

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Civile

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile Geotecnica**

Tesi di Laurea Magistrale

**Interpretazione dei dati sperimentali di
prove sismiche in sito ed analisi di risposta
sismica locale monodimensionale**



Relatore

Prof. Sebastiano Foti

Correlatore

Ing. Federico Passeri

Candidato

Marianna Miola

S221971

Luglio 2018

Indice

Introduzione	1
Capitolo 1 - Teoria delle onde superficiali	4
1.1 Principi base delle onde superficiali	4
1.2 Dispersione geometrica delle onde superficiali	7
Capitolo 2 - Prove sismiche in sito.....	9
2.1 Generalità.....	9
2.2 Analisi di propagazione delle onde superficiali	11
2.2.1 Acquisizione dei dati sismici.....	11
2.2.2 Processing dei dati.....	12
2.2.3 Processo di inversione.....	13
2.2.4 Ipotesi e limitazioni.....	13
Capitolo 3 - Casi studio: Indagini sismiche ad onde superficiali per alcuni siti del Centro Italia	15
3.1 Acquisizione dei dati sismici	15
3.2 Processing dei dati sismici.....	17
3.3 Processo di inversione	24
Capitolo 4 - Prove HVSR, inversioni congiunte ed analisi di risposta sismica locale per il comune di San Severino Marche.....	25
4.1 Interpretazione dei dati sperimentali di prove HVSR	25
4.1.1 Generalità ed esecuzione prove HVSR	25
4.1.2 Analisi dei dati sperimentali di prove HVSR con l'utilizzo del software GEOPSY	31
4.1.3 Criteri di SESAME: attendibilità ed affidabilità delle prove H/V	33
4.2 Processo di inversione	40
4.2.1 Algoritmo di inversione " <i>Neighbourhood Algorithm</i> "	42

4.2.2	Analisi dei risultati ottenuti da processi di inversione della sola curva di dispersione implementati in software diversi.....	43
4.2.3	Processo di inversione congiunta con il codice di calcolo DINVER.....	47
4.3	Analisi di risposta sismica locale.....	55
4.3.1	Generalità	55
4.3.2	Caso studio: analisi di risposta sismica locale per il comune di San Severino Marche 63	
	Conclusione.....	111
	Appendice A.....	113
	Appendice B.....	119
	Appendice C.....	133
	Bibliografia e sitografia.....	137
	Software utilizzati	139

Indice delle tabelle

Tabella 1. Elenco dei comuni sottoposti a campagna di indagine sismica per il Progetto per la Microzonazione Sismica	15
Tabella 2. Modalità e caratteristiche di esecuzione delle prove MASW	16
Tabella 3. Informazioni relative all'esecuzione prova HVSR-1	30
Tabella 4. Informazioni relative all'esecuzione prova HVSR-2	30
Tabella 5. Informazioni relative all'esecuzione prova HVSR-3	30
Tabella 6. Durata delle finestre temporali riferite alle tre prove HVSR eseguite	31
Tabella 7. Applicazione criteri di SESAME per la prova HVSR-1	35
Tabella 8. Applicazione criteri di SESAME per la prova HVSR-2	37
Tabella 9. Applicazione criteri di SESAME per la prova HVSR-3	39
Tabella 10. Target e parametri per inizializzare il processo di inversione in DINVER	43
Tabella 11. Target e parametri per inizializzare il processo di inversione congiunta in DINVER.....	47
Tabella 12. Estratto dalla Relazione Geologica e Geotecnica redatta per il comune di San Severino Marche - Indicazioni relative alla permeabilità dei litotipi identificati dalle campagne di sondaggi (dal 1979).....	53
Tabella 13. Estratto dalla Relazione Geologica e Geotecnica redatta per il comune di San Severino Marche - Litostratigrafia individuata da n°10 sondaggi geognostici a carotaggio continuo nei dintorni dell'area di studio	63
Tabella 14. Estratto dalla Relazione Geologica e Geotecnica redatta per il comune di San Severino Marche - Alcuni parametri geotecnici individuati da prove geotecniche in sito e di laboratorio	63
Tabella 15. Dati - Input 3A.MZ11..HNE.D.20161030.064018	119
Tabella 16. Dati - Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018.....	121
Tabella 17. Dati - Input IT.CLO..HGE.D.20161026.191806	123
Tabella 18. Dati - Input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806.....	125
Tabella 19. Dati - Input IT.MMO..HGE.D.20161030.064018	127
Tabella 20. Dati - Input IT.MMO..HGN.D.20161030.064018.....	129
Tabella 21. Dati - Input IV.T1212..HNE.D.20161026.171036	131

Indice delle figure

Figura 1. Propagazione delle onde superficiali: onde di Rayleigh (a) e onde di Love (b) (Bolt, 1987). Da “Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project”	4
Figura 2. Fascio di curve di attenuazione delle componenti del moto normalizzato delle onde di Rayleigh all’aumentare della profondità ed al variare del coefficiente di Poisson (Richart et al., 1970). Da “ Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves”	5
Figura 3. Dispersione geometrica in un mezzo verticalmente stratificato e definizione della curva di dispersione. Da “Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization”	7
Figura 4. Esempi di prove in sito invasive (a) e non invasive (b). Da “Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves”	9
Figura 5. Schema di esecuzione prova MASW.....	11
Figura 6. Esempio - Primo e secondo modo di vibrare nello spettro (f-k). Da interpretazione dati sperimentali per il sito di Roccafluvione (acquisizione 101).....	14
Figura 7. Esempio di segnali acquisiti con 24 geofoni (distanza sorgente-primario geofono=3 m, $\Delta x=1$ m, $\Delta t=0.25$ ms) – Sito di Palmiano	17
Figura 8. Esempio di spettro (f-k) per acquisizione 100 – Sito di Palmiano	18
Figura 9. Curva di dispersione – Sito di Acquasanta Terme.....	19
Figura 10. Curva di dispersione – Sito di Castel di Lama (campo)	19
Figura 11. Curva di dispersione – Sito di Castel di Lama (strada)	20
Figura 12. Curva di dispersione – Sito di Montemonaco.....	20
Figura 13. Curva di dispersione – Sito di Offida	21
Figura 14. Curva di dispersione – Sito di Palmiano.....	21
Figura 15. Curva di dispersione – Sito di Roccafluvione	22
Figura 16. Curva di dispersione – Sito di Rotella	22
Figura 17. Curve di dispersione per le prove MASW-1 e MASW-2 – Sito di San Severino Marche.....	23
Figura 18. Curva di dispersione – Sito di Venarotta	23
Figura 19. Esempio di applicazione del metodo H/V. In figura (a) le tre componenti del segnale acquisito; in figura (b) la curva H/V (curva media e curve di confidenza) – Sito di San Severino Marche (prova HVSR-2).....	26

Figura 20. Estratto dalla Relazione Geologica e Geotecnica - Planimetria. Nel dettaglio: disposizione stendimenti MASW-1 e MASW-2 e punti di acquisizione prove HVSR-2 e HVSR-3	28
Figura 21. Estratto dalla Relazione Geologica e Geotecnica - Sezione litostratigrafica C-D..	29
Figura 22. Esempio di individuazione di finestre temporali stazionarie con il software GEOPSY – Registros per prova HVSR-2 (sito di San Severino Marche).....	31
Figura 23. Criteri di SESAME – Estratto dal documento SESAME H/V User Guidelines	33
Figura 24. Curva H/V - Prova HVSR-1	34
Figura 25. Curva H/V - Prova HVSR-2	36
Figura 26. Curva H/V – Prova HVSR-3	38
Figura 27. Dettaglio planimetrico del posizionamento degli stendimenti per le prove MASW-1 e MASW-2 (in rosso)	40
Figura 28. Profili di velocità delle onde di taglio V_s (per i 16978 modelli accettati) ottenuti per processo di inversione secondo metodo Monte Carlo implementato in MATLAB. In rosso si individua la soluzione a minimo misfit	41
Figura 29. Risultato dell'inversione - Curva di dispersione sperimentale (in nero) e curve di dispersione numeriche a diverso valore di misfit.....	44
Figura 30. Risultato dell'inversione - A sinistra il profilo di velocità di propagazione delle onde di taglio V_s ; a destra il profilo di velocità di propagazione delle onde di volume V_p (a diverso valore di misfit)	44
Figura 31. Risultato dell'inversione – Curva di dispersione sperimentale (in nero) e numerica (soluzione a minimo misfit - in rosso)	45
Figura 32. Risultato dell'inversione – A sinistra il profilo di velocità di propagazione delle onde di taglio V_s ; a destra il profilo di velocità di propagazione delle onde di volume V_p (soluzione a minimo misfit)	45
Figura 33. Confronto profili di V_s ottenuti dall'inversione della sola curva di dispersione eseguita con codici di calcolo differenti.....	46
Figura 34. Risultato dell'inversione congiunta - Curva di dispersione sperimentale (in nero) e curve di dispersione numeriche a diverso valore di misfit.....	48
Figura 35. Risultato dell'inversione congiunta - Curva di ellitticità sperimentale (in nero) e curve di ellitticità numeriche a diverso valore di misfit.....	48

Figura 36. Risultato dell'inversione congiunta - A sinistra il profilo di velocità di propagazione delle onde di taglio V_S ; a destra il profilo di velocità di propagazione delle onde di volume V_P (a diverso valore di misfit).....	49
Figura 37. Risultato dell'inversione congiunta - Curva di dispersione sperimentale (in nero) e numerica (soluzione a minimo misfit - in rosso).....	50
Figura 38. Risultato dell'inversione congiunta - Curva di ellitticità sperimentale (in nero) e numerica (soluzione a minimo misfit - in rosso).....	51
Figura 39. Risultato dell'inversione congiunta - A sinistra il profilo di velocità di propagazione delle onde di taglio V_S ; a destra il profilo di velocità di propagazione delle onde di volume V_P (soluzione a minimo misfit).....	51
Figura 40. Andamento del coefficiente di Poisson con la profondità per la soluzione a minimo misfit.....	52
Figura 41. Confronto profili di velocità delle onde di taglio ottenuti rispettivamente da inversione della sola curva di dispersione e da inversione congiunta.....	54
Figura 42. Schema semplificato dei punti di applicazione del moto di riferimento: bedrock e outcrop.....	55
Figura 43. Modello del terreno costituito da strato omogeneo elastico lineare su substrato rigido	57
Figura 44. Curve di decadimento del modulo di taglio e del rapporto di smorzamento per il processo iterativo alla base del Metodo Lineare Equivalente	61
Figura 45. Profili ottenuti dall'inversione della sola curva di dispersione, distinti a seconda delle modalità di inversione. A sinistra i profili ottenuti dall'inversione in modalità 1; a destra i profili ottenuti dall'inversione in modalità 2	64
Figura 46. Profili di tipo A	65
Figura 47. Profili di tipo B	65
Figura 48. Confronto tipologie profili (in grigio profili di tipo A, in rosso profili di tipo B)..	66
Figura 49. Andamento $V_{S,z}$ con la profondità – Profili di tipo A.....	67
Figura 50. Andamento $V_{S,z}$ con la profondità – Profili di tipo B.....	67
Figura 51. Confronto andamento (f_0, z) per le diverse tipologie di profili. In grigio per profili di tipo A; in rosso per profili di tipo B.....	68
Figura 52. Andamento della frequenza fondamentale f_0 con la profondità – Profili di tipo A	68
Figura 53. Andamento della frequenza fondamentale f_0 con la profondità – Profili di tipo B	69

Figura 54. Confronto andamento (f_0, z) per le diverse tipologie di profili. In grigio per profili di tipo A; in rosso per profili di tipo B.....	69
Figura 55. Andamento della deviazione standard dei logaritmi delle velocità di propagazione delle onde di taglio con la profondità per profili di tipo A e B.....	70
Figura 56. Tabella estratta da NTC2018 – Definizione delle categorie di sottosuolo in funzione della $V_{s,eq}$	71
Figura 57. Localizzazione del comune di San Severino Marche sulla mappa interattiva di pericolosità sismica (INGV).....	72
Figura 58. Spettro di risposta a pericolosità uniforme (probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni).....	73
Figura 59. Spettri di risposta di input (coefficiente di smorzamento $\xi=5\%$) nel rispetto del criterio di spettrocompatibilità.....	74
Figura 60. REXELite Elaboration Summary.....	75
Figura 61. Funzione di trasferimento – Profili di tipo A.....	76
Figura 62. Funzione di trasferimento – Profili di tipo B.....	76
Figura 63. Confronto funzioni di trasferimento (in grigio per profili di tipo A, in rosso per profili di tipo B).....	77
Figura 64. Esempio di curve di decadimento relative alla non linearità secondo Darendeli et al. (2001).....	78
Figura 65. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo A – Input 3A.MZ11..HNE.D20161030.064018.....	80
Figura 66. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input 3A.MZ11..HNE.D20161030.064018.....	80
Figura 67. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo A – Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018.....	81
Figura 68. Spettri di risposta elastici (a sinistra) e funzioni di amplificazione (a destra) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018.....	81
Figura 69. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo A – Input IT.CLO..HGE.D20161026.191806.....	82
Figura 70. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IT.CLO..HGE.D20161026.191806.....	82

Figura 71. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo A – Input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806	83
Figura 72. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806.....	83
Figura 73. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo A – Input IT.MMO..HGE.D.20161026.064018.....	84
Figura 74. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IT.MMO..HGE.D.20161026.064018	84
Figura 75. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo A – Input IT.MMO..HNN.D.20161026.064018	85
Figura 76. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IT.MMO..HNN.D.20161026.064018.....	85
Figura 77. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo A – Input IV.T1212..HNE.D.20161026.171036.....	86
Figura 78. Spettri di risposta elastici (a sinistra) e funzioni di amplificazione (a destra) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IV.T1212..HNE.D.20161026.171036	86
Figura 79. Confronto risultati - Input 3A.MZ11..HNE.D20161030.064018. In alto spettri di risposta per profili A e B; in basso funzioni di amplificazioni per profili di tipo A e B.....	87
Figura 80. Confronto risultati – Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018. In alto spettri di risposta medi per profili A e B; in basso funzioni di amplificazioni medie per profili di tipo A e B	88
Figura 81. Confronto risultati – Input IT.CLO..HGE.D.20161026.191806. In alto spettri di risposta medi per profili A e B; in basso funzioni di amplificazioni medie per profili di tipo A e B	89
Figura 82. Confronto risultati – Input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806. In alto spettri di risposta medi per profili A e B; in basso funzioni di amplificazioni medie per profili di tipo A e B	90
Figura 83. Confronto risultati – Input IT.MMO..HGE.D.20161026.064018. In alto spettri di risposta medi per profili A e B; in basso funzioni di amplificazioni medie per profili di tipo A e B	91

Figura 84. Confronto risultati – Input IT.MMO..HGN.D.20161026.064018. In alto spettri di risposta medi per profili A e B; in basso funzioni di amplificazioni medie per profili di tipo A e B	92
Figura 85. Confronto risultati – Input IV.T1212..HNE.D.20161026.171036. In alto spettri di risposta medi per profili A e B; in basso funzioni di amplificazioni medie per profili di tipo A e B	93
Figura 86. Spettri di risposta elastici di input (curve colorate), spettro di risposta elastico medio (in nero) e spettro di pericolosità uniforme (in blu)	94
Figura 87. Spettri di risposta elastici medi da analisi lineare equivalente (curve colorate distinte per ogni input) e spettro di risposta elastico medio (in grigio) – Profili di tipo A.....	95
Figura 88. Confronto tra lo spettro di risposta elastico medio da RSL con gli spettri di normativa per profili di tipo A	96
Figura 89. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input ridotto 3A.MZ11..HNE.D20161030.064018	97
Figura 90. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input ridotto 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018	98
Figura 91. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input ridotto IT.CLO..HGE.D20161026.191806 .	98
Figura 92. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input ridotto IT.CLO..HGN.D.20161026.191806	99
Figura 93. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input ridotto IT.MMO..HGE.D.20161026.064018	99
Figura 94. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input ridotto IT.MMO..HNN.D.20161026.064018	100
Figura 95. Spettri di risposta elastici (a sinistra) e funzioni di amplificazione (a destra) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input ridotto IV.T1212..HNE.D.20161026.171036	100
Figura 96. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input 3A.MZ11..HNE.D20161030.064018	101

Figura 97. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018	101
Figura 98. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IT.CLO..HGE.D.20161026.191806.....	102
Figura 99. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806.....	102
Figura 100. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IT.MMO..HGE.D.20161026.064018	103
Figura 101. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IT.MMO..HNN.D.20161026.064018	103
Figura 102. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IV.T1212..HNE.D.20161026.171036	104
Figura 103. Confronto spettri di risposta elastici ottenuti da simulazioni lineari equivalenti per tre diverse modalità di applicazione dell’input 3A.MZ11..HNE.D.20161030.064018	106
Figura 104. Confronto spettri di risposta elastici ottenuti da simulazioni lineari equivalenti per due diverse modalità di applicazione dell’input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018	106
Figura 105. Confronto spettri di risposta elastici ottenuti da simulazioni lineari equivalenti per due diverse modalità di applicazione dell’input IT.CLO..HGE.D.20161026.191806.....	107
Figura 106. Confronto spettri di risposta elastici ottenuti da simulazioni lineari equivalenti per due diverse modalità di applicazione dell’input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806	107
Figura 107. Confronto spettri di risposta elastici ottenuti da simulazioni lineari equivalenti per due diverse modalità di applicazione dell’input IT.MMO..HGE.D.20161030.064018.....	108
Figura 108. Confronto spettri di risposta elastici ottenuti da simulazioni lineari equivalenti per due diverse modalità di applicazione dell’input IT.MMO..HGN.D.20161030.064018	108
Figura 109. Confronto spettri di risposta elastici ottenuti da simulazioni lineari equivalenti per due diverse modalità di applicazione dell’input IV.T1212..HNE.D.20161026.171026	109
Figura 110. Esempio di andamento delle deformazioni massime al variare della profondità – Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018. A sinistra per profili di tipo A; a destra per profili di tipo B.....	110
Figura 111. Spettro f-k per acquisizione 106 (10 stacks) – Sito di Acquasanta Terme	113

Figura 112. Spettro f-k per acquisizione 151-160 (dati staccati) – Sito di Castel di Lama (campo).....	114
Figura 113. Spettro f-k per acquisizione 111-120 (dati staccati) – Sito di Castel di Lama (strada).....	114
Figura 114. Spettro f-k per acquisizione 101 – Sito di Montemonaco	115
Figura 115. Spettro f-k per acquisizione 100-110 (dati staccati) – Sito di Offida	115
Figura 116. Spettro f-k per acquisizione 100 – Sito di Palmiano	116
Figura 117. Spettro f-k per acquisizione 101– Sito di Roccafluvione	116
Figura 118. Spettro f-k per acquisizioni 161-170 (dati staccati) – Sito di Rotella.....	117
Figura 119. Spettro f-k per acquisizione 111 – Sito di San Severino	117
Figura 120. Spettro f-k per acquisizione 100 – Sito di Venarotta.....	118
Figura 121. Storie di accelerazione, velocità e spostamento - Input 3A.MZ11..HNE.D.20161030.064018.....	119
Figura 122. Spettro di Fourier – Input 3A.MZ11..HNE.D.20161030.064018.....	120
Figura 123. Storie di accelerazione, velocità e spostamento - Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018	121
Figura 124. Spettro di Fourier – Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018	122
Figura 125. Storie di accelerazione, velocità e spostamento - Input IT.CLO..HGE.D.20161026.191806	123
Figura 126. Spettro di Fourier – Input IT.CLO..HGE.D.20161026.191806.....	124
Figura 127. Storie di accelerazione, velocità e spostamento - Input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806.....	125
Figura 128. Spettro di Fourier – Input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806	126
Figura 129. Storie di accelerazione, velocità e spostamento - Input IT.MMO..HGE.D.20161030.064018	127
Figura 130. Spettro di Fourier – Input IT.MMO..HGE.D.20161030.064018.....	128
Figura 131. Storie di accelerazione, velocità e spostamento - Input IT.MMO..HGN.D.20161030.064018.....	129
Figura 132. Spettro di Fourier – Input IT.MMO..HGN.D.20161030.064018	130
Figura 133. Storie di accelerazione, velocità e spostamento - Input IV.T1212..HNE.D.20161026.171036	131
Figura 134. Spettro di Fourier – Input IV.T1212..HNE.D.20161026.171036.....	132

Figura 135. Spettri di risposta elastici da analisi visco-elastica lineare per input 3A.MZ11..HNE.D20161030.064018. A sinistra per profili di tipo A; a destra per profili di tipo B.....	133
Figura 136. Spettri di risposta elastici da analisi visco-elastica lineare per input 3A.MZ19..HNN.D20161030.064018. A sinistra per profili di tipo A; a destra per profili di tipo B.....	133
Figura 137. Spettri di risposta elastici da analisi visco-elastica lineare per input IT.CLO..HGE.D.20161026.191806. A sinistra per profili di tipo A; a destra per profili di tipo B	134
Figura 138. Spettri di risposta elastici da analisi visco-elastica lineare per input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806. A sinistra per profili di tipo A; a destra per profili di tipo B	134
Figura 139. Spettri di risposta elastici da analisi visco-elastica lineare per input IT.MMO..HGE.D.20161026.064018. A sinistra per profili di tipo A; a destra per profili di tipo B.....	135
Figura 140. Spettri di risposta elastici da analisi visco-elastica lineare per input IT.MMO..HGN.D.20161026.064018. A sinistra per profili di tipo A; a destra per profili di tipo B.....	135
Figura 141. Spettri di risposta elastici da analisi visco-elastica lineare per input IV.T1212..HGE.D.20161026.171036. A sinistra per profili di tipo A; a destra per profili di tipo B.....	136

Introduzione

Il presente elaborato descrive, nella prima parte, le fasi di interpretazione ed analisi dei dati sperimentali di prove sismiche che hanno portato a caratterizzare dei depositi di terreno. La seconda parte si concentra sulle analisi di risposta sismica locale per un comune in particolare del Centro Italia (San Severino Marche).

I dati sperimentali, oggetto delle elaborazioni svolte, sono stati acquisiti durante le campagne di misura condotte dal Politecnico di Torino nell'ambito del *Progetto per la Microzonazione Sismica* del Centro Italia, il cui obiettivo principale è la realizzazione di carte di Microzonazione Sismica di Livello III per i territori colpiti dagli eventi sismici dal 24 agosto 2016.

L'obiettivo delle carte di Microzonazione Sismica di Livello III è quello di dividere il territorio in zone sismicamente omogenee (*Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica MOPS*) secondo delle condizioni specifiche di stabilità (quali zone stabili, zone stabili soggette ad amplificazione del moto sismico e zone instabili) e caratterizzandole quantitativamente tramite il fattore di amplificazione, valore definito sulla base della risposta locale in superficie rispetto le condizioni di riferimento (su suolo rigido).

Naturalmente, per giungere alle considerazioni relative alla risposta del deposito ad uno specifico input sismico imposto, è necessario indagare preventivamente la zona in questione. In particolare si ha bisogno di definire un modello geologico e geotecnico, rappresentativo delle reali condizioni del sito. In questo contesto si inserisce la campagna di indagini geofisiche, oggetto di successivi approfondimenti.

Il *Progetto per la Microzonazione Sismica* è stato a grandi linee il filo conduttore dell'elaborato di tesi; allo stesso tempo sono state previste analisi aggiuntive e confronti, che si discostano dai dettami definiti dal protocollo di microzonazione, ma ritenute utili per approfondire alcuni punti delle tematiche trattate.

Il lavoro di tesi si articola in 5 capitoli; si riassumono gli aspetti salienti.

Il **Capitolo 1** illustra i riferimenti teorici, atti a comprendere i principi sostanziali relativi alla teoria di propagazione delle onde superficiali, entrando più nel dettaglio nel comportamento delle onde di Rayleigh.

Proprietà fondamentale di tali onde è riscontrabile nella dipendenza della velocità di fase dalla frequenza: nel **Capitolo 2** si accenna alle diverse tipologie di prove sismiche in sito, per poi approfondire la tecnica MASW o *Multistation Analysis of Surface Waves*, indagine non

invasiva, che sfrutta la proprietà di dispersione geometrica delle onde superficiali per definire i parametri meccanici utili alla modellazione del comportamento del terreno.

Nel **Capitolo 3** sono state affrontate nel dettaglio le fasi che portano all'estrazione delle curve di dispersione per 9 comuni della regione Marche, per i quali sono state eseguite prove MASW secondo i dettami definiti dai protocolli del *Progetto per la Microzonazione Sismica*. Si denota come la curva di dispersione assuma un ruolo importante nella caratterizzazione dei depositi di terreno. Essa contiene rilevanti informazioni circa l'andamento del profilo delle velocità delle onde di taglio e di conseguenza informazioni inerenti alle caratteristiche di rigidità del mezzo.

L'informazione ottenuta dall'interpretazione delle prove MASW risulta attendibile per gli strati superficiali del deposito di terreno, ma perde di risoluzione all'aumentare della profondità. Questo aspetto è ritenuto un punto basilare del lavoro di tesi. Avendo a disposizione anche le acquisizioni di prove HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*), nello specifico, per il comune di San Severino Marche (provincia di Macerata), si è scelto di utilizzare i dati sperimentali in termini di curva di ellitticità, per indagare profondità maggiori e migliorare i risultati restituiti dal processo di inversione della sola curva di dispersione.

Il **Capitolo 4**, infatti, è incentrato in particolare sulla caratterizzazione del deposito per il comune di San Severino Marche.

In prima battuta sono state approfondite le metodologie di interpretazione dei dati sperimentali delle prove HVSR e sono state messe in evidenza le motivazioni che hanno portato al processo di inversione congiunta, eseguita con il software DINVER. L'unione dei dati sperimentali della curva di dispersione e della curva di ellitticità ha avuto un riscontro positivo nell'individuazione di una interfaccia aggiuntiva nel profilo di velocità delle onde di taglio, utile a completare i profili a profondità precedentemente non indagate dalle prove MASW.

Avendo a disposizione in questo modo le caratteristiche meccaniche del deposito, si è proceduto con le analisi di risposta sismica locale sempre per il sito di San Severino Marche, con lo scopo di determinare l'amplificazione del moto sismico di riferimento. La risposta sismica locale risulta governata dai rapporti di impedenza del modello multistrato e dalle caratteristiche dissipative del mezzo in questione.

Le simulazioni sono state condotte con il codice di calcolo DEEPSOIL per modelli multistrato monodimensionali, trascurando problematiche bidimensionali ed eseguendo

analisi sia visco-elastiche lineari, sia lineari equivalenti, in cui la risposta risulta dipendente non solo dai parametri del sistema, ma anche dalla non linearità della risposta.

Capitolo 1 - Teoria delle onde superficiali

1.1 Principi base delle onde superficiali

In generale, una delle principali tecniche usate per l'individuazione del profilo di velocità di propagazione delle onde di taglio V_S , utile alla caratterizzazione meccanica del terreno, è rappresentata dalle analisi di propagazione delle onde superficiali. Queste ultime sono generate in presenza di superficie libera (in condizione di tensione nulla) e si propagano in una porzione limitata del mezzo continuo.

Fanno parte di tale categoria ed hanno una importanza rilevante nelle applicazioni di caratterizzazione dei depositi di terreno:

- le *onde di Rayleigh*: associate ad una traiettoria ellittica delle particelle durante la propagazione dell'onda nel mezzo (*Figura 1a*); esse derivano dall'interferenza delle onde P (di compressione) e le onde SV (onde di taglio S polarizzate sul piano verticale) in condizione di bordo libero;
- le *onde di Love*: generate dall'interferenza costruttiva di onde SH (onde S polarizzate sul piano orizzontale) ed in presenza di un substrato a rigidità maggiore al di sotto dello strato superficiale (caso particolare di mezzo stratificato); sono caratterizzate da un moto trasversale, che giace nel piano orizzontale (*Figura 1b*).

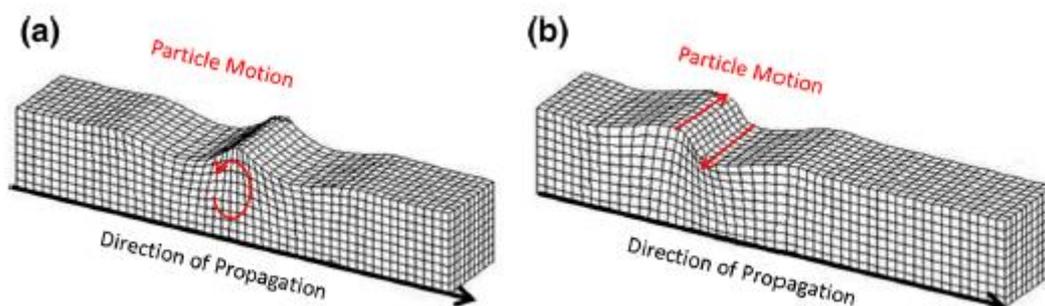


Figura 1. Propagazione delle onde superficiali: onde di Rayleigh (a) e onde di Love (b) (Bolt, 1987). Da "Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project"

Nell'elaborato in questione si farà riferimento esclusivamente alla propagazione delle onde di Rayleigh.

È stato dimostrato come l'ampiezza del moto delle onde di Rayleigh si attenua esponenzialmente con la profondità, assumendo valori trascurabili per profondità maggiori di

circa 1.5 volte la lunghezza d'onda λ ; la propagazione dell'onda avviene in una zona confinata e superficiale e pertanto non risulta influenzata dalle eventuali variazioni delle caratteristiche meccaniche del deposito all'aumentare della profondità.

Come giustificazione di ciò, la *Figura 2* mostra come si riduce l'ampiezza delle componenti orizzontali e verticali del moto (moto normalizzato rispetto la condizione in superficie) con la profondità in un semispazio omogeneo elastico lineare (Richart et al., 1970) per diversi valori del coefficiente di Poisson.

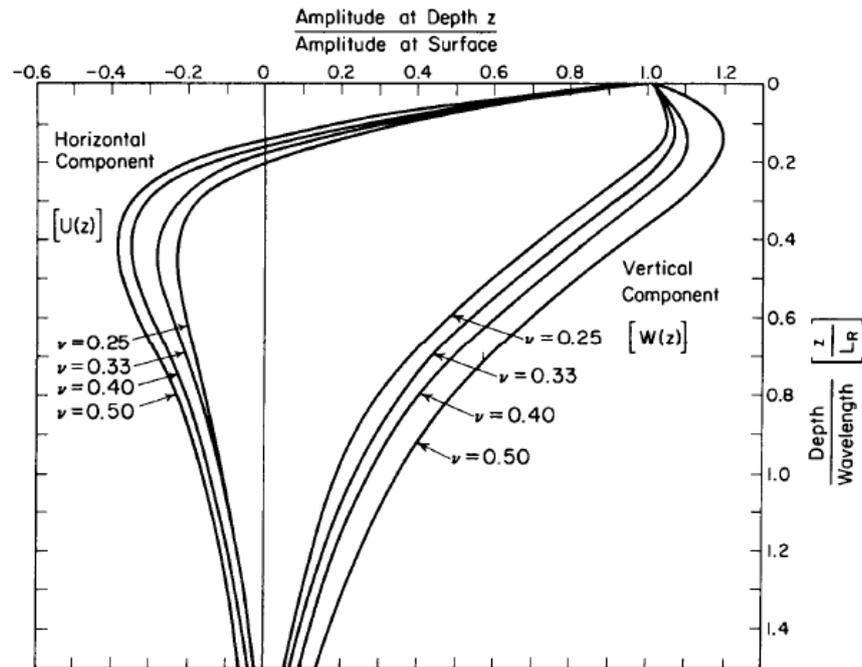


Figura 2. Fascio di curve di attenuazione delle componenti del moto normalizzato delle onde di Rayleigh all'aumentare della profondità ed al variare del coefficiente di Poisson (Richart et al., 1970). Da "Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves"

Altro aspetto interessante è relativo alla tipologia di fronte d'onda, con cui le onde di Rayleigh si propagano. Innanzitutto si ricorda la definizione di fronte d'onda, come quel luogo dei punti più lontano dalla sorgente, raggiunto dalla perturbazione in un determinato istante.

Nell'ipotesi di sorgente puntuale agente sulla superficie libera (Lamb, 1904), è stato dimostrato come la propagazione di tali onde non si dirama in tutte le direzioni, ma si manifesta secondo un fronte d'onda cilindrico, differente dal fronte d'onda sferico tipico delle onde di volume.

Da ciò scaturiscono le leggi di attenuazione geometrica associate alle diverse tipologie di onde.

Ipotizzando la condizione di sorgente in profondità e per un fronte d'onda sferico, l'energia rilasciata da una perturbazione si distribuisce su una superficie sferica, la quale tende ad espandersi all'aumentare della distanza dalla sorgente; in questo caso l'energia si attenua in maniera inversamente proporzionale al quadrato di tale distanza ($E_P \propto \frac{1}{r^2}$).

Invece nel caso di sorgente puntuale su superficie libera, le onde superficiali generate si propagano con fronte d'onda cilindrico e contestualmente l'energia rilasciata si attenua secondo un fattore inversamente proporzionale alla distanza dalla sorgente ($E_R \propto \frac{1}{r}$).

Questo concetto può essere anche affrontato in termini di ampiezza A del moto per diverse tipologie di onde: si definisce la proporzionalità inversa con la distanza r dalla sorgente tramite una legge di potenza, di seguito riportata.

$$A \propto \frac{1}{r^n}$$

Con: $n = 2$ per onde longitudinali e distorsionali in superficie;
 $n = 1$ per onde di volume all'interno del mezzo;
 $n = 1/2$ per onde di Rayleigh.

Per dare un'idea relativamente ai quantitativi di energia trasmessa durante la propagazione delle onde, si richiamano gli studi di *Miller e Pursey (1955)*: nella condizione particolare di fondazione circolare a carico vibrante a bassa frequenza poggiante sulla superficie di un semispazio omogeneo elastico lineare, è stato dimostrato che più del 60% dell'energia totale viene trasmesso dalle onde di Rayleigh, mentre la restante parte viene ripartita tra le altre tipologie di onde.

In definitiva all'aumentare della distanza dalla sorgente si manifestano effetti diversi: ad una certa distanza si risente maggiormente il contributo delle onde di Rayleigh rispetto a quello delle onde di volume, ormai attenuate, e principalmente si riscontra come il campo degli spostamenti dovuto alla propagazione venga dominato dalle onde di Rayleigh.

(Si fa riferimento alla tesi di dottorato: Foti S. (2000), *Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves*)

1.2 Dispersione geometrica delle onde superficiali

In un mezzo omogeneo, isotropo, elastico e lineare le onde di Rayleigh hanno una velocità di propagazione dipendente solo dalle proprietà meccaniche del terreno, di poco diversa dalla velocità di propagazione delle onde di taglio:

$$V_R \cong 0.9 V_S \cong 0.9 \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Al contrario, in un mezzo verticalmente eterogeneo, tali onde assumono un comportamento dispersivo, cioè la velocità di propagazione risulta dipendente dalla frequenza e quindi dalla lunghezza d'onda. Pertanto sul fenomeno della dispersione geometrica si fondano le prove che sfruttano la propagazione delle onde superficiali.

La relazione che determina la velocità di fase delle onde di Rayleigh è la seguente:

$$V_R = \lambda \cdot f$$

e mette in evidenza l'inversa proporzionalità tra la lunghezza d'onda λ e la frequenza f .

Si descrive il fenomeno per una colonna di terreno stratificata e caratterizzata da un profilo di rigidezza crescente all'aumentare della profondità. In queste condizioni, l'onda di Rayleigh ad alta frequenza viaggia in una porzione ristretta del mezzo (valore di λ basso). L'onda a frequenza bassa invece viaggia generalmente a velocità più alta, poiché influenzata dalle caratteristiche di rigidezza degli strati più profondi.

A sostegno di ciò, si ricorre al teorema integrale di Fourier, che definisce come un'onda transitoria sia il risultato della somma di onde stazionarie, ciascuna caratterizzata da una propria frequenza: in questo modo si assume che le varie componenti dell'onda si propagano con velocità di fase diverse. Si relazionano in definitiva i valori delle velocità di fase alle frequenze, la cui rappresentazione prende il nome di curva di dispersione (*Figura 3*).

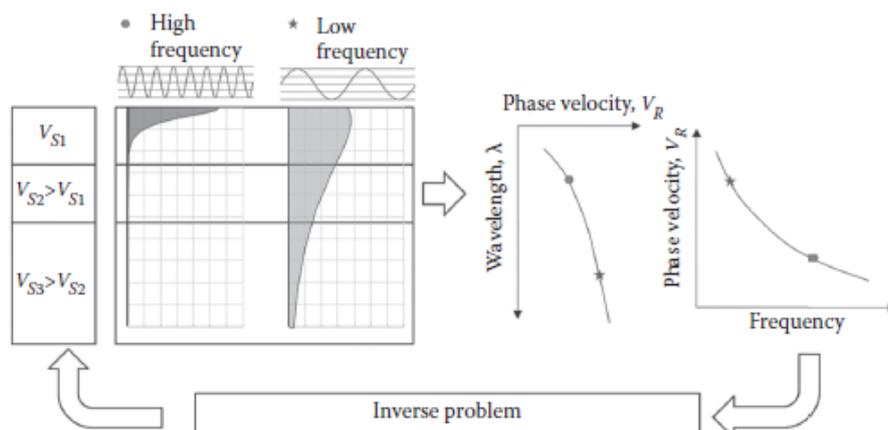


Figura 3. Dispersione geometrica in un mezzo verticalmente stratificato e definizione della curva di dispersione. Da "Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization"

Approcciandosi in maniera operativa al caso, le curve di dispersione vengono ottenute sperimentalmente tramite il *processing* di dati sismici acquisiti durante le indagini in sito, la cui analisi si rimanda nel *Capitolo 2*.

Capitolo 2 - Prove sismiche in sito

2.1 Generalità

Le prove sismiche per la caratterizzazione meccanica del sito si suddividono principalmente in due categorie, quali *prove invasive* e *non invasive*, distinte a seconda della collocazione della strumentazione per l'esecuzione della prova.

Si riassumono le caratteristiche generali di tali categorie.

- *Prove in foro, invasive*: prevedono la collocazione di parte della strumentazione nel mezzo tramite foro di sondaggio. Appartengono a questa categoria: prove Cross-Hole (CHT), prove Down-Hole (DHT), sismico (SCPT), dilatometro sismico (SDMT) (Figura 4a).
- *Prove di superficie, non invasive*: prove interamente eseguite sulla superficie. Si citano: sismica a rifrazione, sismica a riflessione, Surface Waves Methods (SASW, MASW, Microtremors) (Figura 4b).

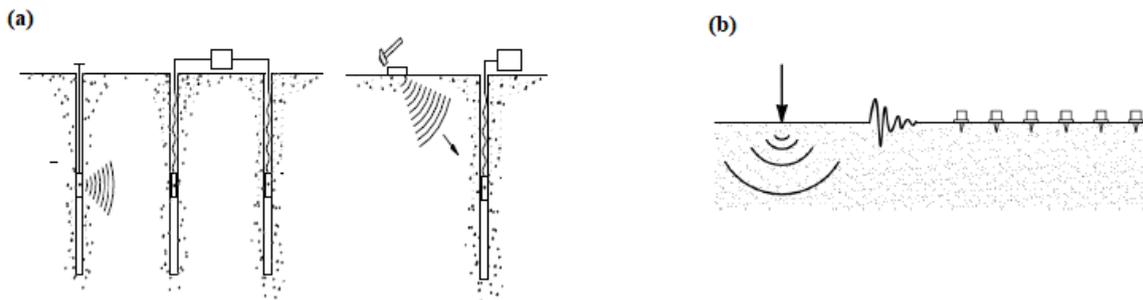


Figura 4. Esempi di prove in sito invasive (a) e non invasive (b). Da "Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves"

Le prove invasive sono basate su misure dirette e locali, che permettono un'interpretazione semplice ed accurata dei dati sperimentali acquisiti, ma richiedono allo stesso tempo una preventiva pianificazione dell'esecuzione e disposizione dei fori per il posizionamento della strumentazione in profondità. L'esecuzione dei fori di sondaggio però risulta un aspetto favorevole, poiché garantisce informazioni aggiuntive sulla stratigrafia.

Le prove non invasive sono affette da un alto grado di incertezza, da una difficoltà di interpretazione dei dati acquisiti e dalla perdita di informazioni ad elevate profondità, ma permettono di esplorare e caratterizzare grandi volumi di terreno.

Di seguito si entra nel dettaglio delle prove non invasive (*Surface Wave Methods SWM*), che si basano sul principio di propagazione delle onde superficiali e sulla soluzione del problema

inverso, con lo scopo di stimare il profilo di velocità delle onde di taglio V_S e di conseguenza il profilo di rigidità della colonna di terreno in esame sulla base della relazione:

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

Si ricorda inoltre la relazione utile alla definizione della velocità di propagazione delle onde di volume V_P :

$$V_P = \sqrt{\frac{M}{\rho}}$$

che mette in evidenza la dipendenza di tale parametro dal modulo edometrico M (modulo in condizione di espansione laterale impedita) e dalla densità del terreno.

Note le espressioni di V_S e V_P ed esprimendo M tramite la seguente relazione:

$$M = \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E$$

è possibile definire la velocità di propagazione delle onde di volume in funzione della velocità di propagazione delle onde di taglio ed il coefficiente di Poisson ν , come segue:

$$V_P = V_S \sqrt{\frac{1 - \nu}{0.5 - \nu}}$$

Nell'ipotesi di mezzo omogeneo isotropo elastico e lineare, la velocità delle onde di taglio V_S è un utile descrittore del comportamento dello scheletro solido del deposito e definisce direttamente l'andamento del modulo di taglio della colonna di terreno con la profondità (secondo la relazione prima riportata).

Da ciò si comprende come il valore di V_S non sia influenzato dall'eventuale presenza di fluido interstiziale, poiché quest'ultimo non resiste alle distorsioni di taglio.

Il profilo di velocità delle onde di volume V_P invece permette di valutare la compresenza del fluido e dello scheletro solido, quindi studiare il comportamento di un mezzo saturo poroso, poiché i valori assunti da questa grandezza sono influenzati dalla rigidità rispettivamente dello scheletro solido (SK) e del fluido (F), come illustrato dalla relazione seguente:

$$V_P = \sqrt{\frac{\left(K^{SK} + \frac{4}{3} \cdot G\right) + \frac{K^F}{n}}{\rho}}$$

In cui: n = porosità;

ρ = densità volumica;

K^{SK} = modulo volumetrico dello scheletro solido;

K^F = modulo volumetrico del fluido.

2.2 Analisi di propagazione delle onde superficiali

Si riconoscono tre fasi distinte nella procedura generale di analisi delle onde superficiali, di seguito elencate:

1. Acquisizione dei dati sismici
2. Processing dei dati sperimentali
3. Processo di inversione

Per tale trattazione, si cita la fonte bibliografica: Foti S., Lai C. G, Rix G. J., Strobbia C. (2014), *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*.

2.2.1 Acquisizione dei dati sismici

Le onde superficiali vengono innanzitutto generate da una sorgente armonica o impulsiva; successivamente tali onde si propagano nel terreno, manifestando un comportamento dispersivo (*Paragrafo 1.2*), fino ad essere acquisite da un numero variabile di ricevitori (geofoni verticali sensibili alle basse frequenze) predisposti sulla superficie del terreno sottoposto ad indagine. I segnali vengono infine registrati da un sismografo.

Si sintetizza in *Figura 5* lo schema esecutivo per una prova MASW (*Multistation Analysis of Surface Waves*).

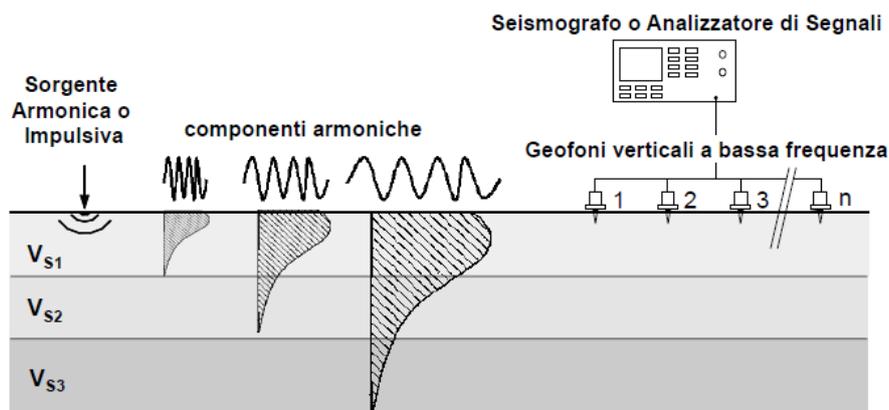


Figura 5. Schema di esecuzione prova MASW

Questo approccio multi-stazione semplifica e velocizza il processamento dei dati e permette di ottenere dei risultati più robusti rispetto alla tecnica SASW (*Surface Analysis of Surface Waves*).

L'approccio SASW a 2 ricevitori valuta la curva di dispersione dalla stima del ritardo temporale tra gli arrivi dell'onda ai medesimi ricevitori. Si denota l'ottenimento di buoni risultati per ricevitori disposti in posizioni vicine (valori di λ bassi), ma le informazioni peggiorano per maggiori distanze (alte lunghezze d'onda). Questo problema può essere risolto ripetendo più volte la prova, spostando i ricevitori, però questo comporta dei lunghi tempi di esecuzione. Per ovviare ciò, si preferisce l'esecuzione di prove MASW.

2.2.2 Processing dei dati

Entrando nel merito dell'elaborazione dei dati sperimentali per prove MASW, i segnali acquisiti, rappresentati nel diagramma spazio-tempo (sismogrammi), sono sottoposti ad una attenta analisi e successivamente processati. L'analisi viene condotta nel dominio frequenza-numero d'onda (f, k) tramite l'applicazione della doppia trasformata di Fourier nel tempo e nello spazio, che separa il segnale di partenza nelle sue componenti armoniche a diversa frequenza. Ad ogni frequenza è associato un numero d'onda k e, tramite la seguente formula, si ottiene la relativa velocità di fase delle onde di Rayleigh:

$$V_R(f) = \frac{2\pi f}{k|_{A=A_{max}}}$$

Rappresentando V_R in funzione della frequenza, si definisce la curva di dispersione ed i punti che ne descrivono l'andamento sono associati ai valori massimi dello spettro nel dominio (f, k).

Dalla curva di dispersione è inoltre desumibile la massima profondità indagata dalla prova MASW, pari a circa metà della massima lunghezza d'onda λ_{max} , per la quale sono disponibili le informazioni sperimentali:

$$z_{max} = \frac{\lambda_{max}}{2}$$

Tale valore di lunghezza d'onda è associato alla minima frequenza f_{min} , per la quale si ricava la corrispondente velocità di fase delle onde di superficie V_R .

2.2.3 Processo di inversione

Il problema di identificazione dei parametri di modello del terreno è affrontato risolvendo il problema inverso, ultimo step dell'interpretazione dei risultati delle prove sismiche a onde superficiali.

La strategia risolutiva del problema inverso è basata sulla ricerca dei parametri di modello del terreno, tali da minimizzare la distanza tra la curva di dispersione sperimentale e quella numerica (problema ai minimi quadrati).

Tipicamente nella definizione dei parametri del modello multistrato, il coefficiente di Poisson ν e la densità ρ sono assunti a priori per ogni strato, poiché rivestono un ruolo secondario rispetto a spessori h e velocità delle onde di taglio V_S , che risultano le vere incognite del problema.

2.2.4 Ipotesi e limitazioni

2.2.4.1 Ipotesi del problema inverso

La risoluzione del problema inverso deve essere governata da ipotesi ragionevoli, che permettano di definire un modello di terreno consistente con la realtà.

Si necessita la scelta di un modello di riferimento, che abbia strati piani e paralleli (escludendo in questo modo variazioni laterali), omogenei, elastici lineari.

Si nota inoltre come il problema inverso sia tipicamente malposto e malcondizionato. Ciò comporta la non esistenza di un'unica soluzione; diversi profili di V_S , ottenuti per diversi valori di parametri di modello incogniti, possono essere soluzione del problema inverso: le diverse curve di dispersione numeriche associate ai diversi profili citati risultano congruenti alla curva di dispersione sperimentale di riferimento.

2.2.4.2 Condizione di campo vicino

Gli effetti di campo vicino sono principalmente dovuti all'interferenza delle onde di volume con le onde superficiali e la tipologia di fronte d'onda delle onde di Rayleigh.

Il campo d'onda in vicinanza della sorgente è tipicamente complesso ed influenzato da onde di volume e di superficie. Secondo la legge di attenuazione dell'energia, all'aumentare della distanza dalla sorgente, il campo è dominato dalle onde di Rayleigh, mentre i contributi delle onde di volume risultano trascurabili, poiché si attenuano più velocemente rispetto alle onde di superficie.

Questo comportamento è dovuto alle diverse tipologie di fronte d'onda, sferico per le onde P e cilindrico per le onde di superficie, aspetto che induce una distribuzione di energia differente (*Paragrafo 1.1*).

2.2.4.3 Analisi dei modi di vibrare

Un'altra ipotesi frequente nell'interpretazione del processo di inversione è relativa all'assunzione che il modo di vibrare fondamentale è dominante.

In alcuni casi particolari, ad esempio per stratigrafie più complesse, il primo modo di vibrare non risulta prevalente, ma emerge una marcata influenza dei modi di vibrare superiori.

Questi ultimi possono essere rilevati nel dato sperimentale, ma sono di difficile identificazione e distinzione. Nel caso in cui si tengano in considerazione (*analisi multi-modali*), essi conferiscono informazioni aggiuntive ed utili al miglioramento della soluzione finale. Si illustra un esempio in *Figura 6*.

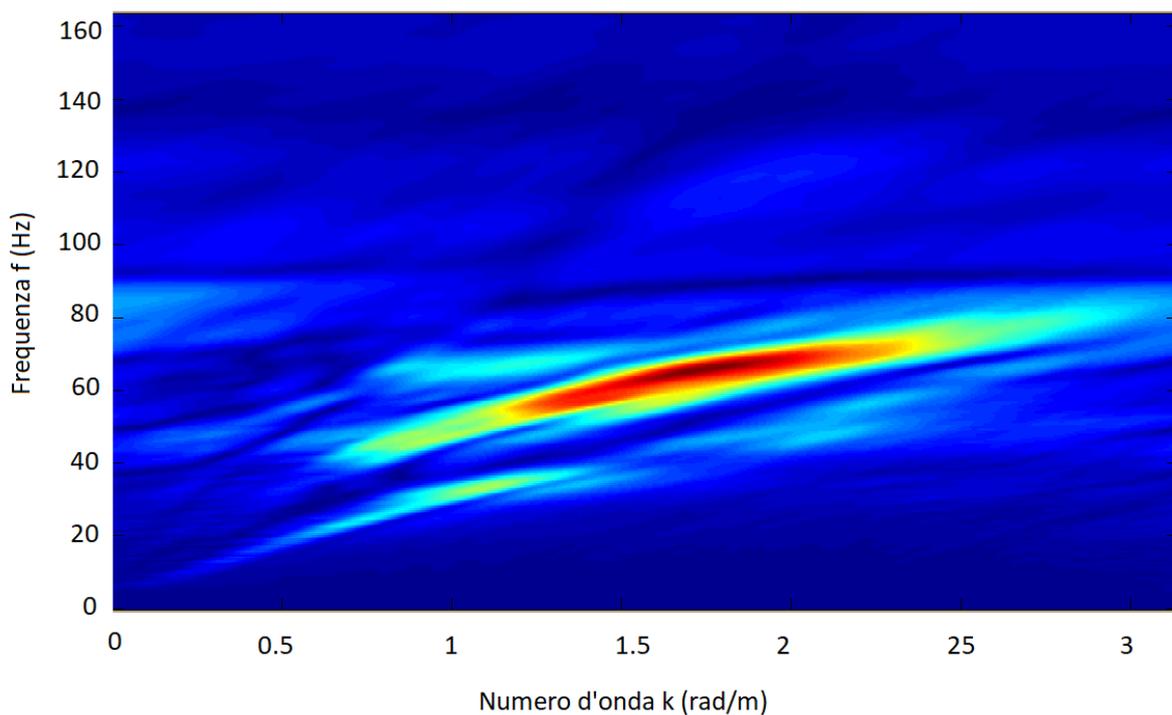


Figura 6. Esempio - Primo e secondo modo di vibrare nello spettro (f-k). Da interpretazione dati sperimentali per il sito di Roccafluvione (acquisizione 101)

Capitolo 3 - Casi studio: Indagini sismiche ad onde superficiali per alcuni siti del Centro Italia

Nell'ambito del *Progetto per la Microzonazione Sismica* del Centro Italia, nel mese di ottobre 2017 è stata condotta dal Politecnico di Torino una campagna di indagine nei luoghi di interesse per l'acquisizione dei dati sismici sperimentali, primo passo per l'investigazione dei volumi di terreno in esame nel campo delle basse deformazioni. L'elenco dei siti sottoposti ad indagini sismiche è riportato in *Tabella 1*.

Comune di Acquasanta Terme	Provincia di Ascoli Piceno Regione Marche
Comune di Castel di Lama	Provincia di Ascoli Piceno Regione Marche
Comune di Montemonaco	Provincia di Ascoli Piceno Regione Marche
Comune di Offida	Provincia di Ascoli Piceno Regione Marche
Comune di Palmiano	Provincia di Ascoli Piceno Regione Marche
Comune di Roccafluvione	Provincia di Ascoli Piceno Regione Marche
Comune di Rotella	Provincia di Ascoli Piceno Regione Marche
Comune di San Severino Marche	Provincia di Macerata Regione Marche
Comune di Venarotta	Provincia di Ascoli Piceno Regione Marche

Tabella 1. Elenco dei comuni sottoposti a campagna di indagine sismica per il Progetto per la Microzonazione Sismica

3.1 Acquisizione dei dati sismici

Dipendentemente dalle condizioni del sito, sono stati predisposti stendimenti lineari di geofoni verticali tipo SENSOR-SM-6/U-B con frequenza propria di 4.5 Hz, allineati con la sorgente sismica di tipo impulsivo. La strumentazione necessaria all'esecuzione delle prove MASW include anche un sistema di acquisizione multicanale (24 canali) (*GEODE*

Sismograph), una sorgente attiva (in questo caso) ed un sistema di collegamento tramite cavi sismici.

I fogli di campagna compilati in sito raccolgono le modalità e le caratteristiche di esecuzione delle prove MASW, illustrate nel dettaglio in *Tabella 2*.

<i>File</i>	Nome file
<i>Tipo sorgente</i>	Sorgente impulsiva (mazza battente)
<i>Posizioni assolute di riferimento</i>	Definizione della posizione della sorgente e del primo ed ultimo canale ricevitore rispetto la sorgente stessa. Teoricamente la sorgente deve essere posizionata rispetto al primo ricevitore in modo tale da rispettare le condizioni di campo lontano (<i>Paragrafo 2.2.4.2</i>) e allo stesso tempo preservare le componenti ad alta frequenza.
<i>Distanza</i>	Distanza tra primo ed ultimo geofono
<i>Intervallo Δx</i>	Distanza tra i-esimo geofono ed il successivo
<i>Canali</i>	Numero di geofoni dello stendimento; si raccomanda un minimo di 24 ricevitori per garantire un adeguato campionamento del campo d'onda. Nei casi studio in esame il numero di geofoni utilizzati varia tra 24 e 36
<i>Samples</i>	Intervallo di acquisizione del segnale, pari a 4.096 s
<i>Δt</i>	Intervallo di campionamento, fissato a 0.25 ms
<i>Pretrig</i>	Intervallo di acquisizione precedente alla energizzazione, fissato a 0.5 s

Tabella 2. Modalità e caratteristiche di esecuzione delle prove MASW

Per ogni sito, nel dettaglio, le prove sono state eseguite:

- energizzando prima da un estremo dello stendimento e successivamente dall'altro;
- a sorgente fissata, secondo due configurazioni di posizionamento dei geofoni (stendimento corto o lungo tramite la variazione del passo tra i dispositivi), per consentire una buona indagine sia alle alte frequenze che alle basse frequenze (eseguita solo per alcuni siti); in questo modo si esplora la banda di frequenza più larga possibile;

- a configurazione di prova fissata, con la registrazione di più dati sperimentali (*stacking*) per aumentare la qualità dei segnali acquisiti (sulla base del rapporto segnale-rumore, che aumenta con la radice di $2*n$).

3.2 Processing dei dati sismici

Il *processing* dei dati sismici è stato eseguito in MATLAB secondo il codice SWAT (*Surface Waves Analysis Tool*), che applica la doppia trasformata di Fourier ai segnali acquisiti e restituisce gli spettri frequenza-numero d'onda (f-k). Il procedimento ha previsto una prima fase di analisi della configurazione di prova e pulizia dei segnali, eliminando le tracce affette da eccessivo rumore (cause ambientali, presenza antropica, traffico, malfunzionamento strumentale).

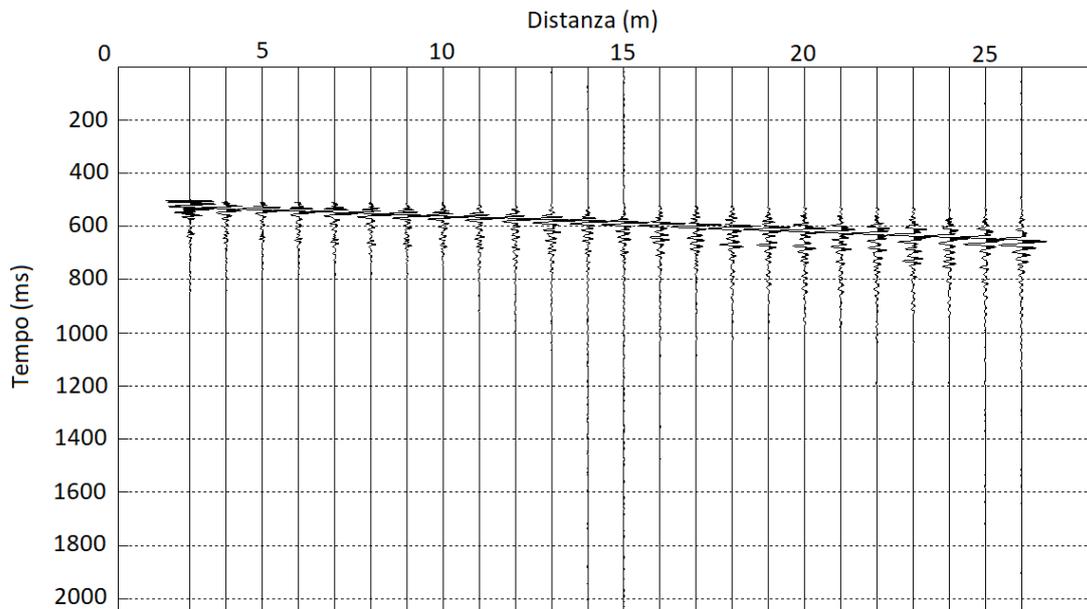


Figura 7. Esempio di segnali acquisiti con 24 geofoni (distanza sorgente-primo geofono=3 m, $\Delta x=1$ m, $\Delta t=0.25$ ms) – Sito di Palmiano

La seconda fase prevede l'individuazione del modo fondamentale e dei successivi modi di vibrare e di seguito la selezione dei valori massimi nello spettro f-k (*picking* della zona in rosso) per il primo modo di vibrare.

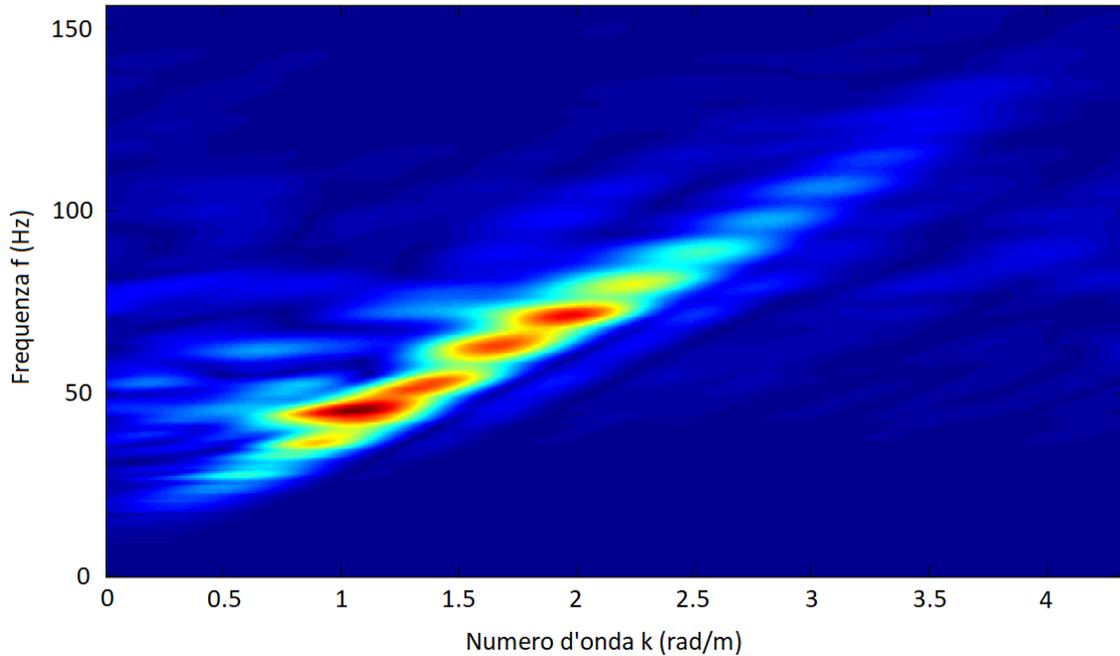


Figura 8. Esempio di spettro (f - k) per acquisizione 100 – Sito di Palmiano

Ad ogni punto individuato dal *picking*, corrisponde un valore di velocità di fase delle onde superficiali V_R e, diagrammando queste velocità al variare della frequenza, si definiscono le curve di dispersione sperimentali per ogni prova eseguita nei diversi siti sottoposti ad indagine.

La curva di dispersione sperimentale di ogni sito è stata infine ottenuta come media delle curve di dispersione relative ad ogni prova effettuata localmente.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per ogni comune: i punti in rosso delle curve di dispersione sperimentali rappresentano i valori medi di velocità di fase ad una determinata frequenza, correlati dalla relativa deviazione standard (*Figure 9-18*).

Si rimanda all'*Appendice A* per la visione degli spettri (f - k) elaborati in MATLAB dal codice SWAT per ogni caso studio.

- Acquasanta Terme

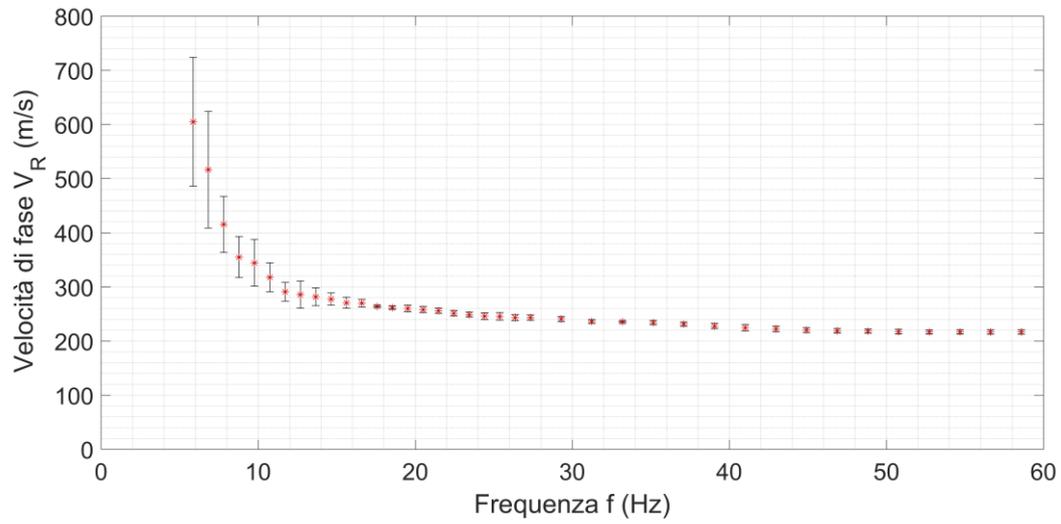


Figura 9. Curva di dispersione – Sito di Acquasanta Terme

- Castel di Lama (campo)

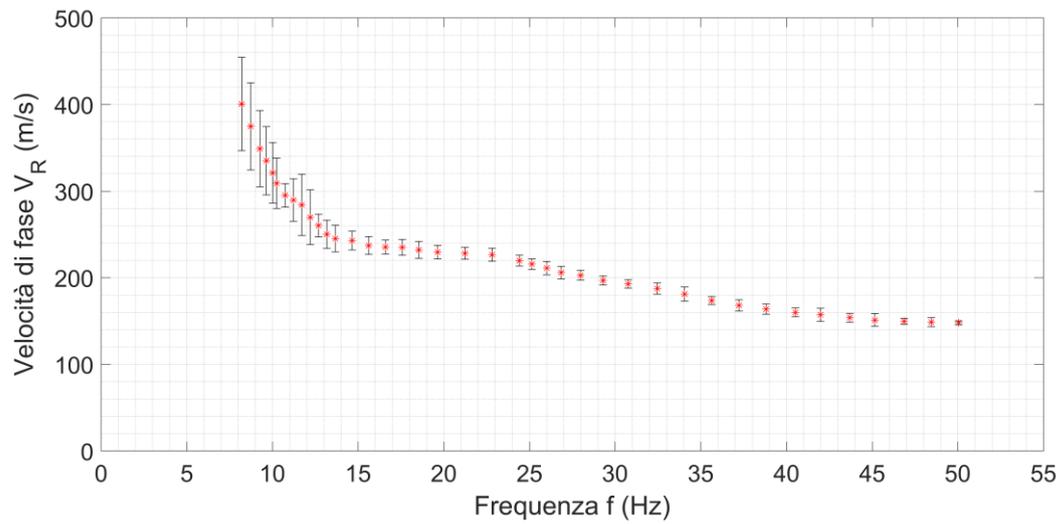


Figura 10. Curva di dispersione – Sito di Castel di Lama (campo)

- Castel di Lama (strada)

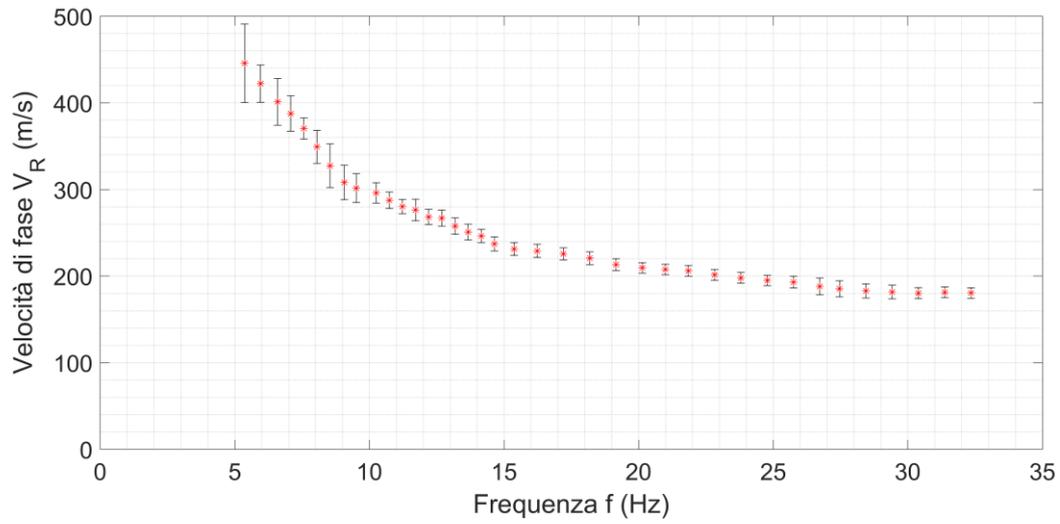


Figura 11. Curva di dispersione – Sito di Castel di Lama (strada)

- Montemonaco

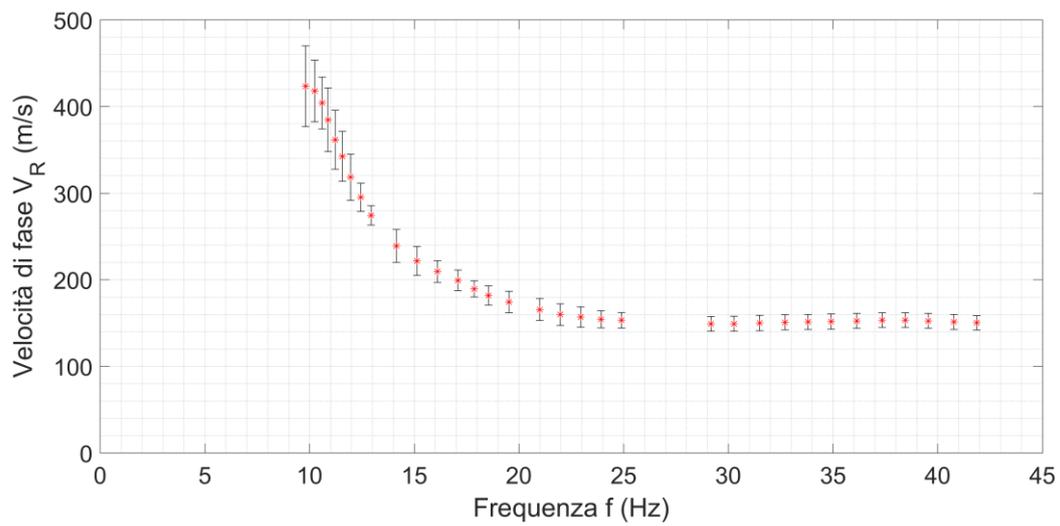


Figura 12. Curva di dispersione – Sito di Montemonaco

- Offida

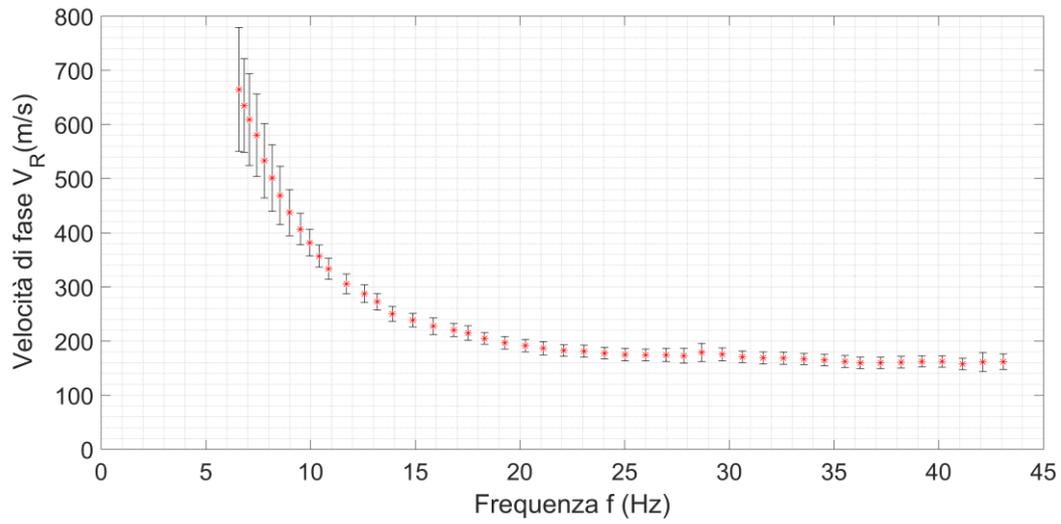


Figura 13. Curva di dispersione – Sito di Offida

- Palmiano

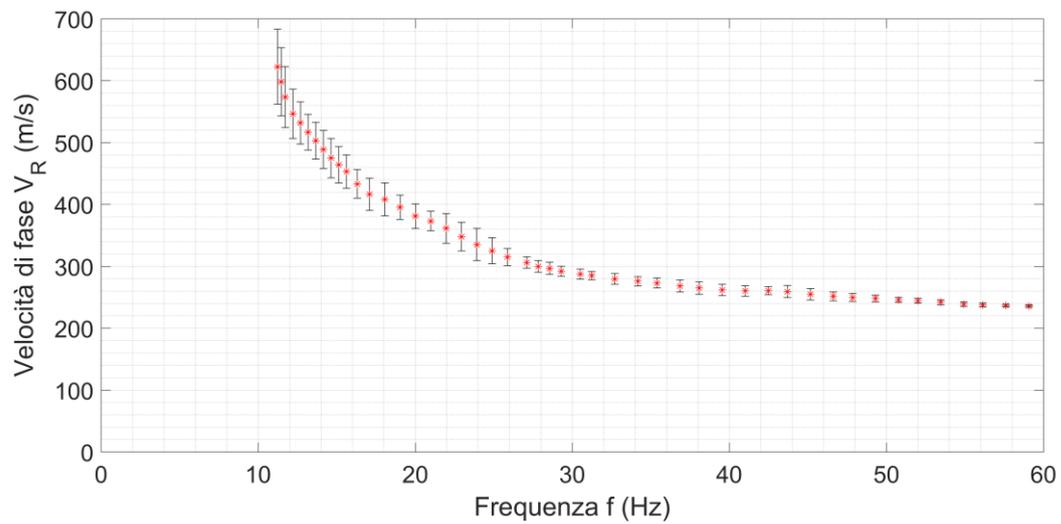


Figura 14. Curva di dispersione – Sito di Palmiano

- Roccafluvione

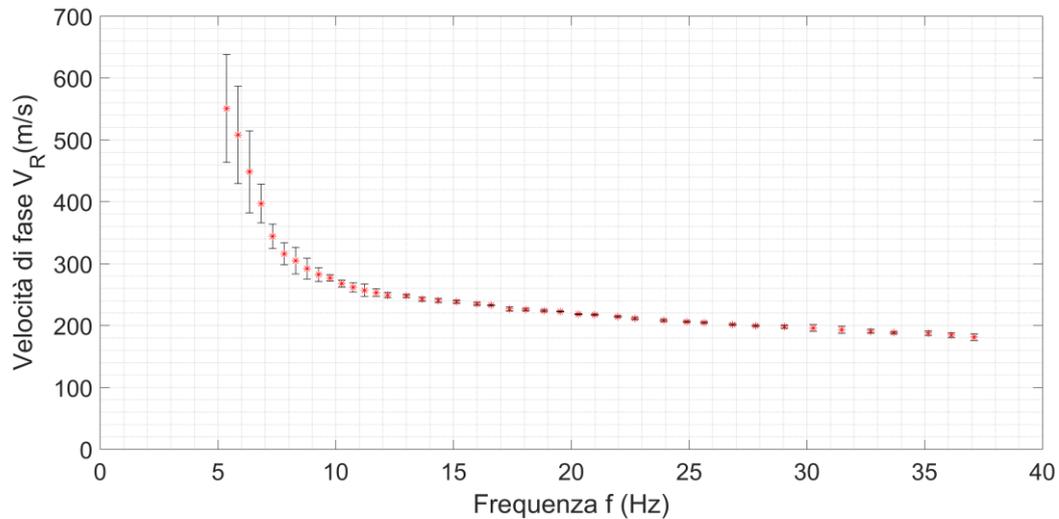


Figura 15. Curva di dispersione – Sito di Roccafluvione

- Rotella

L'interpretazione dei dati sperimentali delle prove MASW eseguite per il comune di Rotella ha portato all'identificazione di due distinte curve di dispersione, dipendenti dalle due configurazioni di esecuzione delle prove:

- configurazione 1: energizzazione a destra dello stendimento di geofoni;
- configurazione 2: energizzazione a sinistra dello stendimento di geofoni.

Le curve non sovrapposte ottenute sono sintomo di presenza di variazioni laterali; in questo modo si conferma una disomogeneità del deposito e la non validità dell'ipotesi di strati piani e paralleli. Si illustra in *Figura 16* la curva di dispersione più rappresentativa del deposito.

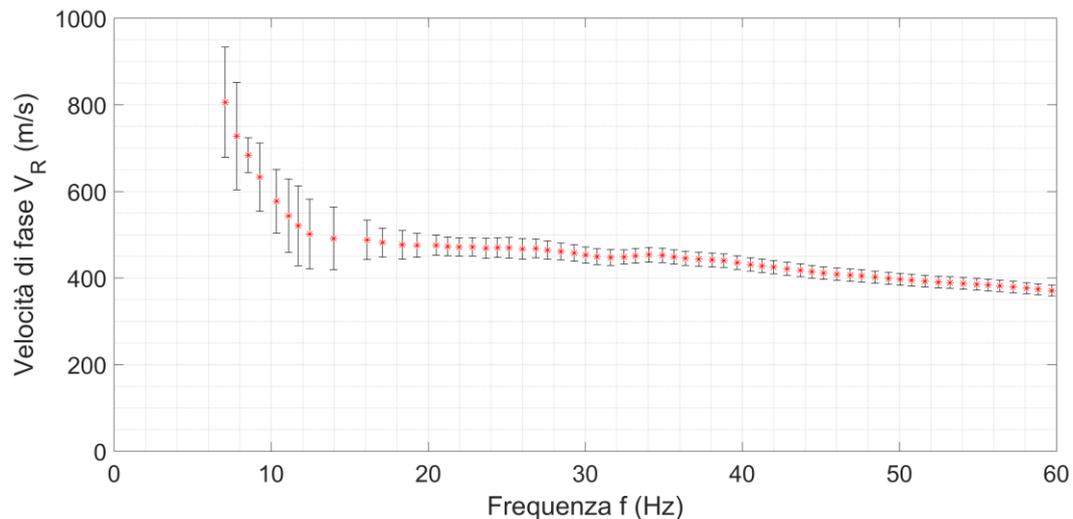


Figura 16. Curva di dispersione – Sito di Rotella

- San Severino Marche

Per il sito di San Severino Marche sono state eseguite due prove MASW differenti.

In *Figura 17* si distinguono le due curve di dispersione ottenute dall'analisi dei dati sperimentali acquisiti dalle prove ad onde superficiali:

- prova MASW-1: curva di dispersione in grigio;
- prova MASW-2: curva di dispersione in rosso.

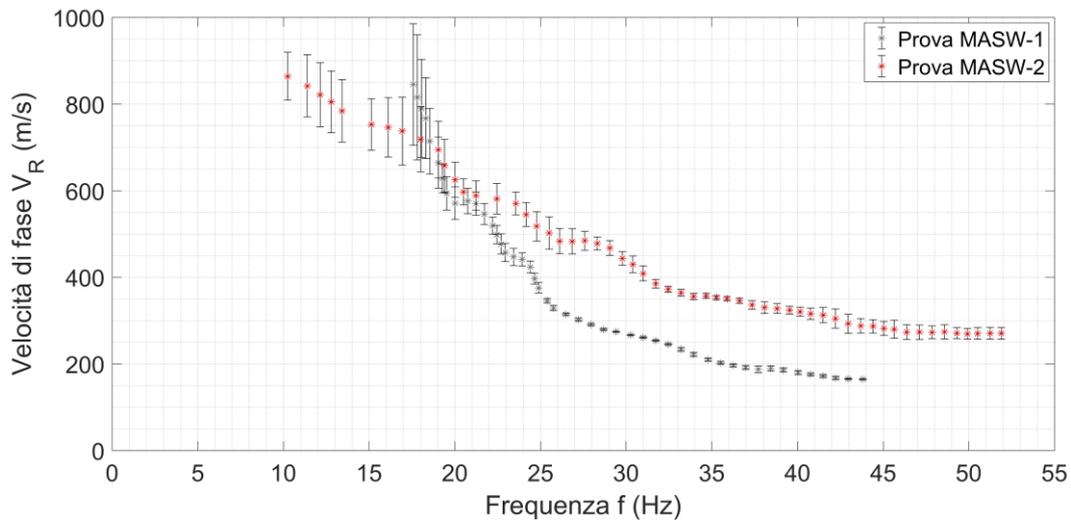


Figura 17. Curve di dispersione per le prove MASW-1 e MASW-2 – Sito di San Severino Marche

- Venarotta

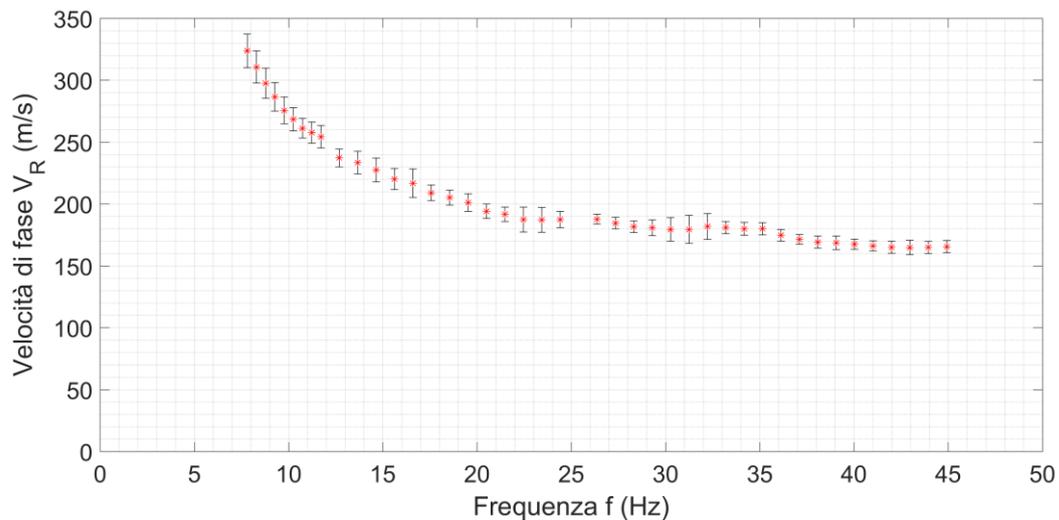


Figura 18. Curva di dispersione – Sito di Venarotta

3.3 Processo di inversione

Per procedere con la risoluzione del problema inverso, le curve di dispersione sono state opportunamente campionate, in modo tale da:

- ottenere un numero maggiore di punti alle basse frequenze, utili alle indagini più in profondità, dove normalmente si ha un grado di incertezza modesto;
- ottenere un numero minore di punti alle alte frequenze, la cui informazione è relativa a strati superficiali e risulta più affidabile;
- permettere un processo di inversione non troppo lungo.

Le inversioni delle curve di dispersione, non oggetto della presente tesi, sono state processate in MATLAB tramite il metodo stocastico Monte Carlo per ogni singolo comune.

Per ulteriori approfondimenti, si rimanda alla tesi di dottorato: Passeri F. (2019), *Development of advanced geostatistical models of shear wave velocity profiles to account for uncertainties and variabilities in Ground Response Analyses*.

Capitolo 4 - Prove HVSR, inversioni congiunte ed analisi di risposta sismica locale per il comune di San Severino Marche

In aggiunta alle prove MASW precedentemente analizzate e discusse, sono state eseguite delle prove HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) per il comune di San Severino Marche. Nello specifico, ci si propone di analizzare i dati acquisiti durante l'esecuzione di n° 3 prove HVSR e di valutare come poter utilizzare le informazioni estrapolate dall'interpretazione dei risultati.

4.1 Interpretazione dei dati sperimentali di prove HVSR

4.1.1 Generalità ed esecuzione prove HVSR

In questo caso ci si propone di usare i dati sperimentali delle prove HVSR come informazione aggiuntiva alle basse frequenze, per poter investigare maggiori profondità rispetto a quelle indagate dalle prove MASW e, quindi, vincolando maggiormente le inversioni delle sole curve di dispersione.

Il metodo H/V (*Horizontal/Vertical*) o *metodo di Nakamura* si basa sull'analisi dell'ampiezza delle componenti spettrali del campo di vibrazioni ambientali, misurato nelle tre direzioni spaziali. Nella pratica, i dati sperimentali sono acquisiti nel dominio del tempo da un geofono tri-dimensionale a bassa frequenza. Successivamente, i segnali vengono trasferiti nel dominio delle frequenze e si calcolano i rapporti spettrali tra la composizione delle componenti orizzontali e la componente verticale (*Nakamura, 1989*). Le ipotesi su cui si basa il metodo sono spiegate di seguito:

- i microtremori sono costituiti da onde di volume provenienti dal sottosuolo;
- al basamento il rapporto tra la componente orizzontale e quella verticale è pari a 1;
- al passaggio nei depositi superficiali, le componenti orizzontali (onde S) sono amplificate, mentre la componente verticale (onde P) non è amplificata nella banda di frequenza di interesse;
- se il rumore contiene onde superficiali, il rapporto tra componenti H (*Horizontal*) e V (*Vertical*) è strettamente connesso all'ellitticità delle onde di Rayleigh.

Si elaborano in maniera grafica le curve H/V (Figura 19), i cui massimi sono legati alle frequenze di risonanza del terreno. La frequenza alla quale si ha il picco è prossima alla frequenza di risonanza del deposito di terreno.

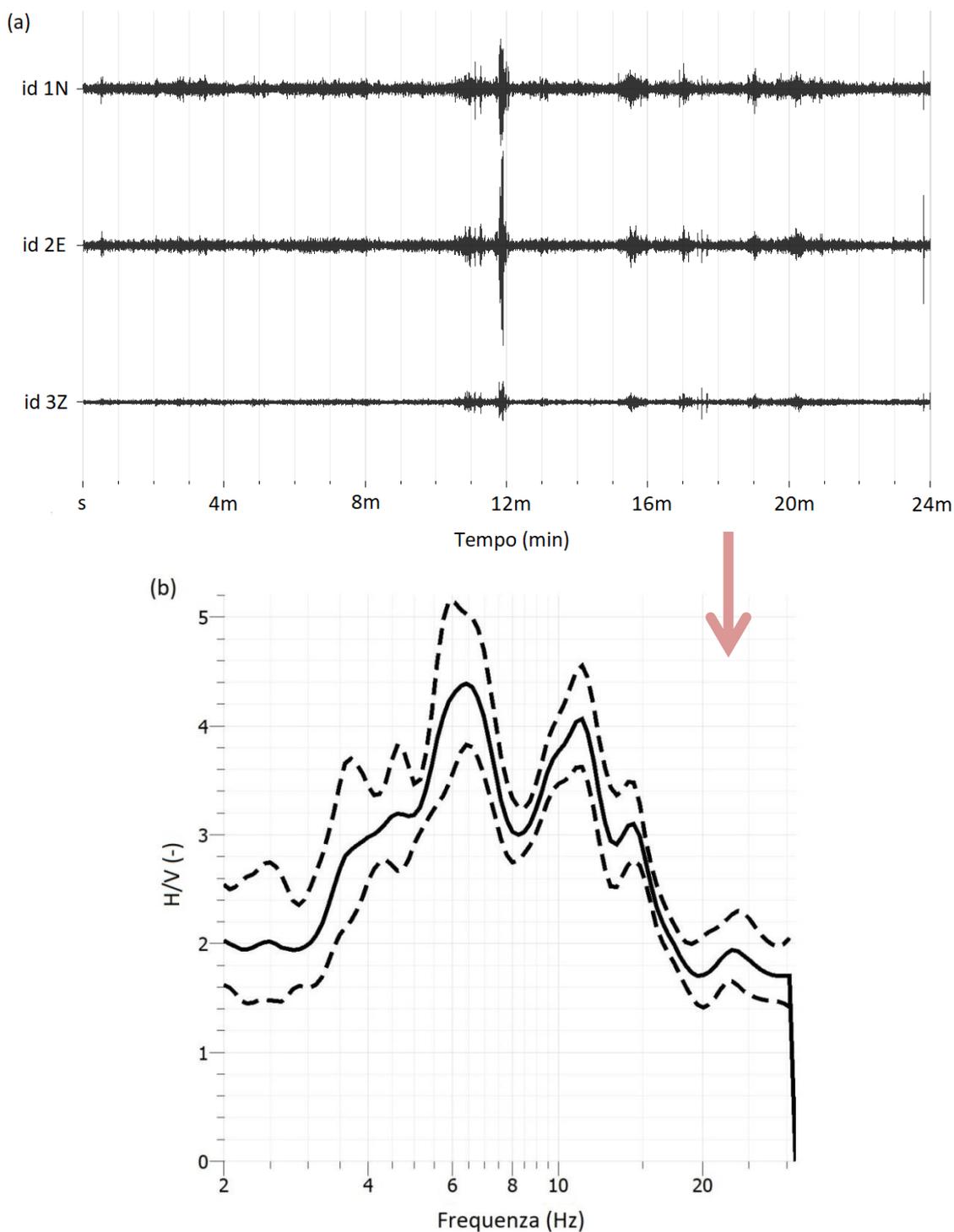


Figura 19. Esempio di applicazione del metodo H/V. In figura (a) le tre componenti del segnale acquisito; in figura (b) la curva H/V (curva media e curve di confidenza) – Sito di San Severino Marche (prova HVSR-2)

Le procedure di esecuzione e le fasi di interpretazione delle prove HVSR vengono dettagliatamente descritte in un documento estratto dal *SESAME European Project (European Site Effect Assessment using Ambient Excitations project)*.

Nel caso in esame per il sito di San Severino Marche sono state eseguite 3 prove HVSR:

- HVSR-1: distante rispetto la zona investigata da prove MASW;
- HVSR-2, HVSR-3: prove effettuate in corrispondenza rispettivamente degli stendimenti delle prove MASW-1 e MASW-2.

L'ubicazione delle prove (HVSR e MASW) è stata aggiunta agli elaborati grafici, allegati della *Relazione Geologica e Geotecnica* che si ha a disposizione per il sito di San Severino Marche. Tale documento è stato redatto in occasione della riparazione dei danni e miglioramento sismico della Torre Smeducci per la ricostruzione post sisma dopo l'evento sismico del 1997.

La relazione include i dettagli relativi alle campagne di indagine del 1999 e propone il confronto delle informazioni acquisite con quelle ottenute dalle precedenti indagini geologiche (anni 1979 e 1992). Le fasi fondamentali per la caratterizzazione geologica e meccanica del deposito di terreno sono di seguito elencate:

- reperimento dei dati delle precedenti indagini ed inquadramento geologico;
- n° 10 sondaggi geognostici eseguiti con perforazioni a carotaggio continuo;
- prove SPT effettuate nei fori di sondaggio;
- installazione di piezometri per il controllo della falda freatica;
- installazione di inclinometri ed estensimetri per il monitoraggio dei movimenti.

(tratto da *Relazione Geologica e Geotecnica per il comune di San Severino Marche, 1999*)

Nell'elaborato di tesi si rimanderà più volte a questa relazione, utilizzata come supporto nell'interpretazione dei dati sperimentali acquisiti dalla campagna di indagine attuale (2017).

In *Figura 20* sono evidenziati in rosso gli stendimenti delle prove MASW-1 e MASW-2 eseguite ed in blu si identificano i punti di acquisizione dei dati per le prove HVSR-2 e HVSR-3.

Si riporta inoltre la sezione litostratigrafica C-D (*Figura 21*), che ricostruisce la stratigrafia del deposito di terreno.

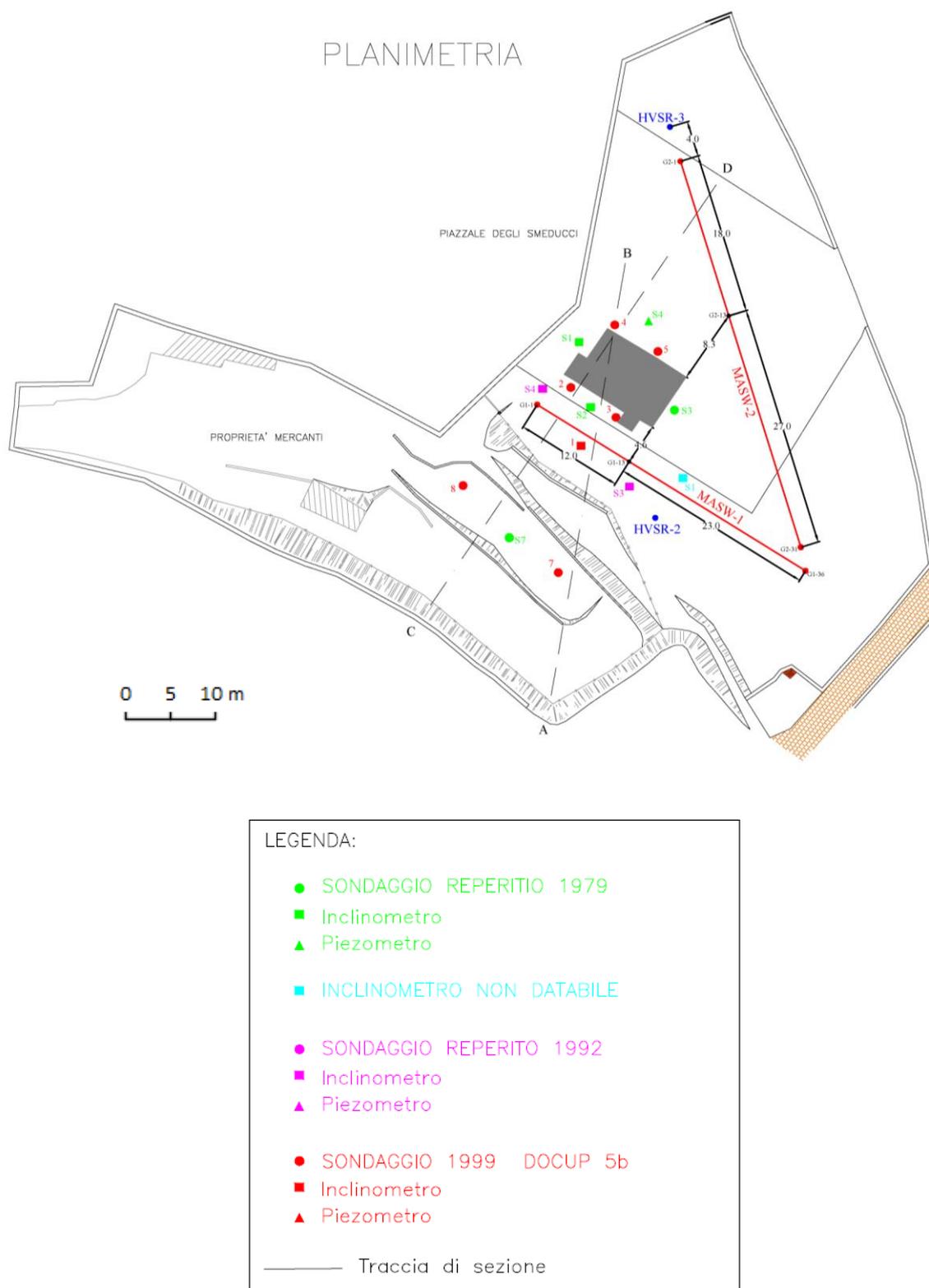


Figura 20. Estratto dalla Relazione Geologica e Geotecnica - Planimetria. Nel dettaglio: disposizione stendimenti MASW-1 e MASW-2 e punti di acquisizione prove HVSR-2 e HVSR-3

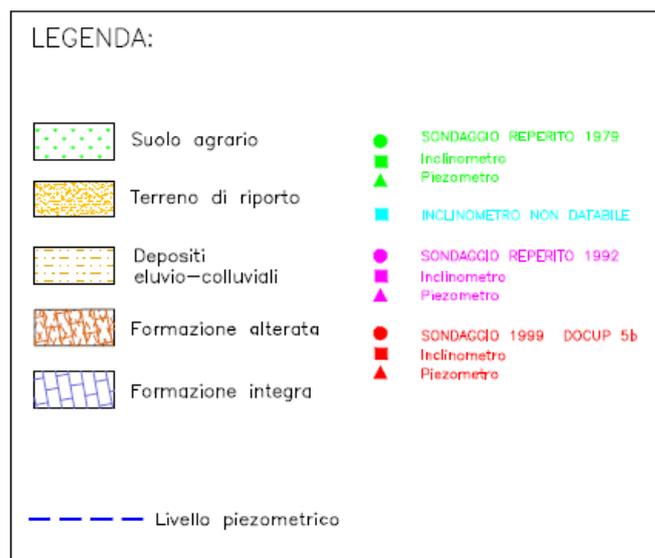
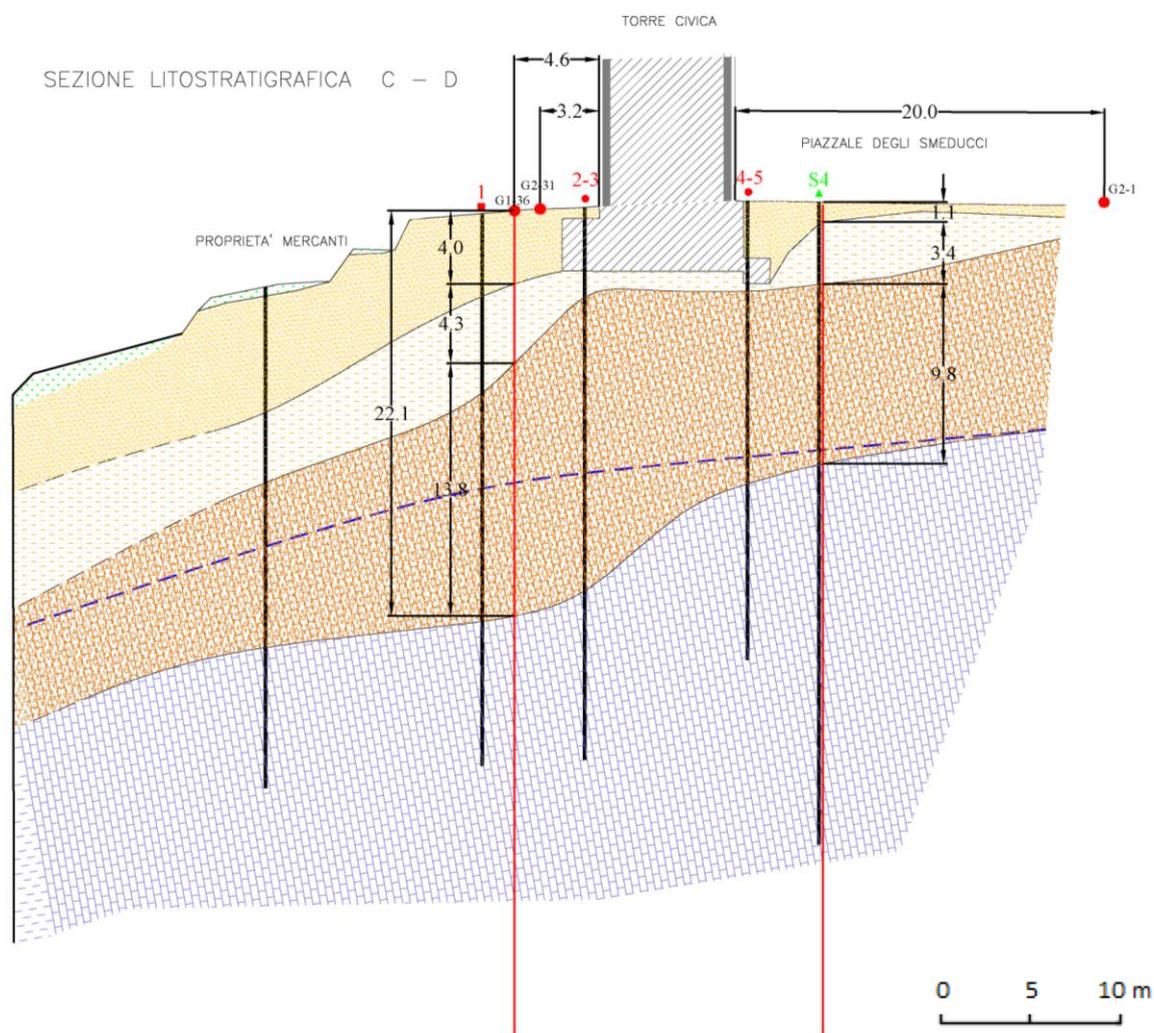


Figura 21. Estratto dalla Relazione Geologica e Geotecnica - Sezione litostратigrafica C-D

I segnali sono stati registrati con dispositivi triassiali a frequenza propria pari a 2 Hz. Nelle *Tabelle 3, 4 e 5* sono illustrate le caratteristiche di esecuzione delle prove HVSR.

ID	Componente	Tempo di riferimento	Frequenza di campionamento	Δt	n° campioni	Durata
HVSR-1_h1	North	18/10/2017	62.5 Hz	0.016 s	90000	24 m
HVSR-1_h2	East	18/10/2017	62.5 Hz	0.016 s	90000	24 m
HVSR-1_z	Vertical	18/10/2017	62.5 Hz	0.016 s	90000	24 m

Tabella 3. Informazioni relative all'esecuzione prova HVSR-1

ID	Componente	Tempo di riferimento	Frequenza di campionamento	Δt	n° campioni	Durata
HVSR-2_h1	North	18/10/2017	62.5 Hz	0.016 s	90000	24 m
HVSR-2_h2	East	18/10/2017	62.5 Hz	0.016 s	90000	24 m
HVSR-2_z	Vertical	18/10/2017	62.5 Hz	0.016 s	90000	24 m

Tabella 4. Informazioni relative all'esecuzione prova HVSR-2

ID	Componente	Tempo di riferimento	Frequenza di campionamento	Δt	n° campioni	Durata
HVSR-3_h1	North	18/10/2017	62.5 Hz	0.016 s	75000	20 m
HVSR-3_h2	East	18/10/2017	62.5 Hz	0.016 s	75000	20 m
HVSR-3_z	Vertical	18/10/2017	62.5 Hz	0.016 s	75000	20 m

Tabella 5. Informazioni relative all'esecuzione prova HVSR-3

4.1.2 Analisi dei dati sperimentali di prove HVSR con l'utilizzo del software GEOPSY

In generale, il software *GEOPSY* è utilizzato per l'elaborazione di prove MASW e prove HVSR. In questa trattazione, il programma è stato applicato nell'interpretazione di prove HVSR effettuate per il sito di San Severino Marche.

Si importano nel programma i dati acquisiti, distinti nelle tre componenti North, East e Vertical e si avvia un'analisi spettrale con l'individuazione nei segnali stessi di sottofinestre di campionamento nel rispetto del criterio di stazionarietà (*Figura 22*).

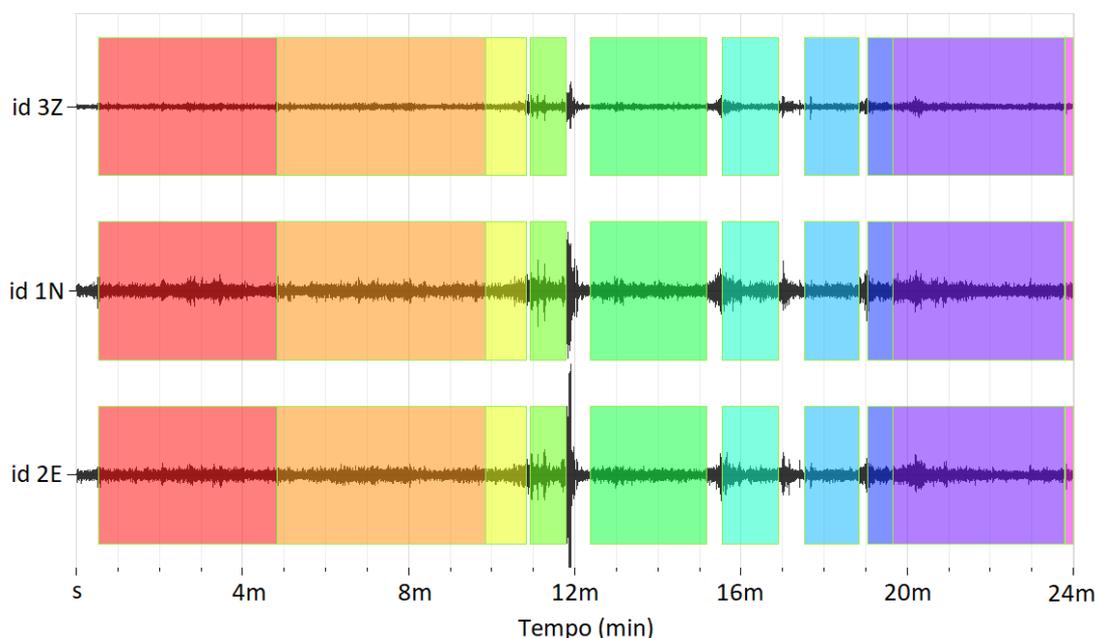


Figura 22. Esempio di individuazione di finestre temporali stazionarie con il software GEOPSY – RegISTRAZIONI per prova HVSR-2 (sito di San Severino Marche)

Il processamento dei dati sperimentali avviene impostando i seguenti parametri:

- Scelta delle lunghezze delle finestre temporali

Si definisce la durata delle finestre temporali di tipo *at least* (durata temporale variabile tra un valore minimo ed un valore massimo), in modo tale da individuare finestre quasi stazionarie e di dimensione variabile.

ID prova	Lunghezza finestre temporali
HVSR-1	10-150 s
HVSR-2	10-300 s
HVSR-3	10-300 s

Tabella 6. Durata delle finestre temporali riferite alle tre prove HVSR eseguite

- Algoritmo anti-trigger

Applicato sia sul segnale grezzo che filtrato e consente di eliminare i transienti energetici dai segnali.

- Scelta del filtro

Si seleziona un filtro *high pass* a 2 Hz, che rimuove tutte le componenti dei segnali con frequenza inferiore alla soglia definita.

- Scelta delle frequenze di campionamento di interesse

Data la frequenza di campionamento pari a 62.5 Hz per le prove in esame, per il *teorema di Nyquist*, la frequenza massima visualizzabile è pari alla metà della frequenza di campionamento:

$$f_{max} = 32.5 \text{ Hz}$$

Il limite inferiore di frequenza invece è scelto sulla base della sensibilità degli strumenti utilizzati:

$$f_{min} = 2 \text{ Hz}$$

L'elaborazione restituisce gli spettri H/V, in cui si visualizzano:

- curva H/V media (linea nera continua);
- curve di confidenza (linee nere tratteggiate), ottenute moltiplicando e dividendo il rapporto H/V medio con la deviazione standard dei valori delle singole curve H/V;
- curve H/V colorate, corrispondenti a ogni finestra stazionaria;
- banda grigia, che evidenzia la frequenza fondamentale f_0 della curva H/V media.

(In riferimento alle *Figure 24, 25 e 26*)

4.1.3 Criteri di SESAME: attendibilità ed affidabilità delle prove H/V

Come precedentemente esposto, le linee guida di esecuzione ed interpretazione delle indagini HVSR sono enunciate nel documento ufficiale *SESAME H/V User Guidelines*.

Sulla base delle raccomandazioni empiriche presenti, si effettua un'analisi statistica della qualità dei dati sperimentali delle prove HVSR. Nel caso in cui i criteri non siano rispettati, questo non soddisfacimento non esclude necessariamente l'utilizzo dei dati sperimentali delle prove. In questo caso, i criteri diventano utili nella valutazione dell'efficacia delle indagini stesse in termini geofisici.

In *Figura 23* si illustrano i criteri da applicare, distinti rispettivamente in:

- *Criteri di affidabilità della curva H/V*: affidabilità della curva nella sua totalità e correttezza nella scelta delle finestre temporali;
- *Criteri di chiarezza del picco H/V*: da valutare rispetto le frequenze circostanti la f_0 e sia in termini di stabilità nei rapporti H/V delle relative finestre.

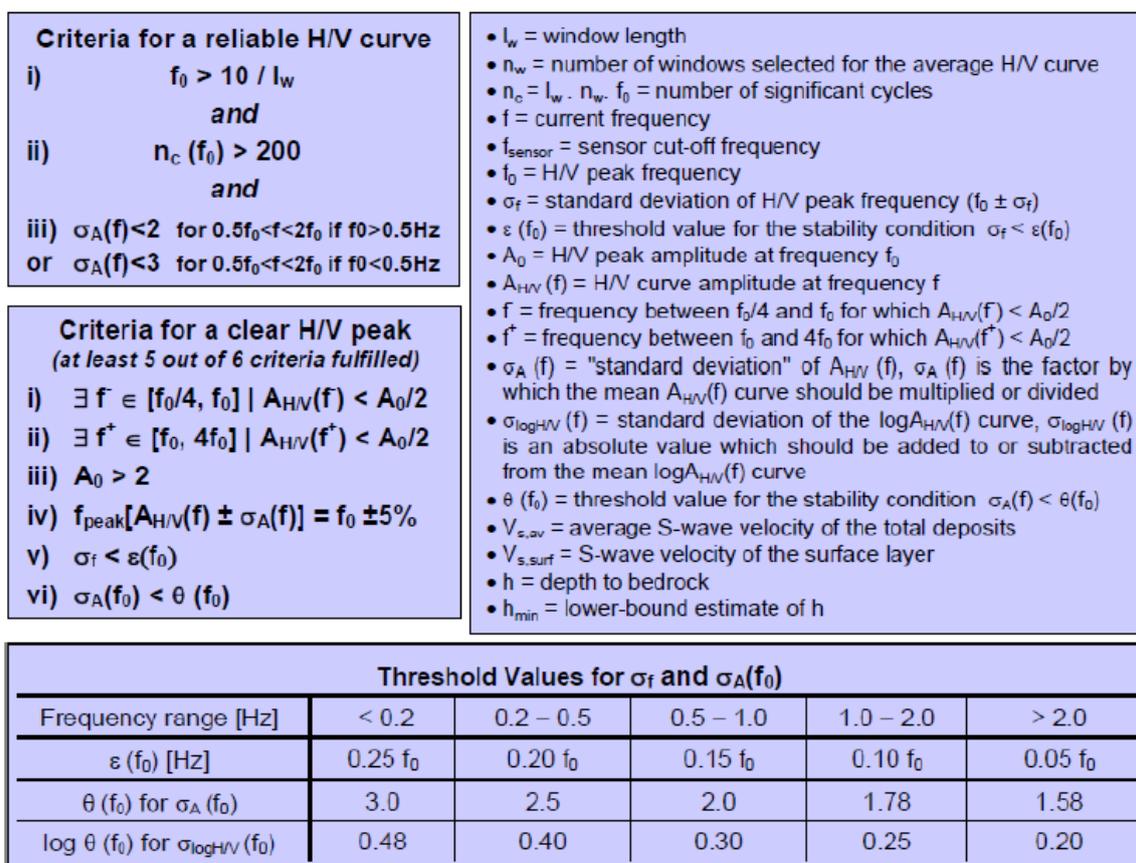


Figura 23. Criteri di SESAME – Estratto dal documento *SESAME H/V User Guidelines*

4.1.3.1 Interpretazione prova HVSR-1

La prova HVSR-1 è stata eseguita in un punto distante dalla zona indagata dalle prove MASW (*Paragrafo 4.1*), motivo per cui le informazioni tratte dai dati sperimentali sono state trascurate nelle analisi successive.

A conferma di questa scelta, inoltre, i dati acquisiti ed importati in *GEOPSY* non mostrano un picco distinguibile nel grafico $(H/V, f)$, rappresentato in *Figura 24*: lo spettro H/V risulta mediamente piatto e quindi non attendibile.

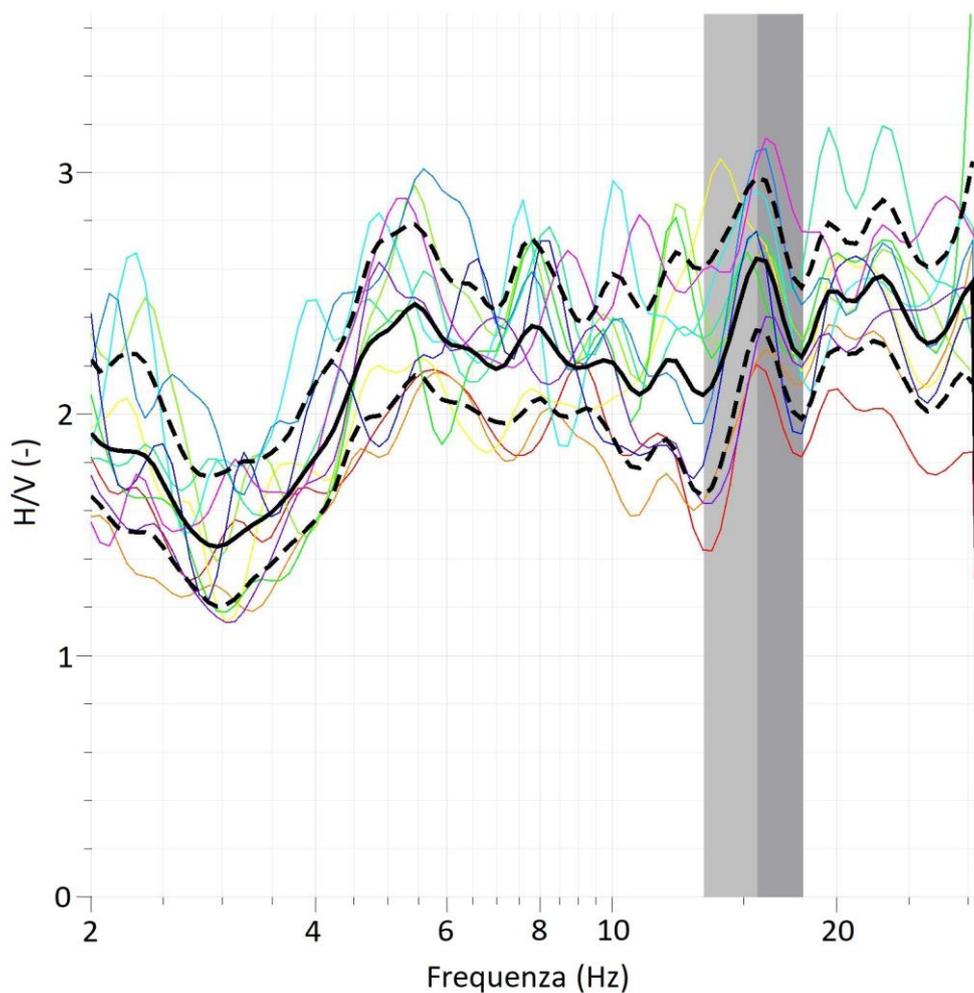


Figura 24. Curva H/V - Prova HVSR-1

Si verifica comunque la non affidabilità statistica dei dati sperimentali della prova HVSR-1 tramite l'applicazione dei criteri di SESAME (*Tabella 7*).

PROVA	HVSR-1
f_0	15.61 Hz
n_w	11

Criteri di affidabilità della curva H/V	Valore misurato	Valore soglia	Verifica
$f_0 > 10/l_w$	15.61	1	SI
$n_c(f_0) > 200$	20007	200	SI
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ o $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	-	-	SI

Criteri di chiarezza del picco della curva H/V	Valore misurato	Valore soglia	Verifica
$\exists f \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	-	-	NO
$\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	-	-	NO
$A_0 > 2$	2.64	2	SI
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	-	[15.56; 15.66]	NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	2.39	0.78	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.13	1.58	SI

Tabella 7. Applicazione criteri di SESAME per la prova HVSR-1

4.1.3.2 Interpretazione prova HVSR-2

La curva H/V della prova HVSR-2 (*Figura 25*) mette in evidenza due picchi significativi: il primo abbastanza distinto in corrispondenza della frequenza media di 6.42 Hz, il secondo picco più basso in termini di ampiezza individuato ad una frequenza di circa 11 Hz.

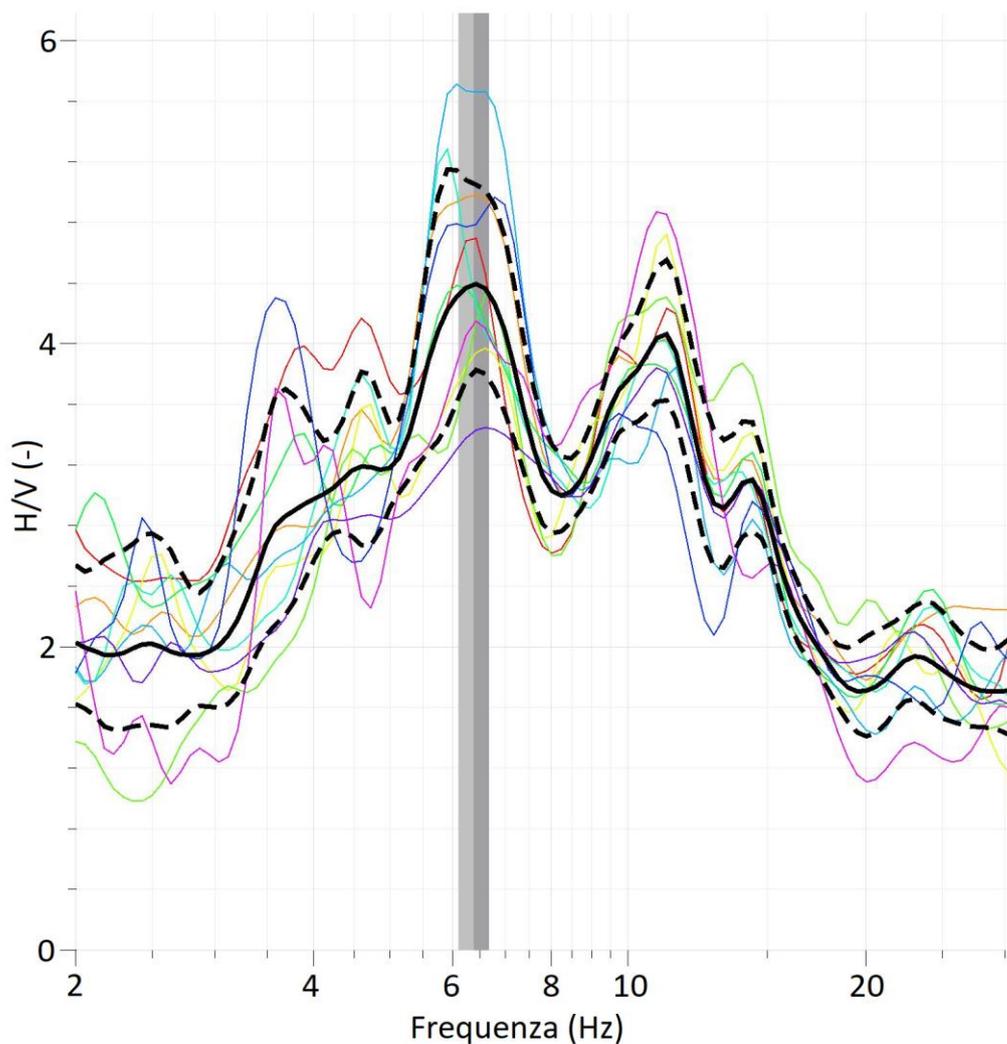


Figura 25. Curva H/V - Prova HVSR-2

Si verifica come il dato sperimentale della prova HVSR-2 soddisfi i criteri di SESAME (*Tabella 8*).

PROVA	HVSR-2
f_0	6.42 Hz
n_w	10

Criteri di affidabilità della curva H/V	Valore misurato	Valore soglia	Verifica
$f_0 > 10/l_w$	6.42	1	SI
$n_c(f_0) > 200$	8294	200	SI
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ o $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	-	-	SI

Criteri di chiarezza del picco della curva H/V	Valore misurato	Valore soglia	Verifica
$\exists f \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	-	-	SI
$\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	-	-	SI
$A_0 > 2$	4.39	2	SI
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	-	[6.37; 6.47]	NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.28	0.32	SI
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.15	1.58	SI

Tabella 8. Applicazione criteri di SESAME per la prova HVSR-2

4.1.3.3 Interpretazione prova HVSR-3

La prova HVSR-3 restituisce la curva H/V rappresentata in *Figura 26*. Esso mostra un picco alla frequenza di 4.86 Hz.

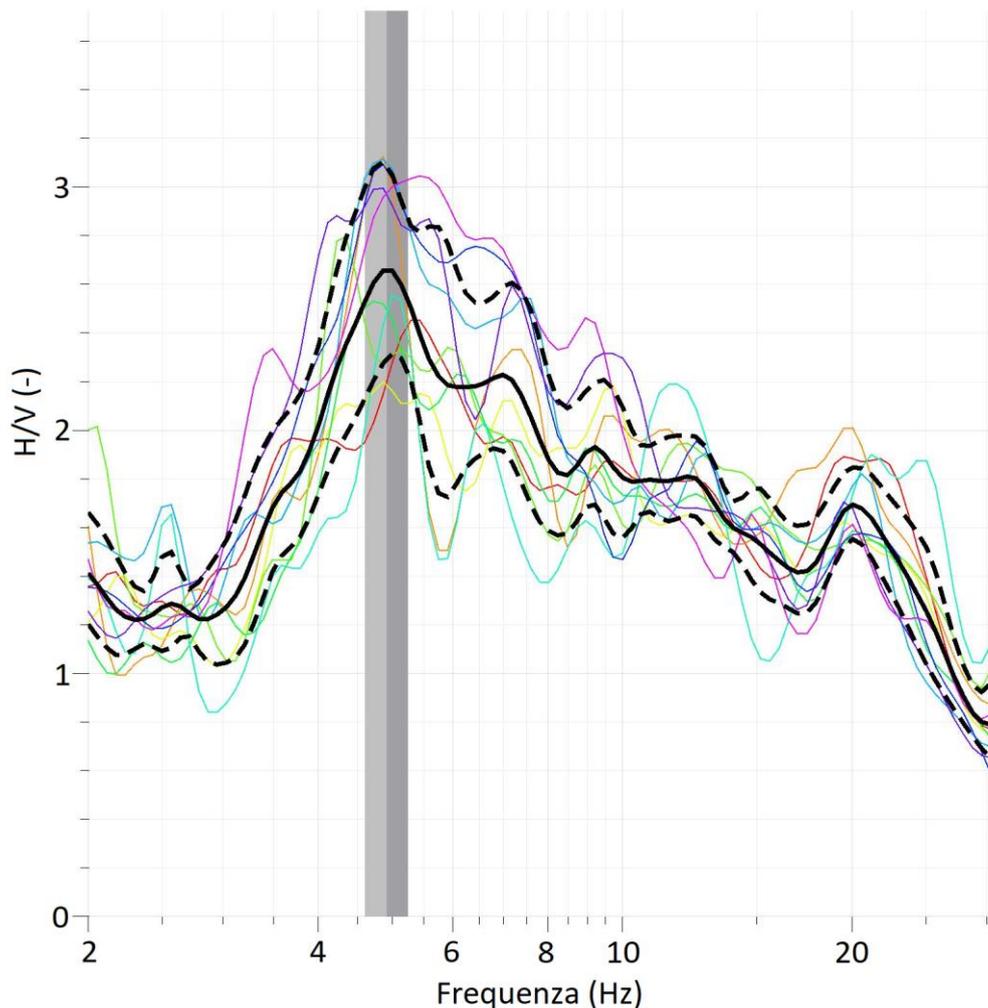


Figura 26. Curva H/V – Prova HVSR-3

Il dato sperimentale della prova HVSR-3 non soddisfa completamente i criteri di SESAME in termini di chiarezza del picco H/V, nonostante allo stesso tempo risulti abbastanza affidabile statisticamente (*Tabella 9*).

PROVA	HVSR-3
f_0	4.86 Hz
n_w	10

Criteri di affidabilità della curva H/V	Valore misurato	Valore soglia	Verifica
$f_0 > 10/l_w$	4.86	1	SI
$n_c(f_0) > 200$	4905	200	SI
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ o $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	-	-	SI

Criteri di chiarezza del picco della curva H/V	Valore misurato	Valore soglia	Verifica
$\exists f \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	-	-	SI
$\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	-	-	NO
$A_0 > 2$	2.66	2	SI
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	-	[4.81; 4.91]	NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.32	0.24	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.17	1.58	SI

Tabella 9. Applicazione criteri di SESAME per la prova HVSR-3

Dopo aver effettuato le osservazioni relative alla qualità dei dati sperimentali delle prove HVSR eseguite in sito a San Severino Marche, si vuole verificare come le curve di ellitticità H/V ottenute possano validare e migliorare il modello del deposito di terreno in esame.

In definitiva, si vuole unire l'informazione ottenuta dall'inversione della sola curva di dispersione con ciò che rileva la curva di ellitticità.

Nell'ipotesi di onde superficiali predominanti nel campo d'onda, si invertono in maniera congiunta la curva di ellitticità sperimentale (nello svolgimento della tesi si farà riferimento alla curva H/V relativa alla prova HVSR-2) e le curve di dispersione sperimentale (*Paragrafo 3.2*), per stimare un andamento delle velocità delle onde di taglio Vs più completo ed affidabile ad elevate profondità.

4.2 Processo di inversione

Esistono diversi metodi numerici che permettono di eseguire il processo di inversione.

Il principio fondamentale su cui essi si basano è relativo alla ricerca di una soluzione numerica, tale da rappresentare al meglio il dato sperimentale in ingresso (*Paragrafo 2.2.3*).

Nella seguente trattazione si accenna al metodo di inversione stocastico Monte Carlo, implementato in MATLAB, e si affronta più nel dettaglio il processo di inversione eseguito in DINVER, programma che sfrutta un altro tipo di algoritmo.

Per il sito di San Severino Marche si hanno a disposizione i dati sperimentali delle due prove MASW (di cui si è discusso precedentemente), eseguite nei dintorni della Torre degli Smeducci. Si ripropone in *Figura 27* lo stralcio planimetrico, utile all'identificazione degli stendimenti in questione.

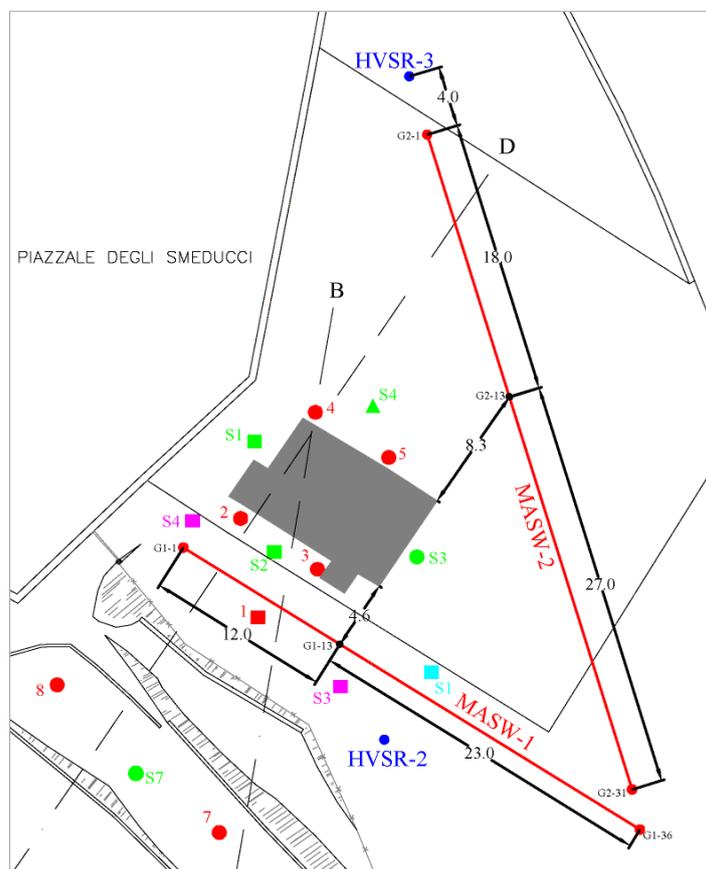


Figura 27. Dettaglio planimetrico del posizionamento degli stendimenti per le prove MASW-1 e MASW-2 (in rosso)

Per le successive elaborazioni, si ipotizza di utilizzare la curva di dispersione della prova MASW-2 (*Paragrafo 3.2*); tale prova è caratterizzata da uno sviluppo diagonale in pianta con una stesa di 31 geofoni verticali e, rispetto alla prova MASW-1, risulta essere più descrittiva

del deposito in esame. Il dato sperimentale della prova MASW-2 riporta informazioni aggiuntive alle basse frequenze nei confronti della curva di dispersione della prova MASW-1. Questo è un aspetto favorevole nei riguardi della profondità di indagine della prova, evidentemente maggiore per la prova MASW-2.

Il processo di inversione della curva di dispersione della prova MASW-2 per il sito di San Severino Marche è stato inizialmente eseguito con il metodo stocastico Monte Carlo, implementato in MATLAB.

A partire da una parametrizzazione di riferimento, l'algoritmo Monte Carlo ha generato 400000 modelli ed ha successivamente restituito un set di soluzioni (di cui 16978 modelli accettati), che risultano geofisicamente equivalenti ai dati sperimentali acquisiti.

Si riporta in *Figura 28* l'insieme di profili di velocità delle onde di taglio V_s , ognuno dei quali associato ad un diverso valore di misfit, che definisce il grado di corrispondenza dei risultati con la realtà. Si rimanda al *Paragrafo 4.2.1* per la definizione analitica della funzione di misfit.

La totalità dei profili è stata ottenuta dall'assemblaggio dei risultati di due inversioni distinte:

- la prima inversione condotta a parametrizzazione fissata su tre layer;
- la seconda inversione condotta con una parametrizzazione più fitta, eliminando il vincolo sul numero di strati (condizione con un grado di libertà in più).

La soluzione migliore, quindi a minimo misfit, è tracciata in rosso ed individua un bedrock sismico alla profondità di circa 15 m e che raggiunge una velocità V_s di circa 1100 m/s.

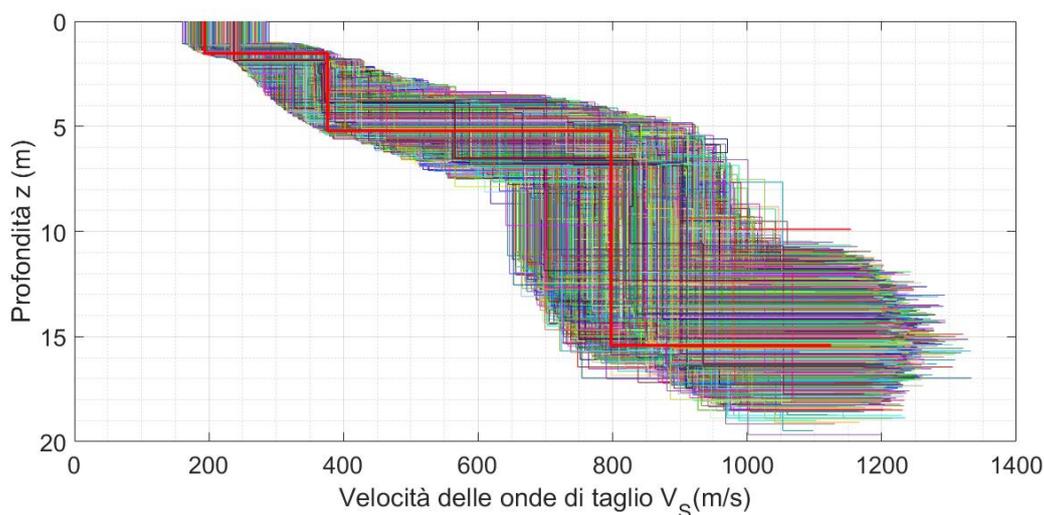


Figura 28. Profili di velocità delle onde di taglio V_s (per i 16978 modelli accettati) ottenuti per processo di inversione secondo metodo Monte Carlo implementato in MATLAB. In rosso si individua la soluzione a minimo misfit

4.2.1 Algoritmo di inversione “*Neighbourhood Algorithm*”

Il processo di inversione è stato successivamente effettuato tramite il codice di calcolo DINVER, applicazione interna al pacchetto *GEOPSY*, che implementa il metodo stocastico “*Neighbourhood Algorithm*” nella ricerca di modelli del terreno rappresentativi della realtà (Wathelet, M., D. Jongmans, and M. Ohrnberger (2004), *Surface wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements*).

Questo algoritmo, sviluppato da *Sambridge (1999)*, investiga l’intero spazio di parametri e ne ricerca quel set che garantisce una funzione di misfit (funzione di disaccordo, errore) minima tra il dato sperimentale e quello numerico.

In definitiva la ricerca della soluzione avviene sulla base del valore della funzione di misfit, che indica quanto il modello generato risulta lontano dalla soluzione reale.

Questa condizione però è necessaria ma non sufficiente nella ricerca della soluzione più coerente con le condizioni reali: è necessario quindi eseguire più inversioni, variando i parametri di stabilizzazione dell’algoritmo e valutando quale soluzione possa essere più rappresentativa della realtà stessa.

Il misfit è calcolato come differenza quadratica media tra la velocità x_{di} della curva dei dati sperimentali alla frequenza f_i e la velocità x_{ci} della curva numerica calcolata alla frequenza f_i :

$$misfit = \sqrt{\sum_{i=0}^{n_F} \frac{(x_{di} - x_{ci})^2}{\sigma_i^2 n_F}}$$

dove: σ_i è l’incertezza dei campioni di frequenza considerati;

n_F è il numero di campioni di frequenza considerati.

La robustezza del risultato finale è generalmente definito sull’esecuzione ripetuta di processi di inversione con un diverso numero random di *seeds*, valore intero che inizializza il processo pseudo-random.

La scelta della parametrizzazione si basa sulla definizione del modello stratigrafico tramite l’inserimento di:

- range di variabilità degli spessori degli strati della colonna di terreno; l’aumento del numero di strati non offre una soluzione più precisa, ma permette di esplorare più gradi di libertà;
- range di variabilità della velocità delle onde di volume V_p (parametro);

- range di variabilità del coefficiente di Poisson ν (condizione che definisce un profilo minimo e massimo, tra i quali deve disporsi la soluzione);
- range di variabilità della velocità delle onde di taglio V_S (parametro);
- densità del terreno ρ .

Oltre ai parametri di modello del terreno, si forniscono i parametri di stabilizzazione dell'algoritmo:

- it_{max} : numero di iterazioni
- n_{s0} : numero di modelli random scelti nello spazio dei parametri, da cui far partire l'inversione;
- n_s : numero di modelli da generare ad ogni iterazione;
- n_r : numero di celle con minore errore, dove sono generati gli n_s modelli.

4.2.2 Analisi dei risultati ottenuti da processi di inversione della sola curva di dispersione implementati in software diversi

Ci si propone di confrontare le soluzioni delle inversioni eseguite in MATLAB con i risultati ottenuti dal software DINVER, con lo scopo di validare la metodologia di esecuzione delle inversioni, sfruttando *Neighbourhood Algorithm*.

In *Tabella 10* si definiscono gli input necessari all'inizializzazione del processo di inversione in DINVER.

<i>Input targets</i>	Curva di dispersione sperimentale – da prova MASW-2
<i>Input parameters</i>	Parametri di modello del terreno (V_P , V_S , ρ , ν)
<i>Tuning parameters</i>	$it_{max} = 1000$
	$n_{s0} = 50$
	$n_s = 50$
	$n_r = 50$
	Seed (valore random generato ad ogni inversione)
	Modelli generati = 50050

Tabella 10. Target e parametri per inizializzare il processo di inversione in DINVER

Si mostrano successivamente gli output restituiti dall'inversione e si evince come i parametri rappresentativi del deposito di terreno di partenza descrivano al meglio il comportamento reale in sito. Nei grafici sono state tracciate tutte le soluzioni aventi un misfit minore di 5 e la scala di colori allegata alle figure (*Figure 29 e 30*) supporta la lettura delle immagini. La banda in rosso descrive le soluzioni numeriche più vicine alla curva sperimentale.

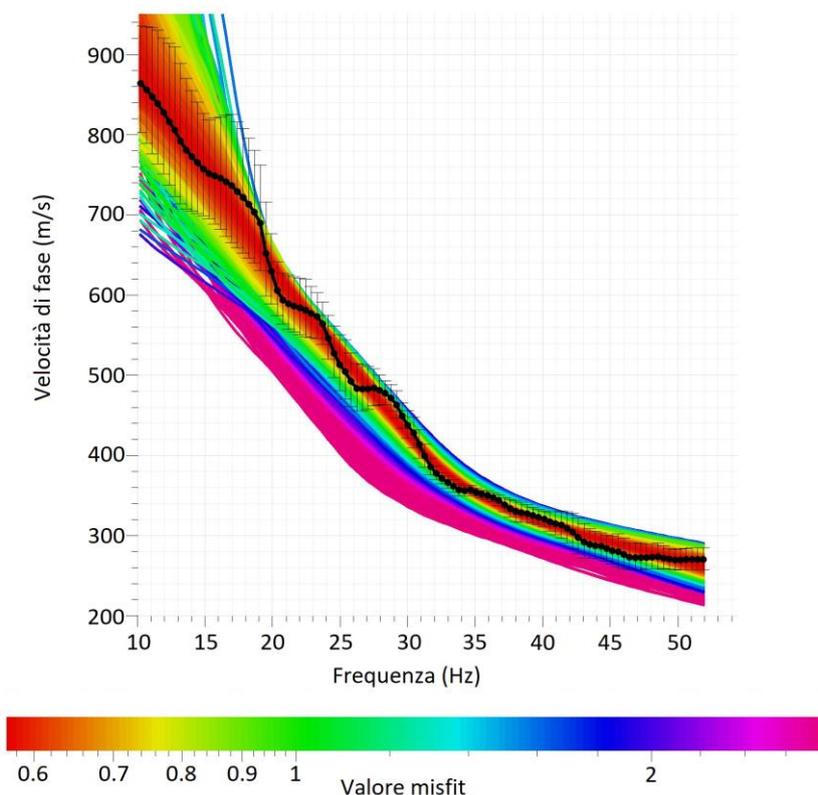


Figura 29. Risultato dell'inversione - Curva di dispersione sperimentale (in nero) e curve di dispersione numeriche a diverso valore di misfit

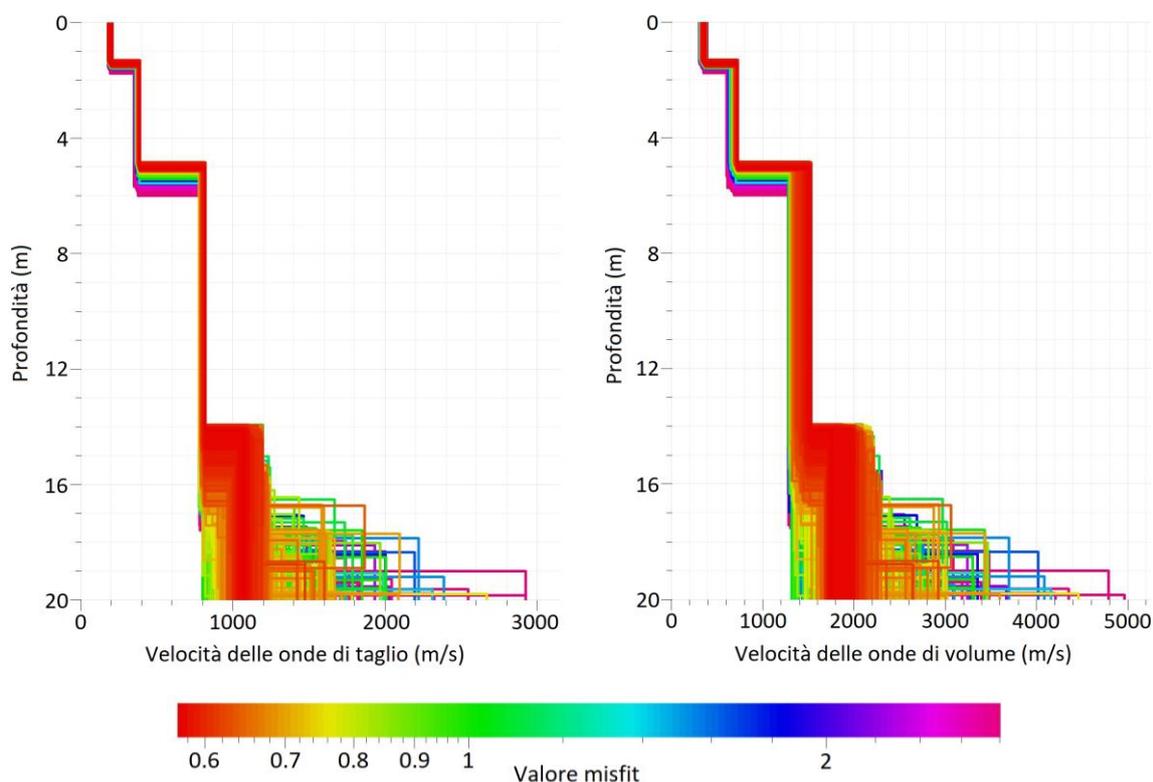


Figura 30. Risultato dell'inversione - A sinistra il profilo di velocità di propagazione delle onde di taglio V_S ; a destra il profilo di velocità di propagazione delle onde di volume V_P (a diverso valore di misfit)

Nel dettaglio si illustrano in *Figura 31* e *32* i risultati dell'inversione, corrispondenti alla condizione di minimo misfit.

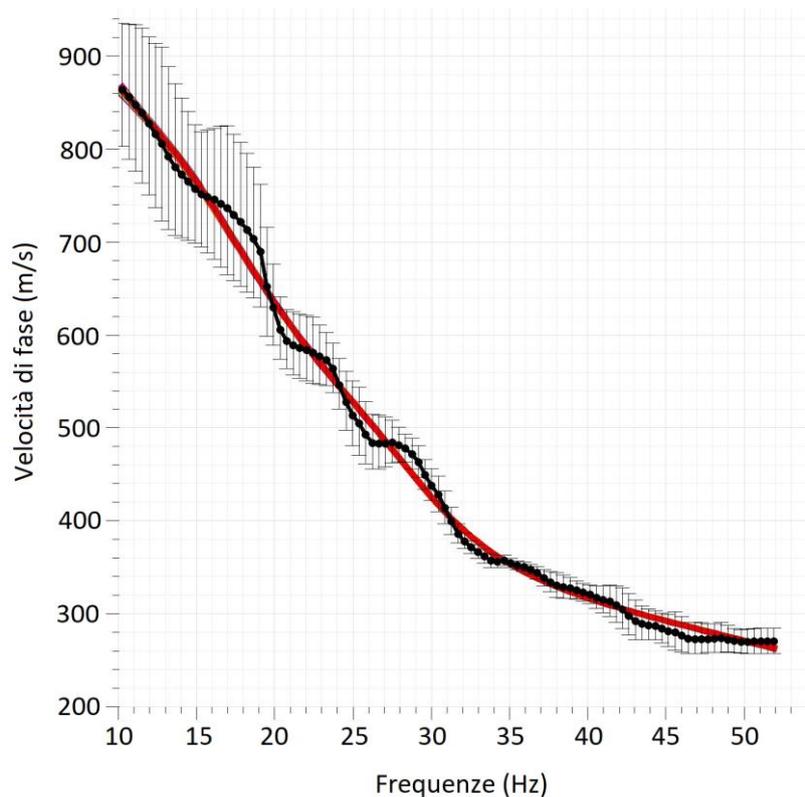


Figura 31. Risultato dell'inversione – Curva di dispersione sperimentale (in nero) e numerica (soluzione a minimo misfit - in rosso)

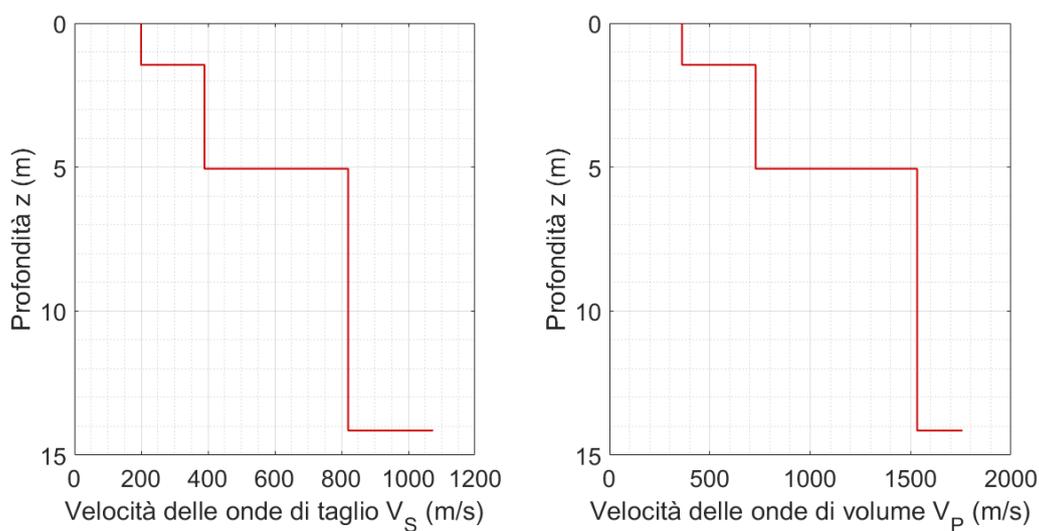


Figura 32. Risultato dell'inversione – A sinistra il profilo di velocità di propagazione delle onde di taglio V_S ; a destra il profilo di velocità di propagazione delle onde di volume V_P (soluzione a minimo misfit)

Dal grafico in *Figura 32* si osserva che, alla profondità di 15 m circa, alla quale è stata precedentemente stimata la posizione del livello di falda tramite i sondaggi geognostici (in riferimento alla *Relazione Geologica e Geotecnica*), la velocità di propagazione delle onde di volume V_P raggiunge i 1500 m/s. Ciò conferma la presenza di falda nel terreno.

Si confrontano in *Figura 33* inoltre i profili di velocità delle onde di taglio restituiti dai due codici di calcolo (MATLAB e DINVER). Nonostante questi ultimi lavorino secondo algoritmi differenti con modalità e tempistiche di elaborazione dati diverse, si evincono risultati praticamente identici.

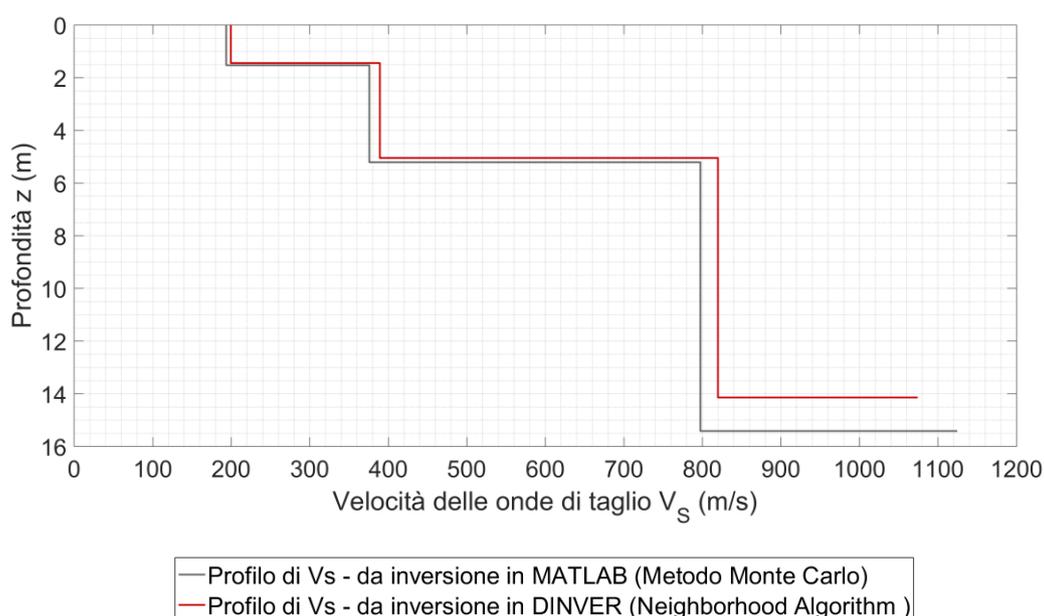


Figura 33. Confronto profili di V_s ottenuti dall'inversione della sola curva di dispersione eseguita con codici di calcolo differenti

4.2.3 Processo di inversione congiunta con il codice di calcolo DINVER

Si procede di seguito con il processo di inversione congiunta, i cui target e parametri di partenza sono illustrati in *Tabella 11*.

<i>Input targets</i>	Curva di dispersione sperimentale – da prova MASW-2
	Curva di ellitticità sperimentale – da prova HVSR-2
<i>Input parameters</i>	Parametri di modello del terreno (V_p , V_s , ρ , ν): stessa parametrizzazione usata per l’inversione della sola curva di dispersione (<i>Paragrafo 6.2.2</i>)
<i>Tuning parameters</i>	$it_{max} = 1000$
	$n_{s0} = 50$
	$n_s = 50$
	$n_r = 50$
	Seed (valore random generato ad ogni inversione)
	Modelli generati = 50050

Tabella 11. Target e parametri per inizializzare il processo di inversione congiunta in DINVER

I parametri di modello del terreno vengono definiti sulla base dell’inversione della sola curva di dispersione fino ai 15 m, per vincolare il modello stesso ed ottenere di conseguenza risultati più attendibili.

Al di sotto dei 15 m, invece, si vuole garantire una variabilità maggiore dei parametri per sondare profondità, possibilmente rilevate dal dato sperimentale della prova HVSR-2.

Il picco di frequenza a 6.42 Hz individuato nella curva di ellitticità della suddetta prova non viene visto da alcuna interfaccia dei profili precedentemente tracciati dal processo di inversione della sola curva di dispersione.

Per quanto concerne l’esecuzione delle inversioni congiunte, si precisa che il target della curva di ellitticità sperimentale è stato opportunamente tagliato al range di frequenze di interesse (da 2 Hz a 8.5 Hz), tenendo in considerazione in questo modo il picco più significativo della curva H/V ($f = 6.42$ Hz).

Si riportano di seguito i risultati delle inversioni congiunte; si mostra l’insieme delle soluzioni al variare del misfit, entrando nel merito di:

- curva di dispersione (*Figura 34*);
- curva di ellitticità (*Figura 35*);
- profili di velocità delle onde di taglio e di volume (*Figura 36*).

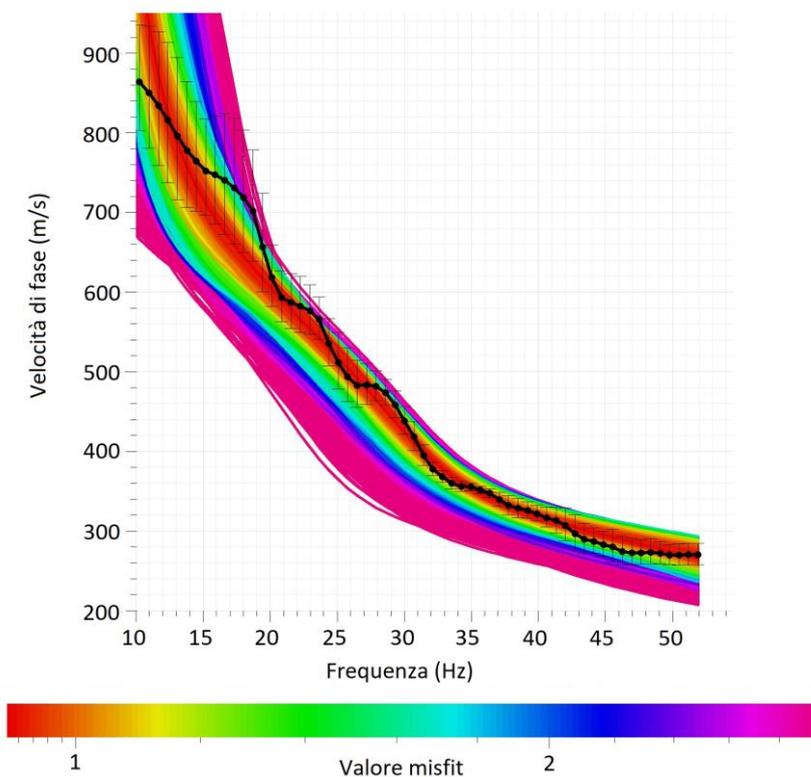


Figura 34. Risultato dell'inversione congiunta - Curva di dispersione sperimentale (in nero) e curve di dispersione numeriche a diverso valore di misfit

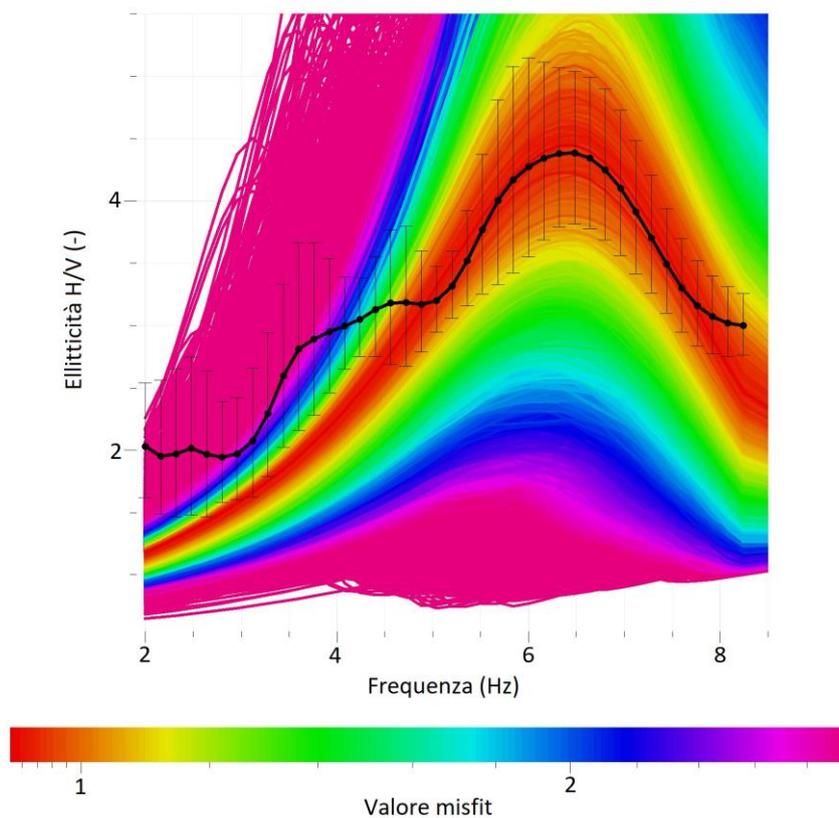


Figura 35. Risultato dell'inversione congiunta - Curva di ellitticità sperimentale (in nero) e curve di ellitticità numeriche a diverso valore di misfit

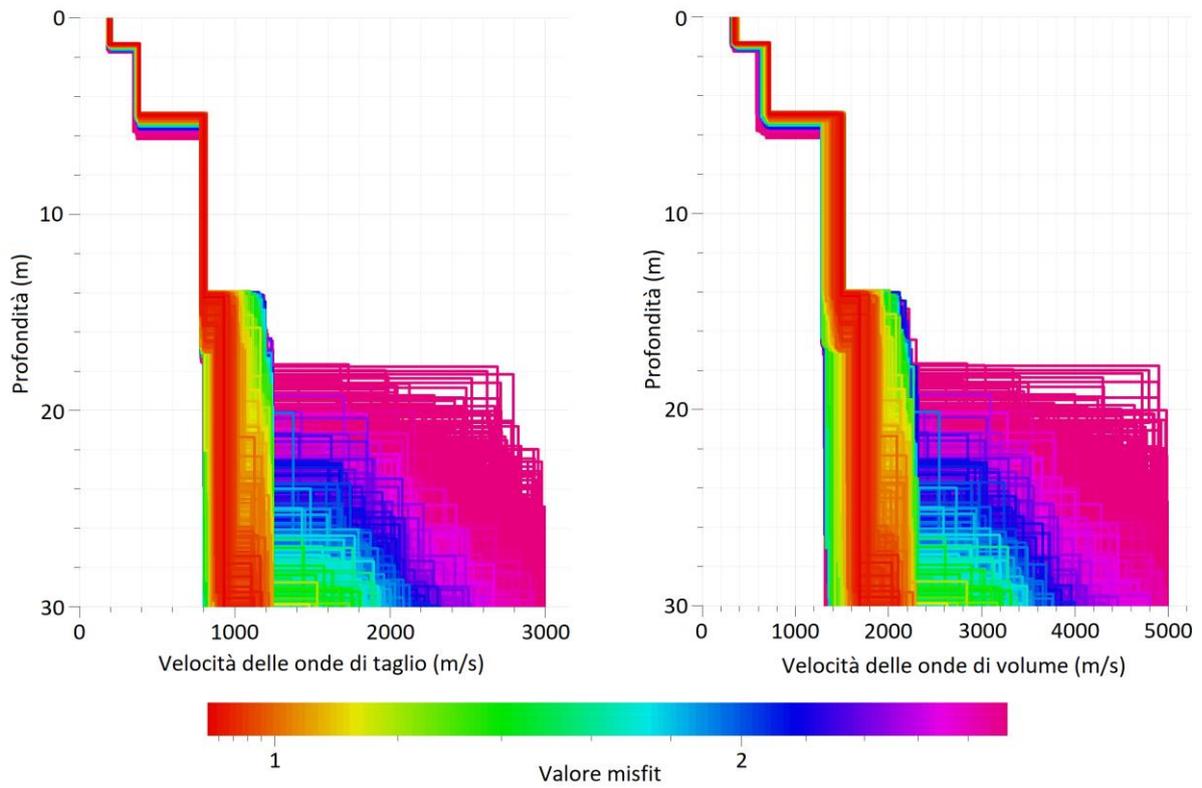


Figura 36. Risultato dell'inversione congiunta - A sinistra il profilo di velocità di propagazione delle onde di taglio V_S ; a destra il profilo di velocità di propagazione delle onde di volume V_P (a diverso valore di misfit)

Nel dettaglio si analizza la migliore soluzione (a minimo misfit).

Si osserva in *Figura 37* come la curva di dispersione numerica (in rosso) alle basse frequenze, principalmente tra i 10 e 20 Hz, non segua il dato sperimentale secondo andamento e concavità. Questo è dovuto al fatto che a tali frequenze si risente dell'influenza del dato sperimentale della curva di ellitticità.

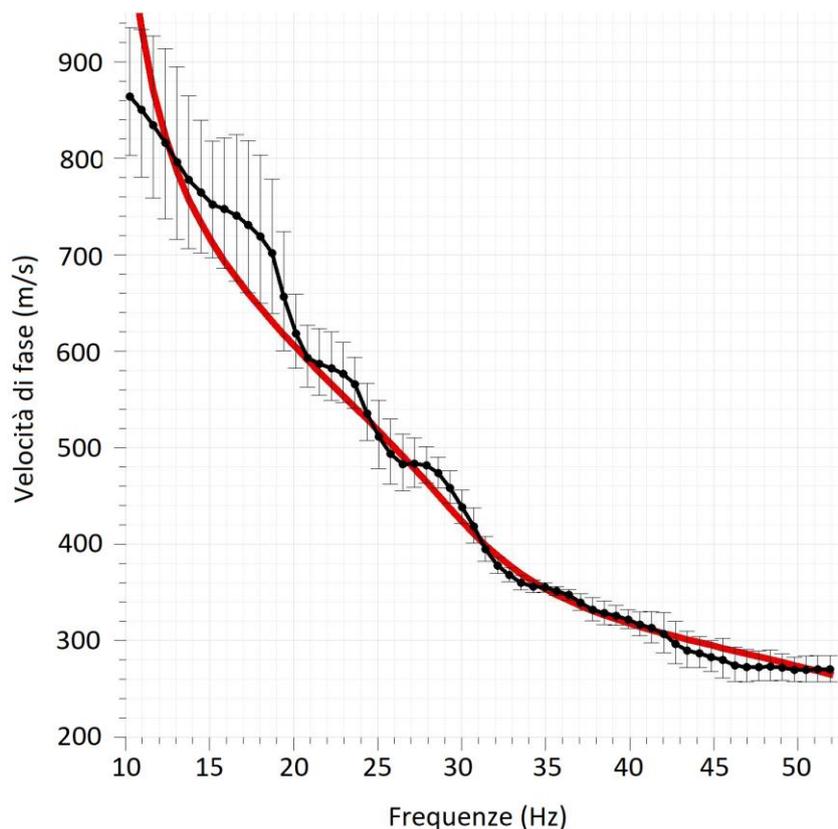


Figura 37. Risultato dell'inversione congiunta - Curva di dispersione sperimentale (in nero) e numerica (soluzione a minimo misfit - in rosso)

Nonostante questa evidenza, la soluzione risulta essere ottimale e, come è mostrato in *Figura 38*, individua esattamente il picco significativo della curva di ellitticità target.

In termini di profili di velocità delle onde di taglio (*Figura 39*), l'analisi ha permesso di individuare una interfaccia sismica aggiuntiva, equivalentemente al raggiungimento del picco sperimentale della curva H/V (prova HVSR-2).

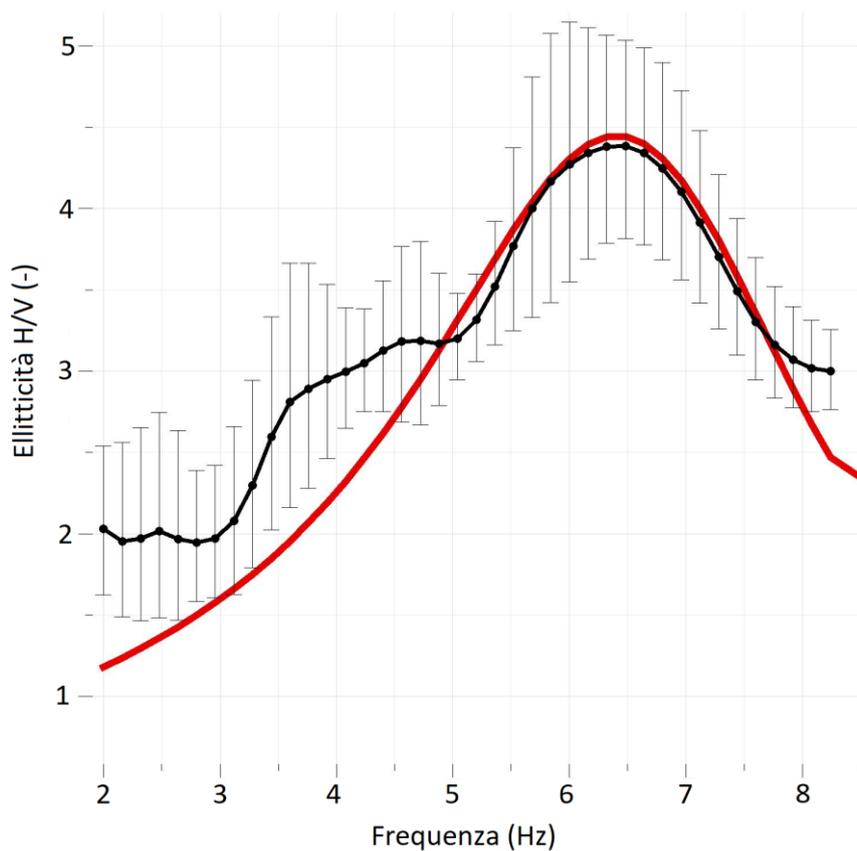


Figura 38. Risultato dell'inversione congiunta - Curva di ellitticità sperimentale (in nero) e numerica (soluzione a minimo misfit - in rosso)

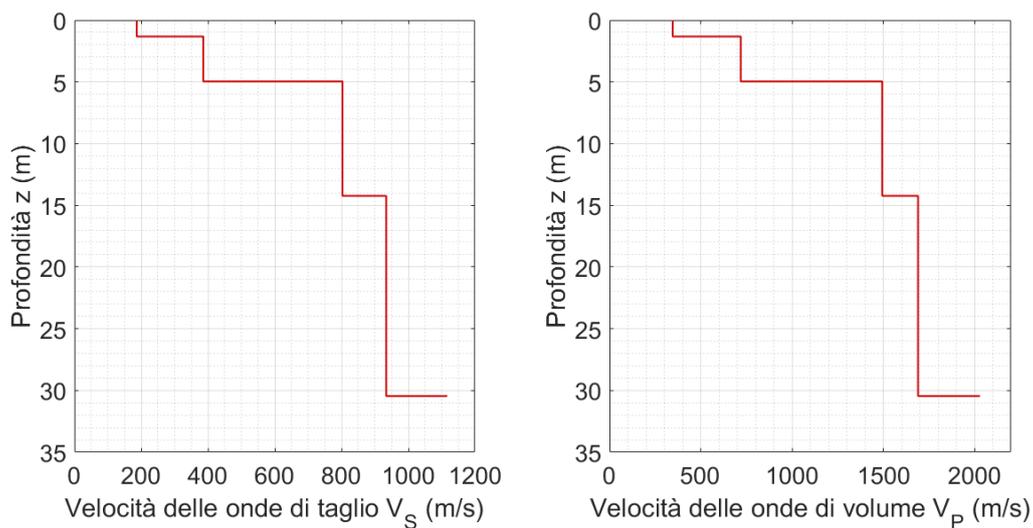


Figura 39. Risultato dell'inversione congiunta - A sinistra il profilo di velocità di propagazione delle onde di taglio V_S ; a destra il profilo di velocità di propagazione delle onde di volume V_P (soluzione a minimo misfit)

Quanto visto per il profilo di velocità delle onde di volume, ottenuto dall'inversione della sola curva di dispersione, si manifesta nuovamente nel risultato dell'inversione congiunta.

Il valore di velocità delle onde di volume V_p pari a circa 1500 m/s a circa 15 m è una evidenza sperimentale della presenza della falda a tale profondità (*Figura 39*).

Inoltre, dai profili di velocità delle onde di taglio e di volume, è possibile ottenere i valori assunti dal coefficiente di Poisson per la soluzione a minimo misfit elaborata dall'inversione congiunta, il cui andamento è descritto in *Figura 40*.

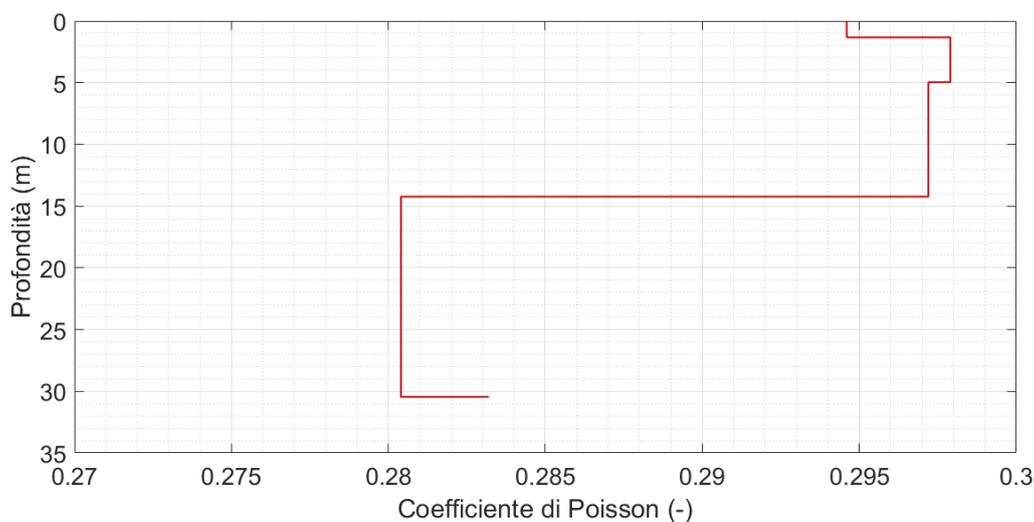


Figura 40. Andamento del coefficiente di Poisson con la profondità per la soluzione a minimo misfit

Il coefficiente di Poisson dovrebbe raggiungere idealmente i valori di 0.45-0.5 per segnalare la condizione di saturazione del terreno, e quindi la presenza di falda, a circa 15 m.

In questo caso, l'andamento di ν per la soluzione a minimo misfit dell'inversione congiunta oscilla intorno ai valori di 0.28-0.3: tale andamento riproduce il comportamento non completamente saturo dei particolari litotipi caratterizzanti il deposito di terreno. Inoltre essendo i materiali del deposito abbastanza rigidi, l'informazione conferita dal coefficiente di Poisson perde di significato.

Relativamente all'idrogeologia del deposito in questione, si propone un estratto della *Relazione Geologica e Geotecnica*, dove si evincono i livelli di permeabilità della litostratigrafia (*Tabella 12*).

Terreni di riporto	<i>“Terreni a permeabilità variabile da alta, dovuta all’eterogeneità litologica in quanto costituiti da commistioni di laterizi, pietrisco e sabbie e limi in differenti proporzioni”</i>
Depositi eluvio-colluviali	<i>“Terreni a permeabilità variabile, sia laterale che verticale, dovuta all’eterogeneità litologica in quanto costituiti da commistioni di limi, argille e sabbie in differenti proporzioni; si possono classificare come “terreni a permeabilità da medio bassa a bassa”. La circolazione idrica risente direttamente delle precipitazioni”</i>
Substrato (Formazione dello Schlier)	<i>“Nel complesso viene classificato come impermeabile a causa della predominanza della componente argillosa che le conferisce le caratteristiche di acquiclude. Tuttavia nel substrato alterato di riscontra la presenza di una falda acquifera mentre in profondità, nella formazione integra, è possibile riscontrare delle limitatissime percolazioni idriche, da mettere in relazione alla presenza di livelli calcarei molto fratturati”</i>

Tabella 12. Estratto dalla Relazione Geologica e Geotecnica redatta per il comune di San Severino Marche - Indicazioni relative alla permeabilità dei litotipi identificati dalle campagne di sondaggi (dal 1979)

I sondaggi eseguiti con piezometri ed inclinometri e fino al raggiungimento dello strato integro, hanno individuato una *“circolazione idrica molto limitata negli strati superficiali dove si notano soltanto zone a differente grado di umidità, risiede nella porzione di substrato alterato e fratturato. Con l’aumentare della profondità le ossidazioni dovute alla percolazione idrica, legate alla presenza di strati più calcarei fratturati, tendono a diminuire fino a scomparire intorno ai 20 m dal pc”*.

In *Figura 41* si confrontano in conclusione i profili di velocità delle onde di taglio, ottenuti rispettivamente dai processi di inversione congiunta e di inversione della sola curva di dispersione. Il profilo in rosso in linea continua è il risultato a minimo misfit dell’inversione congiunta in DINVER: la prima parte del profilo rispecchia l’andamento di velocità generato dall’inversione della sola curva di dispersione con entrambi gli algoritmi; tra i 15 e i 35 m, grazie all’ausilio dei dati sperimentali della curva di ellitticità, viene individuata un’altra interfaccia (a 30 m e che raggiunge una V_s di 1100 m/s circa).

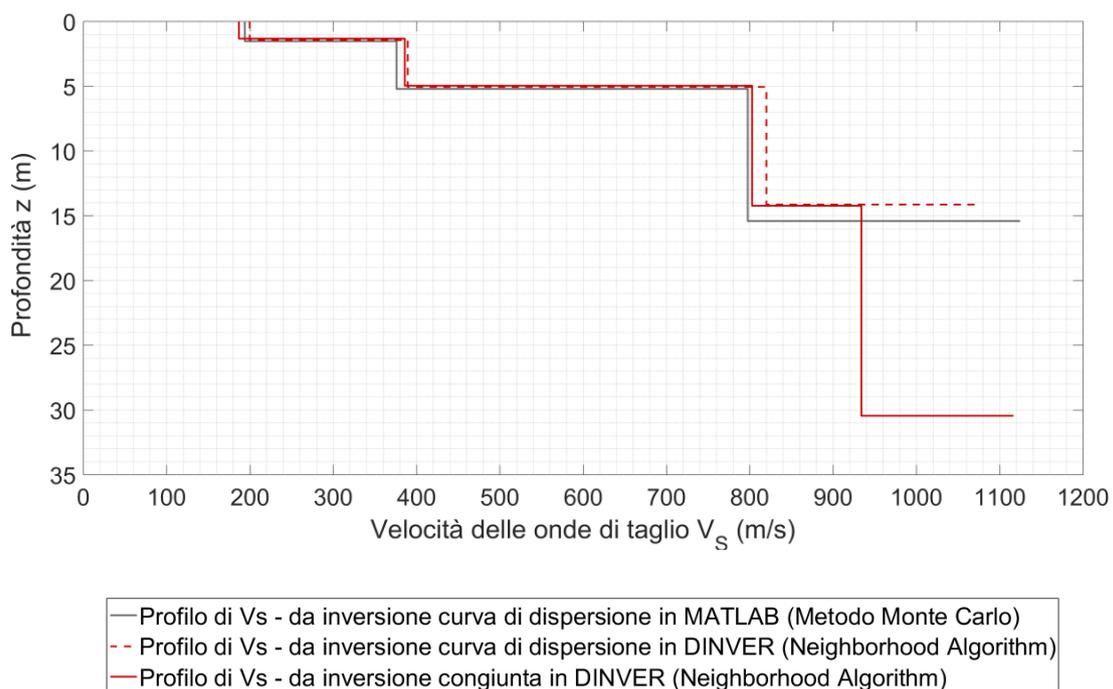


Figura 41. Confronto profili di velocità delle onde di taglio ottenuti rispettivamente da inversione della sola curva di dispersione e da inversione congiunta

4.3 Analisi di risposta sismica locale

4.3.1 Generalità

Le analisi di risposta sismica locale sono condotte per verificare come varia il moto sismico a seconda delle proprietà meccaniche e geometriche dei depositi prossimi alla superficie e/o alla topografia del sito di interesse.

La quantificazione della risposta sismica locale nel dominio del tempo può essere misurata tramite il fattore di amplificazione FA, definito dal rapporto tra i valori massimi di accelerazione in superficie della colonna di terreno $a_{max,s}$ ed il valore massimo del segnale sismico di riferimento $a_{max,o}$.

$$FA = \frac{a_{max,s}}{a_{max,o}}$$

Tale parametro però risulta scarsamente rappresentativo delle caratteristiche dei segnali e, per questa ragione, l'attenzione viene spostata nel dominio delle frequenze, in cui la quantificazione della risposta sismica locale viene affidata alla funzione di trasferimento. Quest'ultima mette in relazione il moto sulla superficie libera ed il moto di riferimento: in definitiva traduce l'alterazione del moto sismico di input sulla base delle condizioni stratigrafiche e topografiche del sito in esame.

Ipotizzando che il sistema abbia comportamento lineare, si definisce nel dominio della frequenza la funzione di trasferimento $H(f)$, come rapporto tra il segnale in uscita (condizione specifica sulla superficie libera) ed il segnale in entrata (condizione di riferimento).

$$H(f) = \frac{A_s(f)}{A_o(f)}$$

La condizione di riferimento è relativa all'applicazione del moto alla base del deposito di terreno (bedrock) o facendo riferimento all'affioramento della formazione rocciosa di base in superficie (outcrop).

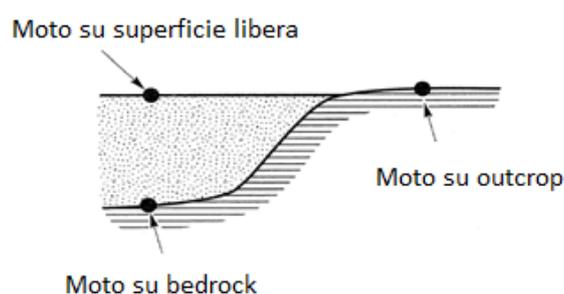


Figura 42. Schema semplificato dei punti di applicazione del moto di riferimento: bedrock e outcrop

Il valore assoluto della funzione di trasferimento prende il nome di funzione di amplificazione $A(f)$, che indica quali componenti in frequenza risultano maggiormente influenzate nell'attraversare il deposito in oggetto.

$$A(f) = |H(f)| = \left| \frac{A_S(f)}{A_O(f)} \right|$$

A tale concetto si collega la definizione di deposito di terreno come *filtro passa-basso*: esso consente il passaggio ed amplificazione delle componenti a bassa frequenza, mentre taglia i contributi alle alte frequenze; concentra quindi la sua azione amplificante o attenuante in determinati range di frequenza.

Nei paragrafi seguenti si approfondiscono gli approcci analitici relativi alle tipologie di analisi per il caso di amplificazione stratigrafica, in cui l'alterazione del moto sismico in superficie viene studiato facendo riferimento a modelli monodimensionali multistrato del terreno con l'ipotesi di interfacce piane e parallele.

Si trascura il caso di amplificazione topografica, che relaziona i fenomeni di variazione del moto alla conformazione topografica del sito, che richiederebbe l'adozione di codici di calcolo multidimensionali.

4.3.1.1 Approccio analitico per modello a singolo strato su substrato rigido

Si analizza la risposta sismica locale di un modello semplificato, costituito da materiale omogeneo elastico lineare su substrato infinitamente rigido (indeformabile).

Il problema viene svolto applicando le leggi di propagazione monodimensionale delle onde di taglio nel mezzo.

L'equazione fondamentale che definisce la propagazione delle onde di taglio polarizzate orizzontalmente è rappresentata da un'equazione differenziale:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{V_S^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

In cui: u = spostamenti orizzontali;

z = coordinata perpendicolare alla superficie libera.

(Figura 43)

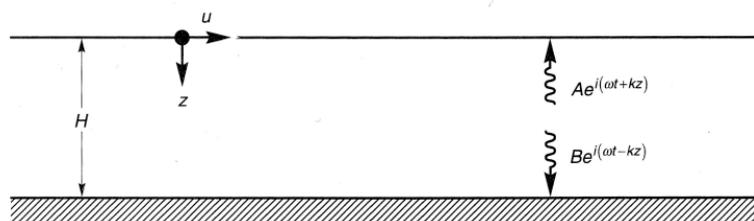


Figura 43. Modello del terreno costituito da strato omogeneo elastico lineare su substrato rigido

La soluzione generale armonica dell'equazione differenziale viene espressa dalla seguente formulazione:

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t + kz)} + Be^{i(\omega t - kz)}$$

Dove: A, B = ampiezze del moto dell'onda che si propaga nelle due direzioni (rispettivamente verso l'alto e verso il basso);

$\omega = 2\pi f$ (frequenza circolare);

$k = 2\pi/\lambda$ (numero d'onda).

Applicando le condizioni al contorno di stato tensionale nullo sulla superficie libera e considerando che le onde SH generano solo tensioni tangenziali,

$$\tau(z = 0, t) = 0$$

l'equazione diventa:

$$u(z, t) = 2A \cos(kz) e^{i\omega t}$$

Questa equazione regola il moto di un'onda stazionaria di ampiezza ($2A \cos(kz)$) prodotta dall'interferenza costruttiva delle componenti d'onda, che viaggiano verso il basso e verso l'alto. In questo modo tramite l'applicazione di tale equazione, sono noti gli spostamenti in superficie ed alla base dello strato: in definitiva è possibile valutare le alterazioni del moto prodotte all'interno del mezzo.

Sulla base della definizione della funzione di trasferimento e della funzione di amplificazione (modulo di $H(f)$), si ottiene:

$$H_r(\omega) = \frac{FFT(u(0, t))}{FFT(u(H, t))} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{V_s}\right)}$$

$$A_r(\omega) = |H_r(\omega)| = \frac{1}{\left| \cos\left(\frac{\omega H}{V_S}\right) \right|} \geq 1$$

In corrispondenza dei valori di frequenza per i quali viene soddisfatta la seguente relazione, la funzione di amplificazione tende ad infinito (condizione di risonanza del sistema).

$$\left(\frac{\omega H}{V_S}\right) = \frac{\pi}{2} + n\pi$$

$$\omega = 2\pi f \Rightarrow f = \frac{V_S}{4H} + n \frac{V_S}{2H} \quad n = 0, 1, \dots$$

Tali valori sono identificati come frequenze di risonanza o frequenze naturali del sistema e, per $n = 0$, si definisce la frequenza fondamentale e la lunghezza d'onda ad essa associata:

$$f_0 = \frac{V_S}{4H} \quad \lambda_0 = 4H$$

Il sistema analizzato finora risulta essere irrealistico, poiché non prende in considerazione l'eventuale dissipazione di energia all'interno dello strato.

Per questa ragione è possibile modificare il modello semplificato in questione e generalizzarlo al caso di modello con strato superiore visco-elastico lineare poggiante su substrato rigido.

L'analisi visco-elastica lineare si svolge seguendo i passaggi precedentemente discussi, ma prevede di introdurre nella soluzione elastica il modulo di rigidezza complesso G^* , in virtù del *Principio di Corrispondenza*:

$$G^* = G(1 + i2D)$$

in cui: D = rapporto di smorzamento, che misura la dissipazione intrinseca del materiale.

Di conseguenza la velocità di propagazione delle onde di taglio ed il numero d'onda diventano:

$$V_S^* = \sqrt{\frac{G^*}{\rho}} = V_S(1 + iD)$$

$$k^* = k(1 - iD)$$

Cambiano anche le formulazioni della funzione di trasferimento e la funzione di amplificazione:

$$H^*_r(\omega) = \frac{1}{\cos k(1 - iD)H} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{V_s(1 + iD)}\right)}$$

$$A^*_r(\omega) = |H^*_r(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2\left(\frac{\omega H}{V_s}\right) + \left(D \frac{\omega H}{V_s}\right)^2}}$$

Le frequenze naturali del sistema possono essere ottenute come i valori che massimizzano la funzione di amplificazione.

Per effetto dello smorzamento, i massimi della funzione di amplificazione assumono valore finito; in particolare, il massimo di amplificazione corrispondente alla frequenza fondamentale è pari a:

$$(A^*_r)_{max} \cong \frac{2}{\pi D}$$

4.3.1.2 Approccio analitico per modello a singolo strato su substrato deformabile

Finora il modello di riferimento ha previsto uno strato poggiante su substrato rigido.

Per tener in conto invece della deformabilità del substrato roccioso, si modifica nuovamente il modello, considerando un substrato elastico lineare nel rispetto delle condizioni reali.

La soluzione generale dell'equazione di propagazione delle onde viene nuovamente risolta imponendo le opportune condizioni al contorno:

- tensione nulla sulla superficie libera;
- condizione di continuità dello stato di sforzo e continuità delle deformazioni all'interfaccia tra strato superficiale e substrato.

Nel caso di strato superficiale elastico (pedice s) poggiante su substrato deformabile (pedice r), la funzione di trasferimento e la funzione di amplificazione sono pari a:

$$H_{rs}(\omega) = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{V_s}\right) + i\alpha_z \text{sen}\left(\frac{\omega H}{V_s}\right)}$$

$$A_{rs}(\omega) = |H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2\left(\frac{\omega H}{V_s}\right) + \alpha_z^2 \text{sen}^2\left(\frac{\omega H}{V_s}\right)}}$$

In cui: $\alpha_z =$ rapporto di impedenza tra i due strati ($\alpha_z = \rho_s V_s / \rho_r V_{s,r}$).

I valori massimi dell'amplificazione, corrispondenti alle condizioni di risonanza, sono pari a:

$$(A_{rs})_{max} = \frac{1}{\alpha_z}$$

Per α_z tendente a 0, si ottiene il caso limite di substrato infinitamente rigido (con V_s del substrato tendente ad infinito), in cui il valore dell'amplificazione massima va ad infinito (*Paragrafo 4.3.1.1*).

Nel caso invece di strato visco-elastico lineare su substrato deformabile, le funzioni di trasferimento ed amplificazione sono valutabili come:

$$H^*_{rs}(\omega) = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{V^*_s}\right) + i\alpha^*_z \text{sen}\left(\frac{\omega H}{V^*_s}\right)}$$
$$A^*_{rs}(\omega) = |H^*(\omega)|$$

Da una formulazione approssimata della funzione di amplificazione, il valore massimo di tale funzione corrispondente alla frequenza fondamentale è dato da:

$$(A^*_{rs})_{max} = \frac{1}{\alpha_z + \frac{\pi}{2} D}$$

I metodi analizzati finora possono essere estesi nel caso di modelli di terreno multistrato.

Volendo tenere in conto della non linearità reale dei materiali, è necessario applicare metodologie rigorose di integrazione nel tempo delle equazioni del moto, tenendo conto dell'effettivo legame sforzi-deformazioni.

In tale ambito, per semplificare queste procedure più complesse ed estremamente dispendiose in termini di tempo, si ricorre al *Metodo Lineare Equivalente* (*Idriss & Seed, 1968*). Tale approccio fa ricorso ad una procedura iterativa basata su successive linearizzazioni del legame sforzi-deformazioni mediante la definizione di un modulo di rigidità ed un rapporto di smorzamento, equivalenti al livello di deformazione indotto dal passaggio dell'onda sismica.

Il processo iterativo si può riassumere come segue:

1. Ipotesi di partenza: livello deformativo iniziale noto;
definizione dei valori iniziali del modulo di taglio G_0 e del rapporto di smorzamento D_0 a piccole deformazioni.

2. Livello deformativo indotto nel deposito al passaggio dell'onda sismica all'iterazione i-esima:

$$\gamma_i = f(G_0, D_0)$$

Si tiene in conto di una deformazione ciclica, applicando un coefficiente di riduzione R_d della deformazione massima:

$$\gamma_{eff,i} = \gamma_{cyc,i} = R_d \cdot \gamma_{max,i}$$

3. Se $G(\gamma_{eff}) = G_0$, si interrompe il processo iterativo; altrimenti si procede con la successiva iterazione, correggendo il modulo di rigidezza e il rapporto di smorzamento tramite le curve in *Figura 44*, fino ad arrivare a convergenza.

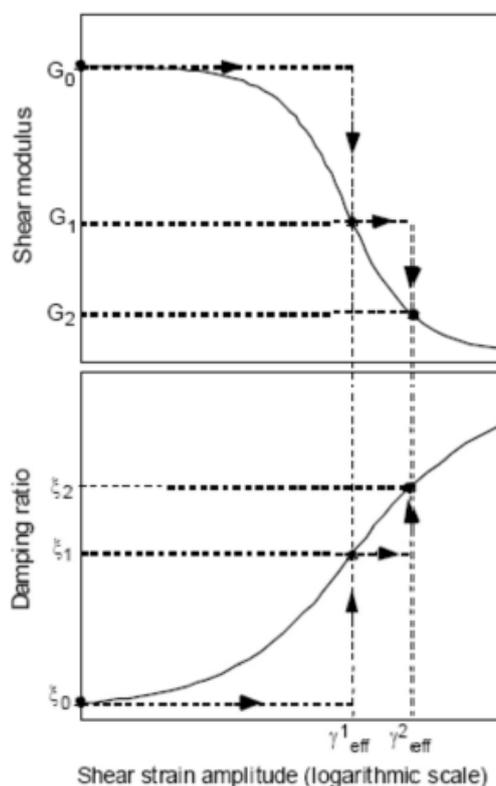


Figura 44. Curve di decadimento del modulo di taglio e del rapporto di smorzamento per il processo iterativo alla base del Metodo Lineare Equivalente

Nel caso in esame, la modellazione è stata eseguita utilizzando il codice di calcolo DEEPSOIL, sviluppato dal centro di ricerca dell'Università dell'Illinois (*Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D., 2016*), che ha permesso di simulare il comportamento dei terreni sia in campo elastico lineare (analisi visco-elastica lineare) che in campo non lineare (analisi lineare equivalente).

L'elaborazione è costituita da tre fasi, affrontate in maniera dettagliata per il caso studio nel *Paragrafo 4.3.2*.

- *Definizione dei modelli monodimensionali multistrato del terreno:*
caratteristiche geotecniche dei terreni (spessore strati, velocità delle onde di taglio, densità, etc), parametri relativi al comportamento ciclico del terreno (solo per analisi lineari equivalenti).
- *Definizione degli input sismici:*
ricerca di input sismici che possano al meglio rappresentare la pericolosità in sito.
- *Elaborazione dei risultati:*
analisi e confronto tra spettri di risposta elastici, funzioni di amplificazione.

4.3.2 Caso studio: analisi di risposta sismica locale per il comune di San Severino Marche

4.3.2.1 Definizione dei modelli monodimensionali multistrato del terreno

Dalla *Relazione Geologica e Geotecnica* del sito di San Severino Marche (1999), si evincono rispettivamente la descrizione dei litotipi ed alcuni dei parametri geotecnici caratterizzanti il deposito (*Tabella 13 e 14*).

Terreni di riporto	<i>“Rilevato al di sotto della pavimentazione e della massicciata e costituito da ciottoli eterometrici, frammenti lapidei grossolani appiattiti ed a spigoli vivi, resti di laterizi, materiali organici nerastri, il tutto immerso in una matrice di sabbia, limo ed argilla.”</i>
Depositi eluvio-colluviali	<i>“Costituiti da limi sabbiosi e limi argilloso-sabbiosi giallastri con abbondanti concrezioni calcaree, debolmente coerenti, scarsamente addensati ed a plasticità medio-alta. Formazione con spessore variabile da pochi decimetri, sotto la torre, fino a circa 6 metri.”</i>
Substrato (Formazione dello Schlier)	<i>“Costituito da alternanze di marne, marne argillose e marne calcaree di colore grigio (formazione alterata e decompressa per uno spessore dagli 8 a 17 metri). All’aumentare della profondità, si presenta asciutta, compatta e mediamente fratturata. A profondità maggiori per decine di metri, mantiene le stesse caratteristiche litologiche e si presenta integra con caratteristiche meccaniche paragonabili ad quelle di una roccia lapidea tenera.”</i>

Tabella 13. Estratto dalla Relazione Geologica e Geotecnica redatta per il comune di San Severino Marche - Litostratigrafia individuata da n°10 sondaggi geognostici a carotaggio continuo nei dintorni dell’area di studio

Terreni di riporto	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ $\phi = 30^\circ$	<i>Peso dell’unità di volume Angolo di attrito</i>
Depositi eluvio-colluviali	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ $\phi' = 29^\circ$ IP = 25%	<i>Peso dell’unità di volume Angolo di attrito drenato Indice di plasticità</i>
Substrato (Formazione dello Schlier)	$\gamma = 20-23 \text{ kN/m}^3$	<i>Peso dell’unità di volume</i>

Tabella 14. Estratto dalla Relazione Geologica e Geotecnica redatta per il comune di San Severino Marche - Alcuni parametri geotecnici individuati da prove geotecniche in sito e di laboratorio

La prima richiesta per avviare le simulazioni di risposta sismica locale è l'inserimento della geometria del sito in esame, in correlazione alle caratteristiche geotecniche degli strati.

La consultazione della *Relazione Geologica e Geotecnica* ha permesso di associare i litotipi ed i parametri geotecnici ai profili di velocità ottenuti dall'interpretazione delle prove sismiche in sito. Per il caso studio in questione, si fa riferimento ai risultati ottenuti dalle indagini sismiche, interpretate precedentemente (*Paragrafo 4.2*).

Si scelgono come profili di input:

- i primi 100 migliori profili di velocità delle onde di taglio, ottenuti dall'inversione delle sole curve di dispersione (interpretazione prova MASW-2);
- i primi 100 migliori profili di velocità delle onde di taglio, ottenuti dall'inversione congiunta (dati sperimentali MASW-2+HVSR-2).

Andando ad estrapolare i 100 migliori profili di velocità dai risultati dell'inversione della sola curva di dispersione, si riscontra una variabilità marcata per alcuni tracciati. Questo è giustificabile dalle due diverse modalità di esecuzione delle inversioni con metodo Monte Carlo implementato in MATLAB, precedentemente citate nel *Paragrafo 4.2* e ricapitolate di seguito:

- *modalità 1*: inversione condotta con un numero fissato di strati;
- *modalità 2*: inversione condotta con una parametrizzazione più fitta (condizione con un grado di libertà in più).

Si distinguono quindi i profili ottenuti dalle due inversioni in *Figura 45*.

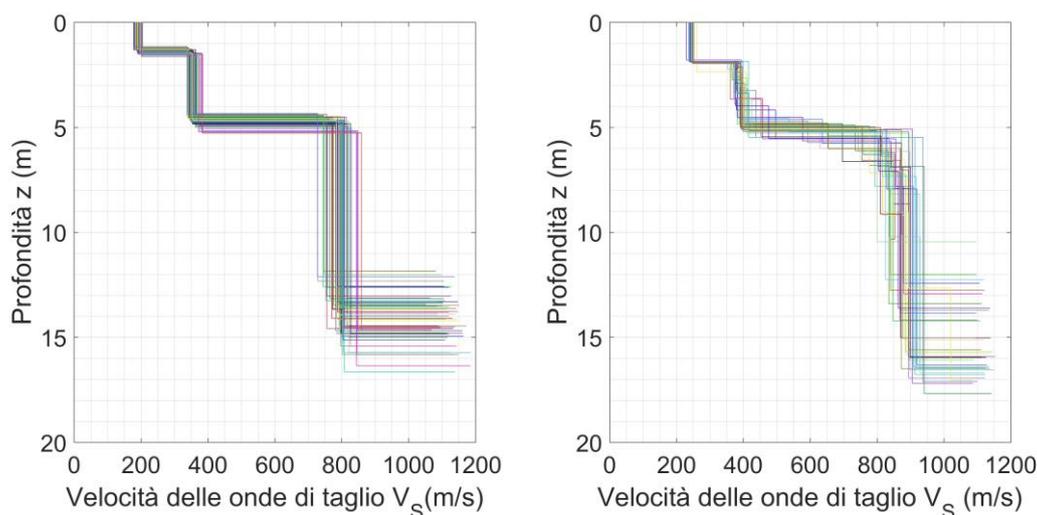


Figura 45. Profili ottenuti dall'inversione della sola curva di dispersione, distinti a seconda delle modalità di inversione. A sinistra i profili ottenuti dall'inversione in modalità 1; a destra i profili ottenuti dall'inversione in modalità 2

Inoltre per facilitare le successive elaborazioni, i profili di velocità sopra citati vengono distinti in due categorie:

- profili tipo A: 100 profili da inversione della sola curva di dispersione, in *Figura 45* (assemblaggio delle soluzioni in un'unica rappresentazione in *Figura 46*);
- profili tipo B: 100 profili da inversione congiunta, in *Figura 47*.

Il relativo confronto sullo stesso grafico è illustrato in *Figura 48*, distinguendo la tipologia A in grigio e la tipologia B in rosso.

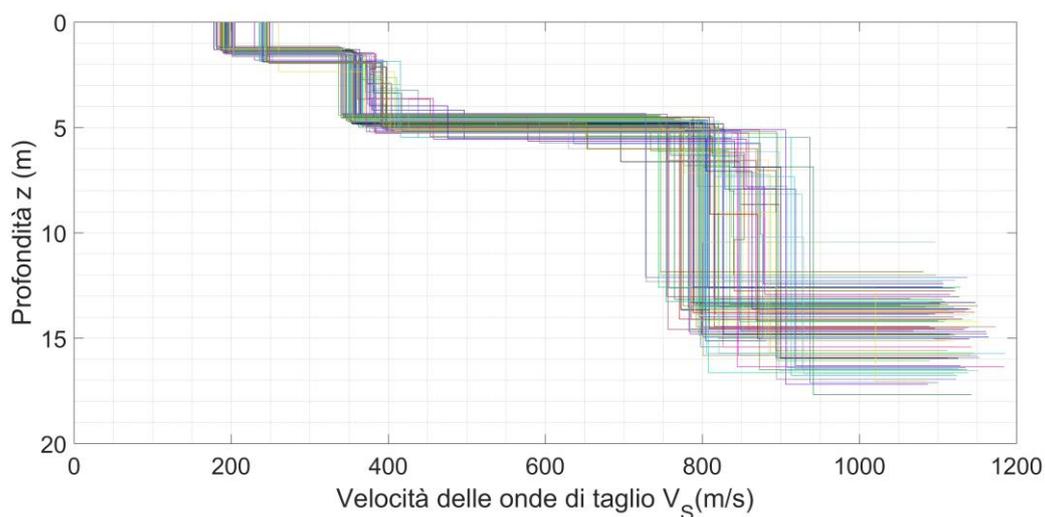


Figura 46. Profili di tipo A

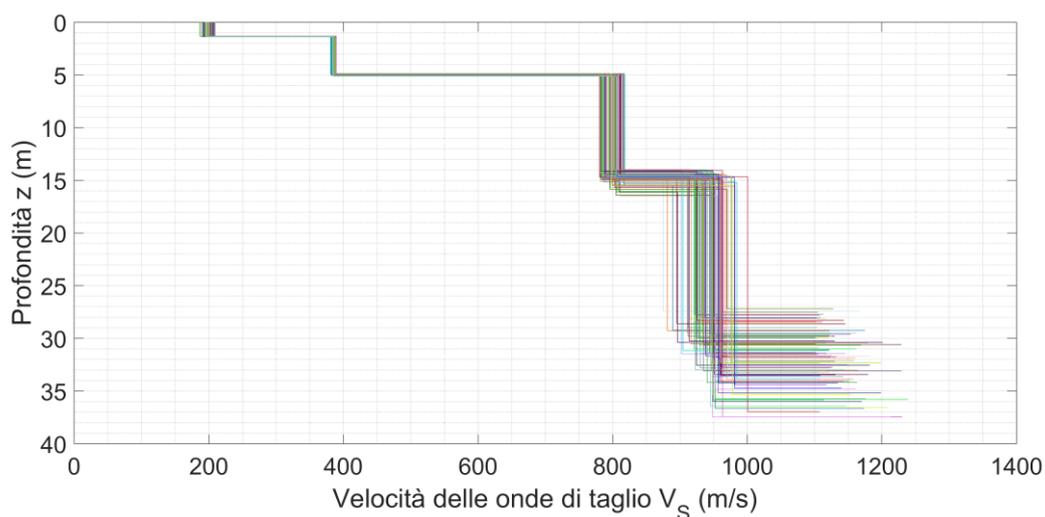


Figura 47. Profili di tipo B

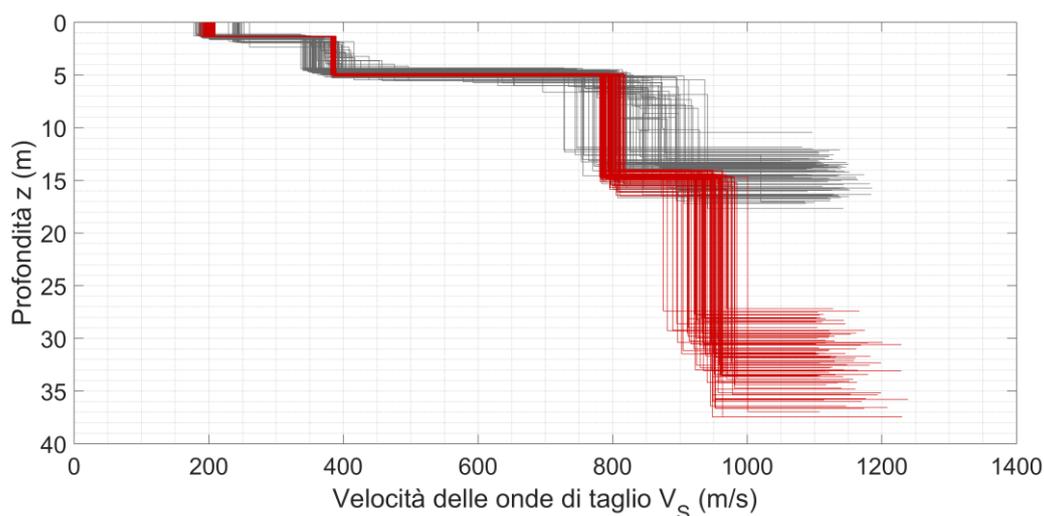


Figura 48. Confronto tipologie profili (in grigio profili di tipo A, in rosso profili di tipo B)

Una rappresentazione utile per la valutazione delle frequenze individuate dalle interfacce dei modelli multistrato considerati è definita dall'andamento della frequenza fondamentale f_0 con la profondità. Si ricorda la relazione tra f_0 e la velocità di propagazione delle onde di taglio media pesata $V_{S,z}$:

$$f_0 = \frac{V_{S,z}}{4H}$$
$$V_{S,z} = \frac{\sum h_i}{\sum h_i/V_{S,i}}$$

in cui la $V_{S,z}$ tiene in conto del comportamento medio della colonna di terreno, suddivisa in un numero i -esimo di strati.

Nel dettaglio, per le due tipologie di profili, si illustrano gli andamenti di:

- $(V_{S,z}, z)$ in *Figure 49, 50 e 51*;

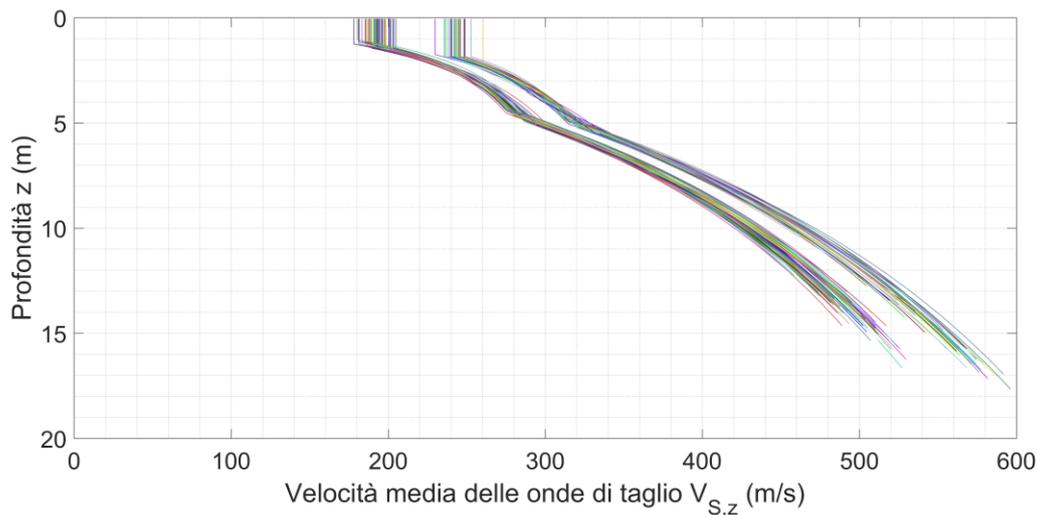


Figura 49. Andamento $V_{S,z}$ con la profondità – Profili di tipo A

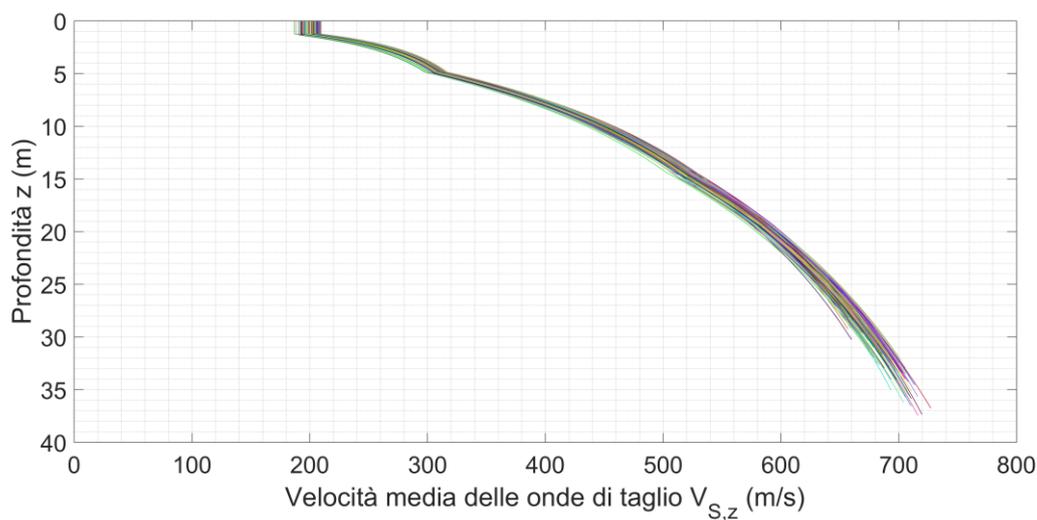


Figura 50. Andamento $V_{S,z}$ con la profondità – Profili di tipo B

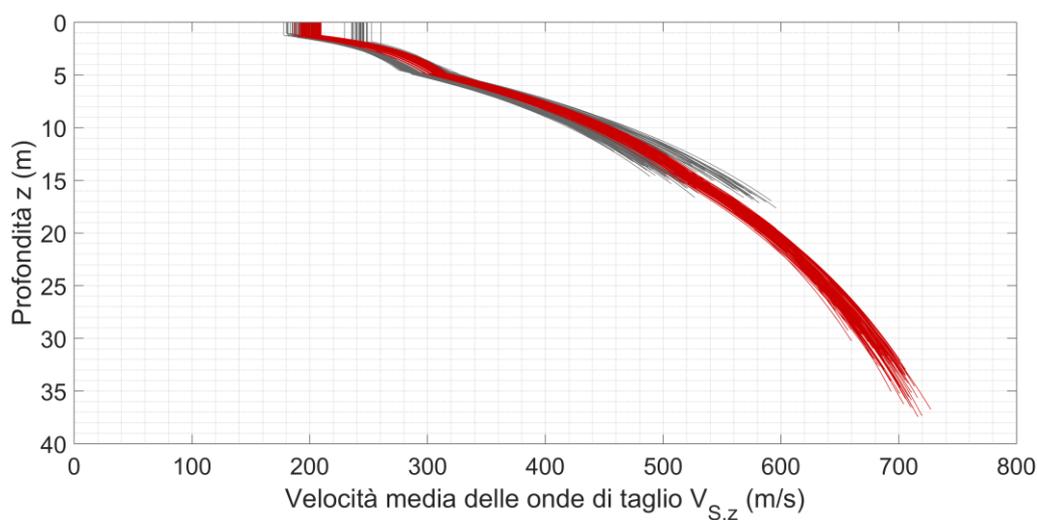


Figura 51. Confronto andamento (f_0, z) per le diverse tipologie di profili. In grigio per profili di tipo A; in rosso per profili di tipo B

- (f_0, z) in Figura 52, 53 e 54;

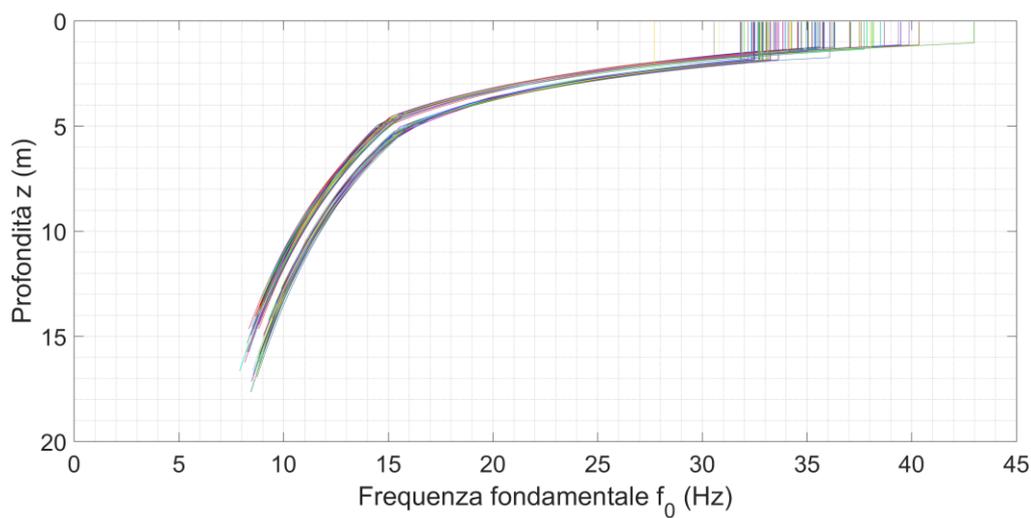


Figura 52. Andamento della frequenza fondamentale f_0 con la profondità – Profili di tipo A

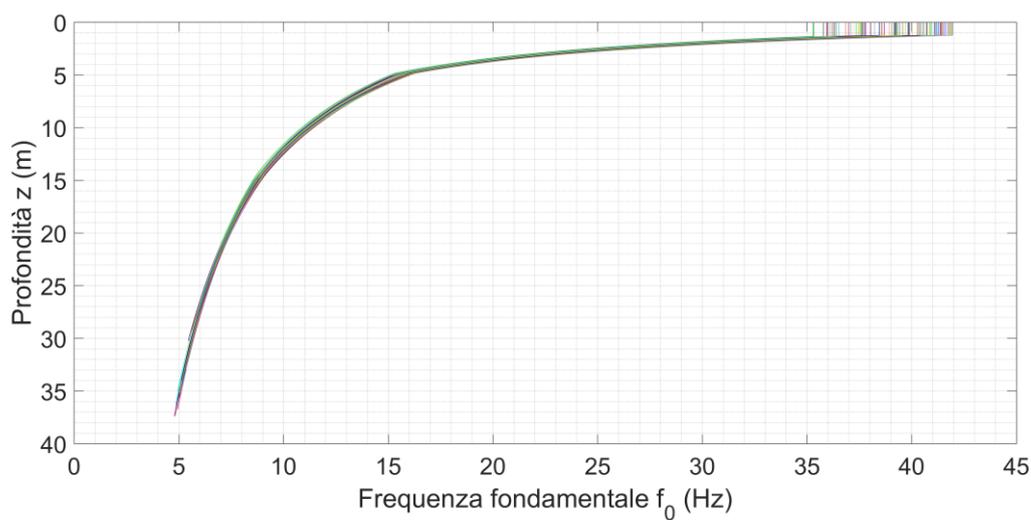


Figura 53. Andamento della frequenza fondamentale f_0 con la profondità – Profili di tipo B

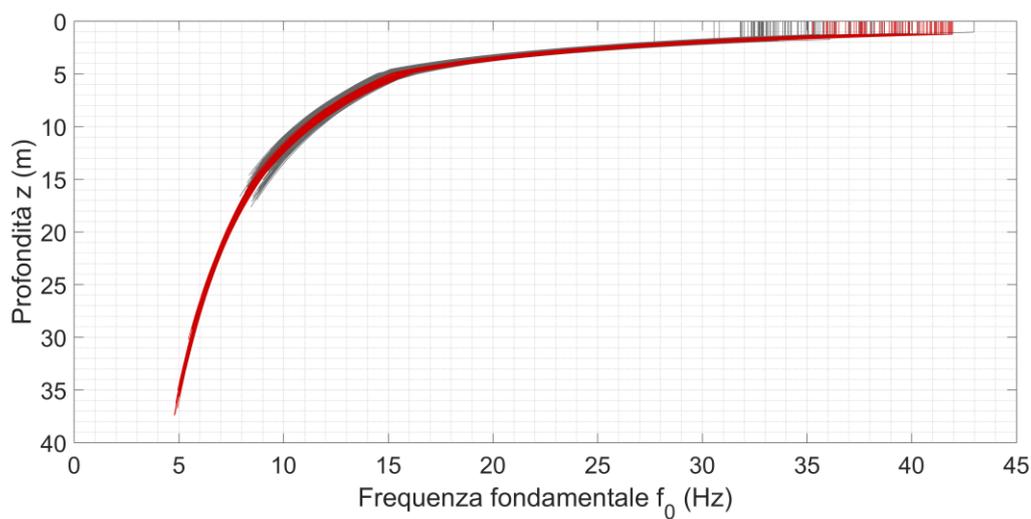


Figura 54. Confronto andamento (f_0, z) per le diverse tipologie di profili. In grigio per profili di tipo A; in rosso per profili di tipo B

Ci si vuole soffermare sulla variabilità dei profili scelti, partendo dall'ipotesi che le misure abbiano una distribuzione gaussiana: si valutano gli indici statistici *media* e *deviazione standard*, utili a descrivere la variabilità della popolazione dei dati sperimentali.

Per gestire la variabilità della velocità di propagazione delle onde di taglio V_S si presuppone di lavorare con il logaritmo naturale di tale grandezza, poiché la distribuzione asimmetrica log-normale risulta più rappresentativa della popolazione dei dati sperimentali in questione.

La *Figura 55* illustra l'andamento della deviazione standard del logaritmo dei valori di V_S con la profondità. La curva in grigio (per profili di tipo A) assume valori di deviazione standard logaritmica più alti rispetto a quelli della curva in rosso (riferita a profili di tipo B) all'aumentare della profondità. Tale evidenza è giustificata dal fatto che i profili di velocità di tipo B sono stati ottenuti da un processo di inversione congiunta, eseguito con una parametrizzazione di partenza poco variabile e definita sulla base dei risultati delle inversioni della sola curva di dispersione (*Paragrafo 4.2.3*).

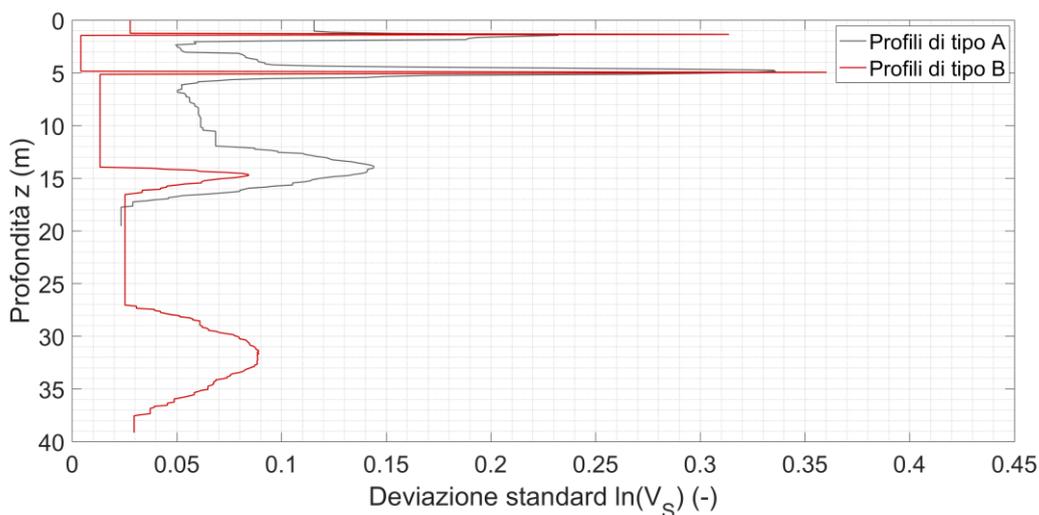


Figura 55. Andamento della deviazione standard dei logaritmi delle velocità di propagazione delle onde di taglio con la profondità per profili di tipo A e B

Si ritiene utile, come approfondimento, citare il riferimento normativo della NTC2018, utile alla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori di velocità di propagazione delle onde di taglio. “La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio $V_{S,eq}$ definita dall'espressione:

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

con: h_i = spessore dell'*i*-esimo strato;

$V_{S,i}$ = velocità delle onde di taglio nell'*i*-esimo strato;

N = numero di strati;

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità”.

(Estratto da NTC2018 – Paragrafo 3.2.2)

Nel caso in questione, facendo riferimento alla classe di profili di terreno di tipo B, il bedrock sismico è individuato alla profondità di circa 15 m, pertanto la $V_{S,eq}$ assume un valore pari:

$$V_{S,eq} \cong (530 \pm 5) \frac{m}{s}$$

Tale valore è stato calcolato mediando le $V_{S,eq}$ di ciascuno dei 100 profili appartenenti alla tipologia B. Dalla tabella in *Figura 56*, nel rispetto delle caratteristiche della superficie topografica, il deposito in questione rientra nella categoria di sottosuolo B, poiché il valore di velocità equivalente calcolata ricade nell'intervallo 360 m/s – 800 m/s.

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

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.

Figura 56. Tabella estratta da NTC2018 – Definizione delle categorie di sottosuolo in funzione della $V_{S,eq}$

4.3.2.2 Definizione degli input sismici

Per la valutazione della risposta sismica locale del sito di San Severino Marche, dopo aver scelto i modelli monodimensionali della colonna di terreno (*Paragrafo 4.3.2.1*), si scelgono gli accelerogrammi di input rappresentativi della pericolosità attesa in sito.

- Studio di pericolosità attesa in sito (approccio probabilistico)

Lo studio di pericolosità sismica per il comune di San Severino Marche viene effettuato tramite l'utilizzo delle mappe interattive fornite dal sito dell'INGV.

(<http://essel-gis.mi.ingv.it/>)

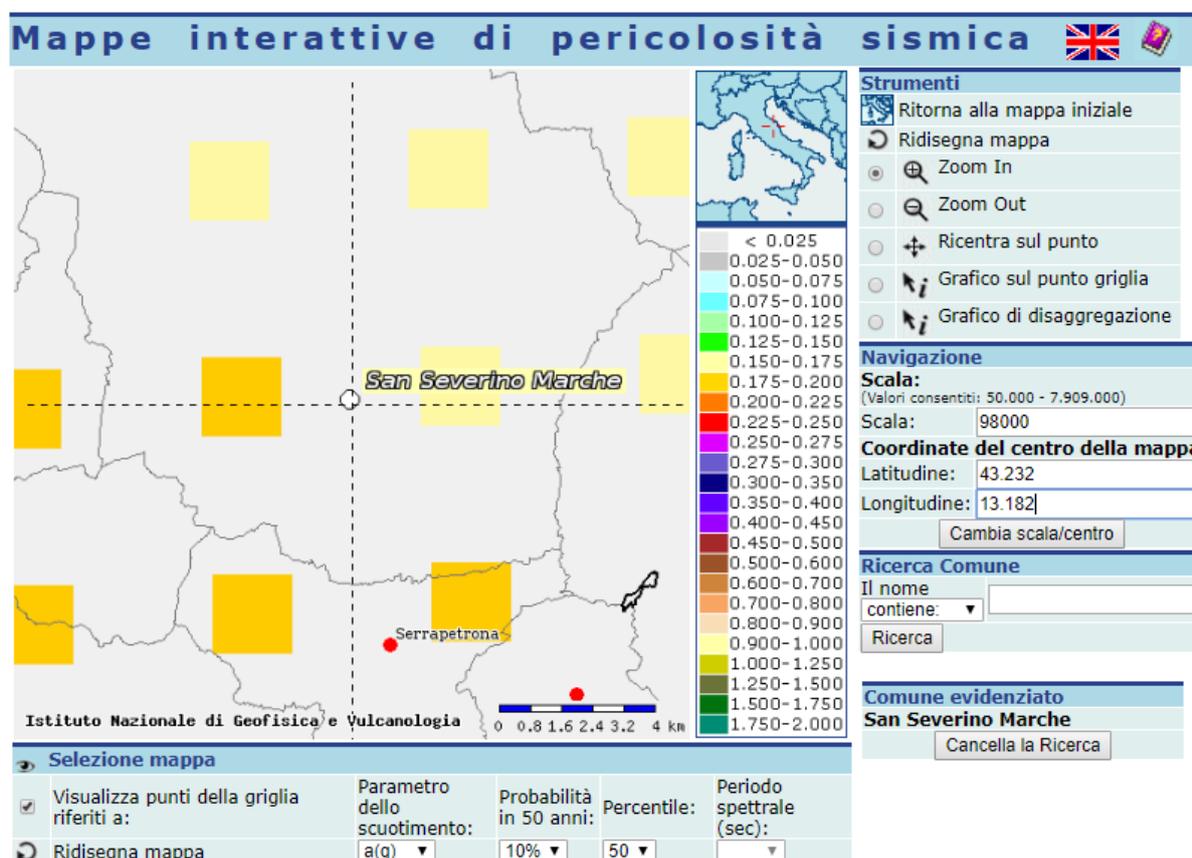


Figura 57. Localizzazione del comune di San Severino Marche sulla mappa interattiva di pericolosità sismica (INGV)

Per una frequenza annuale di superamento di 0.0021, corrispondente ad un periodo di ritorno T_R di 475 anni (probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni), si desume un'accelerazione attesa in sito pari a:

$$a_g = 0.1753g$$

Il sito inoltre genera per il punto del grigliato selezionato lo spettro di pericolosità uniforme per una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, mostrato in *Figura 58*. Per definizione tale spettro si presenta con forma pressoché regolare e non corrisponde ad uno specifico terremoto, ma tiene in conto dell'insieme dei diversi contributi sismici, utili alla stima della pericolosità.

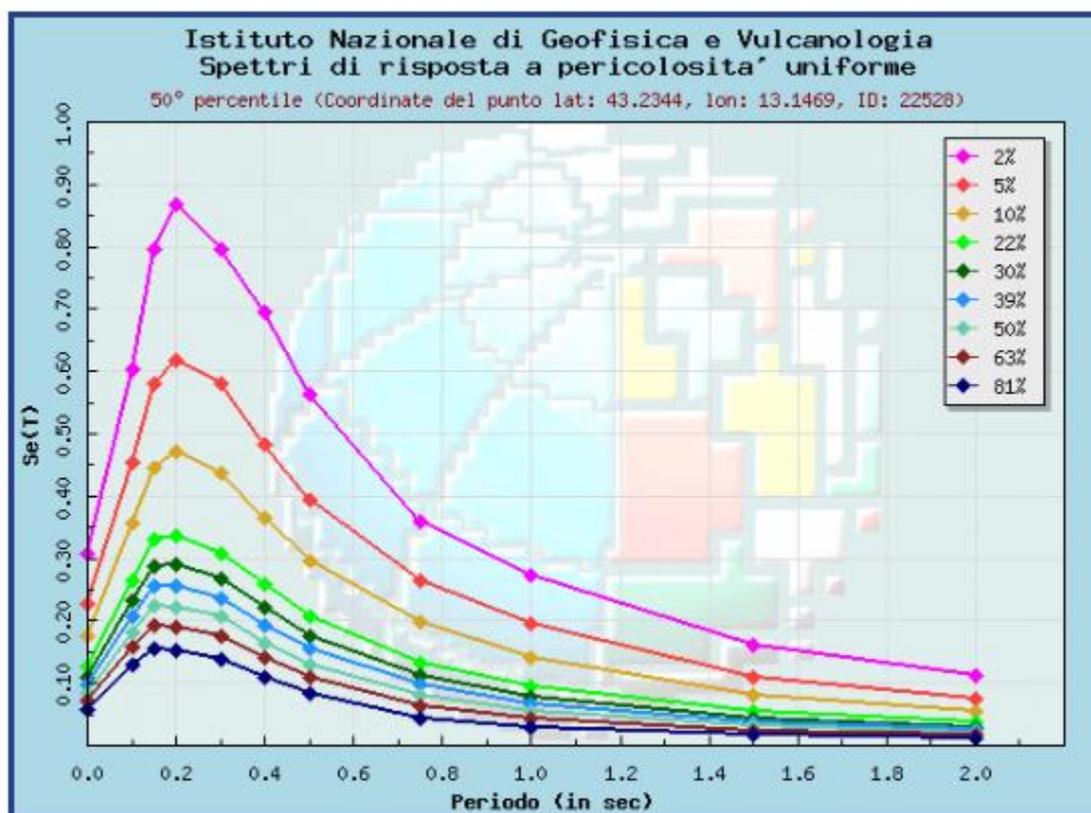


Figura 58. Spettro di risposta a pericolosità uniforme (probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni)

➤ Modalità di ricerca e definizione degli accelerogrammi di input

La scelta degli input avviene ricercando manualmente una combinazione di storie di accelerazioni da banche dati online, che meglio rappresentino le caratteristiche dello scuotimento atteso in termini di: accelerazione attesa, magnitudo attesa, distanza epicentrale, tipologia faglia, tipo di terreno, quindi sulla base dei parametri assunti dallo studio di pericolosità.

La selezione inoltre può avvenire cercando accelerogrammi reali, in modo tale che i loro spettri in media siano confrontabili, quindi simili, con lo spettro target di normativa (criterio di spettrocompatibilità). Questo è l'approccio che è stato utilizzato nel *Progetto per la Microzonazione Sismica*; si riportano di seguito i 7 input selezionati tramite il software REXELite (Iervolino I., Galasso C., Paolucci R., Pacor F., 2011), riferiti ad un periodo di ritorno T_R di 475 anni e che rispecchiano i parametri preliminari di ricerca in termini di magnitudo, distanza epicentrale e categoria di suolo secondo EC8.

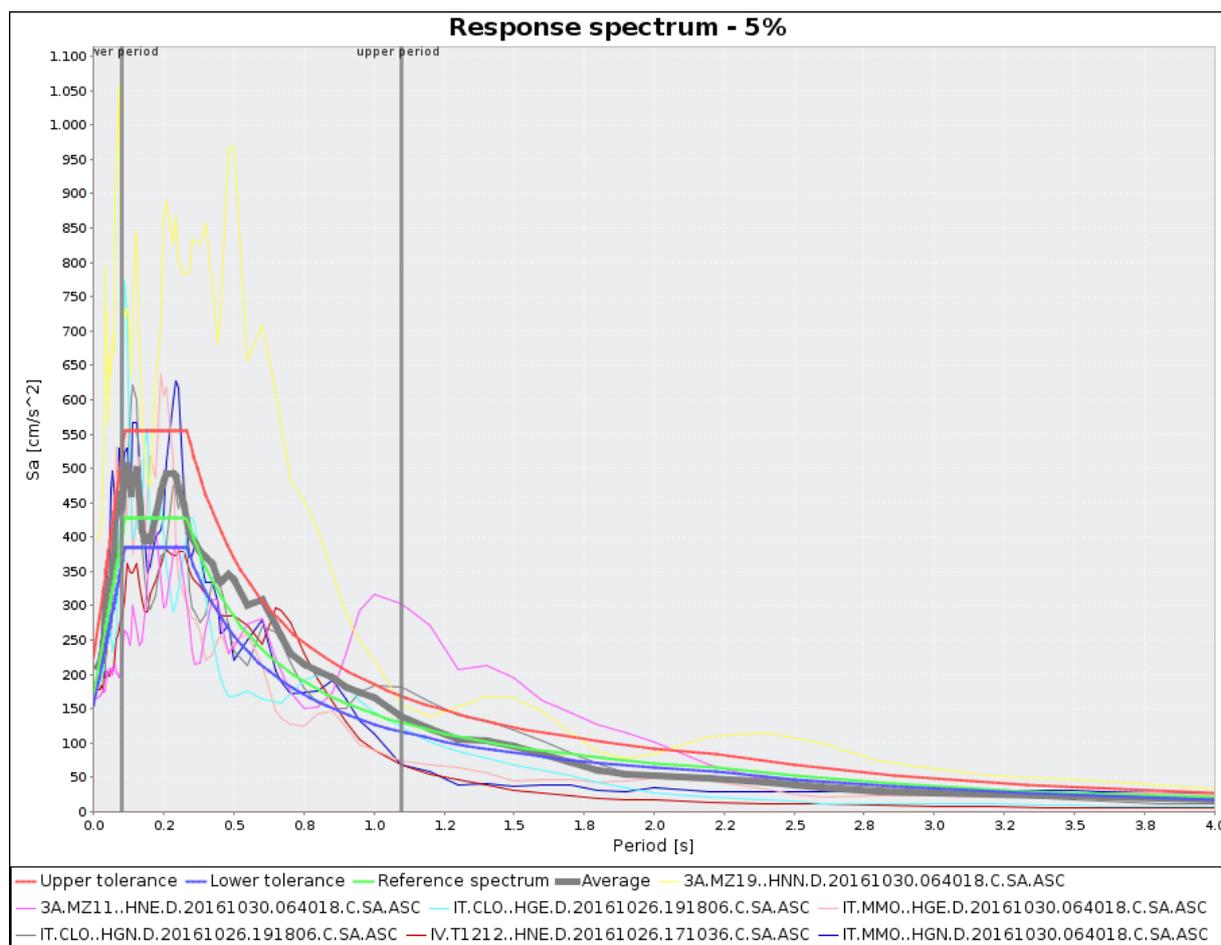


Figura 59. Spettri di risposta di input (coefficiente di smorzamento $\xi=5\%$) nel rispetto del criterio di spettrocompatibilità

In *Figura 59* (ottenuta secondo i dettami del *Progetto per la Microzonazione Sismica* e non elaborata in questo contesto), lo spettro in verde definisce il target di normativa, con il quale verificare la compatibilità degli spettri reali (distinti da colori diversi) e i cui parametri di riferimento sono riportati nella sezione *Target Spectrum* in *Figura 60*.

```
Target spectrum
=====
Latitude: 43.22886
Longitude: 13.17711
Site classification: A
Topography: 1
Nominal life [years]: 50
Building functional type (Cu): 1.0
Limit state probability : 0.1

Preliminary record search
=====
Station site classification: A,A*
Magnitude min: 5.0
Magnitude max: 6.1
Types of magnitude considered: WL
Epicentral distance min [km]: 0.0
Epicentral distance max [km]: 30.0
Include late trigger events: no
Include analog recordings: no

Spectrum matching parameters and analysis options
=====
Period range min [s]: 0.1
Period range max [s]: 1.1
Tolerance below average [%]: 10.0
Tolerance above average [%]: 30.0
Scaled records: no
```

Figura 60. REXELite Elaboration Summary

4.3.2.3 Elaborazione dei risultati delle analisi visco-elastiche lineari

Si analizzano innanzitutto gli andamenti delle funzioni di trasferimento ottenute dalle simulazioni visco-elastiche lineari condotte con il software DEEPSOIL.

Nel dettaglio si riportano le funzioni di trasferimento distintamente per i due set di profili (tipo A e tipo B) e relativo confronto (*Figure 61, 62 e 63*).

Si nota come le funzioni di trasferimento risultino invariate per i diversi input, poiché l'analisi eseguita è di tipo visco-elastico lineare; la variabilità dipende solo dalle caratteristiche dei modelli multistrato di terreno.

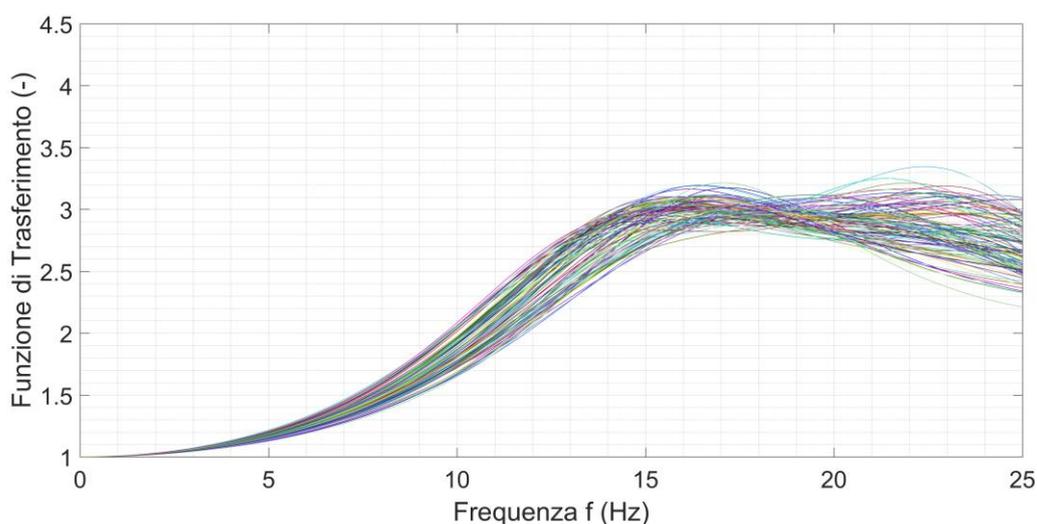


Figura 61. Funzione di trasferimento – Profili di tipo A

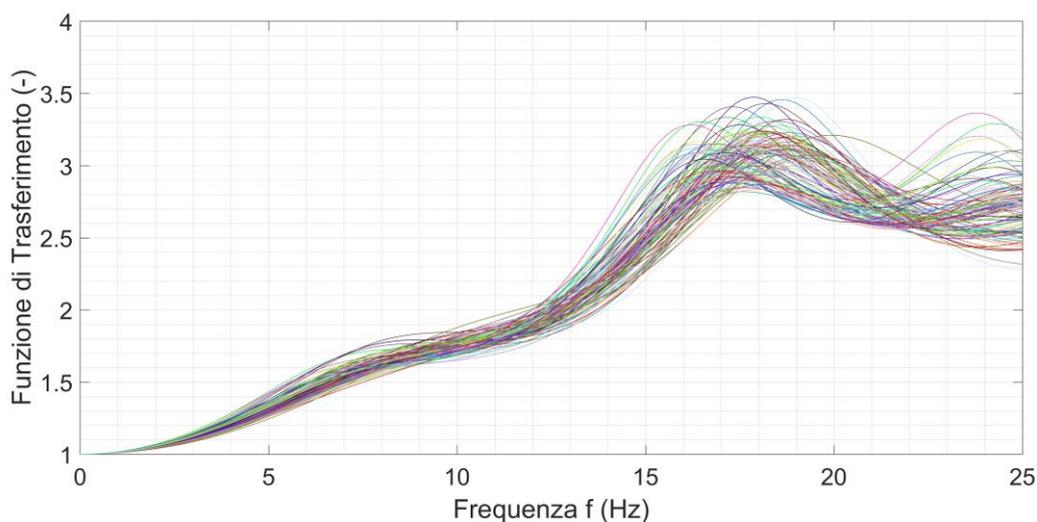


Figura 62. Funzione di trasferimento – Profili di tipo B

Rispetto alle funzioni di trasferimento dei profili di tipo A (curve in grigio), le funzioni di trasferimento per i profili di tipo B (in rosso) presentano un lieve picco alle basse frequenze (intorno ai 6-7 Hz), paragonabile alla frequenza fondamentale ottenuta dall'evidenze sperimentali della curva di ellitticità della prova HVSR-2.

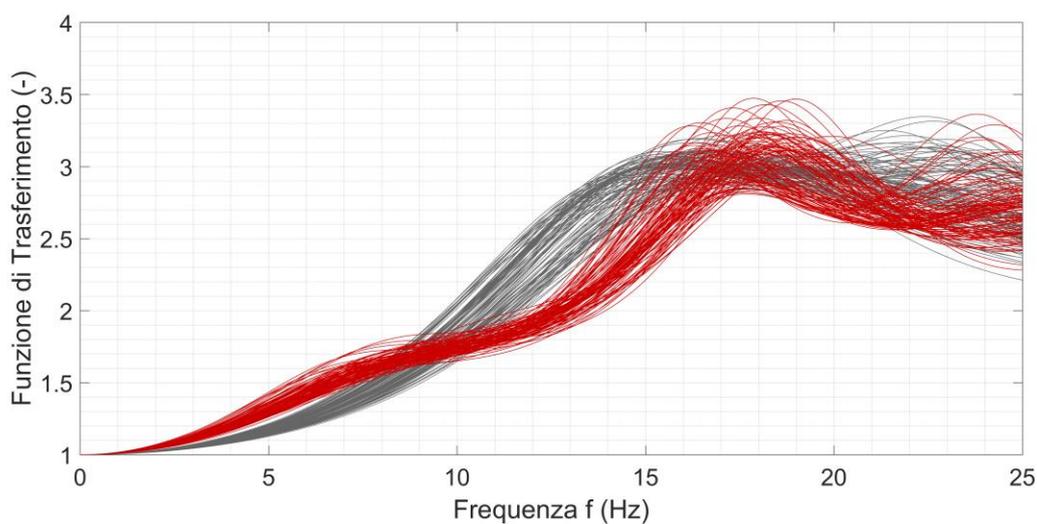


Figura 63. Confronto funzioni di trasferimento (in grigio per profili di tipo A, in rosso per profili di tipo B)

4.3.2.4 Elaborazione dei risultati delle analisi lineari equivalenti con applicazione dell'input sismico in modalità 1

Le analisi lineari equivalenti tengono in conto del comportamento non lineare del deposito di terreno tramite l'assegnazione al materiale in questione di curve di decadimento del modulo di rigidezza e del fattore di smorzamento.

In questo caso sono state associate ai singoli strati del deposito di terreno curve secondo *Darendeli et al (2001)*; un esempio è illustrato in *Figura 64* ed è relativo allo strato di deposito eluvio-colluviale della colonna di terreno, avente γ pari a 20 kN/m^3 e indice di plasticità $IP = 25\%$.

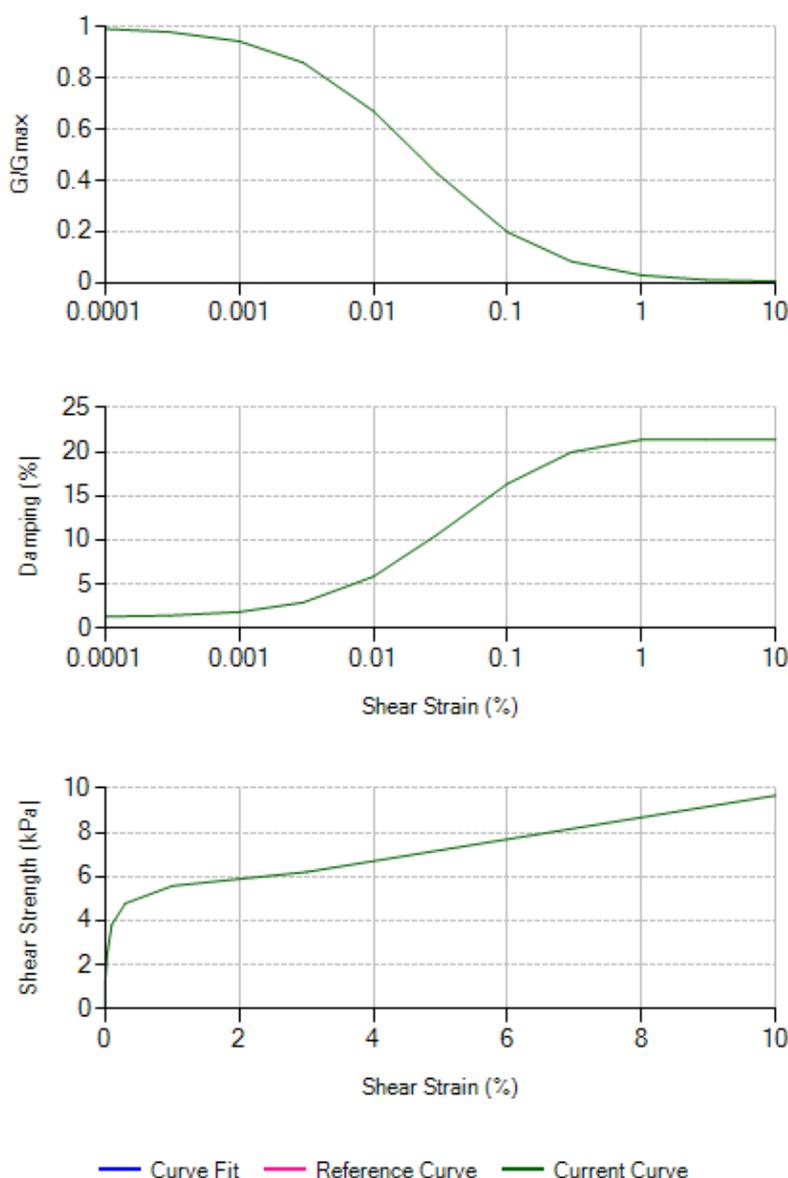


Figura 64. Esempio di curve di decadimento relative alla non linearità secondo Darendeli et al. (2001)

Le simulazioni sono inoltre state eseguite:

- per un numero massimo di iterazioni pari a 15;
- con un coefficiente di riduzione della deformazione massima, il cui valore raccomandato è 0.65.

Di seguito si discutono i risultati determinati dalle analisi di risposta sismica locale di tipo lineare equivalente per i profili che modellano il terreno e per gli input sismici di riferimento, scelti secondo il criterio di spettrocompatibilità (*Paragrafo 4.3.2.2*).

Si porge particolare attenzione ai risultati ottenuti nell'applicazione degli input sismici in tre diverse configurazioni, distinte in:

- modalità 1 (trattato in questo paragrafo): input applicato all'interfaccia sismica del profilo di velocità delle onde di taglio, che raggiunge una V_s di circa 800 m/s;
- modalità 2 (*Paragrafo 4.3.2.5*): input applicato all'interfaccia che raggiunge una velocità maggiore di 800 m/s, ma di intensità ridotta;
- modalità 3 (*Paragrafo 4.3.2.6*): input applicato all'interfaccia che raggiunge una velocità maggiore di 800 m/s.

In tale paragrafo ci si sofferma sui risultati delle analisi elastiche equivalenti di risposta sismica locale effettuate per i 7 accelerogrammi spettrocompatibili di riferimento secondo modalità 1 e per un totale di 200 modelli monodimensionali del terreno (100 tipo A e 100 tipo B).

Si illustrano gli spettri di risposta elastici con rapporto di smorzamento al 5% e la relativa funzione di amplificazione, ottenuta dal rapporto della risposta all'input sismico in termini di accelerazione in superficie rispetto la condizione di riferimento (*Figure 65-78*). I risultati sono stati rappresentati sul piano semi-logaritmico, in modo tale da permettere una migliore lettura dei grafici a periodi bassi.

Input – 3A.MZ11..HNE.D.20161030.064018

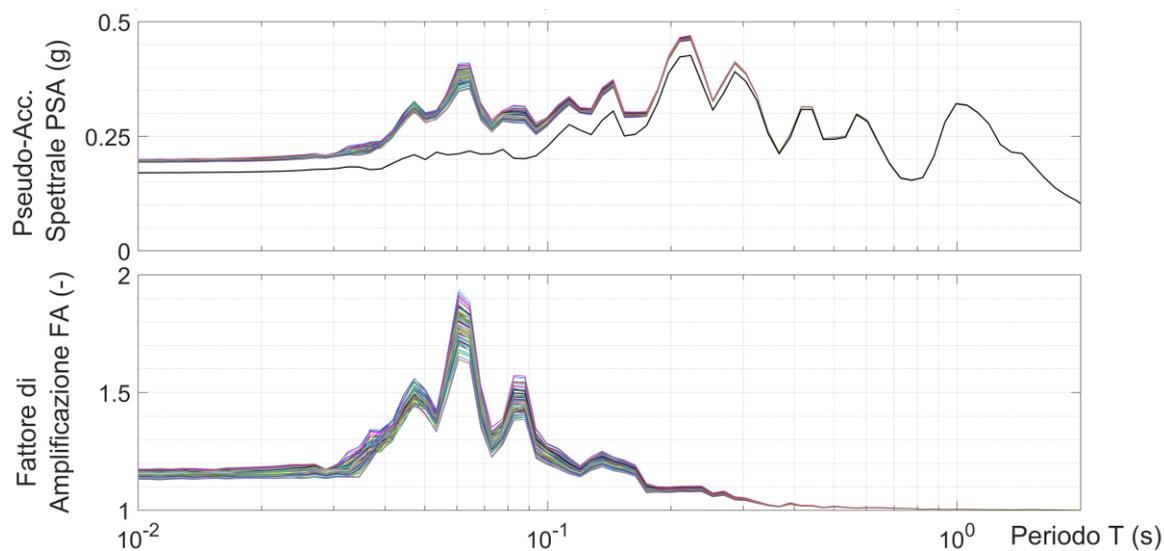


Figura 65. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo A – Input 3A.MZ11..HNE.D20161030.064018

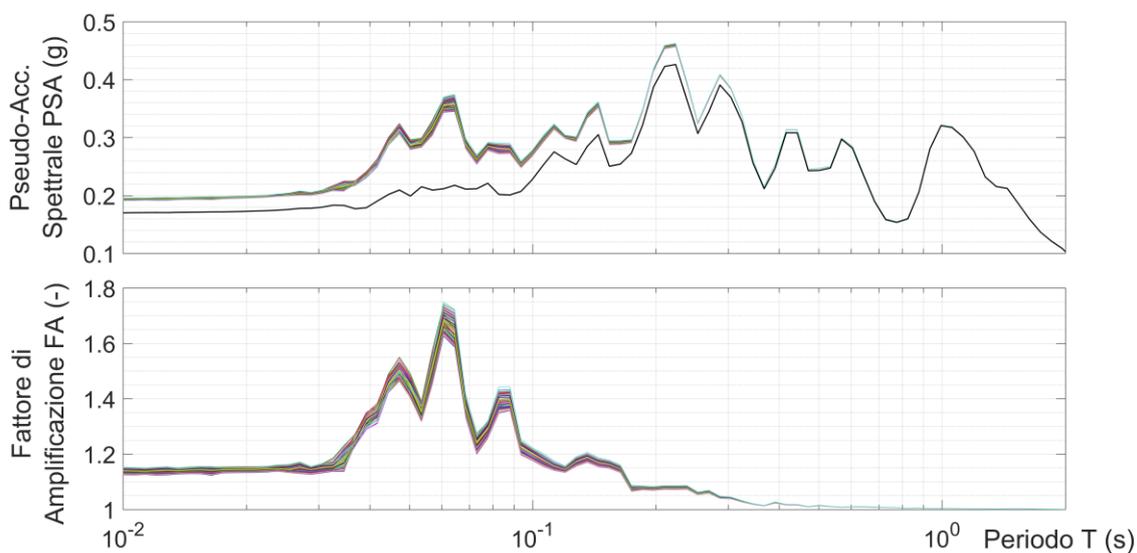


Figura 66. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input 3A.MZ11..HNE.D20161030.064018

Input – 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018

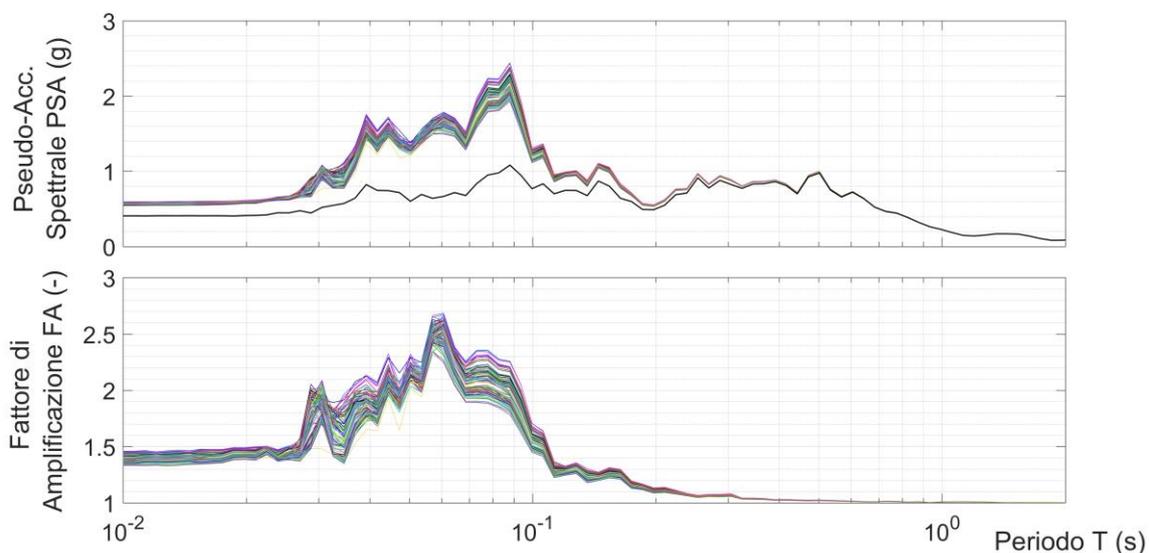


Figura 67. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo A – Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018

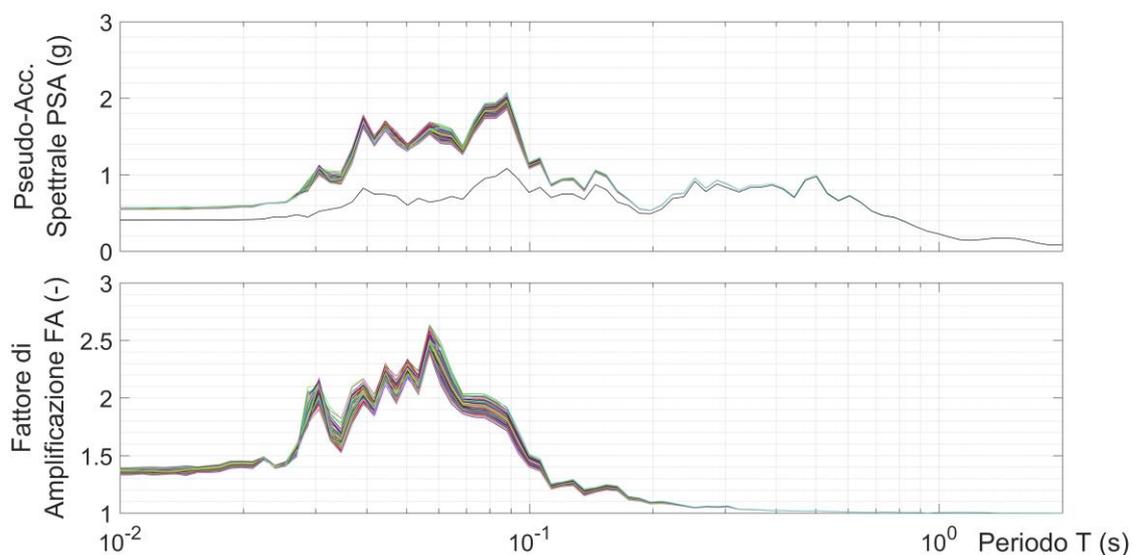


Figura 68. Spettri di risposta elastici (a sinistra) e funzioni di amplificazione (a destra) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018

Input – IT.CLO..HGE.D.20161026.191806

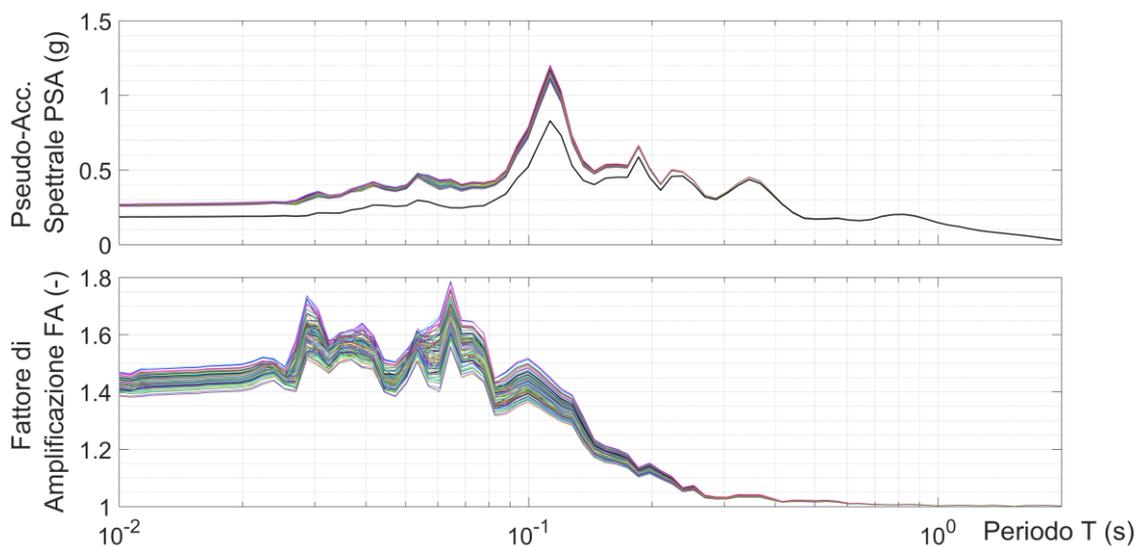


Figura 69. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo A – Input IT.CLO..HGE.D20161026.191806

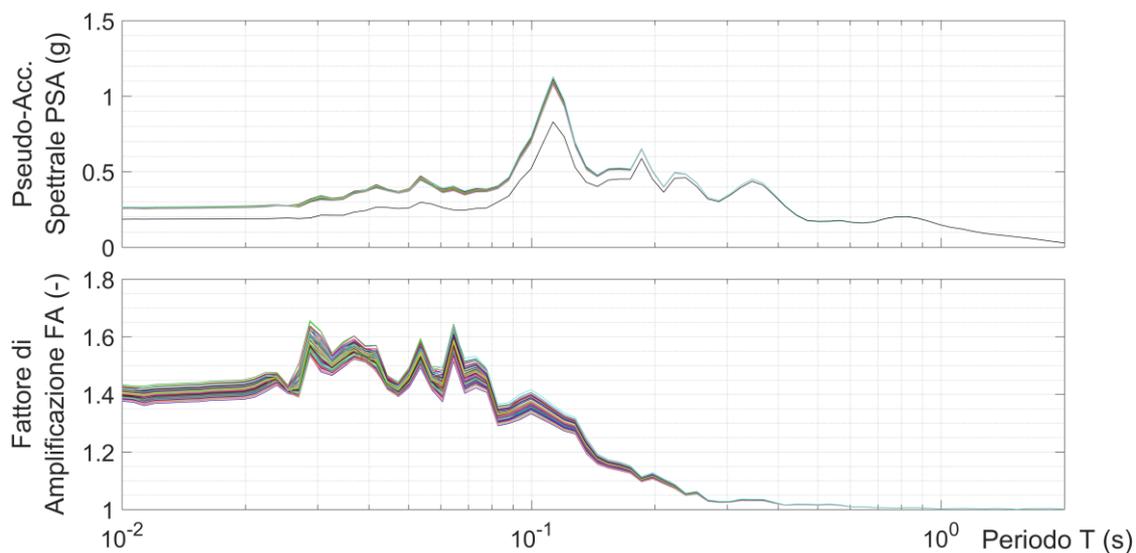


Figura 70. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IT.CLO..HGE.D20161026.191806

Input – IT.CLO..HGN.D.20161026.191806

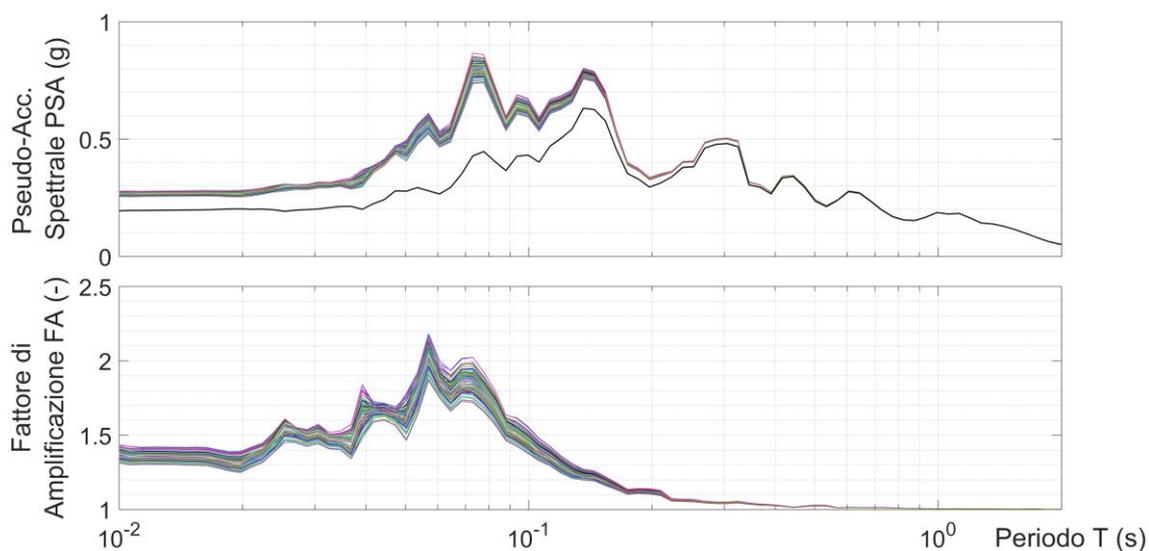


Figura 71. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo A – Input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806

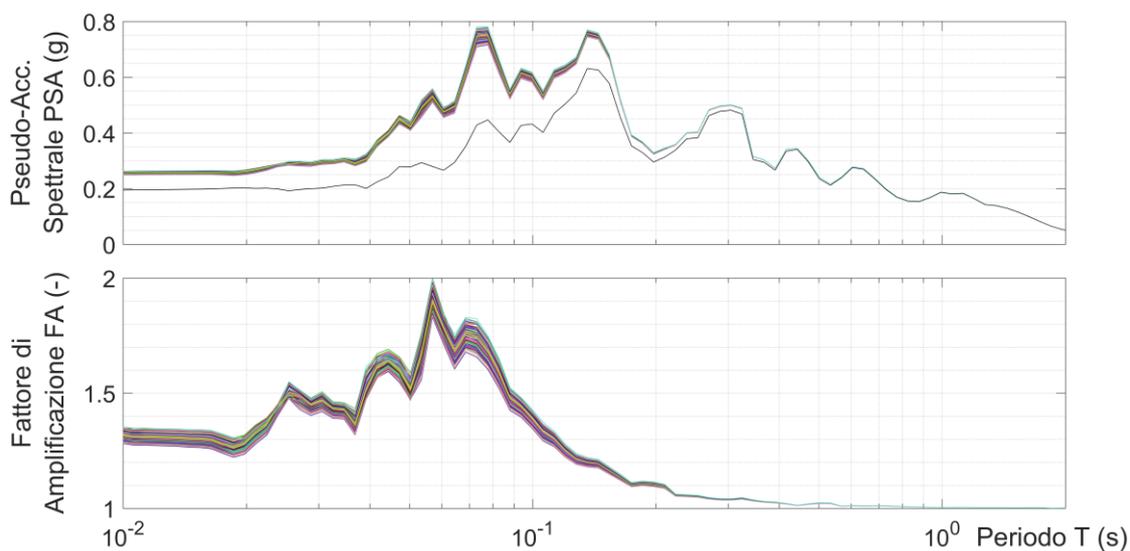


Figura 72. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806

Input – IT.MMO..HGE.D.20161026.064018

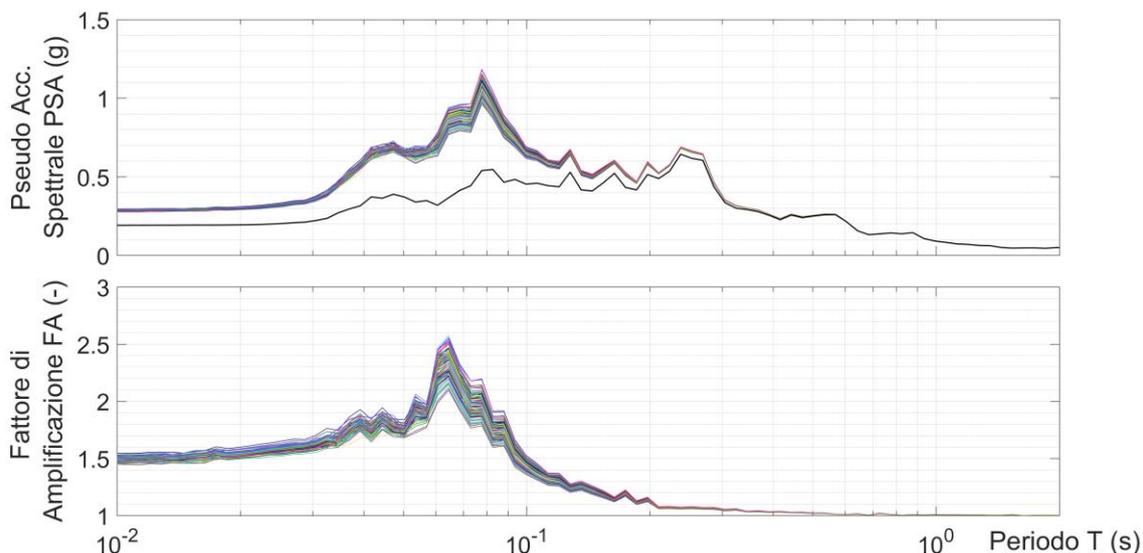


Figura 73. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo A – Input IT.MMO..HGE.D.20161026.064018

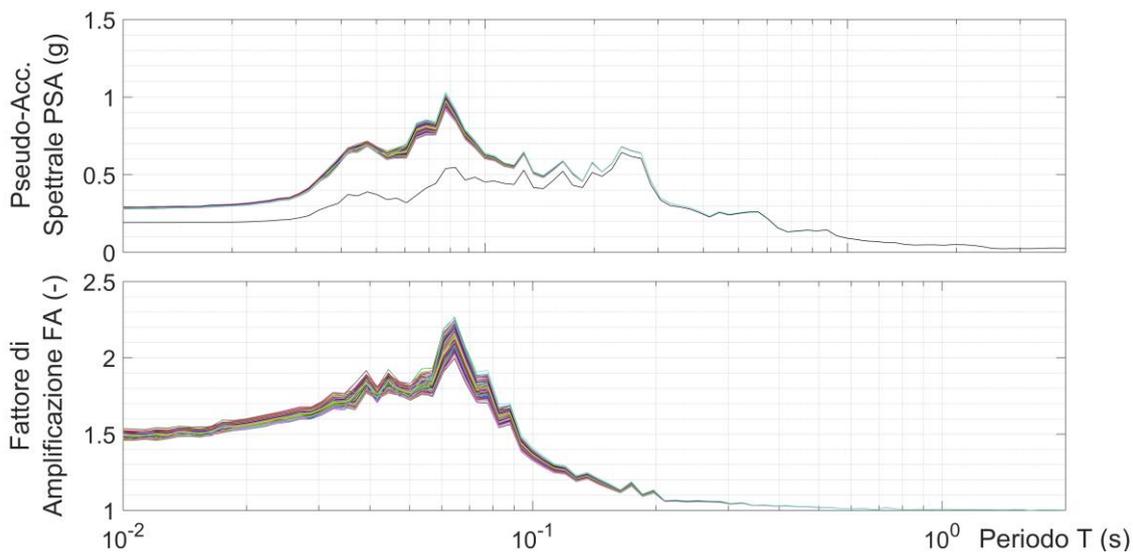


Figura 74. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IT.MMO..HGE.D.20161026.064018

Input – IT.MMO..HGN.D.20161026.064018

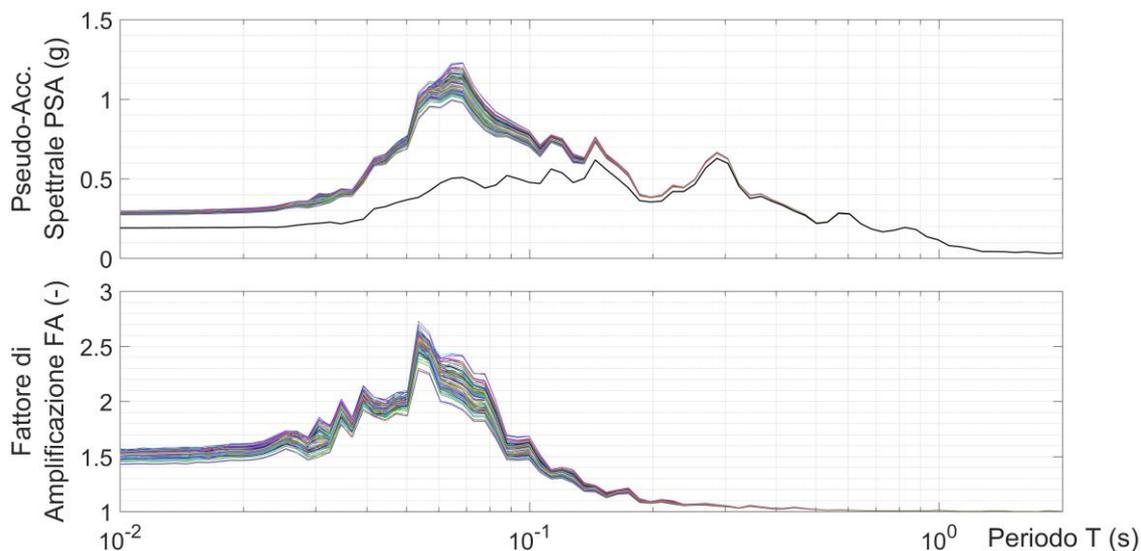


Figura 75. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo A – Input IT.MMO..HNN.D.20161026.064018

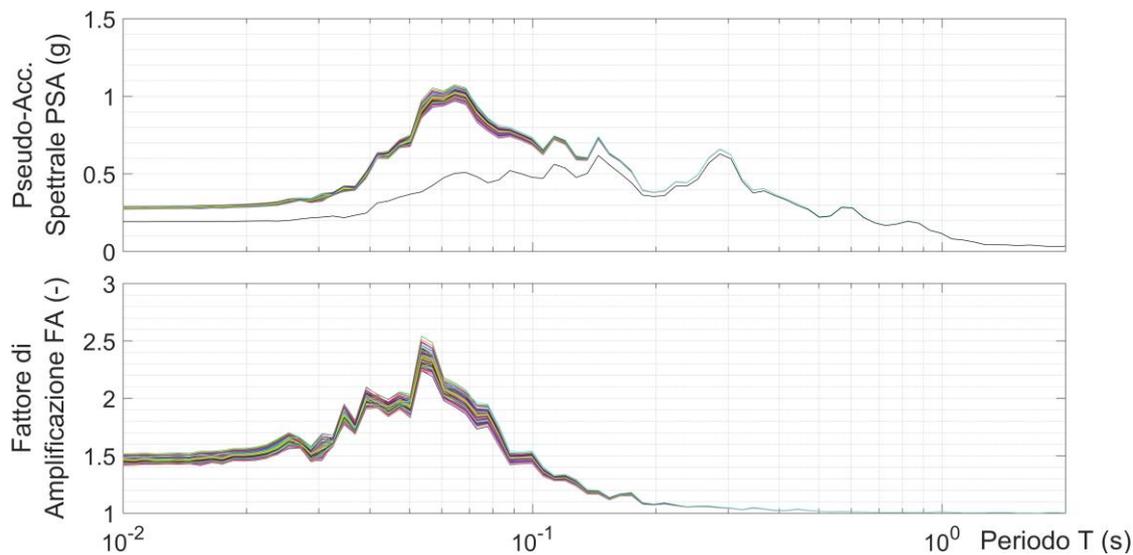


Figura 76. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IT.MMO..HNN.D.20161026.064018

Input – IV.T1212..HGE.D.20161026.171036

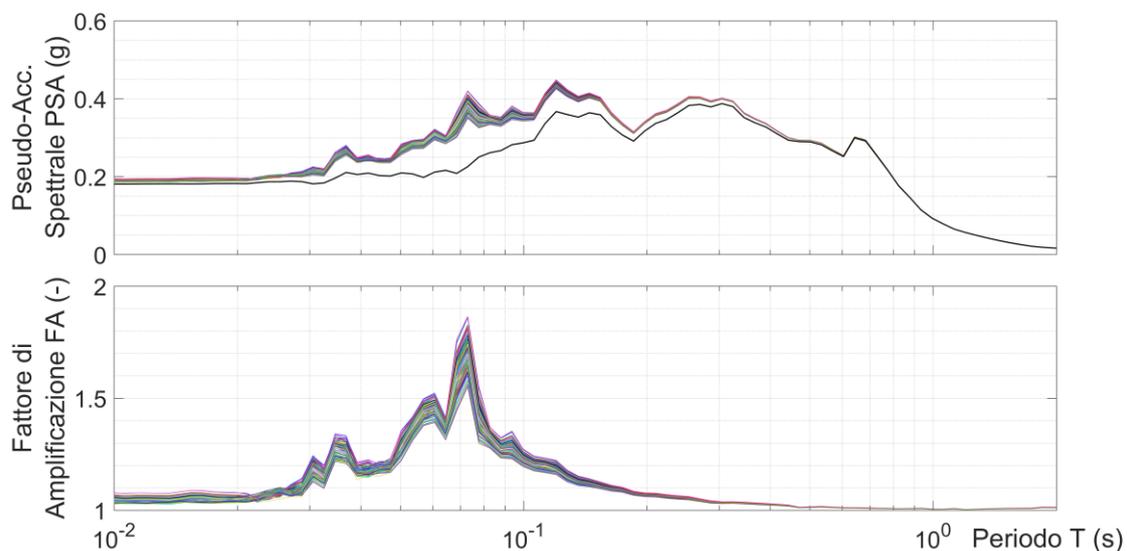


Figura 77. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo A – Input IV.T1212..HNE.D.20161026.171036

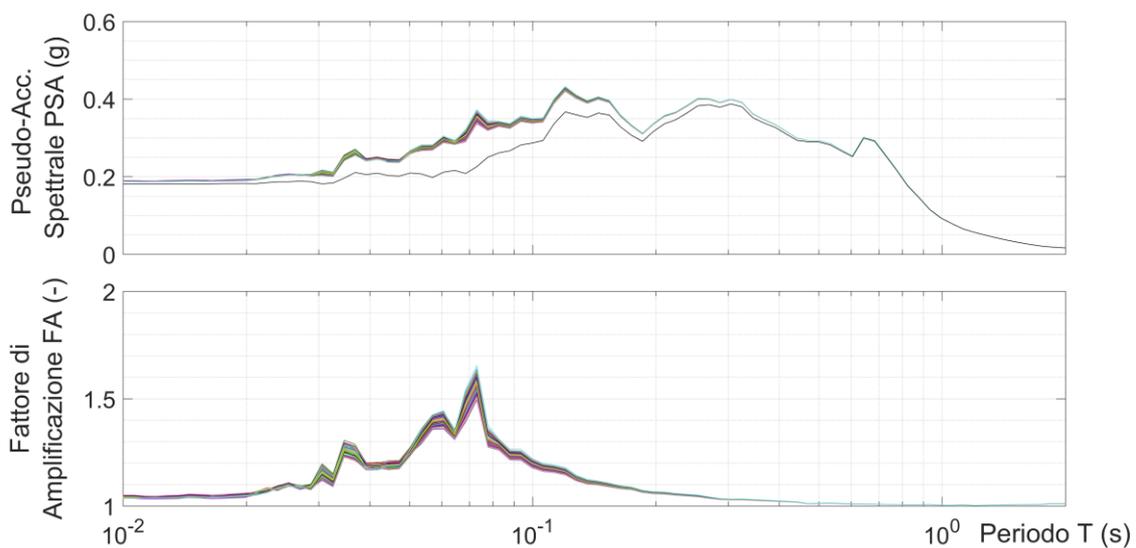


Figura 78. Spettri di risposta elastici (a sinistra) e funzioni di amplificazione (a destra) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IV.T1212..HNE.D.20161026.171036

➤ Confronto della risposta media per le due tipologie di modelli multistrato

Si vuole definire in che modo cambia la risposta globale del deposito all'applicazione degli scuotimenti di riferimento in modalità 1, in funzione della variabilità dei profili ottenuti dalle inversioni. Questo aspetto viene esaminato sulla base di una operazione di media dei dati precedentemente raccolti, sia per quanto riguarda l'analisi spettrale, sia per i relativi fattori di amplificazione.

Di seguito quindi si confrontano gli spettri medi e le funzioni di amplificazioni medie per le diverse tipologie di profili e per ogni input (*Figure 79-85*). Gli andamenti medi sono stati tracciati in linea continua; le linee tratteggiate rappresentano invece le curve medie e deviazione standard associata ($\mu \pm \sigma$).

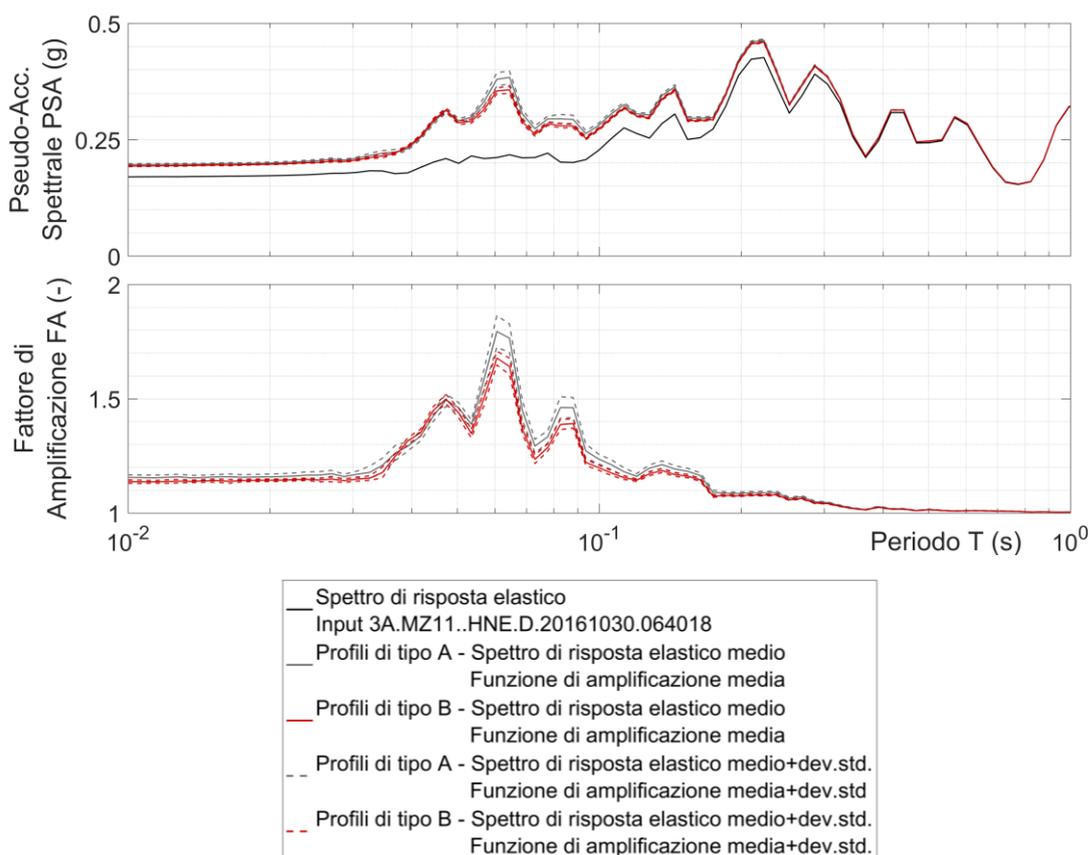


Figura 79. Confronto risultati - Input 3A.MZ11..HNE.D20161030.064018. In alto spettri di risposta per profili A e B; in basso funzioni di amplificazioni per profili di tipo A e B

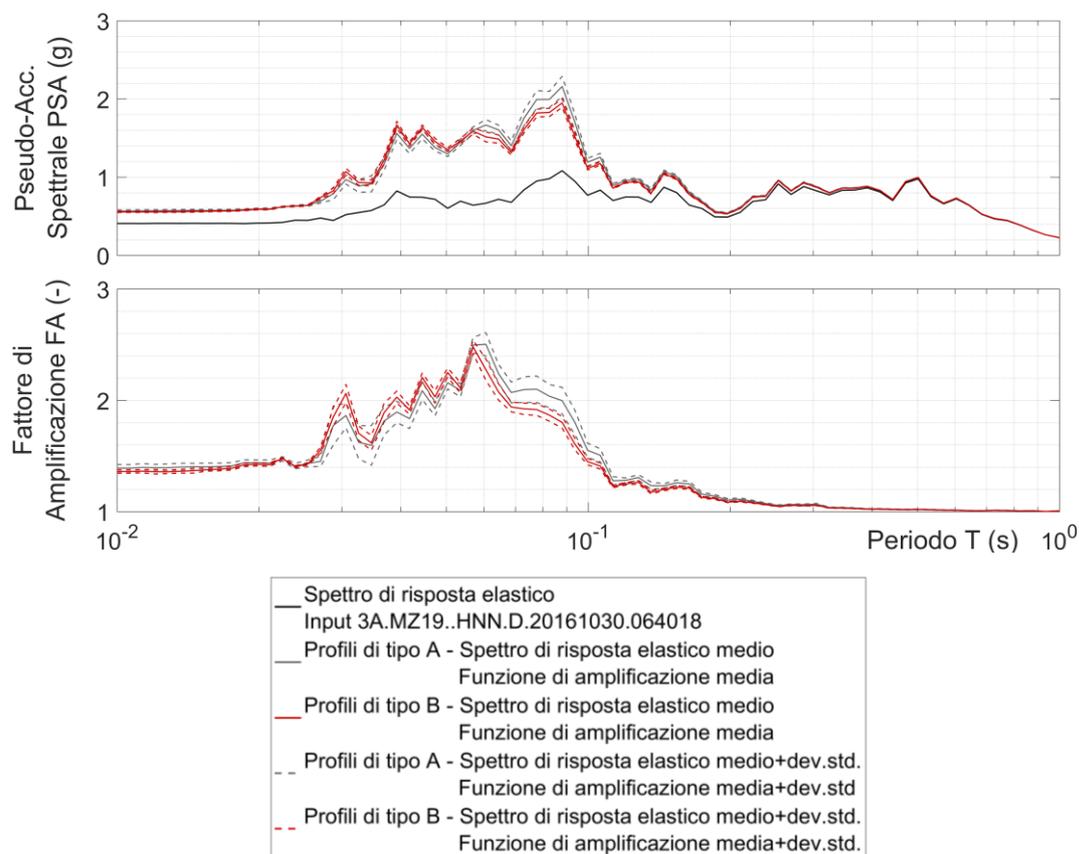


Figura 80. Confronto risultati – Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018. In alto spettri di risposta medi per profili A e B; in basso funzioni di amplificazioni medie per profili di tipo A e B

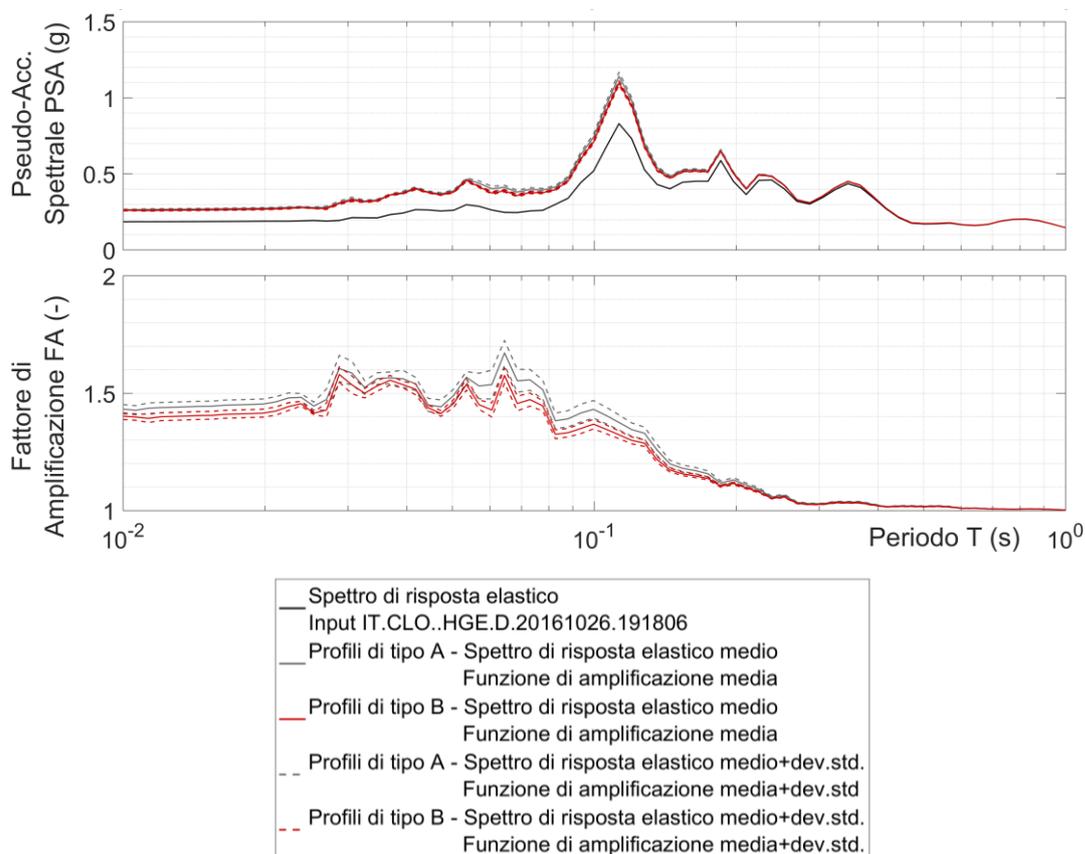


Figura 81. Confronto risultati – Input IT.CLO..HGE.D.20161026.191806. In alto spettri di risposta medi per profili A e B; in basso funzioni di amplificazioni medie per profili di tipo A e B

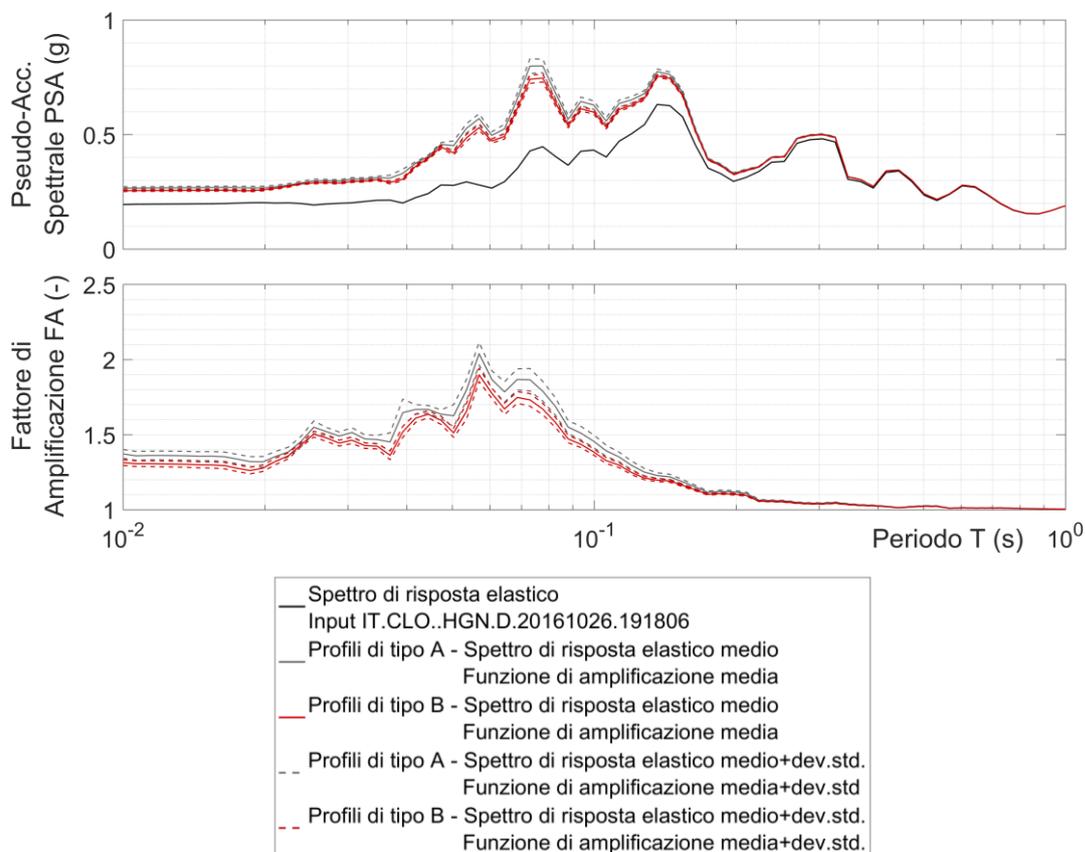


Figura 82. Confronto risultati – Input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806. In alto spettri di risposta medi per profili A e B; in basso funzioni di amplificazioni medie per profili di tipo A e B

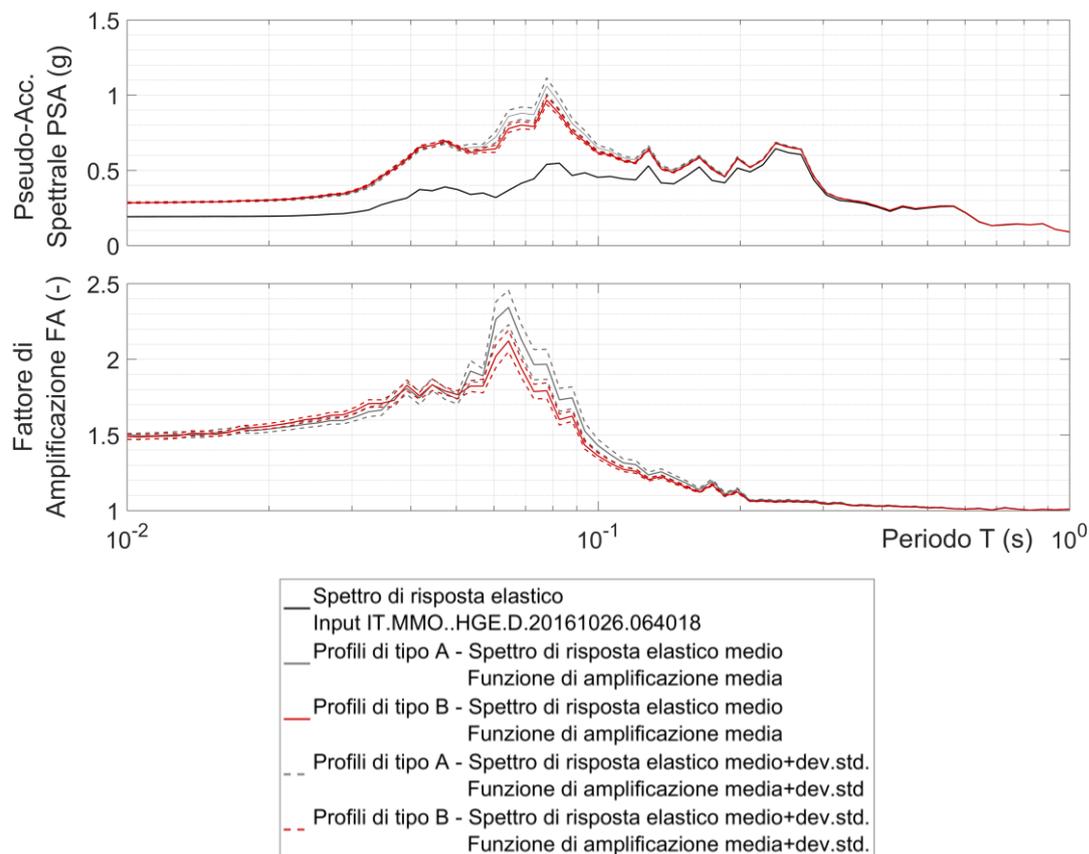


Figura 83. Confronto risultati – Input IT.MMO..HGE.D.20161026.064018. In alto spettri di risposta medi per profili A e B; in basso funzioni di amplificazioni medie per profili di tipo A e B

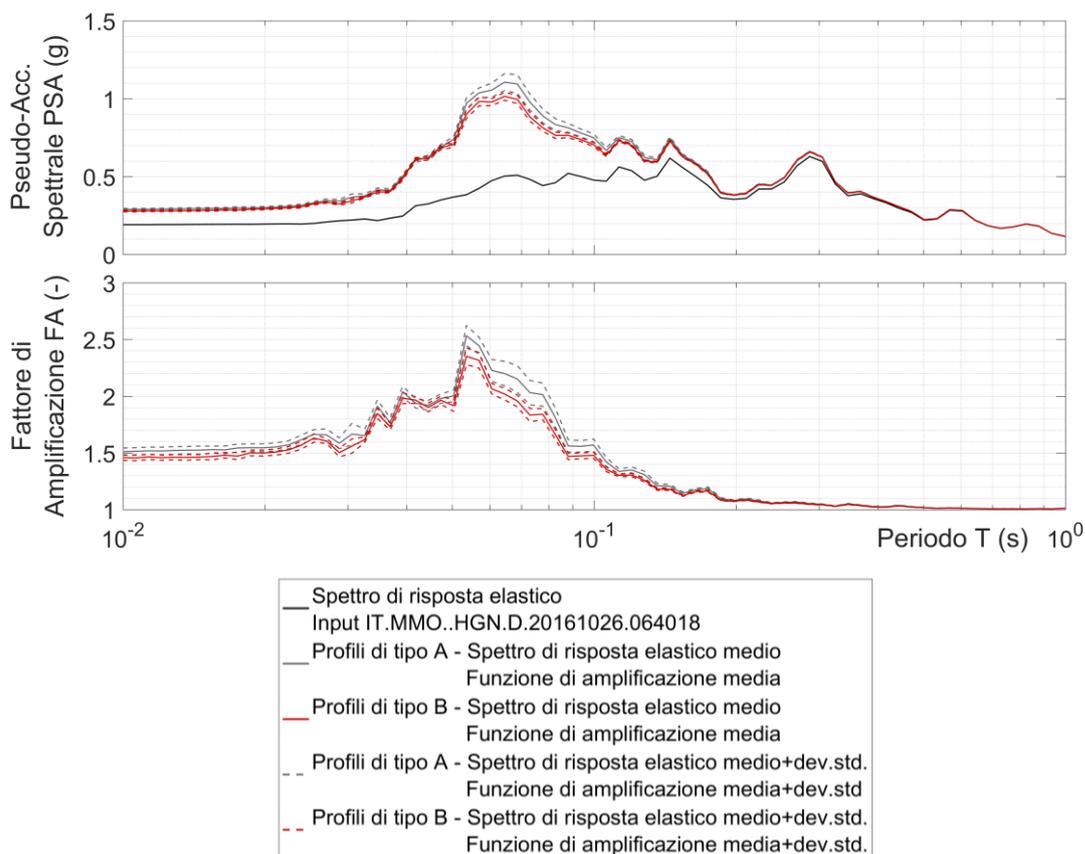


Figura 84. Confronto risultati – Input IT.MMO..HGN.D.20161026.064018. In alto spettri di risposta medi per profili A e B; in basso funzioni di amplificazioni medie per profili di tipo A e B

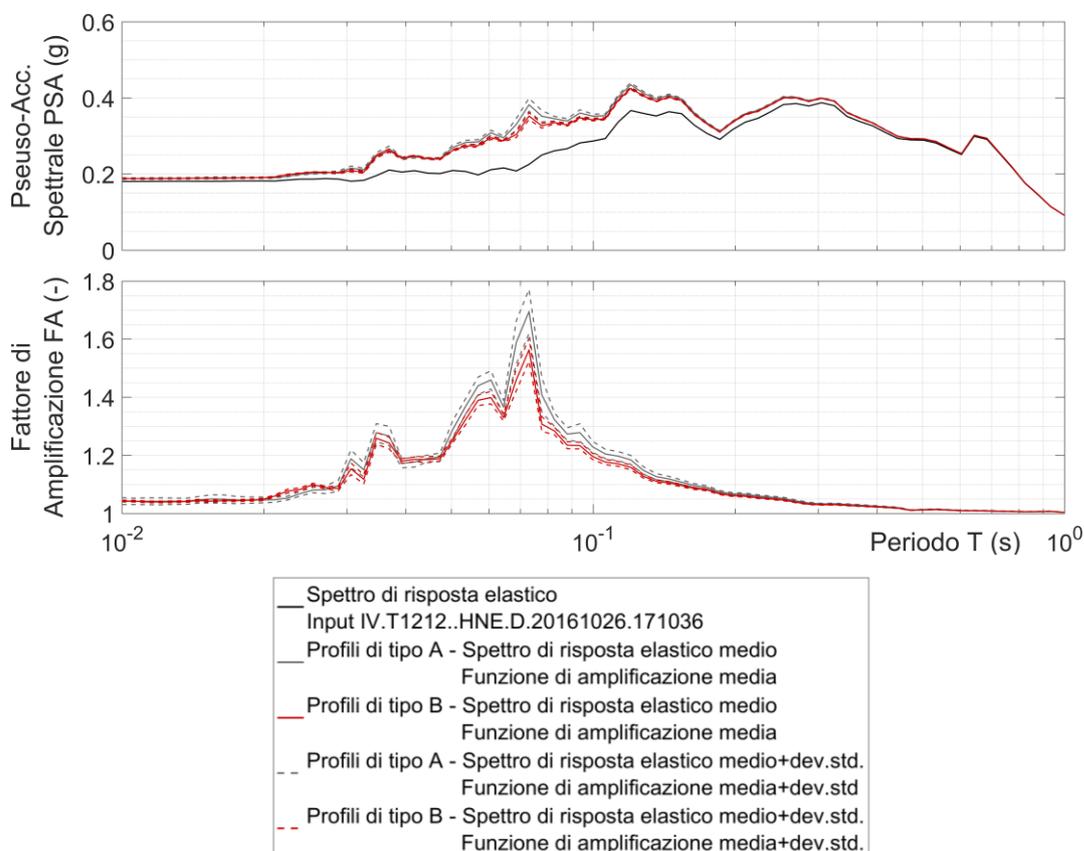


Figura 85. Confronto risultati – Input IV.T1212..HNE.D.20161026.171036. In alto spettri di risposta medi per profili A e B; in basso funzioni di amplificazioni medie per profili di tipo A e B

Dalle figure sopra riportate, si denota una variabilità non marcata dei risultati per i due modelli multistrato di terreno (A e B), evidentemente perché le simulazioni eseguite si traducono in analisi effettuate per profili abbastanza simili in termini di velocità e profondità. La variabilità più accentuata per i profili di tipo B rispetto ai profili di tipo A è riscontrabile per profondità intorno ai 30 m, ma in questo caso l'interfaccia sismica a 800 m/s è identificabile nell'intorno dei 15 m per entrambe le tipologie di profili.

➤ Confronto della risposta media con lo spettro di normativa

Facendo riferimento agli spettri di risposta elastici in *Figura 86*, corrispondenti alle storie di accelerazione di input, si vogliono confrontare i risultati ottenuti dalle analisi di risposta sismica locale di tipo lineare equivalente, eseguite rispettivamente per le tipologie di profili A e B, con lo spettro di normativa.

In *Figura 86* si ricapitola la spetrocompatibilità degli input sismici di riferimento: lo spettro medio (in nero) indica la media degli spettri di input considerati, il cui andamento rappresenta adeguatamente lo spettro di pericolosità uniforme (in blu), assunto dall'analisi di pericolosità in sito.

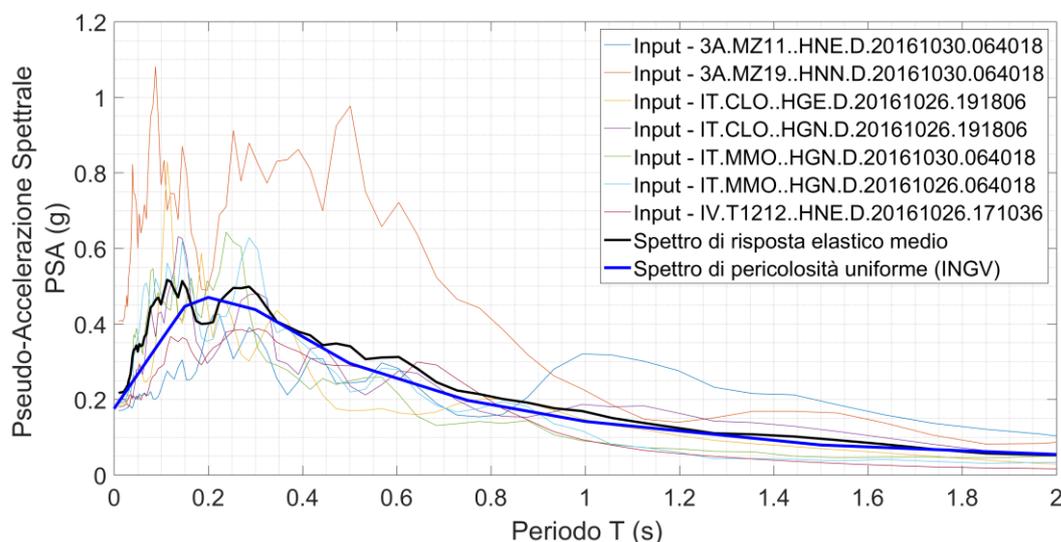


Figura 86. Spettri di risposta elastici di input (curve colorate), spettro di risposta elastico medio (in nero) e spettro di pericolosità uniforme (in blu)

Si riportano di seguito i risultati restituiti dalle simulazioni lineari equivalenti per i 7 input spetrocompatibili in modalità 1 e per la configurazione A di profili. La *Figura 87* mostra l'andamento delle pseudo-accelerazioni spettrali medie al variare del periodo per ogni input e la curva in grigio definisce la media degli spettri medi per i medesimi input.

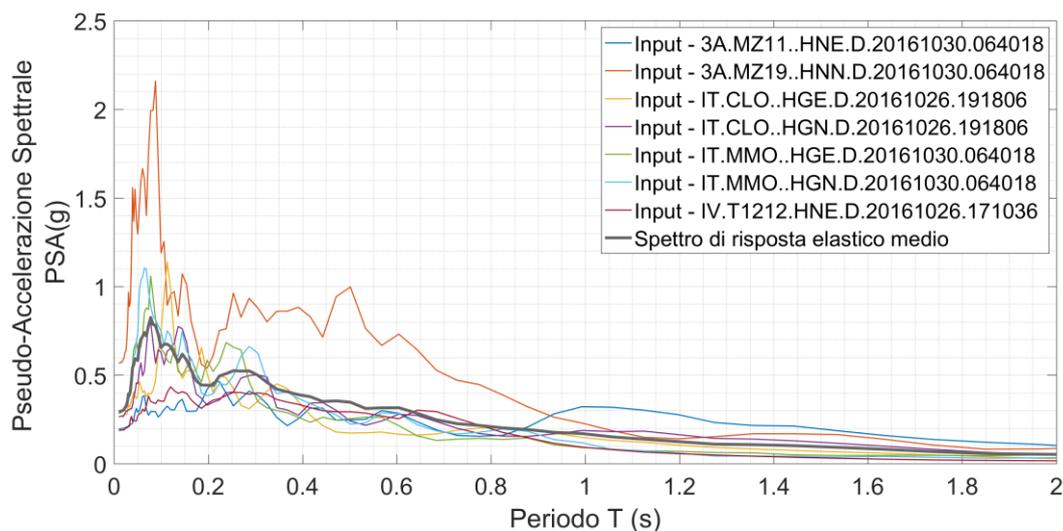


Figura 87. Spettri di risposta elastici medi da analisi lineare equivalente (curve colorate distinte per ogni input) e spettro di risposta elastico medio (in grigio) – Profili di tipo A

Nel dettaglio (*Figura 88*) si illustra il confronto tra gli spettri di input e gli output ottenuti dalle analisi di risposta sismica locale per profili di tipo A. La curva in blu (con marker *) rappresenta lo spettro di risposta a pericolosità uniforme moltiplicato per la funzione di amplificazione, dedotta dal comportamento medio del terreno in risposta agli input sismici. Tale spettro viene confrontato con lo spettro di risposta elastico medio, risultato delle simulazioni lineari equivalenti (curva in grigio). Si osserva come, per i bassi periodi (0-0.2 s), lo spettro di risposta elastico medio da RSL non rispecchia l'andamento dello spettro di pericolosità uniforme amplificato.

Sono inoltre tracciati gli spettri di risposta elastici di normativa per categoria di sottosuolo A e B (curve in verde), in forma semplificata ed ottenuti secondo le formulazioni espone nel *Paragrafo 3.2.3.2.1* delle *NTC2018*.

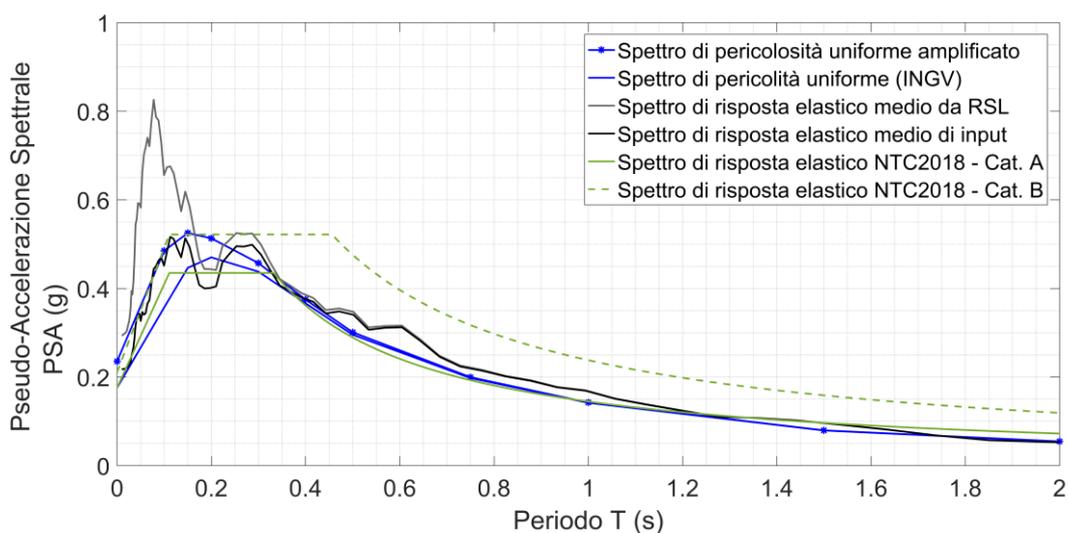


Figura 88. Confronto tra lo spettro di risposta elastico medio da RSL con gli spettri di normativa per profili di tipo A

Lo stesso approccio viene applicato nei riguardi delle analisi condotte per i modelli di terreno tipo B. Data l’analogia dei risultati delle simulazioni eseguite per le due classi di profili (nel caso di applicazione dell’input in modalità 1), il confronto della risposta media del deposito secondo i profili di tipo B con lo spettro di normativa riconferma le evidenze precedenti.

4.3.2.5 Elaborazione dei risultati delle analisi elastiche equivalenti con applicazione dell'input sismico in modalità 2

Ci si propone di confrontare i risultati illustrati nel *Paragrafo 4.3.2.4* con gli output delle simulazioni ottenuti dall'elaborazione di analisi lineari equivalenti condotte applicando l'input all'interfaccia che supera gli 800 m/s.

Affinché questo confronto possa sussistere, si ipotizza di moltiplicare le accelerazioni degli input sismici per un coefficiente di riduzione pari a 0.8, valutato come rapporto tra le velocità mediamente raggiunte ai 15 m e le velocità mediamente raggiunte ai 30 m circa.

Tale fattore di riduzione delle accelerazioni tiene in conto di come varia l'interazione della perturbazione ad interfacce con velocità diversa, quindi a rigidità diversa, e viene applicato proprio per prendere in considerazione l'informazione geofisica al di sotto del bedrock sismico, che altrimenti andrebbe persa applicando l'input di riferimento all'interfaccia a 800 m/s (modalità 1).

Si riportano di seguito i risultati delle analisi elastiche equivalenti di risposta sismica locale effettuate per i 7 accelerogrammi spettrocompatibili con intensità ridotta e per i modelli monodimensionali di terreno di tipo B.

In maniera analoga al caso precedente, si illustrano gli spettri di risposta elastici con rapporto di smorzamento al 5% e la relativa funzione di amplificazione (*Figure 89-96*).

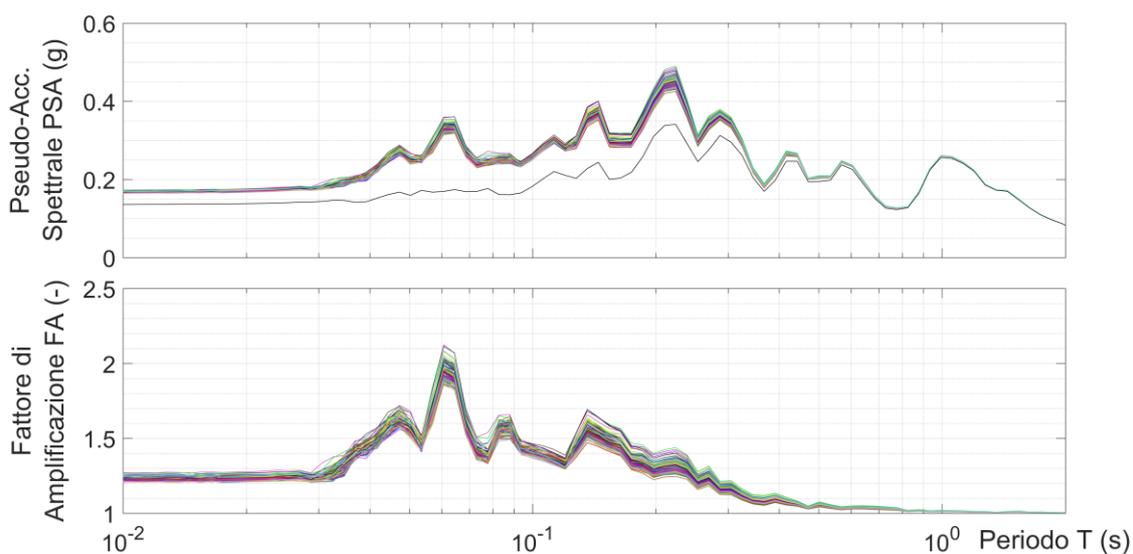


Figura 89. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input ridotto 3A.MZ11..HNE.D20161030.064018

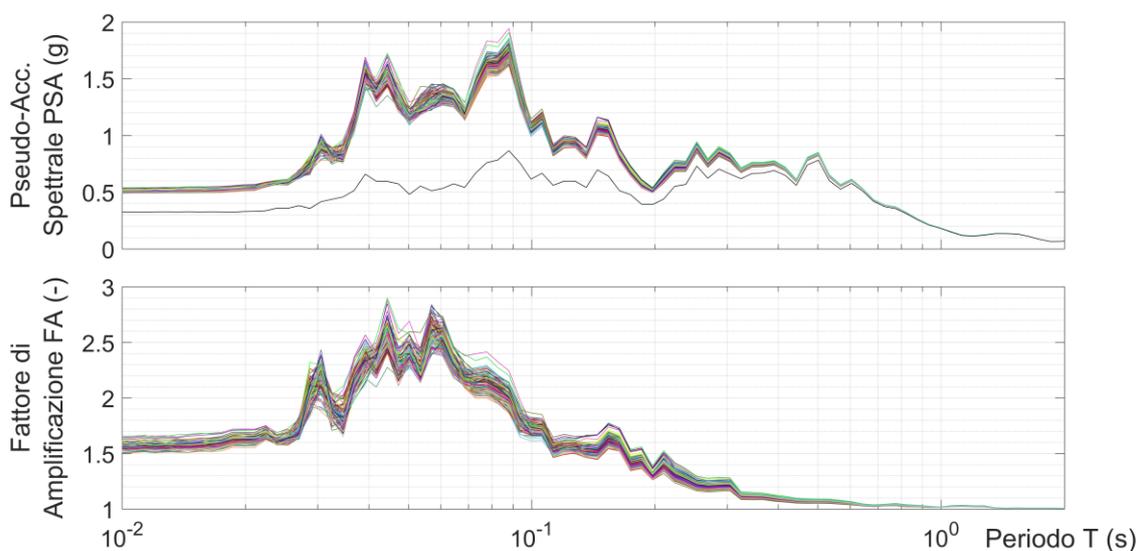


Figura 90. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input ridotto 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018

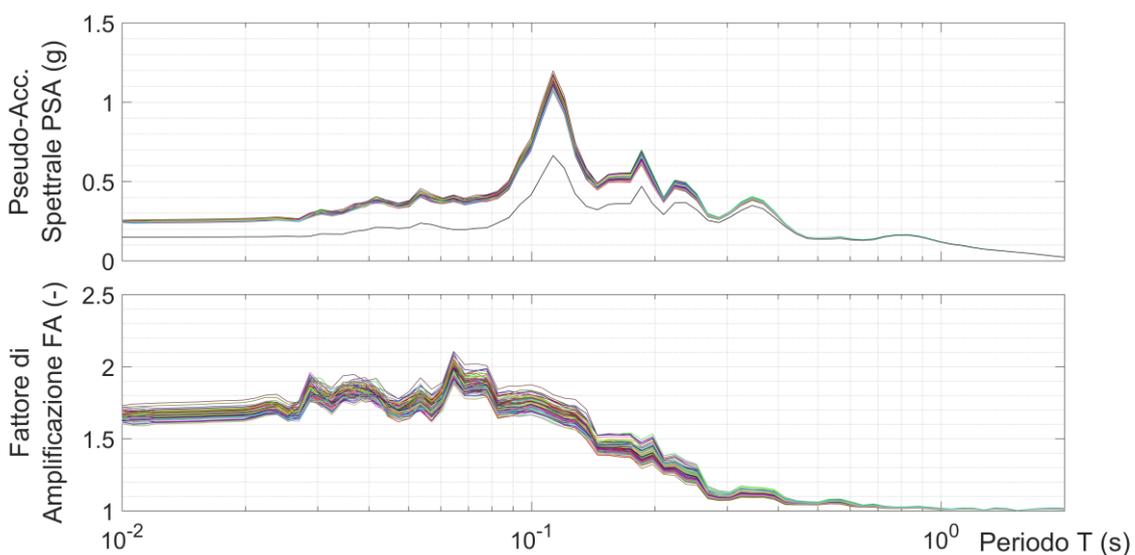


Figura 91. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input ridotto IT.CLO..HGE.D20161026.191806

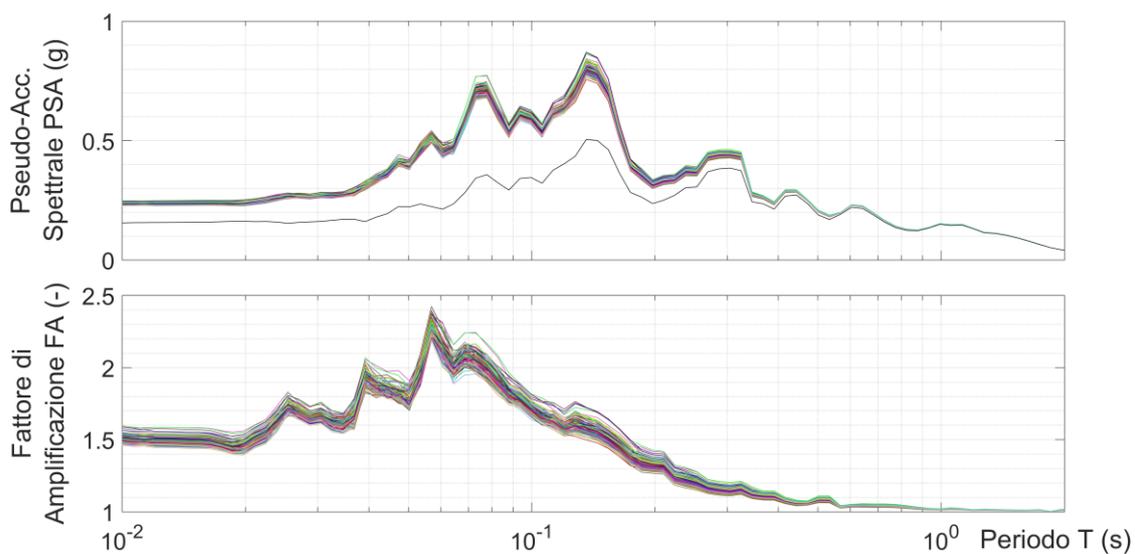


Figura 92. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input ridotto IT.CLO..HGN.D.20161026.191806

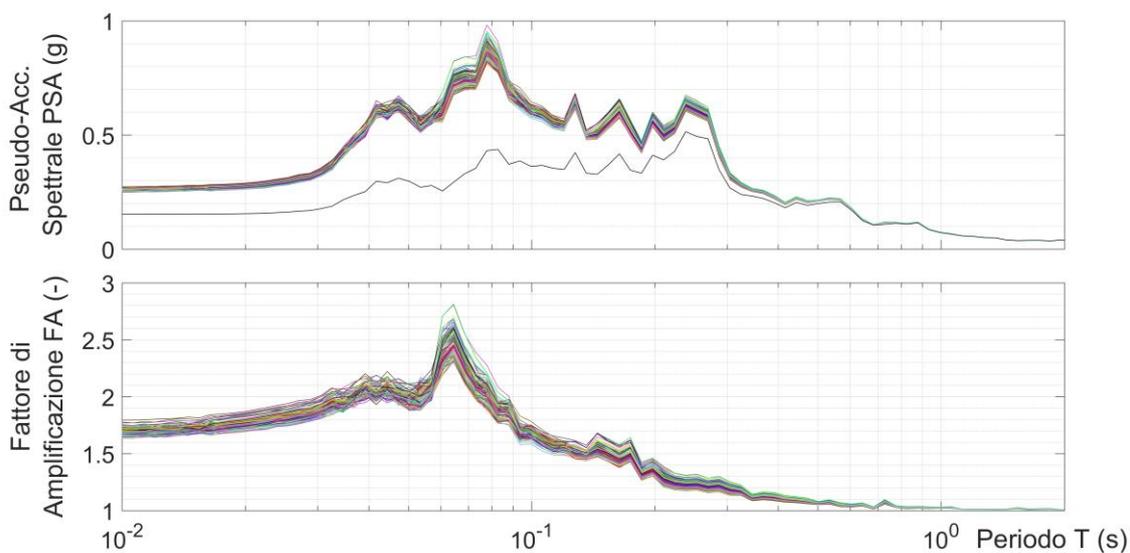


Figura 93. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input ridotto IT.MMO..HGE.D.20161026.064018

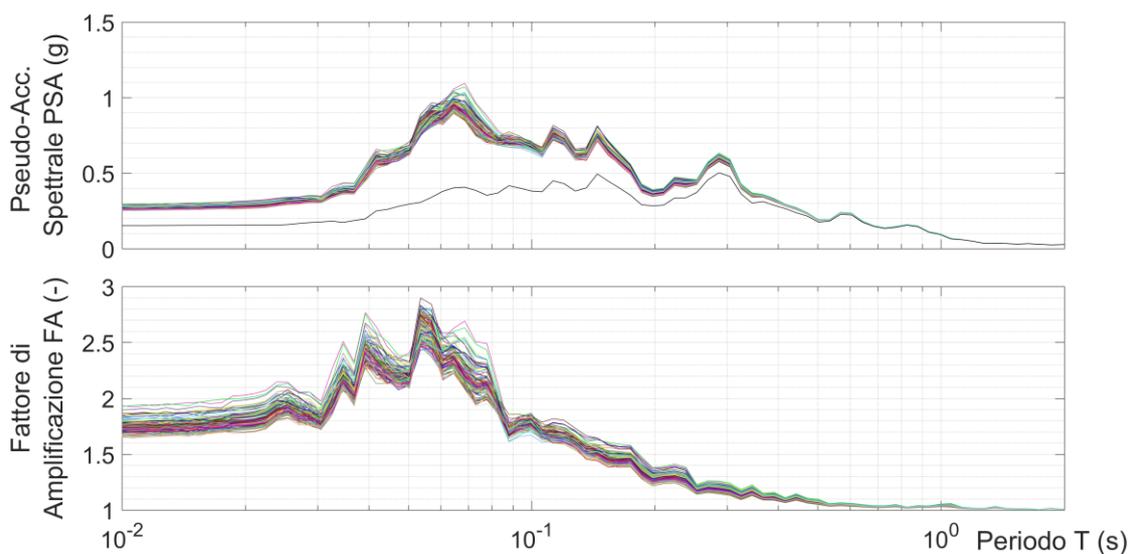


Figura 94. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input ridotto IT.MMO..HNN.D.20161026.064018

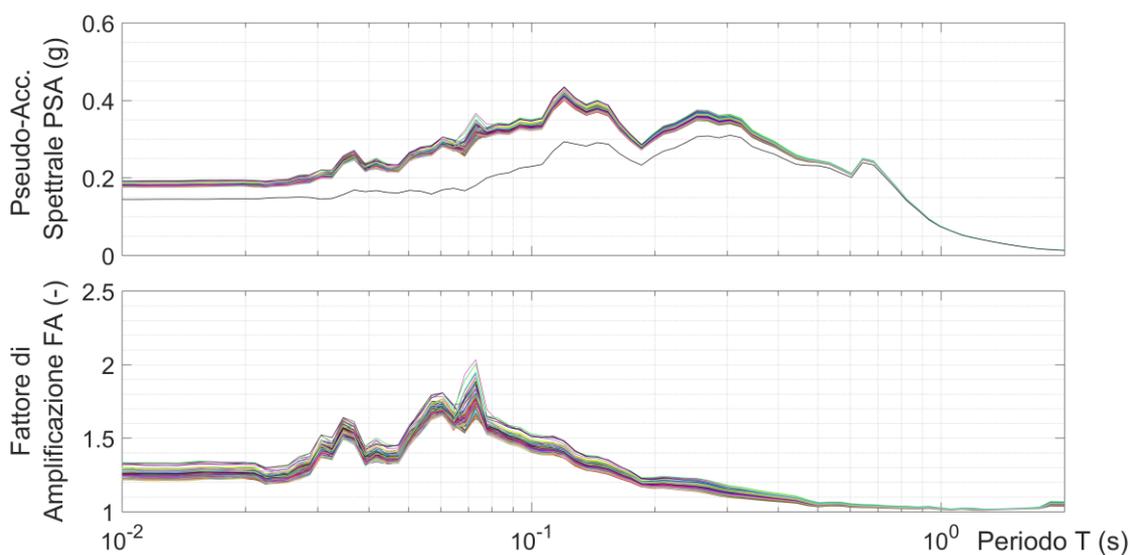


Figura 95. Spettri di risposta elastici (a sinistra) e funzioni di amplificazione (a destra) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input ridotto IV.T1212..HNE.D.20161026.171036

4.3.2.6 Elaborazione dei risultati delle analisi elastiche equivalenti con applicazione dell'input sismico in modalità 3

In ultima analisi, si esaminano i risultati ottenuti dalle analisi elastiche equivalenti per profili di tipo B, con applicazione dell'input sismico alla base della colonna di terreno che raggiunge velocità maggiori di 800 m/s, senza modificarne l'intensità (Figure 96-102).

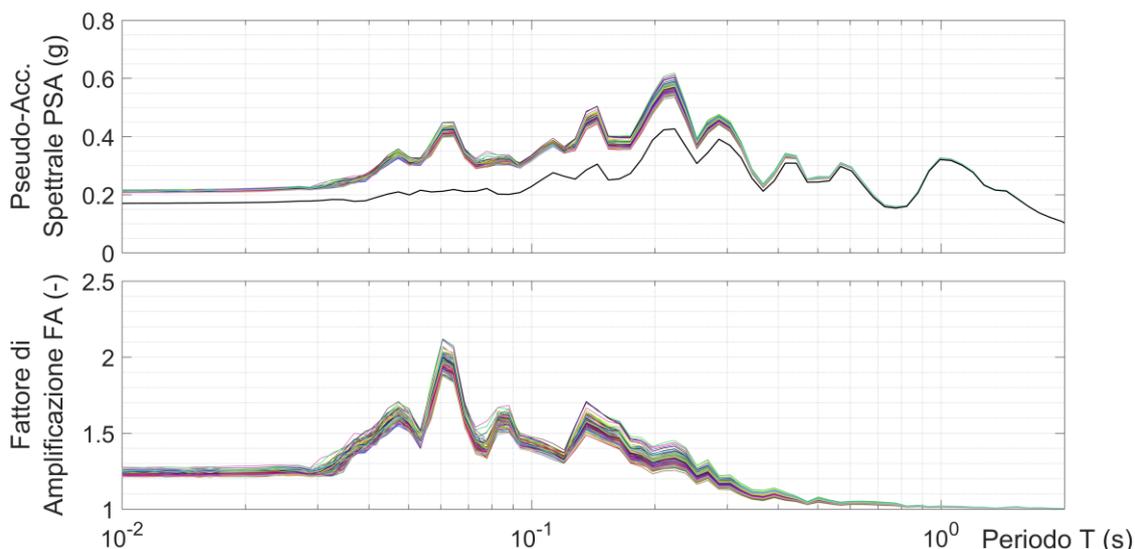


Figura 96. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input 3A.MZ11..HNE.D20161030.064018

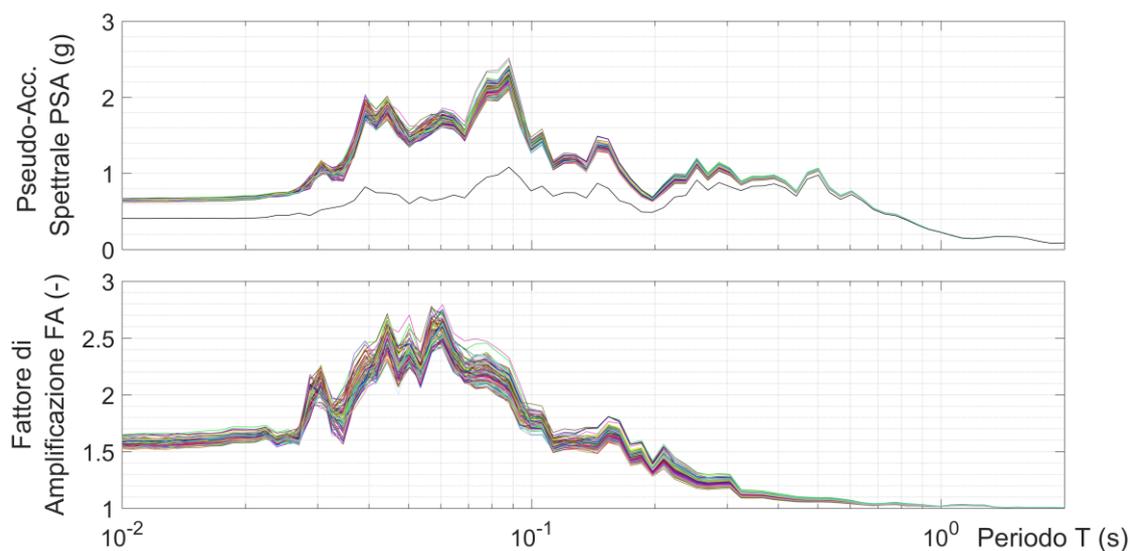


Figura 97. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018

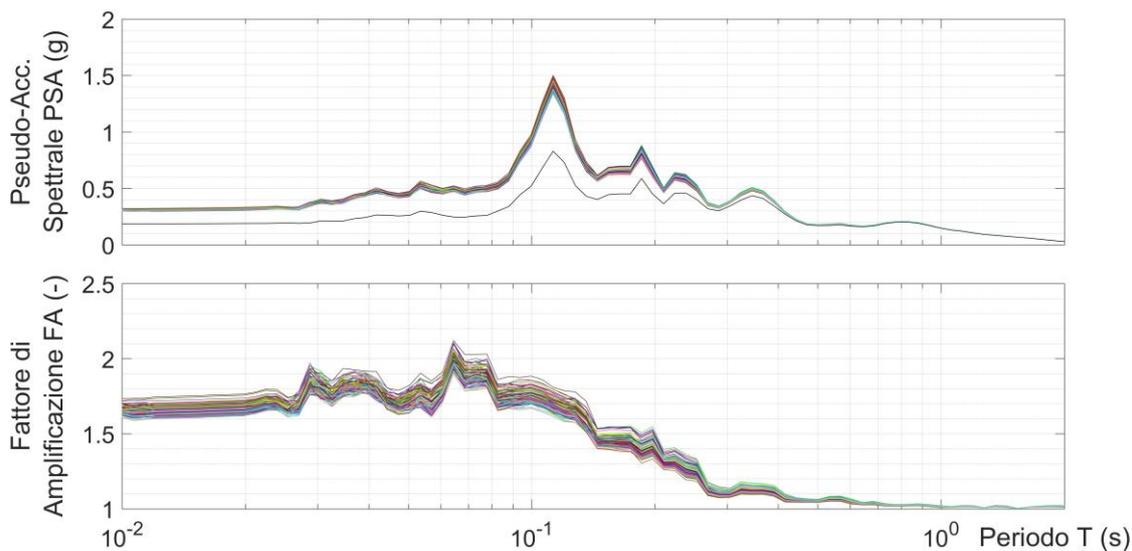


Figura 98. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IT.CLO..HGE.D20161026.191806

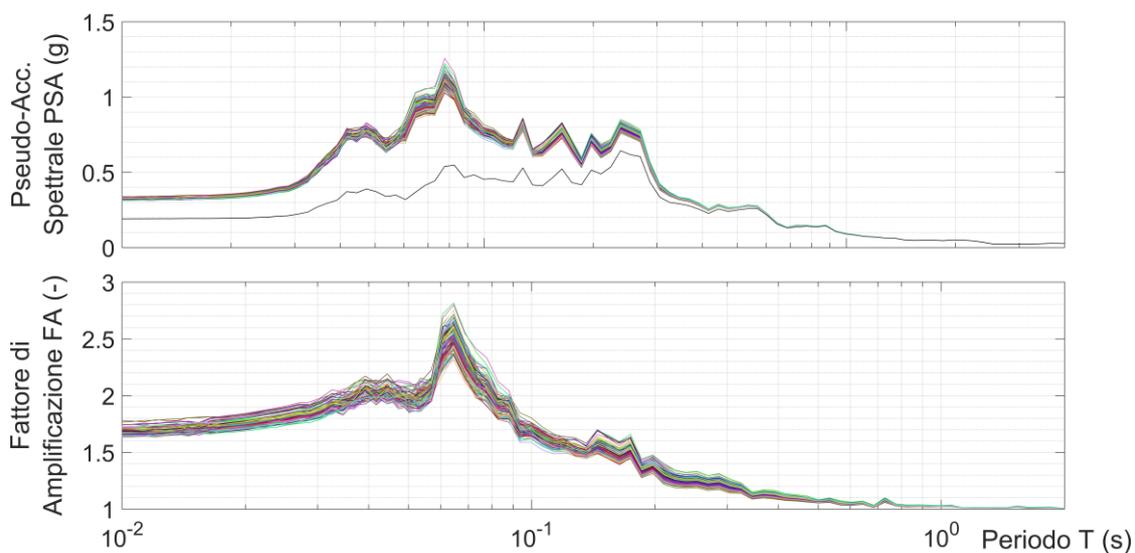


Figura 99. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806

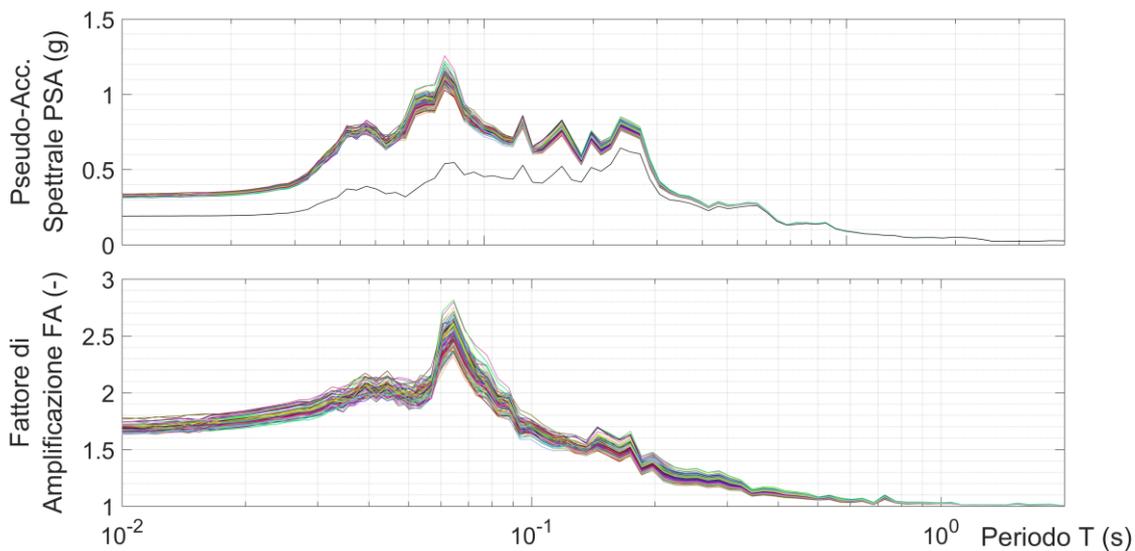


Figura 100. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IT.MMO..HGE.D.20161026.064018

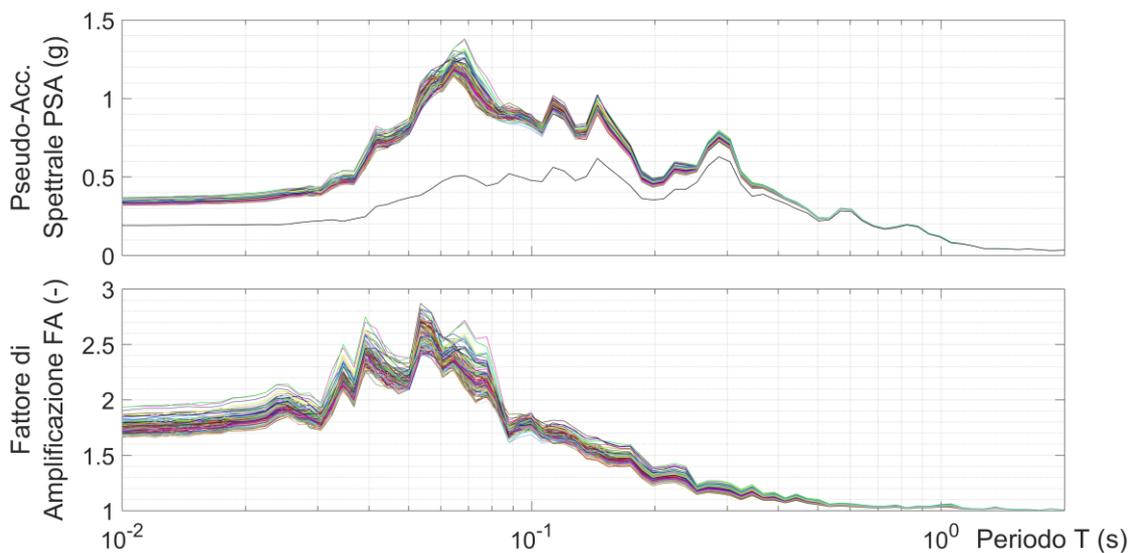


Figura 101. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IT.MMO..HNN.D.20161026.064018

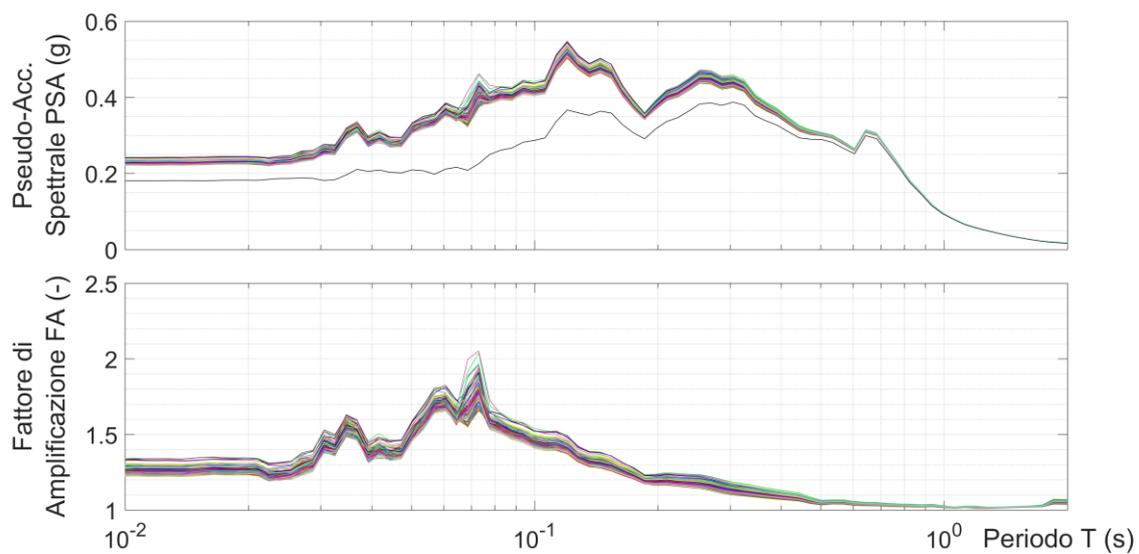


Figura 102. Spettri di risposta elastici (in alto) e funzioni di amplificazione (in basso) da analisi elastica equivalente per profili di tipo B – Input IV.T1212..HNE.D.20161026.171036

4.3.2.7 Confronto dei risultati ed osservazioni

In prima analisi, si valuta come variano i risultati delle simulazioni lineari equivalenti a seconda delle modalità di applicazione degli input sismici, sulla base degli spettri di risposta elastici medi ($\xi=5\%$) in scala semi-logaritmica.

In definitiva si dimostra come, nonostante nelle analisi di risposta sismica locale generalmente l'input di riferimento venga applicato in corrispondenza del bedrock sismico ($V_s = 800$ m/s – modalità 1), si possa sfruttare la caratteristica geofisica acquisita a maggiori profondità, spostando l'applicazione dell'input di riferimento al fondo della colonna di terreno, zona in cui si è individuata una rigidità maggiore.

In generale si denota l'equivalenza tra la modalità 1 e la modalità 2 di applicazione dell'input: le simulazioni condotte secondo modalità 2 hanno permesso di considerare la presenza di una interfaccia più rigida a profondità sotto i 15 m, andando però allo stesso tempo a ridurre l'intensità dell'input sismico. In questo modo sono state ottenute due condizioni confrontabili: è evidente come la risposta media spettrale per la modalità 2 segua l'andamento spettrale per la modalità 1 al variare del periodo T.

Gli spettri medi ottenuti dalle simulazioni per la modalità 3 hanno invece un andamento che si discosta dai precedenti: ipotizzando di non modificare l'intensità dell'input, i profili di terreno considerati includono quell'interfaccia più rigida al di sotto del bedrock sismico e ciò si ripercuote in un'amplificazione più marcata. (*Figure 103-109*).

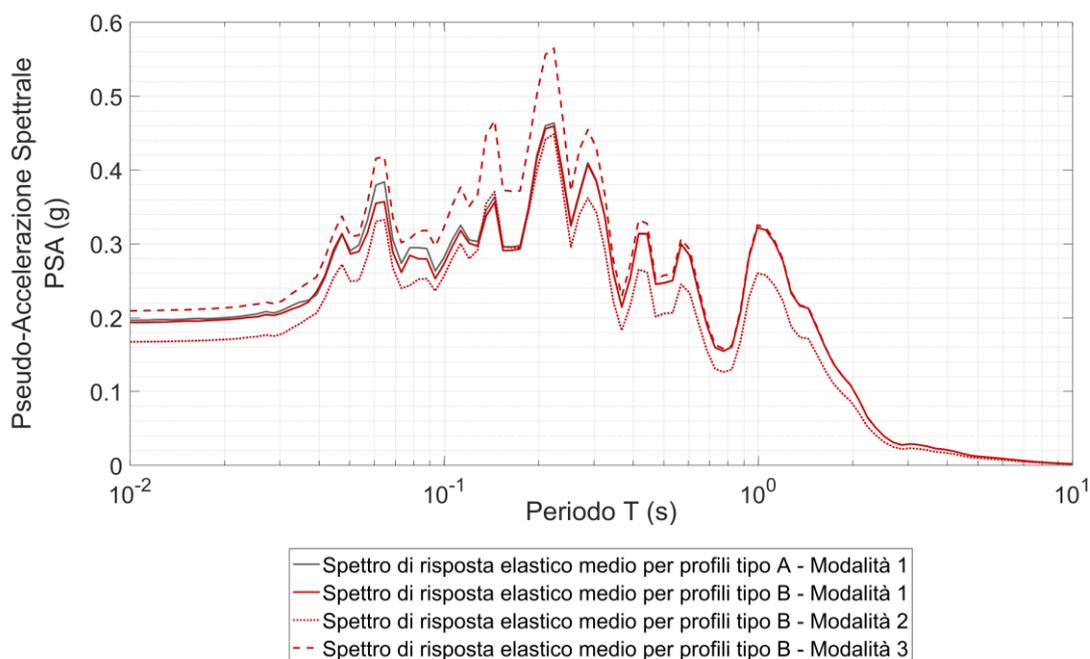


Figura 103. Confronto spettri di risposta elastici ottenuti da simulazioni lineari equivalenti per tre diverse modalità di applicazione dell'input 3A.MZ11..HNE.D.20161030.064018

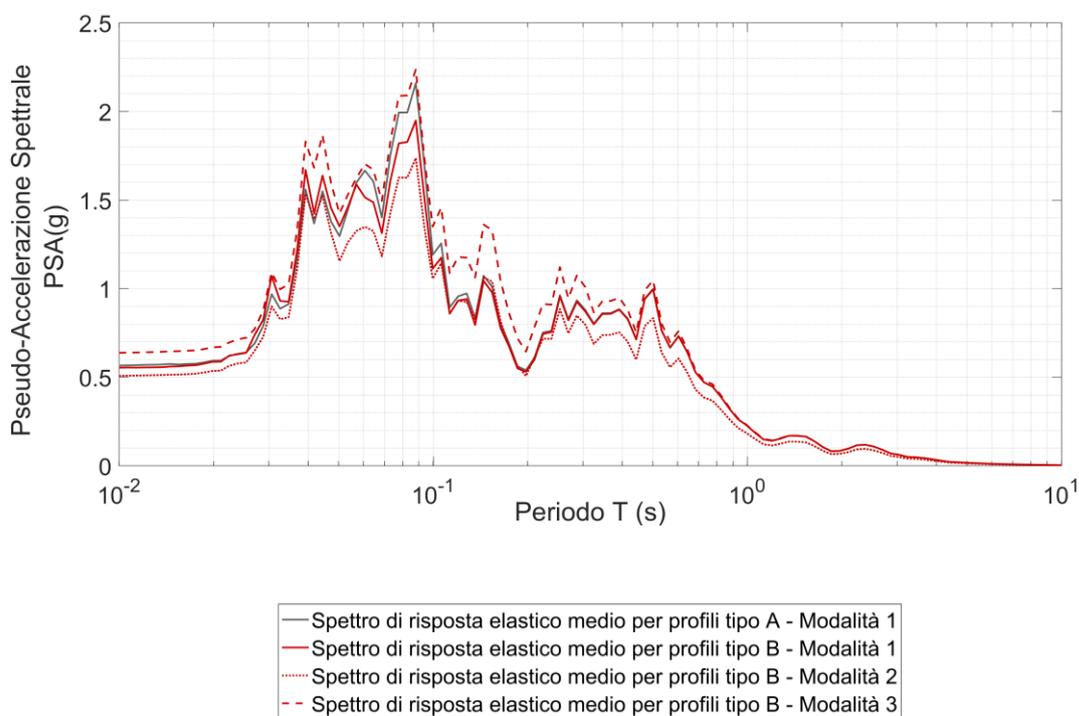


Figura 104. Confronto spettri di risposta elastici ottenuti da simulazioni lineari equivalenti per due diverse modalità di applicazione dell'input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018

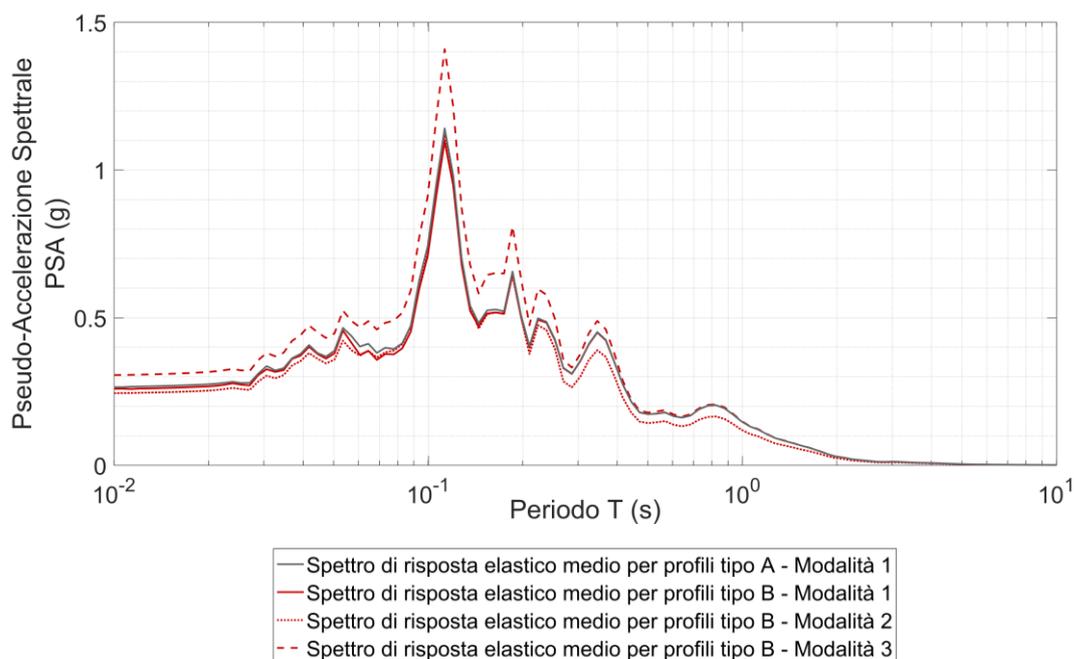


Figura 105. Confronto spettri di risposta elastici ottenuti da simulazioni lineari equivalenti per due diverse modalità di applicazione dell'input IT.CLO..HGE.D.20161026.191806

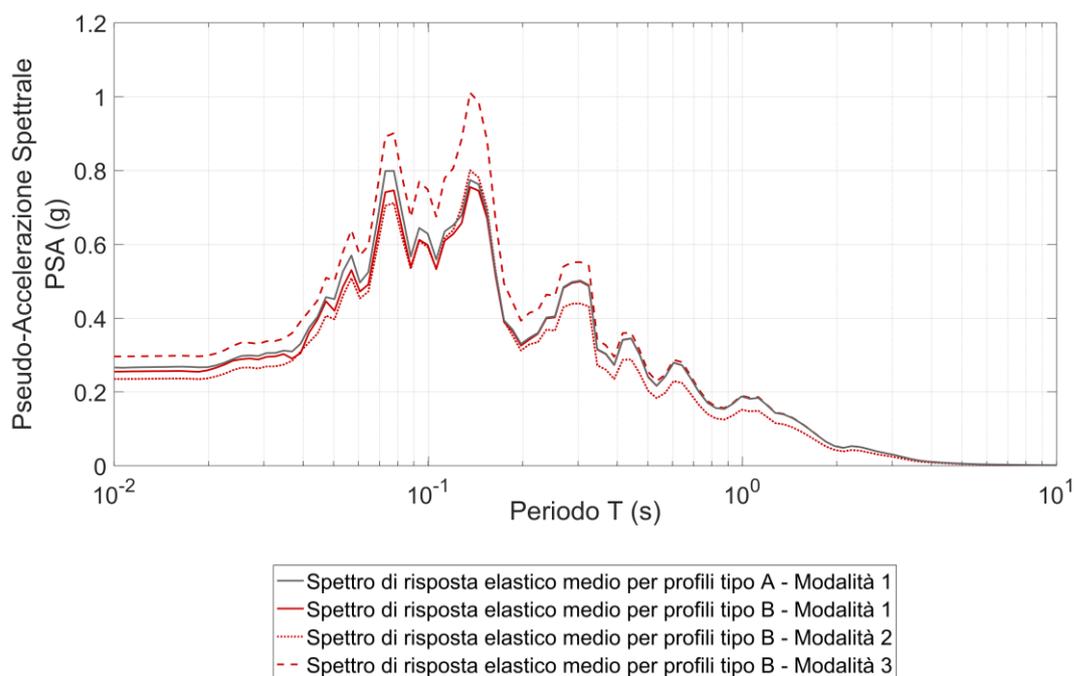


Figura 106. Confronto spettri di risposta elastici ottenuti da simulazioni lineari equivalenti per due diverse modalità di applicazione dell'input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806

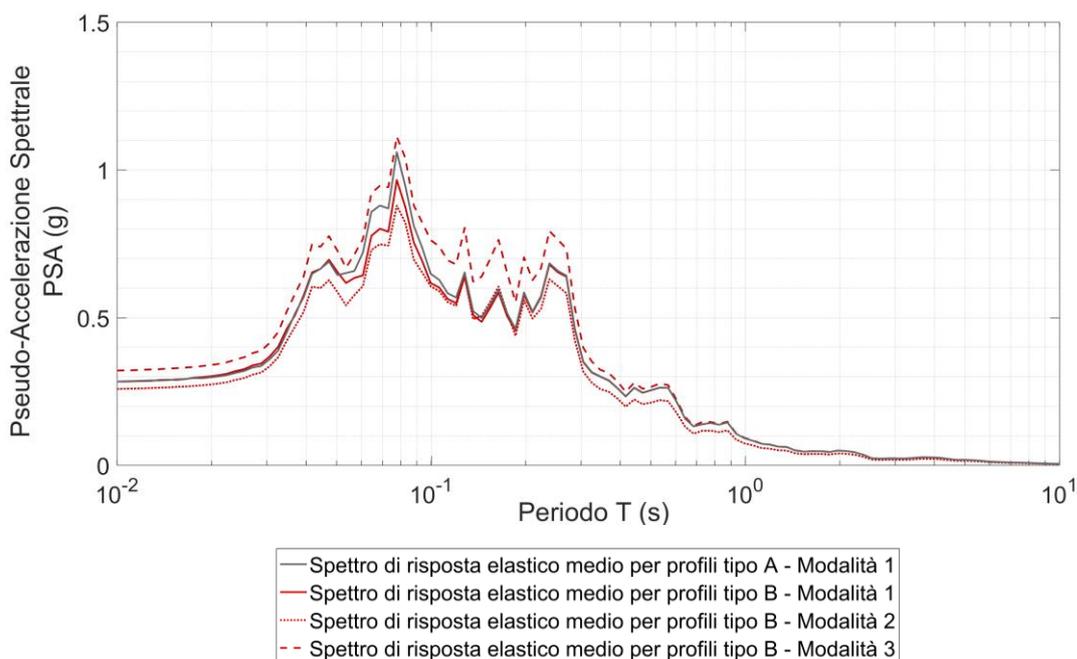


Figura 107. Confronto spettri di risposta elastici ottenuti da simulazioni lineari equivalenti per due diverse modalità di applicazione dell'input IT.MMO..HGE.D.20161030.064018

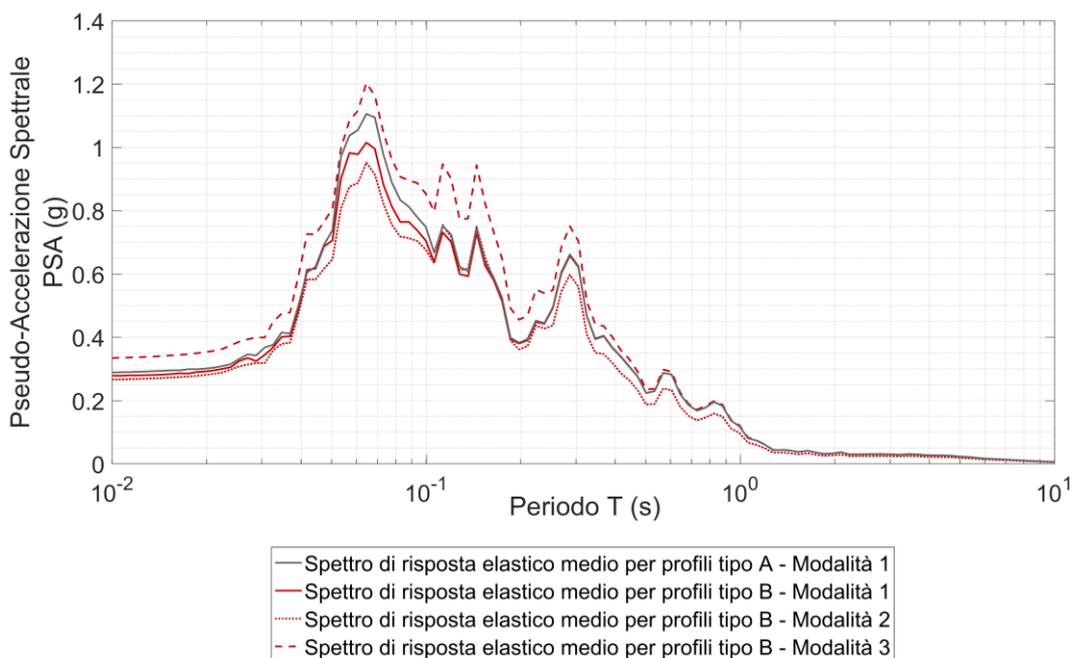


Figura 108. Confronto spettri di risposta elastici ottenuti da simulazioni lineari equivalenti per due diverse modalità di applicazione dell'input IT.MMO..HGN.D.20161030.064018

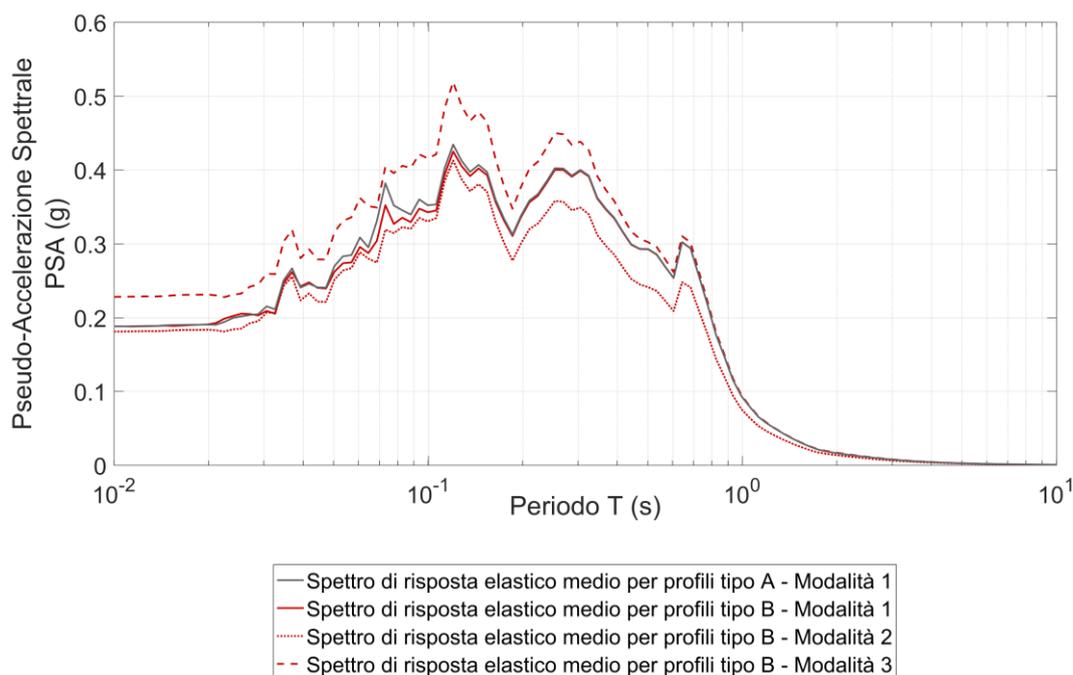


Figura 109. Confronto spettri di risposta elastici ottenuti da simulazioni lineari equivalenti per due diverse modalità di applicazione dell'input IV.T1212..HNE.D.20161026.171026

Si osserva inoltre come il deposito non sia fortemente influenzato dalla non linearità, che è stata introdotta conducendo le analisi lineari equivalenti.

Tale evidenza è giustificata dalle caratteristiche del modello multistrato, data la superficialità e la rigidità del deposito di terreno (si ricorda che il terreno risulta appartenere alla categoria B di sottosuolo secondo NTC2018). Infatti anche i valori delle deformazioni massime al taglio delle colonne multistrato di terreno risultano relativamente basse.

Si riporta un esempio degli andamenti delle deformazioni massime con la profondità, distinti per le due tipologie di profili in esame (*Figura 110*).

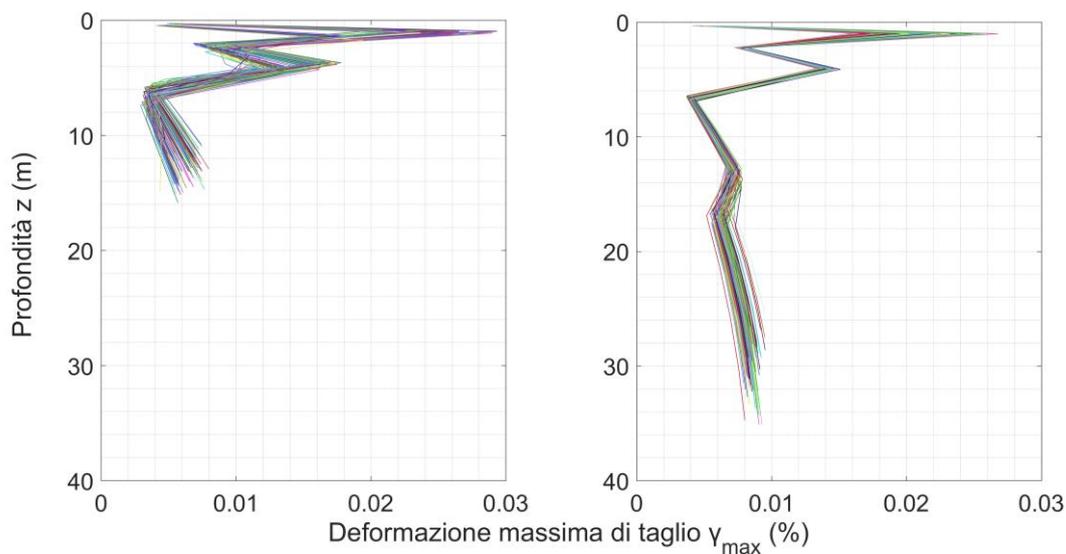


Figura 110. Esempio di andamento delle deformazioni massime al variare della profondità – Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018. A sinistra per profili di tipo A; a destra per profili di tipo B

Questa osservazione è inoltre confermata dal confronto degli spettri di risposta, risultati dalle analisi lineari equivalenti, con gli spettri ottenuti dalle simulazioni visco-elastiche lineari, le cui rappresentazioni sono riportate in Appendice C.

Conclusione

Il problema della caratterizzazione meccanica dei depositi di terreno di 9 comuni del Centro Italia, appartenenti al *Progetto per la Microzonazione Sismica*, è stato affrontato analizzando i dati sperimentali acquisiti da prove MASW relative alla campagna di indagine condotta dal Politecnico di Torino (2017).

Successivamente l'attenzione si è spostata sul comune di San Severino Marche (provincia di Macerata), con lo scopo di comprendere come varia la risposta del sito all'applicazione di input sismici di riferimento, dipendentemente dalle caratteristiche meccaniche del sito.

Per il comune in questione, sono state eseguite anche delle prove HVSR. È stato valutato come le informazioni sperimentali delle prove MASW possono essere completate dai dati sperimentali delle prove HVSR: in questo determinato caso, le prove HVSR hanno restituito un'informazione aggiuntiva alle basse frequenze, che le prove MASW non hanno individuato. Di conseguenza, i modelli multistrato sono stati creati sulla base dei risultati ottenuti dal processo di inversione della sola curva di dispersione e dal processo di inversione congiunta.

L'esecuzione delle simulazioni visco-elastiche lineari e lineari equivalenti hanno permesso di valutare come il deposito non risente fortemente della non linearità; ciò è dovuto ai particolari litotipi costituenti il terreno.

In conclusione, dall'esperienza acquisita nella elaborazione dei dati sperimentali, si osserva come le analisi di risposta sismica locale monodimensionali siano influenzate da incertezze, principalmente riconducibili a:

- modalità di esecuzione delle prove sperimentali (errori di misura);
- interpretazione dei dati sperimentali;
- criticità del processo di inversione (non unicità della soluzione);
- difficoltà nella definizione della posizione del bedrock sismico (perdita di risoluzione delle prove MASW ad elevate profondità; discreta attendibilità dei dati sperimentali delle prove HVSR);
- selezione degli input accelerometrici per la definizione della pericolosità in sito;
- utilizzo di metodi semplificati e scelta di curve di decadimento del modulo di taglio e del rapporto di smorzamento di letteratura per la stima del comportamento non lineare del terreno.

Il saper valutare in maniera critica i risultati, tenendo in considerazione le incertezze associate, è sicuramente un aspetto importante per poter restituire delle soluzioni rappresentative della realtà.

Appendice A

A sostegno della definizione delle curve di dispersione per i casi studio del *Progetto per la Microzonazione Sismica del Centro Italia*, si illustrano di seguito gli spettri (f-k) elaborati dalle acquisizioni dei dati sperimentali di prove di onde superficiali multicanale (MASW).
(Figure 111-120)

- Acquasanta Terme

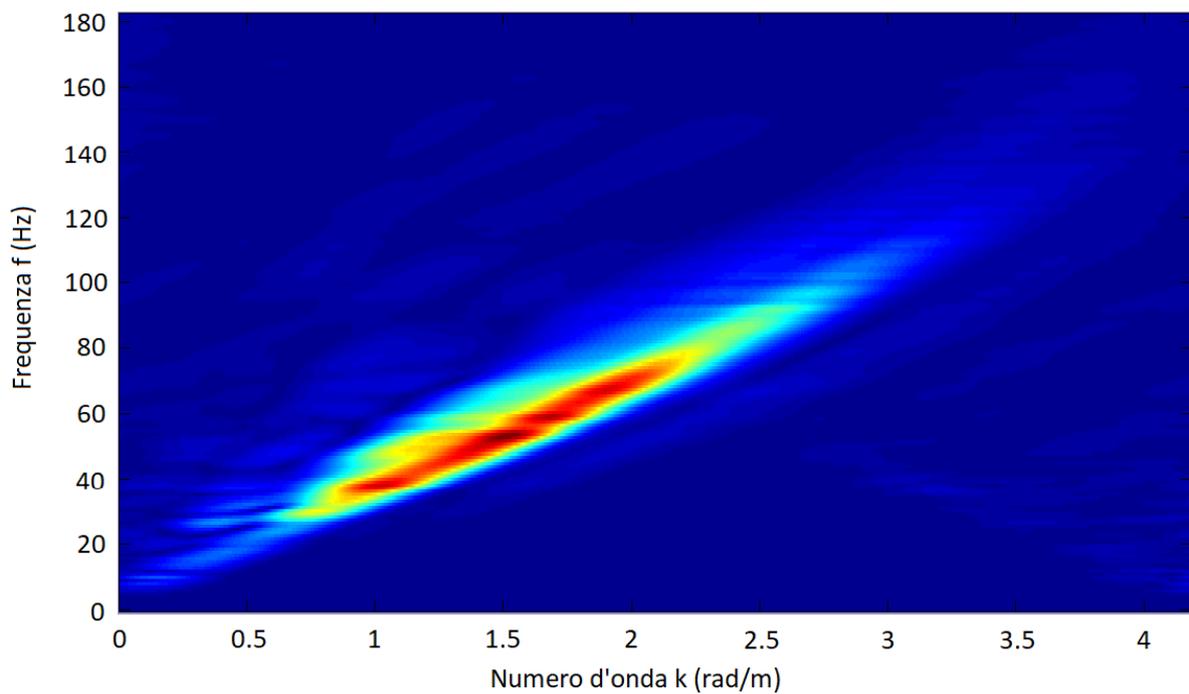


Figura 111. Spettro f-k per acquisizione 106 (10 stacks) – Sito di Acquasanta Terme

- Castel di Lama (campo)

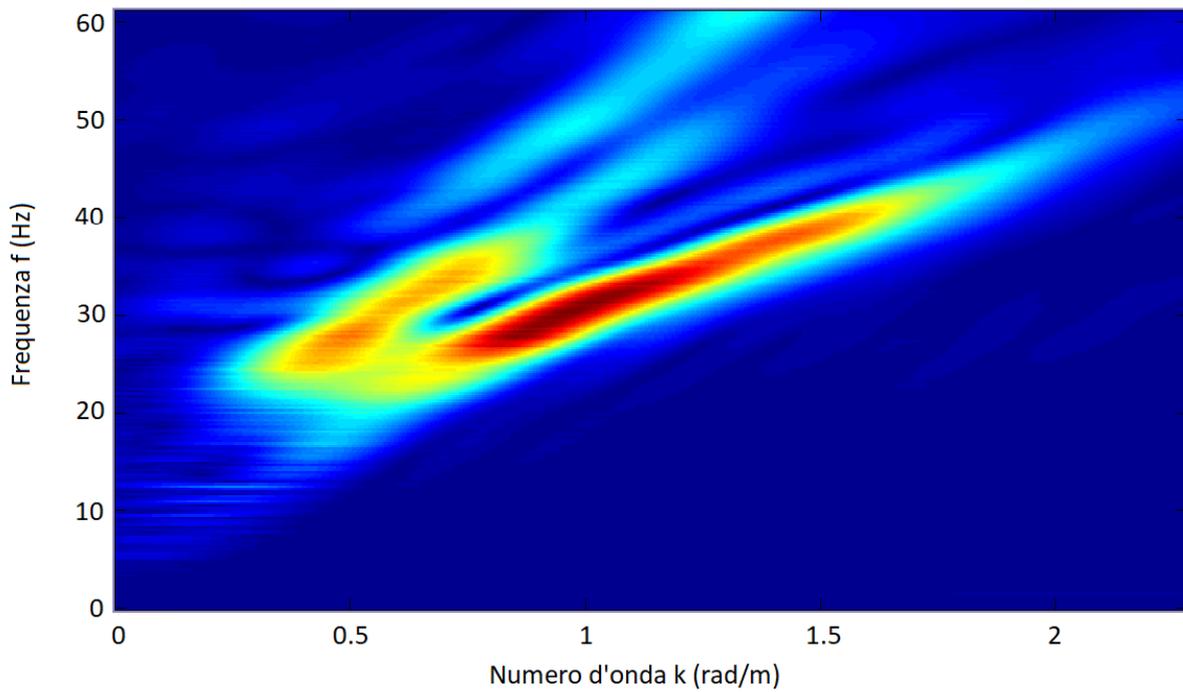


Figura 112. Spettro f - k per acquisizione 151-160 (dati staccati) – Sito di Castel di Lama (campo)

- Castel di Lama (strada)

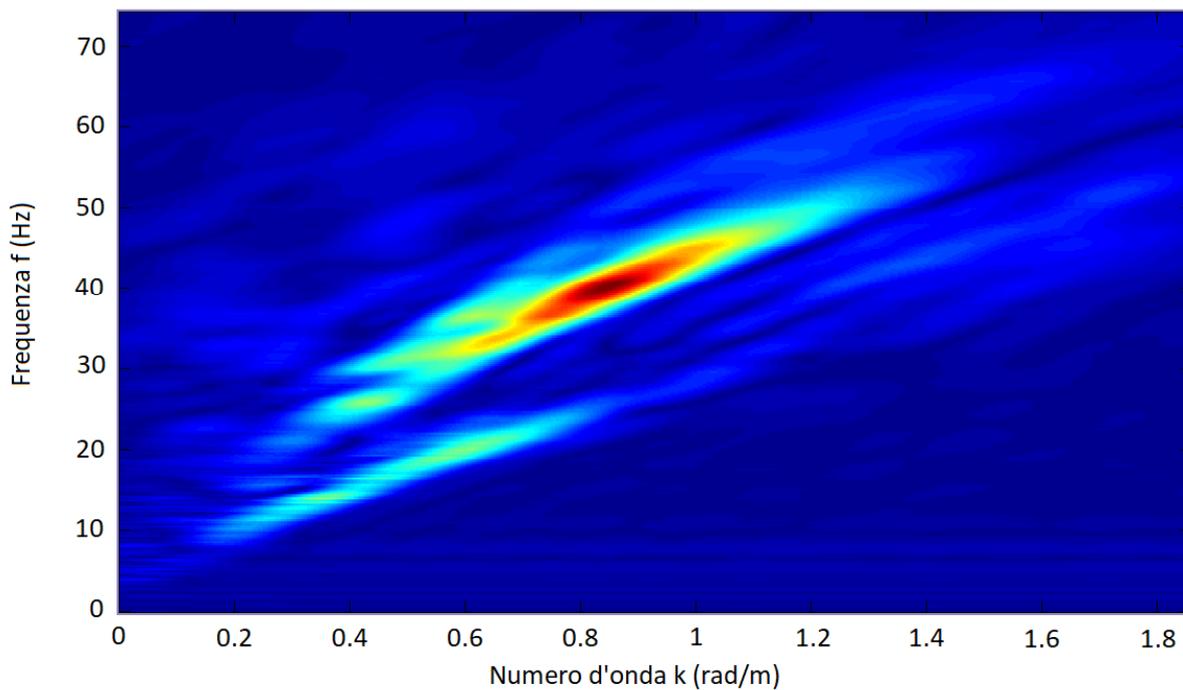


Figura 113. Spettro f - k per acquisizione 111-120 (dati staccati) – Sito di Castel di Lama (strada)

- Montemonaco

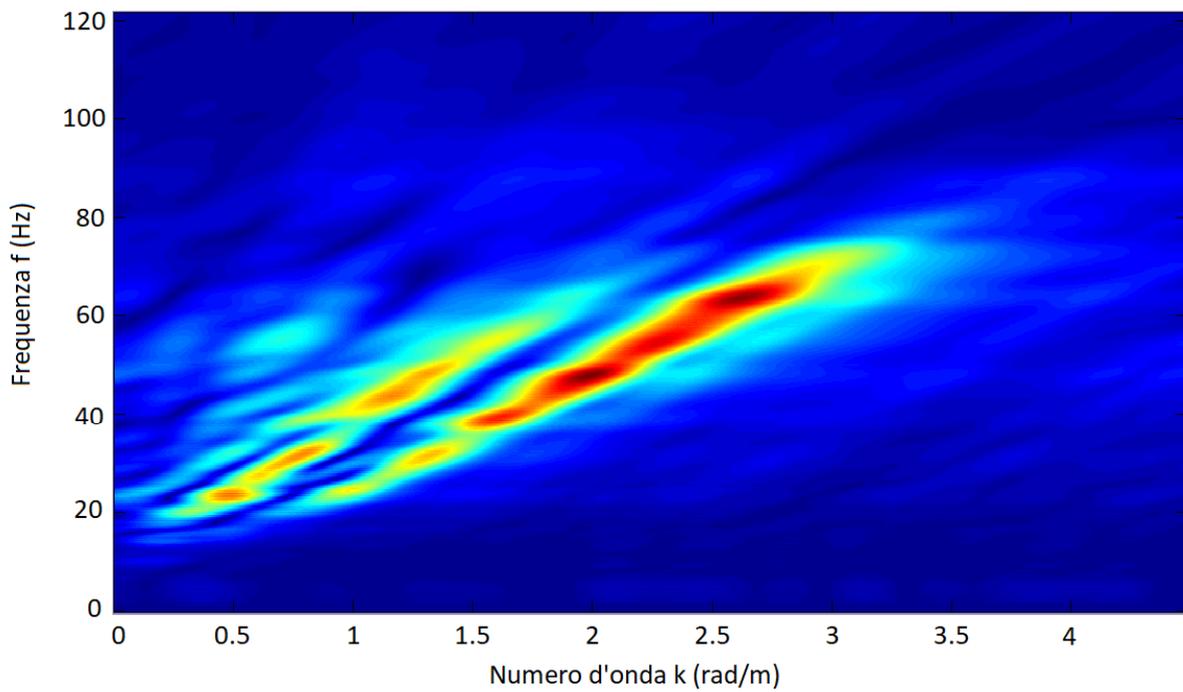


Figura 114. Spettro f-k per acquisizione 101 – Sito di Montemonaco

- Offida

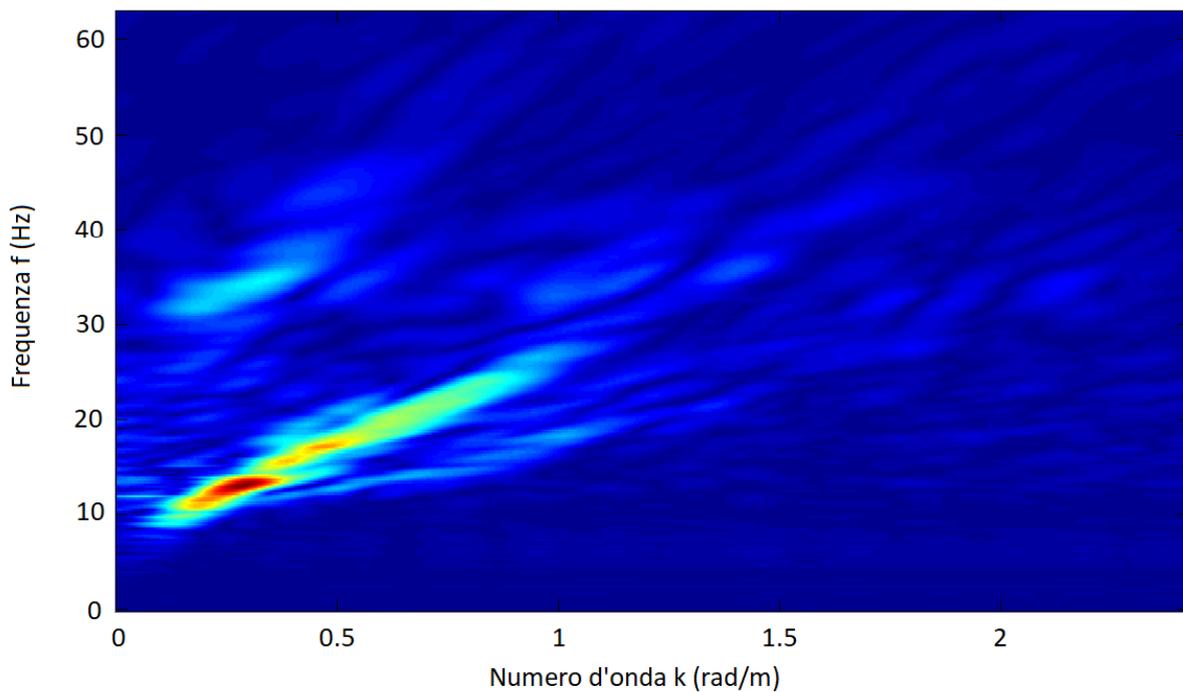


Figura 115. Spettro f-k per acquisizione 100-110 (dati staccati) – Sito di Offida

- Palmiano

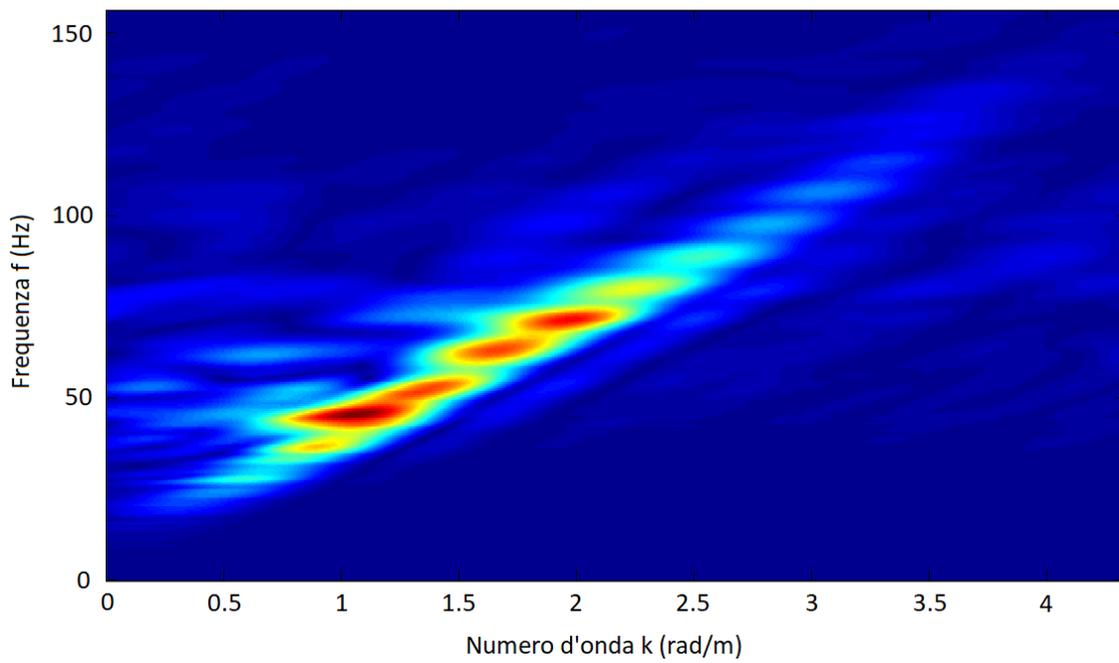


Figura 116. Spettro f - k per acquisizione 100 – Sito di Palmiano

- Roccafluvione

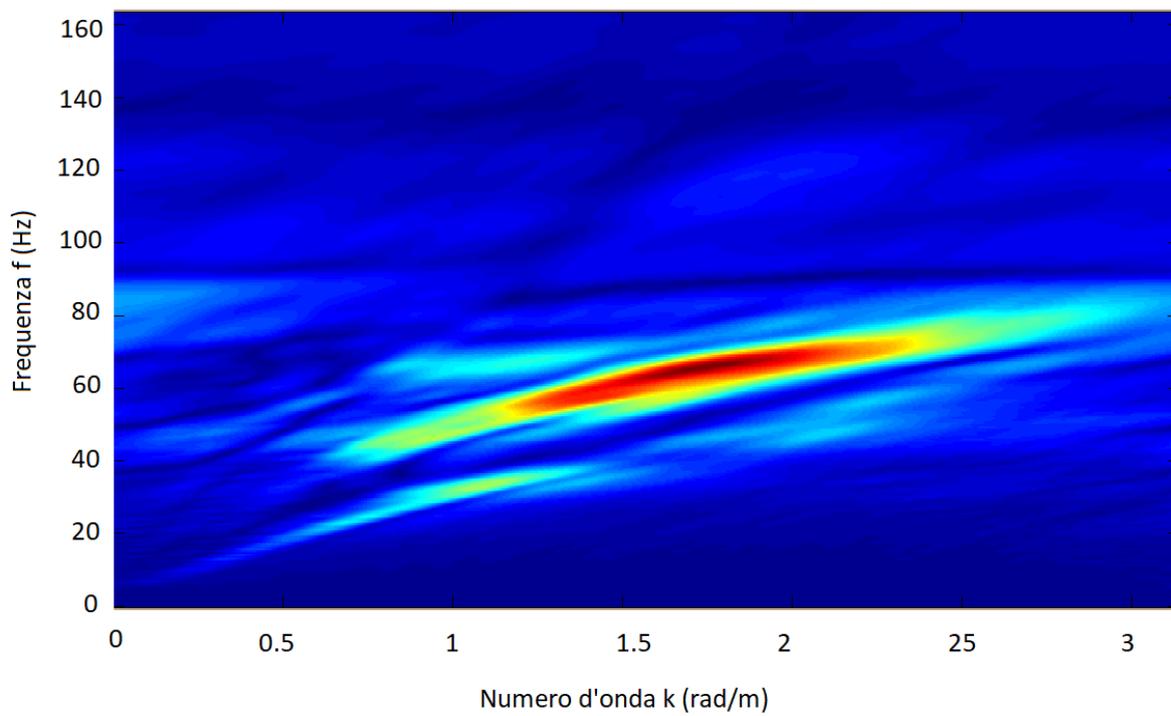


Figura 117. Spettro f - k per acquisizione 101– Sito di Roccafluvione

- Rotella

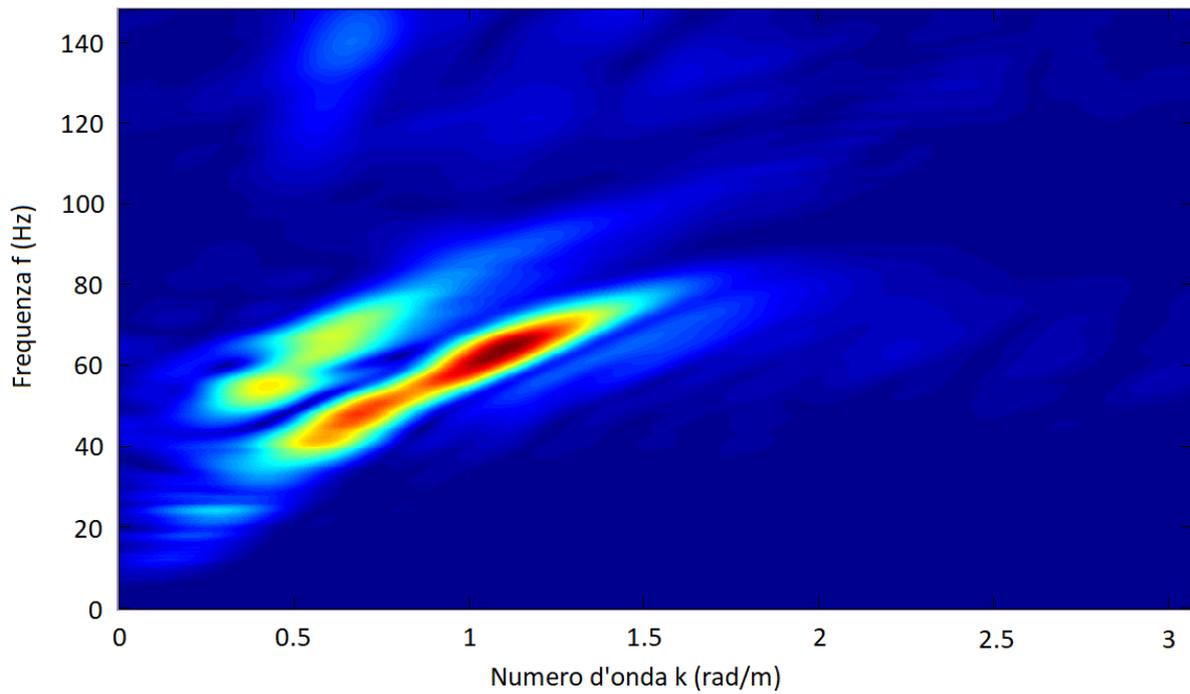


Figura 118. Spettro f-k per acquisizioni 161-170 (dati staccati) – Sito di Rotella

- San Severino Marche

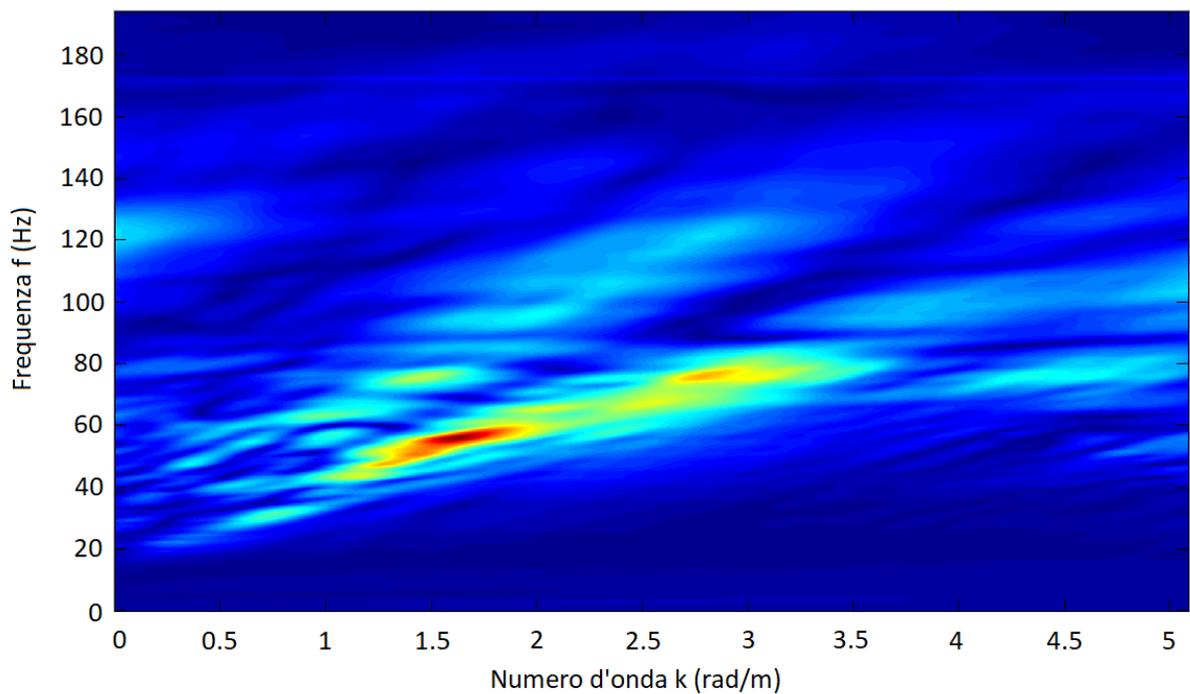


Figura 119. Spettro f-k per acquisizione 111 – Sito di San Severino

- Venarotta

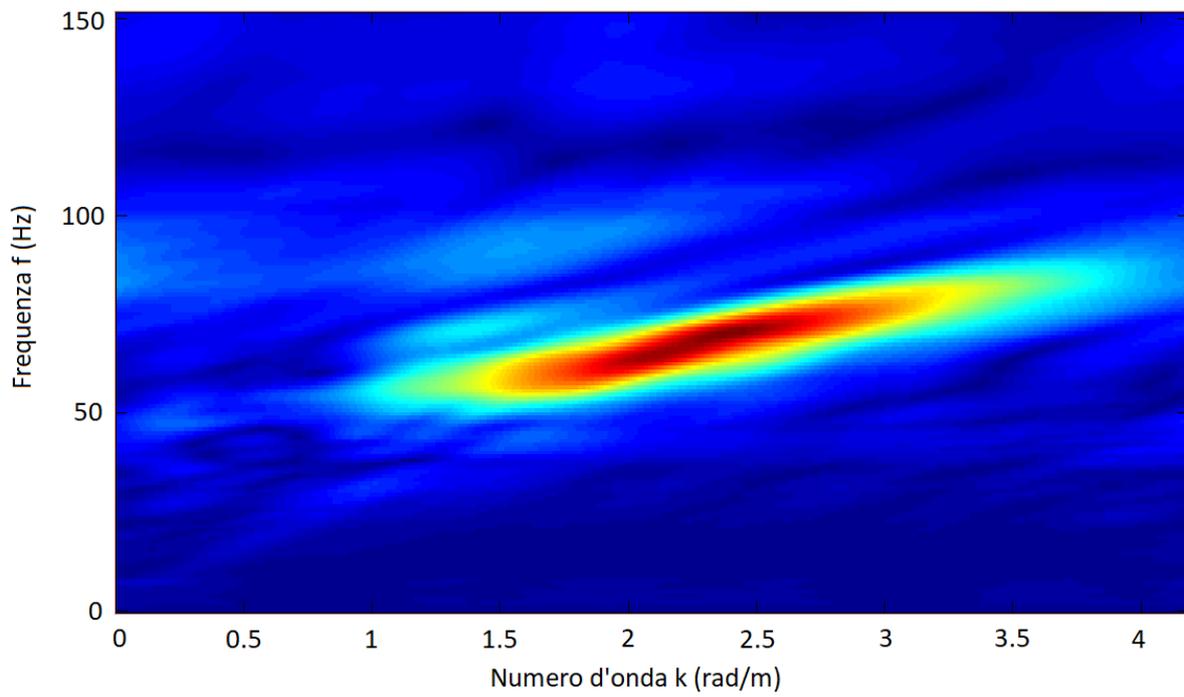


Figura 120. Spettro f-k per acquisizione 100 – Sito di Venarotta

Appendice B

Si illustra il set di input sismici utilizzati per le analisi di risposta sismica locale (*Paragrafo 4.3.2.2*), in termini di storie di accelerazione, velocità, spostamenti e spettro di Fourier, estrapolati con il programma *SeismoSignal*.

Input 3A.MZ11..HNE.D.20161030.064018

INPUT	Nome evento	Central_Italy
	ID evento	EMSC-20161030_0000029
	Data	30/10/2016 – ore 06:40:18
	Magnitudo	$M_W = 6.5$ $M_L = 6.1$
	Distanza epicentrale	$R_{epi} = 24.8$ km
	PGA_{corr}	165.739 cm/s ²
	Orientazione	E-W
STAZIONE	Codice	MZ11
Normativa	Classificazione sito EC8	A*

Tabella 15. Dati - Input 3A.MZ11..HNE.D.20161030.064018

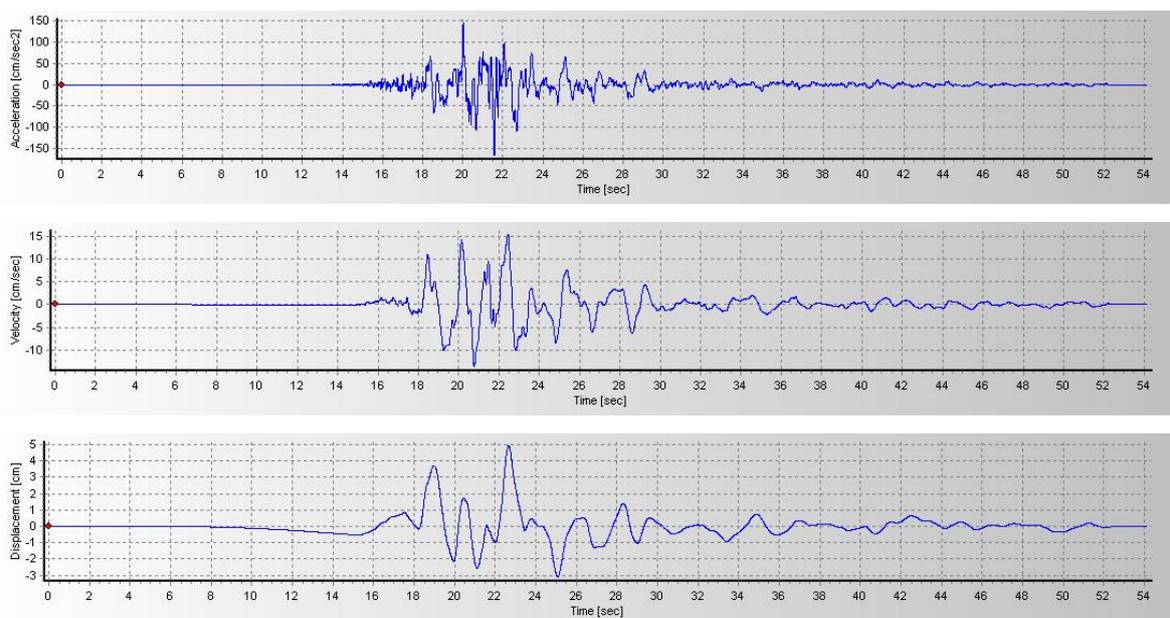


Figura 121. Storie di accelerazione, velocità e spostamento - Input 3A.MZ11..HNE.D.20161030.064018

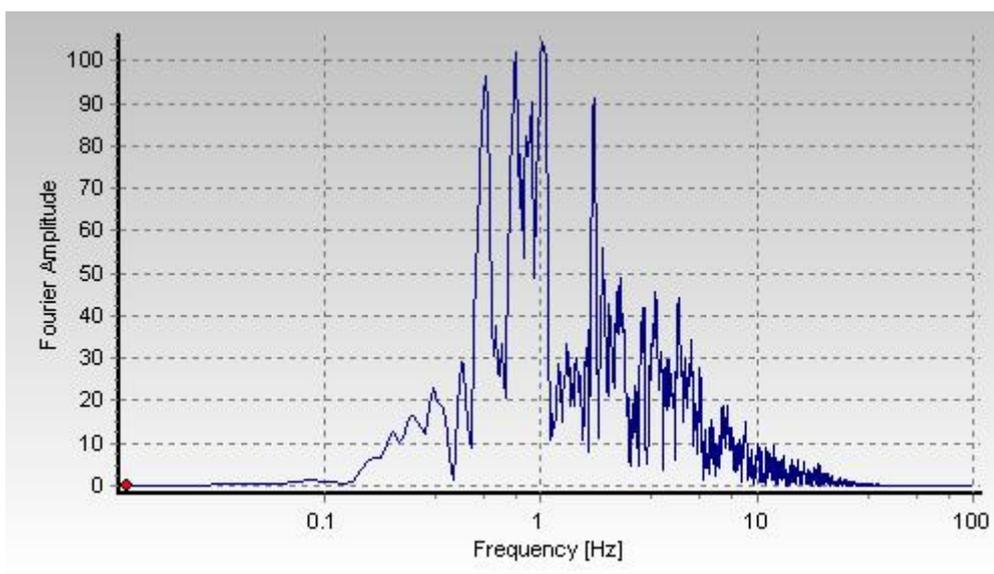


Figura 122. Spettro di Fourier – Input 3A.MZ11..HNE.D.20161030.064018

Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018

INPUT	Nome evento	Central_Italy
	ID evento	EMSC-20161030_0000029
	Data	30/10/2016 – ore 06:40:18
	Magnitudo	$M_W = 6.5$ $M_L = 6.1$
	Distanza epicentrale	$R_{epi} = 22.6$ km
	PGA_{corr}	395.563 cm/s ²
	Orientazione	N-S
STAZIONE	Codice	MZ19
Normativa	Classificazione sito EC8	A*

Tabella 16. Dati - Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018

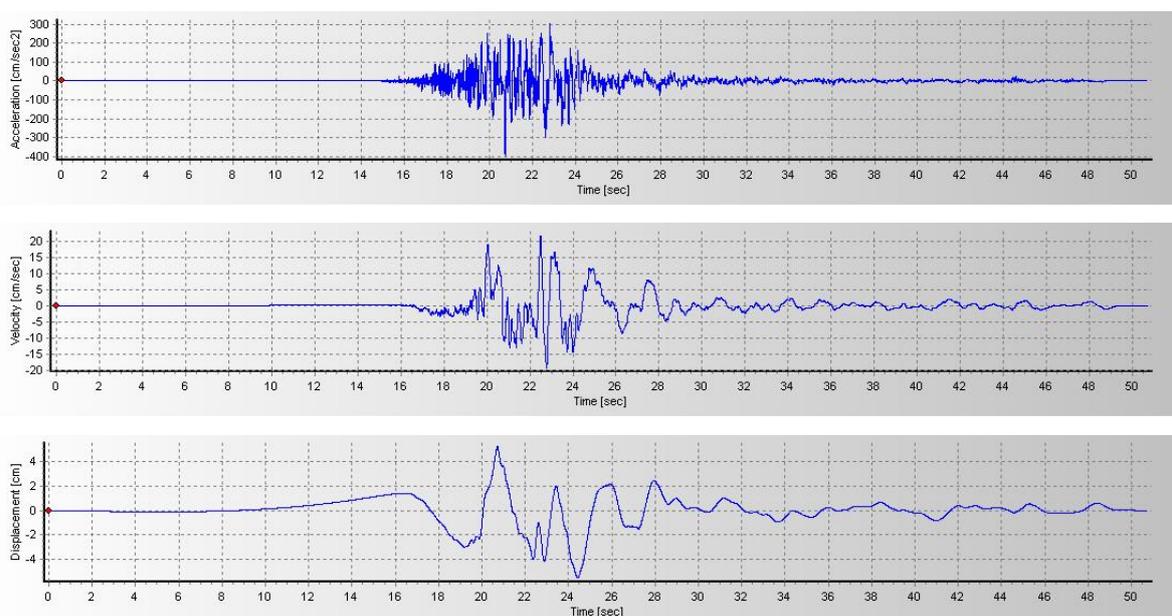


Figura 123. Storie di accelerazione, velocità e spostamento - Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018

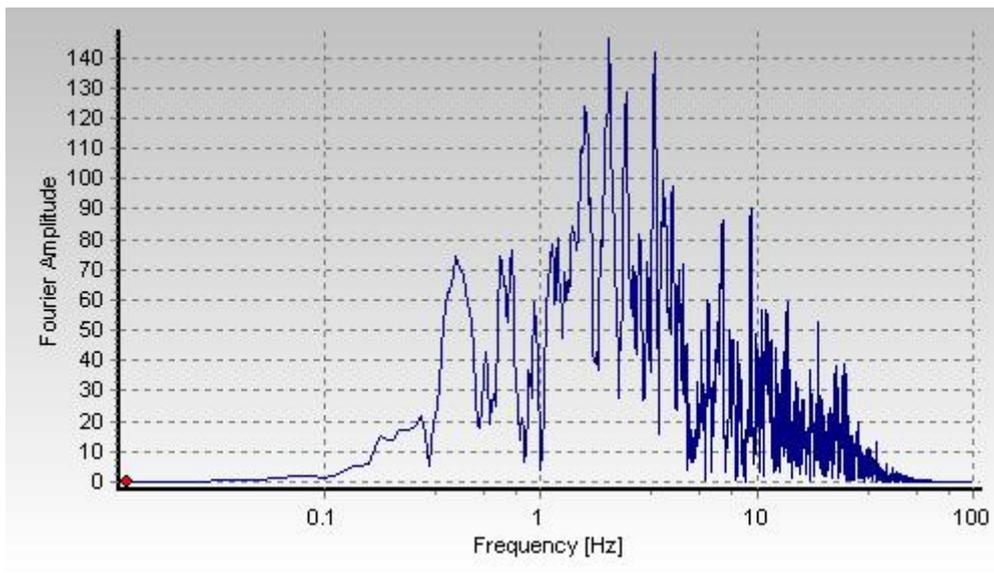


Figura 124. Spettro di Fourier – Input 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018

Input IT.CLO..HGE.D.20161026.191806

INPUT	Nome evento	Central_Ity
	ID evento	EMSC-20161026_0000095
	Data	26/10/2016 – ore 19:18:06
	Magnitudo	$M_W = 5.9$ $M_L = 5.9$
	Distanza epicentrale	$R_{epi} = 10.8$ km
	PGA_{corr}	179.955 cm/s^2
	Orientazione	E-W
STAZIONE	Codice	CLO
Normativa	Classificazione sito EC8	A*

Tabella 17. Dati - Input IT.CLO..HGE.D.20161026.191806

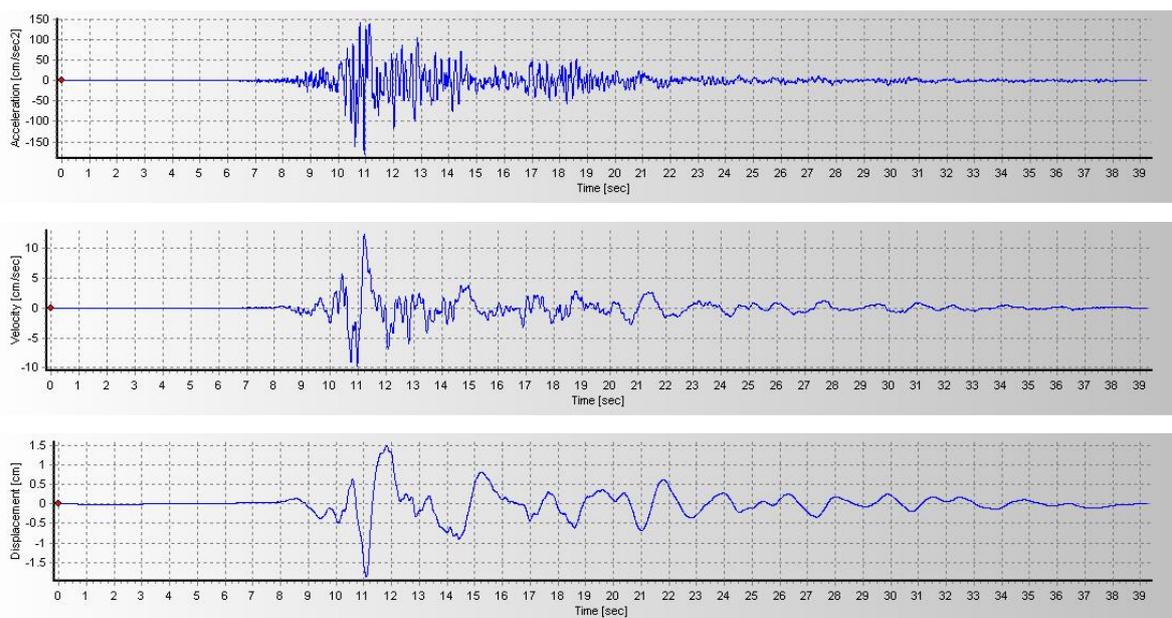


Figura 125. Storie di accelerazione, velocità e spostamento - Input IT.CLO..HGE.D.20161026.191806

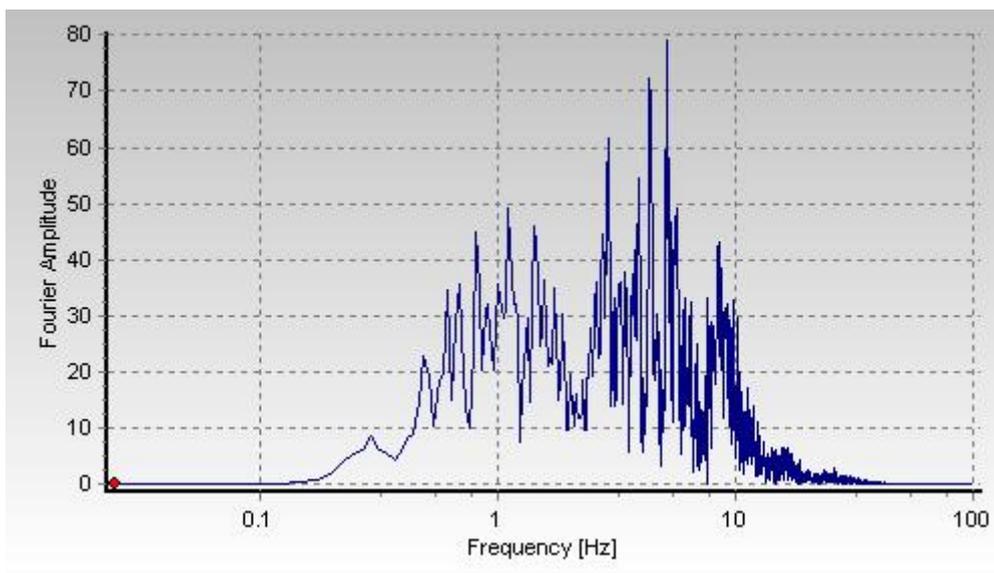


Figura 126. Spettro di Fourier – Input IT.CLO..HGE.D.20161026.191806

Input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806

INPUT	Nome evento	Central_Italy
	ID evento	EMSC-20161026_0000095
	Data	26/10/2016 – ore 19:18:06
	Magnitudo	$M_W = 5.9$ $M_L = 5.9$
	Distanza epicentrale	$R_{epi} = 10.8$ km
	PGA_{corr}	189.388 cm/s^2
	Orientazione	N-S
STAZIONE	Codice	CLO
Normativa	Classificazione sito EC8	A*

Tabella 18. Dati - Input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806

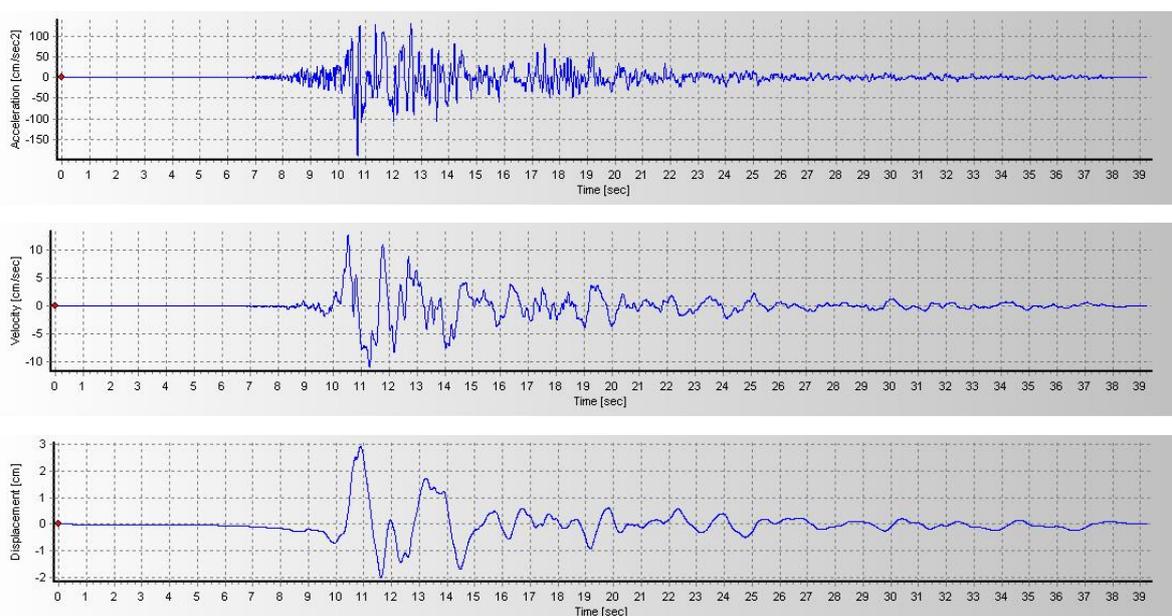


Figura 127. Storie di accelerazione, velocità e spostamento - Input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806

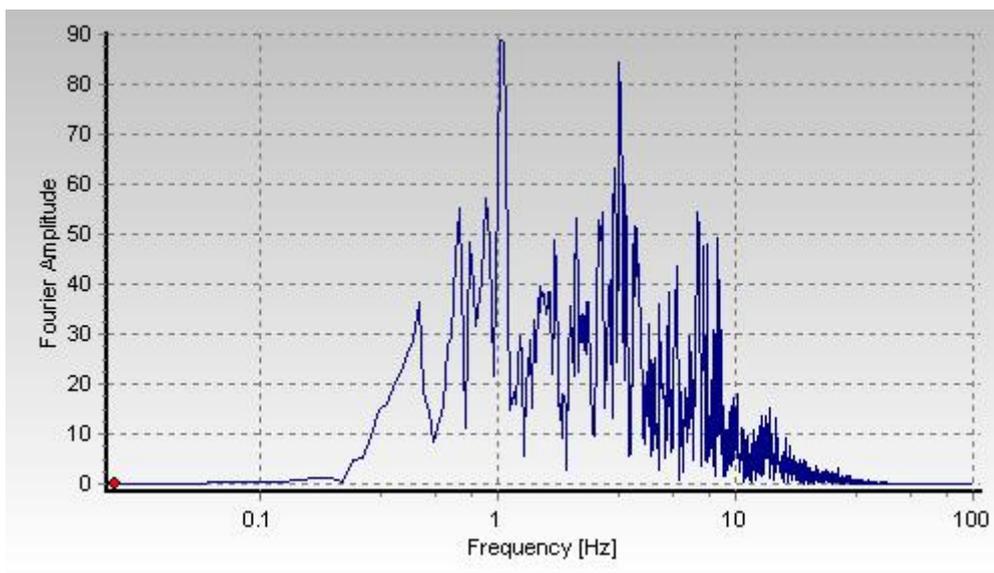


Figura 128. Spettro di Fourier – Input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806

Input IT.MMO..HGE.D.20161030.064018

INPUT	Nome evento	Central_Italy
	ID evento	EMSC-20161030_0000029
	Data	30/10/2016 – ore 06:40:18
	Magnitudo	$M_W = 6.5$ $M_L = 6.1$
	Distanza epicentrale	$R_{epi} = 19.2$ km
	PGA_{corr}	185.324 cm/s ²
	Orientazione	E-W
STAZIONE	Codice	MMO
Normativa	Classificazione sito EC8	A*

Tabella 19. Dati - Input IT.MMO..HGE.D.20161030.064018

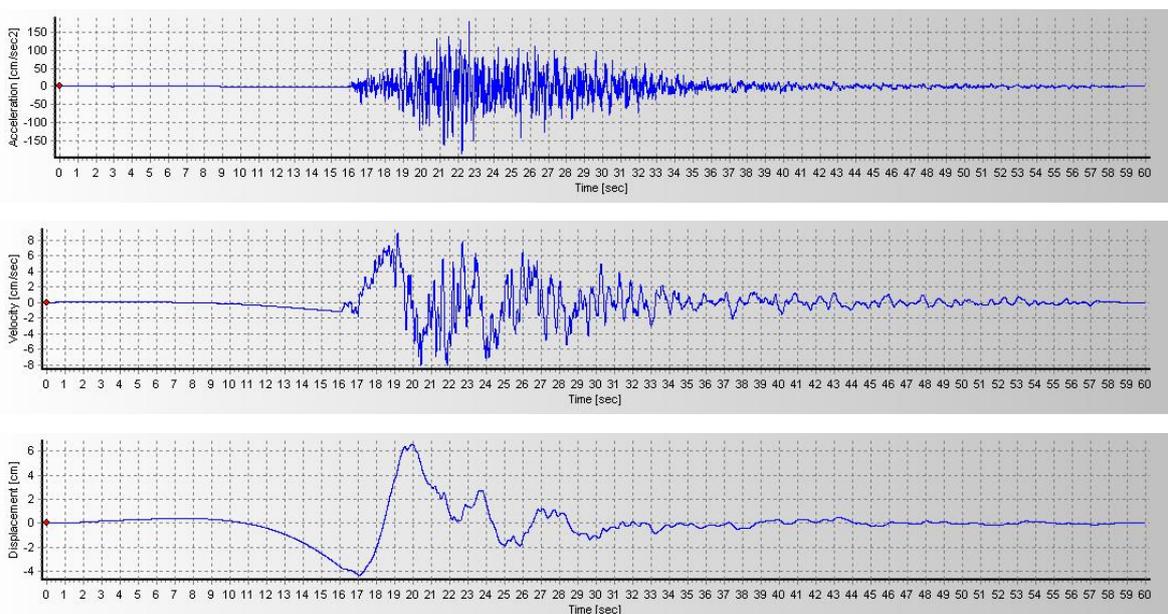


Figura 129. Storie di accelerazione, velocità e spostamento - Input IT.MMO..HGE.D.20161030.064018

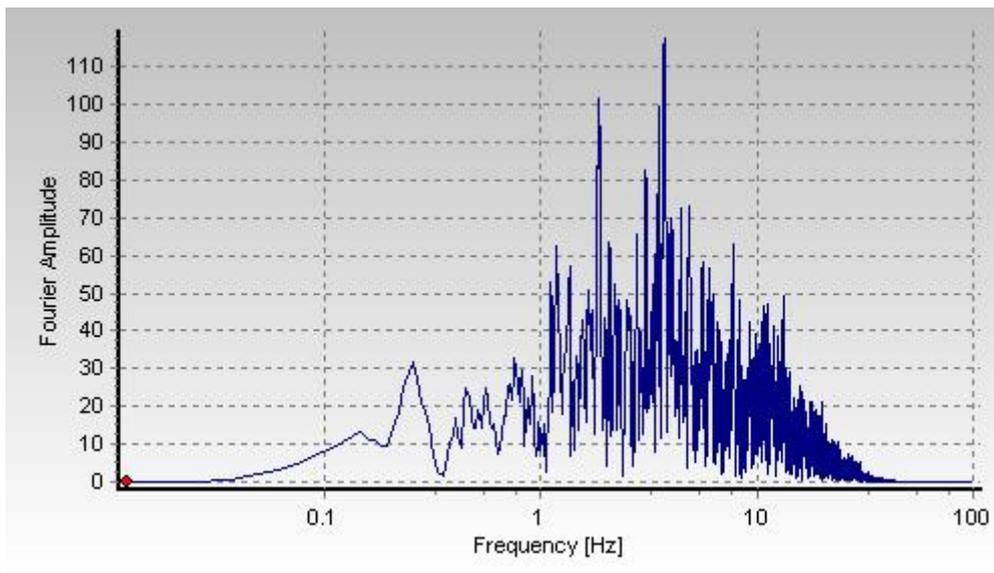


Figura 130. Spettro di Fourier – Input IT.MMO..HGE.D.20161030.064018

Input IT.MMO..HGN.D.20161030.064018

INPUT	Nome evento	Central_Italy
	ID evento	EMSC-20161030_0000029
	Data	30/10/2016 – ore 06:40:18
	Magnitudo	$M_W = 6.5$ $M_L = 6.1$
	Distanza epicentrale	$R_{epi} = 19.2$ km
	PGA_{corr}	185.086 cm/s^2
	Orientazione	N-S
STAZIONE	Codice	MMO
Normativa	Classificazione sito EC8	A*

Tabella 20. Dati - Input IT.MMO..HGN.D.20161030.064018

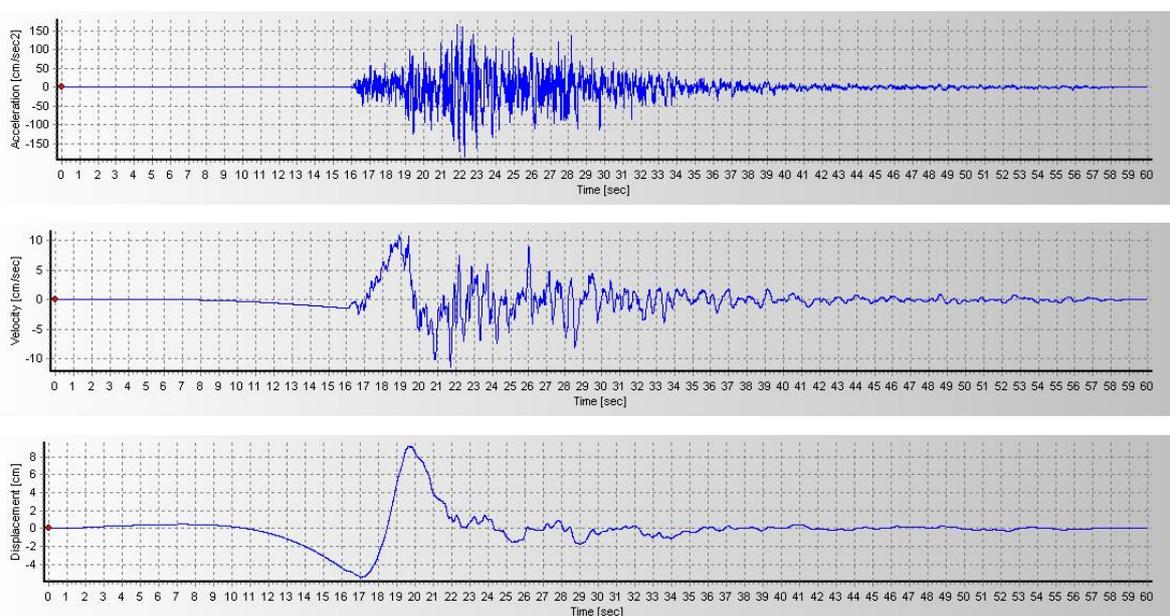


Figura 131. Storie di accelerazione, velocità e spostamento - Input IT.MMO..HGN.D.20161030.064018

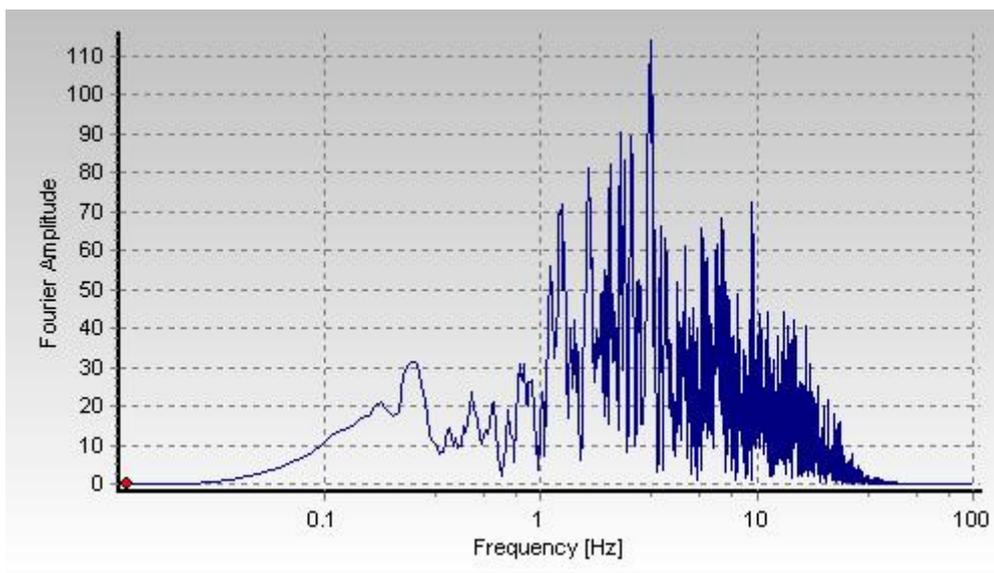


Figura 132. Spettro di Fourier – Input IT.MMO..HGN.D.20161030.064018

Input IV.T1212..HNE.D.20161026.171036

INPUT	Nome evento	Central_Italy
	ID evento	EMSC-20161026_0000077
	Data	26/10/2016 – ore 17:10:36
	Magnitudo	$M_W = 5.4$ $M_L = 5.4$
	Distanza epicentrale	$R_{epi} = 15.8$ km
	PGA_{corr}	176.708 cm/s ²
	Orientazione	E-W
STAZIONE	Codice	T1212
Normativa	Classificazione sito EC8	A*

Tabella 21. Dati - Input IV.T1212..HNE.D.20161026.171036

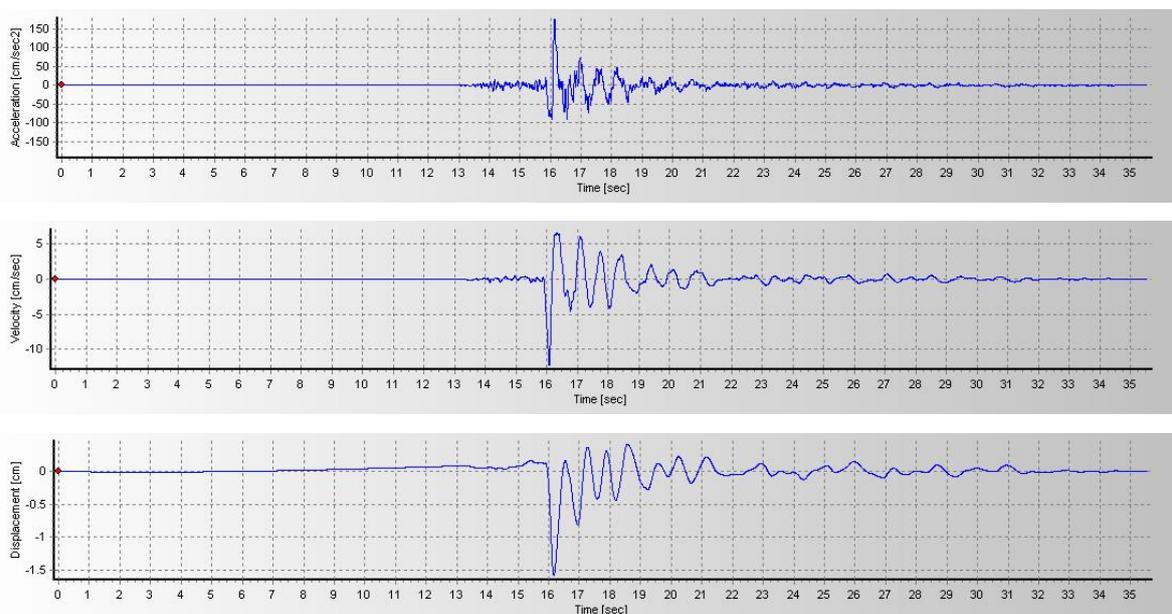


Figura 133. Storie di accelerazione, velocità e spostamento - Input IV.T1212..HNE.D.20161026.171036

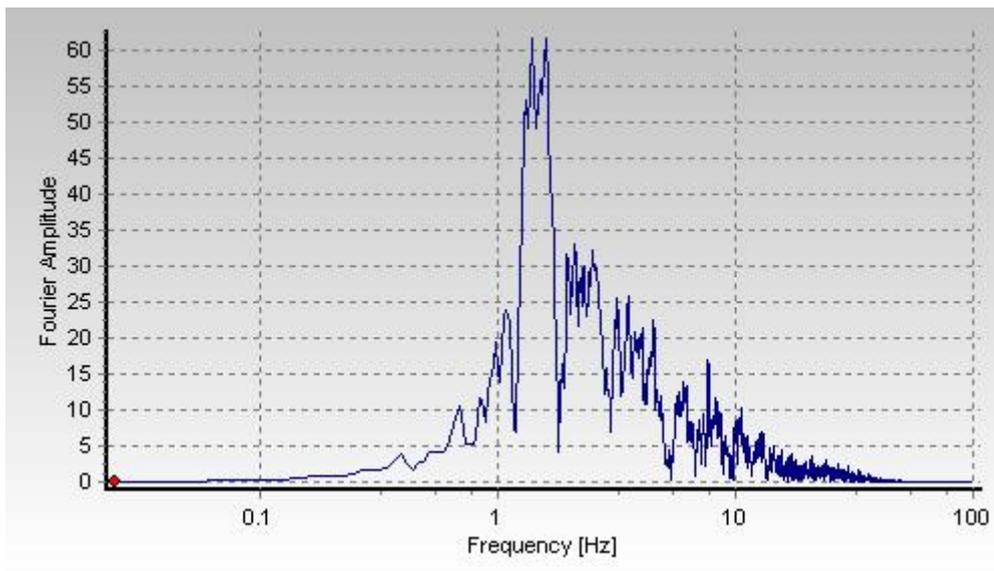


Figura 134. Spettro di Fourier – Input IV.T1212..HNE.D.20161026.171036

Appendice C

Si illustrato i risultati in termini di spettri di risposta elastici (con rapporto di smorzamento al 5%) ottenuti dalle simulazioni visco-elastiche lineari con l'applicazione dell'input al fondo delle colonne di terreno.

Input – 3A.MZ11..HNE.D.20161030.064018

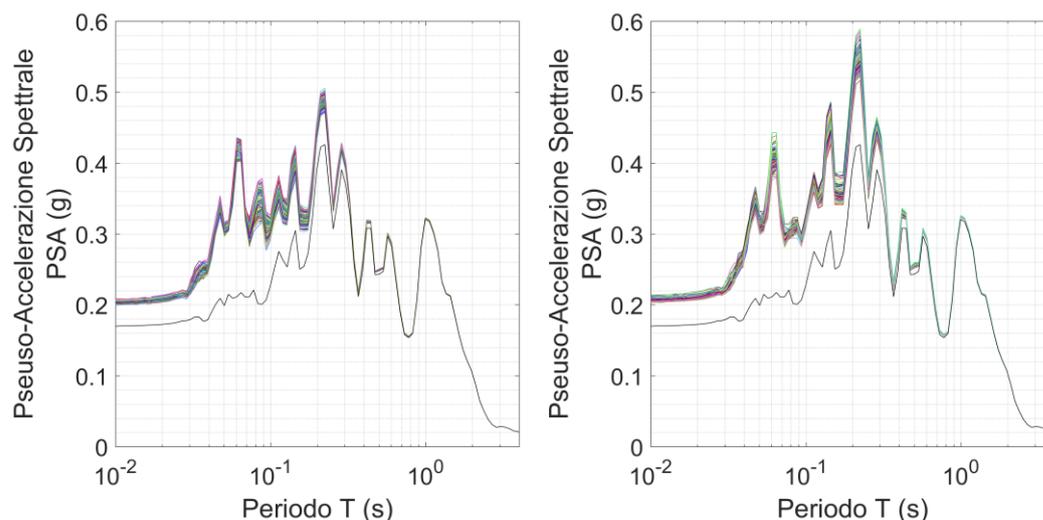


Figura 135. Spettri di risposta elastica da analisi visco-elastica lineare per input 3A.MZ11..HNE.D20161030.064018. A sinistra per profili di tipo A; a destra per profili di tipo B

Input – 3A.MZ19..HNN.D.20161030.064018

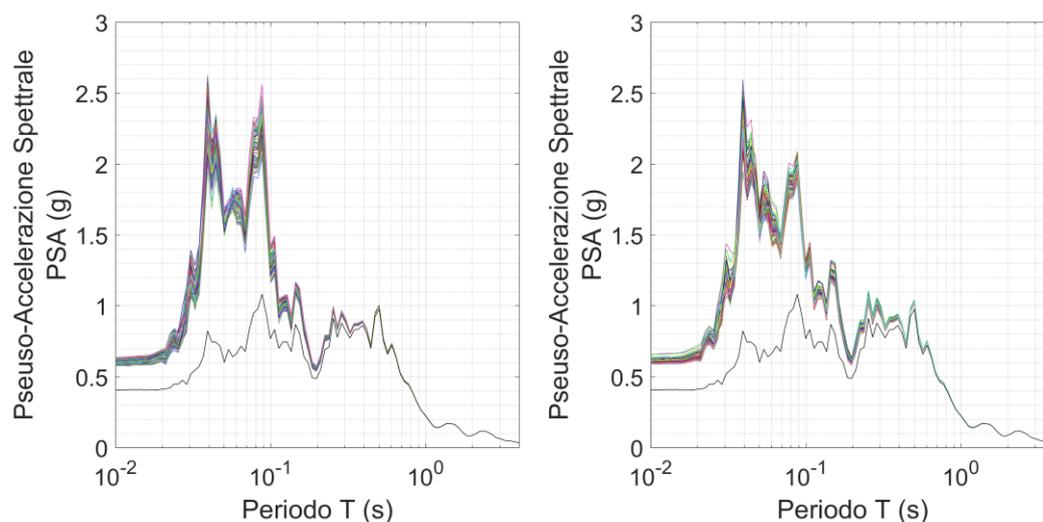


Figura 136. Spettri di risposta elastica da analisi visco-elastica lineare per input 3A.MZ19..HNN.D20161030.064018. A sinistra per profili di tipo A; a destra per profili di tipo B

Input – IT.CLO..HGE.D.20161026.191806

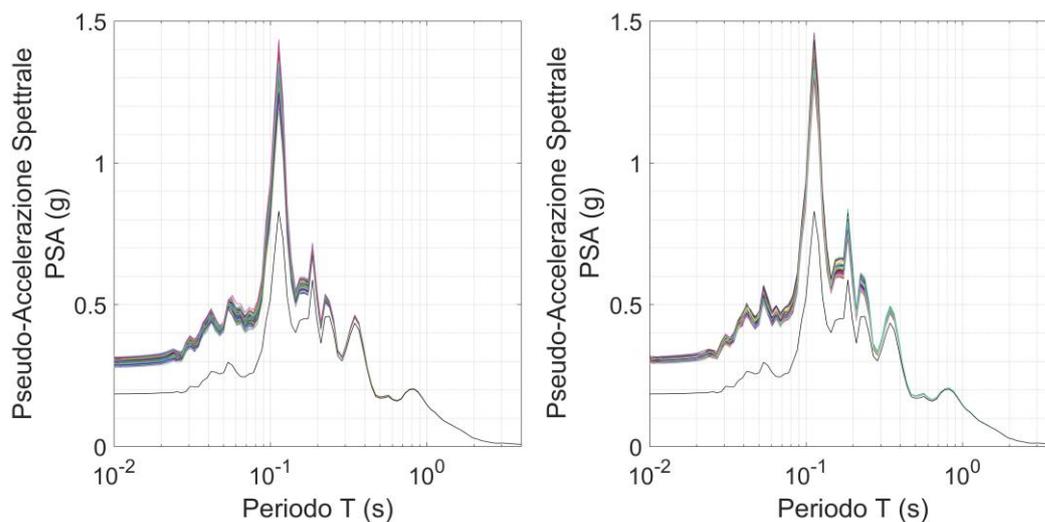


Figura 137. Spettri di risposta elastici da analisi visco-elastica lineare per input IT.CLO..HGE.D.20161026.191806. A sinistra per profili di tipo A; a destra per profili di tipo B

Input – IT.CLO..HGN.D.20161026.191806

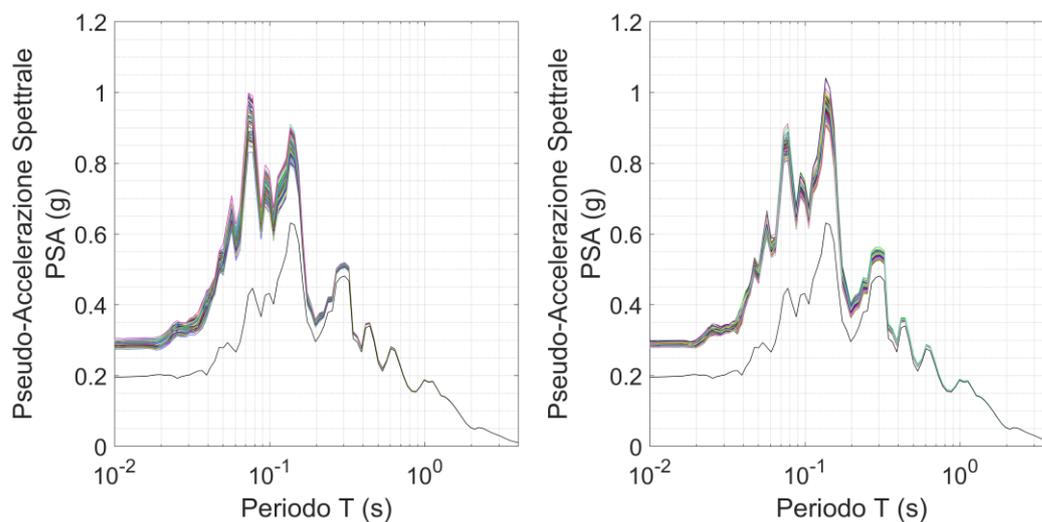


Figura 138. Spettri di risposta elastici da analisi visco-elastica lineare per input IT.CLO..HGN.D.20161026.191806. A sinistra per profili di tipo A; a destra per profili di tipo B

Input – IT.MMO..HGE.D.20161026.064018

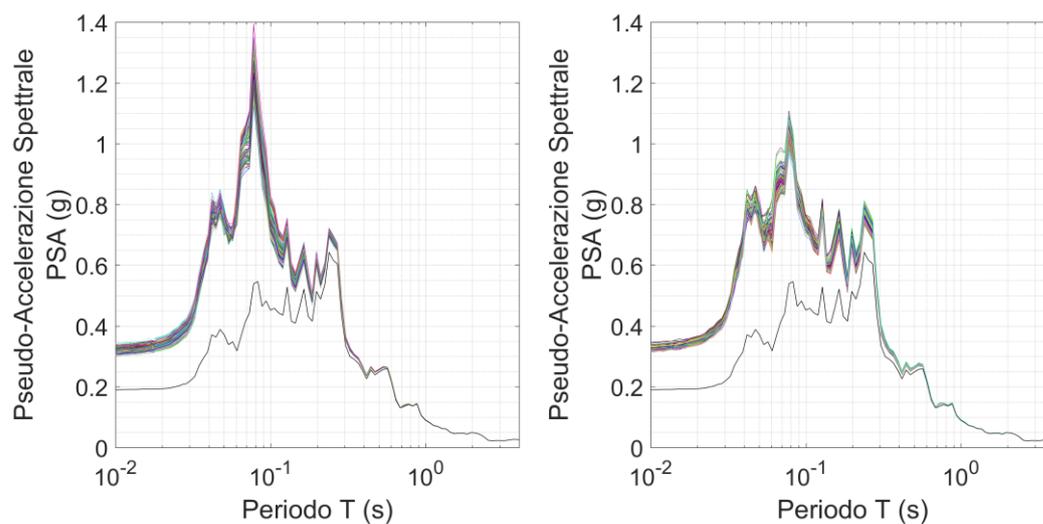


Figura 139. Spettri di risposta elastici da analisi visco-elastica lineare per input IT.MMO..HGE.D.20161026.064018. A sinistra per profili di tipo A; a destra per profili di tipo B

Input – IT.MMO..HGN.D.20161026.064018

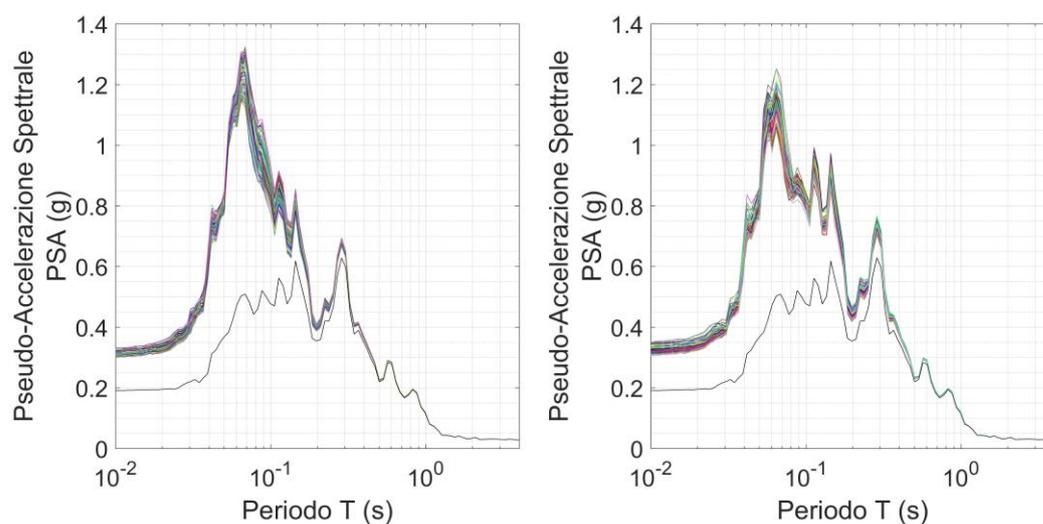


Figura 140. Spettri di risposta elastici da analisi visco-elastica lineare per input IT.MMO..HGN.D.20161026.064018. A sinistra per profili di tipo A; a destra per profili di tipo B

Input – IV.T1212..HGE.D.20161026.171036

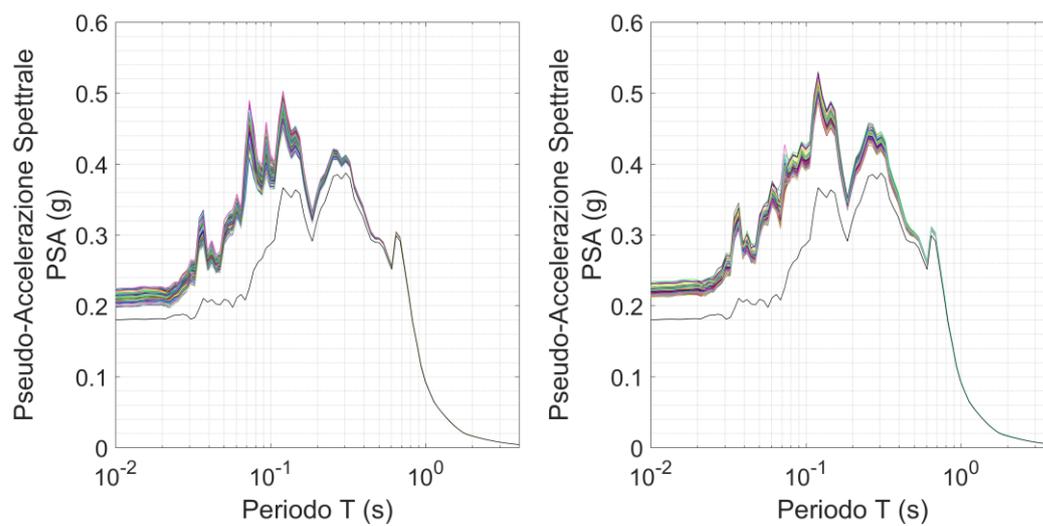


Figura 141. Spettri di risposta elastici da analisi visco-elastica lineare per input IV.T1212..HGE.D.20161026.171036. A sinistra per profili di tipo A; a destra per profili di tipo B

Bibliografia e sitografia

Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni (2017), *Protocolli di acquisizione dati ed elaborazione relativi alle attività di Microzonazione di Livello III nei 140 Comuni di cui all'Ordinanza n. 24 del 12 maggio 2017 della Presidenza del Consiglio dei Ministri*

European Commission (2004), *SESAME European research project, "Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation"*

Foti S., Lai C. G, Rix G. J., Strobbia C. (2014), *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*

Foti S. (2000), *Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves*, PhD thesis, DOI: 10.6092/polito/porto/2497212

Foti S., Hollender F., Garofalo F., Albarello D., Asten M., Bard P., Comina C., Cornou C., et al. (2017), *Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project*, Bulletin of Earthquake Engineering, DOI: 10.1007/s10518-017-0206-7

Ministero delle infrastrutture e dei trasporti (2018), *Norme Tecniche per le Costruzioni – D.M. 17 gennaio 2018*

Passeri F. (2019), *Development of advanced geostatistical models of shear wave velocity profiles to account for uncertainties and variabilities in Ground Response Analyses*, PhD thesis

Wathelet, M., D. Jongmans, and M. Ohrnberger (2004), *Surface wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements*, *Near Surface Geophysics 2*, pp. 211-221

SGA Studio Geologico Associato (1999), *Riparazione dei danni e miglioramento sismico Torre degli Smeducci. Ricostruzione post sisma (finanziamenti DOCUP 5b), “Relazione Geologica e Geotecnica”*

Progetto DPC-INGV – S1, <http://esse1-gis.mi.ingv.it/> (Ultimo accesso: 14 giugno 2018)

Software utilizzati

MATLAB R2016b, *MathWorks*

GEOPSY pack, versione 2.10.1

SeismoSignal2018, *Seismosoft*

DEEPSOIL v6.1