UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PERUGIA

DIPARTIMENTO DI FISICA E GEOLOGIA

Corso di Laurea Magistrale in
Scienze e Tecnologie Geologiche

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI PERUGIA

TESI DI LAUREA

DETERMINAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE, CON METODO SPERIMENTALE, DI UN'AREA PRESSO CASCIA (PG), IN SEGUITO AL TERREMOTO DEL 2016

Laureando:

(NOME STUDENTE)

Sabatini Alessandro

Relatore:

(NOME DOCENTE)

Prof.ssa Pauselli Cristina

Correlatore:

(NOME CORRELATORE)

Dott. Geol. Arcaleni Michele

Anno Accademico 2019/2020

INDICE

Riassunto……5
Abstract……..7
1 Introduzione……9
2 Inquadramento geografico, geomorfologico, geologico – stratigrafico e sismico dell'area in esame……10
2.1 Inquadramento geografico, geomorfologico e geologico stratigrafico……..10
2.2 Descrizione della sismicità storica e recente dell'area in esame……14
3 Indagini geofisiche realizzate e determinazione del modello sismostratigrafico……21
3.1 Indagini geofisiche analizzate per la ricostruzione del modello sismostratigrafico…21
3.2 Risultati delle indagini geofisiche realizzate……..22
3.2.1 Dati Down Hole……22
3.2.2 Risultati indagini di sismica a rifrazione in onde SH con analisi in tecnica tomografica……...27
3.2.3 Risultati della misura di fondo a stazione singola con analisi HVSR……32
3.2.4 Determinazione delle Vs dal p.c. fino al bedrock sismico tramite i dati HVSR integrati con i dati di sismica a rifrazione e down hole (processo di inversione vincolato)…34
3.2.5 Formule relative al periodo proprio di sito……36
4 Determinazione degli spettri di risposta sismica……37
4.1 Riferimenti alla normativa NTC per quanto riguarda la definizione dell'azione sismica……..37
4.2 Descrizione dell'approccio semplificato di normativa (categorie di sottosuolo)……38
4.2.1 Concetti di verifica agli stati limite……39
4.2.2 Azione Sismica……45
4.3 Determinazione dello spettro di risposta sismica del sito in esame attraverso approccio semplificato di normativa (NTC 17/01/18 - categorie di sottosuolo)……46

4.4 Determinazione dello spettro di risposta tramite Microzonazione Sismica di livello 2 (MS2), come da "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" (Dipartimento Protezione Civile)……...54

4.4.1 Abachi utilizzati in base ai parametri riferiti al sito di interesse……57

4.4.2 Spettro di risposta del sito in esame ottenuto con microzonazione sismica di livello 2 (MS2)……..58

4.5 Specifiche indagini per la determinazione dell'azione sismica attraverso l'uso di accelerogrammi naturali……...63

4.5.1 Scelta degli accelerogrammi…….63

4.5.2 Determinazione dei parametri di disaggregazione per RSL……..64

4.5.3 Risposta sismica locale…….66

4.5.4 Considerazioni relative agli spettri di risposta orizzontali..,……83

4.5.5 Considerazioni relative agli spettri di risposta verticali……84

5 Dati accelerometrici – spettro di risposta "reale"……..86

5.1 Descrizione della rete accelerometrica e attività svolte……86

5.2 Effetti locali della componente accelerometrica verticale emersi dall'analisi di accelerogrammi Re.Si.R. (Rete Sismica Regionale) e rapporto con quanto previsto dalle norme tecniche (NTC 17/01/18)……...89

5.2.1 Normativa tecnica e componente verticale del sisma. Quando considerarla…91

5.2.2 Come la normativa "quantifica" la componente verticale del sisma……91

5.3 Effetti della componente verticale del sisma in base ai dati accelerometrici sperimentali acquisiti dalla rete Re.Si.R……...97

5.4 Utilità degli accelerogrammi naturali verticali per la determinazione dello spettro di output verticale da modellazioni numeriche di risposta sismica locale (RSL)……102

5.5 Confronto tra lo spettro verticale di normativa (per SLV, classe d'uso II) e lo spettro ottenuto dalla scalatura dell'accelerogramma verticale del terremoto di Norcia (mg 4.0) registrato a Cascia……...104

6 Conclusioni……..106

6.1 Effetti della direzionalità e della distanza del sisma sullo spettro di risposta verticale. Esempio di Cascia sulla base di accelerogrammi acquisiti dalla rete Re.Si.R……106

6.2 Effetti della direzionalità e della distanza del sisma sullo spettro di risposta orizzontale. Esempio di Cascia sulla base di accelerogrammi acquisiti dalla rete Re.Si.R..107

6.3 Spettri di risposta determinati con accelerogrammi registrati dalle stazioni Re.Si.R e scalati ad una accelerazione a_g di 0.256 g……..109

6.3.1 Confronto tra i risultati dell'analisi sperimentale e quelli di RSL per le due situazioni più critiche……..114
Bibliografia…….116

RIASSUNTO

In una ristretta area situata presso l'abitato di Cascia (PG), i più forti terremoti della crisi sismica dell'Italia Centrale del 2016-17 hanno provocato effetti disastrosi e relativamente circoscritti rispetto alle zone limitrofe. In particolare, la forte scossa del 30 ottobre 2016, di magnitudo 6.5 avvenuta tra Norcia e Cascia, ha reso inagibili e prossimi al crollo, edifici già restaurati in seguito alle crisi sismiche del 1979 e del 1997. Nello specifico, la zona in questione si trova lungo una stretta fascia situata a circa 500 m ad est rispetto al centro storico del paese, tra Via IV Novembre e Viale Cavour. Gli edifici che si trovano in questa ristretta area hanno subito, nonostante i recenti interventi di consolidamento sismico avvenuto soprattutto nella ricostruzione post 1997, un danneggiamento molto superiore (100 % di ordinanze di sgombero) rispetto ad edifici situati a poche decine di metri di distanza. Si ha evidenza, infatti, che condomini posti all'esterno di questa stretta fascia, pur essendo stati costruiti in periodi analoghi rispetto a quelli danneggiati e con materiali e tipologie costruttive molto simili (spesso numero di piani, simile cubatura, cemento armato), hanno reagito molto meglio alla scossa, lesionandosi solo marginalmente o, addirittura, non manifestando alcun effetto in seguito all' evento del 30 ottobre 2016.

Al fine di determinare la causa di tale fenomeno e, conseguentemente, di suggerire le migliori soluzioni progettuali da poter applicare in fase di ricostruzione agli edifici sopra citati, viene svolto un innovativo studio di risposta sismica locale (RSL), integrando i più comuni metodi finora utilizzati (spettri di normativa NTC 17/01/18, microzonazione sismica di livello 2, RSL con l'uso di accelerogrammi naturali spettrocompatibili e modellazione numerica con analisi monodimensionale lineare equivalente) con un modello sperimentale basato sulla determinazione "reale" dello spettro di risposta attraverso l'analisi di accelerogrammi registrati direttamente nel sito in questione.

Tale approccio sperimentale per la determinazione dello "spettro reale" di RSL è stato possibile grazie ad una collaborazione con l'Osservatorio Sismico "A. Bina" che, oltre a svolgere le indagini geofisiche per la modellazione sismostratigrafica di sito ha posizionato, dall'inizio del 2019, una stazione accelerometrica professionale proprio in corrispondenza del sito in esame. È stato possibile quindi analizzare accelerogrammi di terremoti avvenuti nel corso di un intero anno e quantificare gli effetti locali reali, in termini di spettri di risposta orizzontali e verticali ed in termini di contenuto in frequenza, attraverso modellazione numerica.

La collaborazione tra il sottoscritto e l'ente è nata in seguito a due stage svolti presso il centro sismico, (effettuati in base a quanto previsto dalla convenzione tra l'Università di Perugia e l'Osservatorio Sismico "A. Bina"), si è sviluppata in seguito all'interesse scientifico del sito in questione e anche da un punto di vista di prevenzione del rischio sismico. Vi è da considerare che un valore aggiunto è dato dal fatto che il sottoscritto è residente proprio in un edificio situato all'interno dell'area in questione. Ciò ha reso possibile fornire sia il supporto logistico che l'assistenza tecnica per il buon funzionamento delle sofisticate apparecchiature installate.

I risultati emersi dal presente studio mettono in chiara evidenza che la normativa tecnica attuale (Norme tecniche sulle Costruzioni – NTC 17/01/18) sottostima l'azione sismica di questo sito particolare e quindi, se i progettisti, nella delicata fase della ricostruzione, si basano su quanto prescritto dalle NTC per i loro progetti, le verifiche agli stati limite risultano non veritiere e, soprattutto, sottostimate rispetto alla reale risposta sismica di sito.

Anche utilizzando metodi più approfonditi per la valutazione degli spettri di risposta, come l'approccio di microzonazione sismica di livello 2, si ottengono degli spettri di risposta più bassi (e quindi meno cautelativi), rispetto agli spettri "reali".

L'approccio sperimentale utilizzato (analisi di accelerogrammi registrati nel sito per la durata di un anno) ha consentito di dimostrare che, nell'area in questione, vi sono effetti di amplificazione che "sfuggono" ai metodi applicati delle NTC e quindi non valutabili applicando alla lettera solamente gli strumenti normativi a disposizione.

Alla luce dei risultati ottenuti in seguito ad un anno di registrazioni accelerometriche "in continuo", è quantomeno possibile esprimere un parere rispetto alle migliori metodologie progettuali da applicare nella ricostruzione. Le tipologie di intervento ritenute migliori nell'area in questione, vanno tutte verso la scelta di soluzioni che adottano isolatori sismici. Si ritiene che, al fine di considerare i "veri" effetti del sisma e quindi per una reale e corretta progettazione, non ci si possa basare sullo spettro di categoria NTC ma debba essere svolto un approfondito e specifico studio di risposta sismica locale. I risultati emersi permettono di affermare che, nella progettazione degli edifici situati all'interno di tale area, debba essere considerato ugualmente lo spettro di risposta sismica verticale, anche nei casi in cui la normativa non lo richiede. I dati sperimentali analizzati dimostrano infatti che, se il terremoto è relativamente vicino al sito (come quello del 30 ottobre del 2016), la componente verticale risulta addirittura superiore rispetto a quella orizzontale. Ciò trova una conferma anche rispetto al quadro fessurativo degli edifici situati all'interno dell'area analizzata, i quali presentano pesanti lesioni dimostrabili solo considerando una forte presenza della componente verticale del sisma.

ABSTRACT

In a small area located near the town of Cascia (PG), the strongest earthquakes of the seismic crisis in Central Italy of 2016-17 caused disastrous and relatively limited effects compared to the surrounding areas. In particular, the strong earthquake of 30 October 2016, of magnitude 6.5 which occurred between Norcia and Cascia, made buildings that had already been restored following the seismic crises of 1979 and 1997 unusable and close to collapse. Specifically, the area in question is located along a narrow strip located about 500 m east of the historic center of the town, between Via IV Novembre and Viale Cavour. The buildings located in this restricted area have suffered, despite the recent seismic consolidation interventions that took place mainly in the post-1997 reconstruction, much greater damage (100% clearing orders) than buildings located a few tens of meters away. There is evidence, in fact, that condominiums located outside this narrow strip, although they were built in similar periods to those damaged and with very similar materials and construction types (often number of floors, similar cubature, reinforced concrete), reacted much better to the shock, injuring themselves only marginally or even showing no effect following the shock of 30 October 2016.

In order to determine the cause of this phenomenon and, consequently, to suggest the best design solutions that can be applied in the reconstruction phase to the buildings mentioned above, an innovative local seismic response study (RSL) is carried out, integrating the most common methods so far used (spectra of NTC 17/01/18 regulation, level 2 seismic microzonation, RSL with the use of natural spectrocompatible accelerograms and numerical modeling with equivalent linear one-dimensional analysis) with an experimental model based on the "real" determination of the response spectrum with the analysis of accelerograms recorded directly on the site in question.

This experimental approach for determining the "real spectrum" of RSL was possible thanks to a collaboration with the "A. Bina "who, in addition to carrying out the geophysical surveys for the seismostratigraphic modeling of the site, has positioned, since the beginning of 2019, a professional accelerometric station right at the site in question. It was therefore possible to analyze accelerograms of earthquakes that occurred over the course of an entire year and quantify the real local effects, in terms of horizontal and vertical response spectra and in terms of frequency content, through numerical modeling.

The collaboration between the undersigned and the institution was born following two internships carried out at the seismic center, (carried out in accordance with the provisions of the agreement between the University of Perugia and the "A. Bina" Seismic Observatory) and it was developed following the scientific interest of the site in question both from a scientific point of view and from a seismic risk prevention point of view. It must be considered that an added value is given by the fact that the undersigned resides in a building located within the area in question. This made it possible to provide both logistical support and technical assistance for the proper functioning of the sophisticated equipment installed.

The results that emerged from this study clearly highlight that the current technical regulations (Technical Standards on Construction - NTC 17/01/18) underestimate the seismic action of this particular site and therefore, if the designers, in the delicate phase of reconstruction, based on what is prescribed by the NTCs for their projects, the limit state checks are untrue and, above all, underestimated compared to the real seismic response of the site.

Even using more in-depth methods for evaluating response spectra, such as the level 2 seismic microzonation approach, lower (and therefore less conservative) response spectra are obtained, compared to "real" spectra.

The experimental approach used (analysis of accelerograms recorded at the site for a period of one year) allowed to demonstrate that, in the area in question, there are amplification effects that "escape" the applied methods of NTC and therefore cannot be evaluated by applying literally only the regulatory tools available.

In light of the results obtained following a year of “continuous” accelerometric recordings, it is at least possible to express an opinion regarding the best design methods to be applied in the reconstruction. The types of intervention deemed best in the area in question all go towards the choice of solutions that adopt seismic isolators. It is believed that, in order to consider the “true” effects of the earthquake and therefore for a real and correct design, it is not possible to rely on the NTC category spectrum but a thorough and specific study of local seismic response must be carried out. The results that emerged allow us to state that, in the design of buildings located within this area, the vertical seismic response spectrum must also be considered, even in cases where the legislation does not require it. In fact, the experimental data analyzed show that, if the earthquake is close (such as that of 30 October 2016), the vertical component is even higher than the horizontal one. This is also confirmed with respect to the crack pattern of the buildings located within the analyzed area, which show heavy demonstrable lesions only considering a strong presence of the vertical component of the earthquake.

1
INTRODUZIONE

In seguito alla sequenza sismica iniziata nel 2016, che ha interessato l'abitato di Cascia (PG), è sorto un grande interesse riguardo il danneggiamento di alcuni edifici posti in una fascia abbastanza ristretta della cittadina umbra, che già in seguito a recenti terremoti avevano subito consolidamenti sismici. Tali adeguamenti avrebbero dovuto assicurare una maggiore stabilità degli edifici stessi anche in seguito ad un evento sismico importante come quello avvenuto nella vicina Norcia il 30 Ottobre 2016, di magnitudo 6.5. Le osservazioni che hanno posticipato l'evento, hanno messo in evidenza che per tali strutture, il danno reale è stato superiore al danno atteso, rispetto ad altri edifici vicini, al di fuori di tale fascia, che al contrario non hanno subito alcun danno o sono stati interessati da danni lievi.

L'ipotesi alla base della presente ricerca è quella che lo spettro di risposta sismica utilizzato per la progettazione degli interventi di restauro e consolidamento pre-2016, calcolata sulla base di quanto prescritto dalle normative tecniche 2008 e precedenti, sia "sottostimata" rispetto alla risposta sismica "reale" del sito in questione. Quest'ultima viene valutata nel presente lavoro a partire da un lungo monitoraggio accelerometrico effettuato posizionando un accelerometro professionale nel sito specifico, in collaborazione con l'Osservatorio Sismico "A. Bina". Gli accelerogrammi registrati, hanno consentito, con opportune scalature, di ottenere degli spettri di risposta sismica "reali" sia orizzontali che verticali. Tali spettri vengono confrontati con gli spettri di risposta sismica "analitici" costruiti a partire dai dati delle indagini geofisiche realizzate (sismica a rifrazione, down hole e misurazione di rumore di fondo a stazione singola con tecnica HVSR) ed applicando scrupolosamente quanto prescritto dalla normativa attuale sulle costruzioni (NTC 17/01/18).

Lo scopo principale della ricerca, è quello di confrontare gli spettri "analitici" ottenuti dalla normativa con gli spettri "reali" ottenuti dal monitoraggio accelerometrico e quindi, di trovare una causa all'anomalo grado di danneggiamento sopra descritto e di proporre, sulla base dei risultati ottenuti, le migliori soluzioni progettuali da adottare in fase di ricostruzione.

2

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO, GEOMORFOLOGICO, GEOLOGICO – STRATIGRAFICO E SISMICO DELL'AREA IN ESAME

2.1 Inquadramento geografico, geomorfologico e geologico - stratigrafico

L'area della città di Cascia, presa in esame in questa tesi di laurea per gli studi di risposta sismica locale, si colloca nell'Umbria sud – orientale proprio in corrispondenza dell'Appennino Umbro – Marchigiano. In linea generale, l'appennino Umbro – Marchigiano costituisce la parte centrale dell'intero appennino, ed è disposto secondo una direzione NNW – SSE. Formatisi in seguito alla collisione tra placca sardo – corsa e placca adriatica (circa 16 milioni di anni fa), oggi gli appennini sono caratterizzati da un regime distensivo che tramite il lavoro di faglie dirette, riesce a dislocare i sovrascorrimenti (plasmati appunto durante il regime compressivo) formando veri e propri bacini (*conche intermontane*). Essi si frappongono dunque tra le varie catene montuose e sono bordati da faglie dirette (con andamento NW – SE, più recenti spostandosi da ovest verso est), che giustificano la forte sismicità dell'area, sia in epoca antica che attuale. Essendo Cascia al centro di uno di questi bacini recenti, è anch'essa caratterizzata da forte sismicità.

Queste depressioni, durante la loro formazione, sono state colmate da sedimenti fluvio - lacustri; ghiaie, sabbie, limi e argille. Gli strati più superficiali dell'area in esame, a quota inferiore rispetto al centro abitato, sono caratterizzati prevalentemente da argille, come testimoniato dai vari sondaggi effettuati in seguito alla sequenza sismica che ha colpito la cittadina nel 2016 (Fig. 2.1).

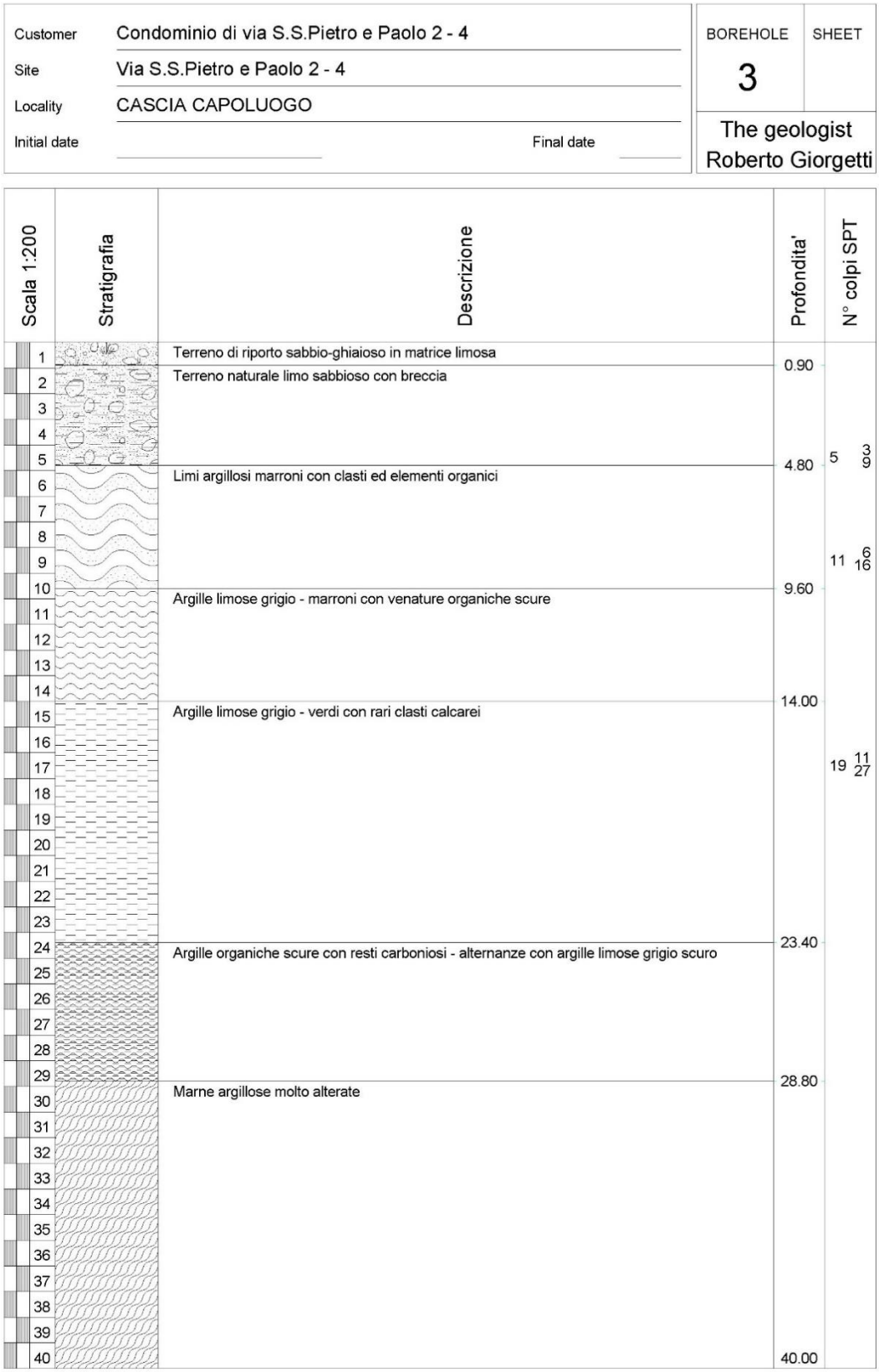


Figura 2.1: Stratigrafia derivata da un sondaggio effettuato nell'area in esame (Cascia).

Le unità geologiche affioranti ai bordi di tale bacino appartengono al dominio Umbro – Marchigiano, a partire dal Calcare Massiccio fino alla Scaglia Cinerea.

Come mostrato dalla cartografia regionale per Google Earth messa a disposizione dalla Regione Umbria (in formato kmz, foglio n. 337050, link: http://dati.umbria.it/dataset/carta-geologica-dell-umbria/resource/2c5ccac4-fc96-4749-b757-974d6f069e2c) (Fig. 2.2), il centro storico di Cascia poggia su Scaglia Rossa, mentre il punto di indagine (coordinate in WGS84: LAT: 42.718937, LONG 13.017884) nel bacino a quota minore, è prossimo ad un'area con Scaglia Cinerea affiorante (come si può osservare dalla legenda messa a disposizione dalla Regione Umbria, nella figura 2.2).

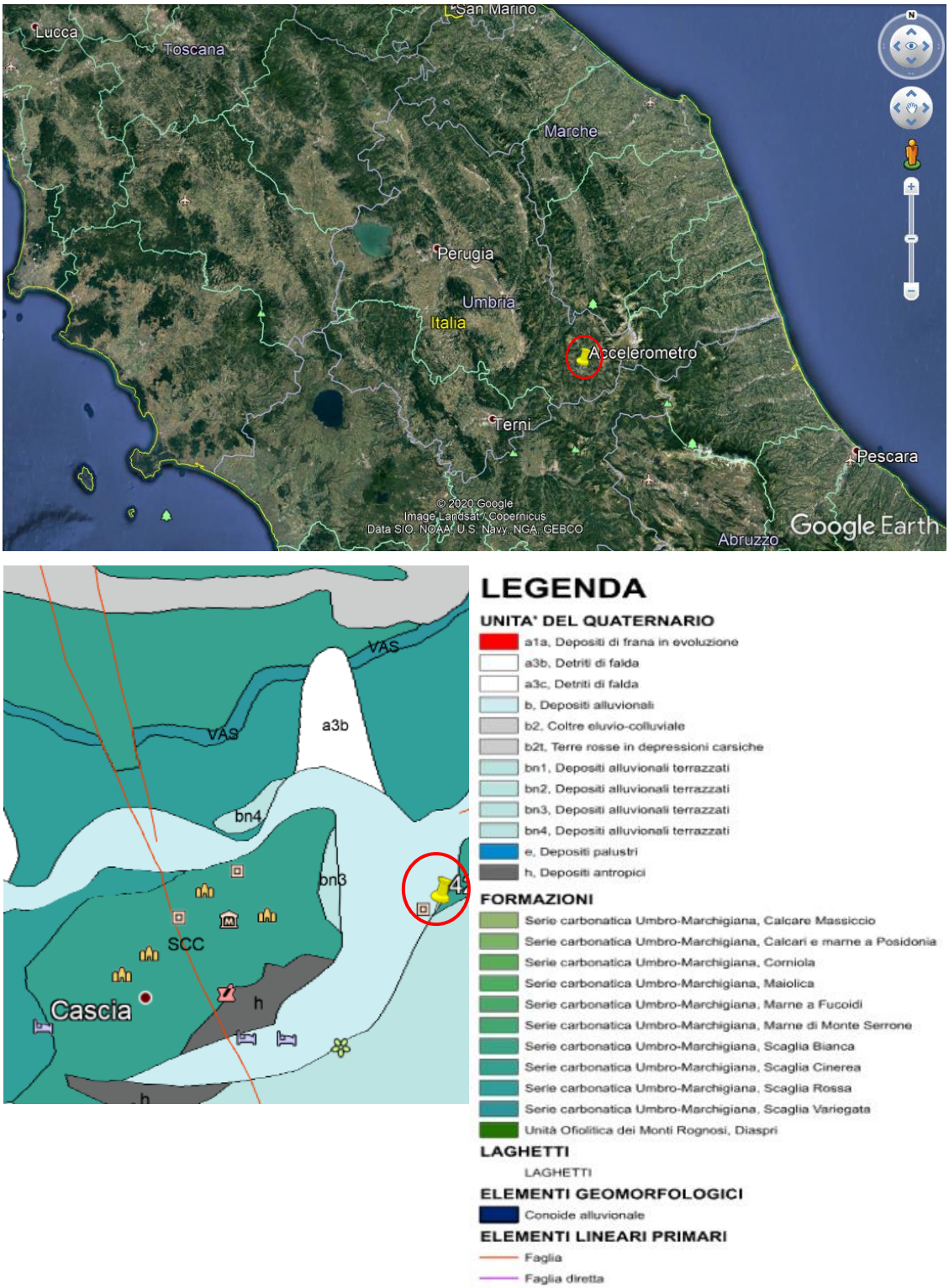


Figura 2.2: Localizzazione del punto di indagine sia su mappa a grande scala sia su mappa più dettagliata. L'immagine più specifica mostra le formazioni sulla quale poggia il centro storico di Cascia, situato a quota superiore rispetto al punto di indagine (con coordinate: LAT 42.718937, LONG 13.017884). Come mostrato dalla legenda accanto, il punto in esame all'interno dell'area di interesse, è situato al di sopra di depositi alluvionali in prossimità di un'area con scaglia cinerea affiorante.

2.2 Descrizione della sismicità storica e recente dell'area in esame

Come accennato, l'abitato di Cascia si trova in corrispondenza di un bacino di recente formazione, dovuta alla presenza di faglie dirette (a direzione appenninica NW-SE) associate a un regime distensivo e in grado di produrre terremoti di importate entità.
Segue un elenco degli eventi che hanno determinato effetti, più o meno importanti, sulla cittadina umbra nel tempo, riportato sul catalogo ufficiale INGV (catalogo CPTI15 – DBMI 15).

Cascia

PlaceID	IT_48514
Coordinate (lat, lon)	42.718, 13.013
Comune (ISTAT 2015)	Cascia
Provincia	Perugia
Regione	Umbria
Numero di eventi riportati	103

Effetti	In occasione del terremoto del				
Int.	**Anno Me Gi Ho Mi Se**	**Area epicentrale**	**NMDP**	**Io**	**Mw**
9	1328 12 01	Valnerina	13	10	6.49
9	1599 11 06 01 25	Valnerina	20	9	6.07
NF	1639 10 07	Monti della Laga	39	9-10	6.21
5	1702 10 18	Valnerina	5	5	4.16
6-7	1702 11 14	Valnerina	2	5-6	4.40
9	1703 01 14 18	Valnerina	197	11	6.92
8	1703 01 16 13 30	Appennino laziale-abruzzese	22		
5-6	1703 06 29 18	Valnerina	3	5-6	4.40

Effetti	In occasione del terremoto del				
Int.	**Anno Me Gi Ho Mi Se**	**Area epicentrale**	**NMDP**	**Io**	**Mw**
6-7	1716 10 04	Valnerina	1	6-7	4.86
7	1719 06 27 06 30	Valnerina	16	8	5.59
8	1730 05 12 05	Valnerina	115	9	6.04
6-7	1760 01 12	Valnerina	6	5-6	4.40
F	1767 06 05 01 30	Valle Umbra	10	7-8	5.45
NF	1838 01 05 14	Valnerina	8	7	5.10
5	1838 02 14 07 30	Valnerina	24	8	5.48
6-7	1859 08 22	Valnerina	20	8-9	5.73
5-6	1878 02 13 19 30	Cascia	8	4-5	4.22
8	1879 02 23 18 30	Valnerina	15	8	5.59
6	1882 05 26 04 15	Cascia	16	5	4.45
5	1897 01 19 19 20	Poggiodomo	19	6	4.68
NF	1899 02 07 12 35 3	Appennino umbro-marchigiano	49	4	4.04
NF	1899 07 19 13 18 5	Colli Albani	122	7	5.10
F	1902 10 23 08 51	Reatino	77	6	4.74
4-5	1903 11 02 21 52	Valnerina	33	6	4.81
5	1904 09 02 11 21	Maceratese	59	5-6	4.63
NF	1906 01 29 15 05	Valle del Tronto	50	5	4.28
5	1906 02 05 16 34	Valnerina	55	5	4.41
NF	1906 07 01 00 50	Reatino	41	5	4.29

Effetti	In occasione del terremoto del				
Int.	**Anno Me Gi Ho Mi Se**	**Area epicentrale**	**NMDP**	**Io**	**Mw**
4	1907 01 23 00 25	Adriatico centrale	93	5	4.75
3	1908 03 17 03 59	Marche meridionali	54	5-6	4.61
NF	1909 10 01 01 08	Spoleto	8	5-6	4.40
3-4	1910 03 06 22 22	Monti Reatini	15	4-5	3.93
5	1910 06 29 13 52	Valnerina	58	7	4.93
4-5	1910 12 22 12 34	Monti della Laga	19	5	4.30
4	1910 12 22 17 18	Monti della Laga	3	4-5	3.93
5	1910 12 26 16 30	Monti della Laga	50	5-6	4.56
5-6	1915 01 13 06 52 4	Marsica	1041	11	7.08
5-6	1915 09 16 02 58 4	Valnerina	2	4-5	3.93
5	1916 07 04 05 06	Monti Sibillini	18	6-7	4.82
6	1916 11 16 06 35	Alto Reatino	40	8	5.50
NF	1919 06 29 15 06 1	Mugello	565	10	6.38
5-6	1930 04 07 17 17 1	Monti Sibillini	28	5-6	4.50
5-6	1930 10 07 09 18 2	Cascia	2	4-5	3.93
4	1930 11 09 01 33	Monti Sibillini	17	5	4.31
6	1931 09 25 20 28 1	Cascia	1	6	4.63
NF	1938 08 12 02 28 3	Appennino laziale-abruzzese	55	5-6	4.56
4	1940 10 16 13 17	Val di Paglia	106	7-8	5.29

Effetti	In occasione del terremoto del				
Int.	**Anno Me Gi Ho Mi Se**	**Area epicentrale**	**NMDP**	**Io**	**Mw**
D	1943 01 16	Monti Sibillini	22	6-7	5.04
NF	1948 06 13 06 33 3	Alta Valtiberina	142	7	5.04
5-6	1950 09 05 04 08	Gran Sasso	386	8	5.69
6	1951 08 08 19 56	Gran Sasso	94	7	5.25
5	1957 03 12 16 20	Valnerina	62	5	4.16
4	1957 07 19 09 04 0	Valle Umbra	58	6-7	4.58
5	1958 05 08 00 13 2	Valnerina	17	5	4.25
NF	1960 02 24 01 51	Appennino umbro-marchigiano	25	5	4.32
6	1962 08 30 12 10	Valnerina	35	7	5.02
4	1963 01 25 05 27	Monti Sibillini	30	5	4.31
4	1963 02 02 19 34	Reatino	10	6	4.64
5	1963 05 19 22 45	Valnerina	12	6	4.74
7	1964 08 02 10 40	Valnerina	25	6	4.53
4-5	1969 09 26 23 40 3	Teramano	97	5	4.39
4	1970 09 07 14 02 2	Appennino umbro-marchigiano	56	5	4.35
4	1971 02 11 18 49 2	Valle del Chiascio	71	6	4.61
6	1971 04 02 01 43 5	Valnerina	68	6	4.50
6	1974 12 02 01 55 1	Valnerina	27	7-8	4.58
F	1979 01 25 23 53 0	Valnerina	8	5	4.44

Effetti	In occasione del terremoto del				
Int.	**Anno Me Gi Ho Mi Se**	**Area epicentrale**	**NMDP**	**Io**	**Mw**
8	1979 09 19 21 35 3	Valnerina	694	8-9	5.83
6	1980 02 28 21 04 4	Valnerina	146	6	4.97
NF	1980 11 23 18 34 5	Irpinia-Basilicata	1394	10	6.81
4	1984 04 29 05 02 5	Umbria settentrionale	709	7	5.62
4-5	1989 11 19 03 40 2	Valnerina	38	5	4.13
4	1989 12 22 06 48 1	Valle Umbra	114	5	4.44
3-4	1990 09 12 02 59 4	Valle Umbra	62	5-6	4.12
4	1992 10 24 18 44 4	Monti della Laga	32	5	4.08
2	1993 06 04 21 36 5	Valle del Topino	90	5-6	4.39
3-4	1993 06 05 19 16 1	Valle del Topino	326	6	4.72
3-4	1994 06 02 16 41 2	Aquilano	60	4-5	3.99
4-5	1996 10 20 19 06 5	Appennino laziale-abruzzese	100	5	4.36
3	1997 09 03 22 07 2	Appennino umbro-marchigiano	62	6	4.54
3	1997 09 07 23 28 0	Appennino umbro-marchigiano	57	5-6	4.19
6	1997 09 26 00 33 1	Appennino umbro-marchigiano	760	7-8	5.66
5-6	1997 09 26 09 40 2	Appennino umbro-marchigiano	869	8-9	5.97
4-5	1997 10 03 08 55 2	Appennino umbro-marchigiano	490		5.22
5	1997 10 06 23 24 5	Appennino umbro-marchigiano	437		5.47
6	1997 10 14 15 23 1	Valnerina	786		5.62

Effetti	In occasione del terremoto del				
Int.	**Anno Me Gi Ho Mi Se**	**Area epicentrale**	**NMDP**	**Io**	**Mw**
5	1997 10 23 08 58 4	Appennino umbro-marchigiano	56		3.86
5-6	1997 11 09 19 07 3	Valnerina	180		4.87
4-5	1998 02 07 00 59 4	Appennino umbro-marchigiano	62		4.41
4-5	1998 02 16 13 45 1	Valnerina	33		3.75
4-5	1998 03 21 16 45 0	Appennino umbro-marchigiano	141		5.00
5	1998 04 05 15 52 2	Appennino umbro-marchigiano	395		4.78
3-4	1998 08 15 05 18 0	Reatino	233	5-6	4.42
5	1999 10 10 15 35 5	Alto Reatino	79	4-5	4.21
5-6	1999 11 29 03 20 3	Monti della Laga	62	5-6	4.15
4	2000 09 02 05 17 0	Appennino umbro-marchigiano	115	5	4.40
2-3	2000 12 16 07 31 0	Ternano	129	5-6	4.29
NF	2004 12 09 02 44 2	Teramano	213	5	4.09
NF	2005 04 12 00 31 5	Maceratese	131	4	3.74
4-5	2005 12 15 13 28 3	Val Nerina	350	5	4.14
NF	2006 04 10 19 03 3	Maceratese	211	5	4.06
6	2016 08 24 01 36 3	Monti della Laga	221	10	6.18
6-7	2016 10 30 06 40 1	Valnerina	379		6.61
5	2017 01 18 10 14 0	Aquilano	280		5.70

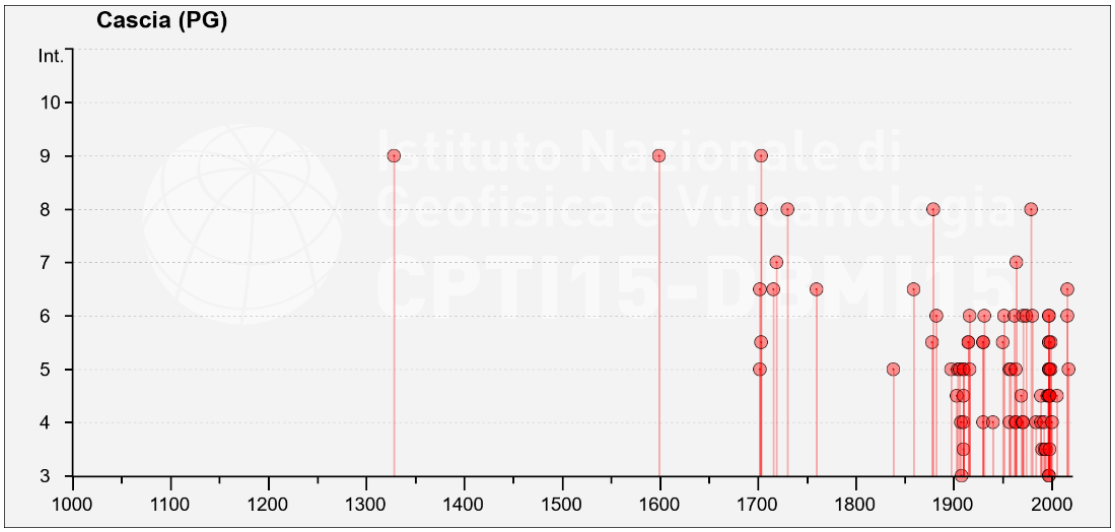


Figura 2.3: Estratto del catalogo parametrico INGV (link: https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query_place/), che mostra l'intensità macrosismica per ogni evento considerato.

La sismicità recente è rappresentata dalla mappa sottostante (Fig. 2.4), nella quale vengono localizzati alcuni terremoti (Mg>3.0) registrati dal 2005 al 2019 dalla rete sismica INGV, all'interno di un raggio di 30 Km da Cascia. Risultano 324 terremoti.

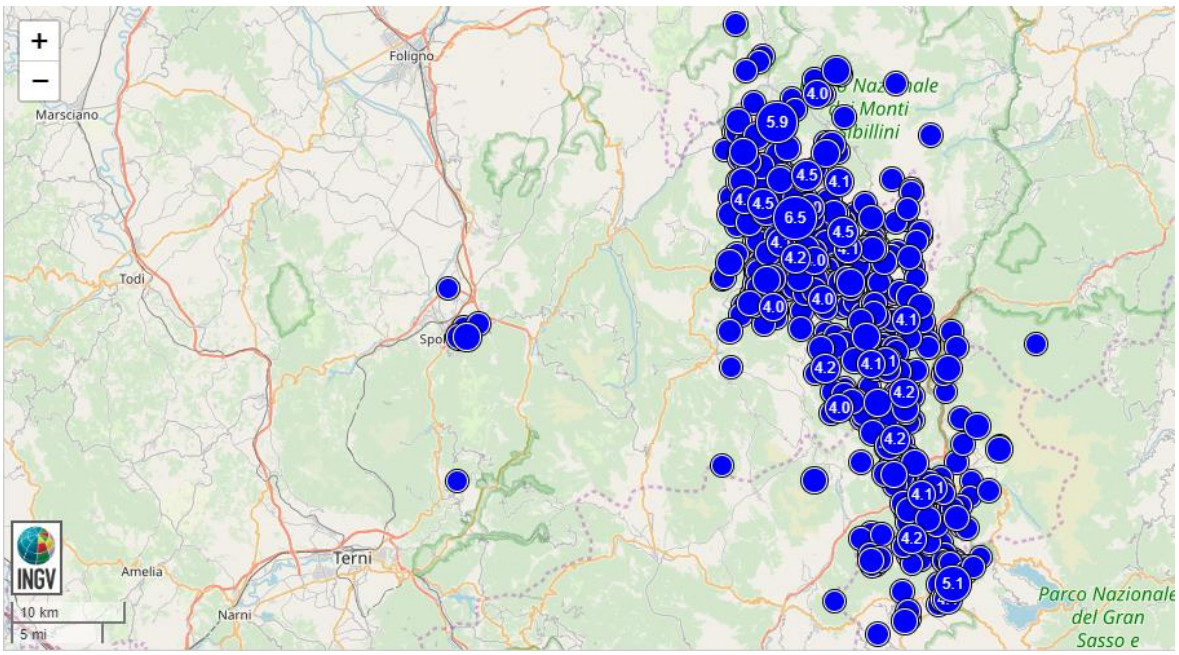


Figura 2.4: Mappa terremoti di magnitudo > 3.0 registrati dal 2005 al 2019 dalla rete sismica INGV in un raggio di 30 km da Cascia. Immagine ripresa dal catalogo parametrico INGV.

3

INDAGINI GEOFISICHE REALIZZATE E DETERMINAZIONE DEL MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO

3.1 Indagini geofisiche analizzate per la ricostruzione del modello sismostratigrafico

La sismostratigrafia è stata determinata attraverso l'utilizzo integrato di dati geofisici (Fig. 3.1) provenienti da una indagine Down Hole (profondità 32 metri), un'indagine di sismica a rifrazione in onde SH ed una misura di rumore di fondo a stazione singola con analisi dei dati con tecnica HVSR. La zona risulta omogenea dal punto di vista sismostratigrafico e quindi è stato possibile utilizzare un unico modello per tutta l'area di progetto.

Figura 3.1: Immagine creata in Google Earth raffigurante le indagini geofisiche svolte all'interno dell'area in esame (Cascia, PG).

3.2 Risultati delle indagini geofisiche

3.2.1 Dati Down Hole

L'indagine down hole (localizzazione in Fig. 3.2) ha permesso di determinare le velocità delle onde P ed S fino ad una profondità di 32 m dal p.c. In base a quanto prescritto dalle NTC 17/01/18, il parametro Vs_{eq} corrisponde a 240 m/s. Le V_S aumentano in modo graduale senza presentare particolari contrasti di velocità ne particolari inversioni. I depositi possono essere associati ad una categoria di sottosuolo tipo C.

Figura 3.2: Localizzazione dell'indagine down hole. Coordinate (WGS84): LAT 42.719312, LONG 13.019908).

Down Hole in onde P ed SH
Distanza dello sparo da bocca foro = 2.00 [m]

PRIMI ARRIVI

N° Geof.	Profondità [m]	Onde P [ms]	Onde S [ms]	Onde P (corretti) [ms]	Onde S (corretti) [ms]
1	2.00	3.00	8.00	2.12	5.66
2	4.00	5.25	20.25	4.70	18.11
3	6.00	6.50	30.38	6.17	28.82
4	8.00	8.63	42.13	8.37	40.87
5	10.00	9.88	50.63	9.68	49.64
6	12.00	10.88	57.75	10.73	56.96
7	14.00	12.38	70.00	12.25	69.30
8	16.00	13.25	75.50	13.15	74.92
9	18.00	14.50	83.50	14.41	82.99
10	20.00	15.63	92.75	15.55	92.29
11	22.00	17.00	98.25	16.93	97.85
12	24.00	18.50	107.13	18.44	106.75
13	26.00	19.75	113.00	19.69	112.67
14	28.00	20.50	119.75	20.45	119.45
15	30.00	22.00	128.13	21.95	127.84
16	32.00	23.00	130.75	22.96	130.50

VELOCITA' ONDE P

Strato	Profondità [m]	Velocità [m/s]
1	10	1017
2	24	1668
3	32	1666

PARAMETRI ONDE S

Strato	Profondità [m]	Velocità [m/s]	Poisson [-]	Shear [kPa]	Young [kPa]	Bulk [kPa]
1	**10**	**201**	0.47	80802	237557	1319761
2	**24**	**244**	0.48	119072	352453	2937106
3	**32**	**325**	0.47	211250	621074	3450410

VELOCITA' MEDIE V_{S30}

Geofono	$V_{Seq}=V_{S30}$ [m/s]
orizzontale S	240

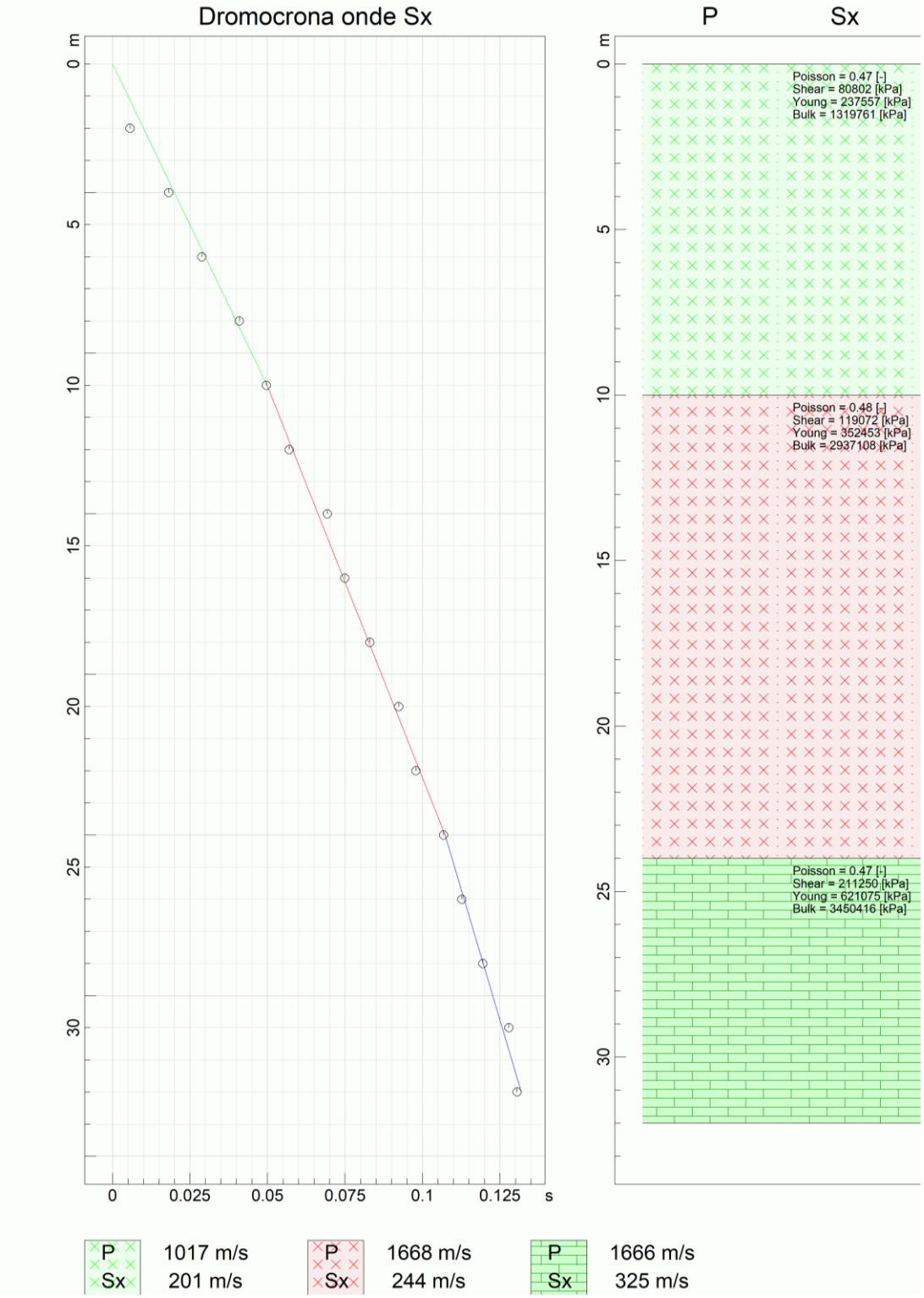


Figura 3.3: Modello semplificato per rifrattori sismici (down hole).

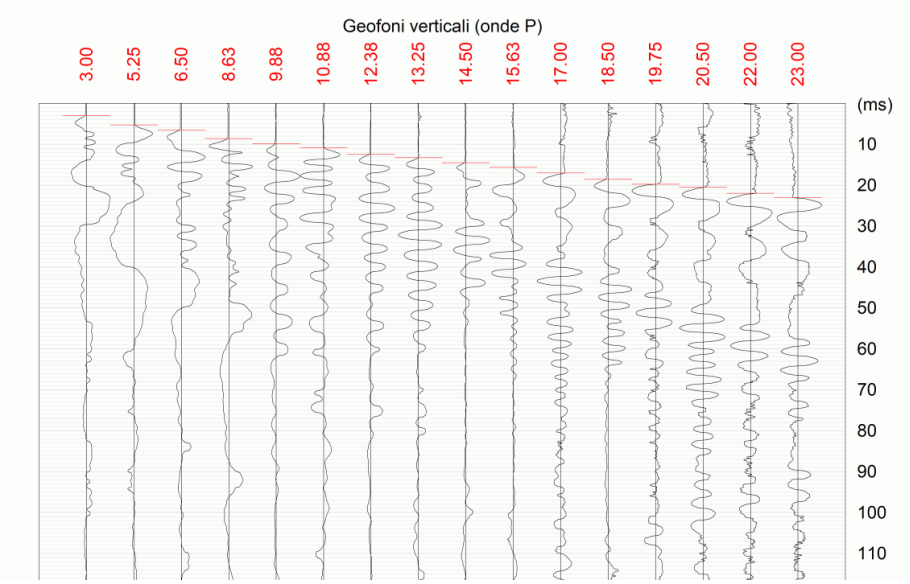


Figura 3.4: Sismogrammi onde P acquisiti.

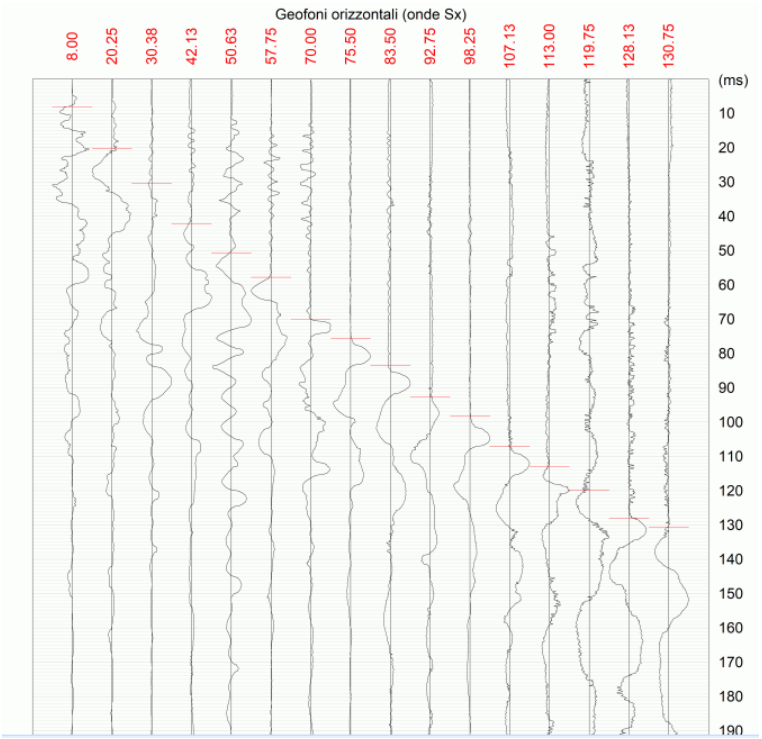


Figura 3.5: sismogrammi onde SX acquisiti.

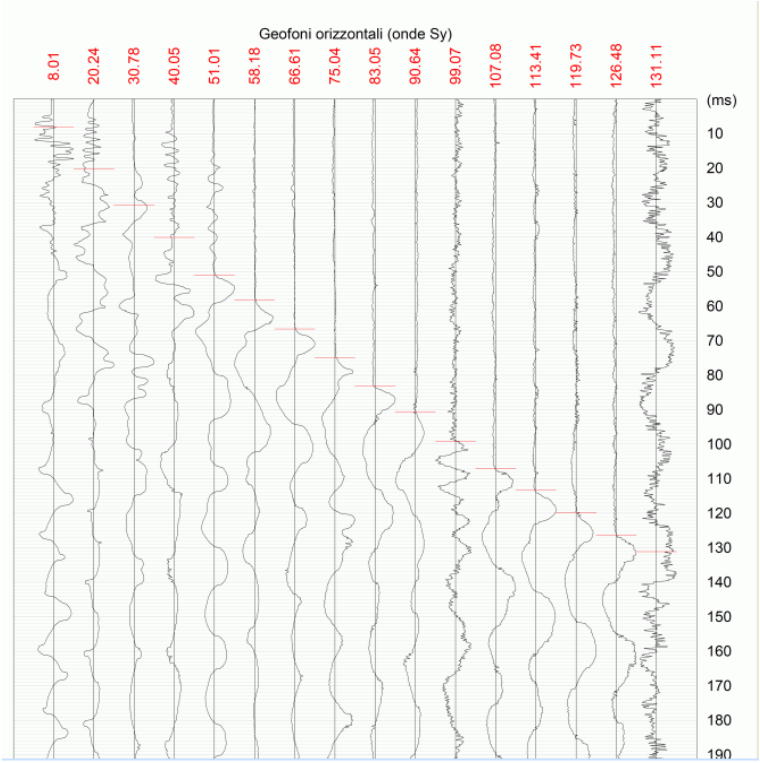


Figura 3.6 Sismogrammi onde SY acquisiti.

Figura 3.7: Preparazione per l'esecuzione dell'indagine down hole nel sito di Cascia.

3.2.2 Risultati Indagini di sismica a rifrazione in onde SH con analisi in tecnica tomografica

È stata realizzata una campagna di sismica a rifrazione in onde SH (localizzazione in Fig. 3.8), con lo scopo di ricostruire l'assetto sismostratigrafico dei livelli più superficiali e di fornire la velocità delle onde S per tutto lo spessore investigato. Le indagini sono state svolte in linea con quanto indicato nelle NTC18. Per la valutazione della categoria di sottosuolo attraverso il parametro Vs_{eq}, la campagna geofisica di sismica a rifrazione è stata eseguita attraverso l'esecuzione di uno stendimento sismico (A–B) in onde SH. Il profilo A-B assume una lunghezza di 96 metri. I dati sono stati acquisiti ed analizzati in tecnica tomografica (Fig. 3.9 e Fig. 3.10). Sono stati effettuati n. 5 punti di energizzazione equidistanti.

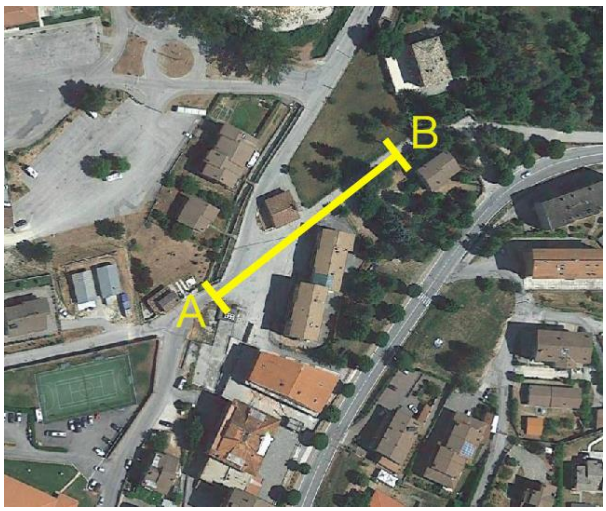


Figura 3.8: Localizzazione del profilo di sismica a rifrazione in onde SH con estremi A e B, le cui coordinate sono definite nella tabella seguente.

Punto del profilo	**Latitudine**	**Longitudine**
A	42.718818	13.017293
B	42.719351	13.018230

Profilo sismico a rifrazione, onde SH: sezione tomografica

Sezione A–B onde SH: modello di velocità (modello multistrato)

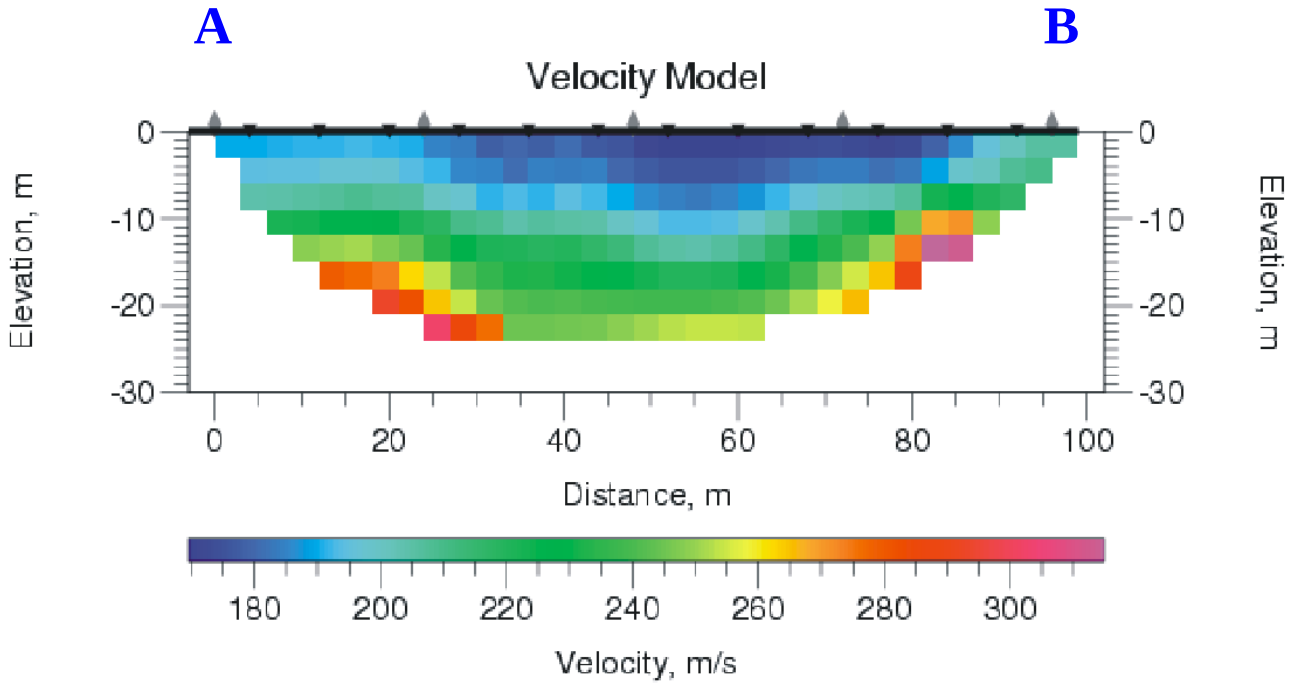


Figura 3.9: Profilo sismica a rifrazione, onde SH; sezione tomografica.

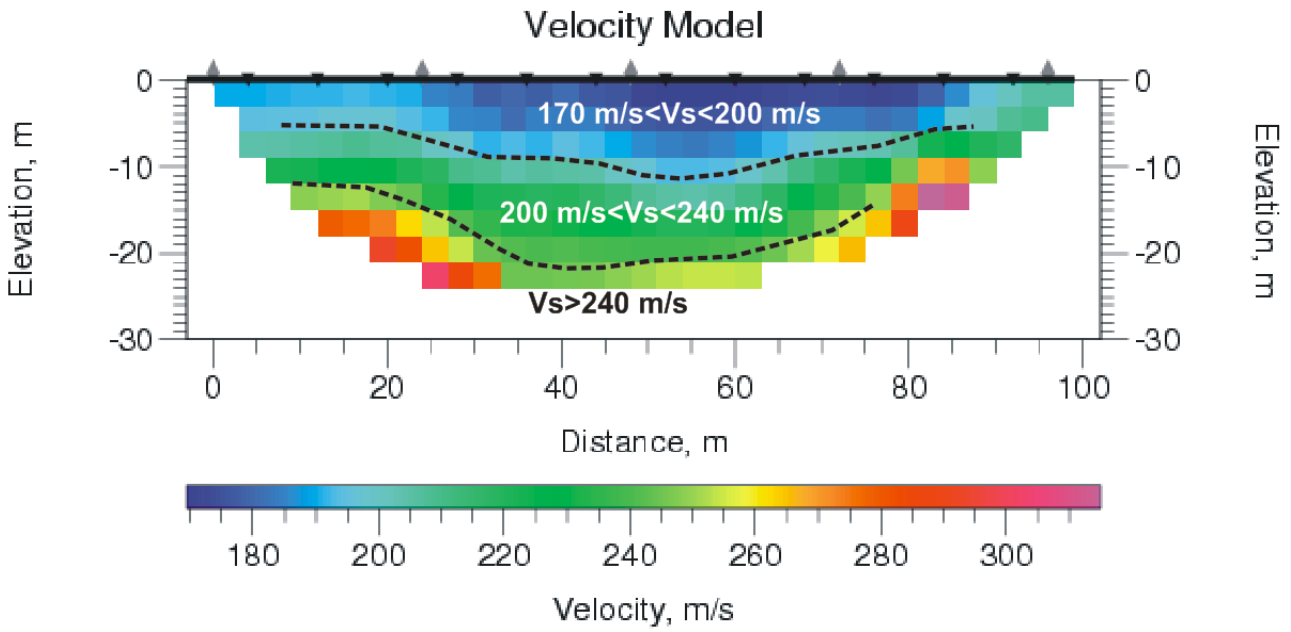
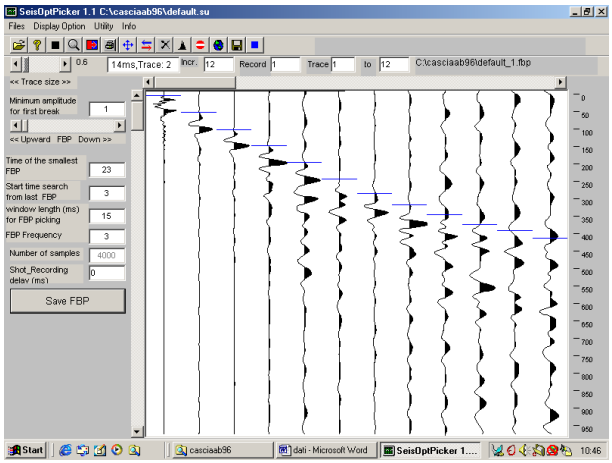
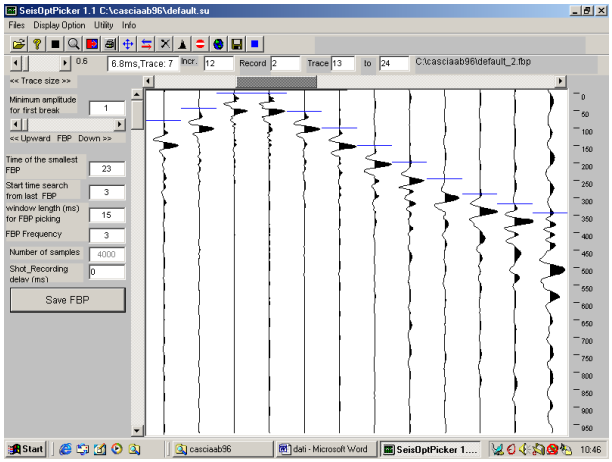
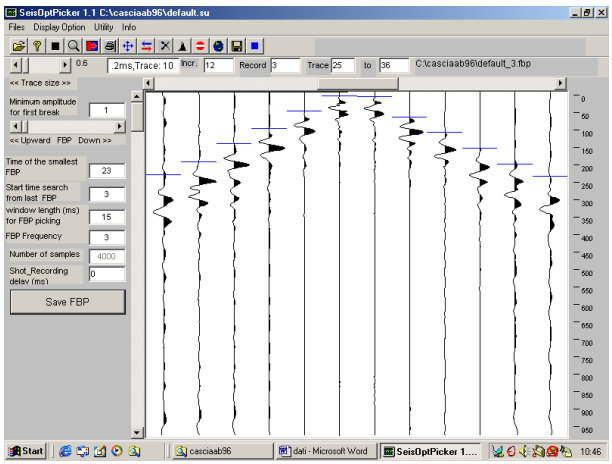


Figura 3.10: Interpretazione del profilo sismico per rifrattori principali.


SeisOptPicker 1.1 C:\casciaab96\default.su
Files Display Option Utility Info
14ms,Trace: 2
Incr. 12
Record 1
Trace 1
to 12
C:\casciaab96\default_1.fbp
<< Trace size >>
Minimum amplitude for first break
1
<< Upward FBP Down >>
Time of the smallest FBP
23
Start time search from last FBP
3
window length (ms) for FBP picking
15
FBP Frequency
3
Number of samples
4000
Shot_Recording delay (ms)
0
Save FBP
Start
casciaab96
dati - Microsoft Word
SeisOptPicker 1....
10:46


SeisOptPicker 1.1 C:\casciaab96\default.su
Files Display Option Utility Info
6.8ms,Trace: 7
Incr. 12
Record 2
Trace 13
to 24
C:\casciaab96\default_2.fbp
<< Trace size >>
Minimum amplitude for first break
1
<< Upward FBP Down >>
Time of the smallest FBP
23
Start time search from last FBP
3
window length (ms) for FBP picking
15
FBP Frequency
3
Number of samples
4000
Shot_Recording delay (ms)
0
Save FBP
Start
casciaab96
dati - Microsoft Word
SeisOptPicker 1....
10:46


SeisOptPicker 1.1 C:\casciaab96\default.su
Files Display Option Utility Info
.2ms,Trace: 10
Incr. 12
Record 3
Trace 25
to 36
C:\casciaab96\default_3.fbp
<< Trace size >>
Minimum amplitude for first break
1
<< Upward FBP Down >>
Time of the smallest FBP
23
Start time search from last FBP
3
window length (ms) for FBP picking
15
FBP Frequency
3
Number of samples
4000
Shot_Recording delay (ms)
0
Save FBP
Start
casciaab96
dati - Microsoft Word
SeisOptPicker 1....
10:46

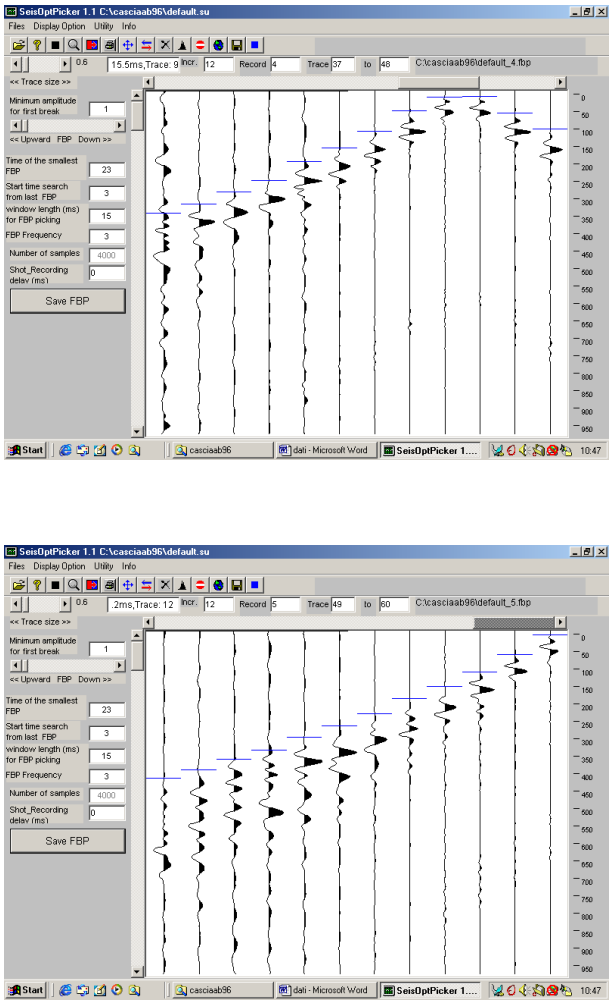


Figura 3.11: Sismogrammi ottenuti dalla sismica a rifrazione in onde SH per il profilo AB (ogni immagine è riferita a un punto di energizzazione).

Figura 3.12: Esecuzione dell'indagine di sismica a rifrazione (profilo AB) in onde SH nel sito di Cascia.

Figura 3.13: Esecuzione di un' indagine di sismica a rifrazione in onde SH in un sito di Cascia, posto a quote superiori rispetto al profilo AB preso in esame per il lavoro di tesi.

3.2.3 Risultati della misura di fondo a stazione singola con analisi HVSR

La curva F-H/V (Fig. 3.15) è stata ottenuta attraverso il rapporto tra lo spettro di Fourier medio delle componenti orizzontali e lo spettro di Fourier della componente verticale. Per effettuare tale analisi, è stato utilizzato il software Geopsy.

Tale metodo, denominato metodo Nakamura (HVSR) (utilizzato in sito con localizzazione mostrata in Fig. 3.14), permette di determinare la frequenza di risonanza del terreno, sulla base delle misure di rumore di fondo (microtremori) effettuate con una singola stazione a tre componenti.

Attraverso un processo di inversione vincolata, è stato possibile determinare il modello di Vs fino al bedrock sismico (Vs>800 m/s). Per vincolare il processo sono state utilizzate le Vs ottenute dalla sismica a rifrazione e dalla down hole. Per tale procedura viene utilizzato il software *dinver* del pacchetto Geopsy.

Figura 3.14: Localizzazione della misura di rumore di fondo a stazione singola con analisi dei dati con tecnica HVSR. Le coordinate WGS84 del punto di indagine sono le seguenti: LAT 42.718150, LONG 13.017184.

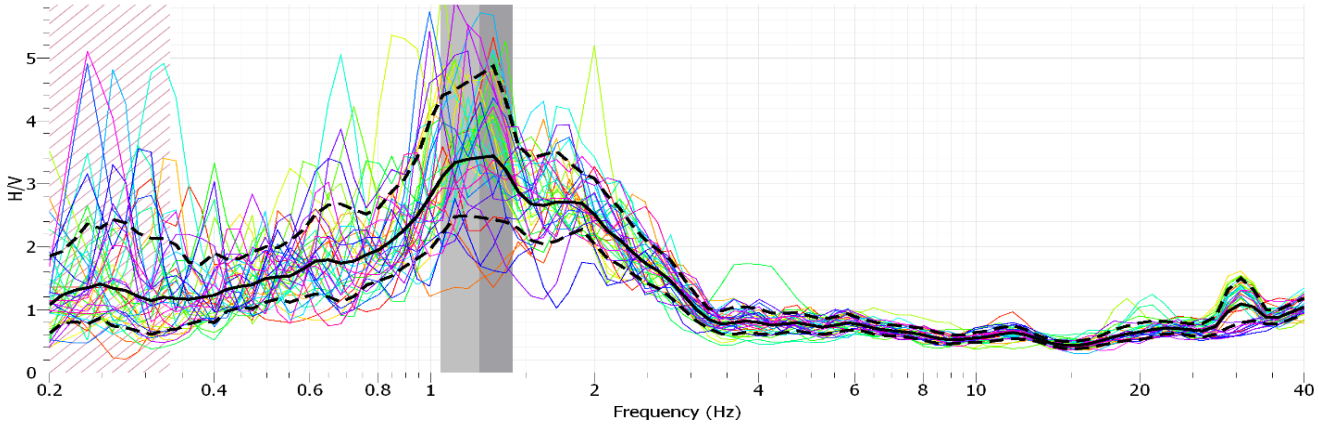


Figura 3.15: Grafico Frequenza – H/V.

Il picco di frequenza (frequenza di risonanza dei depositi) corrisponde a circa 1.3 Hz. A tale picco è associabile un valore del rapporto H/V di circa 3.5. In base alle V_s determinate dalle indagini geofisiche, tale fenomeno è associabile ad un contrasto di rigidità (limite copertura bedrock sismico) presente a profondità relativamente superficiale (circa 44 m in base al processo di inversione).

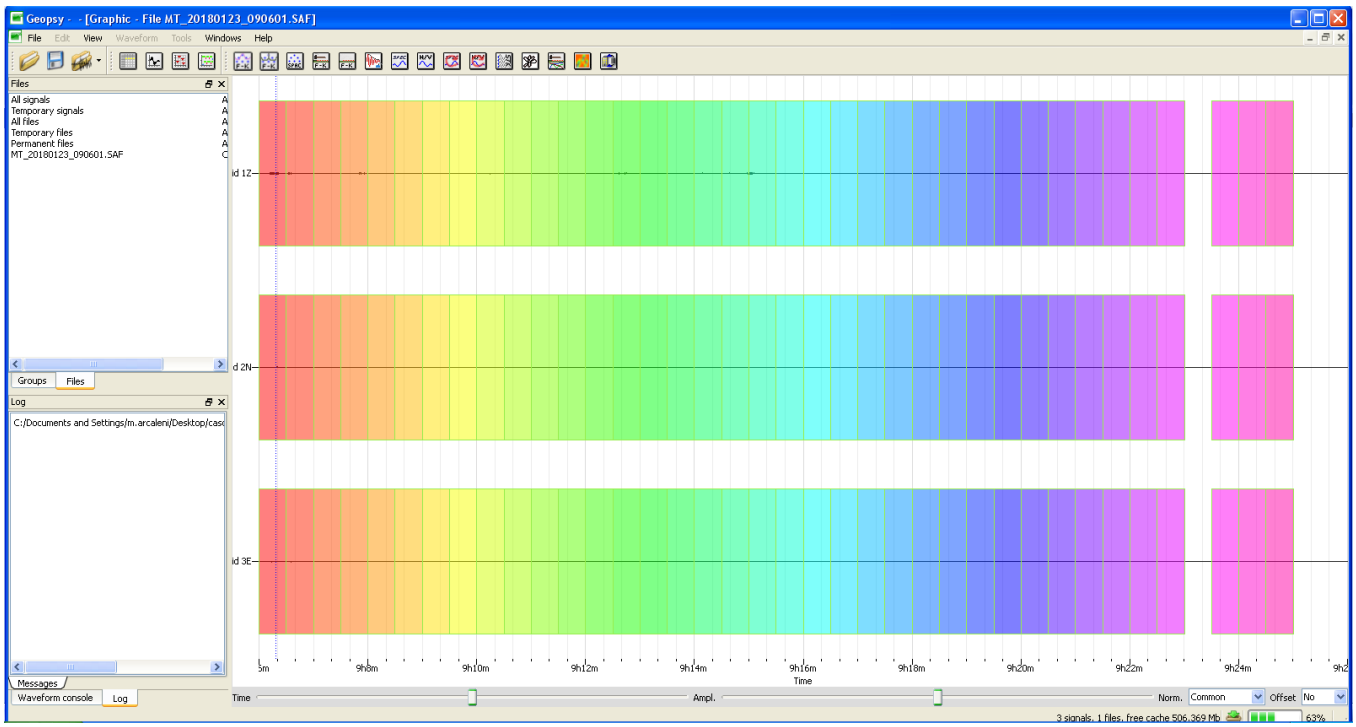


Figura 3.16: Sismogramma acquisito e finestre prese in esame per l'HVSR. Schermata ricavata dal software Geopsy.

3.2.4 Determinazione delle V_S dal p.c. fino al bedrock sismico tramite i dati HVSR integrati con i dati di sismica a rifrazione e down hole (processo di inversione vincolato)

La tecnica HVSR, oltre alla frequenza di sito, ci consente di stimare le velocità delle onde P ed onde S fino al bedrock sismico. Tale applicazione, definita *processo di inversione vincolata*, avviene attraverso opportuni metodi di inversione e con l'utilizzo di un vincolo dato dall'integrazione di dati ricavati dalle indagini di sismica a rifrazione e down hole. L'utilizzo di algoritmi di calcolo finalizzati ad una modellizzazione dello spettro H/V, permettono di correlare ogni picco spettrale con le discontinuità presenti nel sottosuolo. Nel presente lavoro, tale processo ha mostrato la presenza di un bedrock sismico (V_S>800 m/s) ad una profondità di circa 44 metri (Fig. 3.17), al quale è possibile associare il picco di frequenza di 1.3 Hz ricavato dall'indagine HVSR.

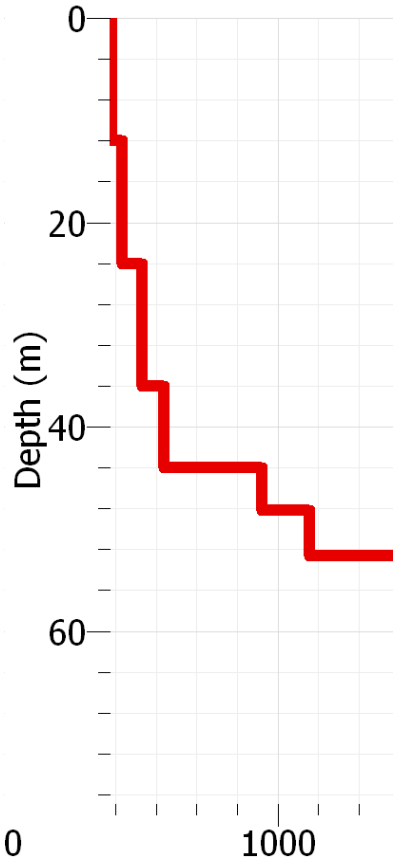


Figura 3.17: Modello sismostratigrafico dal piano campagna fino al bedrock sismico (Vs > 800 m/s).

Modello sismostratigrafico del sito in esame:

Calcolo del parametro Vs_{eq} (NTC 17/01/18) dalla sismostratigrafia ottenuta dall'integrazione dei dati di sismica a rifrazione e down hole.

Vs (m/s)	spessore	h/vs	H=30	Vs_{eq}
171	3	0,0175439	30	216,7829
178	3	0,0168539		
186	3	0,016129		
197	3	0,0152284		
208	3	0,0144231		
223	3	0,0134529		
239	3	0,0125523		
250	3	0,012		
285	3	0,0105263		
310	3	0,0096774		

In base a quanto prescritto dalle NTC 17/01/18, i depositi risultano associabili ad un sottosuolo di categoria C.

Sismostratigrafia dal p.c. fino al bedrock sismico (ottenuta con processo vincolato):

Vs (m/s)	spessore	h/vs	H substrato	VsH
171	3	0,0175439	44	253,0406
178	3	0,0168539		
186	3	0,016129		
197	3	0,0152284		
208	3	0,0144231		
223	3	0,0134529		
239	3	0,0125523		
250	3	0,012		
285	3	0,0105263		
310	3	0,0096774		
360	6	0,0166667		
420	6	0,0142857		
440	2	0,0045455		
Oltre 800	oltre 44 m			

Il modello sismostratigrafico sopra riportato è stato preso in considerazione per la determinazione degli spettri di risposta MS2 e RSL con l'uso di accelerogrammi naturali.

3.2.5 Formule relative al periodo proprio di sito

Il periodo proprio di sito è indicato dalla seguente equazione:

$$\mathbf{T_0 = 4H/Vs}$$

dove:

V_S = velocità delle onde S media sino al bedrock sismico

H = spessore della copertura sovrastante il bedrock sismico.

Naturalmente, la frequenza di risonanza del sito sarà data da:

$$\mathbf{f_0 = 1/T_0}$$

e quindi

$$\mathbf{f_0 = Vs/4H}$$

Il valore della frequenza di risonanza può essere stimato, oltre che dal rapporto spettrale H/V, anche dall'equazione della risonanza:

$$T = \frac{4 \times \sum_{i=1}^{n} h_i}{\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} Vs_i \times h_i}{\sum_{i=1}^{n} h_i} \right)}$$

dove si considerano gli spessori e le velocità V_S di tutti gli strati al di sopra del bedrock.

4

DETERMINAZIONE DEGLI SPETTRI DI RISPOSTA SISMICA

4.1 Riferimenti alla normativa NTC per quanto riguarda la definizione dell'azione sismica

Il moto generato da un terremoto in un sito, come riportato dalle Norme Tecniche sulle Costruzioni (NTC 17/01/18, cap. 7) dipende dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche del sottosuolo e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei terreni e degli ammassi rocciosi di cui è costituito. Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, l'analisi della risposta sismica locale consente quindi di definire le modifiche che il segnale sismico in ingresso (input sismico) subisce, a causa dei suddetti fattori locali (output). Le amplificazioni del moto sismico dal bedrock sismico al piano di campagna (o al piano fondale) possono essere quantificate in termini di accelerazione, velocità e spostamento.

Le analisi di risposta sismica locale richiedono un'adeguata conoscenza delle proprietà geotecniche dei terreni, determinabili mediante specifiche indagini e prove.
Nelle analisi di risposta sismica locale, le attuali norme tecniche mettono in evidenza che l'azione sismica di ingresso (input sismico) è descritta in termini di storia temporale dell'accelerazione (accelerogramma) su di un sito di riferimento rigido ed affiorante con superficie topografica orizzontale (sottosuolo di tipo A). L'azione sismica da considerare nell'ambito della progettazione, è definita da un accelerogramma di output o da uno spettro di risposta sismica (spettro RSL).

L'amplificazione sismica si può quantificare mediante il rapporto fra il moto sismico alla superficie del sito e quello che si osserverebbe per lo stesso evento sismico su un ipotetico affioramento di substrato rigido con morfologia orizzontale (condizioni di campo aperto). Se il rapporto è maggiore di 1, si parla di amplificazione sismica locale. La normativa tecnica (C.3.2.2, Categorie di sottosuolo, NTC18*)*, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, permette di valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante due tipi di approcci: approccio semplificato (categorie di sottosuolo) e specifiche analisi di risposta sismica locale (spettro di risposta determinato con l'utilizzo di accelerogrammi).

4.2 Descrizione dell'approccio semplificato di normativa (categorie di sottosuolo)

Qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili a particolari condizioni (Tab. 4.1), si può far riferimento all'approccio semplificato, che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, Vs. Si tratta di una media ponderata delle velocità delle onde S fino al bedrock sismico (Vs>800 m/s) o fino a 30 m se il bedrock sismico risulti a profondità superiori di tale valore.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	*Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	*Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti,* caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	*Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti,* con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	*Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D,* con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Tabella 4.1: Categorie di sottosuolo come da NTC 17/01/18, cap. 3.2.2.

Con la normativa NTC 17/01/2018, rispetto alla normativa precedente del 2008 (NTC 14/01/08), la caratterizzazione sismica deve essere svolta attraverso la misura delle velocità delle onde di taglio Vs, utilizzando il concetto di velocità equivalente Vs_{eq}, in sostituzione delle precedenti Vs_{30} (cioè le velocità di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 metri di profondità), come illustrato nelle equazioni sottostanti:

Equazione 1: Vs_{eq} (NTC 17/01/18)

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^{N} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

Equazione 2: Vs30 come da NTC 14/01/08

$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

Equazione 1:

H: Profondità substrato (Vs > 800 m/s) (per H>30 metri, Vs_{eq} = Vs30)

Vs_i: velocità di propagazione delle onde di taglio nello strato i -esimo

h_i: spessore (espresso in metri) dell'i-esimo strato

Equazione 2:

h_i: spessore (espresso in metri) dell'i-esimo strato compreso nei primi 30 metri di profondità

N: numero di strati compresi nei primi 30 metri di profondità

Vs_i: velocità di propagazione delle onde di taglio nello strato i -esimo (nei 30 metri)

L'approccio semplificato, in base a quanto riportato nelle NTC18, non può essere applicato a terreni con $Vs_{eq} < 100$ m/s. In tale condizione, particolarmente sfavorevole, vengono richieste specifiche analisi di risposta sismica locale per la determinazione dell'azione sismica di progetto.

4.2.1 Concetti di verifica agli stati limite

Con le attuali NTC, viene data molta importanza alle caratteristiche dissipative delle opere, contrariamente alle normative precedenti che prediligevano edifici rigidi ed indeformabili. Gli edifici, secondo la normativa attuale, possono "sconfinare" in campo plastico", superando i limiti di elasticità, attraverso una deformazione controllata definita "gerarchia delle resistenze".

Sono definiti *stati limite* quegli stati, cioè quelle condizioni al di là delle quali la struttura, o anche soltanto una sua parte, non soddisfa più le esigenze di comportamento per le quali è destinata ed è stata progettata. Gli stati limite ai quali devono essere verificate le strutture, sono di due tipi:

- **Stati limite di esercizio SLE** (stato limite di operatività e stato limite di danno)
- **Stati limite ultimi SLU** (stato limite della salvaguardia della vita e stato limite del collasso)

Gli **stati limite ultimi** rappresentano un limite oltre il quale si ha una condizione di pericolo per la resistenza della struttura, che può portare al collasso o ad altre forme di cedimento strutturale che possono mettere in pericolo la sicurezza delle persone o delle cose che si trovano all'interno o nei pressi della costruzione. Si possono presentare diversi tipi di stati limite ultimo, derivanti dal verificarsi di diversi fenomeni come la perdita di stabilità della struttura, rottura di sezioni critiche, collasso per effetto del fuoco e di esplosioni, etc.. Il superamento dello stato limite ultimo è un processo irreversibile e si definisce *collasso*.

Gli **stati limite di esercizio** rappresentano invece un limite oltre il quale si genera una condizione non ottimale per l'utilizzo della struttura che può al limite impedirne il funzionamento, non risultando più soddisfatti i requisiti per i quali è stata progettata. In termini più semplici, la costruzione, pur senza manifestare un cedimento strutturale, non può più essere utilizzata per gli scopi preposti. Anche lo stato limite di esercizio può essere di diversa natura: danneggiamenti locali (es. fessurazione calcestruzzo) che possano ridurre la durabilità, l'efficienza e l'aspetto della struttura, spostamenti o deformazioni che possano compromettere l'efficienza di elementi non strutturali, impianti o macchinari, etc..

Gli stati limite di esercizio si suddividono in:

- **Stato limite di operatività (S.L.O)**: a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi.
- **Stato limite di danno (S.L.D.)**: a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di

rigidezza nei confronti delle azioni verticali e orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

Lo stato limite di operatività è particolarmente utile come riferimento progettuale per le opere che debbono restare operative durante e subito dopo il terremoto, come ospedali, caserme, centri di protezione civile etc..

Gli stati limite ultimi si suddividono in:

- **Stato limite di salvaguardia della vita (S.L.V.)**: a seguito del terremoto la struttura subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidezza per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali.
- **Stato limite di prevenzione del collasso (S.L.C.)**: a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali: la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

I quattro stati limite definiti consentono di individuare quattro situazioni diverse che, al crescere dell'azione sismica, ed al conseguente progressivo superamento dei quattro stati limite ordinati per azione sismica crescente (S.L.O., S.L.D., S.L.V, S.L.C.), fanno corrispondere una progressiva crescita del danneggiamento all'insieme di struttura, elementi non strutturali ed impianti.

Secondo le NTC18, non tutte le verifiche agli stati limite sopra descritti vanno effettuate per qualunque struttura. I tipi di verifica dipendono infatti dalla tipologia strutturale e dalla classe d'uso di appartenenza (cioè dall'importanze dell'opera).

Le costruzioni sono suddivise in classi d'uso così definite (NTC18):

- ***Classe I***: Costruzioni con presenza occasionale di persone, edifici agricoli.
- ***Classe II***: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche o sociali essenziali. Industrie

con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in classi d'uso III o in classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

- ***Classe III***: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.
- ***Classe IV***: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al *D.M. 5 novembre, n.6792, "Norme funzionali e geometriche per le costruzioni delle strade"*, e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

Le più comuni tipologie strutturali in riferimento alle classi d'uso sono riportate nella tabella 4.2:

Tipologia strutturale	**Classe d'uso**
Civile abitazione	II
Scuola	III
Ospedale	IV
Caserma	IV
Stalla	I
Centro commerciale	III
Cinema	III
Municipio	IV

Tabella 4.2: Tipologia di struttura alla quale viene associata una specifica classe d'uso; tale parametro è fondamentale, insieme ad altri, in fase di progettazione.

Segue la tabella 4.3, che riporta il tipo di verifiche agli stati limite necessarie, in funzione della classe d'uso dell'opera:

Tipologia dell'opera	Stati limite da verificare e tipo di verifica da effettuare
Opere di classe 1	STATO LIMITE DEL DANNO (**S.L.D.**) – Controllo degli spostamenti
	STATO LIMITE DI SALVAGUARDIA DELLA VITA (**S.L.V.**) – Verifica di resistenza
Opere di classe 2	STATO LIMITE DEL DANNO (**S.L.D.**) – Controllo degli spostamenti
	STATO LIMITE DI SALVAGUARDIA DELLA VITA (**S.L.V.**) – Verifica di resistenza
Opere di classe 3	STATO LIMITE DI OPERATIVITÀ (**S.L.O.**) – Controllo degli spostamenti
	STATO LIMITE DEL DANNO (**S.L.D.**) – Controllo degli spostamenti
	STATO LIMITE DEL DANNO (**S.L.D.**) – Controllo degli spostamenti + Verifica di resistenza
	STATO LIMITE DI SALVAGUARDIA DELLA VITA (**S.L.V.**) – Verifica di resistenza
Opere di classe 4	STATO LIMITE DI OPERATIVITÀ (**S.L.O.**) – Controllo degli spostamenti
	STATO LIMITE DEL DANNO (**S.L.D.**) – Controllo degli spostamenti
	STATO LIMITE DEL DANNO (**S.L.D.**) – Controllo degli spostamenti + Verifica di resistenza
	STATO LIMITE DI SALVAGUARDIA DELLA VITA (**S.L.V.**) – Verifica di resistenza
Opere isolate	STATO LIMITE DI OPERATIVITÀ (**S.L.O.**) – Controllo degli spostamenti
	STATO LIMITE DEL DANNO (**S.L.D.**) – Controllo degli spostamenti
	STATO LIMITE DEL DANNO (**S.L.D.**) – Controllo degli spostamenti + Verifica di resistenza
	STATO LIMITE DI SALVAGUARDIA DELLA VITA (**S.L.V.**) – Verifica di resistenza
	STATO LIMITE DI COLLASSO (**S.L.C.**) – Controllo degli spostamenti

Tabella 4.3: Verifiche agli stati limite in riferimento alla classe d'uso considerata.

Per ogni stato limite inoltre è possibile definire una probabilità di superamento P_{VR} dell'azione sismica prevista (in termini di accelerazione) in fase di progetto (Tab 4.4):

	Stati Limite	P_{V_R}: Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R	
Stati limite di esercizio		SLO	81%
		SLD	63%
Stati limite ultimi		SLV	10%
		SLC	5%

Tabella 4.4: Definizione per SLE e SLU del parametro Pvr, probabilità di superamento dell'azione sismica in termini di accelerazione.

Qualora la protezione nei confronti degli stati limite di esercizio sia di prioritaria importanza, i valori di P_{VR} forniti in tabella devono essere ridotti in funzione del grado di protezione che si vuole raggiungere.

Per ciascuno stato limite e relativa probabilità di eccedenza P_{VR} nel periodo di riferimento per l'azione sismica V_R, si ricava il periodo di ritorno T_R del sisma utilizzando la relazione:

$$T_R = - V_R / \ln (1- P_{VR}) = - C_U V_N / \ln (1- P_{VR})$$

In questa equazione compaiono due importanti parametri che devono essere inseriti nello studio di risposta sismica locale, tramite definizione delle categorie di sottosuolo e che definiscono dunque il periodo di riferimento per l'azione sismica, che sono:

- **Coefficiente d'uso C_U**, che varia al variare della classe d'uso.

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C_U	0,7	1,0	1,5	2,0

- **Vita nominale V_n** di una struttura, cioè il numero di anni durante il quale il fabbricato, purché soggetto alla manutenzione ordinaria prevista, deve potere assolvere alle funzioni per il quale è stato progettato. Quindi anche questo parametro dipende dal tipo struttura da progettare, i quali valori sono indicati nella tabella 4.5:

	TIPI DI COSTRUZIONI	Valori minimi di V_N (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

Tabella 4.5: Valori di vita nominale dell'opera necessari ai fini della corretta definizione dell'azione sismica tramite approccio semplificato.

Le verifiche sismiche di opere di tipo 1 o in fase di costruzione possono omettersi quando il progetto preveda che tale condizione permanga per meno di 2 anni.

Un altro elemento da inserire nell'approccio semplificato basato sulla definizione di categorie di sottosuolo, è la categoria topografica a cui appartiene il sito (Tab 4.6):

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15°$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15°$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15° \leq i \leq 30°$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30°$

Tabella 4.6: Categorie topografiche che influenzano l'andamento della superfice del terreno, utili nella definizione dell'azione sismica tramite approccio semplificato.

Sono dunque quelle condizioni che caratterizzano l'andamento della superficie del terreno sul quale si dovrà edificare l'opera in progetto.

Per configurazioni superficiali abbastanza semplici si può utilizzare la classificazione contenuta nella tabella soprastante, ma per condizioni topografiche più articolate e nel caso in cui non si è in possesso di analisi più specifiche della risposta sismica locale, vengono utilizzati i seguenti valori (Tab. 4.7) per ogni tipo di condizione topografica:

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

Tabella 4.7: Valori numerici associati ad una determinata categoria topografica da dover inserire nei calcoli per la definizione dell'azione sismica.

4.2.2 Azione sismica

Come da NTC, le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione e sono funzione delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche che determinano la risposta sismica locale. La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A come definita al § 3.2.2, NTC18), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente Se(T), con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} (come definite nel § 3.2.1 NTC18), nel periodo di riferimento V_R (come definito nel § 2.4, NTC18). In alternativa è ammesso l'uso di accelerogrammi, purché correttamente commisurati alla pericolosità sismica locale dell'area della costruzione.

Le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento P_{VR} nel periodo di riferimento V_R, a partire dai valori dei seguenti parametri di pericolosità sismica di base su sito di riferimento rigido orizzontale:

- $\mathbf{a_g}$: accelerazione orizzontale massima al sito;

- **F_o**: valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- **T_c^***: valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Tali parametri dipendono dalla localizzazione del sito e dallo stato limite considerato. Gli stessi sono riportati nell'allegato B delle NTC 14/01/08, al quale si riferisce anche la normativa attuale.

Per poter confrontare gli spettri di risposta del sito in esame ottenuti attraverso tutti i possibili approcci (spettro di categoria di sottosuolo, spettro da microzonazione sismica di livello 2, spettro di RSL e spettro reale da monitoraggio accelerometrico), si ritiene opportuno riferirsi allo spettro di risposta relativo allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV), utilizzando una classe d'uso 2 ed una vita nominale di 50 anni.

4.3 Determinazione dello spettro di risposta sismica del sito in esame attraverso approccio semplificato di normativa (NTC 17/01/18 - categorie di sottosuolo)

Il punto di indagine è situato a Cascia (PG). Le coordinate geografiche WGS 84 risultano le seguenti: LATITUDINE 42.718937, LONGITUDINE 13.017884.
Le coordinate sopra riportate devono essere trasformate nel sistema ED 50 al fine di poter determinare i tre parametri di pericolosità sismica di base, come da allegato B di normativa (14/01/08). Tali parametri costituiscono le tre variabili indipendenti per la costruzione dello spettro di risposta di sito. Le coordinate ED 50 risultano, pertanto: LAT: 42.719904, LONG: 13.018810.

Per la determinazione degli spettri di normativa viene utilizzato il foglio di calcolo "Spettri di risposta" ver. 1.0.3 realizzato dal Ministero Superiore dei Lavori Pubblici. I parametri di input risultano essere: le coordinate del sito (ED 50), i parametri progettuali (classe d'uso, vita nominale), lo stato limite, la categoria di sottosuolo e la categoria topografica.
Tale foglio di calcolo permette di ricavare gli spettri di risposta, utilizzando le formule di normativa presenti al cap. 3 delle NTC.

Nel presente lavoro vengono determinati e confrontati gli spettri di risposta "elastici" (per le componenti orizzontali e verticali). Tali spettri, in fase progettuale (spettro di progetto), dovranno tener conto delle caratteristiche dissipative delle opere in progetto e quindi del coefficiente di struttura (o coefficiente di comportamento). Al fine di poter confrontare gli spettri ottenuti con i vari approcci, è stato ritenuto opportuno considerare solamente determinati parametri progettuali.

La definizione degli spettri di risposta con il foglio di calcolo utilizzato è articolata in tre fasi:

- Fase 1: individuazione della pericolosità del sito
- Fase 2: scelta della strategia di progettazione
- Fase 3: determinazione dell'azione di progetto (spettri elastici e plastici)

Figura 4.1: Schermata iniziale del foglio di calcolo "Spettri di risposta" ver. 1.0.3 realizzato dal Ministero Superiore dei Lavori Pubblici.

Fase 1, individuazione della pericolosità del sito

Inserendo le coordinate in ED 50 e selezionando l'interpolazione "media ponderata", il software permette di determinare i parametri di pericolosità sismica di base (Fig. 4.2).

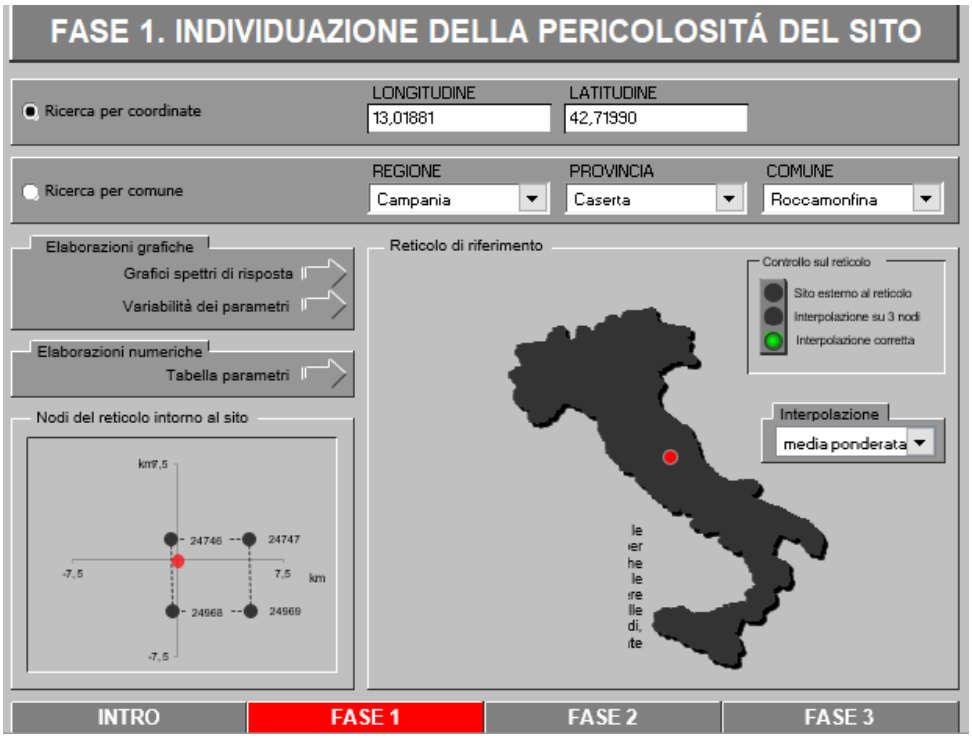


Figura 4.2: Schermata relativa all'individuazione della pericolosità del sito.

Fase 2, scelta della strategia di progettazione

In questa fase vengono inseriti i valori di vita nominale (V_N) dipendente dalla tipologia dell'opera e il coefficiente d'uso (C_U) ad essa associato. Quest'ultimo parametro dipende dalla classe d'uso come precedentemente riportato. Si richiede inoltre di inserire il valore della vita di riferimento per la costruzione (in anni), che viene calcolata come:

$$V_R = V_N \text{ X } C_U$$

e il periodo di ritorno (T_R, in anni) per la definizione dell'azione sismica.

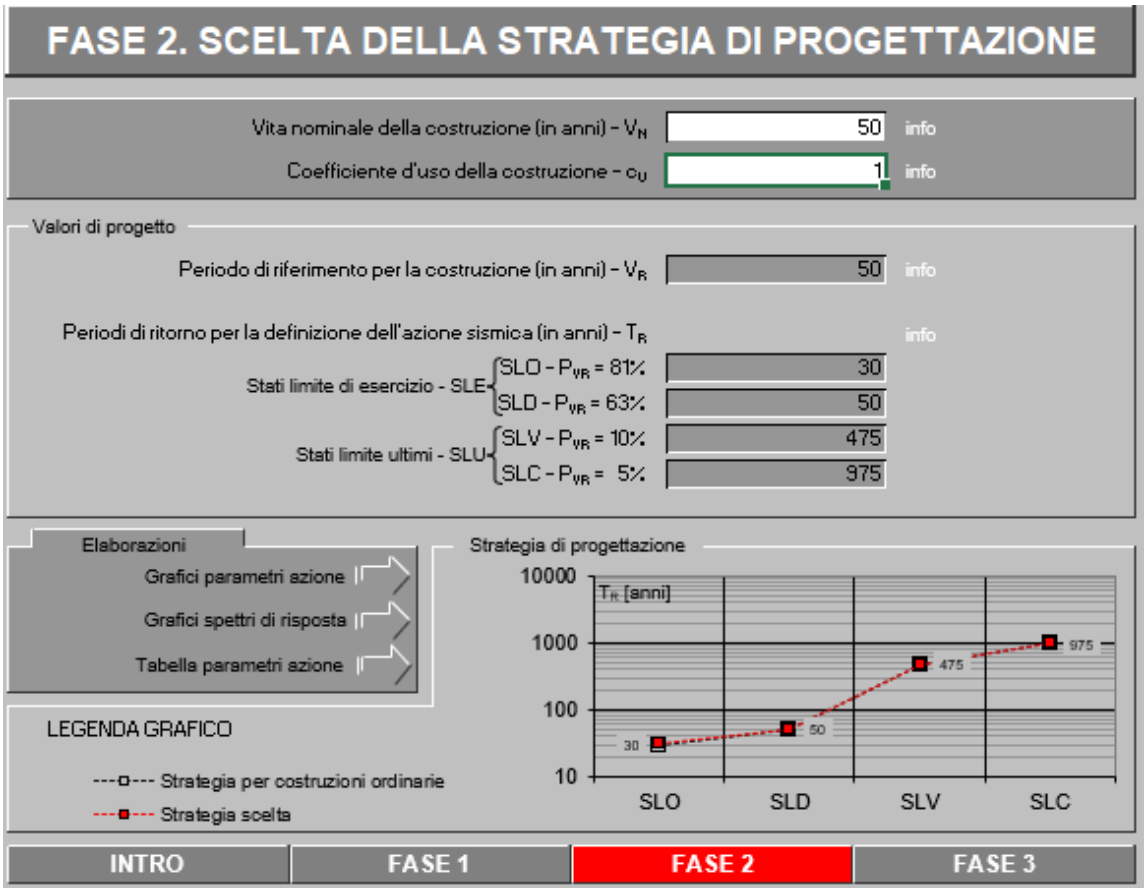


Figura 4.3: Schermata relativa alla scelta della strategia di progettazione.

SLATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_C^* [s]
SLO	30	0,078	2,394	0,271
SLD	50	0,103	2,317	0,278
SLV	475	0,256	2,370	0,336
SLC	975	0,329	2,403	0,355

Tabella 4.8: Valori dei parametri a_g, Fo, Tc* per i periodi di ritorno T_R associati a ciascuno stato limite.

Fase 3, determinazione dell'azione di progetto

In questa fase si ottiene lo spettro di risposta sismica per lo stato limite SLV, con la possibilità di inserire la categoria di sottosuolo associata al punto di indagine e la categoria topografica. Nel caso in questione, le indagini geofisiche realizzate hanno permesso di associare i depositi ad una categoria di sottosuolo tipo C. Un altro parametro che compare in questa fase, è il coefficiente di smorzamento ξ (%). Per tutti gli spettri elastici, la normativa impone di utilizzare un valore di ξ uguale al 5%. Per tale valore corrisponde un

coefficiente η uguale a 1. Gli spettri di risposta sismica che si ottengono dal completamento delle fasi precedenti sono (Fig. 4.4):

- Spettro di progetto riferito alla componente orizzontale
- Spettro di progetto riferito alla componente verticale
- Spettro elastico di riferimento NTC per un suolo di categoria A

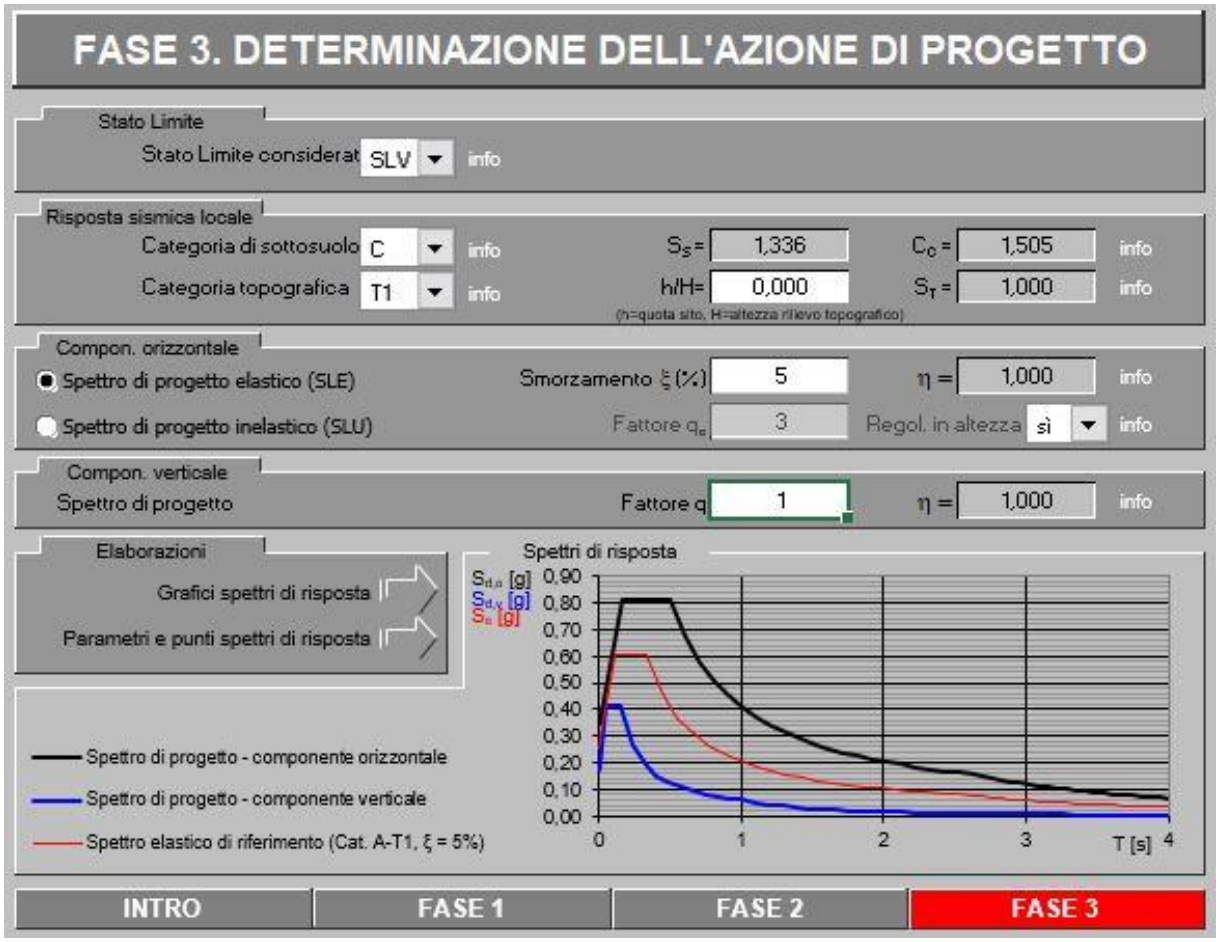


Figura 4.4: Esempio di spettri di normativa per SLV. In nero è riportato lo spettro SLV riferito alla categoria di sottosuolo C. In rosso lo spettro SLV riferito ad una categoria di sottosuolo A ed in blu lo spettro verticale.

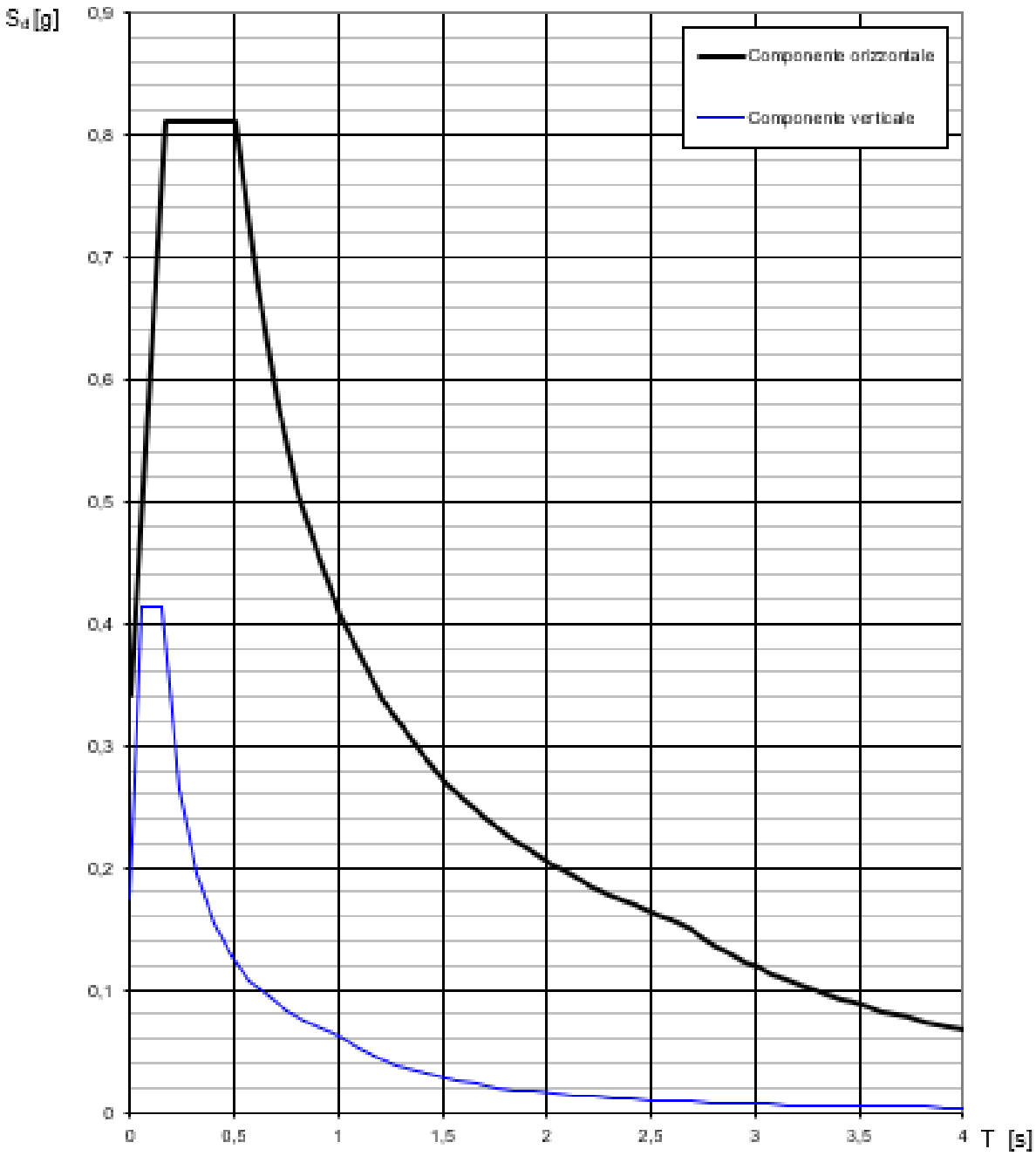


Figura 4.5: Rappresentazione grafica degli spettri orizzontale e verticale da NTC, categoria di sottosuolo C.

Parametri e punti dello spettro di risposta orizzontale per lo stato limite SLV

Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLV	
a_g	0,256	g
F_o	2,370	
T_C^*	0,336	s
S_S	1,336	
C_C	1,505	
S_T	1,000	
q	1,000	

Parametri dipendenti

S	1,336	
h	1,000	
T_B	0,169	s
T_C	0,506	s
T_D	2,625	s

Espressioni dei parametri dipendenti

(NTC-08 Eq. 3.2.5)

$$S = S_S \cdot S_T$$

$$\eta = \sqrt{10/(5+\xi)} \geq 0,55; \ \eta = 1/q$$

(NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5)

(NTC-07 Eq. 3.2.8)

$$T_B = T_C / 3$$

(NTC-07 Eq. 3.2.7)

$$T_C = C_C \cdot T_C^*$$

(NTC-07 Eq. 3.2.9)

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6$$

Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

Lo spettro di progetto $S_d(T)$ per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico $S_e(T)$ sostituendo η con 1/q, dove q è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

Punti dello spettro di risposta

	T [s]	Se [g]
	0,000	0,342
T_B ←	0,169	0,811
T_C ←	0,506	0,811
	0,606	0,676
	0,707	0,580
	0,808	0,507
	0,909	0,451
	1,010	0,406
	1,111	0,369
	1,212	0,338
	1,313	0,312
	1,414	0,290
	1,515	0,271
	1,616	0,254
	1,716	0,239
	1,817	0,226
	1,918	0,214
	2,019	0,203
	2,120	0,193
	2,221	0,185
	2,322	0,177
	2,423	0,169
	2,524	0,162
T_D ←	2,625	0,156
	2,690	0,149
	2,756	0,142
	2,821	0,135
	2,887	0,129
	2,952	0,123
	3,018	0,118
	3,083	0,113
	3,149	0,109
	3,214	0,104
	3,280	0,100
	3,345	0,096
	3,411	0,092
	3,476	0,089
	3,542	0,086
	3,607	0,083
	3,673	0,080
	3,738	0,077
	3,804	0,074
	3,869	0,072
	3,935	0,070
	4,000	0,067

Parametri e punti dello spettro di risposta verticale per lo stato limite: SLV

Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLV	
a_{gv}	0,175	g
S_S	1,000	
S_T	1,000	
q	1,000	
T_B	0,050	s
T_C	0,150	s
T_D	1,000	s

Parametri dipendenti

F_v	1,619
S	1,000
η	1,000

Espressioni dei parametri dipendenti

$S = S_S \cdot S_T$ (NTC-08 Eq. 3.2.5)

$\eta = 1/q$ (NTC-08 §. 3.2.3.5)

$F_v = 1{,}35 \cdot F_o \cdot \left(\frac{a_g}{g}\right)^{0.5}$ (NTC-08 Eq. 3.2.11)

Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.10)

$0 \le T < T_B$ | $S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o}\left(1 - \frac{T}{T_B}\right)\right]$

$T_B \le T < T_C$ | $S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v$

$T_C \le T < T_D$ | $S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left(\frac{T_C}{T}\right)$

$T_D \le T$ | $S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2}\right)$

Punti dello spettro di risposta

	T [s]	Se [g]
	0,000	0,175
T_B ←	0,050	0,415
T_C ←	0,150	0,415
	0,235	0,265
	0,320	0,194
	0,405	0,154
	0,490	0,127
	0,575	0,108
	0,660	0,094
	0,745	0,084
	0,830	0,075
	0,915	0,068
T_D ←	1,000	0,062
	1,094	0,052
	1,188	0,044
	1,281	0,038
	1,375	0,033
	1,469	0,029
	1,563	0,025
	1,656	0,023
	1,750	0,020
	1,844	0,018
	1,938	0,017
	2,031	0,015
	2,125	0,014
	2,219	0,013
	2,313	0,012
	2,406	0,011
	2,500	0,010
	2,594	0,009
	2,688	0,009
	2,781	0,008
	2,875	0,008
	2,969	0,007
	3,063	0,007
	3,156	0,006
	3,250	0,006
	3,344	0,006
	3,438	0,005
	3,531	0,005
	3,625	0,005
	3,719	0,004
	3,813	0,004
	3,906	0,004
	4,000	0,004

La verifica dell'idoneità del programma, l'utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell'utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall'utilizzo dello stesso.

4.4 Determinazione dello spettro di risposta tramite Microzonazione Sismica di livello 2 (MS2), come da "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" (Dipartimento Protezione Civile)

La microzonazione sismica di livello II prevede l'impiego di parametri che quantificano la variazione del moto sismico in superficie e che sono determinabili con metodi semplificati. Tali parametri sono organizzati in abachi riferiti alle singole condizioni stratigrafiche per le quali sono applicabili. Le amplificazioni sono espresse attraverso due fattori di amplificazione, F_A ed F_V, da applicare alle ordinate spettrali a basso periodo (F_A) e alto periodo (F_V).

Gli abachi ottenuti sono realizzati sintetizzando i risultati di analisi numeriche mono–dimensionali di propagazione delle onde sismiche di taglio.

Tali analisi sono di tipo non lineare equivalente e sono condotte su un modello di sottosuolo costituito da terreni stratificati orizzontalmente, omogenei e deformabili, poggianti su un terreno più rigido avente V_s = 800 m/s, chiamato *bedrock sismico*. Nelle modellazioni viene considerata la risposta sismica locale per spessori variabili da 5 a 150 m di copertura (con step di 5-10 m).

La velocità equivalente del deposito copre valori che vanno da un minimo di 100 m/s a un massimo di 700 m/s, con step di 50 m/s. Per ogni coppia di valori velocità equivalente-spessore, è possibile utilizzare tre profili di velocità:

- Profilo 1: velocità costante lungo tutto lo spessore del deposito.
- Profilo 2: velocità crescente con la profondità con il gradiente massimo compatibile con i seguenti limiti:
    - La V_s alla base del deposito non deve superare gli 800 m/s
    - La V_s in superficie non deve essere inferiore a 50 m/s
- Profilo 3: profilo a velocità crescente con la profondità con gradiente intermedio tra i due precedenti. Per costruire il profilo 3 si determina la velocità del primo strato $V_{S1,3}$ come media fra la velocità equivalente V_{eq} (nella formula indicata come V_{sH}) e la velocità nel primo strato corrispondente al gradiente massimo, come desunta dal profilo 2.

$$V_{s1,3} = \frac{V_{sH} + V_{s1,2}}{2}$$

Si procede allo stesso modo per l'ultimo punto del deposito determinando la velocità alla base di esso; successivamente vengono uniti i punti e si ottiene il profilo 3 intermedio ai primi due. La scelta del tipo di profilo va fatta sulla base delle conoscenze specifiche ottenute dalla microzonazione di livello 2.

In generale, quando lo spessore della copertura diventa considerevole (diverse decine di metri, nel caso in esame 44 metri), anche se omogeneo da un punto di vista litologico, è improbabile che il profilo di velocità si mantenga costante (a causa del peso litostatico dei depositi). È quindi preferibile orientarsi verso gli abachi riferiti al profilo variabile linearmente con pendenza intermedia. Il profilo con pendenza massima fornisce in genere risultati più cautelativi e andrebbe utilizzato quando si può effettivamente ipotizzare che ci siano gradienti molto accentuati con la profondità.

Per la scelta degli abachi, si fa riferimento a tre litotipi diversi scelti per il deposito (argilla, sabbia e ghiaia), a ciascuno dei quali, nella modellazione svolta a monte degli abachi, sono state associate curve di degrado (curve di decremento del modulo di rigidezza a taglio G/G_0 con la deformazione (Υ) e curve di incremento dello smorzamento D con la deformazione (Υ)) tratte dalla letteratura (Fig. 4.6 e Fig. 4.7). In particolare, dato che il litotipo prevalente nell'area in esame è argilla, come risulta dal sondaggio a carotaggio continuo, sono state utilizzate le *curve di Vucetic e Dobry (1991)*, relative ad argille con *indice di plasticità del 50%*.

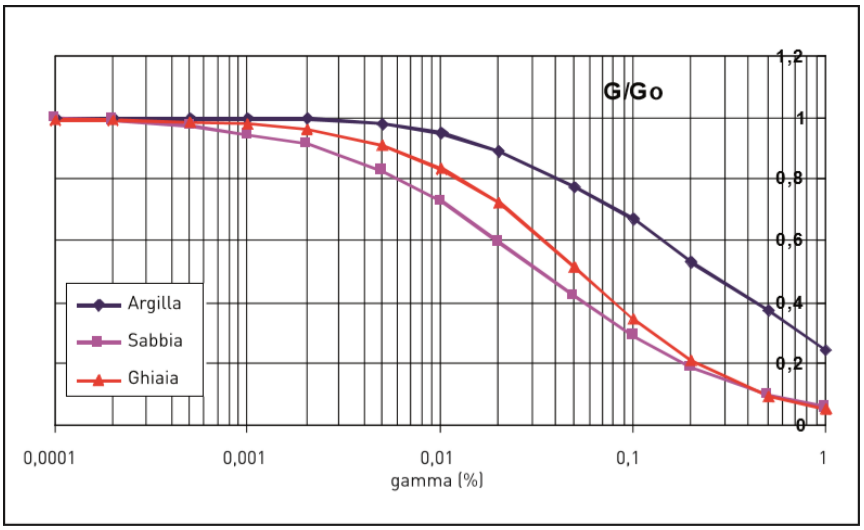


Figura 4.6: Curve normalizzate di decadimento del modulo di taglio con la deformazione.

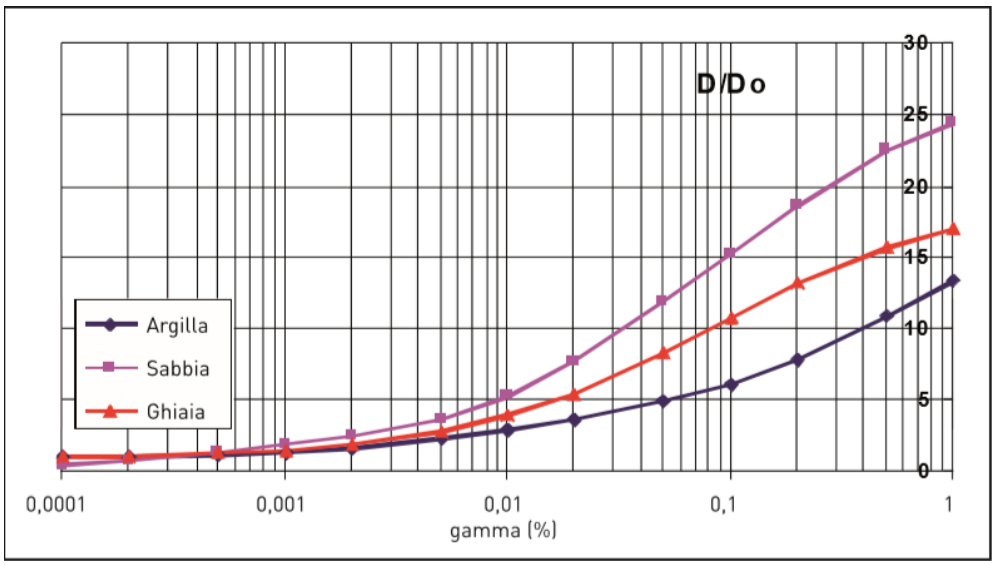


Figura 4.7: Curve di variazione dello smorzamento relativo all'aumentare della deformazione.

Come input per queste simulazioni numeriche, il gruppo di lavoro ICMS, ha utilizzato 7 accelerogrammi artificiali spettro – compatibili con spettri medi derivanti da studi di pericolosità e riferiti a tre livelli di sismicità con accelerazioni di picco al suolo di 0.06g (bassa sismicità), 0.18g (media sismicità) e 0.26g (alta sismicità). I valori riportati negli abachi sono la media dei risultati ottenuti da 7 simulazioni condotte con 7 accelerogrammi diversi per ciascun livello energetico (0.06g, 0.18g, 0.26g), su ciascun litotipo, spessore H e per ciascuno dei tre profili di V_S.

Vengono inoltre presi in considerazione nella modellazione, i valori del peso per unità di volume, considerato costante per il deposito, uguale in tutto lo spessore a 18 kN/m^3, mentre è pari a 20 kN/m^3 per il bedrock sismico.

4.4.1 Abachi utilizzati in base ai parametri riferiti al sito di interesse

I parametri scelti di H (profondità) e Vs (m/s) relativi al caso in esame sono riportati nel sottoparagrafo 4.4.2, in quanto utili per la costruzione dello spettro di risposta del sito attraverso microzonazione sismica di livello 2 (MS2).

Fattore di amplificazione	Tipo di terreno	a_g (g)	Profilo di velocità
FA	Argilla	0.26g	Lineare pendenza intermedia

		V_{s30} (m/s)									
		150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
H	5	2.21	1.79	1.75	1.57	1.35	1.19	1.09	1.04	1.01	1.00
	10	-	2.27	1.96	1.63	1.43	1.32	1.25	1.16	1.05	1.01
	15	-	2.35	2.14	1.88	1.66	1.47	1.33	1.22	1.10	1.03
	20	-	2.14	2.16	1.96	1.75	1.58	1.43	1.31	1.15	1.05
	25	-	1.89	2.00	1.97	1.79	1.62	1.48	1.37	1.19	1.07
	30	-	1.77	1.89	1.85	1.77	1.62	1.49	1.38	1.20	1.07
	35	-	-	1.71	1.76	1.67	1.60	1.48	1.38	1.21	1.08
	40	-	-	1.73	1.64	1.62	1.52	1.46	1.37	1.21	1.07
	50	-	-	1.70	1.65	1.51	1.42	1.36	1.31	1.18	1.06
	60	-	-	1.60	1.60	1.51	1.39	1.30	1.24	1.15	1.05
	70	-	-	1.52	1.52	1.47	1.40	1.29	1.21	1.11	1.03
	80	-	-	1.45	1.47	1.41	1.36	1.29	1.21	1.09	1.01
	90	-	-	1.38	1.43	1.37	1.33	1.27	1.21	1.08	0.99
	100	-	-	1.27	1.36	1.32	1.27	1.24	1.19	1.08	0.98
	110	-	-	1.29	1.31	1.30	1.25	1.20	1.17	1.07	0.98
	120	-	-	1.21	1.27	1.26	1.24	1.18	1.13	1.06	0.97
	130	-	-	1.18	1.23	1.22	1.20	1.17	1.12	1.04	0.96
	140	-	-	1.13	1.20	1.20	1.18	1.14	1.10	1.03	0.95
	150	-	-	1.10	1.18	1.16	1.14	1.12	1.09	1.02	0.94

Fattore di amplificazione	Tipo di terreno	a_g (g)	Profilo di velocità
FV	Argilla	0.26g	Lineare pendenza intermedia

	V_{sH} (m/s)									
	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1.12	1.05	1.03	1.02	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00
10	-	1.32	1.13	1.06	1.04	1.03	1.02	1.02	1.01	1.00
15	-	1.95	1.39	1.19	1.12	1.06	1.04	1.03	1.01	1.01
20	-	2.33	1.74	1.38	1.22	1.14	1.10	1.05	1.03	1.01
25	-	2.71	2.04	1.57	1.34	1.23	1.15	1.10	1.04	1.01
30	-	2.79	2.32	1.80	1.50	1.32	1.22	1.14	1.08	1.02
35	-	-	2.50	2.01	1.63	1.43	1.29	1.20	1.09	1.02
40	-	-	2.50	2.17	1.79	1.52	1.36	1.25	1.11	1.03
50	-	-	2.33	2.21	1.94	1.69	1.50	1.36	1.17	1.04
H 60	-	-	2.29	2.06	1.95	1.76	1.57	1.42	1.21	1.08
70	-	-	2.38	2.04	1.84	1.74	1.60	1.46	1.24	1.09
80	-	-	2.35	2.05	1.82	1.66	1.57	1.46	1.25	1.10
90	-	-	2.25	2.12	1.83	1.64	1.51	1.42	1.24	1.07
100	-	-	2.16	2.07	1.86	1.65	1.50	1.40	1.24	1.07
110	-	-	2.11	2.02	1.84	1.64	1.50	1.39	1.22	1.07
120	-	-	2.15	1.94	1.82	1.65	1.50	1.38	1.21	1.07
130	-	-	2.15	1.91	1.79	1.64	1.50	1.38	1.19	1.06
140	-	-	2.13	1.92	1.74	1.63	1.51	1.39	1.20	1.05
150	-	-	2.04	1.93	1.73	1.61	1.50	1.38	1.20	1.05

4.4.2 Spettro di risposta del sito in esame ottenuto con microzonazione sismica di livello 2 (MS2)

Parametri progettuali:

- Classe di edificio II; Vita nominale: 50 [anni]

Stato limite	Tr [Anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [sec]
SLO	30	0.078	2.394	0.271
SLD	50	0.103	2.317	0.278
SLV	475	0.256	2.370	0.336
SLC	975	0.329	2.403	0.355

Parametri sismici e litologici

Abachi utilizzati: Linee guida MS – DPC (a_g 0.260 per S.L.V.)

Litotipo prevalente: Argilla

Profilo di velocità: Lineare pendenza intermedia

Spessore di sottosuolo (H): **44 [m]**

Vs44: **253.0 [m/s]**

Spettro di risposta elastico delle componenti orizzontali:

Stato limite	Tr [Anni]	Fa [-]	Fv [-]	ag [g]	ag abaco [g]	F0 [-]	Tc* [sec]	SAc [g]	SA(TB) [g]	TB [sec]	TC [sec]	TD [sec]
SLO	30	1.862	2.365	0.078	0.060	2.394	0.271	0.187	0.051	0.115	0.344	1.912
SLD	50	1.862	2.365	0.103	0.060	2.317	0.278	0.239	0.066	0.118	0.353	2.012
SLV	475	1.714	2.417	0.256	0.260	2.370	0.336	0.607	0.204	0.158	0.474	2.624
SLC	975	1.714	2.417	0.329	0.260	2.403	0.355	0.791	0.281	0.167	0.501	2.916

Tabella 4.9: Tabella riassuntiva dei valori necessari alla costruzione dello spettro orizzontale per ogni stato limite considerato.

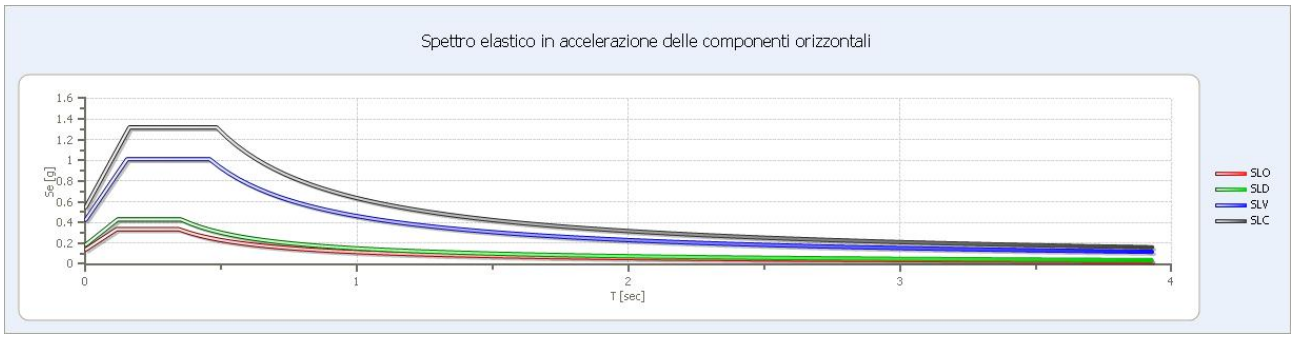


Figura 4.8: Spettri di risposta elastici della componente orizzontale per ogni stato limite considerato.

Valori numerici dello spettro orizzontale per S.L.V.

Periodo	**Se (G)**
0.00	0.438671
0.158	1.039651
0.474	1.039651
0.5956	0.827403
0.7172	0.687124
0.8387	0.587516
0.9603	0.513131
1.0819	0.455465
1.2035	0.40945
1.3251	0.37188
1.4467	0.340625
1.5683	0.314216
1.6898	0.291608

1.8114	0.272035
1.933	0.254924
2.0546	0.239838
2.1762	0.226438
2.2978	0.214456
2.4194	0.203678
2.541	0.193932
2.6625	0.185076
2.7841	0.176994
2.9057	0.169588
3.0273	0.162776
3.1489	0.156491
3.2705	0.150673
3.3921	0.145272
3.5137	0.140245
3.6352	0.135555
3.7568	0.131168

Spettro di risposta elastico delle componenti verticali

Stato limite	Tr [Anni]	Fa [-]	Fv [-]	ag [g]	ag abaco [g]	F0 [-]	Tc* [sec]	SAc [g]	SA(TB) [g]	TB [sec]	TC [sec]	TD [sec]
SLO	30	1.862	2.365	0.078	0.060	2.394	0.271	0.070	0.019	0.115	0.344	1.912
SLD	50	1.862	2.365	0.103	0.060	2.317	0.278	0.103	0.029	0.118	0.353	2.012
SLV	475	1.714	2.417	0.256	0.260	2.370	0.336	0.414	0.139	0.158	0.474	2.624
SLC	975	1.714	2.417	0.329	0.260	2.403	0.355	0.612	0.217	0.167	0.501	2.916

Tabella 4.10: Tabella riassuntiva dei valori necessari alla costruzione dello spettro verticale per ogni stato limite considerato.

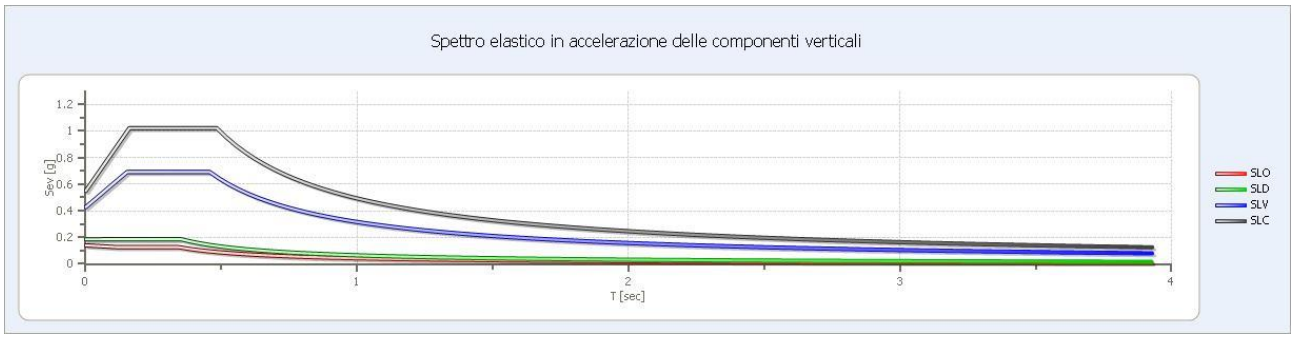


Figura 4.9: Spettri di risposta elastici della componente verticale per ogni stato limite considerato.

Valori numerici dello spettro verticale per SLV

Periodo	**Se (G)**
0.00	0.438671
0.158	0.710136
0.474	0.710136
0.5956	0.565159
0.7172	0.469342
0.8387	0.401304
0.9603	0.350495
1.0819	0.311106
1.2035	0.279676
1.3251	0.254013
1.4467	0.232665
1.5683	0.214626
1.6898	0.199184

1.8114	0.185814
1.933	0.174126
2.0546	0.163822
2.1762	0.154669
2.2978	0.146485
2.4194	0.139123
2.541	0.132466
2.6625	0.126417
2.7841	0.120896
2.9057	0.115837
3.0273	0.111185
3.1489	0.106892
3.2705	0.102918
3.3921	0.099229
3.5137	0.095795
3.6352	0.092591
3.7568	0.089594

4.5 Specifiche indagini per la determinazione dell'azione sismica attraverso l'uso di accelerogrammi naturali

Lo spettro di risposta relativo all'azione sismica può essere determinato, in base alle NTC, mediante l'uso di accelerogrammi (storie temporali). È preferibile l'utilizzo di accelerogrammi naturali in quanto più realistici rispetto a quelli artificiali, in termini sia energetici che di contenuto in frequenza. Gli accelerogrammi utilizzati devono essere "spettrocompatibili", cioè compatibili con le caratteristiche del moto sismico atteso per il sito in questione e derivanti da un'analisi di pericolosità sismica locale.

Naturalmente, lo spettro di risposta ottenuto da specifiche analisi di risposta sismica con l'uso di accelerogrammi naturali è sempre preferibile rispetto allo spettro ottenuto dall'approccio semplificato perché più mirato alla situazione sismostratigrafica locale.

4.5.1 Scelta degli accelerogrammi

In base a quanto prescritto dalle NTC, la scelta degli accelerogrammi viene definita sulla base delle seguenti condizioni:

- **effettive caratteristiche della sorgente sismogenetica**: gli accelerogrammi scelti devono essere originati da terremoti aventi gli stessi meccanismi focali dei terremoti che caratterizzano la zona di progetto. Nel caso di Cascia, sono stati selezionati accelerogrammi di terremoti originati da faglie dirette;
- **coppia magnitudo-distanza**: gli accelerogrammi devono corrispondere a terremoti rappresentativi delle condizioni del sito di progetto, sia in termini di distanza epicentrale che in termini di magnitudo. Tali parametri (*di disaggregazione*) sono stati ricavati dalla fonte ufficiale INGV citata dalla Normativa;
- **similarità, in ampiezza, tra lo spettro medio di input degli accelerogrammi naturali e lo spettro A di normativa** (NTC 17/01/18), nell'intervallo di periodi di interesse per la struttura in esame. Nel caso in questione la spettrocompatibilità è stata verificata per il range di periodi compresi tra 0,15 s e 2,4 s. Tale intervallo è compatibile quindi sia ad un progetto che prevede fondazioni superficiali sia a progetti che prevedano isolatori sismici.
- **contenuto fattore di scala**: per rendere corrispondenti i valori di PGA degli accelerogrammi scelti ed il valore dell'accelerazione massima attesa (a_g) su suolo A di riferimento, le tracce devono essere scalate di un fattore contenuto. In tutte le modellazioni effettuate nel presente studio, il fattore di scala si mantiene su valori molto contenuti.

- **contenuto in frequenza e contenuto energetico**: gli accelerogrammi devono essere analizzati anche in termini di contenuto in frequenza e contenuto energetico. Ciò per verificare se i picchi di PGA siano o meno impulsivi e per accertarsi che l'accelerogramma contenga un corretto range di frequenze. Tutti gli accelerogrammi scelti per la determinazione della risposta sismica di Cascia, presentano una fase di massima energia sufficientemente estesa per buona parte della durata del segnale.

Nel caso in questione, si è scelto di effettuare la modellazione con un set di 7 accelerogrammi, come consigliato dalla circolare applicativa (C7.11.3.1.2.2). Il valore di a_g, al quale vengono scalati gli accelerogrammi scelti, corrisponde a 0.256 g, in base ai parametri di pericolosità sismica di base per stato limite SLV.

Come riporta testualmente la normativa al paragrafo 3.2.3.6:

"Le storie temporali del moto del terreno registrate devono essere selezionate e scalate in modo tale che i relativi spettri di risposta approssimino gli spettri di risposta elastici nel campo dei periodi propri di vibrazione di interesse per il problema in esame. Nello specifico la compatibilità con lo spettro di risposta elastico deve essere verificata in base alla media delle ordinate spettrali ottenute con i diversi accelerogrammi associati alle storie per un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ del 5%. L'ordinata spettrale media non deve presentare uno scarto in difetto superiore al 10% ed uno scarto in eccesso superiore al 30%, rispetto alla corrispondente componente dello spettro elastico in alcun punto dell'intervallo dei periodi propri di vibrazione di interesse per l'opera in esame per i diversi stati limite".

4.5.2 Determinazione dei parametri di disaggregazione per RSL

Per quanto riguarda la coppia di valori magnitudo-distanza, i parametri vengono definiti utilizzando il processo definito nel sito ufficiale dell'INGV (http://esse1-gis.mi.ingv.it).
Per tale scopo sono stati utilizzati, come dati di input, i parametri progettuali di Classe d'uso 2 e stato limite SLV. Gli accelerogrammi scelti devono rispettare i parametri sismologici ottenuti dal processo di disaggregazione.

Il *"grafico di disaggregazione"* restituisce il contributo in percentuale alla pericolosità delle diverse coppie di magnitudo - distanza e quindi individua la coppia di valori che domina lo scenario sismico per una data zona.

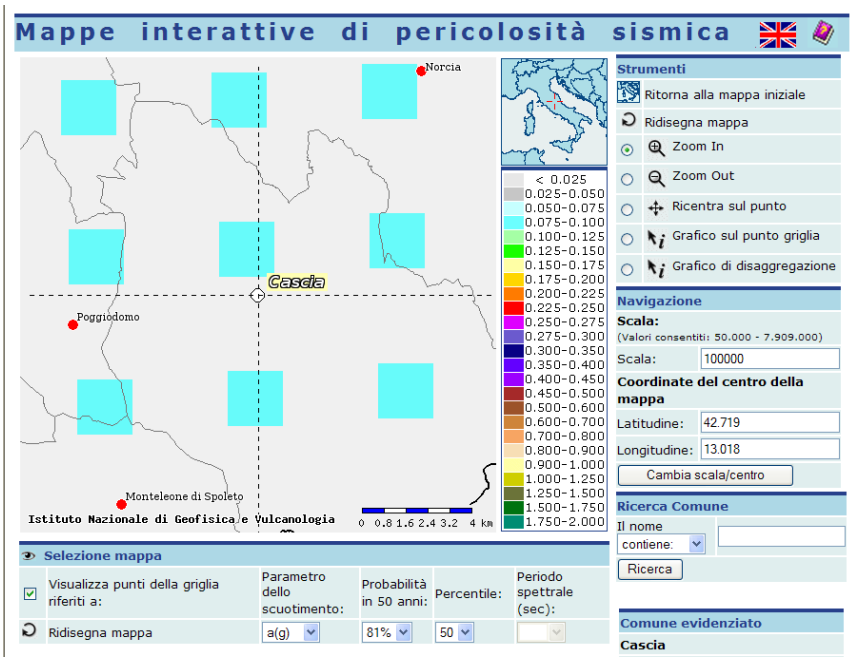


Figura 4.10: Schermata di localizzazione del sito di interesse per il quale definire i parametri di disaggregazione.

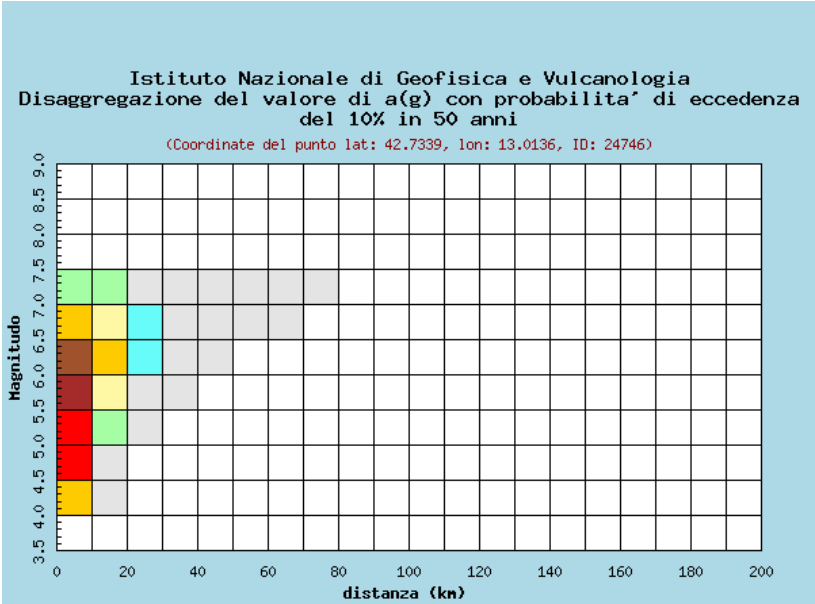


Figura 4.11: Parametri di disaggregazione per SLV.

Valori medi	
Magnitudo	**Distanza**
5.660	7.400

Figura 4.12: Parametri di disaggregazione coppia magnitudo – distanza per il sito di Cascia.

4.5.3 Risposta sismica locale

Al fine di trasformare gli accelerogrammi di input in accelerogrammi di output e quindi per passare dallo spettro di input allo spettro di output, è necessario effettuare una modellazione che consideri gli effetti di amplificazione sismostratigrafica data dai depositi di copertura. Considerando che le caratteristiche morfologiche del sito in questione (zona di fondovalle) escludono la presenza di amplificazioni sismiche dovute a fattori topografici, è stato scelto di utilizzare un modello numerico di analisi monodimensionale lineare equivalente.

L'impiego di modelli di calcolo ha lo scopo di simulare il processo di propagazione delle onde sismiche attraverso il substrato e i depositi superficiali, ai fini della valutazione della risposta sismica locale. Tali modelli differiscono tra loro per l'algoritmo di calcolo utilizzato, per le condizioni e le ipotesi semplificative considerate. Le analisi numeriche possono dunque fornire l'andamento nel tempo delle deformazioni e delle tensioni, delle accelerazioni e dei corrispondenti spettri di risposta sia in superficie che in profondità.

L'analisi monodimensionale lineare equivalente è utile per modellare situazioni piano – parallele ad uno o più strati, considerando una colonna verticale monodimensionale e ipotizzando isotropia laterale. Il rapporto profondità massima – estensione del fondovalle (H/L), tale da poter applicare questa analisi, deve essere minore di 0.25. Il modello di calcolo in questione fornisce risultati soddisfacenti per deformazioni non eccessive del terreno, minori dell'1%.

La modellazione è stata effettuata con i programmi Strata (*Alfred Kottke, Ellen Rathje, University of Texas at Austin*) e RSLIII della ditta GeoStru software. Entrambi si basano sul codice di calcolo Shake.

Gli spettri medi ottenuti dallo studio di risposta sismica locale vengono normalizzati utilizzando lo stesso algoritmo riportato sia negli ICMS che specificatamente nell' Ord. 55 del 24/04/2018.

La procedura di normalizzazione (*Newmark e Hall, 1982, Romeo, 2007, Liberatore e Pagliaroli, 2014*), permette di trasformare lo spettro medio di risposta sismica locale, in uno spettro con forma standard (secondo le vigenti norme tecniche per le costruzioni), costituita da un ramo con accelerazione crescente lineare, un ramo ad accelerazione costante, un ramo in cui l'accelerazione decresce con 1/T e, quindi, a velocità costante. Indicando con SA l'ordinata relativa allo spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione (Fig. 4.13),

ottenuto dalle simulazioni numeriche, i passi della procedura di normalizzazione sono i seguenti:

a) Si calcola lo spettro di pseudoaccelerazione (SA) e si determina il periodo proprio (TA) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudoaccelerazione

b) Si calcola il valore medio dello spettro (SA_m) nell'intorno di TA, tra 0.5TA e 1.5TA; questo valore sarà assunto come valore costante del tratto ad accelerazione costante dello spettro standard.

$$SA_m = \frac{1}{TA} \int_{0.5*TA}^{1.5*TA} SA(T)dT$$

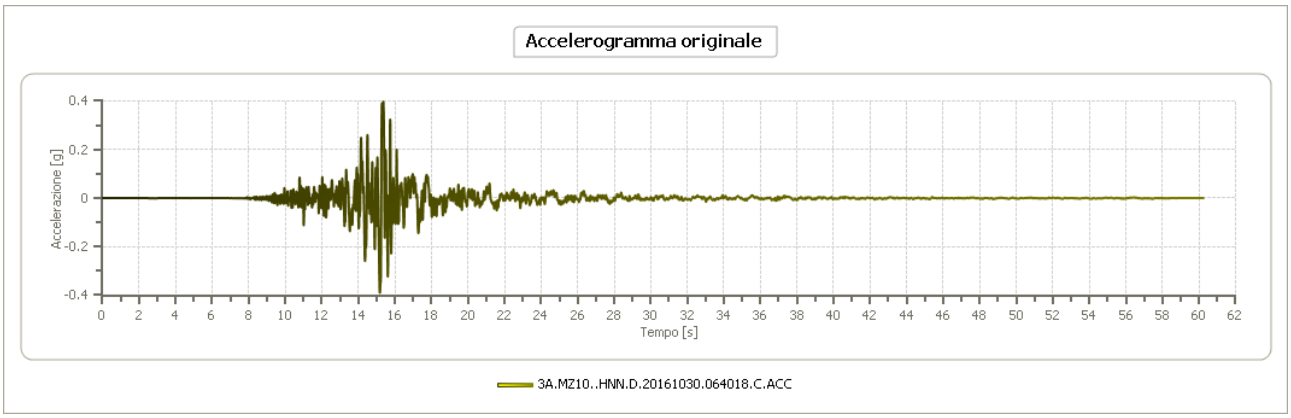
Figura 4.13: Integrale utilizzato per la normalizzazione dello spettro.

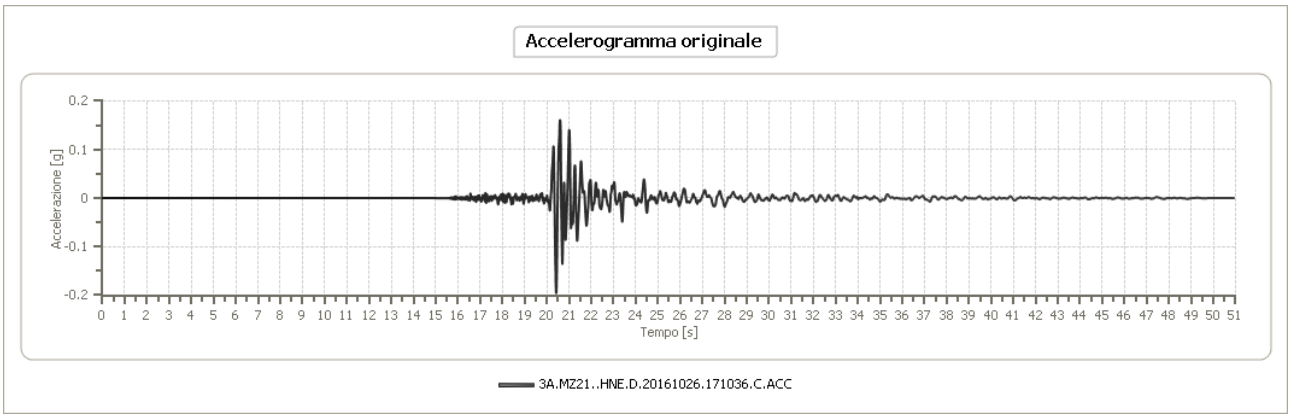
n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Terreno (Curve di degrado)	Gmax [MPa]	Peso unità vol. [kN/m³]	Vs [m/s]
1	--	6.0	Vucetic & Dorby (1991) PI=50	56.19	18.0	175.0
2	6.0	6.0	Vucetic & Dorby (1991) PI=50	66.24	18.0	190.0
3	12.0	6.0	Vucetic & Dorby (1991) PI=50	84.82	18.0	215.0
4	18.0	6.0	Vucetic & Dorby (1991) PI=50	110.14	18.0	245.0
5	24.0	6.0	Vucetic & Dorby (1991) PI=50	165.14	18.0	300.0
6	30.0	6.0	Vucetic & Dorby (1991) PI=50	237.80	18.0	360.0
7	36.0	6.0	Vucetic & Dorby (1991) PI=50	323.67	18.0	420.0
8	42.0	2.0	Vucetic & Dorby (1991) PI=50	355.23	18.0	440.0
9	oo	--	Smorzamento costante	1435.27	22.0	800.0

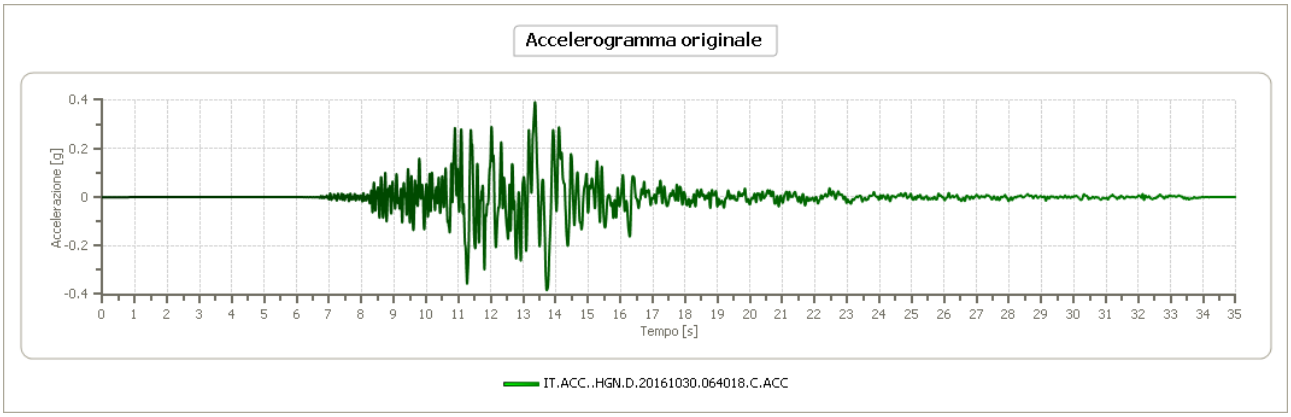
Tabella 4.11: Modello sismostratigrafico utilizzato per la modellazione numerica e costruzione degli spettri.

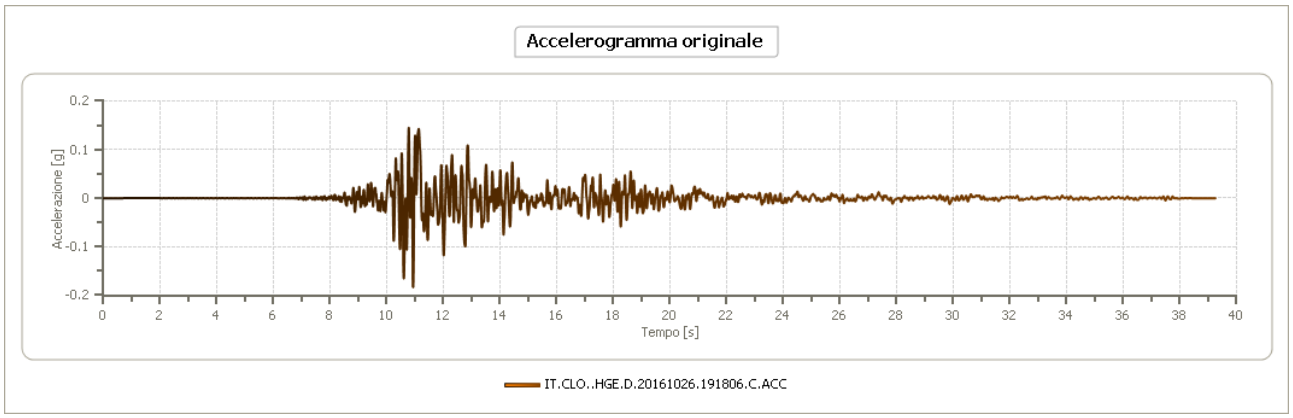
3A.MZ10..HNN.D.20161030.064018.C.ACC
3A.MZ21..HNE.D.20161026.171036.C.ACC
IT.ACC..HGN.D.20161030.064018.C.ACC
IT.CLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC
IT.CLO..HGN.D.20161026.191806.C.ACC
IT.MMO..HGN.D.20161030.064018.C.ACC
IV.T1212..HNN.D.20161030.064018.C.ACC

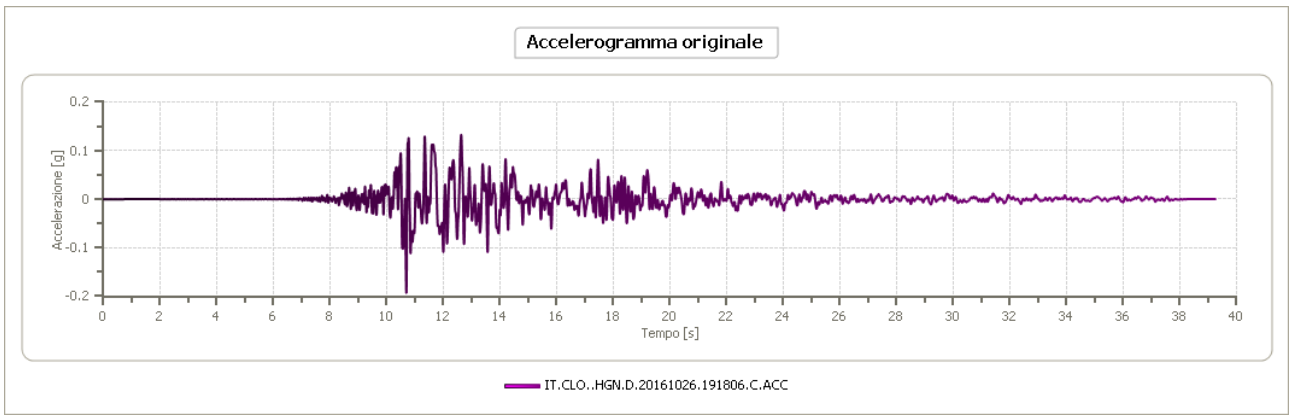
Figura 4.14: Nomi degli accelerogrammi utilizzati per la definizione della risposta sismica locale orizzontale.

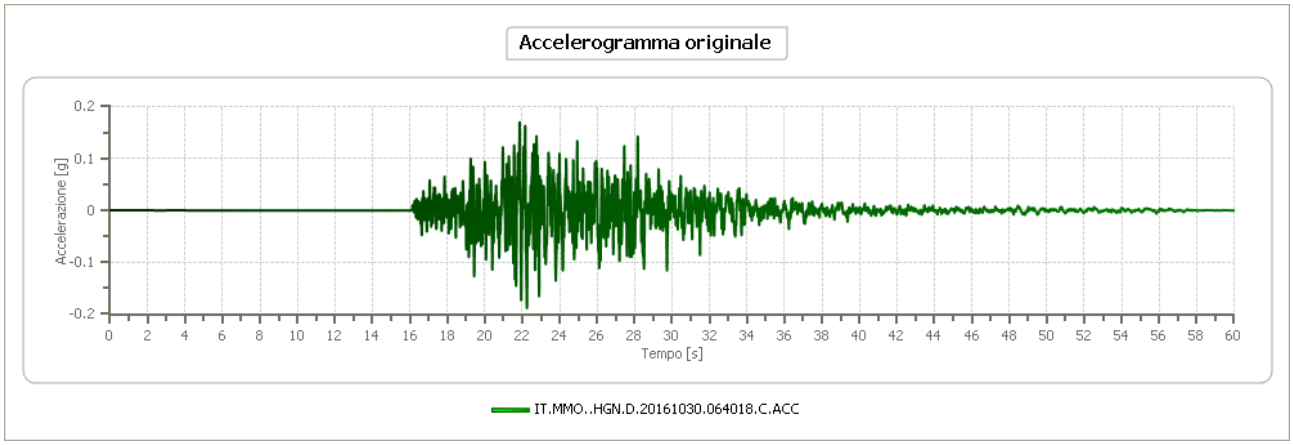







Accelerogramma originale
Accelerazione [g]
Tempo [s]
IT.CLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC


Accelerogramma originale
Accelerazione [g]
Tempo [s]
IT.CLO..HGN.D.20161026.191806.C.ACC


Accelerogramma originale
Accelerazione [g]
Tempo [s]
IT.MMO..HGN.D.20161030.064018.C.ACC

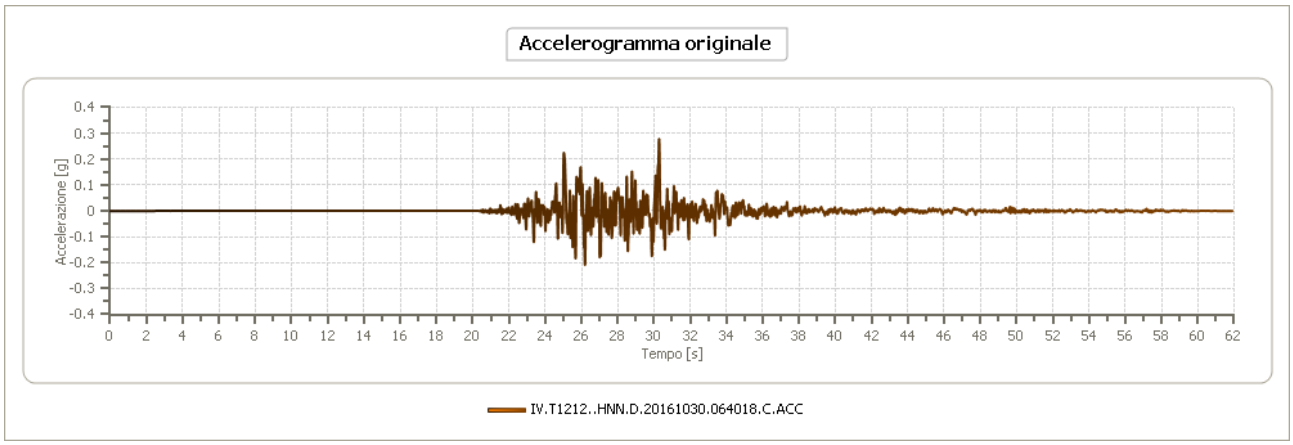


Figura 4.15: Accelerogrammi utilizzati per la risposta sismica locale orizzontale.

La spettrocompatibilità degli spettri medi di input viene verificata in un intervallo di periodo compreso tra 0.15 s e 2,4 s (per gli spettri normalizzati). Tale intervallo risulta più largo rispetto a quelli normalmente utilizzati (0.15 s – 2 T) al fine di poter utilizzare i risultati delle modellazioni anche per progetti che prendono in considerazione l'utilizzo di isolatori sismici. Per tali strutture, infatti, il periodo proprio della struttura, risulta generalmente prossimo o superiore ai 2 secondi.

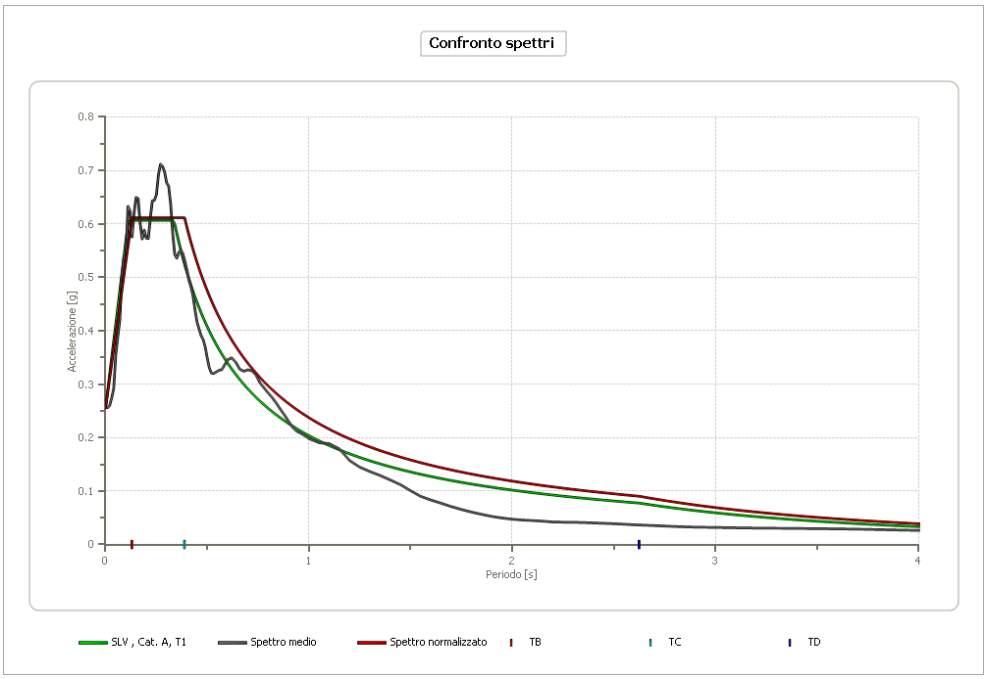


Figura 4.16: Spettrocompatibilità componente orizzontale per SLV.

Periodo minino [s]	Periodo massimo [s]	Int. Housner input [m]	Int. Housner output [m]	Int. Housner input/output [m]	FA
0.100	0.500	0.097	0.177	0.200	1.832
0.400	0.800	0.135	0.341	0.500	2.532
0.700	1.100	0.146	0.350	0.636	2.390

Tabella 4.12: Fattori di amplificazione (FA) relativi a tre intervalli di periodo.

Spettro medio orizzontale (valori numerici) SLV

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.01	0.4713	0.33	1.0928	0.72	0.9219	1.90	0.0787	4.60	0.0244
0.02	0.4756	0.34	0.9965	0.74	0.8912	1.95	0.0723	4.70	0.0235
0.03	0.4823	0.35	0.9544	0.76	0.8317	2.00	0.0678	4.80	0.0226
0.04	0.5068	0.36	0.9486	0.78	0.7674	2.05	0.0644	4.90	0.0218
0.05	0.5392	0.37	0.9675	0.80	0.7245	2.10	0.0615	5.00	0.0212
0.06	0.5799	0.38	0.9745	0.82	0.6841	2.15	0.0601	5.10	0.0204
0.07	0.6276	0.39	0.9626	0.84	0.6393	2.20	0.0585	5.20	0.0196
0.08	0.7012	0.40	0.9470	0.86	0.6003	2.25	0.0567	5.40	0.0182
0.09	0.7811	0.41	0.9441	0.88	0.5682	2.30	0.0550	5.60	0.0170
0.10	0.8630	0.42	0.9256	0.90	0.5361	2.35	0.0536	5.80	0.0158
0.11	1.0108	0.43	0.8905	0.92	0.5053	2.40	0.0523	6.00	0.0147
0.12	1.0045	0.44	0.8553	0.94	0.4813	2.50	0.0494	6.20	0.0136
0.13	0.9592	0.45	0.8494	0.96	0.4586	2.60	0.0468	6.40	0.0128
0.14	1.0498	0.46	0.8605	0.98	0.4366	2.70	0.0453	6.60	0.0122
0.15	1.1167	0.47	0.8778	1.00	0.4172	2.80	0.0433	6.80	0.0117
0.16	1.1757	0.48	0.8884	1.05	0.3857	2.90	0.0410	7.00	0.0111
0.17	1.0577	0.49	0.8886	1.10	0.3470	3.00	0.0391	7.20	0.0106
0.18	1.0257	0.50	0.8722	1.15	0.3226	3.10	0.0376	7.40	0.0100
0.19	1.0315	0.51	0.8536	1.20	0.2897	3.20	0.0360	7.60	0.0095
0.20	1.0307	0.52	0.8704	1.25	0.2555	3.30	0.0345	7.80	0.0090
0.21	1.1033	0.53	0.8836	1.30	0.2326	3.40	0.0336	8.00	0.0084
0.22	1.2144	0.54	0.8995	1.35	0.2119	3.50	0.0330	8.50	0.0073
0.23	1.3085	0.55	0.9168	1.40	0.1902	3.60	0.0327	9.00	0.0065
0.24	1.3386	0.56	0.9416	1.45	0.1703	3.70	0.0322	9.50	0.0058
0.25	1.3342	0.57	0.9831	1.50	0.1547	3.80	0.0313	10.00	0.0052
0.26	1.3590	0.58	1.0109	1.55	0.1405	3.90	0.0302		
0.27	1.3729	0.60	1.0353	1.60	0.1292	4.00	0.0291		
0.28	1.3642	0.62	1.0449	1.65	0.1192	4.10	0.0283		
0.29	1.3059	0.64	1.0096	1.70	0.1090	4.20	0.0271		
0.30	1.2640	0.66	0.9657	1.75	0.1007	4.30	0.0266		
0.31	1.2384	0.68	0.9378	1.80	0.0928	4.40	0.0260		
0.32	1.1836	0.70	0.9326	1.85	0.0854	4.50	0.0251		

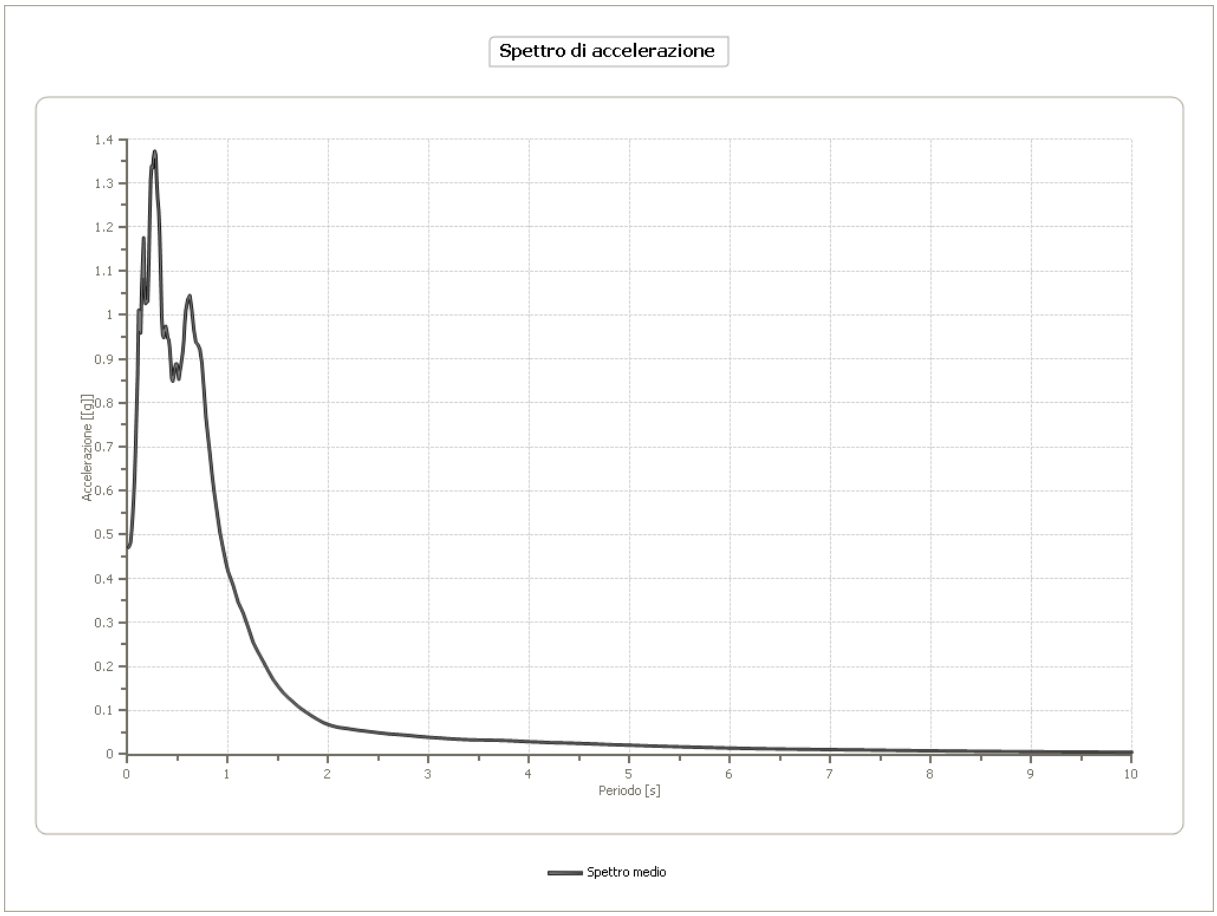


Figura 4.17: Grafico spettro medio componente orizzontale per SLV.

Spettro normalizzato orizzontale (valori numerici) SLV

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.4760	0.32	1.1373	0.70	0.9114	1.85	0.3449	4.50	0.1418
0.01	0.5113	0.33	1.1373	0.72	0.8861	1.90	0.3358	4.60	0.1387
0.02	0.5467	0.34	1.1373	0.74	0.8621	1.95	0.3272	4.70	0.1357
0.03	0.5821	0.35	1.1373	0.76	0.8394	2.00	0.3190	4.80	0.1329
0.04	0.6174	0.36	1.1373	0.78	0.8179	2.05	0.3112	4.90	0.1302
0.05	0.6528	0.37	1.1373	0.80	0.7975	2.10	0.3038	5.00	0.1276
0.06	0.6882	0.38	1.1373	0.82	0.7780	2.15	0.2967	5.10	0.1251
0.07	0.7235	0.39	1.1373	0.84	0.7595	2.20	0.2900	5.20	0.1227
0.08	0.7589	0.40	1.1373	0.86	0.7418	2.25	0.2835	5.40	0.1181
0.09	0.7943	0.41	1.1373	0.88	0.7250	2.30	0.2774	5.60	0.1139
0.10	0.8297	0.42	1.1373	0.90	0.7089	2.35	0.2715	5.80	0.1100
0.11	0.8650	0.43	1.1373	0.92	0.6935	2.40	0.2658	6.00	0.1063
0.12	0.9004	0.44	1.1373	0.94	0.6787	2.50	0.2552	6.20	0.1029
0.13	0.9358	0.45	1.1373	0.96	0.6646	2.60	0.2454	6.40	0.0997
0.14	0.9711	0.46	1.1373	0.98	0.6510	2.70	0.2363	6.60	0.0967
0.15	1.0065	0.47	1.1373	1.00	0.6380	2.80	0.2279	6.80	0.0938
0.16	1.0419	0.48	1.1373	1.05	0.6076	2.90	0.2200	7.00	0.0911
0.17	1.0772	0.49	1.1373	1.10	0.5800	3.00	0.2127	7.20	0.0886
0.18	1.1126	0.50	1.1373	1.15	0.5548	3.10	0.2058	7.40	0.0862
0.19	1.1373	0.51	1.1373	1.20	0.5317	3.20	0.1994	7.60	0.0839
0.20	1.1373	0.52	1.1373	1.25	0.5104	3.30	0.1933	7.80	0.0818
0.21	1.1373	0.53	1.1373	1.30	0.4908	3.40	0.1876	8.00	0.0797
0.22	1.1373	0.54	1.1373	1.35	0.4726	3.50	0.1823	8.50	0.0751
0.23	1.1373	0.55	1.1373	1.40	0.4557	3.60	0.1772	9.00	0.0709
0.24	1.1373	0.56	1.1373	1.45	0.4400	3.70	0.1724	9.50	0.0672
0.25	1.1373	0.57	1.1193	1.50	0.4253	3.80	0.1679	10.00	0.0638
0.26	1.1373	0.58	1.1000	1.55	0.4116	3.90	0.1636		
0.27	1.1373	0.60	1.0633	1.60	0.3987	4.00	0.1595		
0.28	1.1373	0.62	1.0290	1.65	0.3867	4.10	0.1556		
0.29	1.1373	0.64	0.9968	1.70	0.3753	4.20	0.1519		
0.30	1.1373	0.66	0.9666	1.75	0.3646	4.30	0.1484		
0.31	1.1373	0.68	0.9382	1.80	0.3544	4.40	0.1450		

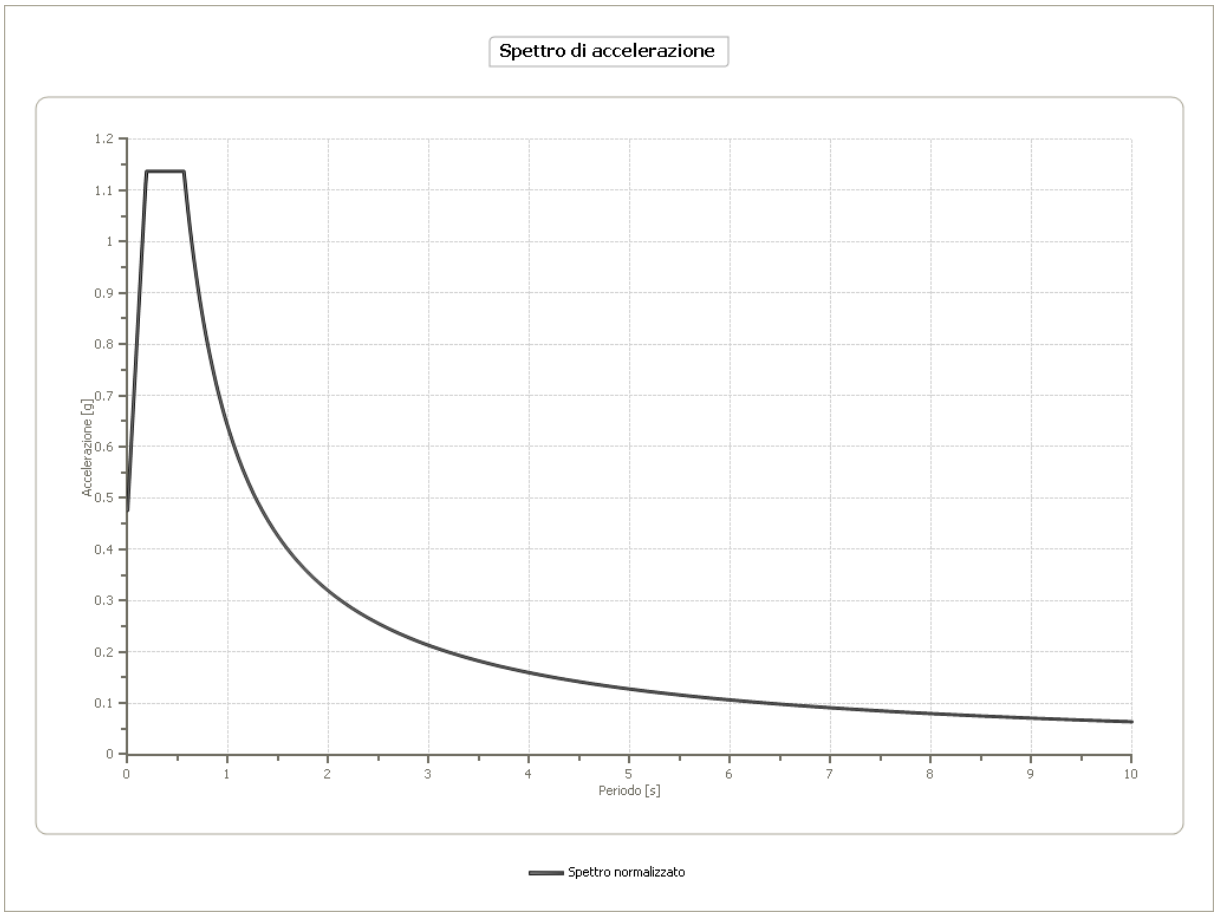


Figura 4.18: Grafico spettro normalizzato componente orizzontale per SLV.

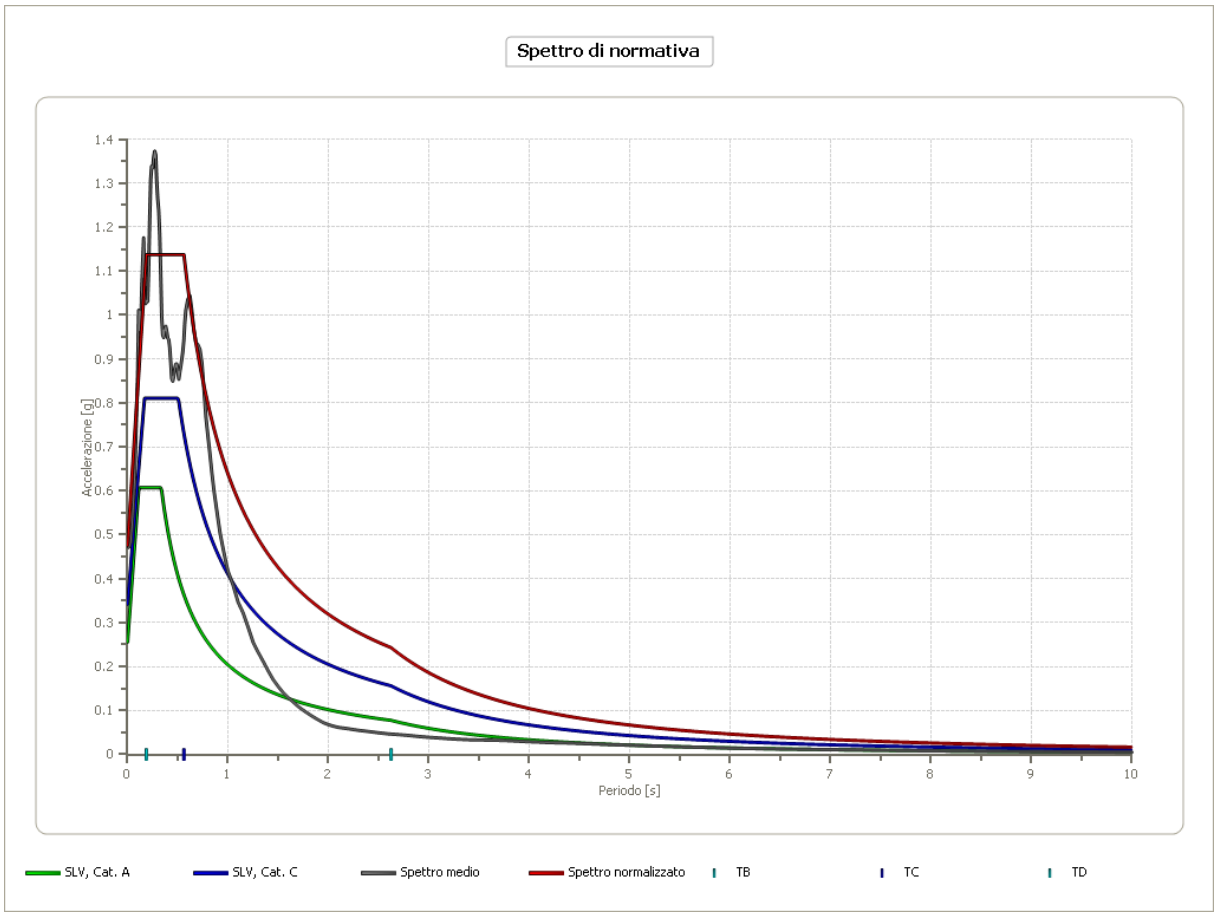
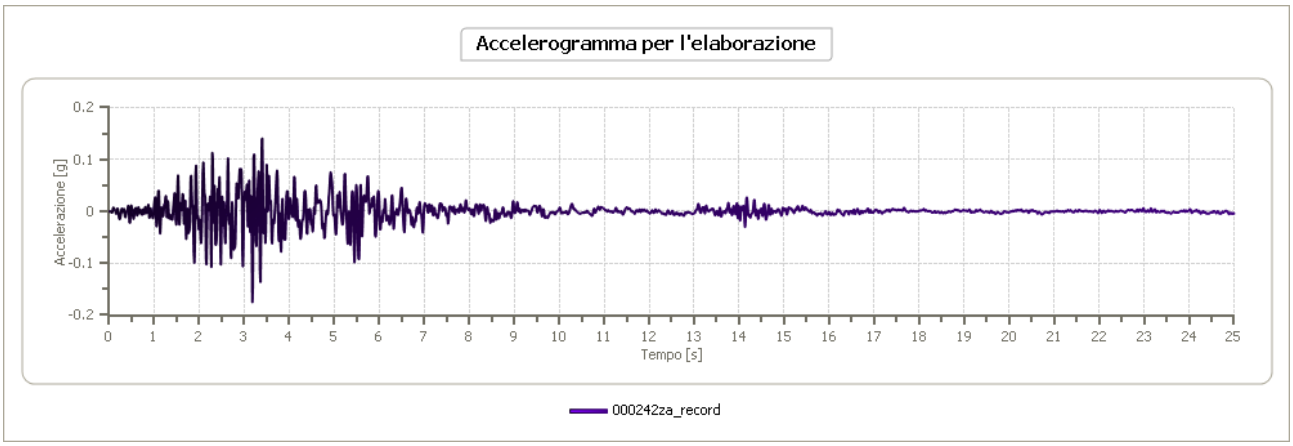
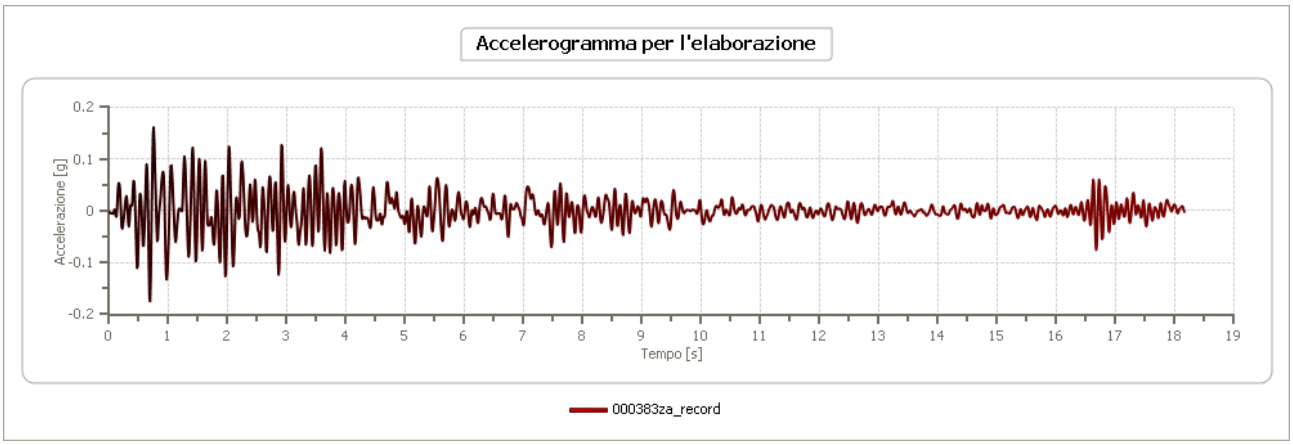


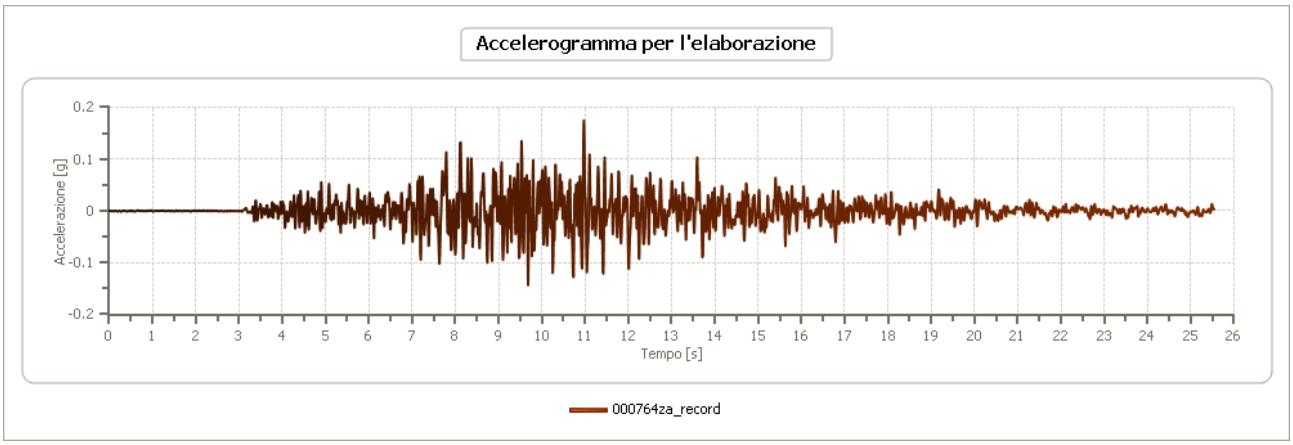
Figura 4.19: Confronto tra spettri di normativa (cat. A e C), spettro normalizzato e spettro medio SLV, per la componente orizzontale.

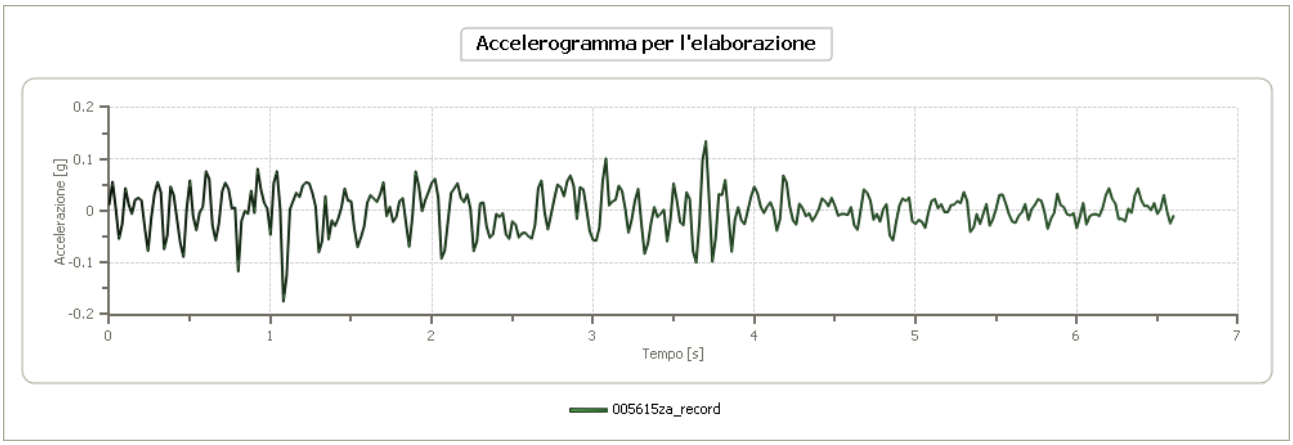
000242za_record.txt
000383za_record.txt
000764za_record.txt
005615za_record.txt
005655za_record.txt
007156za_record.txt
007187za_record.txt

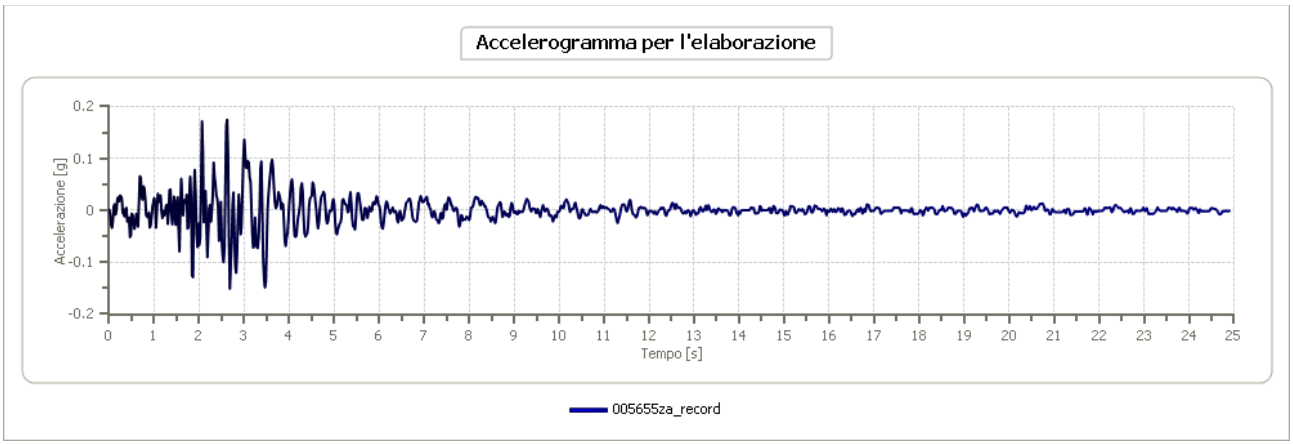
Figura 4.20: Nomi accelerogrammi utilizzati per la definizione della risposta sismica verticale locale.

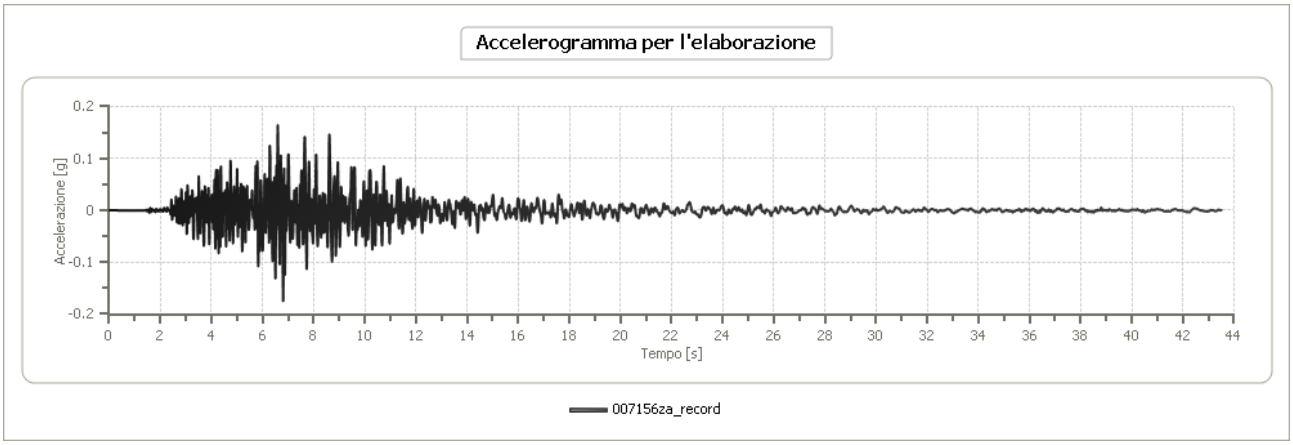







Accelerogramma per l'elaborazione
Accelerazione [g]
Tempo [s]
005615za_record


Accelerogramma per l'elaborazione
Accelerazione [g]
Tempo [s]
005655za_record


Accelerogramma per l'elaborazione
Accelerazione [g]
Tempo [s]
007156za_record

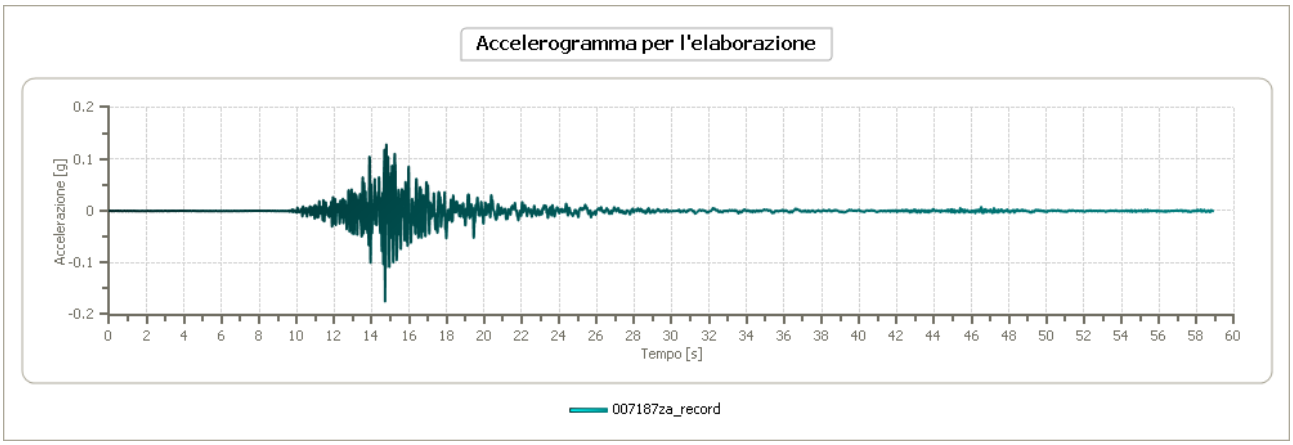


Figura 4.21: Accelerogrammi utilizzati per la risposta sismica locale verticale.

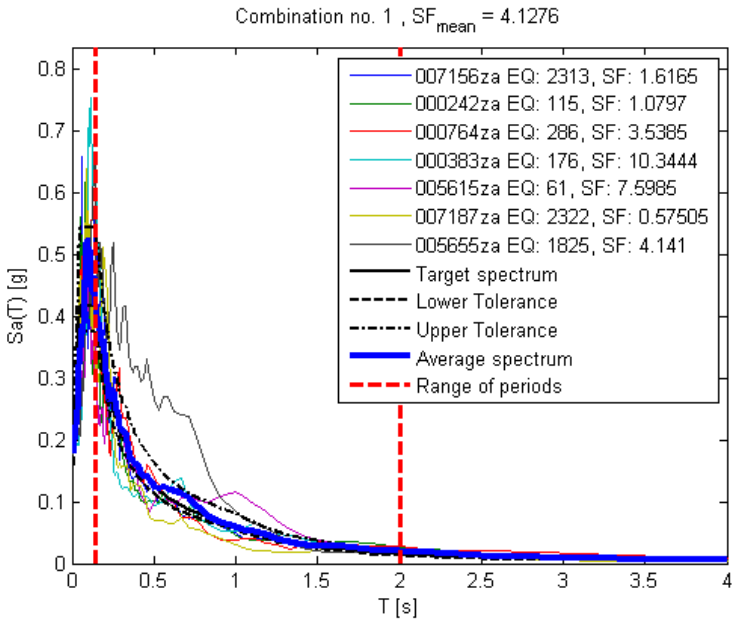


Figura 4.22: Spettrocompatibilità componente verticale per SLV.

Periodo minino [s]	Periodo massimo [s]	Int. Housner input [m]	Int. Housner output [m]	Int. Housner input/output [m]	FA
0.100	0.500	0.041	0.079	0.200	1.941
0.400	0.800	0.046	0.123	0.500	2.662
0.700	1.100	0.046	0.104	0.636	2.246

Tabella 4.13: Fattori di amplificazione (FA) relativi a tre intervalli di periodo.

Spettro medio verticale (valori numerici) SLV

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.01	0.2926	0.33	0.3708	0.72	0.2795	1.90	0.0301	4.60	0.0043
0.02	0.2927	0.34	0.3437	0.74	0.2648	1.95	0.0288	4.70	0.0041
0.03	0.3085	0.35	0.3246	0.76	0.2434	2.00	0.0276	4.80	0.0039
0.04	0.3690	0.36	0.3180	0.78	0.2244	2.05	0.0261	4.90	0.0038
0.05	0.4237	0.37	0.3223	0.80	0.2056	2.10	0.0246	5.00	0.0036
0.06	0.5122	0.38	0.3248	0.82	0.1869	2.15	0.0231	5.10	0.0034
0.07	0.5558	0.39	0.3242	0.84	0.1739	2.20	0.0220	5.20	0.0033
0.08	0.7100	0.40	0.3191	0.86	0.1643	2.25	0.0209	5.40	0.0030
0.09	0.7828	0.41	0.3099	0.88	0.1544	2.30	0.0201	5.60	0.0028
0.10	0.8792	0.42	0.3034	0.90	0.1449	2.35	0.0194	5.80	0.0027
0.11	0.8082	0.43	0.3086	0.92	0.1382	2.40	0.0188	6.00	0.0025
0.12	0.7333	0.44	0.3204	0.94	0.1318	2.50	0.0176	6.20	0.0024
0.13	0.8025	0.45	0.3272	0.96	0.1258	2.60	0.0165	6.40	0.0023
0.14	0.7982	0.46	0.3347	0.98	0.1203	2.70	0.0154	6.60	0.0021
0.15	0.7412	0.47	0.3436	1.00	0.1143	2.80	0.0141	6.80	0.0020
0.16	0.7168	0.48	0.3468	1.05	0.1020	2.90	0.0134	7.00	0.0019
0.17	0.6550	0.49	0.3484	1.10	0.0920	3.00	0.0128	7.20	0.0019
0.18	0.6356	0.50	0.3509	1.15	0.0821	3.10	0.0120	7.40	0.0018
0.19	0.6759	0.51	0.3493	1.20	0.0700	3.20	0.0115	7.60	0.0017
0.20	0.6673	0.52	0.3606	1.25	0.0618	3.30	0.0109	7.80	0.0017
0.21	0.6472	0.53	0.3715	1.30	0.0563	3.40	0.0102	8.00	0.0016
0.22	0.6370	0.54	0.3804	1.35	0.0518	3.50	0.0094	8.50	0.0015
0.23	0.5897	0.55	0.3854	1.40	0.0488	3.60	0.0086	9.00	0.0013
0.24	0.5920	0.56	0.3893	1.45	0.0458	3.70	0.0079	9.50	0.0013
0.25	0.5927	0.57	0.3863	1.50	0.0440	3.80	0.0074	10.00	0.0012
0.26	0.5712	0.58	0.3801	1.55	0.0424	3.90	0.0069		
0.27	0.5047	0.60	0.3590	1.60	0.0403	4.00	0.0064		
0.28	0.4557	0.62	0.3494	1.65	0.0379	4.10	0.0060		
0.29	0.4246	0.64	0.3408	1.70	0.0368	4.20	0.0056		
0.30	0.4028	0.66	0.3263	1.75	0.0353	4.30	0.0052		
0.31	0.3929	0.68	0.3057	1.80	0.0333	4.40	0.0049		
0.32	0.3923	0.70	0.2918	1.85	0.0316	4.50	0.0046		

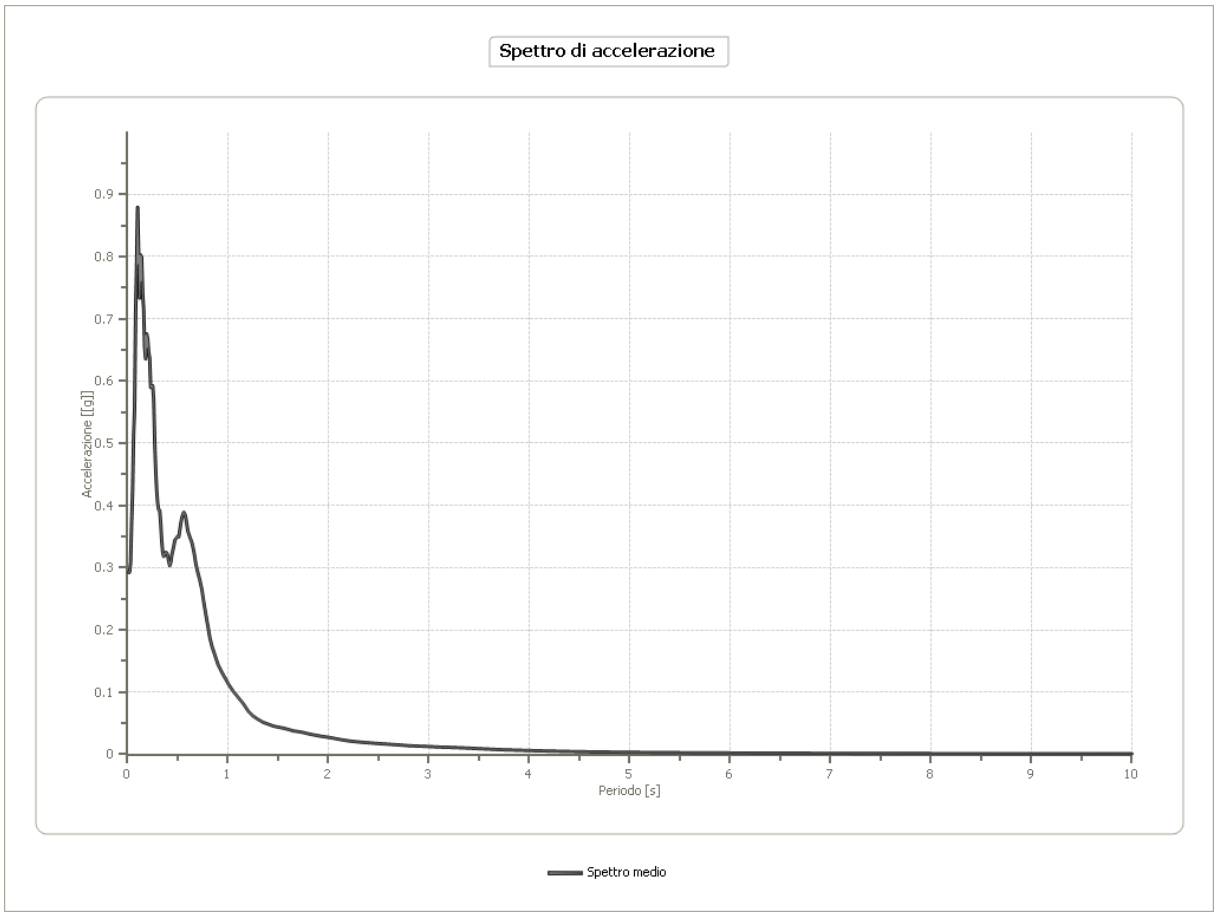


Figura 4.23: Grafico spettro medio componente verticale SLV.

Spettro normalizzato verticale (valori numerici) SLV

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.2890	0.32	0.6793	0.70	0.3105	1.85	0.1175	4.50	0.0483
0.01	0.3313	0.33	0.6587	0.72	0.3019	1.90	0.1144	4.60	0.0473
0.02	0.3735	0.34	0.6393	0.74	0.2937	1.95	0.1115	4.70	0.0462
0.03	0.4158	0.35	0.6211	0.76	0.2860	2.00	0.1087	4.80	0.0453
0.04	0.4581	0.36	0.6038	0.78	0.2787	2.05	0.1060	4.90	0.0444
0.05	0.5003	0.37	0.5875	0.80	0.2717	2.10	0.1035	5.00	0.0435
0.06	0.5426	0.38	0.5720	0.82	0.2651	2.15	0.1011	5.10	0.0426
0.07	0.5849	0.39	0.5574	0.84	0.2588	2.20	0.0988	5.20	0.0418
0.08	0.6272	0.40	0.5434	0.86	0.2528	2.25	0.0966	5.40	0.0403
0.09	0.6694	0.41	0.5302	0.88	0.2470	2.30	0.0945	5.60	0.0388
0.10	0.7117	0.42	0.5176	0.90	0.2415	2.35	0.0925	5.80	0.0375
0.11	0.7165	0.43	0.5055	0.92	0.2363	2.40	0.0906	6.00	0.0362
0.12	0.7165	0.44	0.4940	0.94	0.2312	2.50	0.0869	6.20	0.0351
0.13	0.7165	0.45	0.4831	0.96	0.2264	2.60	0.0836	6.40	0.0340
0.14	0.7165	0.46	0.4725	0.98	0.2218	2.70	0.0805	6.60	0.0329

0.15	0.7165	0.47	0.4625	1.00	0.2174	2.80	0.0776	6.80	0.0320
0.16	0.7165	0.48	0.4529	1.05	0.2070	2.90	0.0750	7.00	0.0311
0.17	0.7165	0.49	0.4436	1.10	0.1976	3.00	0.0725	7.20	0.0302
0.18	0.7165	0.50	0.4347	1.15	0.1890	3.10	0.0701	7.40	0.0294
0.19	0.7165	0.51	0.4262	1.20	0.1811	3.20	0.0679	7.60	0.0286
0.20	0.7165	0.52	0.4180	1.25	0.1739	3.30	0.0659	7.80	0.0279
0.21	0.7165	0.53	0.4101	1.30	0.1672	3.40	0.0639	8.00	0.0272
0.22	0.7165	0.54	0.4025	1.35	0.1610	3.50	0.0621	8.50	0.0256
0.23	0.7165	0.55	0.3952	1.40	0.1553	3.60	0.0604	9.00	0.0242
0.24	0.7165	0.56	0.3882	1.45	0.1499	3.70	0.0587	9.50	0.0229
0.25	0.7165	0.57	0.3814	1.50	0.1449	3.80	0.0572	10.00	0.0217
0.26	0.7165	0.58	0.3748	1.55	0.1402	3.90	0.0557		
0.27	0.7165	0.60	0.3623	1.60	0.1359	4.00	0.0543		
0.28	0.7165	0.62	0.3506	1.65	0.1317	4.10	0.0530		
0.29	0.7165	0.64	0.3396	1.70	0.1279	4.20	0.0518		
0.30	0.7165	0.66	0.3294	1.75	0.1242	4.30	0.0506		
0.31	0.7012	0.68	0.3197	1.80	0.1208	4.40	0.0494		

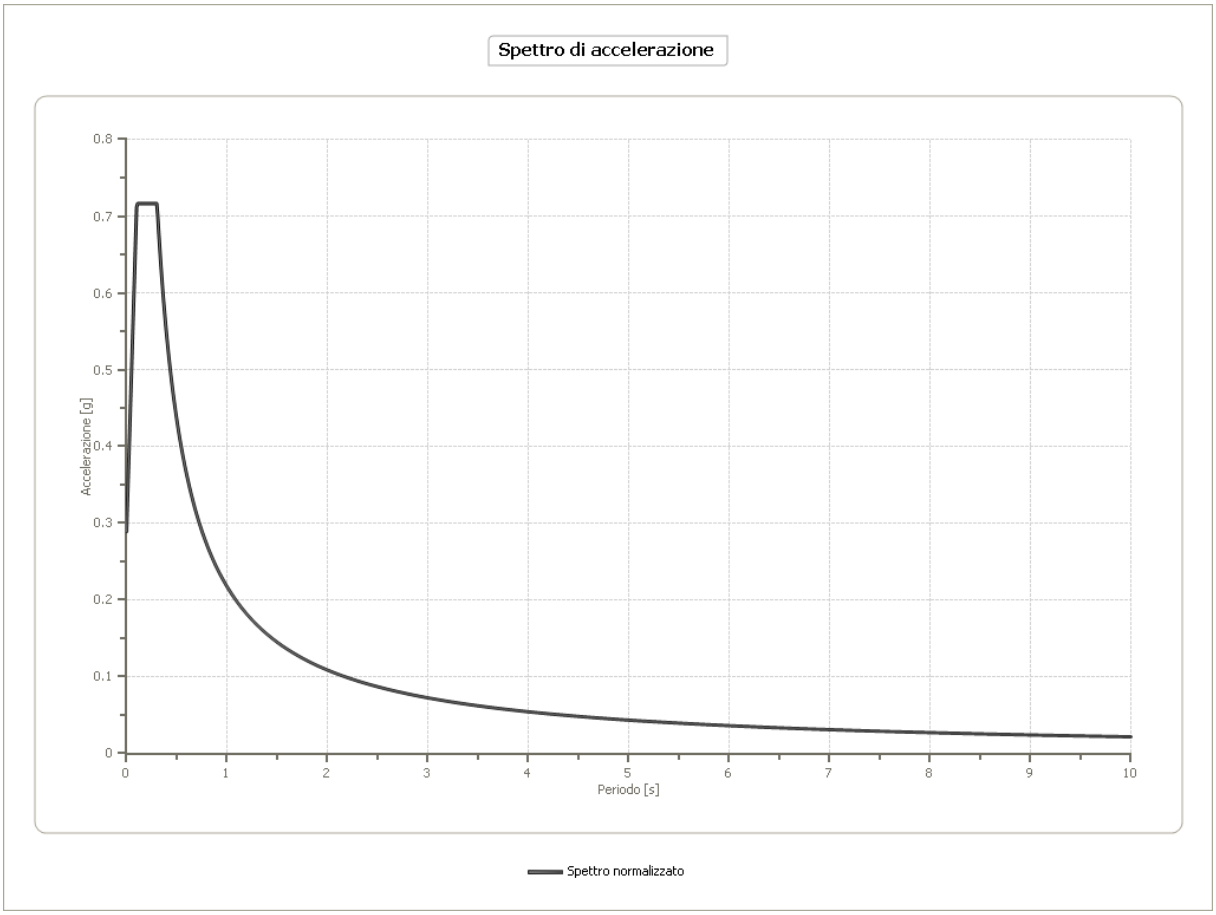


Figura 4.24: Grafico spettro normalizzato componente verticale per SLV.

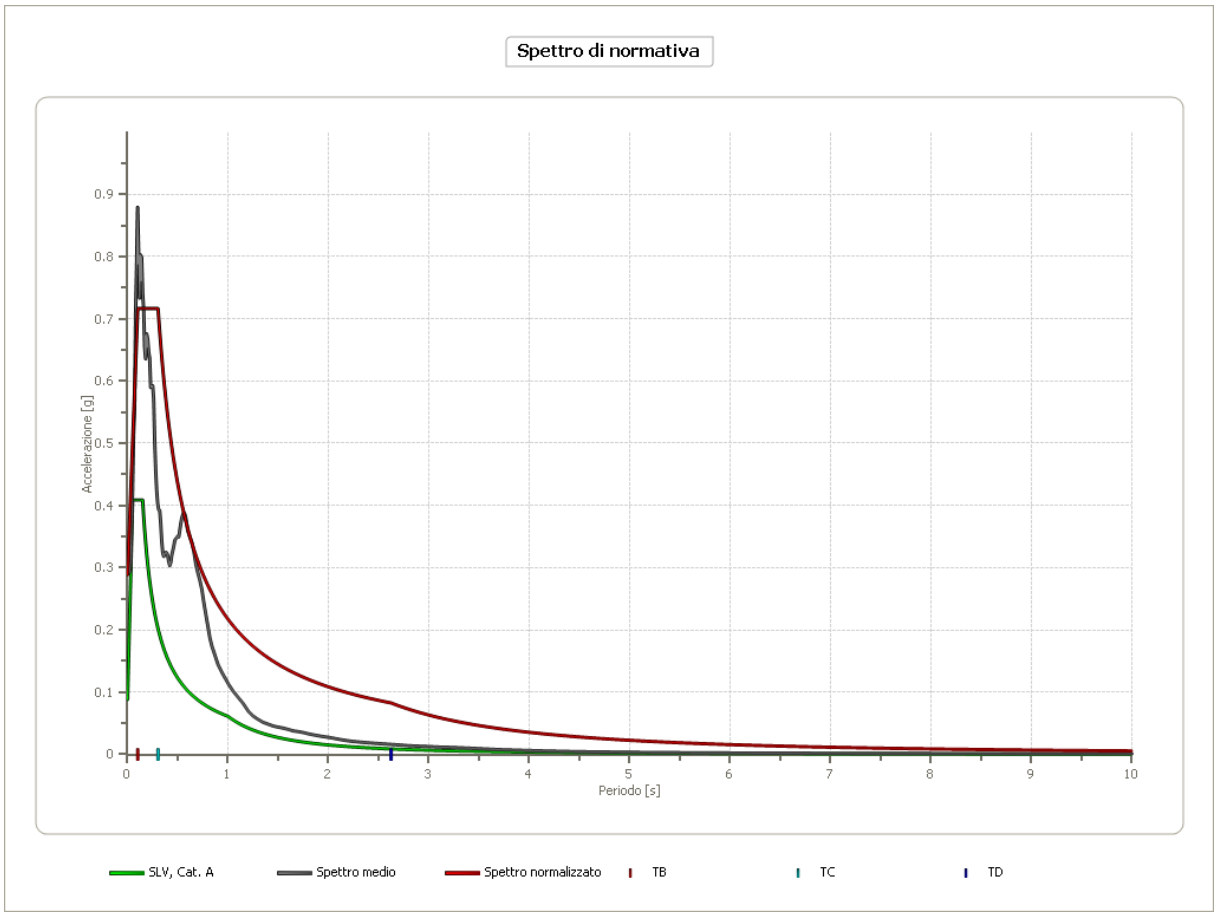


Figura 4.25: Confronto tra spettri di normativa (cat. A e C), spettro normalizzato e spettro medio, per la componente verticale.

4.5.4 *Considerazioni relative agli spettri di risposta orizzontali*

Per valori di periodo inferiori a 0,5 s, la pseudoaccelerazione risulta crescente passando da un approccio semplificato di normativa (Fig. 4.26) ad una modellazione con accelerogrammi naturali (Fig. 4.28).

Lo spettro più "basso" e quindi meno cautelativo viene pertanto determinato attraverso le categorie di sottosuolo (NTC).

I valori della pseudoaccelerazione del tratto con g costante (plateaux) corrispondono a circa 0.8 g per lo spettro dell'approccio semplificato. Lo stesso parametro sale a circa 1.1 g nello spettro di MS2 fino ad arrivare ad un valore di circa 1.2 g nello spettro RSL.

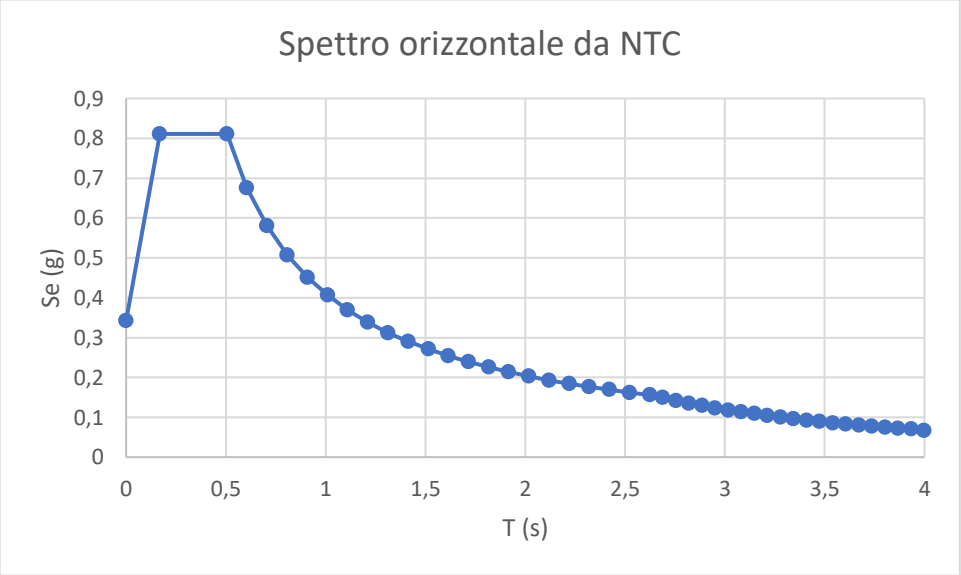


Figura 4.26: Spettro di risposta componente orizzontale da NTC.

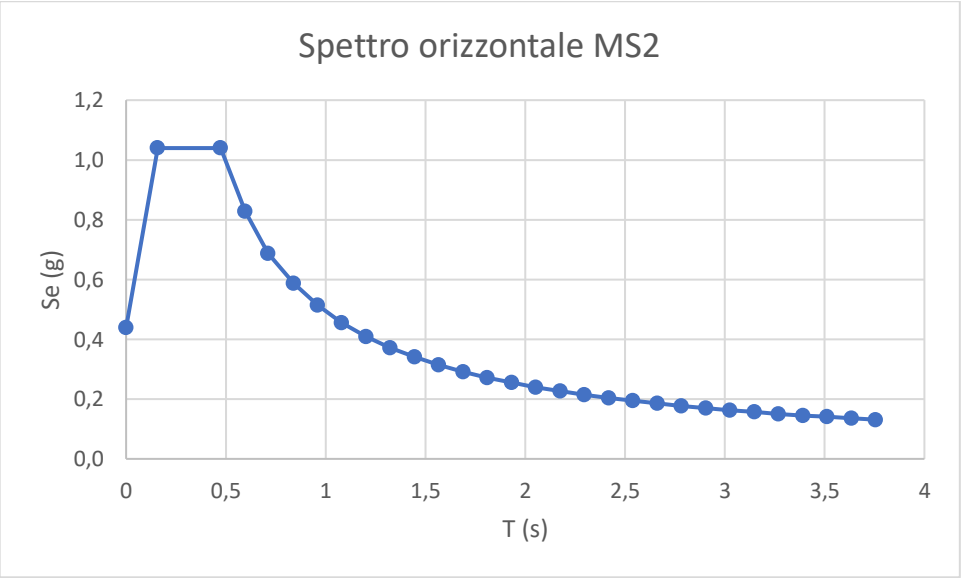


Figura 4.27: Spettro di risposta componente orizzontale MS2.

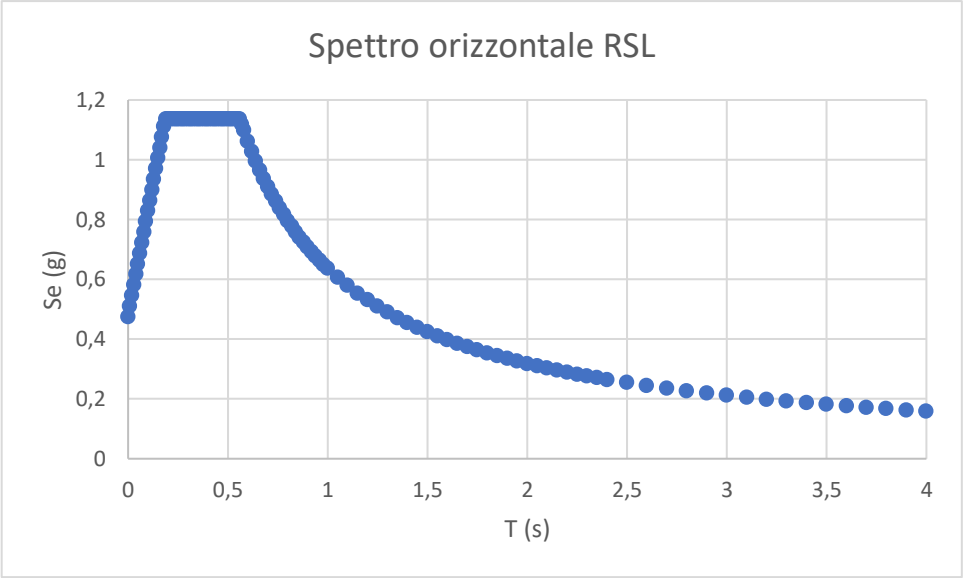


Figura 4.28: Spettro di risposta componente orizzontale RSL.

4.5.5 Considerazioni relative agli spettri di risposta verticali

Anche per quanto riguarda lo spettro della componente verticale, si verifica una sottostima del valore di g utilizzando l'approccio semplificato di normativa (che non tiene conto delle differenze sismostratigrafiche dei depositi, attribuendo un unico spettro di risposta indipendentemente dalla categoria di sottosuolo (Fig. 4.29)).

Utilizzando approcci più specifici ed approfonditi (MS2 (Fig. 4.30) e RSL (Fig. 4.31)), il valore di g del plateaux passa da 0.4 g circa a 0.7 g circa.

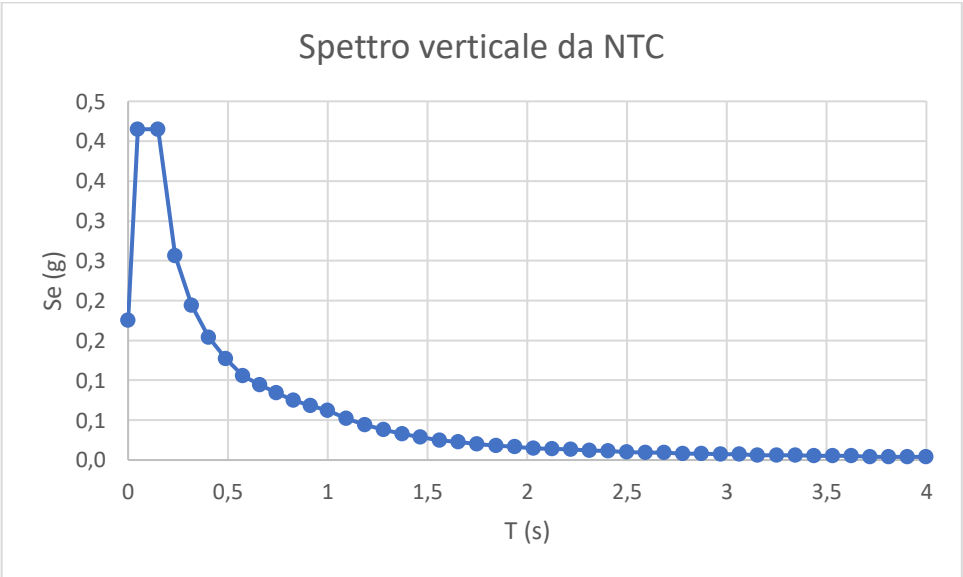


Figura 4.29: Spettro di risposta componente verticale NTC.

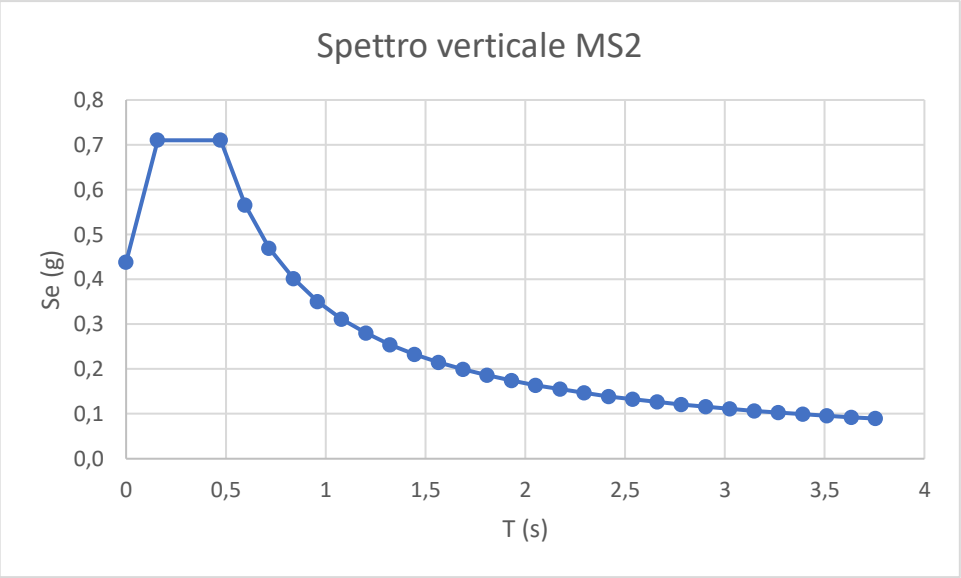


Figura 4.30: Spettro di risposta componente verticale MS2.

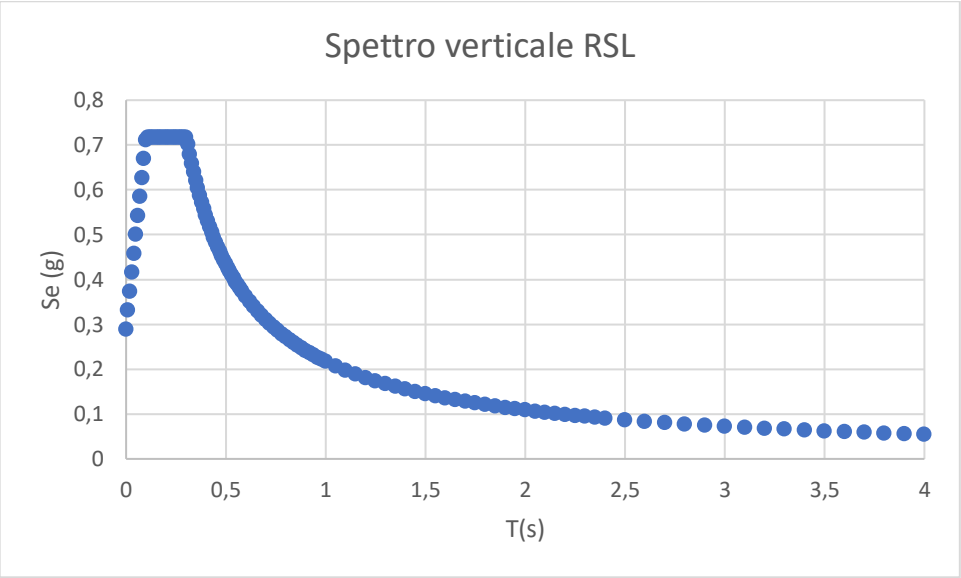


Figura 4.31: Spettro di risposta componente verticale RSL.

5

DATI ACCELEROMETRICI – SPETTRO DI RISPOSTA “REALE”

5.1 Descrizione della rete accelerometrica e attività svolte

Gli spettri calcolati analiticamente seguendo le indicazioni fornite dalle normative attuali, precedentemente illustrati e descritti, vengono confrontati con gli spettri ottenuti attraverso l’analisi di accelerogrammi registrati direttamente nel sito di Cascia. L’accelerometro installato a Cascia (Figura 5.1) fa parte della rete accelerometrica Re.Si.R.

Tale rete, istituita nell’ambito di un contratto stipulato tra la Regione Umbria e l’Osservatorio Sismico “A.Bina”, è in funzione dal 01/01/2019 ed è composta da quattro stazioni situate nelle località di Città di Castello, Perugia, Cascia e Giano dell’Umbria (Fraz. Bastardo). La rete acquisisce dati utili sia nell’ambito geofisico che in quello ingegneristico.

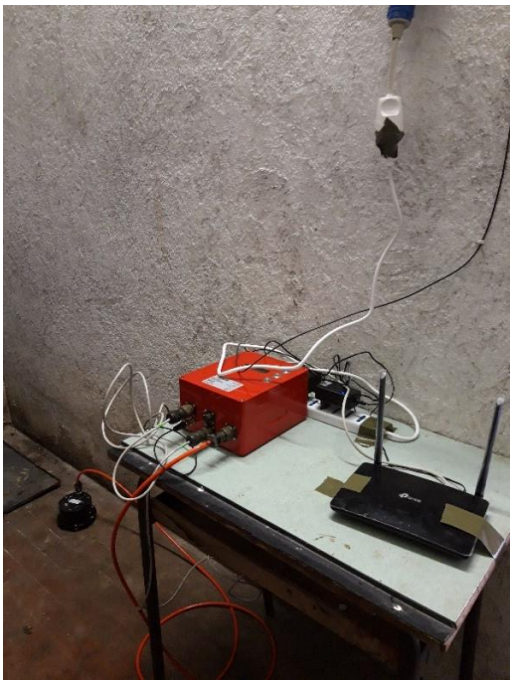


Figura 5.1: Accelerometro di Cascia. Sistema costituito da accelerometro Epicensor FBA ES-T, sismografo 24 bit SL06C3, sistema di trasmissione dati via GSM con configurazione VPN e antenna GPS per la sincronizzazione oraria dei dati acquisiti dal digitalizzatore.

Figura 5.2: Postazione accelerometrica didattica multimediale di Perugia, situata all'interno dell'Osservatorio Sismico A. Bina.

La strumentazione accelerometrica installata è in grado di registrare sia eventi di intensità contenuta che forti terremoti (*strong motion*) in prossimità dell'epicentro e fornisce la risposta sismica reale del terreno. Tale fattore è fondamentale per lo studio delle caratteristiche del moto del terreno e per la definizione dei parametri progettuali nell'ambito della costruzione di nuovi edifici o per la verifica di edifici già esistenti (come prescritto dalle attuali norme tecniche sulle costruzioni NTC 17/01/18).

I parametri ricavati dalle registrazioni accelerometriche, in termini di accelerazione (PGA) e spettro di risposta, permettono di determinare l'azione sismica da applicare per le verifiche sismiche nell'ambito della progettazione di edifici antisismici**.** I dati acquisiti dalla nuova rete accelerometrica permettono quindi di determinare, in modo diretto, la risposta sismica locale "reale" dei terreni di fondazione. Tale fattore permette inoltre di "tarare" le indagini geofisiche che si effettuano per la ricostruzione del modello sismostratigrafico e per risalire, in modo empirico, alla teorica risposta sismica locale.

Il monitoraggio accelerometrico continuo sul piano fondale di importanti edifici (edifici strategici, edifici pubblici, scuole, ospedali ecc..) permette di risalire, per tali costruzioni, ai parametri progettuali come spettri di risposta sismica, fattori di amplificazione per vari

intervalli di periodo di vibrazione e la frequenza di risonanza dei terreni, parametri necessari per le verifiche sismiche di tali strutture. Tale attività si configura quindi come un intervento per la riduzione dal rischio sismico e per la tutela della pubblica incolumità. L'attività di tale rete rientra quindi nel campo della prevenzione del rischio sismico.

Gli accelerogrammi registrati dalla rete costituiranno un dato prezioso per tutta la comunità tecnico-scientifica che si occupa dei meccanismi di propagazione delle onde sismiche e, nel campo ingegneristico, per tutti i progettisti che si occupano di verifiche sismiche per la costruzione di edifici in zona sismica, nell'ambito della normativa attuale.

I terremoti registrati attraverso l'accelerometro situato a Cascia, hanno permesso dunque di risalire ai valori di accelerazione reale del sito per magnitudo e distanza epicentrale variabili. Gli eventi che hanno mostrato anomalie confrontando lo spettro normalizzato RSL (NTC) e quello medio "reale" derivante dai dati accelerometrici, sono quelli di Norcia del 1/09/2019 di magnitudo 4.0 e il terremoto avvenuto a L'Aquila il 7/12/2019 di magnitudo 3.8. Sono stati analizzati, come verrà mostrato in seguito, anche altri terremoti con magnitudo di circa 3.5 avvenuti a diverse distanze e con epicentri diversi, ma nessun altro rispetto ai due sopra citati ha mostrato anomalie degne di osservazioni più dettagliate.

I valori di PGA ottenuti dallo spettro medio "reale" risultano essere più elevati rispetto ai valori di PGA considerati in fase di progettazione, basata sullo spettro di risposta sismico di normativa (spettro RSL). Pertanto, da tale confronto osserviamo che, per terremoti provenienti dai "distretti" di Norcia e L'Aquila (e in tal caso per componenti orizzontali del moto del suolo), pur non avendo a disposizione dati relativi a terremoti più forti che normalmente si registrano in queste zone, bisogna, per quanto possibile, effettuare delle considerazioni sull'accelerazione reale al suolo ottenuta dalla rete accelerometrica e confrontarla con gli spettri di normativa.

5.2 Effetti locali della componente accelerometrica verticale emersi dall'analisi di accelerogrammi Re.Si.R (Rete Sismica Regionale) e rapporto con quanto previsto dalle norme tecniche (NTC 17/01/18)

Le norme tecniche per le costruzioni (in seguito NTC) nella maggior parte dei casi, non prescrivono di verificare l'edificio agli stati limite per la componente verticale ma solo per quella orizzontale del sisma. L'azione sismica, pertanto, viene calcolata attraverso uno spettro orizzontale.

I casi per i quali le NTC obbligano a prendere in considerazione la componente verticale per la verifica delle strutture, risultano molto particolari ed estremi da un punto di vista progettuale.

Alla luce dei dati ottenuti dalle stazioni accelerometriche Re.Si.R emerge, invece, che in molti casi la componente verticale del sisma risulta dello stesso ordine di grandezza di quella orizzontale, sia in termini di picco massimo di accelerazione (PGA – peak ground acceleration) sia in termini di contenuto in frequenza. Si tratta, nello specifico, di terremoti con distanza epicentrale contenuta, inferiore a circa 15-20 km.

Per tali terremoti, l'analisi degli accelerogrammi Re.Si.R ha consentito di dimostrare che il contenuto in frequenza della componente verticale risulta avere una banda di ampiezza simile rispetto alla banda delle frequenze delle componenti orizzontali. Tale banda, pertanto, non risulta più stretta, come spesso veniva ritenuto ai fini ingegneristici.

Un altro risultato emerso è che la banda di frequenza della componente accelerometrica verticale, risulta spostata verso frequenze più alte rispetto alla componente orizzontale, ma interessa, comunque, frequenze di interesse ingegneristico.

Per ultimo, dall'analisi di accelerogrammi naturali registrati in Valnerina (Cascia), con distanze epicentrali inferiori a 15 km (Fig. 5.3), si ricava che lo spettro di risposta «reale» (medio e normalizzato) della componente verticale risulta, per svariati intervalli di frequenza, al di sopra dello spettro verticale di normativa.

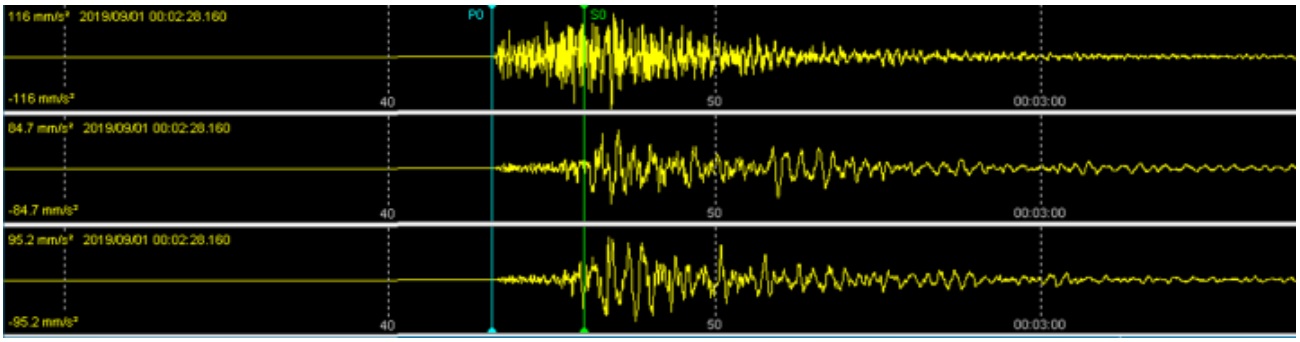


Figura 5.3: Terremoto registrato a meno di 15 km di distanza dall'epicentro. Si noti che, dei tre accelerogrammi riferiti alle direzioni verticale, N-S ed E-W, la componente verticale risulta avere il più alto valore di PGA (116 mm/s^2).

5.2.1 Normativa tecnica e componente verticale del sisma. Quando considerarla

Le norme tecniche per le costruzioni prescrivono sempre la verifica delle strutture agli stati limite rispetto alla componente orizzontale del sisma ma omettono, nella maggior parte dei casi, la verifica della componente verticale.

Nello specifico, la normativa esclude la verifica della componente verticale, quando l'edificio si trova in un sito al quale corrisponde un'accelerazione orizzontale massima al suolo (a_g, riferita ad una categoria A) inferiore a 0.15 g (§3.2.3.1 NTC18). La stessa normativa prevede di prendere in considerazione l'azione verticale del sisma solo in casi molto particolari (§7.2.2 NTC18), quali la presenza di elementi orizzontali con luce superiore a 20 m, elementi presso compressi (con l'esclusione di solai di luce inferiore a 8 m), elementi a mensola di luce superiore a 4 m, strutture di tipo spingente, pilasti in falso, edifici con piani sospesi, ponti e costruzioni con isolamento (alcuni esempi riportati in figura 5.6). In quest'ultimo caso, solo quando il rapporto tra la rigidezza verticale del sistema di isolamento K_V e la rigidezza equivalente orizzontale K_{esi} risulti inferiore a 800 (§7.10.5.3.2 NTC18).

5.2.2 Come la normativa "quantifica" la componente verticale del sisma

A proposito della componente che descrive il moto verticale, la normativa riporta che la stessa è caratterizzata dal suo spettro di risposta o dalla componente accelerometrica verticale. Tuttavia, in assenza di documentata informazione specifica (§3.2.3.1 NTC18), in via semplificata, l'accelerazione massima e lo spettro di risposta della componente verticale attesa in superficie, possono essere determinati sulla base dell'accelerazione massima e dello spettro di risposta delle due componenti orizzontali. Pertanto, la componente accelerometrica verticale può essere correlata alle componenti accelerometriche orizzontali del moto sismico.

Al fine della determinazione dello spettro di risposta verticale di sito, il valore del fattore di struttura (q) utilizzato per la componente verticale dell'azione sismica allo stato limite della vita (SLV), a meno di adeguate analisi giustificative, è q = 1,5 per qualunque tipologia strutturale e di materiale, tranne che per i ponti per i quali è q = 1 (§7.3.1 NTC18).

Mentre lo spettro orizzontale di normativa dipende dalla categoria di sottosuolo ed aumenta gradualmente passando dalla categoria di sottosuolo A a quella D, lo spettro verticale di normativa è unico (S = 1), indipendentemente dalla categoria di sottosuolo. Ciò

è dovuto al fatto che, nelle formule che lo determinano, viene sempre attribuito il valore di 1 all'amplificazione stratigrafica (S), a prescindere dalla categoria di sottosuolo (Fig. 5.4).

Categoria di sottosuolo	S_S	T_B	T_C	T_D
A, B, C, D, E	1,0	0,05 s	0,15 s	1,0 s

Figura 5.4: Valori dei parametri dello spettro verticale da normativa. Si noti che Ss (fattore di amplificazione stratigrafica) risulta sempre uguale ad 1 per tutte le categorie di sottosuolo.

I parametri sopra riportati dimostrano che lo spettro verticale di normativa risulta, di fatto, molto più basso rispetto allo spettro orizzontale dello stesso sito. Quindi la componente verticale del sisma non solo viene omessa nella maggior parte dei casi ma, in quei casi limite riferiti a tipologie progettuali "estreme" sopra riportati, si può fare uso di uno spettro estremamente contenuto in ampiezza e sempre uguale, nonostante la possibilità di trovarsi in suoli con Vs molto basse (tipo suoli D) o, peggio, con importanti contrasti di rigidità sismica (suoli tipo E).

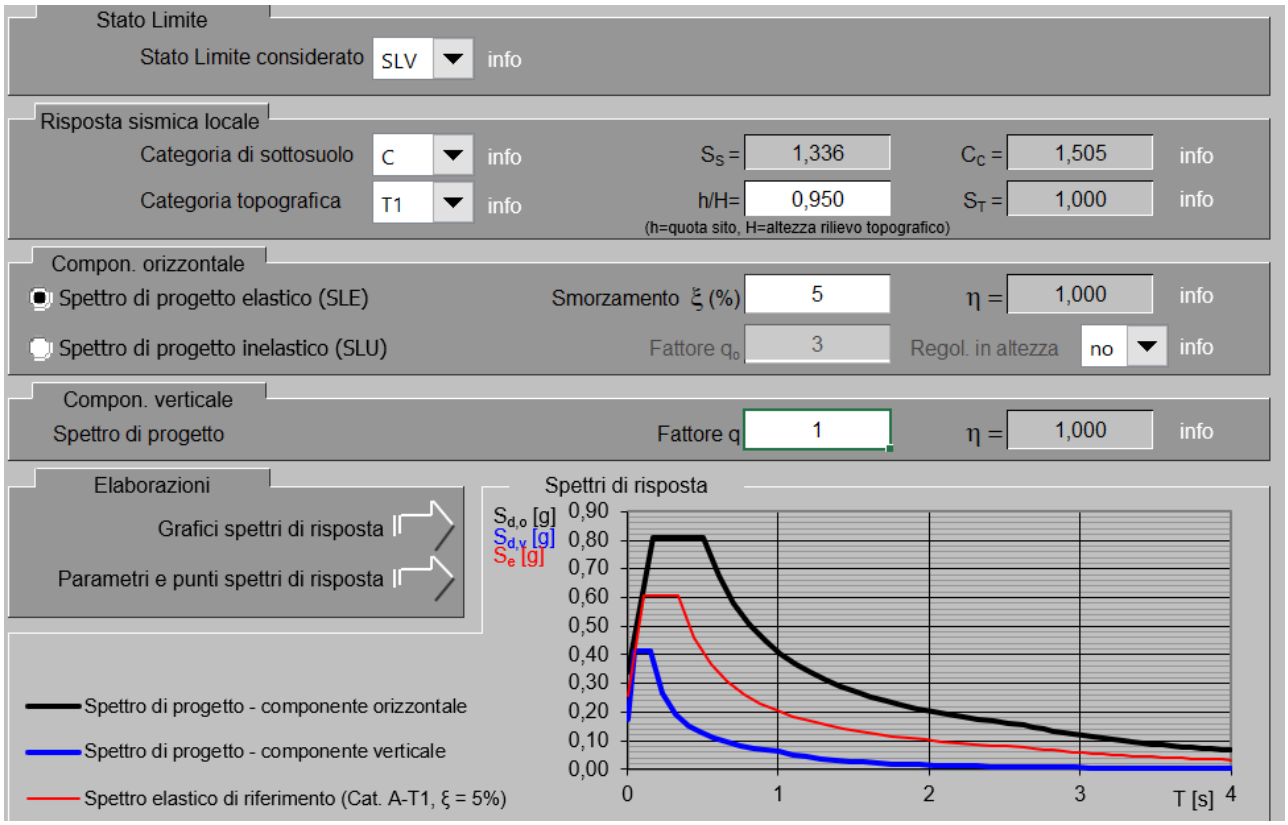


Figura 5.5: Sito di Cascia, confronto tra spettri orizzontali (cat. A e C) e spettro verticale in base alle NTC. Si noti che passando da categoria A a categoria C dello spettro orizzontale, il tratto di accelerazione costante sale da 0.6 a 0.8 g. Ciò non accade per lo spettro verticale che risulta sempre lo stesso indipendentemente dalla categoria di sottosuolo.

Figura 5.6: Tipologie progettuali per le quali è prevista la verifica della componente accelerometrica verticale in base a quanto prescritto dalle NTC.

Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLV
a_g	0,256 g
F_o	2,370
T_C^*	0,336 s
S_S	1,336
C_C	1,505
S_T	1,000
q	1,000

Parametri dipendenti

S	1,336
η	1,000
T_B	0,169 s
T_C	0,506 s
T_D	2,625 s

Espressioni dei parametri dipendenti

$S = S_S \cdot S_T$ (NTC-08 Eq. 3.2.5)

$\eta = \sqrt{10/(5+\xi)} \geq 0,55;\ \eta = 1/q$ (NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5)

$T_B = T_C / 3$ (NTC-07 Eq. 3.2.8)

$T_C = C_C \cdot T_C^*$ (NTC-07 Eq. 3.2.7)

$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6$ (NTC-07 Eq. 3.2.9)

Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)

$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o}\left(1 - \frac{T}{T_B}\right)\right]$

$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$

$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C}{T}\right)$

$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2}\right)$

Lo spettro di progetto $S_d(T)$ per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico $S_e(T)$ sostituendo η con 1/q, dove q è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

Figura 5.7: Espressioni per la determinazione dello spettro orizzontale riportate nelle NTC.

Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLV
a_{gv}	0,175 g
S_S	1,000
S_T	1,000
q	1,000
T_B	0,050 s
T_C	0,150 s
T_D	1,000 s

Parametri dipendenti

F_v	1,619
S	1,000
η	1,000

Espressioni dei parametri dipendenti

$$S = S_S \cdot S_T \qquad \text{(NTC-08 Eq. 3.2.5)}$$

$$\eta = 1/q \qquad \text{(NTC-08 §. 3.2.3.5)}$$

$$F_v = 1{,}35 \cdot F_o \cdot \left(\frac{a_g}{g}\right)^{0,5} \qquad \text{(NTC-08 Eq. 3.2.11)}$$

Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.10)

$$0 \le T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o}\left(1 - \frac{T}{T_B}\right)\right]$$

$$T_B \le T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v$$

$$T_C \le T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left(\frac{T_C}{T}\right)$$

$$T_D \le T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2}\right)$$

Figura 5.8: Espressioni per la determinazione dello spettro verticale riportate nelle NTC.

5.3 Effetti della componente verticale del sisma in base ai dati accelerometrici sperimentali acquisiti dalla rete ReSiR

Le NTC forniscono un unico spettro di risposta per la componente verticale a prescindere dalla categoria di sottosuolo e quindi indipendentemente dalle qualità geofisiche e geotecniche dei depositi. Tale spettro risulta in ogni caso molto più basso rispetto a quello orizzontale.

Alla luce di quanto sopra riportato ed in seguito alla disponibilità di molte decine di accelerogrammi acquisiti dall'inizio della messa in opera degli accelerografi, vengono analizzati gli effetti reali della componente verticale rispetto alla componente orizzontale ed in funzione della distanza epicentrale. Anche se l'analisi viene svolta su terremoti con magnitudo relativamente contenuta (fino a 4 gradi Richter), si ritiene che i rapporti possano ritenersi presumibilmente gli stessi anche per magnitudo superiori, in quanto le caratteristiche dissipative dei terreni si manifestano in tutte e due le componenti.

Vengono pertanto analizzati due casi distinti. Il primo relativo agli effetti provocati da un terremoto di magnitudo 3.8 con epicentro L'Aquila (Figura 5.10), distante circa 50 Km dalla stazione accelerometrica posta a Cascia. Il secondo relativo ad un terremoto posto ad una distanza epicentrale di circa 10 km dalla stessa stazione accelerometrica, di magnitudo 4.0 e con epicentro a Norcia (Figura 5.12). I segnali sono stati analizzati sia da un punto di vista di PGA che di contenuto in frequenza.

Nel primo caso (terremoto lontano) i valori massimi di accelerazione corrispondenti alle due componenti orizzontali N-S ed E-W (6.79 mm/s^2 e 5.78 mm/s^2) risultano nettamente superiori rispetto alla componente massima fatta registrare dalla componente verticale *(2.74 mm/s^2)* (Figura 5.11).

Nel secondo caso (terremoto vicino), invece, i valori di PGA registrati dalle due componenti orizzontali N-S ed E-W (84.7 mm/s^2 e 95.2 mm/s^2) risultano nettamente inferiori rispetto alla componente massima fatta registrare dalla componente verticale (116.0 mm/s^2) (Figura 5.13).

In quest'ultimo caso, anche l'analisi dei valori di accelerazione-direzione in funzione del tempo (particle motion, figura 5.9), permettono di confermare che gli effetti delle componenti verticale ed orizzontale sono dello stesso ordine di grandezza.

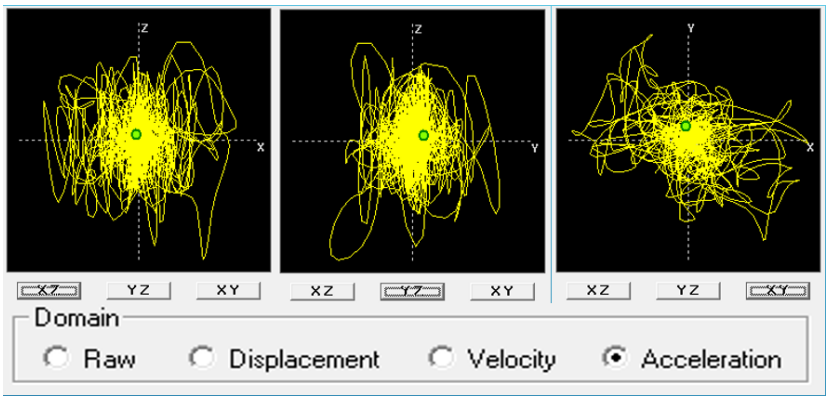


Figura 5.9: Particle motion sulle componenti verticale ed orizzontale in termini di accelerazione (caso di Norcia).

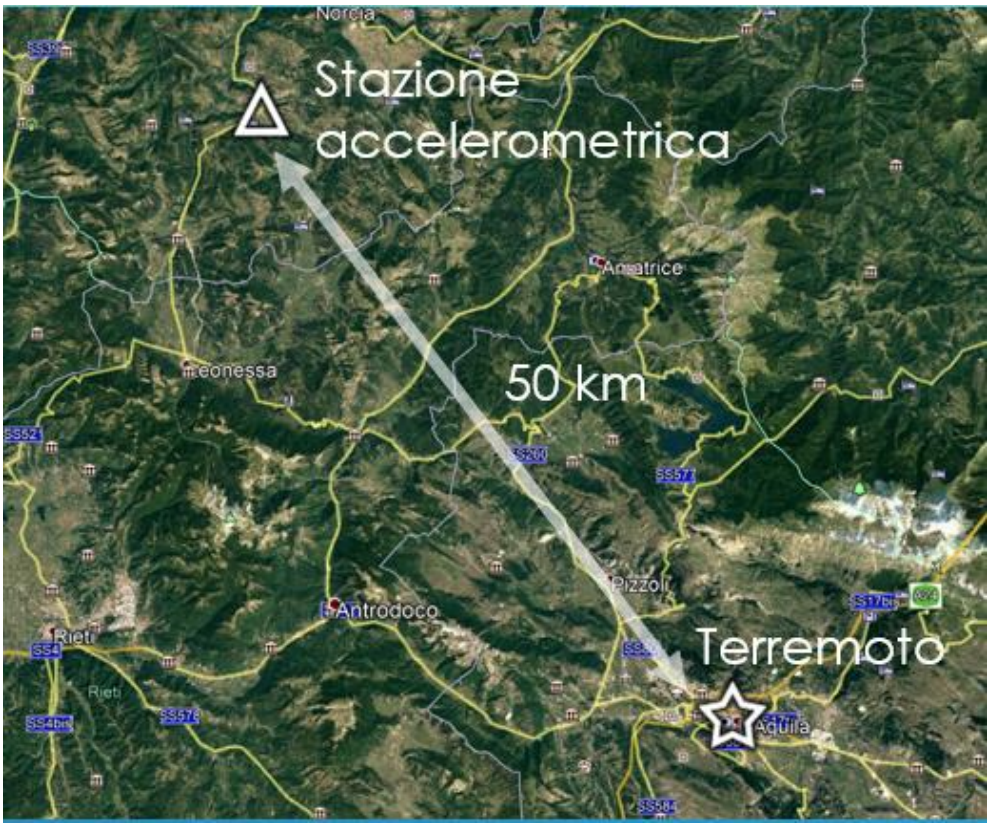


Figura 5.10: Primo caso analizzato: terremoto di magnitudo 3.8 con epicentro L'Aquila, a una distanza di 50 km rispetto alla stazione di registrazione posta a Cascia.

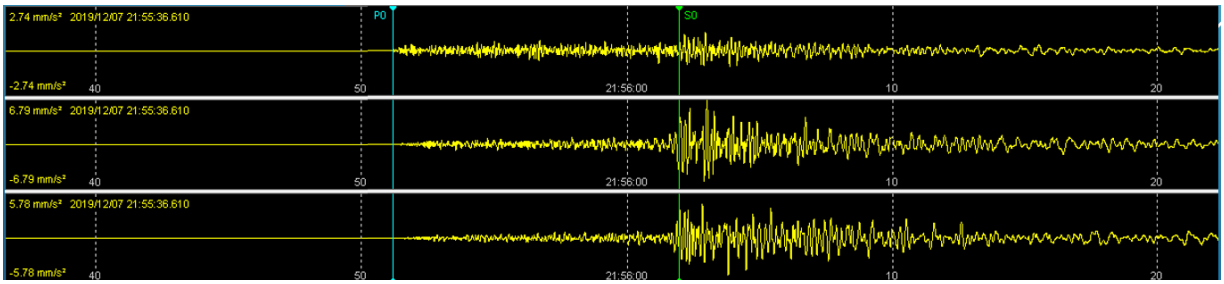


Figura 5.11: Accelerogrammi relativi al terremoto di L'Aquila distante 50 km da Cascia. Da notare che i valori di PGA delle componenti orizzontali N-S ed E-W, riportati sulla sinistra (6.79 mm/s^2 e 5.78 mm/s^2), risultano nettamente superiori rispetto alla PGA della componente verticale (2.74 mm/s^2).

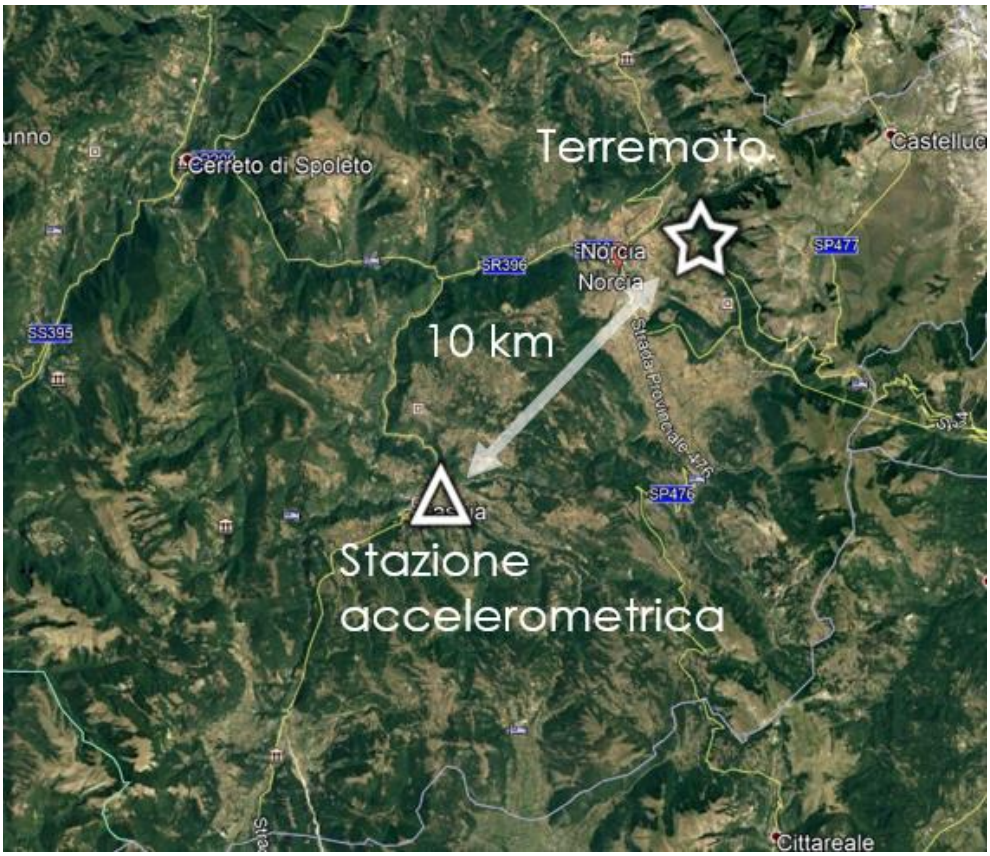


Figura 5.12: Secondo caso analizzato: terremoto di magnitudo 4.0 con epicentro Norcia, ad una distanza di 10 km rispetto alla stazione di registrazione posta a Cascia.

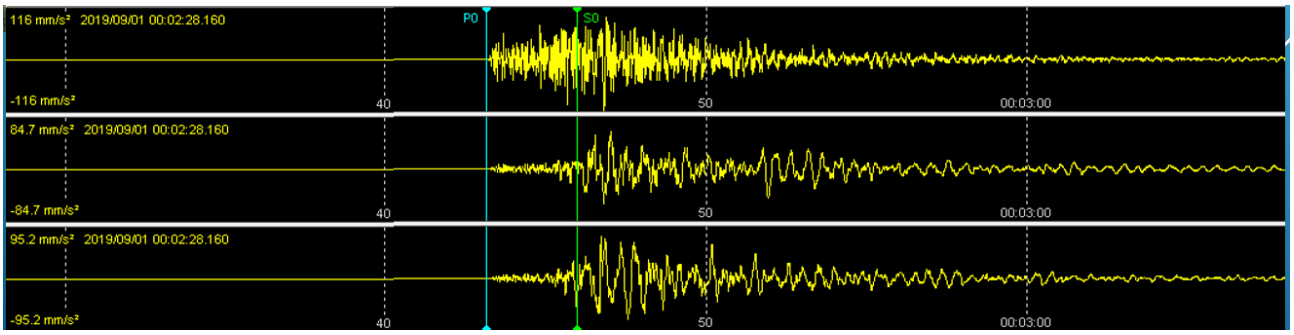


Figura 5.13: Accelerogrammi relativi al terremoto di Norcia distante 10 km da Cascia. I valori di PGA delle componenti orizzontali N-S ed E-W (84.7 mm/s^2 e 95.2 mm/s^2), risultano inferiori rispetto alla PGA della componente verticale (116.0 mm/s^2).

I due terremoti vengono analizzati anche in termini di contenuto in frequenza. Si è proceduto quindi ad effettuare lo spettro di Fourier per ogni componente accelerometrica (Figura 5.14).

Dai risultati emersi è possibile affermare che, quando il terremoto è vicino, le frequenze predominanti della componente verticale del sisma risultano avere una banda dello stesso ordine di grandezza rispetto a quella orizzontale e spostata verso frequenze leggermente più alte. Nel caso specifico, le frequenze contenute nell'accelerogramma verticale rientrano in una banda di frequenze di interesse ingegneristico in quanto possono mettere in vibrazione una molteplice tipologia di edifici.

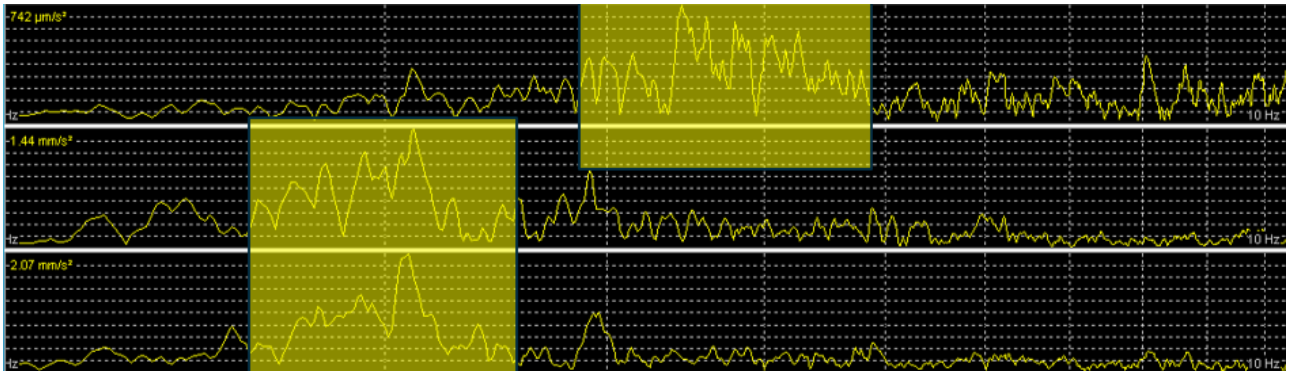


Figura 5.14: Spettri di Fourier relativi alle tre componenti accelerometriche di un terremoto "vicino". In alto la componente verticale, al centro la componente N-S, in basso la componente E-W. Si noti che la banda di frequenza presente nella componente verticale (all'interno del rettangolo giallo) risulta di ampiezza confrontabile con quella presente nelle componenti orizzontali, seppur spostata verso frequenza superiori.

Da quanto emerso dal presente studio, è possibile affermare che gli effetti della componente accelerometrica verticale, in alcuni casi relativi a forti terremoti con contenute distanze epicentrali, possono essere sottostimati nell'ambito progettuale, anche seguendo scrupolosamente quanto prescritto dalle NTC.

A tal proposito sono state svolte, a livello ingegneristico, delle analisi a scala più ampia e prendendo in considerazione magnitudo ben più grandi rispetto a quelle valutate in questo articolo. I risultati emersi da tali studi risultano analoghi e confrontabili con quelli sopra esposti (Figura 5.15).

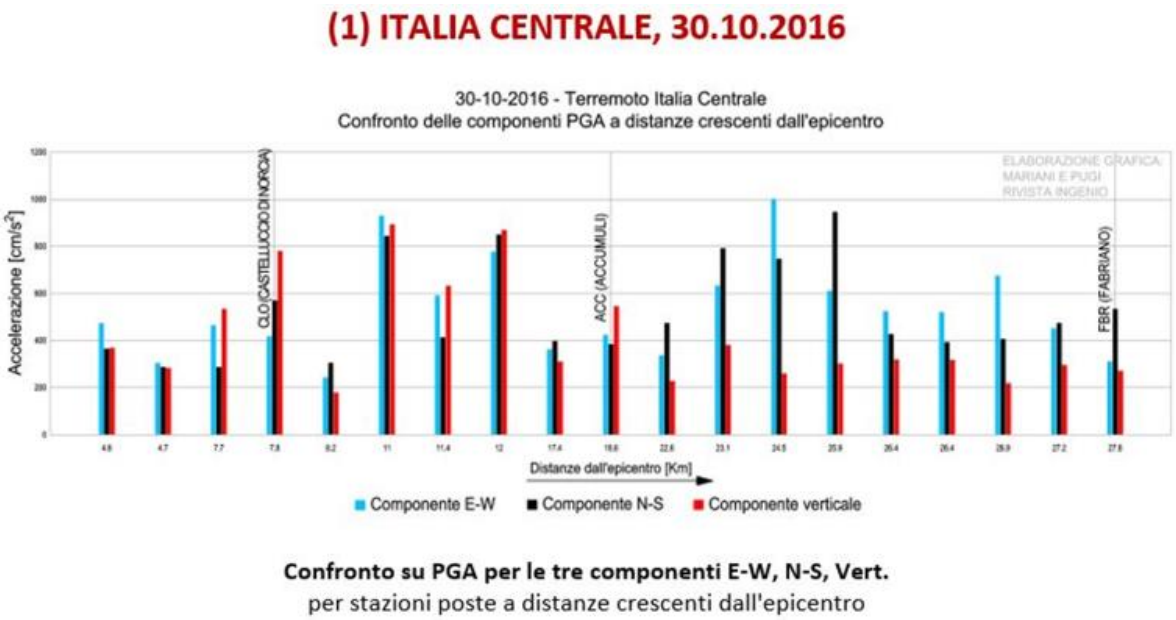


Figura 5.15: Terremoto di magnitudo 6.5 del 30/10/2016 con epicentro Norcia. Rapporto tra la componente accelerometrica verticale ed orizzontale (Mariano e Pugi, Rivista INGENIO). Si noti come la componente verticale (in rosso) risulti predominante, rispetto a quella orizzontale, fino a circa 15 km dall'epicentro.

5.4 Utilità degli accelerogrammi naturali verticali per la determinazione dello spettro di output verticale da modellazioni numeriche di risposta sismica locale (RSL)

Le NTC consentono di determinare lo spettro di risposta della componente verticale "in mancanza di documentata informazione specifica ed in via semplificata" sulla base dello spettro di risposta delle due componenti orizzontali (§3.2.3.1 NTC18). La componente accelerometrica verticale può quindi essere correlata alle componenti orizzontali del moto sismico.

Di seguito vengono riportati i risultati di due modellazioni numeriche per le componenti orizzontale e verticale (Figura 5.16), riferite al sito specifico presso Cascia.

Nella prima modellazione, come input, vengono utilizzati accelerogrammi orizzontali spettrocompatibili (così come consentito dalle NTC) mentre, nella seconda modellazione, vengono utilizzati solo accelerogrammi verticali.

Dai risultati ottenuti è evidente che lo spettro di RSL ricavato da accelerogrammi orizzontali risulta più alto e decisamente più ampio rispetto allo spettro ottenuto con i soli accelerogrammi verticali. Lo spettro di risposta verticale ottenuto, invece, con gli accelerogrammi verticali, risulta più ristretto per quanto riguarda i periodi e questo fattore è facilmente comprensibile a causa del fatto che la componente verticale ha frequenze più elevate rispetto a quella orizzontale. Quest'ultimo spettro, naturalmente dei due è il più vicino alla reale risposta sismica. Alla luce di questo risultato si sottolinea l'utilità di una banca dati che metta a disposizione anche accelerogrammi verticali, il cui uso consente di avvicinarsi molto meglio alla RSL verticale rispetto all'uso di accelerogrammi orizzontali.

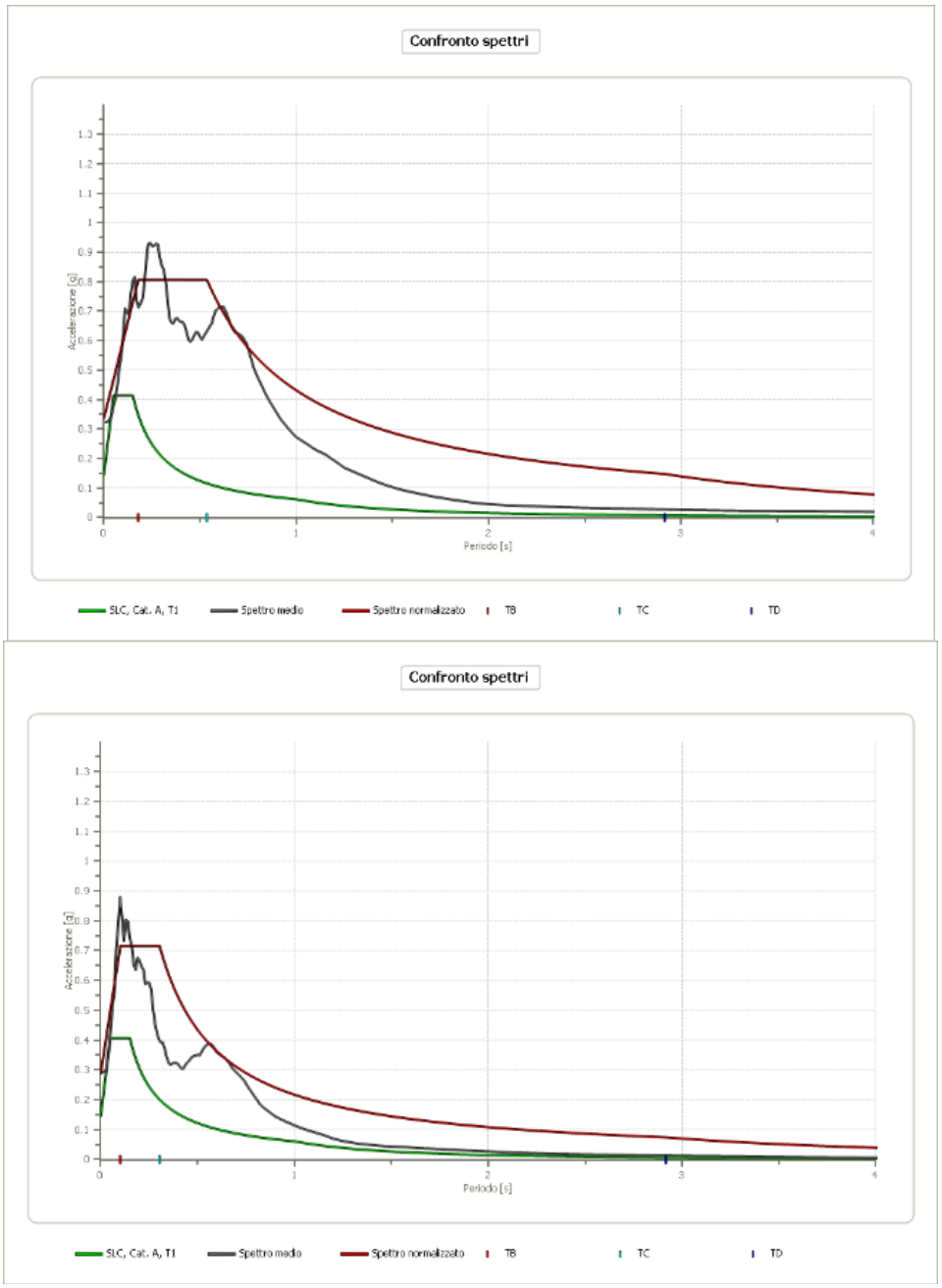


Figura 5.16: Risultati di modellazioni numeriche dello stesso sito ottenute utilizzando set di accelerogrammi spettrocompatibili orizzontali (figura superiore) e verticali (figura inferiore). Si noti come lo spettro medio di RSL, nel caso della componente verticale, risulti più ristretto in termini di periodo e leggermente più basso rispetto allo spettro medio della componente orizzontale.

5.5 Confronto tra lo spettro verticale di normativa (per SLV Classe d'uso II) e lo spettro ottenuto dalla scalatura dell'accelerogramma verticale del terremoto di Norcia (mg 4.0) registrato a Cascia

Viene estratto lo spettro di risposta dalla componente accelerometrica verticale di un terremoto registrato a Cascia, con epicentro Norcia. Tale terremoto, avvenuto il 1 settembre 2019, ha fatto registrare una magnitudo di 4.0. Lo spettro di risposta viene "scalato" all'Ag_v del sito di registrazione che, per i parametri progettuali fissati (SLV, Classe d'uso 2) corrisponde a 0.175 g.

Sovrapponendo i risultati ottenuti, in termini sia di spettro medio che di spettro normalizzato con lo spettro verticale di normativa, si notano delle differenze. Lo spettro normalizzato ottenuto dalla scalatura dell'accelerogramma verticale registrato a Cascia risulta avere il tratto di accelerazione costante più alto rispetto allo spettro verticale di normativa (circa 0.5 g rispetto a circa 0.4 g) (Figura 5.17). Ciò si potrebbe tradurre, in fase di progettazione, in una sottostima della componente accelerometrica verticale del sisma qualora il progettista sia obbligato o scelga di verificare tale componente.

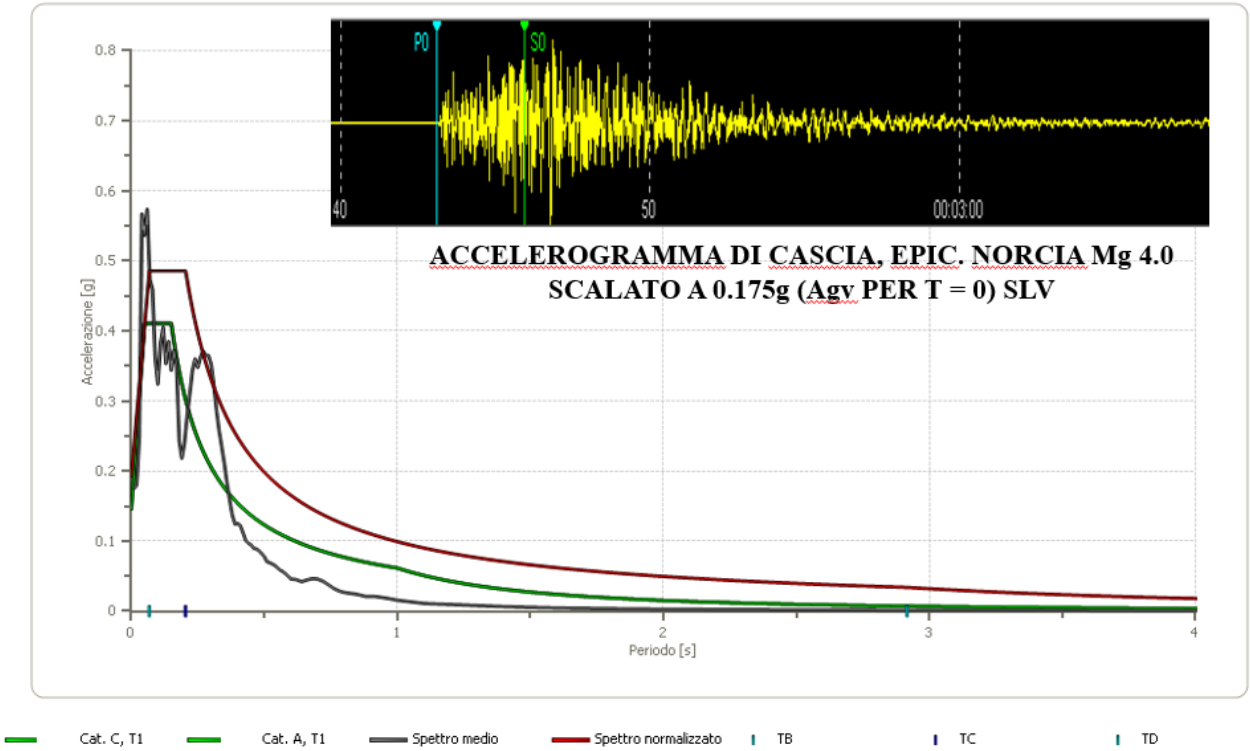


Figura 5.17: Sito di Cascia: confronto tra lo spettro verticale di normativa (per SLV, Classe II) e lo spettro medio e normalizzato della componente verticale da risposta sismica locale, ottenuto scalando la PGA di un accelerogramma all'Ag_V di normativa. Si noti come lo spettro normalizzato di risposta sismica locale sia più alto rispetto allo spettro verticale da NTC e come lo spettro medio di RSL sia più alto rispetto allo spettro verticale di normativa per alcuni intervalli di periodo.

6

CONCLUSIONI

6.1 Effetti della direzionalità e della distanza del sisma sullo spettro di risposta sismica verticale. Esempio di Cascia sulla base di accelerogrammi acquisiti dalla rete Re.Si.R.

Sulla base dell'analisi di alcuni accelerogrammi acquisiti da accelerometri facenti parte della Re.Si.R (Rete Sismica Regionale della Regione Umbria), per quanto riguarda la componente verticale del sisma, è stato possibile giungere alle seguenti conclusioni:

- entro un raggio di circa 10-15 km dall'epicentro di un terremoto, la componente accelerometrica verticale del sisma, in termini di valori massimi di accelerazione (PGA), risulta dello stesso ordine di grandezza di quella orizzontale se non, in alcuni casi, nettamente superiore;
- nel caso di terremoti con distanza epicentrale contenuta, il contenuto in frequenza dell'accelerogramma della componente verticale risulta avere una banda di ampiezza simile rispetto alla banda delle frequenze della componente orizzontale. Quindi la componente verticale non è "impulsiva" come spesso considerata a livello ingegneristico.
- la banda di frequenza della componente accelerometrica verticale risulta leggermente "spostata" verso frequenze più alte rispetto alla componente orizzontale, comunque comprese all'interno della banda di interesse ingegneristico in quanto risultano comprese al suo interno frequenze associabili ad alcune tipologie di edifici.
- dall'analisi di accelerogrammi naturali registrati in Valnerina (Cascia) ad una distanza inferiore a 15 km dall'epicentro, si ricava che lo spettro di risposta «reale» della componente verticale risulta, per svariati intervalli di periodo, al di sopra dello spettro verticale di normativa. Ciò richiede pertanto grande attenzione, da parte dei progettisti, nel considerare l'azione sismica dovuta alla componente verticale qualora venga richiesta dalle NTC o si intenda comunque di valutarla.

6.2 Effetti della direzionalità e della distanza del sisma sullo spettro di risposta sismica orizzontale. Esempio di Cascia sulla base di accelerogrammi acquisiti dalla rete Re.Si.R

Vengono determinati gli spettri di risposta sismica locale per la componente orizzontale di un sito localizzato a Cascia, attraverso l'analisi di alcuni accelerogrammi registrati da una stazione accelerometrica della rete sismica Re.Si.R.

Gli accelerogrammi presi in considerazione corrispondono a quattro terremoti. Gli epicentri di tali terremoti risultano Norcia (mg 4.0), Accumoli (mg 3.3), Cittareale (mg 3.5) e L'Aquila (mg 3.8). Un quinto terremoto, quello avvenuto ad Amandola (Fermo) il 05/05/2020 di magnitudo 3.4, viene inserito per confronto con quelli sopra citati in quanto non molto distante dal sito di Cascia, ma comunque poco rilevante ai fini del presente lavoro. Si tratta quindi di terremoti avvenuti a differenti distanze e direzioni rispetto a Cascia (Figura 6.1).

Per ogni terremoto sono stati determinati gli spettri di risposta nelle due componenti N-S ed E-W. Gli accelerogrammi sono stati scalati in base a determinati parametri progettuali (Classe d'uso 2, Tr 475 anni, stato limite SLV, a_g 0.256 g).

I risultati ottenuti vengono confrontati con gli spettri di risposta sismica orizzontale determinati in modo empirico, attraverso un approccio semplificato di normativa (per categorie di sottosuolo), un approccio di microzonazione sismica di livello 2 (con l'utilizzo di abachi DPCN) e un approccio approfondito di normativa, utilizzando accelerogrammi naturali spettrocompatibili.

Lo scopo del confronto è determinare gli effetti di direzionalità del sisma e di mettere in evidenza le differenze tra spettri "reali" ottenuti da monitoraggio locale e spettri "analitici" di normativa.

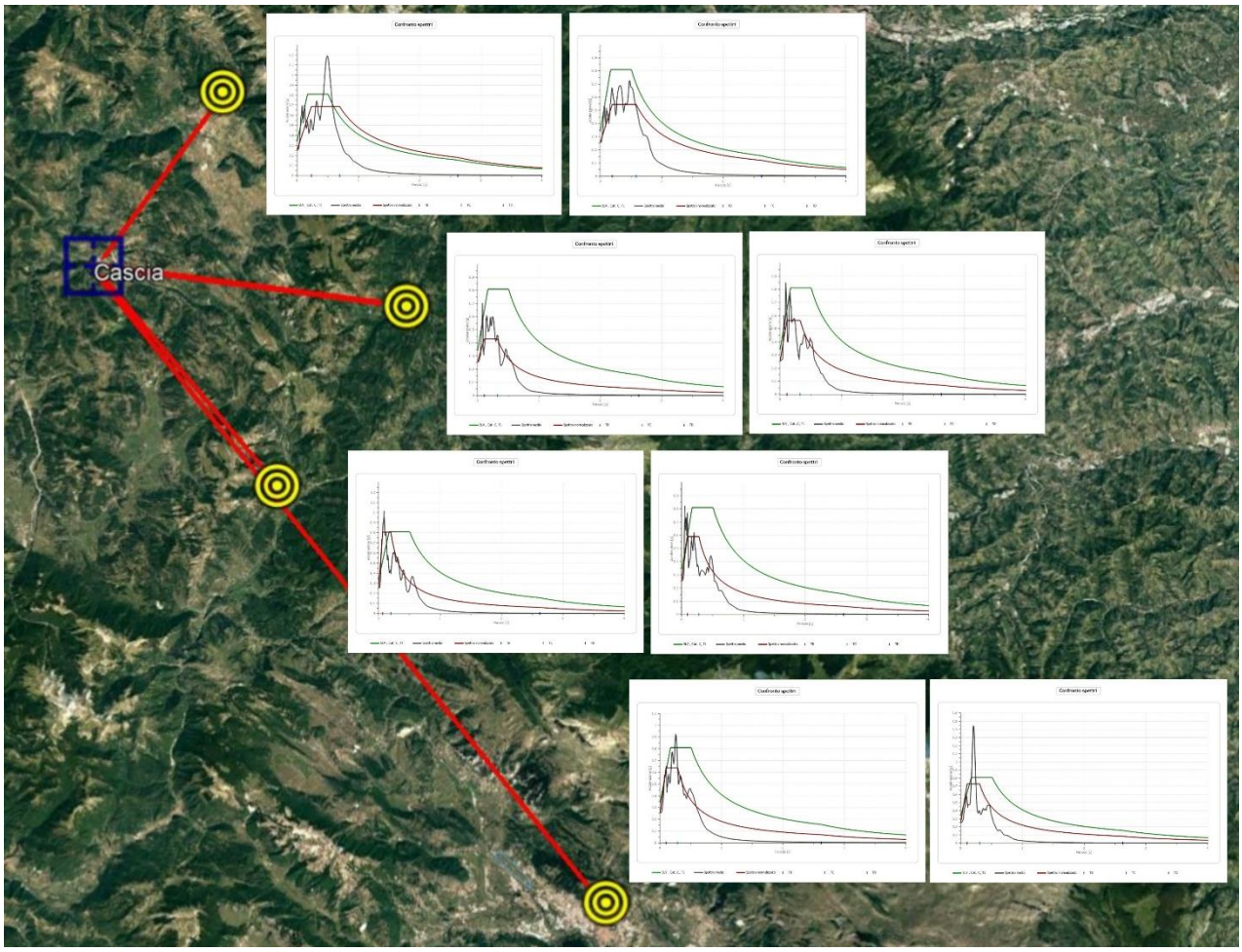


Figura 6.1: Spettri di risposta orizzontali (E-W a sinistra e N-S a destra) generati da quattro terremoti avvenuti a differenti distanze e direzioni rispetto all'abitato di Cascia.

6.3 Spettri di risposta determinati con accelerogrammi registrati dalle stazioni Re.Si.R e scalati ad una accelerazione a_g di 0.256 g

I quattro terremoti scelti risultano avere magnitudo inferiore rispetto a quella di terremoti che possono provocare danneggiamenti a strutture antropiche nella zona di Cascia.

Al fine di poter confrontare gli spettri di risposta "reale" di sito con quelli determinati con metodi empirici, utilizzando le normative vigenti, gli accelerogrammi scelti vengono scalati alla pericolosità sismica di base per i parametri progettuali Tr 475 anni, Classe d'uso II, stato limite SLV. Di seguito un primo confronto tra spettro medio "reale" e spettro normalizzato da normativa per categoria di sottosuolo C.

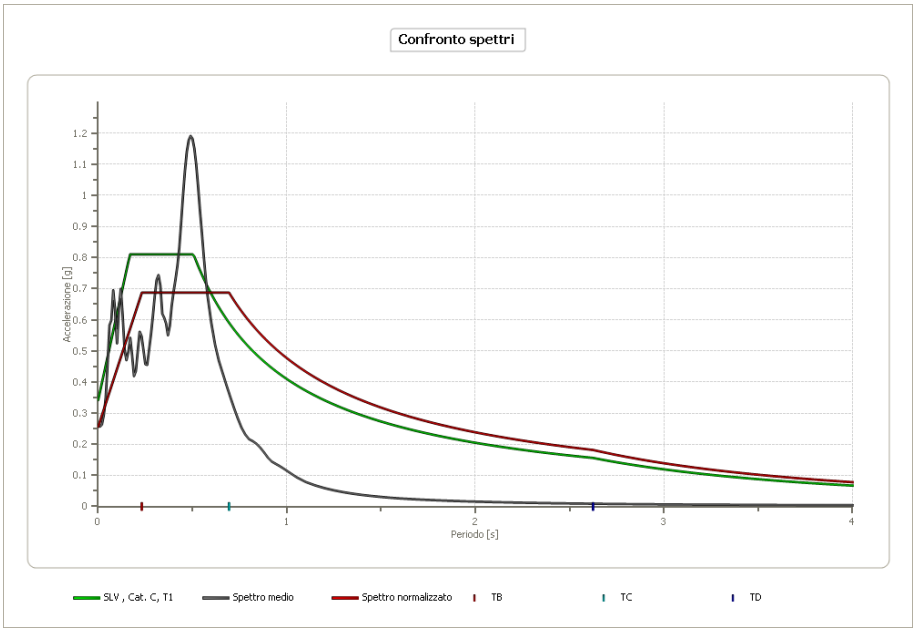


Figura 6.2: Spettro di risposta del sito di Cascia ottenuto in seguito al terremoto di Norcia di magnitudo 4.0 del 1/09/2019. Componente E – W; si noti come nell'intervallo di periodo compreso tra 0.42 s e 0.57 s, lo spettro medio "reale" supera lo spettro C di normativa.

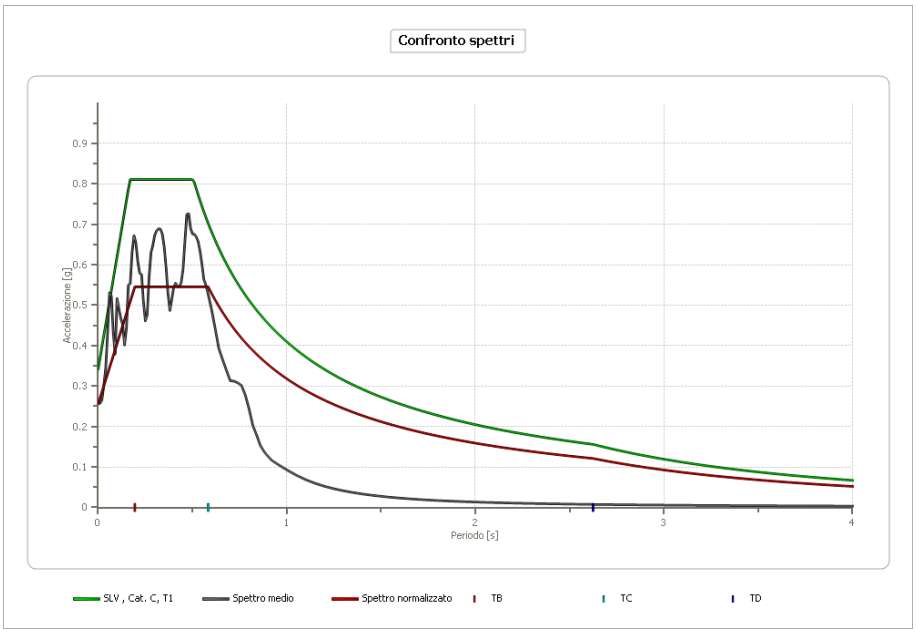


Figura 6.3: Spettro di risposta di Cascia, terremoto di Norcia di magnitudo 4.0 del 1/09/2019, componente N-S. In questo caso lo spettro C da NTC risulta cautelativo rispetto alla risposta “reale” di sito.

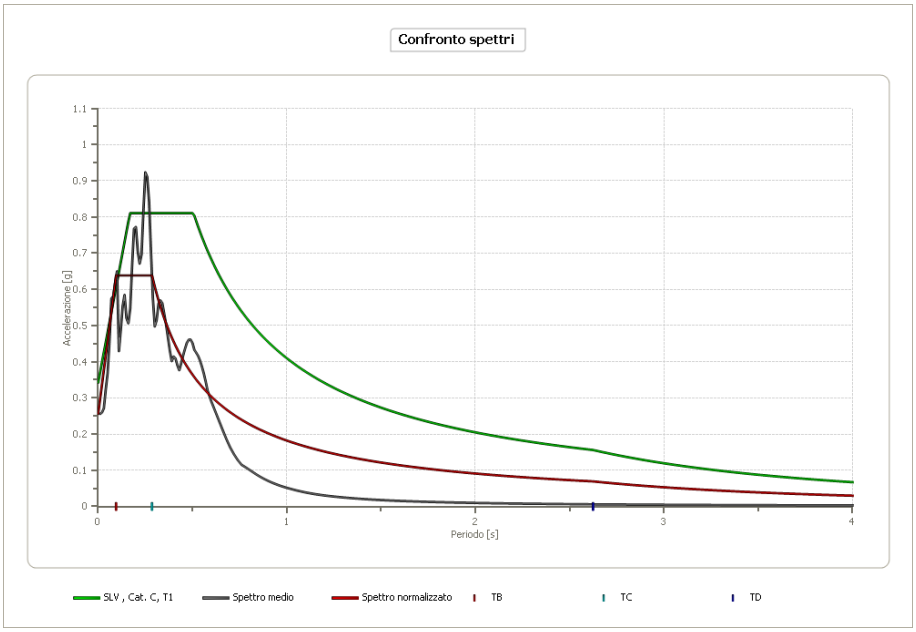


Figura 6.4: Spettro di risposta di Cascia, terremoto di L’Aquila di magnitudo 3.8 del 7/12/2019, componente E – W. Si notano delle criticità solo su un intervallo di periodo molto contenuto (da 0.24 s a 0.27 s).

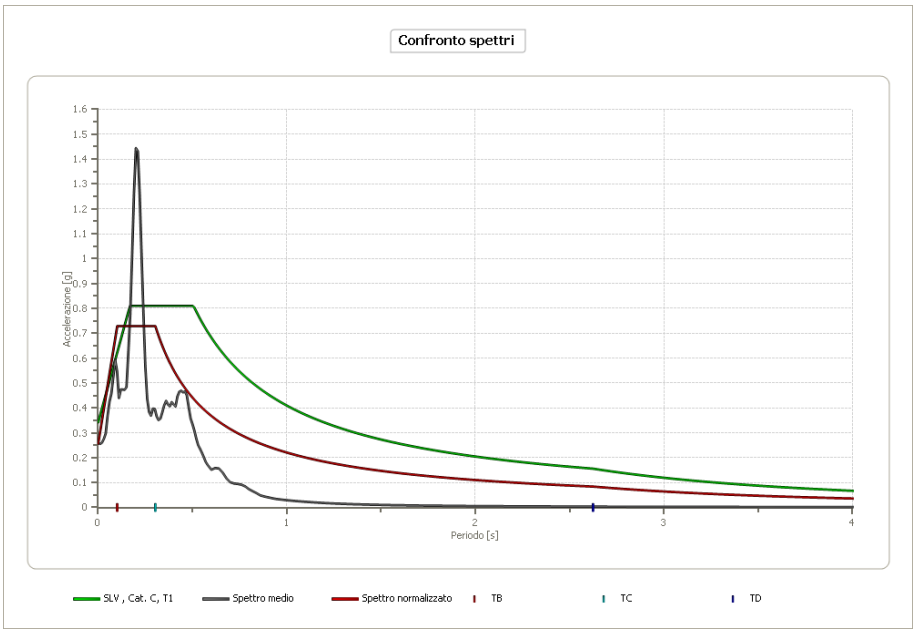


Figura 6.5: Spettro di risposta di Cascia, terremoto di L'Aquila di magnitudo 3.8 del 7/12/2019, componente N-S. Si evidenzia un importante picco di criticità tra 0.17 s e 0.24 s.

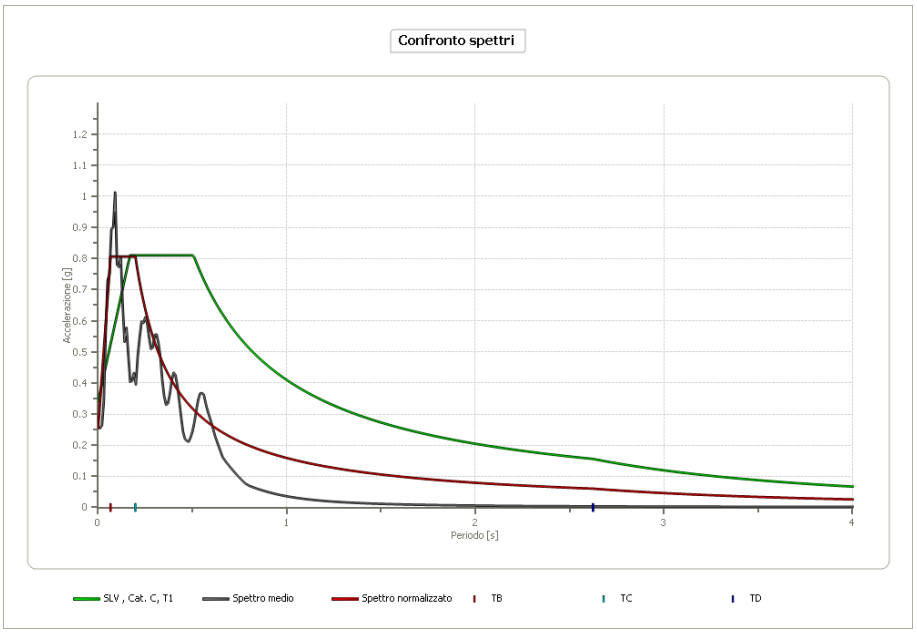


Figura 6.6: Spettro di risposta di Cascia, terremoto di Cittareale di magnitudo 3.5 del 27/08/2019, componente E-W. Lo spettro medio reale risulta più alto dello spettro C di normativa solo per periodi molto bassi (tra 0.0 s e 0.1 s).

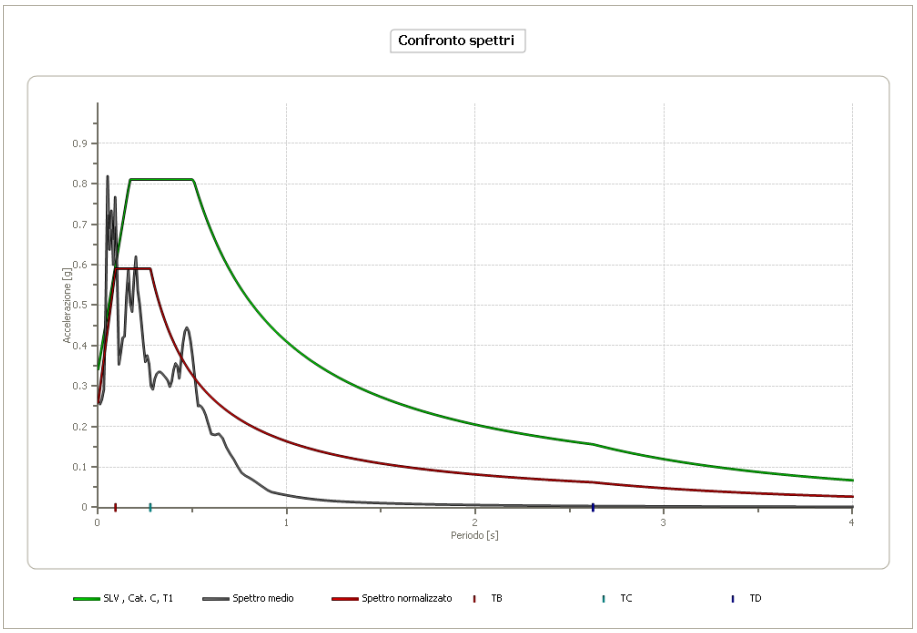


Figura 6.7: Spettro di risposta di Cascia, terremoto di Cittareale di magnitudo 3.5 del 27/08/2019, componente N-S. Anche in questo caso lo spettro medio reale risulta più alto di uno spettro C solo per periodi molto bassi, inferiori a 0.1 s.

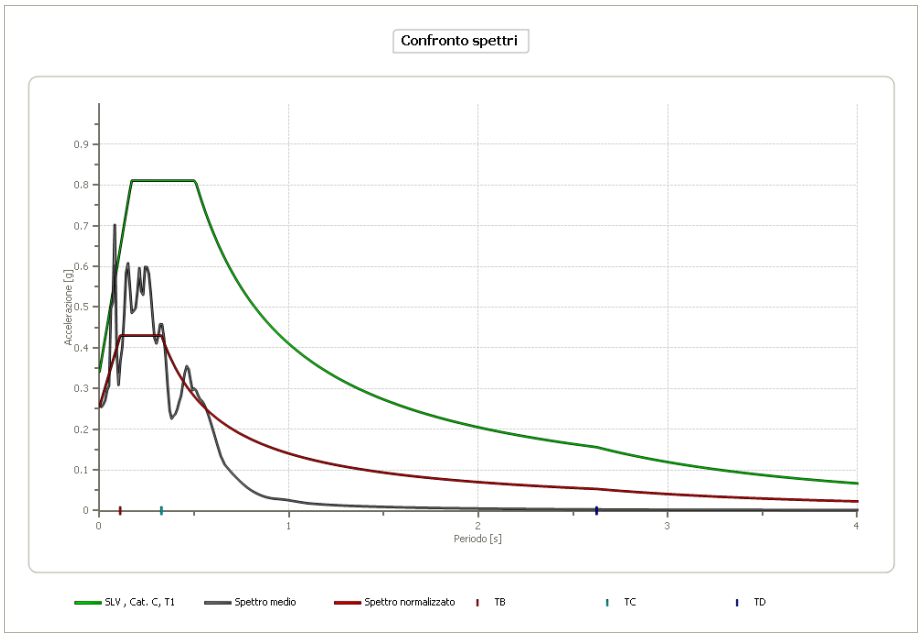


Figura 6.8: Spettro di risposta di Cascia, terremoto di Accumoli di magnitudo 3.3 del 28/01/2020, componente E-W. Un solo picco impulsivo dello spettro medio supera lo spettro di normativa per un valore di periodo molto basso.

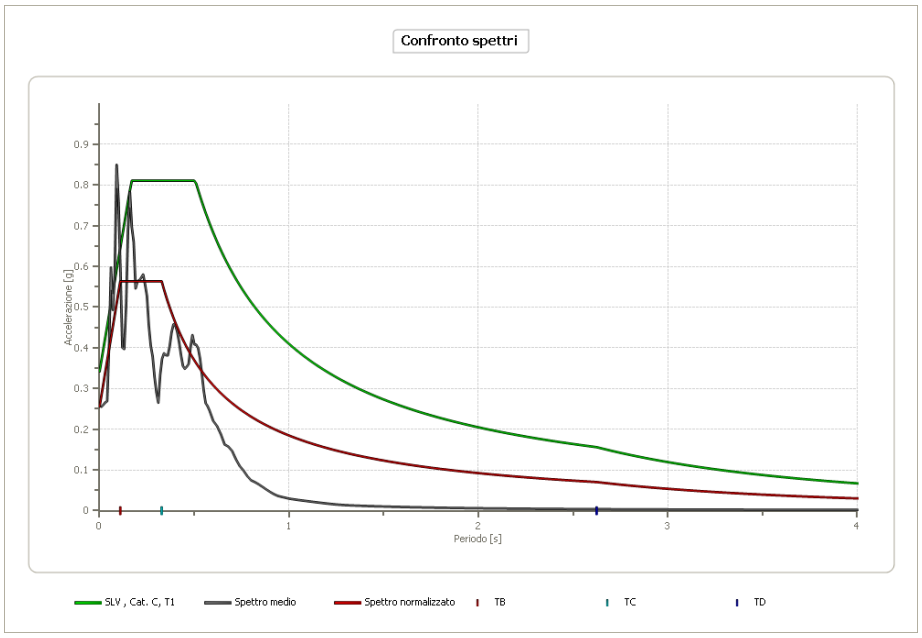


Figura 6.9: Spettro di risposta di Cascia, terremoto di Accumoli di magnitudo 3.3 del 28/01/2020, componente N-S. Si evidenziano criticità tra 0.05 s e 0.12 s.

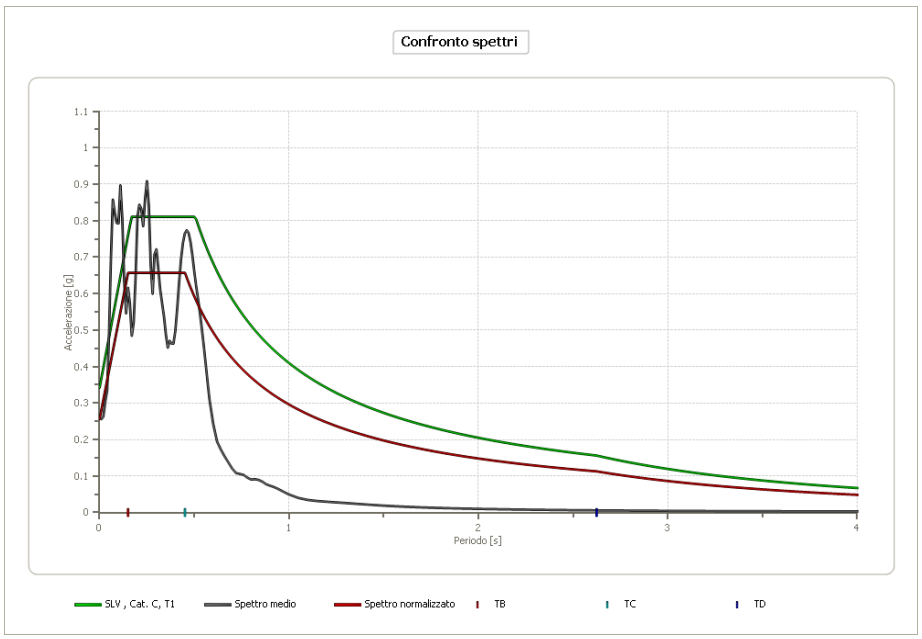


Figura 6.10: Spettro di risposta di Cascia, terremoto di Amandola (Fermo) di magnitudo 3.4 del 05/05/2020, componente E-W. Lo spettro medio reale presenta due picchi a bassi periodi per i quali si raggiungono valori di accelerazioni superiori ad uno spettro C di normativa.

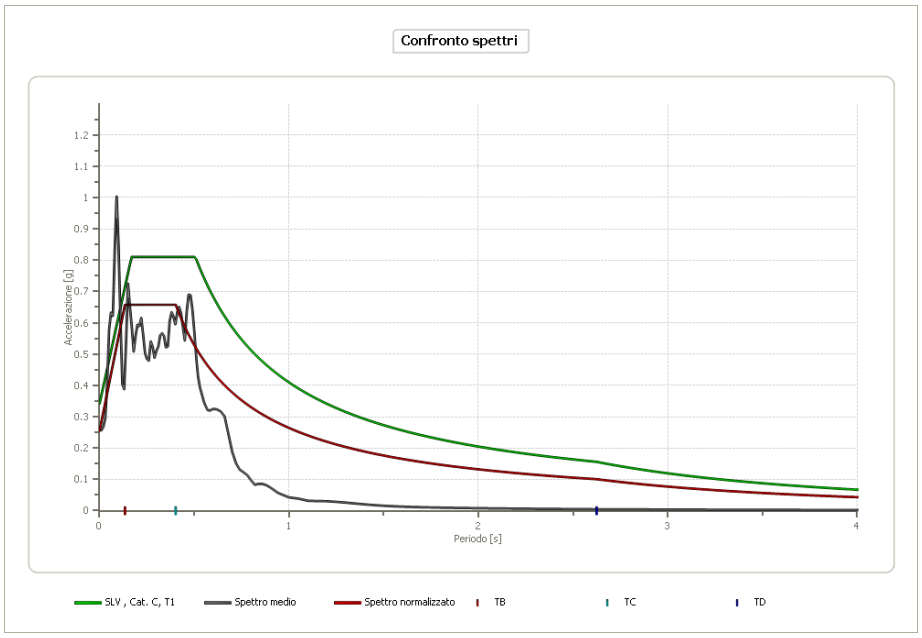


Figura 6.11: Spettro di risposta di Cascia, terremoto di Amandola (Fermo) di magnitudo 3.4 del 05/05/2020, componente N-S. Si evidenziano criticità tra 0.04 s e 0.15 s.

6.3.1 Confronto tra i risultati dell'analisi sperimentale e quelli di RSL per le due situazioni più critiche

Dal confronto tra gli spettri sperimentali e quelli di normativa ottenuto dall'analisi di svariati terremoti, si evince che, per Cascia, possono sussistere situazioni di "criticità" in due particolari casi ben distinti. Si tratta, nello specifico, della componente E-W di Norcia e della componente N-S di L'Aquila (Figura 6.2 e Figura 6.5). Per tali situazioni, pertanto, vengono confrontati tra loro i valori degli spettri medi sperimentali e degli spettri RSL da NTC. Da tale confronto si evince che la componente E-W del terremoto di Norcia provoca effetti, in termini di accelerazione, superiori a quelli attesi per una frequenza dell'ordine dei 2 Hz (seppur in misura ridotta). Tale frequenza è associabile ad edifici di altezza di circa 15 metri (dal piano fondale alla falda del tetto).

Il terremoto proveniente da L'Aquila, nella sua componente N-S, fa registrare un picco critico di circa 5 Hz. Per tale valore, pertanto, lo spettro medio reale supera lo spettro di RSL da NTC. Gli effetti più tangibili si dovrebbero quindi esplicitare su edifici di altezza prossima a 7 metri.

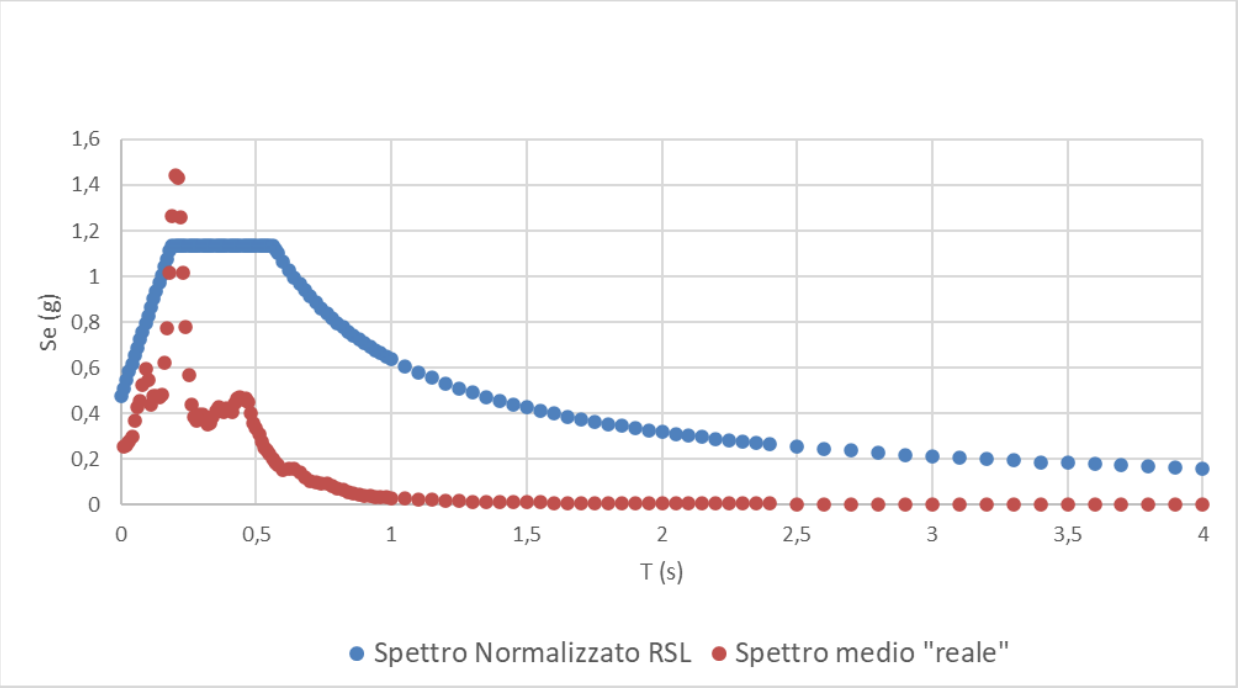


Figura 6.12: Sovrapposizione spettro normalizzato orizzontale RSL con spettro medio "reale" ricavato dal terremoto di L'Aquila (mg 3.8).

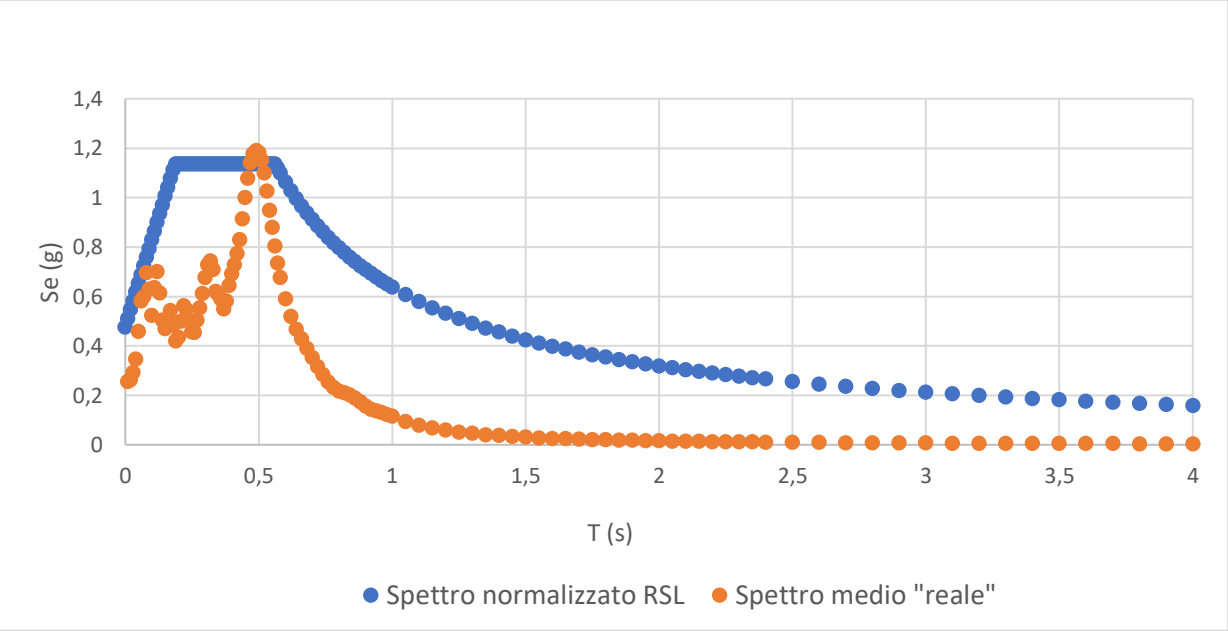


Figura 6.13: Sovrapposizione spettro normalizzato orizzontale RSL con spettro medio "reale" ricavato dal terremoto di Norcia (mg 4.0).

Bibliografia

A. Biondi, *Le nuove N.T.C 2008 – Guida pratica*. 2009. Dario Flaccovio Editore.

ASTM D5777-18, *Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

C.G. Lai, S. Foti, M.Rota, *Input sismico e stabilità geotecnica dei siti di costruzione*, Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia, Vol. 6, 2009.

Consiglio superiore dei lavori pubblici, D.M. 14 Gennaio 2008 – Approvazione delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni, software *Spettri di risposta ver. 1.0.3*.

D. Liberatore, A. Pagliaroli, 2014. *Verifica della sicurezza sismica dei Musei Statali*. Applicazione O.P.C.M. 3274/2003 s.m.i. e della Direttiva P.C.M. 12.10.2007. Convenzione Arcus – DG PaBAAC Rep. n. 113/2011 del 30/09/2011. Convenzione DG PaBAAC – Consorzio ReLUIS Rep. n. 21/2011 del 26/10/2011. Responsabile scientifico: Domenico Liberatore. Referente tecnico: Luigi Sorrentino.

GeoStru software, RSLIII. *Software modellazione monodimensionale lineare equivalente – GeoStru.*

Gruppo di lavoro MS, 2008. *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome – Dipartimento della protezione civile, Roma, Vol. III.

Idriss I.M. e Sun J.I.; 1992: *SHAKE91 – a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soils deposits*. University of California, Davis.

Iervolino I., Galasso C., Cosenza E., 2009. *Rexel: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis*. Bulleting of Earthquake Engineering, 8:339-362, DOI 10.1007/s10518-009-9146-1.

L. Nori, P. Di Marcantonio, 2014. *Manuale pratico di risposta sismica locale*, EPC editore.

Marc Wathelet, 2002 – 2011. *Geopsypack 2.5.0 version 2.9.0*.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Decreto 17 gennaio 2018, *Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le costruzioni"*. Gazzetta Ufficiale n.42 del 20 Febbraio 2018. Parte prima, Roma.

Newmark N.M. e Hall W.J., 1982. *Earthquake spectra and design*. EERI Research Report, 82- 71183, 103 pp.

Optimsoftware, 2009. *SeisOpt 2D – Refraction*.

Roberto W. Romeo, 2007. *La risposta sismica locale per la progettazione strutturale*, CISM editore.

Roberto W. Romeo. *Le azioni sismiche e le categorie di sottosuolo*. Giornale di Geologia Applicata 6, 65-80. doi: 10.1474/GGA.2007 -06.0-07.0188, 2007.

Sara Electronic Instruments, *Seismowin* – pacchetto software per la gestione di accelerogrammi e dell'accelerometro.

Strata, Alfred Kottke, Ellen Rathje, University of Texas at Austin.

Ringraziamenti

Al termine di questo percorso universitario e del lavoro di tesi magistrale, vorrei porgere i miei più sentiti ringraziamenti a tre figure professionali che si sono rivelate fondamentali per la mia crescita, sia in ambito universitario che professionale: la prof.ssa Cristina Pauselli, il direttore dell'Osservatorio Sismico "A. Bina" di Perugia, sismologo dott. p. Martino Siciliani O.S.B. e il geologo prof. Michele Arcaleni che lavora da anni per questo importante Ente.

Di loro ho apprezzato il carattere umano, la pazienza nell'insegnarmi quanto più possibile anche in breve tempo e la fiducia che hanno riposto in me in più di una situazione, sia in campo accademico che lavorativo. In futuro mi auguro di mettere in pratica tutti i loro insegnamenti e sarebbe una fortuna per me, poter collaborare con loro e con altre figure professionali del loro calibro.

Non è facile essere uno studente universitario, nonostante io abbia avuto da sempre una particolare passione per la geologia e le scienze naturali. Non nascondo di aver attraversato dei momenti particolari che mi hanno reso incerto sul mio percorso formativo, soprattutto sul traguardo finale, ma questo solo per un momento; poi il tempo di ricordarmi che è uno dei miei sogni e che non avrei mai abbandonato. Questo l'ho coltivato con amore e dedizione per cinque anni, al termine dei quali è arrivato il momento di raccoglierne i migliori frutti.

I miei genitori mi hanno dato questa grande opportunità e mi hanno sempre trasmesso la loro fiducia; felici quando gli esami e il mio percorso si svolgevano nel migliore dei modi e mai delusi, ma anzi pronti a darmi la giusta carica quando più ne ho avuto bisogno. Sono loro che devo ringraziare oggi per avermi permesso di iniziare e terminare nel miglior modo per me possibile, questo lungo percorso universitario. La mia speranza è continuare a dare loro le giuste soddisfazioni puntando prima a darle a me stesso, perché so che è questo che loro vogliono per me, la mia felicità (così come quella dei miei fratelli e mia sorella) prima della loro.

Un'altra spalla su cui appoggiarmi, per me fondamentale nella vita di tutti i giorni ormai da più di sei anni è Giorgia; la sua presenza ha influito in modo positivo nella mia carriera universitaria, ed è stata più massiccia proprio in questi due ultimi anni di studi. Anche il suo desiderio è stato quello di vedermi raggiungere questo obiettivo, dandomi la spinta giusta ogni qual volta mi vedeva rilassato e permettendomi di allentare la presa quando ero

esageratamente coinvolto. Sono fiero di lei quanto lei lo è di me e non posso fare altro che apprezzare la pazienza mostrata durante i miei cinque anni di università.

Ringrazio anche tutti i miei amici studenti con la quale ho condiviso questi anni di università; ci siamo aiutati tutti e sempre nei momenti di bisogno e di riflessione ma abbiamo saputo anche divertirci quando ne abbiamo avuto l'opportunità.

Un piccolo complimento ora, lo voglio rivolgere a me stesso, perché alla fine la verità è che tutto dipendeva da me, tutto girava intorno alla mia passione e alle mie capacità di trasformarla in realtà. Oggi un piccolo grande passo è stato compiuto, ma la strada per raggiungere una soddisfazione ancora più grande, cioè quella sul lavoro, è lunga. Mi auguro quindi di continuare ad essere determinato come lo sono stato in tutti questi anni affidandomi anche alle persone a me più vicine, a tutte quelle che vogliono il mio bene e che non ho potuto citare in questi ringraziamenti finali.

Alessandro