/Lon] Length [km] Width [km] Min depth [km] Max depth [km] Strike [deg] Dip [deg] Rake [deg] Slip Per Event [m] Slip rate [mm/y] min max Recurrence [y] min max Magnitude [Mw]	44.18 / 10.32 18.0 11.3 1.0 8.3 305 40 270 0.79 0.11.0 7907900 6.4	QUALITY LD OD ER OD AR OD CD EJ ER EJ EJ	EviDENCE Primarily based on the location of the associated historical earthquake. Based on geological and geomorphological data. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). Based on geological and geomorphological data. Derived from dip, width and min depth. Based on geological and geomorphological data. Based on geological and geomorphological data. Inferred from geological data. Calculated from Mo using the relationship from Hanks and Kanamori (1979). Unknown, values assumed from geodynamic constraints. Inferred from slip rate and average displacement. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994).	
V NO SA	PARAMETRIC INFORMA PARAMETER Location [Lat/Lon] Length [km] Width [km] Min depth [km] Max depth [km] Strike [deg] Dip [deg] Rake [deg] Slip Per Event [m] Slip rate [mm/y] min max Recurrence [y] min max Magnitude [Mw] LD=LITERATURE DATA: OD=ORIGINAL D	44.18 / 10.32 18.0 11.3 1.0 8.3 305 40 270 0.79 0.11.0 7907900 6.4 ATA: ER=EMPIRICAL REP	QUALITY LD OD ER OD AR OD CD EJ ER EJ ER ER	EviDence Primarily based on the location of the associated historical earthquake. Based on geological and geomorphological data. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). Based on geological and geomorphological data. Derived from dip, width and min depth. Based on geological and geomorphological data. Date of the geological and geomorphological data. Inferred from geological data. Calculated from Mo using the relationship from Hanks and Kanamori (1979). Unknown, values assumed from geodynamic constraints. Inferred from slip rate and average displacement. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). NEXTYPOLE RELATIONSHIP; EJFEXPERT JUDGEMENT;	
V NO SA	PARAMETRIC INFORMAL PARAMETER Location [Lat/Lon] Length [km] Width [km] Min depth [km] Max depth [km] Max depth [km] Strike [deg] Dip [deg] Rake [deg] Slip Per Event [m] Slip rate [mm/y] min max Recurrence [y] min max Magnitude [Mw] LD=LITERATURE DATA: OD=ORIGINAL D	44.18 / 10.32 18.0 11.3 1.0 8.3 305 40 270 0.79 0.11.0 7907900 6.4 ATA; ER=EMPIRICAL RE	QUALITY LD OD ER OD AR OD CD EJ ER EJ ER EJ ER	EVIDENCE Primarily based on the location of the associated historical earthquake. Based on geological and geomorphological data. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). Based on geological and geomorphological data. Derived from dip, width and min depth. Based on geological and geomorphological data. Inferred from geological and geomorphological data. Inferred from geological data. Calculated trom Mo using the relationship from Hanks and Kanamori (1979). Unknown, values assumed from geodynamic constraints. Inferred from slip rate and average displacement. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). WALVITICAL RELATIONSHIP;EJ=EXPERT JUDGEMENT;	
V NO SA	PARAMETRIC INFORMAL PARAMETER Location [Lat/Lon] Length [km] Width [km] Min depth [km] Min depth [km] Max depth [km] Strike [deg] Dip [deg] Rake [deg] Slip Per Event [m] Slip rate [mm/y] min max Recurrence [y] min max Magnitude [Mw] LD=LITERATURE DATA; OD=ORIGINAL D INFORMATION ABOUT Latest Earthquake	44.18 / 10.32 18.0 11.3 1.0 8.3 305 40 270 0.79 0.11.0 7907900 6.4 ATA; ER=EMPIRICAL REF THE ASSOCIAT 07 Sep 1920	QUALITY LD OD ER OD AR OD CD EJ ER EJ ER EJ ER	EVIDENCE Primarily based on the location of the associated historical earthquake. Based on geological and geomorphological data. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). Based on geological and geomorphological data. Derived from dip, width and min depth. Based on geological and geomorphological data. Inferred from geological and geomorphological data. Inferred from geological data. Calculated trom Mo using the relationship from Hanks and Kanamori (1979). Unknown, values assumed from geodynamic constraints. Inferred from slip rate and average displacement. Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994). WALVITICAL RELATIONEMIP;EJ=EXPERT JUDGEMENT;	

Figura 4.15 Informazioni generali e parametri della sorgente ITISO50 – Garfagnana North. Fonte: INGV, Database DISS, <u>http://diss.rm.ingv.it/dissnet/</u>

L'interpretazione sismotettonica del DISS è condivisa da Eva et al. (2014), che associano la sismicità della Lunigiana nel periodo 1999-2011 ad una struttura sismogenetica immergente verso NE ubicata lungo il bordo SW del graben (Figura 4.16).







Figura 4.16 A sinistra: Sismicità nel periodo 1999 – 2011, con indicazione dei principali terremoti storici, delle faglie attive [da Di Naccio et al., 2013] e sorgenti sismogenetiche [da database DISS 3.1]. A destra: sezioni sismologiche orientate SW-NE attraverso l'appennino tosco-emiliano, con indicazione dei principali terremoti storici (stella gialla: 1995; stella azzurra: 1920; stella rossa: 1837); T.c. = costa tirrenica; Ap.W. = spartiacque appenninico; P-AF = fronte dei thrust pedeappenninico; Lu.G. = graben della Lunigiana. Da Eva et al. (2014), modificato

Il terremoto più recente che ha interessato la regione, ovvero quello con meccanismo focale di tipo dip-slip con debole componente trascorrente destra avvenuto il 21 giungo 2013, è attribuito all'attivazione della struttura ad orientazione circa E-W/NE-SW che connette i sistemi di faglia ai bordi sudoccidentali dei graben della Lunigiana e della Garfagnana (Pezzo et al., 2014; Stramondo et al., 2014; Figura 4.17; Figura 4.17).







Figura 4.17 Carta geologico-strutturale della regione Lunigiana-Garfagnana [da Di Naccio et al., 2013] con indicazione della sismicità storica [da CPTI11; Rovida et al., 2011] e della sequenza sismica del 2013 con il meccanismo focale del terremoto del 21 Giugno. Lo schema in basso a sinistra rappresenta l'immagine 3D, con vista da SW, della sorgente del terremoto del 21 giugno 2013. Da Pezzo et al. (2014). Il simbolo in giallo indica l'ubicazione del sito della diga di Lago Ballano



Structural sketch of the Lunigiana and Garfagnana area with the June 21, 2013 earthquake, its focal mechanism (http://cnt.m.ingv.iv/dnth.thm]) and the 2013 sequence [4], Squares: historical earthquakes having magnitude larger than 5.3 [12]; hatched lines: normal faults [21]; dashed lines: lineaments, EL: Enza line [23], SL: Sarzana-Equi Terme line [3]; dark polygon: composite seismogenic sources projection on the ground surface; black bioses: individual seismogenic seismogenic sources onto the ground surface; black lines: up-dip projection of the seismogenic sources onto the surface 1) ITIS085-Pontremoli; 2) ITIS067-Aulla; 3) ITIS050-Garfagnana North; and 4) ITIS051: Garfagnana South [2]; black stars: thermal springs. Inset shows the structural framework of the Etrurian Fault System (redrawn from [1]).

Figura 4.18 Interpretazione sismotettonica della sismicità registrata al confine Lunigiana-Garfagnana con indicazione delle principali sorgenti sismogenetiche dell'area (tratte da DISS) e block-diagram che mostra la geometria semplificata dell'area Lunigiana-Garfagnana. La sorgente del terremoto del 1481 è associata alla faglia bordiera sudoccidentale del graben della Lunigiana ed è schematicamente legata alla sorgente del terremoto del 1920 attraverso la relay ramp cui è associata la sequenza del giugno 2013. Immagini da Stramondo et al. (2014)

Recupero della diga di Lago Ballano. Progetto definitivo. Studio sismotettonico e analisi della pericolosità sismica. 31





5. STUDIO SISMOTETTONICO E ANALISI PROBABILISTICA DI PERICOLOSITA' SISMICA

5.1 Modello sismotettonico

5.1.1 Introduzione

Il modello sismotettonico è stato definito individuando le informazioni migliori, più attendibili e aggiornate in accordo alle indicazioni delle linee guida redatte ai sensi dell'articolo 15 della 241/90 e successive modifiche tra la Direzione Generale per le Dighe e le Infrastrutture Idriche ed Elettriche del Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti e l'Istituto di Geofisica e Vulcanologia (INGV), INGV-MITDGUD.

La definizione del modello sismotettonico parte assumendo, quale studio di riferimento per la pericolosità italiana, il cosiddetto modello MPS04 (Stucchi et al 2011, Meletti 2007), che è alla base della valutazione delle azioni sismiche per strutture e infrastrutture secondo le norme correnti.

A partire dall'impianto di tale modello si sono poi valutati gli aggiornamenti relativi alla caratterizzazione delle sorgenti sismiche, secondo i dati più aggiornati e la letteratura più accreditata a disposizione.

Gli elementi principali dello studio sono riepilogati in elenco, rimandando per maggiori dettagli ai paragrafi seguenti.

Il modello assunto per la definizione delle sorgenti sismiche è il modello a zone sismogenetiche noto come ZS9 (Meletti et al. 2008). Tale modello è il più recente pubblicato che copre con dettaglio omogeneo e coerente tutti i siti di interesse di questo studio; inoltre, esso è riconosciuto dalla comunità scientifica ed è, come citato, alla base delle norme tecniche per le costruzioni.

La stima dei parametri di pericolosità sismica di ciascuna zona è basata sulla versione del 2015 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15) (Rovida et al. 2016). È noto che il calcolo ufficiale di pericolosità sismica nazionale faccia riferimento alla versione del catalogo del 2004, CPTI04. Tuttavia, la recente pubblicazione del catalogo aggiornato al 2014 che, non solo contiene gli eventi sismici recenti, ma per il quale sono state aggiornate le stime delle magnitudo dei terremoti storici, rende necessario, oltre che opportuno, l'aggiornamento dei parametri di sismicità delle zone.

Per quanto riguarda l'eliminazione delle repliche (*declustering*) e la stima della completezza del catalogo CPTI15, ci si è avvalso del lavoro Meletti et al. 2009 dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e i cui autori sono gli studiosi italiani più autorevoli sul tema.

Il modello sismotettonico è stato definito per una macroarea che include tutte le zone della zonazione ZS9 nell'area centro-settentrionale (Figura 5.1).







Figura 5.1. Localizzazione del sito e zone sismogenetiche che contribuiscono alla pericolosità sismica

5.1.2 Modello di zonazione

Il modello a zone sismogenetiche ZS9 copre con dettaglio omogeneo e coerente tutto il territorio italiano.

La scelta di utilizzare zone sismogenetiche omogenee invece che faglie sismiche, è stata operata per ragioni di affidabilità del modello ZS9 in quanto la conoscenza delle faglie sismiche non è attualmente sufficiente, nonostante i recenti studi sul tema, da permettere di basare l'analisi di pericolosità esclusivamente sulle faglie. Si ritiene quindi valido l'utilizzo di aree/zone sismogenetiche omogenee, che, sulla base di indizi geologici, sismotettonici e sulla sismicità storica, si possono ritenere caratterizzate da un tasso di sismicità, cioè il numero medio di terremoti annui con una magnitudo superiore a un valore minimo di interesse, uniforme in tutta la zona.

Il modello di zone sismogenetiche ZS9 prende in considerazione 36 zone sismogenetiche identificate da un numero progressivo che va da 901 a 936 sulla base di informazioni derivate da (i) i terremoti passati, (ii) le strutture sismogenetiche contenute nel DISS 2.0 (Database of Italy's Seismogenic Sources o DISS 2.0) (Valensise e Pantosti 2001), (iii) le altre faglie attive note all'epoca della sua redazione.

In accordo con il concetto di zona sismogenetica, nel seguito si assumono le seguenti ipotesi classiche della analisi probabilistica di pericolosità sismica:

• il processo di occorrenza degli eventi sismici principali (mainshock) su ciascuna zona è stocasticamente ben descritto dal processo di Poisson omogeneo (PPO). Quest'ultimo è





caratterizzato da un singolo parametro o tasso, $v(M \ge M_{min})$, pari al numero medio di terremoti nell'unità di tempo (anno) con magnitudo, M, superiore ad una soglia minima ritenuta di interesse per le strutture, M_{min} ;

- condizionatamente all'occorrenza di un terremoto in una data zona, la distribuzione di probabilità della posizione dell'epicentro è uniforme in tutta l'area della zona (Cornell 1968);
- condizionatamente all'occorrenza di un evento nella zona, indipendentemente dal punto della zona in cui tale evento si genera, la distribuzione di probabilità delle magnitudo dell'evento si può derivare dalla legge di Gutenberg e Richter (Gutenberg e Richter 1944).

5.1.3 Catalogo CPTI15

La stima dei parametri di pericolosità sismica di ciascuna zona è basata CPTI15.

Il nuovo Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15) copre un intervallo temporale dall'anno 1000 al 2014 e fa riferimento a modelli di conversione aggiornati per ristimare le magnitudo dei terremoti storici già contenuti nelle precedenti versioni.

In Figura 5.2 sono riportati tutti i 4427 terremoti presenti nel CPTI15; la figura riporta gli epicentri di ciascun evento raffigurati con cerchi di diverso colore e dimensione in funzione della magnitudo momento, *M*_w, dell'evento considerato. La localizzazione dei terremoti di magnitudo maggiore permette di identificare abbastanza chiaramente la zona che si estende dalla dorsale appenninica all'arco calabro fino alla Sicilia sud-orientale.

Lo stesso catalogo è rappresentato in un diverso formato in Figura 5.3 nella quale si riportano tutti gli eventi rappresentati in funzione dell'anno di occorrenza.

La figura permette di introdurre il concetto di completezza del catalogo, in quanto mostra chiaramente come la frequenza dei terremoti osservati diminuisce allontanandosi nel tempo. Tale fenomeno, più evidente al diminuire della classe di magnitudo considerata, evidenzia che più si va indietro nel tempo, maggiori sono i terremoti di cui si è persa traccia nel catalogo, soprattutto in riferimento alle classi di magnitudo minori.

La rappresentazione dei dati del CPTI15 riportata nelle figure comprende sia terremoti principali che repliche e non tiene in considerazione i diversi intervalli di completezza del catalogo che vanno stimati per classi di magnitudo e per macro-zone geografiche. Questi due aspetti sono analizzati in dettagli nel seguito.








Figura 5.2. Distribuzione geografica ed intensità dei terremoti contenuti nel CPTI15









5.1.4 Tassi per classi di magnitudo

Il catalogo, privo di repliche e completo, è stato utilizzato per stimare i parametri sismici di ciascuna delle 18 zone del modello ZS9 appartenenti alla macroarea in esame.

Per ciascuna zona sono stati quindi stimati i tassi di occorrenza per classi di magnitudo. Tali tassi, per semplicità di rappresentazione riferiti all'unità temporale di cento anni, sono riportati in Tabella 5.1 (completezza storica) e Tabella 5.2 (completezza statistica) insieme con i centri delle classi di magnitudo considerati ed il nome e numero identificativo di ciascuna zona.





Tabella 5.1. Tassi di occorrenza in cento anni secondo completezza storica per classi di magnitudo e per zona sismogenetica

			Classe di magnitudo (centro intervallo)														
Nome zona	ZS9	3,96	4,19	4,42	4,65	4,88	5,11	5,34	5,57	5,8	6,03	6,26	6,49	6,72	6,95	7,18	7,41
Grigioni - Valtellina	903	1,75	1,75	0,70	3,50	1,40	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Friuli - Veneto Orientale	905	7,81	9,55	11,37	9,55	4,49	2,07	1,03	0,41	0,42	0,42	0,22	0,22	0,11	0,00	0,00	0,00
Garda - Veronese	906	3,13	5,06	5,06	2,81	6,18	1,03	0,41	0,21	0,14	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
Bergamasco	907	0,00	1,69	1,69	1,69	2,25	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Piemonte	908	4,39	10,53	5,59	3,50	2,10	0,64	0,32	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nizza - Sanremo	910	1,75	2,63	4,20	1,40	0,70	0,00	0,32	0,41	0,21	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tortona - Bobbio	911	3,13	7,02	2,10	2,10	2,80	0,55	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dorsale Ferrarese	912	6,25	3,93	5,62	5,06	0,56	1,03	1,65	0,21	0,28	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Appennino Emiliano- Romagnolo	913	3,13	9,51	6,17	4,62	2,95	2,75	1,93	0,41	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forlivese	914	3,13	7,19	7,42	7,57	5,18	0,76	0,62	0,48	0,00	0,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Garfagnana - Mugello	915	6,25	20,18	9,79	6,99	6,29	2,47	0,27	0,55	0,00	0,62	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00
Versilia-Chianti	916	4,69	7,02	4,90	2,10	2,10	1,10	0,82	0,55	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rimini - Ancona	917	6,25	5,82	4,20	2,80	0,00	1,65	0,27	1,10	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Medio- Marchigiana/Abru zzese	918	1,56	14,91	9,79	4,20	0,00	0,27	1,10	0,55	0,41	0,00	0,28	0,14	0,00	0,14	0,00	0,00
Appennino Umbro	919	1,56	18,42	10,49	6,99	3,50	3,02	1,37	1,92	0,21	0,62	0,14	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00
Val di Chiana - Ciociaria	920	3,13	18,42	12,59	6,29	2,80	1,92	0,82	0,27	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etruria	921	6,25	9,65	6,99	6,29	4,90	2,47	1,10	0,00	0,21	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Appennino Abruzzese	923	6,25	26,32	20,28	11,89	3,50	3,30	1,37	1,92	1,03	0,41	0,56	0,28	0,14	0,14	0,14	0,00





Tabella 5.2. Tassi di occorrenza in cento anni secondo completezza statistica per classi di magnitudo e per zona sismogenetica

			Classe di magnitudo (centro intervallo)														
Nome zona	ZS9	3,96	4,19	4,42	4,65	4,88	5,11	5,34	5,57	5,8	6,03	6,26	6,49	6,72	6,95	7,18	7,41
Grigioni - Valtellina	903	2,08	2,78	0,69	3,66	1,22	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Friuli - Veneto Orientale	905	6,25	11,81	13,89	10,42	4,17	4,35	2,72	0,62	0,93	0,53	0,35	0,29	0,14	0,00	0,00	0,00
Garda - Veronese	906	2,08	6,25	6,25	2,78	6,94	2,17	0,54	0,31	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bergamasco	907	0,00	1,39	2,08	2,08	2,78	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Piemonte	908	6,25	9,03	5,56	3,66	1,83	0,49	0,49	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nizza - Sanremo	910	2,08	2,78	4,17	1,22	0,61	0,00	0,49	0,41	0,21	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tortona - Bobbio	911	1,49	6,61	2,24	2,10	2,99	0,45	0,00	0,00	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dorsale Ferrarese	912	4,86	4,17	6,94	6,25	0,69	0,54	1,63	0,31	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Appennino Emiliano- Romagnolo	913	2,83	10,14	7,15	5,12	3,52	4,79	2,87	0,62	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forlivese	914	2,88	7,20	6,66	7,95	5,07	1,44	1,09	0,31	0,00	1,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Garfagnana - Mugello	915	4,48	17,91	10,45	7,46	5,97	3,13	0,00	0,38	0,00	0,46	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00
Versilia-Chianti	916	3,73	5,97	5,22	1,49	2,24	1,79	1,34	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rimini - Ancona	917	2,93	5,92	4,48	2,99	0,00	2,68	0,45	0,76	1,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Medio- Marchigiana/Abru zzese	918	2,99	15,67	10,45	4,48	0,00	0,00	1,34	0,76	0,76	0,00	0,46	0,23	0,00	0,23	0,00	0,00
Appennino Umbro	919	2,24	18,66	11,19	6,72	3,73	2,68	1,34	2,65	0,38	0,69	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00
Val di Chiana - Ciociaria	920	4,48	18,66	13,43	6,72	2,99	2,23	0,89	0,38	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etruria	921	5,22	11,19	7,46	5,97	5,22	1,79	1,34	0,00	0,00	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Appennino Abruzzese	923	11,94	28,36	21,64	12,69	3,73	4,02	1,79	2,27	1,52	0,46	0,69	0,00	0,00	0,23	0,23	0,00





5.1.5 Distribuzione di Gutenberg-Richter

La relazione frequenza-magnitudo o relazione di Gutenberg-Richter, è una forma funzionale che lega il tasso cumulato dei terremoti osservati con la magnitudo degli stessi:

$$\log v(M_w) = a + b (M_w - M_{w,min})$$

dove $v(M_w)$ è il tasso di eventi con magnitudo maggiore o uguale a M_w , mentre a e b sono parametri da stimare.

A partire dai tassi per classe di magnitudo riportati in Tabella 5.1 e Tabella 5.2 sono stati stimati i parametri della relazione di Gutenberg-Richter per ciascuna zona sismogenetica e i risultati sono mostrati in Tabella 5.3 e Tabella 5.4, rispettivamente. I tassi sono stati stimati con il metodo della massima verosimiglianza.

La tabella mostra anche i valori della magnitudo minima (*M*_{w,min}) e magnitudo massima (*M*_{w,max}) per ciascuna zona.

Tabella 5.3. Parametri distribuzione Gutenberg-Richter per zona secondo completezza storica

ZS9	a	b	Mw,min	M _{w,max}	v <i>(</i> M _w)
903	-0,82	-1,16	3,85	5,23	0,152
905	-0,18	-0,94	3,85	6,84	0,657
906	-0,39	-1,12	3,85	6,61	0,403
907	-0,85	-1,21	3,85	5,69	0,143
908	-0,36	-1,37	3,85	5,69	0,439
910	-0,84	-0,89	3,85	6,38	0,143
911	-0,57	-1,26	3,85	5,92	0,267
912	-0,42	-1,06	3,85	6,15	0,382
913	-0,17	-1,25	3,85	6,15	0,678
914	-0,35	-0,88	3,85	6,15	0,443
915	-0,17	-0,99	3,85	6,61	0,671
916	-0,46	-1,06	3,85	6,15	0,344
917	-0,62	-0,79	3,85	5,92	0,239
918	-0,50	-0,82	3,85	7,07	0,317
919	-0,14	-0,92	3,85	6,61	0,730
920	-0,08	-1,33	3,85	5,92	0,823
921	-0,17	-1,20	3,85	6,15	0,679
923	-0,02	-0,85	3,85	7,30	0,953



ZS9	a	b	Mw,min	M _{w,max}	∨(M _w)
903	-0,79	-1,11	3,85	5,23	0,162
905	-0,04	-0,92	3,85	6,84	0,911
906	-0,27	-1,14	3,85	5,92	0,534
907	-0,80	-1,12	3,85	5,69	0,160
908	-0,38	-1,33	3,85	5,69	0,416
910	-0,86	-0,83	3,85	6,38	0,138
911	-0,65	-1,07	3,85	5,92	0,226
912	-0,37	-1,15	3,85	6,15	0,425
913	-0,06	-1,23	3,85	6,15	0,866
914	-0,33	-0,86	3,85	6,15	0,463
915	-0,23	-0,92	3,85	6,61	0,584
916	-0,53	-0,87	3,85	5,69	0,296
917	-0,61	-0,70	3,85	5,92	0,246
918	-0,46	-0,75	3,85	7,07	0,348
919	-0,14	-0,87	3,85	6,61	0,727
920	-0,10	-1,22	3,85	5,92	0,796
921	-0,15	-1,27	3,85	6,15	0,713
923	0,01	-0,84	3,85	7,30	1,032

Tabella 5.4. Parametri distribuzione Gutenberg-Richter per zona secondo completezza statistica

Per la magnitudo minima, $M_{w,min}$, si è scelto si assumere comune a tutte le zone italiane, pari a 3,85 (estremo inferiore intervallo), sebbene alcune zone mostrino tassi nulli per la prima classe di magnitudo.

La magnitudo massima, $M_{w,max}$, invece, è stata calcolata come l'estremo superiore della classe di magnitudo cui corrisponde un tasso diverso da zero in Tabella 5.1 o Tabella 5.2. È importante qui sottolineare che, le analisi di pericolosità sismica sono state comunque effettuate assumendo come magnitudo massima di ciascuna zona la massima tra quelle ottenuta da analisi del CPTI15 e quella relativa al CPTI04. Infine, in Tabella 5.3 e Tabella 5.4 sono anche riportati i tassi annui per magnitudo maggiori o uguali a $M_{w,min}$, $v(M_w)$. Tali tassi definiscono interamente il processo di Poisson omogeneo che modella l'occorrenza di eventi sismici nella zona considerata.

In Tabella 5.5 sono riportati gli errori standard (incertezze di stima) associati alla stima dei coefficienti b nei due casi di completezza considerati. Si nota come gli errori di stima per le zone di maggiore estensione, e quindi quelle che in generale contribuiscono maggiormente alla pericolosità sismica dei siti italiani, siano trascurabili; le zone più piccole presentano errori di stima leggermente superiori. Sulla base dei dati mostrati si è scelto, ai fini delle analisi probabilistiche di pericolosità sismica, di non considerare incertezza di stima sul parametro b. Tale scelta è stata operata in accordo alle indicazioni riportate in Stucchi et al 2011.





Tabella 5.5. Errori standard associati alla stima del coefficiente b per ciascuna zona

	Errore	standard
Zona	Compl. Storica	Compl. Statistica
903	0,29	0,22
905	0,03	0,04
906	0,07	0,11
907	0,20	0,19
908	0,09	0,08
910	0,05	0,04
911	0,13	0,11
912	0,08	0,09
913	0,12	0,14
914	0,06	0,06
915	0,05	0,06
916	0,07	0,08
917	0,05	0,03
918	0,04	0,04
919	0,03	0,04
920	0,08	0,06
921	0,09	0,11
923	0,02	0,02





5.2 Analisi di pericolosità sismica

5.2.1 Leggi di attenuazione

Le analisi probabilistiche di pericolosità sismica sono effettuate tenendo conto dell'incertezza di modello tramite albero logico (e.g. Lin et al 2013).

Quest'ultimo è costruito associando uguale peso (0,5) alle due stime di completezza di cui si è discusso nelle precedenti sezioni. Inoltre, si è scelto anche di utilizzare diversi modelli di propagazione del moto sismico quali:

- Bindi et al. (2011), ITA10, ricavata da registrazioni italiane;
- Bindi et al. (2014), ITA14 ricavata da registrazioni europee;
- Akkar e Bommer (2010) ricavata da registrazioni europee e del medio-oriente.

Con riferimento ai rami relativi ai modelli di attenuazione, è stato assegnato peso maggiore (0.4) alla ITA10, ricavata su dati italiani, mentre un peso pari a 0,3 è stato attribuito ai rami della AB10 e ITA 14, ricavate entrambe su dati europei e/o mediorientali.

La Figura 5.4 mostra l'albero logico implementato nelle analisi di pericolosità ed i pesi associati a ciascun ramo.





Le leggi di attenuazione adottate sono state scelte tra quelle riportate nell'elenco delle Linee guida redatte dall'INGV e dalla Direzione Generale Dighe del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Gli intervalli di definizione di ciascun modello, coerenti con la sismicità dell'area, sono sintetizzati in Tabella 5.6.

Tabella 5.6. Intervalli di definizione in termini di magnitudo e distanza-sito sorgente per ciascuna
legge di attenuazione selezionata

Modello di propagazione	Mw	R _{jb} [km]
Akkar e Bommer (2010)	5 – 7,6	0 - 100
Bindi et al. (2011)	4 - 6,9	0 - 200
Bindi et al. (2014)	4 - 7,6	0 - 300





Le leggi adottate hanno il vantaggio di utilizzare la stessa metrica di magnitudo, M_w , e di distanza, ovvero la minima distanza tra il sito e la proiezione in superfice della rottura, o distanza di Joyner e Boore (R_{jb}) compatibile, dopo conversione, con un modello di sorgente basato su zone sismogenetiche ad aree.

Le leggi fanno anche riferimento alla stessa misura di intensità del moto sismico ovvero la media geometrica delle componenti orizzontati degli spettri elastici di pseudo-accelerazione calcolati con smorzamento pari al 5%.

Hanno inoltre il vantaggio di essere state calibrate anche sui dati storici italiani.

I risultati presentati sono stati ottenuti tramite un software disponibile in letteratura per l'analisi probabilistica di pericolosità sismica sito-specifico OpenQuake-Engine v. 3.10.1, (Pagani et al 2014), testato e validato dal programma di ricerca PEER (Pacific Earthquake Engineering Research).

Le analisi sono state effettuate considerando suolo di classe A della norma italiana (NTC 2018).

Nelle analisi sono state simulate tutte le possibili rotture tridimensionali che possono provocare un terremoto nella zona di interesse. Questo ha richiesto la definizione di parametri descrittivi della rottura quali lo strike, il dip ed il rake (Aki & Richards 1980), il rapporto di forma della rottura (assumendo quest'ultima quadrata) e la profondità dell'ipocentro della rottura (5 km). Si è assunto nel presente caso che le rotture siano tutte di tipo diretto.

Nei calcoli, le variabili aleatorie di magnitudo e distanza sono state discretizzate con passo pari a 0,05 e 2 km rispettivamente; come distanza si fa riferimento alla distanza di Joyner & Boore o Rjb (la distanza minima tra il sito e la proiezione in superficie del piano di faglia, Joyner e Boore 2011), ovvero la metrica assunta dalle leggi di attenuazione scelte, attraverso la relazione semi-empirica di Montaldo et al 2005.

5.2.2 Curve di pericolosità

L'obiettivo principale dell'analisi di pericolosità consiste nel determinare il numero medio di terremoti che, nell'unità di tempo (tipicamente un anno), causano il superamento al sito di una certa soglia di una misura di intensità scelta. In altri termini, l'analisi di pericolosità permette di calcolare, per una (pseudo) accelerazione spettrale, S_a , corrispondente ad un certo periodo naturale di vibrazione, T, e fattore di smorzamento, il tasso dei terremoti che causano il superamento della soglia (S_a). Tale tasso, indicato con $\lambda_{Sa(T)>Sa}$, definisce il processo di Poisson che descrive l'occorrenza dei terremoti che causano il superamento della soglia al sito di interesse nell'intervallo di tempo.

Quindi, la probabilità che il numero di terremoti che causano il superamento della soglia $N_{Sa(T)>Sa}(\Delta T)$ al sito nell'intervallo ΔT sia pari ad *n* è fornita dalla seguente equazione:

$$P[N_{Sa(T)>sa}(\Delta T) = n] = \frac{(\lambda_{Sa(T)>sa} \cdot \Delta T)^n}{n!} \cdot e^{-\lambda_{Sa(T)>sa} \cdot \Delta T}.$$

Per un sito soggetto a s sorgenti sismiche, $\lambda_{Sa(T)>Sa}$ è calcolato attraverso la seguente espressione, conosciuta come integrale di pericolosità.

$$\lambda_{Sa(T)>sa} = \sum_{j=1}^{n_T} \left\{ \sum_{i=1}^{s} \nu_i \cdot \iint_{M,R} P[Sa(T) > sa | M = m, R = r] \cdot f_{M,R,i}(m,r) \cdot dm \cdot dr \right\}_j \cdot p_j$$

Nell'equazione, il pedice *j* indica il j-esimo degli n_r rami considerati nell'analisi, il peso del quale è pari a p_i . Il pedice $i = \{1, 2, ..., s\}$ denota la i-esima sorgente sismica, caratterizzata dal tasso dei





terremoti, v_i , con magnitudo compresa tra una magnitudo minima (m_{min}) di interesse e la massima ritenuta possibile per la sorgente (m_{max}) . Il termine $f_{M,R,i}(m,r)$ rappresenta la distribuzione congiunta di magnitudo (M) e distanza sito-sorgente (R). Si noti che i termini che compaiono nell'equazione non considerano le metriche di magnitudo e distanza adottate nel presente studio avendo carattere generale.

Infine, P[Sa(T) > sa|M = m, R = r] rappresenta la probabilità di superamento della soglia, condizionata ad un determinato valore di magnitudo e distanza. Tale probabilità è tipicamente calcolata attraverso una legge di attenuazione, la quale modella il logaritmo di Sa(T) secondo una distribuzione normale.

$log(Sa) = \mu_{m,r} + \sigma \cdot \varepsilon$

dove $\mu_{m,r} \in \sigma \cdot \varepsilon$ rappresentano il valore mediano e il residuo del logaritmo di Sa(T), rispettivamente. In particolare, $\sigma \cdot \varepsilon$ è una variabile aleatoria normale di media nulla e deviazione standard pari a σ , mentre ε è il residuo totale standardizzato, ovvero il numero di deviazioni standard attraverso cui la generica realizzazione del logaritmo di Sa(T), log(Sa), differisce da $\mu_{m,r}$. Tipicamente, il residuo è caratterizzato da due componenti, denominati residuo inter-evento, distribuito secondo una gaussiana di media nulla e deviazione standard σ_{inter} , e residuo intra-evento, distribuito secondo una gaussiana di media nulla e deviazione standard σ_{inter} . Residuo inter- e intra-evento sono due variabili aleatorie stocasticamente indipendenti. Pertanto, la deviazione standard del residuo totale, di utilizzo nelle analisi di pericolosità sito-specifico, è ottenuta come $\sigma = \sqrt{\sigma_{inter}^2 + \sigma_{intra}^2}$ (Giorgio e lervolino, 2016).

La curva di pericolosità per la misura di intensità scelta è ottenuta per diversi valori di soglia e del tasso di superamento.

Per il presente studio le curve di pericolosità sono state calcolate per quattordici accelerazioni spettrali corrispondenti a diversi periodi naturali di vibrazione (da 0 a 2,0 s).

La scelta di tali misure di intensità è derivata da due esigenze:

- coprire un intervallo di periodi di interesse fino a 2,0 s;
- scegliere misure di intensità comuni alle leggi di attenuazione scelte per l'analisi in modo da evitare interpolazioni per periodi strutturali non comuni.

In Figura 5.5 sono rappresentate le curve di pericolosità per tutte le accelerazioni spettrali considerate, ottenute come media pesata delle curve dei singoli rami. Il tasso complessivo dei terremoti al sito in esame (ovvero il tasso in corrispondenza del valore di accelerazione nullo) è pari a 3397 eventi per anno.









Le curve corrispondenti alle ordinate spettrali Sa(T = 0s), Sa(T = 0.5s), sono riportate in Figura 5.6 e in Figura 5.7 e in , rispettivamente. Tali ordinate spettrali sono state scelte perché considerate significative rispetto all'insieme di periodi considerati.



Figura 5.6. Curve di pericolosità per T = 0 secondi. In nero la curva risultata dall'albero logico. Sono inoltre rappresentate le curve costituenti i singoli rami dell'albero logico





Green Pow

Figura 5.7. Curve di pericolosità per T = 0,5 secondi. Sono inoltre rappresentate le curve per i singoli rami dell'albero logico

Oltre alla curva ottenuta come media pesata dei risultati dei singoli rami (indicata in legenda con "albero logico"), sono inoltre mostrate le curve per ciascun ramo. Sebbene i risultati dei rami individuali non siano molto diversi tra loro, è possibile osservare che, come atteso, gli andamenti delle curve mostrano delle differenze imputabili ai tassi ottenuti secondo le due differenti completezze e i modelli di propagazione adottati nei calcoli. Ad esempio, appare evidente che il tasso complessivo dei terremoti al sito non è lo stesso per i singoli rami. Questo risultato è maggiormente chiaro ricordando che:

- alle diverse completezze del catalogo i corrispondono diversi parametri delle relazioni di Gutenberg-Richter e quindi anche diversi tassi per zona;
- il tasso al sito associato ad una misura di intensità pari a zero (i.e., tasso complessivo di eventi al sito) dipende anche dalla legge di attenuazione. Infatti, si è scelto di non estrapolare alcun modello otre i propri intervalli di definizione e le tre leggi di attenuazione utilizzate hanno diversi intervalli di definizione in termini sia di magnitudo che di distanza sito-sorgente. Ad esempio, la legge ITA14 è definita per magnitudo momento compresa tra 4 e 7,6 e R_{jb} entro 300km, mentre la AB10 considera magnitudo momento tra 5 e 7,6 e distanze entro 100km dal sito. Quest'ultima quindi comporta che i terremoti minori di M_w=5 e/o più distanti di 100km siano trascurati. Ne consegue che, per lo stesso sito, il tasso complessivo di terremoti ottenuto tramite la prima legge sia maggiore di quello ottenuto tramite la seconda.

5.2.3 Spettri a pericolosità uniforme

Lo spettro a pericolosità uniforme (UHS Uniform Hazard Spectrum) è uno spettro le cui ordinate hanno la stessa probabilità di essere superate in un certo periodo di tempo, ovvero l'intervallo temporale che mediamente intercorre tra due superamenti consecutivi è lo stesso per tutte le ordinate. Tale intervallo temporale è detto periodo di ritorno. Fissato il periodo di ritorno, lo UHS è calcolato a partire





dalle curve di pericolosità: le accelerazioni spettrali sono ottenute infatti intercettando le curve di Figura 5.5 con la retta di ordinata pari al reciproco del periodo di ritorno scelto e leggendo i valori corrispondenti sull'asse delle ascisse.

Il periodo di ritorno, usualmente indicato con T_R , da assumere per la costruzione dello spettro dipende dallo stato limite di interesse, dalla vita nominale, V_n , e dal coefficiente d'uso, C_u , della struttura, che varia con la classe d'uso della stessa. In particolare, esso è ottenuto attraverso la seguente espressione, riportata nella Circolare alle NTC:

$$T_r = -\frac{V_n \cdot C_u}{\log(1 - P_{\nu r})}$$

in cui *P*_{vr} è fornito dalla normativa e rappresenta la probabilità di superamento da considerare per ciascuno dei sette periodi di ritorno richiesti.

Gli spettri calcolati per questi tempi di ritorno sono riportati in Figura 5.8 -fino Figura 5.13. Ciascuna figura mostra lo spettro costruito a partire dalle curve ottenute come media pesata delle curve dei singoli rami e quelli relativi ai rami individuali.

In Tabella 5.7 sono riportati, per ciascun periodo di ritorno, i valori di pseudo-accelerazione in corrispondenza dei periodi T=0,0 s, T=0,5 s, T=1,0 s e T=2,0 s.

In generale, nonostante i risultati non cambino in maniera significativa da un ramo all'altro, per periodi compresi tra 0,0 s e 0,9 s si riscontrano alcune minime differenze tra le diverse leggi di attenuazione.

Periodo di ritorno T _r [anni]	Probabilità di superamento P _{vr}	Sa(T=Os) [g]	Sa(T=0,5s) [g]	Sa(T=1s) [g]	Sa(T=2s) [g]
50	0,64	0,055	0,037	0,011	0,004
101	0,39	0,089	0,065	0,022	0,007
201	0,22	0,128	0,102	0,037	0,012
475	0,10	0,191	0,170	0,067	0,023
975	0,05	0,254	0,253	0,105	0,036
1950	0,03	0,327	0,353	0,157	0,054
2475	0,02	0,355	0,399	0,178	0,061

Tabella 5.7. Ordinate degli UHS ai periodi di ritorno considerati nell'analisi







Figura 5.8. UHS con periodo di ritorno pari a 101 anni. Sono inoltre rappresentati gli spettri per i singoli rami dell'albero logico



Figura 5.9. UHS con periodo di ritorno pari a 201 anni. Sono inoltre rappresentati gli spettri per i singoli rami dell'albero logico







Figura 5.10. UHS con periodo di ritorno pari a 475 anni. Sono inoltre rappresentati gli spettri per i singoli rami dell'albero logico



Figura 5.11. UHS con periodo di ritorno pari a 975 anni. Sono inoltre rappresentati gli spettri per i singoli rami dell'albero logico







Figura 5.12. UHS con periodo di ritorno pari a 1950 anni. Sono inoltre rappresentati gli spettri per i singoli rami dell'albero logico



Figura 5.13. UHS con periodo di ritorno pari a 2475 anni. Sono inoltre rappresentati gli spettri per i singoli rami dell'albero logico





5.2.4 Confronto con gli spettri di norma

In questa sezione sono confrontati gli spettri UHS della sezione precedente con quelli della NTC2018 (da Figura 5.15 a Figura 5.20).

E' importante sottolineare che le leggi di attenuazione adottate in questo studio (AB10, ITA10 e ITA14) sono stimate a partire dalla media geometrica delle componenti orizzontali dei segnali registrati, in linea con le più moderne pratiche scientifiche, mentre, quelle della mappa nazionale (MPS04) sono ancora definite in massima componente.

Pertanto, per effettuare un confronto consistente, gli UHS sono stati convertiti utilizzando il valore mediano della distribuzione statistica del rapporto tra massima componente e media geometrica delle componenti orizzontali presentata in Beyer e Bommer, 2006. La dispersione di tale distribuzione è ritenuta trascurabile rispetto alla dispersione tipiche delle leggi di attenuazione.

Dal confronto emerge che:

- per tempi di ritorno Tr=50, 101 e 201 anni lo spettro di norma è sempre superiore a quello UHS per ogni periodo proprio;
- per il tempo di ritorno Tr=475 anni lo spettro UHS è confrontabile con quello di norma nel tratto ascendente iniziale dello spettro per mostrare un picco più elevato fino a circa 0,15 secondi; dopo 0,15 secondi lo spettro di norma è sempre più elevato di quello UHS;
- per tempi di ritorno più elevati (Tr =975, 1950 e 2475 anni) fino a 0,20-0,25 secondi (periodo massimo di interesse delle strutture di progetto) lo spettro UHS è ben superiore a quello proposto dalla norma;



Figura 5.14. Confronto tra spettro di norma e UHS modificato in massima componente per periodo di ritorno pari a 50 anni







Figura 5.15. Confronto tra spettro di norma e UHS modificato in massima componente per periodo di ritorno pari a 101 anni



Figura 5.16. Confronto tra spettro di norma e UHS modificato in massima componente per periodo di ritorno pari a 201 anni







Figura 5.17. Confronto tra spettro di norma e UHS modificato in massima componente per periodo di ritorno pari a 475 anni



Figura 5.18. Confronto tra spettro di norma e UHS modificato in massima componente per periodo di ritorno pari a 975 anni







Figura 5.19. Confronto tra spettro di norma e UHS modificato in massima componente per periodo di ritorno pari a 1950 anni



Figura 5.20. Confronto tra spettro di norma e UHS modificato in massima componente per periodo di ritorno pari a 2475 anni





6. ANALISI DETERMINISTICA DI PERICOLOSITA' SISMICA

6.1 Introduzione

I principali passi dell'analisi sono:

- 1) selezione di scenari di riferimento con definizione delle caratteristiche principali degli eventi per le sorgenti sismiche più significative;
- 2) propagazione dell'evento attraverso leggi di attenuazione.

Si precisa che l'analisi deterministica non fornisce alcuna indicazione sulla probabilità di accadimento dello scenario analizzato, né tiene in conto delle numerose incertezze in gioco.

6.2 Database di sorgenti sismogenetiche individuali DISS

Per il sito della diga di Lago Ballano sono state prese in considerazione le strutture sismogenetiche catalogate dal "Database of Individual Seismogenic Sources" – DISS (DISS Working Group, 2015).

Il database DISS segnala, per la zona in esame, una faglia, <u>sorgente sismogenetica ITISO50 –</u> <u>Garfagnana North</u> (vedi par.4.3) che si estende a ovest della diga con una distanza minima del sito dalla proiezione in superficie del piano di faglia (Joyner e Boore, 1981) di circa 17,3 km e un valore della massima magnitudo osservata pari a 6,4 Mw (quella dell'ultimo evento associato alla faglia).

L'area presenta una elevata sismicità con magnitudo elevate (superiore a 5) a breve distanza dal sito (inferiore a 25 km).

Le caratteristiche del massimo evento generabile dalla sorgente ITISO50 sono determinate dalla massima magnitudo riportata nel catalogo ($M_{w,max} = 6,4$) e dalla minima distanza tra la faglia e il sito ($D_{min}=17,3$ km).

6.3 Leggi di attenuazione

La legge di attenuazione adottata per l'analisi deterministica è la ITA10. Questa è stimata a partire dalla media geometrica delle componenti orizzontali dei segnali registrati. Per effettuare un confronto consistente con gli spettri di norma, i risultati dell'analisi deterministica sono stati convertiti in massima componente utilizzando il valore mediano della distribuzione statistica del rapporto tra massima componente e media geometrica delle componenti orizzontali presentata in Beyer e Bommer, 2006.

6.4 Risultati dell'analisi deterministica di pericolosità sismica

I risultati dell'analisi deterministica (relativa ad ITIS050) sono stati determinati al 84esimo percentile. In Figura 6.1 è riportato lo spettro deterministico delle accelerazioni stimate al sito della diga Lago Ballano.

È possibile osservare che il valore dell'accelerazione spettrale attesa è inferiore ad 1g per tutti i periodi.







Figura 6.1. Spettro di accelerazione deterministico per la sorgente ITIS050





7. CONFRONTO DEI RISULTATI DELL'ANALISI DI PERICOLOSITÀ

7.1 Dati del confronto

Nello specifico dello sbarramento di Lago Ballano, viene esplicitato il confronto dei risultati delle analisi di pericolosità svolte con approccio probabilistico con il riferimento normativo e con le informazioni/risultati riportati nello studio e con analisi deterministica all'84simo percentile.

Il confronto è stato eseguito per lo stato limite di danno, caratterizzato da un periodo di ritorno di 100 anni e per lo stato limite di collasso, caratterizzato da un periodo di ritorno di 1946 anni.

Per lo stato limite di danno si è ritenuto opportuno confrontare i seguenti dati:

- uniform hazard spectrum risultante dall'analisi di pericolosità sismica svolta con approccio probabilistico;
- spettro di normativa per il sito specifico calcolato interpolando i dati disponibili;

e a scopo qualitativo e di paragone si sono anche confrontati i risultati provenienti da:

 analisi deterministica degli eventi su base storica più significativi che hanno interessato la diga riportati nel catalogo CPTI15 (evento del 1920 con M = 6,53 e D = 24,9 km).

Per lo stato limite di collasso si è invece ritenuto opportuno confrontare i seguenti dati:

- uniform hazard spectrum risultante dall'analisi di pericolosità sismica svolta con approccio probabilistico;
- spettro di normativa per il sito specifico calcolato interpolando i dati disponibili;
- analisi deterministica della sorgente sismogenetica più significativa risultante dall'inquadramento sismotettonico (DISS ITISO51-Garfagnana North, $M_w = 6,4, D = 17,3$ km);

e a scopo qualitativo e di paragone:

• analisi deterministica degli eventi su base storica più significativi riportati nel catalogo CPTI15 in tutto l'intervallo temporale del catalogo e nel periodo successivo alla realizzazione della diga (evento del 1920 con M = 6,53 e D = 24,9 km).

I risultati per lo stato limite di danno e per lo stato limite di collasso sono riportati nei paragrafi seguenti.





7.2 Confronto per Stato Limite di Danno

I risultati del confronto tra gli spettri di accelerazione a **componente orizzontale** per la valutazione della pericolosità sismica allo SLD sono rappresentati in Figura 7.1 e in Tabella 7.1.

Dall'analisi dei dati emerge che i risultati dell'analisi di pericolosità sismica con **approccio probabilistico sono inferiori allo spettro di normativa per ogni periodo**.

Essendo lo spettro di norma superiore all'UHS risultante dall'analisi di pericolosità con approccio probabilistico per ogni periodo, in accordo alle prescrizioni della normativa (punto C 7.7.1 delle NTD 2014), nella verifica sismica **si adottano i risultati dello spettro di normativa**.



Figura 7.1. Confronto allo SLD tra gli spettri di accelerazione a componente orizzontale risultanti dallo studio di pericolosità sismica

Tabella 7.1. Confronto allo SLD tra i valori di PGA, Sa (T=0,1s) e Sa (T=0,2s) dei diversi scenari a componente orizzontale

	PGA [g]	<mark>Sa (T=0,1s) [g]</mark>	<mark>Sa (T=0,2s) [g]</mark>
NTC 2018	<mark>0,111</mark>	<mark>0,268</mark>	<mark>0,268</mark>
PSHA (UHS)	<mark>0,089</mark>	<mark>0,239</mark>	<mark>0,222</mark>
DA84 diga	<mark>0,154</mark>	<mark>0,307</mark>	<mark>0,461</mark>





In analogia, per la componente verticale, risulta che:

- per i periodi di interesse della diga (T ≤ 0,2 secondi) i risultati dell'analisi di pericolosità con approccio probabilistico sono inferiori allo spettro di normativa;
- per periodi superiori a 0,3 secondi i risultati dell'analisi di pericolosità con approccio probabilistico sono invece superiori allo spettro di normativa.

Essendo lo spettro di normativa superiore all'UHS risultante dall'analisi di pericolosità sismica con approccio probabilistico (analisi eseguita in questo caso solo con il modello di attenuazione ITA10 e non tramite albero logico), nella verifica sismica **si adottano i risultati dello spettro di normativa in quanto risultano più gravosi per i periodi di interesse.**

Di seguito si riporta in Figura 7.2 e Tabella 7.2 il confronto tra gli spettri di accelerazione a componente verticale risultanti dallo studio di pericolosità sismica allo stato limite di danno.



Figura 7.2. Confronto allo SLD tra gli spettri di accelerazione a componente verticale risultanti dallo studio di pericolosità sismica

Tabella 7.2. Confronto allo SLD tra i valori di PGA, Sa (T=0,1s) e Sa (T=0,2s) dei diversi scenari a componente verticale

	PGA [g]	<mark>Sa (T=0,1s) [g]</mark>	<mark>Sa (T=0,2s) [g]</mark>
NTC 2018	<mark>0,050</mark>	<mark>0,121</mark>	<mark>0,109</mark>
PSHA (UHS)	<mark>0,041</mark>	<mark>0,110</mark>	<mark>0,085</mark>





7.3 Confronto per Stato Limite di Collasso

I risultati del confronto tra gli spettri di accelerazione a componente orizzontale per la valutazione della pericolosità sismica allo SLC sono rappresentati in Figura 7.3 e in Tabella 7.3.

Dall'analisi dei dati emerge che:

- per i periodi di interesse della diga (T ≤ 0,2 secondi) i risultati dell'analisi di pericolosità con approccio probabilistico PSHA (UHS) sono superiori allo spettro di normativa di circa il 6 - 12% e superiori allo spettro deterministico DA84 – DISS di più dell'50%;
- per periodi superiori a circa 0,25 secondi i risultati dell'analisi di pericolosità con approccio probabilistico sono inferiori allo spettro di normativa.

Di conseguenza, per la componente orizzontale si adotta lo spettro di accelerazione con approccio probabilistico in quanto più gravoso per i periodi di interesse.



Figura 7.3. Confronto allo SLC tra gli spettri di accelerazione a componente orizzontale risultanti dallo studio di pericolosità sismica

Tabella 7.3. Confronto allo SLC tra i valori di PGA, Sa (T=0,1s) e Sa (T=0,2s) dei diversi scenari a componente orizzontale

	PGA [g]	<mark>Sa (T=0,1s) [g]</mark>	<mark>Sa (T=0,2s) [g]</mark>
NTC 2018	0,321	<mark>0,770</mark>	<mark>0,770</mark>
PSHA (UHS)	<mark>0,327</mark>	<mark>0,803</mark>	<mark>0,820</mark>
DA84 - DISS	0.206	<mark>0.415</mark>	<mark>0.585</mark>

In analogia, per la **componente verticale**, risulta che:

- per i periodi di interesse della diga (T ≤ 0,2 secondi) i risultati dell'analisi di pericolosità con approccio probabilistico sono inferiori allo spettro di normativa;
- per periodi superiori a circa 0,4 secondi i risultati dell'analisi di pericolosità con approccio probabilistico sono invece superiori allo spettro di normativa.





Essendo lo spettro di normativa superiore all'UHS risultante dall'analisi di pericolosità sismica con approccio probabilistico (analisi eseguita in questo caso solo con il modello di attenuazione ITA10 e non tramite albero logico), nella verifica sismica **si adottano i risultati dello spettro di normativa in quanto risultano più gravosi per i periodi di interesse.**

Di seguito si riporta in Figura 7.4 e Tabella 7.4 il confronto tra gli spettri di accelerazione a componente verticale risultanti dallo studio di pericolosità sismica allo stato limite di collasso.





Tabella 7.4. Confronto allo SLC tra i valori di PGA, Sa (T=0,1s) e Sa (T=0,2s) dei diversi scenari a componente verticale

	PGA [g]	<mark>Sa (T=0,1s) [g]</mark>	<mark>Sa (T=0,2s) [g]</mark>
NTC 2018	<mark>0,245</mark>	<mark>0,588</mark>	<mark>0,432</mark>
PSHA (UHS)	<mark>0,185</mark>	<mark>0,420</mark>	<mark>0.350</mark>





8. CONCLUSIONI

Il presente rapporto presenta i risultati dello studio sismotettonico e dell'analisi di pericolosità sismica per il progetto definitivo di miglioramento sismico e di recupero dello diga di Lago Ballano (PR).

Il sito in esame è stato dapprima oggetto di una preliminare valutazione della pericolosità sismica così come prevista dalla normativa tecnica NTC2018. Successivamente, partendo da un'analisi della macroarea in cui è inserito lo sbarramento, sono stati individuati i sismi storici e le sorgenti sismogenetiche più prossime all'impianto.

Sulla base delle sorgenti sismogenetiche sono state effettuate in parallelo due analisi di pericolosità sismica differenti: una svolta con approccio probabilistico, l'altra di tipo deterministico effettuata sulla sorgente sismogenetica più significativa.

Una volta presentate entrambe le analisi di pericolosità, è stato effettuato un confronto dei risultati con il riferimento normativo al fine di effettuare, sia per la componente orizzontale che per la componente verticale del moto sismico, la scelta degli spettri di riferimento da adottare per i differenti Stati Limite (SLD e SLC).

Nello specifico, dal confronto dei risultati dell'analisi di pericolosità sismica è emerso che, per la componente orizzontale del moto sismico allo Stato Limite di Collasso SLC (periodo di ritorno di 1946 anni), lo spettro di risposta calcolato con l'approccio probabilistico PSHA (UHS) è risultato superiore allo spettro previsto dalla normativa tecnica NTC 2018 e allo spettro che emerge dall'analisi deterministica (sorgente sismogenetica più significativa DISS - ITISO51-Garfagnana North, $M_w = 6,4, D = 17,3$ km).

Per quanto riguarda invece la componente verticale dell'accelerazione allo SLC, lo spettro da più gravoso è risultato quello previsto dalla normativa NTC 2018.

In condizioni di Stato Limite di Danno SLD (periodo di ritorno di 100 anni), sia a componente orizzontale che verticale, lo spettro di normativa NTC 2018 è risultato sempre superiore ai risultati dell'analisi probabilistica.





BIBLIOGRAFIA

Aki K, Richards P. Quantitative seismology: theory and methods. San Francisco: 1980.

Akkar S, Bommer JJ. Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East. Seismological Research Letters 2010; 81(2): 195–206. DOI: 10.1785/gssrl.81.2.195.

Argnani, A., Barbacini, G. Bernini, M., Camurri, F., Ghielmi, M., Papani, G., Rizzini, F., Rogledi, S., Torelli, L., 2003. Gravity tectonics driven by Quaternary uplift in the northern Apennines: insight from the La Spezia-Reggio Emilia geotransect. Quaternary International, vol. 101–102, pag.13–26.

Barchi, M. R., De Feyter A., Magnani M. B., Minelli G., Pialli G., Sotera B. M. (1998). Extensional tectonics in the Northern Apennines (Italy): Evidence from the CROP03 deep seismic reflection line. Memorie della Società Geologica Italiana, vol. 52, pag. 527-538.

Bennett, R.A., Serpelloni, E., Hreinsdóttir, S., Brandon, M.T., Buble, G., Basic, T., Casale, G., Cavaliere, A., Anzidei, M., Marjonovic, M., Minelli, G., Molli, G., Montanari, A. (2012). Syn-convergent extension observed using the RETREAT GPS network, northern Apennines, Italy. Journal of Geophysical Research, vol. 117, n. B4. doi:10.1029/2011JB008744.

Bernini M., Papani G. (2002). La distensione della fossa tettonica della Lunigiana nord-occidentale (con Carta geologica alla scala 1:50000). Bollettino della Società Geologica Italiana, vol. 121, pag. 313-341.

Beyer K, Bommer JJ. Relationships between Median Values and between Aleatory Variabilities for Different Definitions of the Horizontal Component of Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2006; **96**(4A): 1512–1522. DOI: 10.1785/0120050210.

Bindi D, Massa M, Luzi L, Ameri G, Pacor F, Puglia R, et al. Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5 %-damped PSA at spectral periods up to 3.0 s using the RESORCE dataset. Bulletin of Earthquake Engineering 2014; 12(1): 391–430. DOI: 10.1007/s10518-013-9525-5.

Bindi D, Pacor F, Luzi L, Puglia R, Massa M, Ameri G, et al. Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. Bulletin of Earthquake Engineering 2011; 9(6): 1899–1920. DOI: 10.1007/s10518-011-9313-z.

Boncio, P., Brozzetti, F., Lavecchia, G., 2000. Architecture and seismotectonics of a regional low-angle normal fault zone in Central Italy. Tectonics, vol. 19, pag. 1038-1055.

Bonini, M., (2013). Fluid seepage variability across the external Northern Apennines (Italy): structural controls with seismotectonic and geodynamic implications. Tectonophysics, vol. 590, pag. 151–174.

Carmignani, L., Decandia, F.A., Disperati, L., Fantozzi, P.L., Kligfield, R., Lazzarotto, A., Liotta, D., Meccheri, M., 2001. Inner Northern Apennines, in "Anatomy of an Orogen: the Apennines and Adjacent Mediterranean Basins", a cura di G.B. Vai e I.P. Martini, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pag. 197-214.

Carmignani, L., Kligfield, R., 1990. Crustal extension in the Northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane core complex. Tectonics, vol. 9, n. 6, pag. 1275-1303.

Carmignani, L., Conti, P., Massa, G., Vaselli, L., Mancini, S. (2006). Lineamenti geologici delle Alpi Apuane. Acta apuana, Suppl. V, pag. 9-23.

Cenni, N., Mantovani, E., Baldi, P., Viti, M. (2012). Present kinematics of Central and Northern Italy from continuous GPS measurements. Journal of Geodynamics, vol. 58, pag. 62-72.





Chiarabba, C., Jovane, L., Di Stefano, R., 2005. A new view of Italian seismicity using 20 years of instrumental recordings. Tectonophysics, vol. 395, n. 3-4, pag. 251-268.

Chiarabba C., Palano M., 2017. Progressive migration of slab break-off along the southern Tyrrhenian plate boundary: Constraints for the present day kinematics. *Journal of Geodynamics, vol. 105*, pag. 51-61.

Circolare del ministero delle infrastructure e dei trasporti, n.7 del 21 Gennaio 2019: "Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 gennaio 2018. Consiglio Superiore Dei Lavori Pubblici GU n35 Del 11022019 2019.

Cornell CA. ENGINEERING SEISMIC RISK ANALYSIS. vol. 58. 1968.

Cornell CA. Engineering seismic risk analysis. Bulletin of the Seismological Society of America 1968; **58**(5): 1583–1606.

CPTI Working Group. Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, version 2004 (CPTI04). 2004.

CS.LL.PP. Decreto Ministeriale: Norme tecniche per le costruzioni, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 42, 20 febbraio, Suppl. Ordinario n. 8. lst. Polig. e Zecca dello Stato S.p.a., Rome (in Italian). 2018.

Devoti, R., Esposito, A., Pietrantonio, G., Pisani, A.R., Riguzzi, F., 2011. Evidence of large-scale deformation patterns from GPS data in the Italian subduction PTundary. Earth and Planetary Science Letters, vol. 311, n. 3-4, pag. 230-241.

DISS Working Group (2010). Version 3.1.1: a compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <u>http://www.diss.rm.ingv.it/diss/</u>, © INGV 2010 – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

DISS Working Group (2015). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.0. http://diss.rm.ingv.it/diss/.

Giorgio M, Iervolino I. On Multisite Probabilistic Seismic Hazard Analysis. DOI: 10.1785/0120150369.

Gruppo di Lavoro MS (2008). Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica. Conferenza delle Regioni e Province autonome- Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e CD-rom. http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137.

Gutenberg B, Richter CF. Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America 1944; **34**: 185–188.

lervolino I, Chioccarelli E, Convertito V. Engineering design earthquakes from multimodal hazard disaggregation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2011; **31**(9): 1212–1231. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.05.001.

Iervolino I, Chioccarelli E, Giorgio M. Aftershocks' effect on structural design actions in Italy. Bulletin of the Seismological Society of America 2018; **108**(4): 2209–2220. DOI: 10.1785/0120170339.

Iervolino I, Galasso C, Cosenza E. REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis 2010; 8: 339–362. DOI: 10.1007/s10518-009-9146-1.

lervolino I, Giorgio M, Cito P. The peak over the design threshold in strong earthquakes. Bulletin of Earthquake Engineering 2019; **17**(3): 1145–1161. DOI: 10.1007/s10518-018-0503-9.

Iervolino I, Giorgio M, Cito P. Which earthquakes are expected to exceed the design spectra? *Earthquake Spectra* 2019(In press). DOI: 10.1193/032318EQS066O.





lervolino I, Giorgio M. E' possibile evitare il superamento delle azioni di progetto nell'area epicentrale di terremoti forti? *Progettazione Sismica* 2017; **8**: 25–32.

Iervolino I, Giorgio M, Polidoro B. Sequence-Based Probabilistic Seismic Hazard Analysis. Bulletin of the Seismological Society of America 2014; **104**(2): 1006–1012. DOI: 10.1785/0120130207.

INGV (2007). http://cnt.rm.ingv.it/~earthquake/data_id/2199802450/event.php.

ISIDe working group (2016). Version 1.0, DOI: 10.13127/ISIDe, http://cnt.rm.ingv.it/iside.

Joyner WB, Boore DM. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America* 1981; **71**(6): 2011–2038.

Kottke, Albert R., and Ellen M. Rathje. (2008). "Technical manual for Strata." Report No.: 2008/10. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Kramer, S. L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J

Lavoro G. Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 mazrzo 2003. Rapporto Conclusivo per Il Dipartimento Della Protezione Civile, Aprile 2004, Istituto Nazionale Di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Milano-Roma, Italy, Available at Http://ZonesismicheMi IngvIt/ (Last Accessed April 2019) 2004.

Martelli, L., Santulin, M., Sani, F., Tamaro, A., Bonini, M., Rebez, A., Corti, G., Slejko, D. (2017a). Seismic hazard of the Northern Apennines based on 3D seismic sources. Journal of Seismology. DOI 10.1007/s10950-017-9665-1.

Martelli, L., Bonini, M., Calabrese, L., Corti, G., Ercolessi, G., Molinari, F.C., Piccardi, L., Pondrelli, S., Sani, F., Severi, P. (2017b). Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe, con Note illustrative. Regione Emilia-Romagna, Ed, 94.

Martini, I. P., Sagri, M. (1993). Tectono-sedimentary characteristics of Late Miocene-Quaternary extensional basins of the Northern Apennines, Italy. Earth-Science Reviews, vol. 34, n. 3, pag. 197-233.

Meletti C, D'Amico V, Martinelli F, Rovida A. Valutazione della completezza e delle sequenze del catalogo CPTI15. 2018.

Meletti C, Galadini F, Valensise G, Stucchi M, Basili R, Barba S, et al. A seismic source zone model for the seismic hazard assessment of the Italian territory. *Tectonophysics* 2008; **450**(1–4): 85–108. DOI: 10.1016/j.tecto.2008.01.003.

Meletti C. Progetto S1: proseguimento della assistenza al DPC per il completamento e la gestione della mappa di pericolosità sismica previs- ta dall'Ordinanza PCM 3274/2003 e progettazione di ulteriori sviluppi. Report Finale, Disponibile a Http://Esse1Milngv It/Data/S1_Rendicontazione_Scientifica_finale_S1Pdf (Lultimo Accesso Aprile 2018), 70 Pp 2007.

Montaldo V, Faccioli E, Zonno G, Akinci A, Malagnini L. Treatment of ground-motion predictive relationships for the reference seismic hazard map of Italy. *Journal of Seismology* 2005; **9**: 295–316.

Pagani M, Monelli D, Weatherill G, Danciu L, Crowley H, Silva V, et al. OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model. Seismological Research Letters 2014; **85**(3): 692–702. DOI: 10.1785/0220130087.

Pondrelli, S., Salimbeni, S., Ekström, G., Morelli, A., Gasperini, P., Vannucci, G., 2006. The Italian CMT dataset from 1977 to the present. Physics of the Earth and Planetary Interiors, vol. 159, n. 3-4, pag. 286-303.

Rovida A, Locati M, Camassi R, Lolli B, Gasperini P, Azzaro R, et al. Italian Parametric Earthquake





Catalogue (Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani) version CPTI15 release 1.5 Macroseismic data management and revision. DOI: 10.6092/INGV.IT-CPTI15.

Rovida, A., Locati, M., Camassi, R., Lolli, B., Gasperini P. CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. *Istituto Nazionale Di Geofisica e Vulcanologia* 2016. DOI: 10.6092/INGV.IT-CPTI15.

F Sabetta, A Pugliese - Bulletin of the Seismological Society of America, 1996. <u>Estimation of response</u> spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions.

Serpelloni, E., Anzidei, M., Baldi, P., Casula, G., Galvani, A. (2006). GPS measurement of active strains across the Apennines. Annali di Geofisica., vol. 49, n. 1, pag. 319–329.

Stramondo, S., Vannoli, P., Cannelli, V., Polcari, M., Melini, D., Samsonov, S., Moro, M., Bignami, C., Saroli, M., 2014. X-and C-Band SAR Surface Displacement for the 2013 Lunigiana Earthquake (Northern Italy): A Breached Relay Ramp?. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 7, n. 7, pag. 2746-2753.

Stucchi M, Albarello D, Albini P, Camassi R, Castelli V, Meletti C, et al. GNGTS-Atti del 23° Convegno Nazionale / 08.08 LA COMPLETEZZA DEL CATALOGO DEI TERREMOTI ITALIANI 2004 VALUTATA PER LE ZONE SISMOGENETICHE ATTRAVERSO GLI APPROCCI STORICO E STATISTICO.

Stucchi M, Meletti C, Montaldo V, Crowley H, Calvi GM, Boschi E. Seismic hazard assessment (2003-2009) for the Italian building code. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2011; **101**(4): 1885–1911. DOI: 10.1785/0120100130.

Valensise G, Pantosti D. Intorduction to Database. Annals of Geophysics 2001; 44(4): 797–808.

Viti, M., Mantovani, E., Babbucci, D., Tamburelli, C., Cenni, N., Baglione, M., D'Intinosante, V. (2015). Belt-parallel shortening in the Northern Apennines and seismotectonic implications. International Journal of Geosciences, vol. 6, pag. 938-961.





APPENDICE A STIMA DEI PARAMETRI DELLE ZONE SU BASE DI COMPLETEZZA STORICA

Si riportano i grafici rappresentativi delle stime dei coefficienti di Gutenberg-Richter per ciascuna zona sismogenetica.

Ogni figura si riferisce ad una zona ed è divisa in due pannelli. A sinistra, in scala logaritmica, sono riportati i tassi cumulati annuali per classe di magnitudo ottenuti da CPTI15 con completezza storica e da CPTI04 (Tassi₁₅ e Tassi₀₄ in legenda, rispettivamente). A tali tassi sono sovrapposte le funzioni di Gutenberg-Richter tarate su di essi (GR₁₅, GR₀₄). Le stesse funzioni sono confrontate a destra in scala lineare; nel pannello di destra è anche evidenziata la localizzazione della zona sismogenetica a cui si fa riferimento.


























APPENDICE B STIMA DEI PARAMETRI DELLE ZONE SU BASE DI COMPLETEZZA STATISTICA

Si riportano i grafici rappresentativi delle stime dei coefficienti di Gutenberg-Richter per ciascuna zona sismogenetica.

Le figure sono nello stesso formato già descritto per l'Appendice A.

Il calcolo riferito al CPTI15 considera la stima della completezza statistica.

Sebbene i risultati di CPTIO4 qui riportati sono gli stessi del caso precedente e fanno quindi riferimento alla completezza storica, si ritiene che il confronto grafico possa comunque essere utile.



















