

INDICE

INTRODUZIONE	2
1. ANALISI E DEFINIZIONE DELL'INPUT SISMICO	3
2. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA, GEOFISICA E GEOTECNICA	8
2.1 Sintesi delle indagini disponibili sui terreni.....	8
2.2 Caratterizzazione dei terreni in campo statico e dinamico	15
2.2.1 Formazione dell'Acquerino (AQR)	16
2.2.2 Arenarie del Monte Falterona (FAL).....	17
2.2.3 Formazione di Sillano (SIL).....	18
2.2.4 Depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello (MGO1a1)	20
2.2.5 Strati con presenza di materiale organico.....	24
2.2.6 Facies argillosa siltosa con intercalazioni ghiaiose (MGO1a1_v)	27
2.2.7 Depositi fluviali del Bacino del Mugello (SIV) e depositi plio-quadernari eluvio-colluviali (b, a, b _s)	29
3. ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE	32
3.1 Codice di calcolo QUAD4M.....	33
3.2 Modellazione delle sezioni	35
3.2.1 Sezione A-A'	42
3.2.2 Sezione A''-A'''	44
3.2.3 Sezione B-B'	46
3.2.4 Sezione B''-B'	48
3.2.5 Sezione C-C', settore nord-orientale.....	50
3.2.6 Sezione C-C', settore sud-occidentale.....	52
3.2.7 Sezione D-D'	57
3.2.8 Sezione E-E'	59
3.2.9 Sezione F-F'	61
3.2.10 Sezione G-G' (Galliano)	63
3.2.11 Sezione H-H' (Galliano).....	65
3.2.12 Sezione I-I' nord	67
3.2.13 Sezione I-I' sud.....	69
3.2.14 Sezione L-L'	71
3.2.15 Sezione N-N'	72
4. ANALISI DEI RISULTATI DELLA MODELLAZIONE	74
5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	94

Introduzione

Nella presente Relazione sono illustrati i risultati dello studio finalizzato alla valutazione della risposta sismica locale nel territorio del Comune di Barberino di Mugello (FI), oggetto della Convenzione stipulata in data 27/09/2010 tra la Regione Toscana – Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica e l'Università degli Studi di Firenze – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DI-CeA).

Lo studio è stato condotto in costante e stretta collaborazione con i tecnici del Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica della Regione Toscana, cui in particolare si deve la programmazione, la direzione e l'interpretazione delle indagini geologiche e geofisiche, e la conseguente modellazione geologica.

Il territorio di Barberino di Mugello si trova in un'area, quella del Mugello, a rischio sismico relativamente elevato, coinvolta in età storica da due importanti eventi, quello del 1542 ($M_w = 5.91$) e quello del 1919 ($M_w = 6.18$), e attualmente classificata in Zona 2 (Deliberazione G.R.T. del 19/06/2006). Esso appartiene alla Zona Sismogenetica 915 (Meletti e Valensise, 2004), cui corrisponde una magnitudo momento massima $M_{W,max} = 6.60$. Dalla normativa attualmente vigente (D.M. 14/01/2008) e in particolare dalla pericolosità sismica del territorio nazionale elaborata dall'INGV, si ricava per l'area una accelerazione di picco su sito di riferimento rigido a superficie orizzontale pari ad $a_g = 0.1956 g$ per un periodo di ritorno $T_R = 475$ anni.

Dal punto di vista geologico il Mugello costituisce un bacino tettonico con orientamento NW-SE che ha subito una subsidenza nel corso del Pliocene e del Pleistocene (3.4-0.7 Ma). Ciò ha portato alla formazione di un vasto lago endoreico, ed alla conseguente deposizione di una spessa coltre di depositi di origine fluvio-lacustre, perlopiù limo-argillosi (ma più grossolani nella porzione inferiore), con sporadica presenza di materiale organico (torba e lignite). In seguito, colmato e svuotato il lago conseguentemente all'apertura dell'attuale Valdisieve, tali depositi sono stati sottoposti all'erosione del Fiume Sieve e dei suoi affluenti (fase degradativa). Gli stessi sono stati anche responsabili, in alcune fasi geologiche (fase aggradativa), dell'apporto di materiale grossolano (Alluvioni della Sieve), individuabili in due principali terrazzi alluvionali (Unità di Scarperia e Unità di Luco di Mugello), oltre agli attuali depositi di fondovalle (Unità di Sagginale). Il substrato, affiorante ai margini del bacino, è perlopiù costituito da arenarie del Dominio toscano (Arenarie del Falterona e Formazione dell'Acquerino). In alcune porzioni, specialmente nella zona sud-occidentale, esso è sormontato da argilliti del Dominio Ligure (Formazione di Sillano), spesso alterate o molto alterate, che altrove, a causa del sollevamento della catena appenninica, sono state completamente erose.

Il territorio di Barberino di Mugello, il Comune più occidentale dell'area, si trova quasi interamente in un sub-bacino, più piccolo di quello principale, che ha subito una minore subsidenza e che quindi vede uno spessore di depositi fluvio-lacustri più ridotto (al massimo un centinaio di metri), ma, d'altra parte, una maggiore presenza di materiale organico. La frazione di Galliano, le cui analisi di risposta sismica locali sono pure descritte in questa relazione, si trova invece al margine nord-occidentale del bacino principale.

Lo studio ha avuto l'obiettivo di fornire al Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica (CRPS), lungo alcune sezioni geologiche da esso determinate, l'andamento dei più comuni fattori di amplificazione sismica. In collaborazione con lo stesso CRPS, è stato effettuato un confronto fra di essi, in modo da individuare il più appropriato per l'elaborazione di una carta di microzonazione sismica di terzo livello (Carta di Microzonazione Sismica con Approfondimenti, secondo la definizione degli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica – Gruppo di Lavoro MS, 2008). Tale carta sarà poi messa a disposizione degli Enti locali, per permettere di organizzare consapevolmente il futuro sviluppo urbanistico del territorio (in termini di posizionamento del nuovo edificato e di requisiti da imporre ad esso) e gli interventi di miglioramento e adeguamento sismico sugli edifici pubblici esistenti.

1. Analisi e definizione dell'input sismico

La scelta dei segnali accelerometrici da utilizzare come input, avendo come riferimento lo spettro di risposta semplificato ottenuto, per categoria di suolo A e tempo di ritorno di 475 anni, dalle indicazioni di normativa (D.M. 14/01/2008), è stata effettuata da EUCENTRE, su commissione dello stesso Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica. Si rimanda al materiale da esso consegnato per ogni considerazione relativa alla scelta ed alle caratteristiche di tali segnali. EUCENTRE ha fornito per il territorio di Barberino di Mugello un set di sette accelerogrammi spettro-compatibili, lo stesso già individuato per il Comune di Villa Colemandina (LU), a cui è associato uno spettro di target sostanzialmente analogo. Gli accelerogrammi così individuati dovranno quindi essere scalati per riportarsi, dall'accelerazione di picco relativa a Villa Colemandina, a quella individuata per Barberino di Mugello.

Di seguito (Figg. 1.1 e 1.2) si riportano gli accelerogrammi selezionati da EUCENTRE e il loro spettro di Fourier. In Tabella 1.1 sono riportati le sigle identificative dei segnali, ed alcune informazioni su di essi.

Tabella 1.1 – Accelerogrammi spettro-compatibili selezionati da EUCENTRE.

ID accelerogramma	ID registrazione	Database	Distanza epicentrale (km)	Magnitudo evento (Mw)	Fattore di scala
I1	000200xa	ESMD	65.00	6.68	0.91
I2	0765y	NGA	28.64	6.93	0.43
I3	1041y	NGA	45.77	6.69	1.52
I4	YMG0190103241528	K-NET1	62.48	6.80	1.29
I5	IWT0100305261824	K-NET2	50.50	7.00	1.12
I6	SAG0010503201053	K-NET1	36.18	6.60	1.63
I7	IWT0100806140843	K-NET2	23.05	6.90	0.73

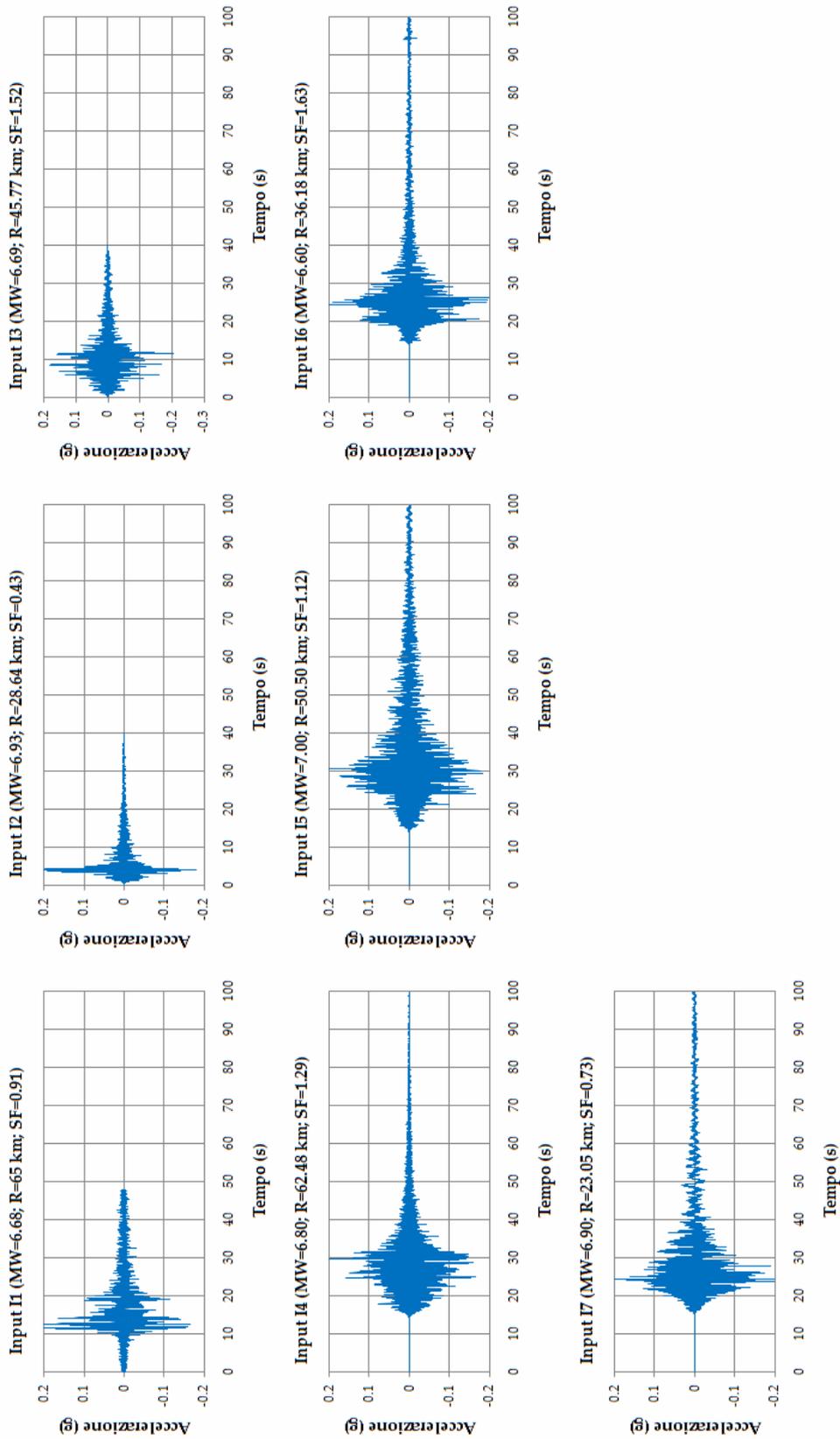


Figura 1.1 – Accelerogrammi spettro-compatibili individuati per il territorio di Barberino di Mugello da EUCENTRE.

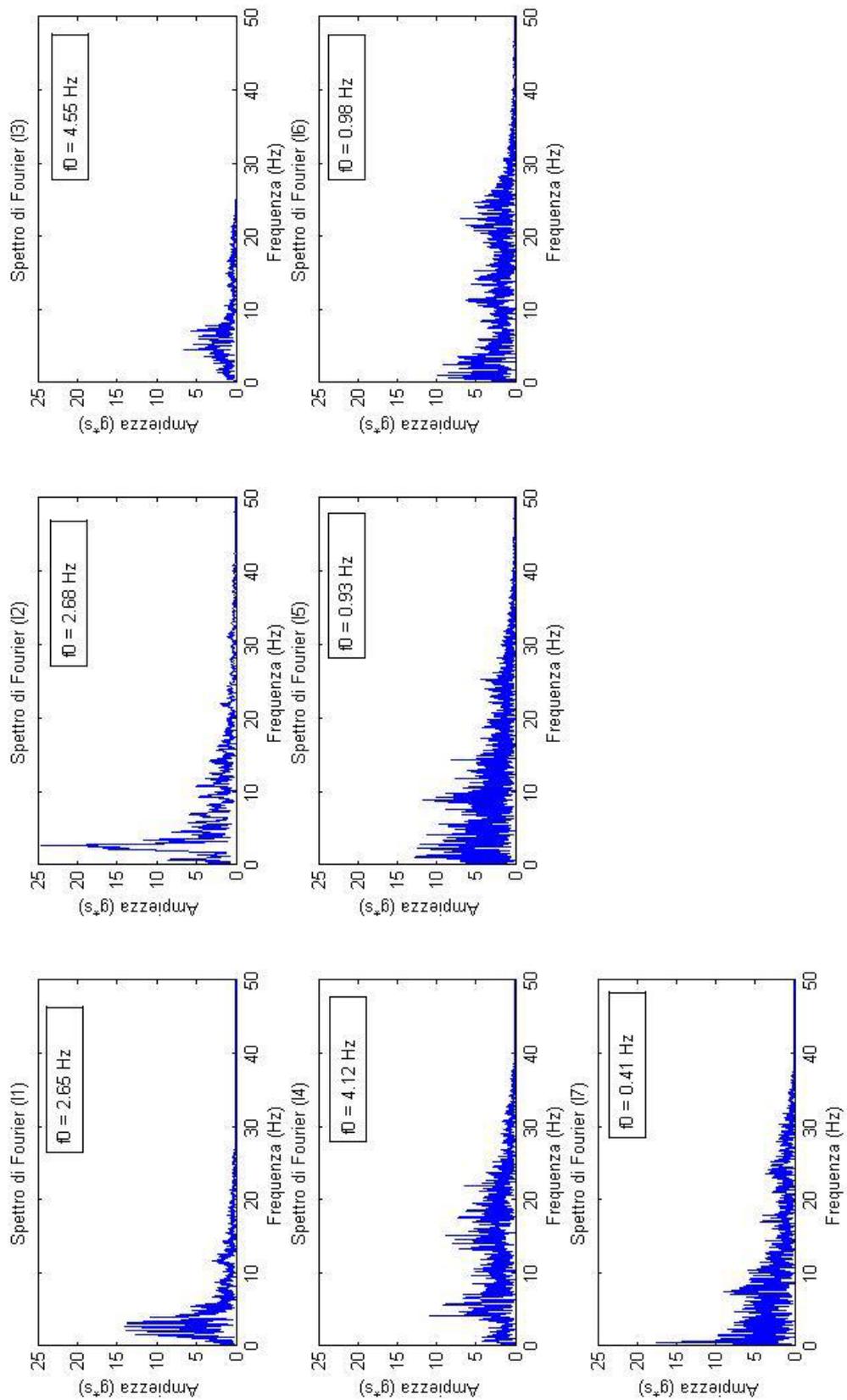


Figura 1.2 – Spettri di Fourier degli accelerogrammi spettro-compatibili individuati per il territorio di Barberino di Mugello da EUCENTRE.

Dall'analisi dei sette segnali sismici, si è notato che due di essi (indicati con I3 e I6) non erano particolarmente significativi dal punto di vista dell'analisi di risposta sismica locale, avendo caratteristiche molto simili a quelle degli altri. In particolare, lo spettro di Fourier relativo a I3 ha ampiezze limitate, e copre un campo di frequenze contenuto, con una forma molto simile a quella della prima parte dello spettro di Fourier di I4. Analogamente, lo spettro di Fourier dell'accelerogramma I6 è molto simile a quello di I5, con ampiezze inferiori nel campo di frequenze di interesse ingegneristico (< 20 Hz). Si è verificato inoltre che la rimozione dei due segnali I3 e I6 non comportava alcun sostanziale cambiamento dello spettro medio del set (Figura 1.3). Si è dunque deciso di utilizzare per le analisi i soli accelerogrammi I1, I2, I4, I5, I7 essendo il numero totale 5 comunque superiore a quello minimo (4) indicato dagli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica.

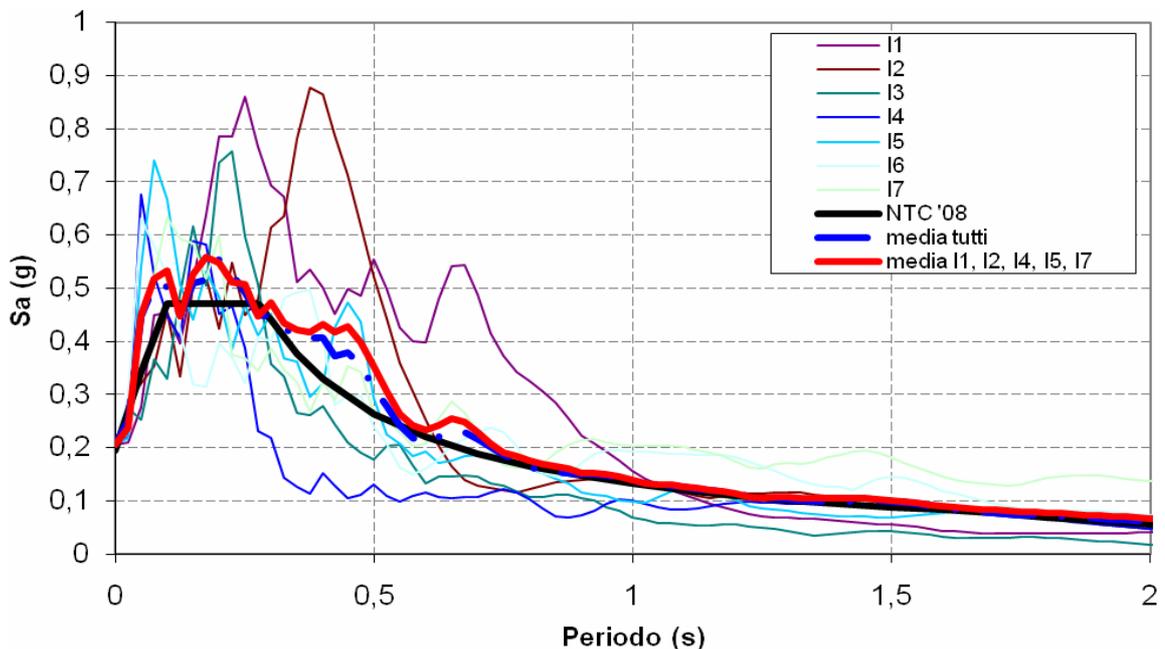


Figura 1.3 – Spettri di risposta degli accelerogrammi spettro-compatibili individuati per il territorio di Barberino di Mugello da EUCENTRE, confrontati con lo spettro di target; valore medio di tali spettri, e valore medio degli spettri dei soli accelerogrammi scelti per l'esecuzione delle analisi di risposta sismica locale.

Di quattro dei cinque accelerogrammi utilizzati nelle analisi (tutti, tranne I1) è stata tagliata la parte finale, che vedeva sostanzialmente la registrazione del solo rumore di fondo, andando molto oltre quello che poteva essere considerato il termine del segnale sismico. Questo ha permesso sia di eliminare una parte delle componenti del segnale non relative al terremoto, sia di diminuire il costo computazionale, già molto elevato, delle analisi. L'operazione, delicata, è stata fatta controllando che essa non apportasse cambiamenti allo spettro di Fourier delle registrazioni (Figura 1.4).

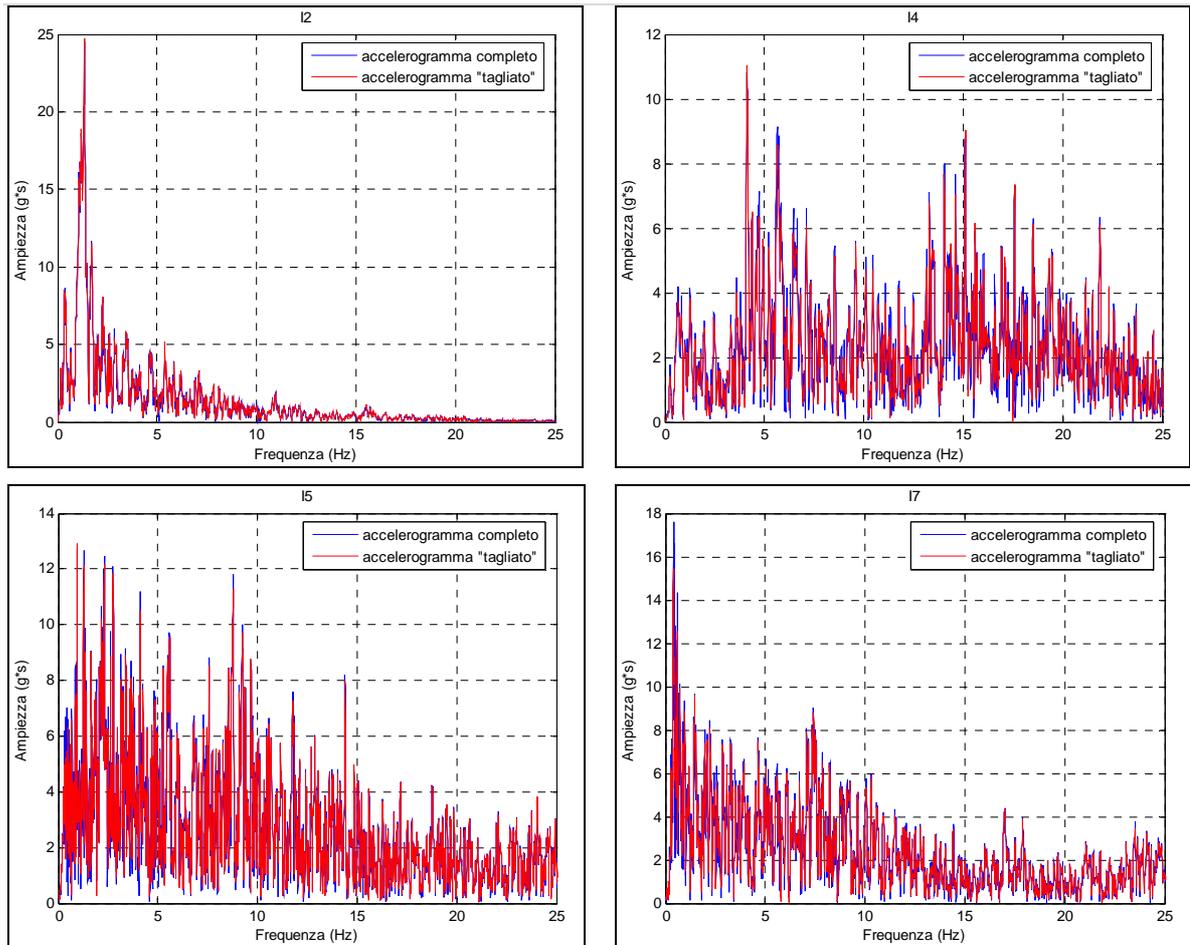


Figura 1.4 – Confronto fra gli spettri di Fourier degli accelerogrammi I2, I4, I5 e I7 relativi all'intera registrazione (in blu) e alla registrazione "tagliata" utilizzata per le analisi di risposta sismica locale (in rosso).

In Tabella 1.2 si riassumono le principali caratteristiche dei cinque segnali, così come sono stati utilizzati per le analisi di risposta sismica locale.

Tabella 1.2 – Caratteristiche degli accelerogrammi utilizzati per le analisi di risposta sismica locale, in termini di durata del segnale D , numero di punti campionati N , passo di campionamento DT , frequenza fondamentale f_0 .

Accelerogramma	D [s]	N [-]	DT [s]	f_0 [Hz]
I1	47.950	4795	0.010	2.648
I2	25.005	5001	0.005	1.340
I4	40.010	4001	0.010	4.124
I5	70.010	7001	0.010	0.933
I7	60.010	6001	0.010	0.417

2. Caratterizzazione geologica, geofisica e geotecnica

2.1 Sintesi delle indagini disponibili sui terreni

La valutazione della pericolosità sismica richiede una conoscenza approfondita del sottosuolo, che non si limita esclusivamente alla morfologia del deposito, ma che si estende alle caratteristiche meccaniche e dinamiche dei litotipi che lo costituiscono. A questo fine, nell'ambito dei Programmi Regionali VEL e DOCUP (finalizzati alla valutazione degli effetti locali rispettivamente nei centri urbani e nelle aree produttive), è stato finanziato un consistente numero di indagini in situ e di laboratorio.

Tali indagini sono state eseguite da Imprese specializzate nel settore, opportunamente selezionate attraverso procedure di appalto pubblico, ed effettuate secondo i protocolli previsti. Il Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica ne ha pianificata l'esecuzione e controllato ed interpretato i risultati, prima di utilizzarli per la definizione del modello geologico dell'area e di metterli a disposizione del pubblico e della Sezione Geotecnica del DICeA per l'esecuzione delle analisi di RSL.

Nell'area del sub-bacino di Barberino di Mugello sono stati effettuati 14 sondaggi a carotaggio continuo, denominati S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S12, S13, S14, S15, S17. In ciascuno di essi è stata anche eseguita una prova down-hole. Sono anche stati prelevati 20 campioni indisturbati, su cui sono state eseguite prove di caratterizzazione, prove per la determinazione delle caratteristiche meccaniche, prove edometriche, prove per la determinazione del comportamento dinamico. Inoltre, sono state eseguite 9 indagini sismiche a rifrazione, denominate ST1, ST2, ST3, ST5, ST6, ST7, ST11, ST12, ST13. In Figura 2.1 si riporta la carta geologica del sub-bacino di Barberino di Mugello sulla quale è indicata l'ubicazione dei sondaggi e delle stese sismiche (per quanto riguarda queste ultime, alcune di quelle programmate, e riportate in figura, non sono state eseguite). Nella stessa figura sono riportate anche le tracce delle sezioni geologiche individuate dal CRPS, oggetto delle analisi di risposta sismica locale descritte nella presente Relazione. In Tabella 2.1 sono riportate alcune informazioni relative ai sondaggi effettuati (anno di realizzazione, profondità, numero di prove SPT eseguite, numero di campioni indisturbati prelevati). In Tabella 2.2 sono elencate le prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati prelevati nell'area: in essa viene anche riportata la formazione da cui sono stati estratti, secondo la denominazione del Vol. 5 (Legende per la Realizzazione della Cartografia Geologica, Geomorfologica e Litologico-Tecnica per le Aree del Mugello) delle Istruzioni Tecniche per le Indagini Geologiche, Geofisiche, Geognostiche e Geotecniche per la Valutazione degli Effetti Locali nei Comuni Classificati Sismici della Toscana (Regione Toscana – Servizio Sismico Regionale, 2007).



Figura 2.1 – Carta geologica del sub-bacino di Barberino di Mugello con ubicazione delle indagini (stese sismiche e sondaggi) e tracce delle sezioni (le sezioni M-M', O-O' e P-P' non sono state modellate).

Tabella 2.1 – Sondaggi, numero di campioni indisturbati (C.I.) e di prove SPT in foro (area di Barberino di Mugello).

Sond.	Anno	Prof. (m)	N° SPT	N° C.I.
S2	2005	70.0	0	0
S3	2006	15.0	2	0
S4	2006	43.0	4	2
S5	2006	20.0	1	2
S6	2006	71.6	3	2
S7	2006	15.0	2	1
S8	2006	50.0	4	2
S9	2005	55.0	5	3
S10	2005	32.5	5	2
S12	2007	72.0	3	1
S13	2007	80.0	4	1
S14	2007	30.0	4	1
S15	2007	30.0	3	1
S17	2007	40.0	3	2

Tabella 2.2 – Prove geotecniche di laboratorio (area di Barberino di Mugello).

Camp.	Prof. [m]	Formaz.	γ	γ_d	G _s	w	GR	LL. AA.	EDO	DS	CU	RC	TS	BE
S4-C1	5.50-5.80	MGO1a1	X	X		X	X		X					
S4-C2	10.50-10.90	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X		X	X		X
S5-C1	7.50-8.00	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X		X			X
S5-C2	10.00-10.34	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X
S6-C1	4.85-5.45	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X					
S6-C2	10.50-11.20	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X		X			
S7-C1	1.70-2.20	SIV2	X	X	X	X	X	X	X		X			
S8-C1	3.10-3.70	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X		X			X
S8-C2	10.20-10.80	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X			X		
S9-C1	1.50-2.15	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X			X		
S9-C2	6.00-6.50	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X	X				
S9-C3	13.50-14.10	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X
S10-C1	1.50-1.95	SIL	X	X	X	X	X	X	X	X				
S10-C2	6.00-6.20	SIL	X	X	X	X	X	X	X			X		
S12-C1	16.50-17.00	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X		X			
S13-C1	16.50-17.10	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X
S14-C1	10.40-11.00	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X		X	X		X
S15-C1	5.80-6.50	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X		X	X		X
S17-C1	3.00-3.55	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X		X	X		
S17-C2	6.00-6.55	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X		X		X	

Legenda:

γ peso di volume
 γ_d peso di volume secco
 G_s gravità specifica

w	contenuto naturale d'acqua
GR	analisi granulometrica
LL.AA.	limiti di Atterberg
EDO	prova di compressione edometrica ad incrementi di carico
DS	prova di taglio diretto
CU	prova di compressione triassiale consolidata non drenata (in tutti i casi consolidata a K_0 tranne per S17-C1, in cui è consolidata isotropicamente)
RC	prova di colonna risonante
TS	prova di taglio torsionale ciclico
BE	misura della velocità delle onde in provini triassiali (bender elements)

Nell'area della frazione di Galliano (appartenente al sub-bacino di Scarperia e Borgo San Lorenzo) sono stati effettuati 3 sondaggi a carotaggio continuo, denominati S1, S11, S16. In ciascuno di essi è stata anche eseguita una prova down-hole. Sono anche stati prelevati 4 campioni indisturbati, su cui sono state eseguite prove di caratterizzazione, prove per la determinazione delle caratteristiche meccaniche, prove edometriche, prove per la determinazione del comportamento dinamico. Inoltre, sono state eseguite 3 indagini sismiche a rifrazione, denominate ST4, ST9, ST10. In Figura 2.2 si riporta la carta geologica dell'area, su cui è indicata la posizione dei sondaggi e delle stese. In figura sono anche riportate le tracce di alcune delle sezioni geologiche individuate dal CRPS sulle quali sono state effettuate le analisi di risposta sismica locale. In Tabella 2.3 sono riportate alcune informazioni relative ai sondaggi effettuati (anno di realizzazione, profondità, numero di prove SPT eseguite, numero di campioni indisturbati prelevati). In Tabella 2.4 sono elencate le prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati prelevati nell'area: in essa viene anche riportata la formazione da cui sono stati estratti, secondo la denominazione del Vol. 5 (Legende per la Realizzazione della Cartografia Geologica, Geomorfologica e Litologico-Tecnica per le Aree del Mugello) delle Istruzioni Tecniche per le Indagini Geologiche, Geofisiche, Geognostiche e Geotecniche per la Valutazione degli Effetti Locali nei Comuni Classificati Sismici della Toscana (Regione Toscana – Servizio Sismico Regionale, 2007).

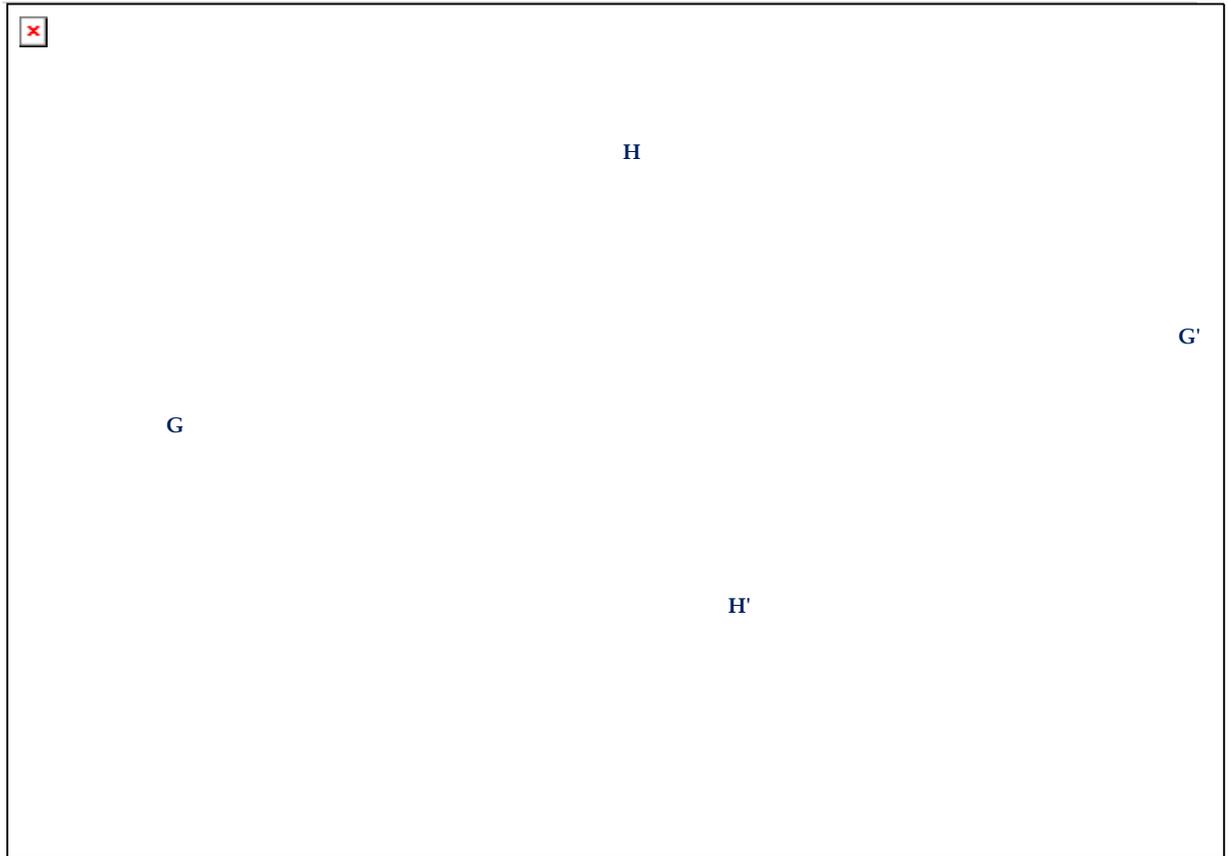


Figura 2.2 – Carta geologica con ubicazione delle indagini (stese sismiche e sondaggi) effettuate nell'ambito del Programma VEL (area di Galliano). Il sondaggio S16 si trova al di fuori della zona rappresentata, in direzione sud.

Tabella 2.3 – Sondaggi, numero di campioni indisturbati (C.I.) e di prove SPT in foro (area di Galliano).

Sond.	Anno	Prof. (m)	N° SPT	N° C.I.
S1	2005/2006	72.0	3	1
S11	2005	58.0	5	3
S16	2007	15.0	1	0

Tabella 2.4 – Prove geotecniche di laboratorio (area di Galliano).

Camp.	Prof. [m]	Formaz.	γ	γ_d	G_s	w	GR	LL. AA.	EDO	C0	TC	RC	TS	BE
S1-C1	11.20-11.90	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X	X		X		
S11-C1	1.50-1.80	SIV3	X	X	X	X	X	X						
S11-C2	6.00-6.70	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
S11-C3	15.00-15.60	MGO1a1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X

Legenda:

γ	peso di volume
γ_d	peso di volume secco
G_s	gravità specifica
w	contenuto naturale d'acqua
GR	analisi granulometrica
LL.AA.	limiti di Atterberg
EDO	prova di compressione edometrica (a velocità di deformazione costante in S1-C1, ad incremento di carico negli altri casi)
CU	prova di compressione triassiale consolidata consolidata a K_0 (drenata in S11-C2, non drenata negli altri casi)
TC	prova triassiale ciclica tipo "Property"
RC	prova di colonna risonante (in S11-C3 eseguite due prove a diversa pressione di consolidazione e una terza prova con l'oscillatore di Hardin)
TS	prova di taglio torsionale ciclico
BE	misura della velocità delle onde in provini triassiali (bender elements)

2.2 Caratterizzazione dei terreni in campo statico e dinamico

Gli elaborati grafici relativi alle stratigrafie dei sondaggi effettuati e alle prove down-hole sono riportati nel capitolo Allegati. Nello specifico, l'Allegato A contiene le stratigrafie, nelle quali sono indicati anche i risultati delle prove penetrometriche dinamiche (SPT) e delle indagini speditive volte alla definizione della coesione non drenata (penetrometro tascabile e scissometro tascabile). Nell'Allegato B sono riportati, per ciascun foro di sondaggio, i profili di velocità ricavati tramite le prove down-hole. Non sono riportati in questa sede i risultati delle prove di sismica a rifrazione, anch'esse effettuate e finanziate nell'ambito dei Programmi VEL e DOCUP, poiché ritenuti meno significativi rispetto alle down-hole ai fini della determinazione della risposta sismica locale, precisando che essi sono stati determinanti nell'elaborazione del modello geologico dell'area, operazione di competenza del Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica.

I risultati ottenuti dalle prove di laboratorio realizzate sui campioni indisturbati prelevati in sito ed indicate nelle tabelle precedenti sono riassunti per ciascun campione di ciascun sondaggio nell'Allegato C.

Ai fini dell'analisi della risposta sismica locale tuttavia l'elemento di maggior interesse è costituito dalle proprietà dinamiche desunte dalle prove. Per tale ragione dunque ci si limita a riportare i risultati in termini di profili di velocità delle onde sismiche e curve di decadimento e di smorzamento per le varie formazioni presenti nel sub-bacino di Barberino, così da ricavare i parametri necessari alla modellazione. Come appare evidente dai suddetti profili di velocità, a causa della notevole dispersione dei dati non è possibile identificare un valore medio da impiegare per tutte le modellazioni, né individuare una tendenza di massima (ad esempio un miglioramento delle caratteristiche in una certa direzione) tale da consentire una divisione dell'area in fasce a cui attribuire valori costanti, perciò si è stabilito di legare la modellazione di ciascuna sezione al sondaggio o ai sondaggi effettuati in prossimità di essa, rinunciando a definire dei valori caratteristici validi per l'intero sub-bacino.

Procediamo dunque alla rappresentazione dei risultati partendo dai substrati e proseguendo verso la superficie del deposito.

Come noto, dati i valori di ρ e V_s è possibile ricavare il modulo di taglio G_0 (modulo di taglio iniziale, corrispondente a bassissimi livelli di deformazione) mediante la relazione

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2$$

Noti i valori di V_s e V_P è possibile stimare il coefficiente Poisson ν tramite l'inversione della relazione

$$\frac{V_P}{V_s} = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - \nu)}{1 - 2\nu}}$$

Ci limitiamo dunque a riportare per ciascuna formazione i soli profili di V_s e V_P , essendo le altre grandezze significative ricavabili dalle precedenti come appena descritto.

2.2.1 Formazione dell'Acquerino (AQR)

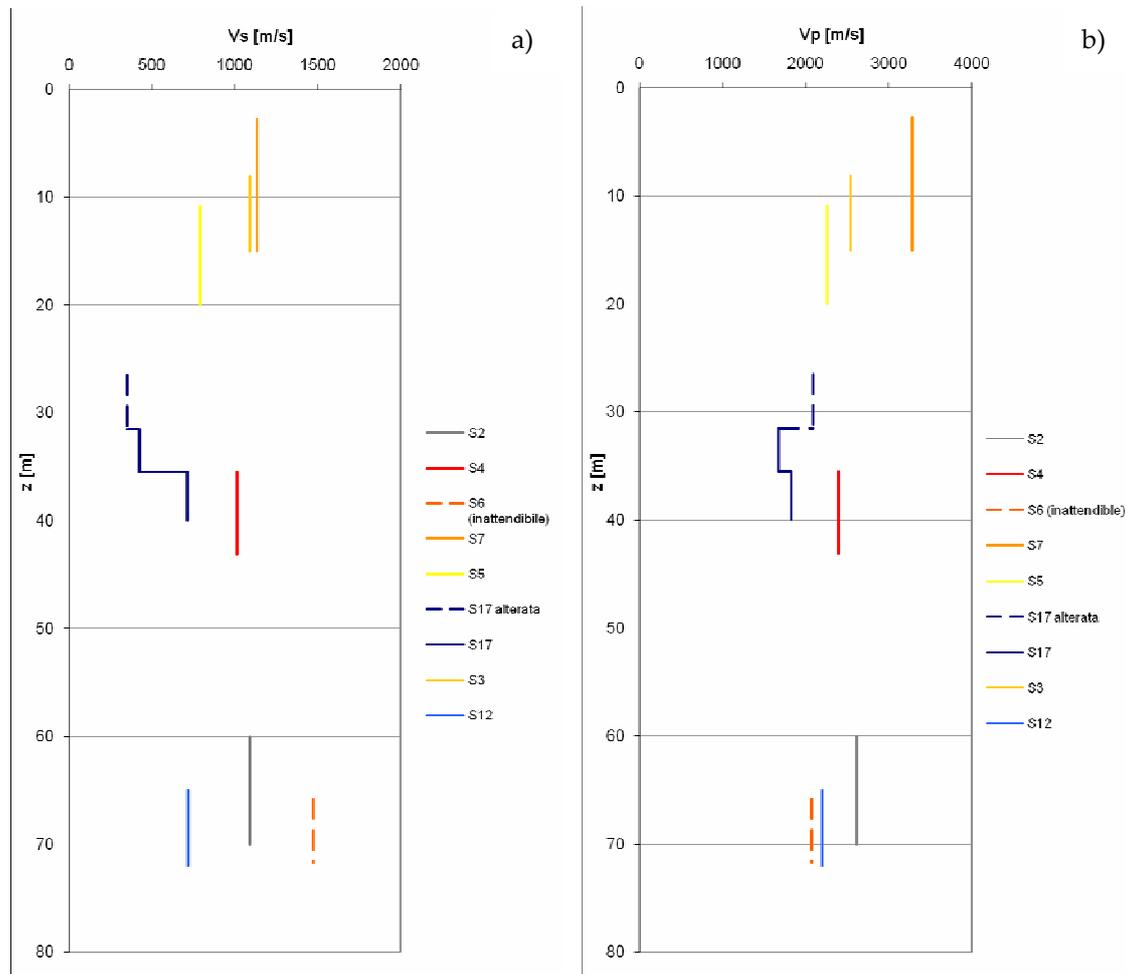


Figura 2.3 – Profili di velocità delle onde di taglio (a) e longitudinali (b) con la profondità ottenuti tramite prove down-hole per il membro pelitico-arenaceo (AQR2) e per il membro pelitico (AQR3) della Formazione dell'Acquerino.

Per quanto riguarda la Formazione dell'Acquerino si è scelto di effettuare una caratterizzazione unica per l'intero comparto, ritenuta valida per tutti e tre i suoi membri AQR1, AQR2 e AQR3 (anche se AQR1 non è presente in nessuna delle sezioni analizzate).

Come affermato sopra, noti i valori di ρ , V_s e V_p è possibile ricavare i valori di G_0 e ν , tuttavia ai fini di una caratterizzazione completa del materiale occorre definire anche il valore del rapporto di smorzamento D . In linea teorica, poiché il substrato ha caratteristiche elastiche, dovremmo assumere uno smorzamento nullo; tuttavia, essendo l'ipotesi di elasticità lineare un'astrazione e dovendo comunque fornire in fase di modellazione un valore rappresentativo del rapporto di smorzamento iniziale D_0 , è stato adottato in questa sede un valore pari allo 0.5%, rapporto mantenuto costante per qualunque livello di deformazione.

Relativamente al peso di volume γ da attribuire alla roccia, in mancanza di dati al riguardo si è fatto ricorso a valori di letteratura assumendo $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$, valore all'incirca medio dell'intervallo in cui rientra generalmente il peso di volume delle arenarie ($18 \div 27 \text{ kN/m}^3$; Alberti, 2010).

2.2.2 Arenarie del Monte Falterona (FAL)

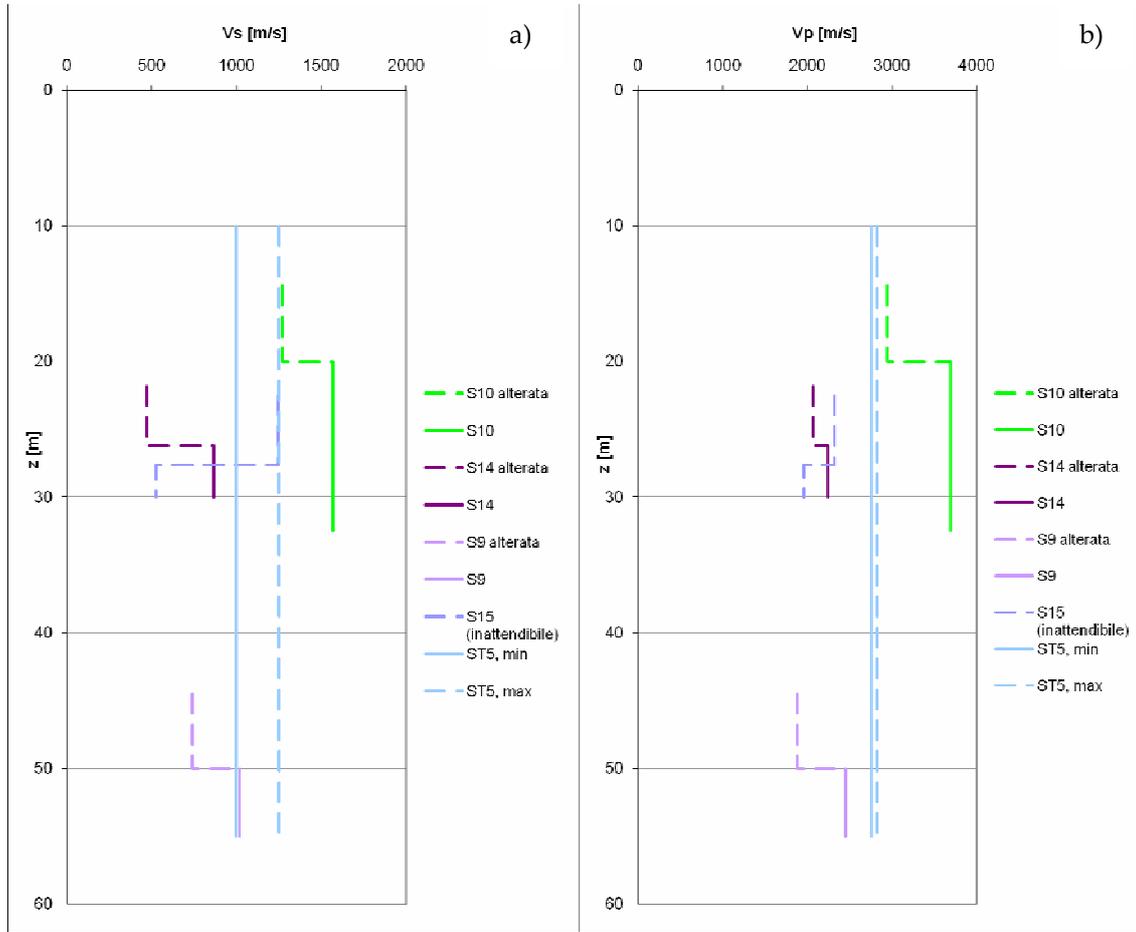


Figura 2.4 – Profili di velocità delle onde di taglio (a) e longitudinali (b) con la profondità ottenuti tramite prove down-hole e indagini sismiche a rifrazione per il Membro di Montalto delle Arenarie del Falterona.

Il Membro di Montalto (FAL3) sia per ragioni geologiche che in virtù degli elevati valori di V_s rilevati dalle down-hole e dalle indagini di sismica a rifrazione, di cui nella Figura 2.4 sono riportati i risultati di alcune stese, rappresenta insieme alla Formazione dell'Acquerino un altro substrato sismico. Relativamente ai valori del peso di volume e del rapporto di smorzamento, sono stati adottati per tale unità valori rispettivamente pari a $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$ e $D_0 = 0.5\%$.

2.2.3 Formazione di Sillano (SIL)

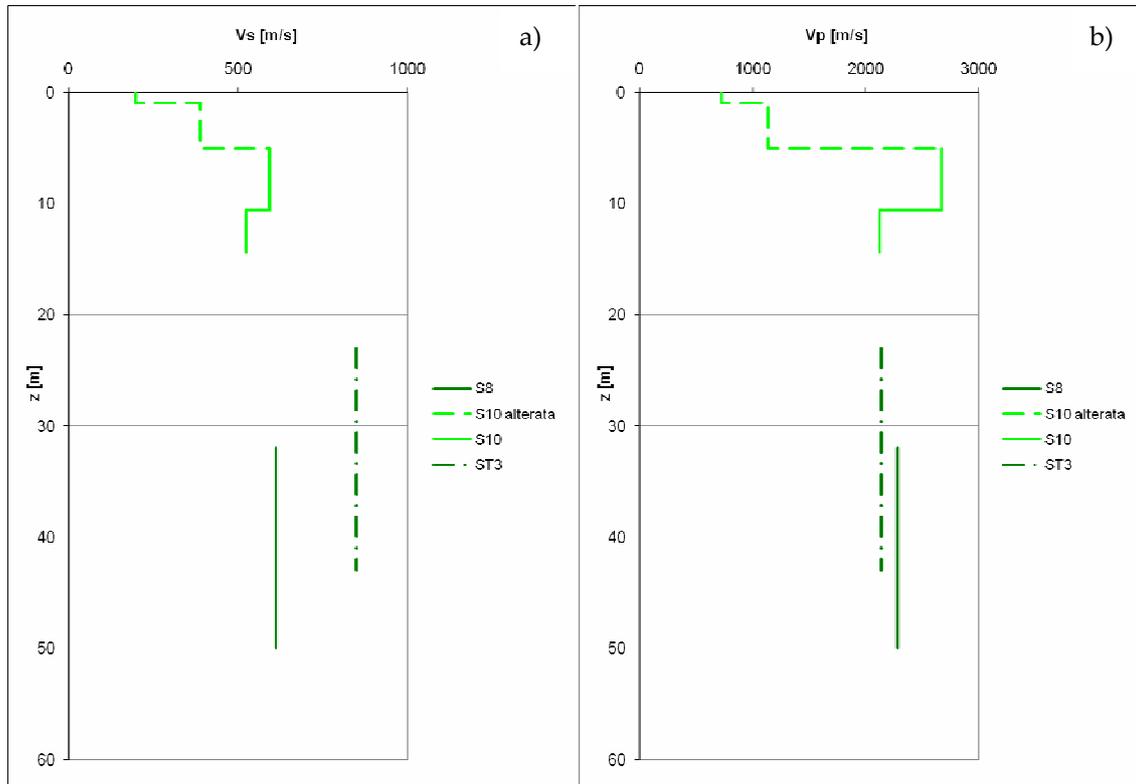


Figura 2.5 – Profili di velocità delle onde di taglio (a) e longitudinali (b) con la profondità ottenuti tramite prove down-hole e indagini sismiche a rifrazione per la Formazione di Sillano.

La Formazione di Sillano, analogamente alle Arenarie del Falterona e alla Formazione dell'Acquerino, costituisce dal punto di vista geologico un substrato, tuttavia non lo è dal punto di vista geotecnico e sismico. Essa infatti possiede caratteristiche più simili a quelle di un terreno duro che di una roccia, e tali sono anche i valori di velocità delle onde sismiche misurati al suo interno. Non si può dunque considerare tale materiale come avente un comportamento approssimativamente elastico lineare o addirittura rigido; al contrario le argilliti sono caratterizzate da una degradazione delle caratteristiche meccaniche all'aumentare della deformazione e da un incremento delle loro capacità dissipative, come un qualunque terreno a comportamento visco-elastico. Come tali, dunque, sono state trattate nel corso delle analisi di risposta sismica locale. Anziché adottare curve di decadimento e di smorzamento tratte dalla letteratura, sono stati utilizzati i risultati di una prova di colonna risonante effettuata su un campione prelevato all'interno di questa Formazione, ai quali è stato adattato il modello di Ramberg e Osgood (1943). L'adattamento non risulta ottimale ($R^2 = 0.96$ per la curva di decadimento, $R^2 = 0.85$ per la curva di smorzamento): ciò è dovuto sia alle caratteristiche del materiale (intermedio tra un terreno e una roccia), che rendono la prova di colonna risonante di difficile esecuzione, sia al disturbo del provino, estratto da una fustella ovalizzata e dunque, come affermato dalla stessa ditta esecutrice delle prove di laboratorio, inadatta alla garanzia di un campione di buona qualità. In Figura 2.6 sono rappresentate la curva di decadimento e la curva di smorzamento ottenute per la Formazione di Sillano; i punti indicati sono le coppie $(G/G_0, \gamma)$ e (D, γ) misurate nella prova dinamica di laboratorio.

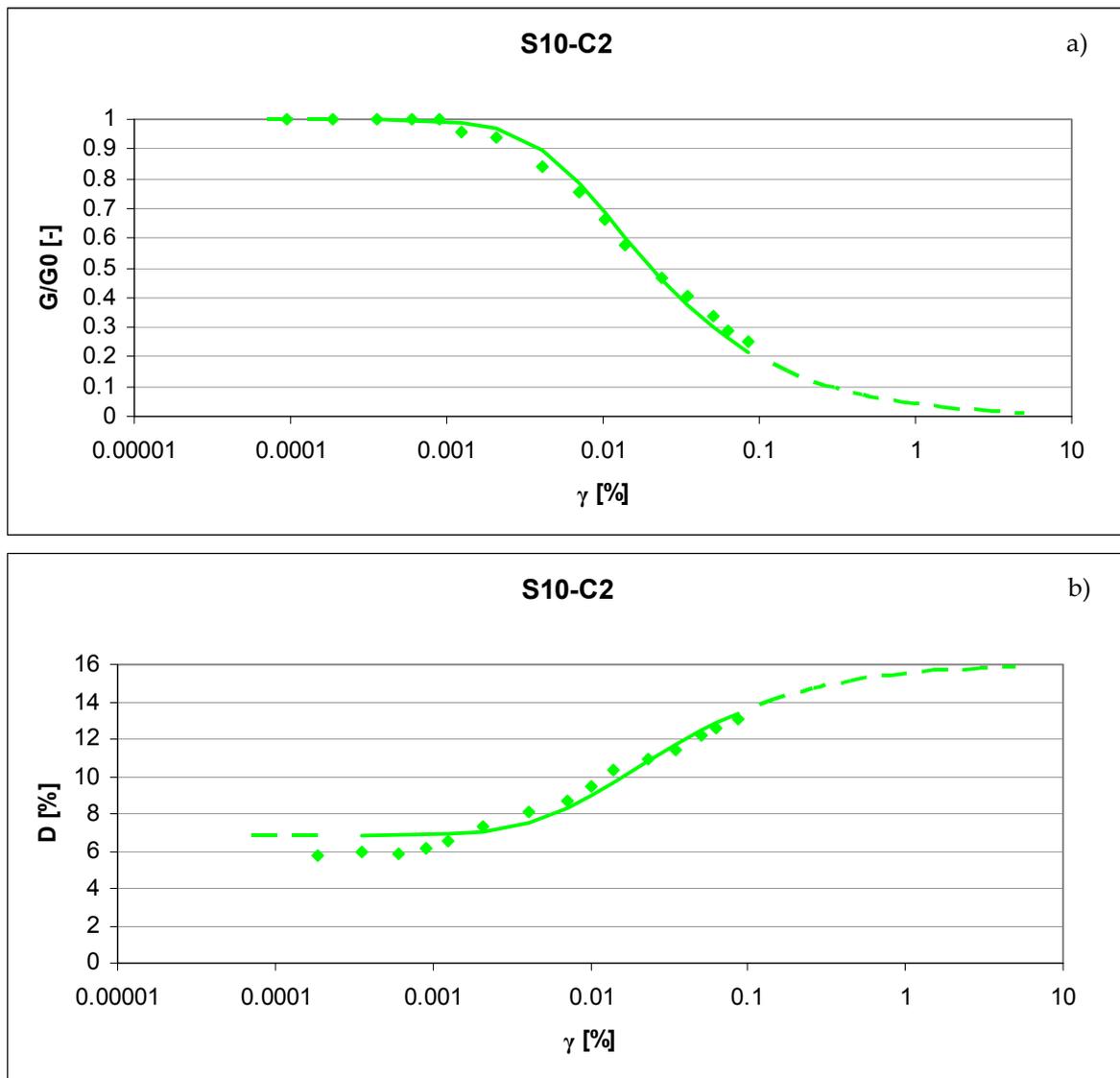


Figura 2.6 – Curve di decadimento (a) e di smorzamento (b) per la Formazione di Sillano ricavate dalla prova di colonna risonante (RC) effettuata sul campione C2 del sondaggio S10.

Per quanto riguarda il peso di volume, si è attribuito alla formazione il valore ottenuto come media di quelli ricavati nelle varie prove effettuate sul campione C2 del sondaggio S10, ovvero $\gamma = 20.76 \text{ kN/m}^3$. Al solo strato superficiale di alterazione, da cui è estratto il campione C1 del sondaggio S10, si è attribuito il valore ottenuto come media di quelli ricavati nelle varie prove effettuate su tale provino, vale a dire $\gamma = 19.95 \text{ kN/m}^3$. Non si è ritenuto opportuno, nonostante il discreto spessore della formazione, che arriva anche a 20 m, ipotizzare una ulteriore crescita della densità con la profondità: infatti, la fascia inferiore, in prossimità del contatto litologico con le Arenarie del Falterona, è alterata. In mancanza di dati si ritiene che l'alterazione compensi il maggior confinamento, e quindi che il peso di volume resti costante fino alla superficie di separazione tra tale unità e le Arenarie del Falterona.

2.2.4 Depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello (MGO1a1)

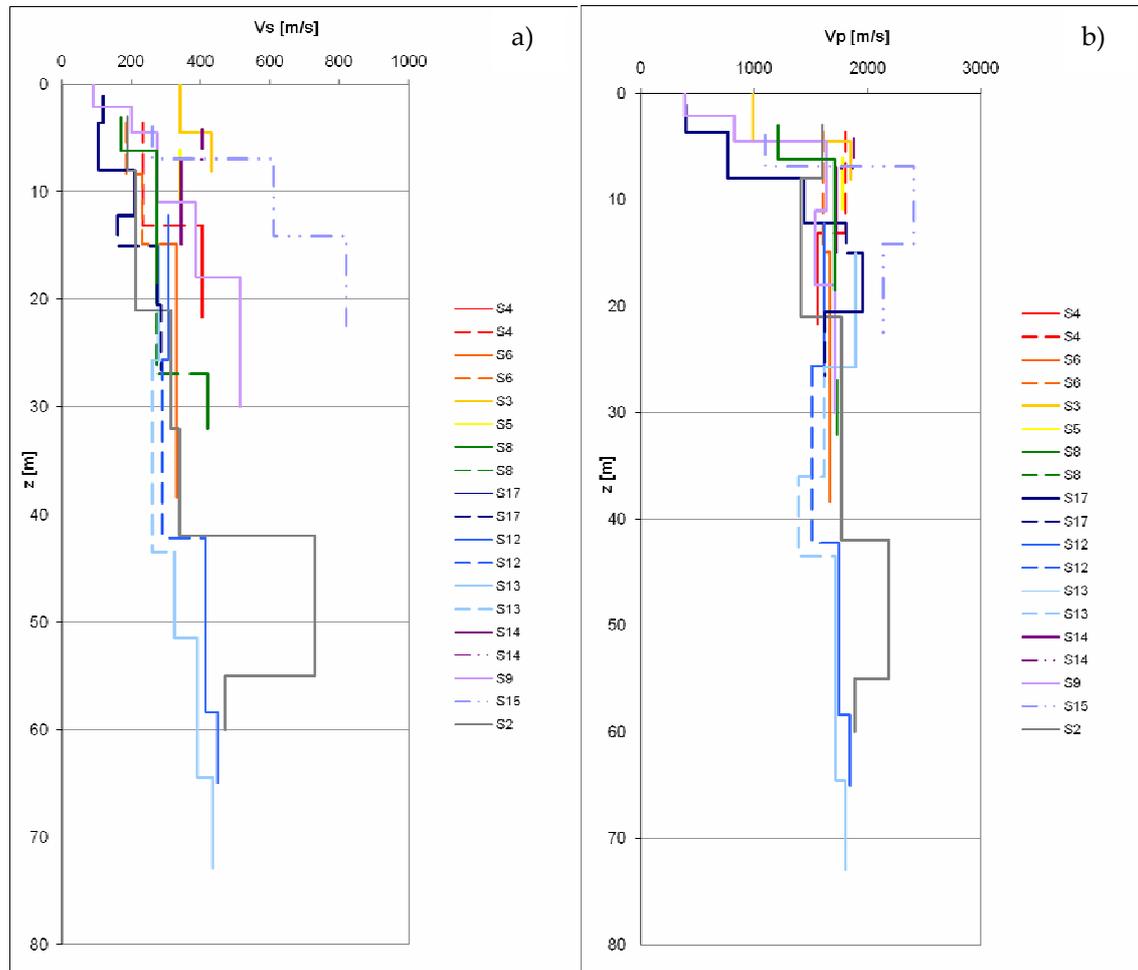


Figura 2.7 – Profili di velocità delle onde di taglio (a) e longitudinali (b) con la profondità ottenuti tramite prove down-hole e indagini sismiche a rifrazione per i depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello.

I depositi fluvio-lacustri rappresentano di gran lunga la formazione più rilevante nell'area di studio. Essi infatti riempiono completamente le paleovalle sepolte nell'area, giungendo a spessori di circa 100 m, solo parzialmente ricoperti da un "velo" (il termine pare adatto, visto l'esiguo spessore in confronto a quello delle altre unità, in genere di pochi metri) di depositi alluvionali superficiali. In pratica, a questa formazione appartiene l'intero deposito i cui effetti stratigrafici devono essere valutati attraverso le analisi di risposta sismica locale.

Per questo motivo, sui sedimenti dell'antico lago plio-pleistocenico sono state effettuate numerose indagini, in situ e in laboratorio, in modo da far emergere un quadro abbastanza dettagliato delle loro proprietà, e permettere dunque una caratterizzazione geotecnica pertinente, sia in campo statico sia in condizioni dinamiche.

Come emerge chiaramente dalle figure precedenti, la variabilità è estremamente elevata: alla stessa profondità, la velocità delle onde di taglio può variare anche di oltre 300 m/s. Se tale differenziale può non essere considerato così rilevante per un substrato (pur restando più che sensibile), in ragione delle velocità comunque molto elevate, per un deposito, in cui valori di V_s sono inferiori, una variazione di 300 m/s può significare uno scarto tra il valore minimo e quello massimo anche di due o tre volte. Risulta dunque evidente quanto già affermato in precedenza, ossia che non è possibile

utilizzare un valore medio (o un andamento medio con la profondità) uguale per tutta la formazione. La ragione della notevole dispersione dei dati risiede nel fatto che la diversità dell'ambiente di provenienza e di erosione ha originato dei sedimenti molto diversi all'interno della medesima formazione. Una certa omogeneità tuttavia si riscontra nella parte centrale (settore che oggi è in gran parte sommerso dal Lago di Bilancino) e più lontana delle antiche sponde; invece le paleovalle, che separavano le varie insenature in cui sboccavano i diversi immissari, sono caratterizzate da materiali ben differenti una dall'altra.

Il criterio di scelta, dunque, non può che essere quello di definire le caratteristiche dinamiche della formazione fluvio-lacustre in base alle caratteristiche dei sondaggi effettuati nella paleovalle in esame.

Per quanto riguarda le altre caratteristiche meccaniche (in particolare il peso di volume), si è seguito lo stesso principio appena illustrato a proposito dei profili di velocità. Si è rinunciato cioè alla definizione di un valore medio uguale per tutta la formazione, legando invece i risultati ottenuti per i vari provini alle paleovalle da cui sono stati estratti. I valori ottenuti come media dei risultati delle prove di laboratorio eseguite su ciascun campione mostrano infatti una variabilità analoga a quella dei profili di velocità, come emerge dalla Figura 2.8.

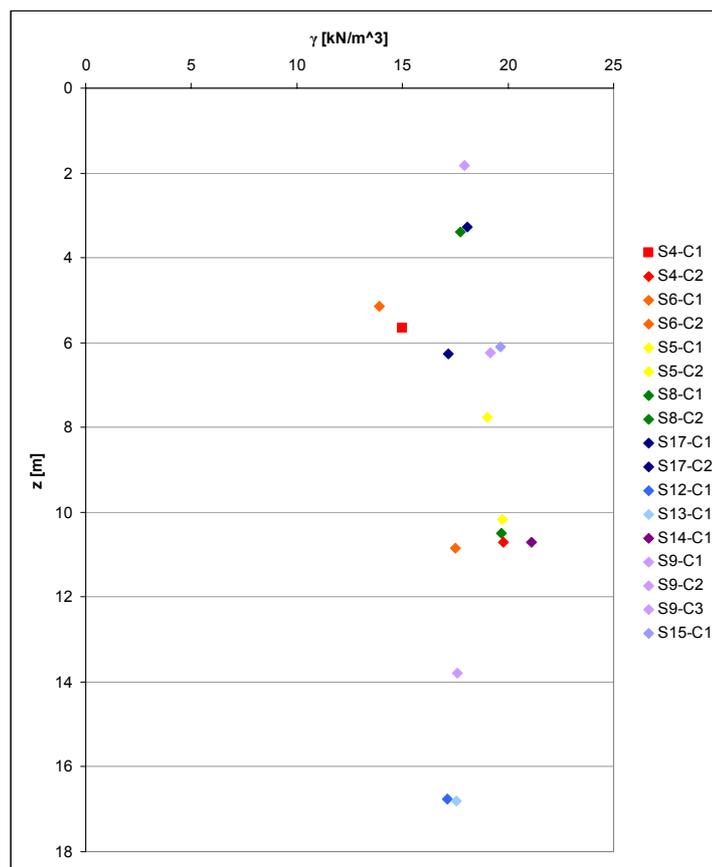


Figura 2.8 – Valori del peso di volume ottenuti da prove di laboratorio eseguite su campioni prelevati all'interno dei depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello, ordinati secondo la profondità di estrazione dei provini.

Per quanto riguarda le curve di decadimento e di smorzamento, si hanno a disposizione numerose prove di colonna risonante e di taglio torsionale ciclico, di cui nelle figure successive, da 2.9 a 2.11, si riportano i risultati.

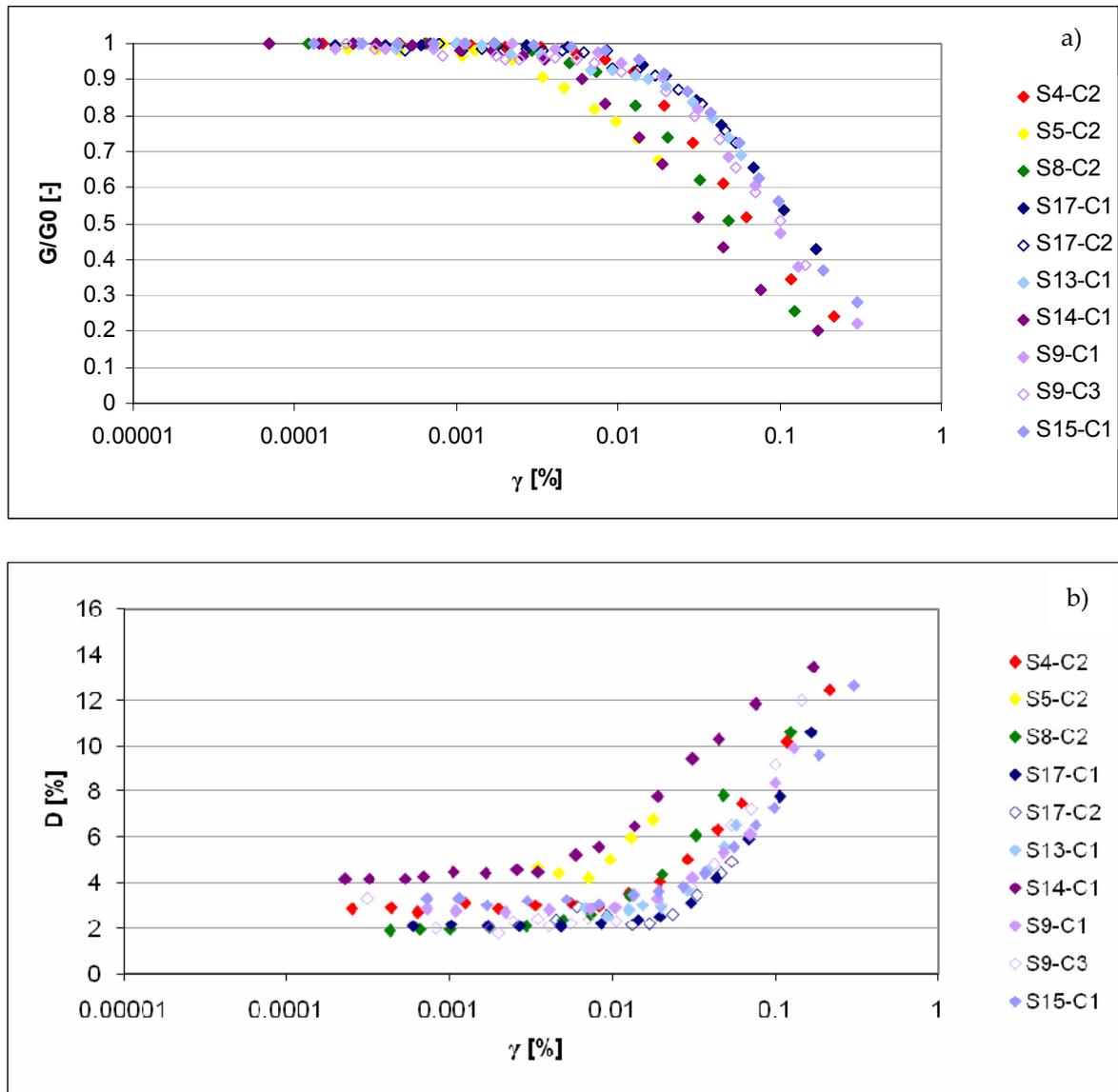


Figura 2.9 – Risultati delle prove dinamiche di laboratorio in termini di modulo di taglio normalizzato (a) e di rapporto di smorzamento (b) eseguite su campioni prelevati all'interno dei depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello.

A questo riguardo, si riscontrano dei risultati piuttosto omogenei, soprattutto per il modulo di taglio normalizzato; risultati difformi si registrano soltanto per i campioni estratti dai sondaggi S4, S5 (ritenuto non attendibile), S8 e S14. Si è deciso dunque di procedere analogamente a quanto fatto per i profili di velocità e per i valori del peso di volume, ossia di applicare la curva di decadimento ai depositi della paleovalle da cui è stato estratto il provino sul quale è stata eseguita la prova dinamica. L'unica semplificazione è consistita nel definire un'unica curva di decadimento (e un'unica curva di smorzamento) per tutti i campioni tranne i quattro già citati, invece che una diversa per ciascuno di essi. Nelle figure seguenti si riportano i valori delle quattro curve di decadimento e di smorzamento (per S4, S8, S14 e tutti gli altri campioni), oltre ai punti sperimentali ottenuti dalle prove dinamiche. Per la definizione delle curve di decadimento relative a S4, S8 e S14 si è usato il

modello di Ramberg e Osgood (1943), per la curva relativa agli altri campioni il modello di Yokota et al. (1981).

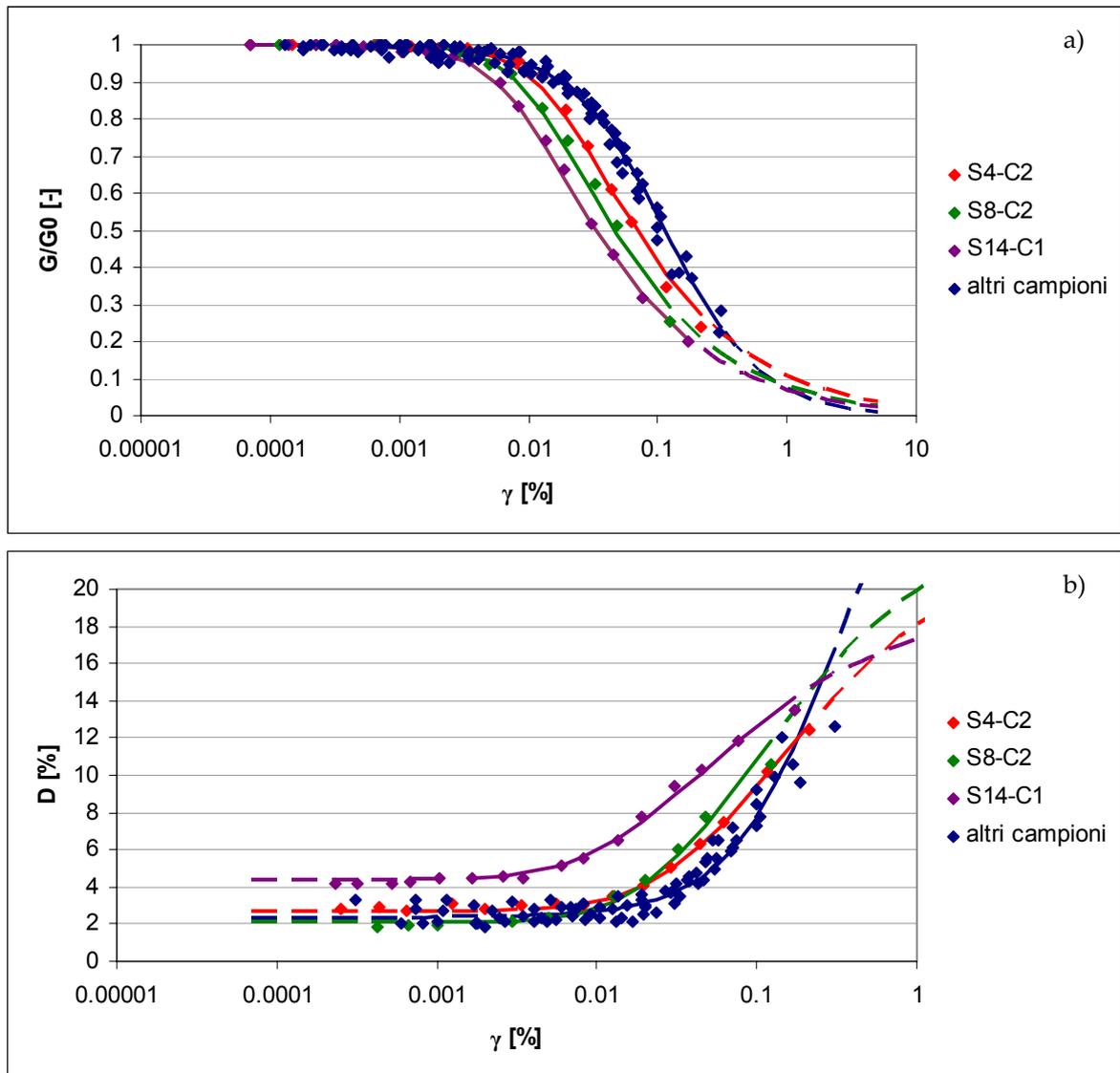


Figura 2.10 – Curve di decadimento (a) e curve di smorzamento (b) dei depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello, così come ricavate a partire dalle prove dinamiche effettuate sui campioni S4-C2, S8-C2 e S14-C1, e mediamente sui campioni S9-C1, S9-C2, S13-C1, S15-C1, S17-C1 e S17-C2.

2.2.5 Strati con presenza di materiale organico

Come accennato nel paragrafo introduttivo, sporadicamente all'interno della coltre dei depositi fluvio-lacustri si riscontra la presenza di materiale organico, perlopiù torba e lignite. Questo perché nel sub-bacino di Barberino si sono verificate condizioni che hanno permesso, almeno in due riprese, l'accumulo di materiale organico di origine vegetale sui fondali bassi del lago plio-pleistocenico, e quindi l'innesco del processo di carbonizzazione. Si sono formati così strati o lenti di torba o lignite, e, più spesso, di argilla torbosa o lignitifera. I materiali organici hanno caratteristiche in genere ben diverse da quelle dei materiali inorganici; tuttavia, nel sub-bacino di Barberino, essi non sono stati adeguatamente indagati.

Materiale organico è stato individuato nei campioni S4-C1, S6-C1 e S6-C2, tuttavia, poiché sui tre campioni sono state effettuate le sole prove di classificazione, il problema principale è stato quello di definirne il comportamento in campo dinamico, data l'assenza di prove di colonna risonante o di taglio torsionale ciclico. Si sono quindi ricercate in letteratura indicazioni relative alla modellazione del comportamento dinamico dei materiali organici, purtroppo però con scarsi risultati, poiché l'analisi di risposta sismica locale non è ancora sufficientemente sviluppata da incentivare ricerche sul comportamento di materiali relativamente poco diffusi quali appunto quelli organici. Inoltre le maggiori difficoltà nel prelievo di campioni indisturbati sui quali eseguire prove di laboratorio possono in parte motivare la scarsità di informazioni disponibili.

Per quanto riguarda le torbe in realtà, a partire dagli anni Novanta del secolo scorso, sono state condotte alcune ricerche, le quali tuttavia hanno evidenziato una notevole variabilità dei risultati in funzione delle proprietà del materiale (indice di plasticità), della pressione di confinamento e della frequenza del carico. In particolare sono stati messi a confronto i risultati ottenuti per le torbe di Sherman Island, le torbe di Union Bay, le torbe di Bogotà e le torbe di Grottaperfetta (un'area collocata tra Roma e Ostia lungo la paleovalle di un antico affluente di sinistra del Fiume Tevere). Le curve ottenute presentano un valore piuttosto elevato del modulo di taglio normalizzato G/G_0 per elevati livelli di deformazione, dovuto presumibilmente alla natura fibrosa dei vegetali di origine, che, ad alti livelli deformativi, induce un raddrizzamento e uno stiramento delle fibre, secondo un meccanismo analogo a quello dei tessuti e dei geosintetici. Le caratteristiche delle torbe di Barberino tuttavia sono significativamente differenti da quelle dei siti sopra citati, sia in termini di contenuto d'acqua che di contenuto di materiale organico. Nell'impossibilità di eseguire indagini ulteriori e ritenendo poco opportuno fare affidamento su risultati relativi a siti diversi, si è deciso di adottare una curva di decadimento determinata a partire dalle misure effettuate sui campioni prelevati dai sondaggi eseguiti nel sub-bacino di Barberino. Esse sono relative a terreni inorganici, ma sono le uniche disponibili per il sito ed inoltre, tenendo conto del fatto che si riscontrano più propriamente argille torbose piuttosto che torbe pure, non si ritiene che il comportamento del materiale organico si discosti così pesantemente da queste misure. Si è scelto allora di costruire una nuova curva, definita a partire dalle misure effettuate sui campioni di terreni inorganici prelevati nel sub-bacino di Barberino, ma cercando di "esaltare" quelle che sono le caratteristiche delle torbe.

Osservando che per elevati livelli deformativi il rapporto di smorzamento relativo alle torbe risulta significativamente inferiore rispetto a quello dei terreni inorganici, si è deciso di adottare, a partire dai punti sperimentali ottenuti per il materiale inorganico, la curva di smorzamento più spostata verso il basso (ovvero verso destra). La relativa curva di decadimento è stata disegnata a partire dai valori del modulo di taglio normalizzato corrispondenti alle misure di D utilizzate per la costruzione della curva di smorzamento, impiegando per l'interpolazione il modello di Yokota et al.. Così facendo si ritiene di essere giunti alla migliore soluzione possibile, sia pure nella consapevolezza che il reale comportamento di questi strati potrebbe essere notevolmente diverso da quello assunto. D'altra parte il parametro più influente, considerando i livelli deformativi ragionevolmente ipotizzabili nella risposta sismica locale dell'area in esame, è il modulo di taglio iniziale, con il quale si

può definire il valore assoluto, e non più normalizzato, della rigidità del materiale. Per quanto riguarda tale valore si hanno a disposizione le misure delle prove down-hole le quali, confrontate con le stratigrafie, permettono agevolmente di individuare gli strati ad elevato contenuto organico e di definirne il relativo valore di velocità delle onde sismiche e quindi di rigidità.

Nelle figure che seguono si riportano rispettivamente le curve di decadimento e le curve di smorzamento per i terreni contenenti materiale organico costruite secondo il metodo sopra riportato con il modello di Ramberg e Osgood e con quello di Yokota et al., confrontate con quelle definite per i terreni inorganici dei depositi fluvio-lacustri.

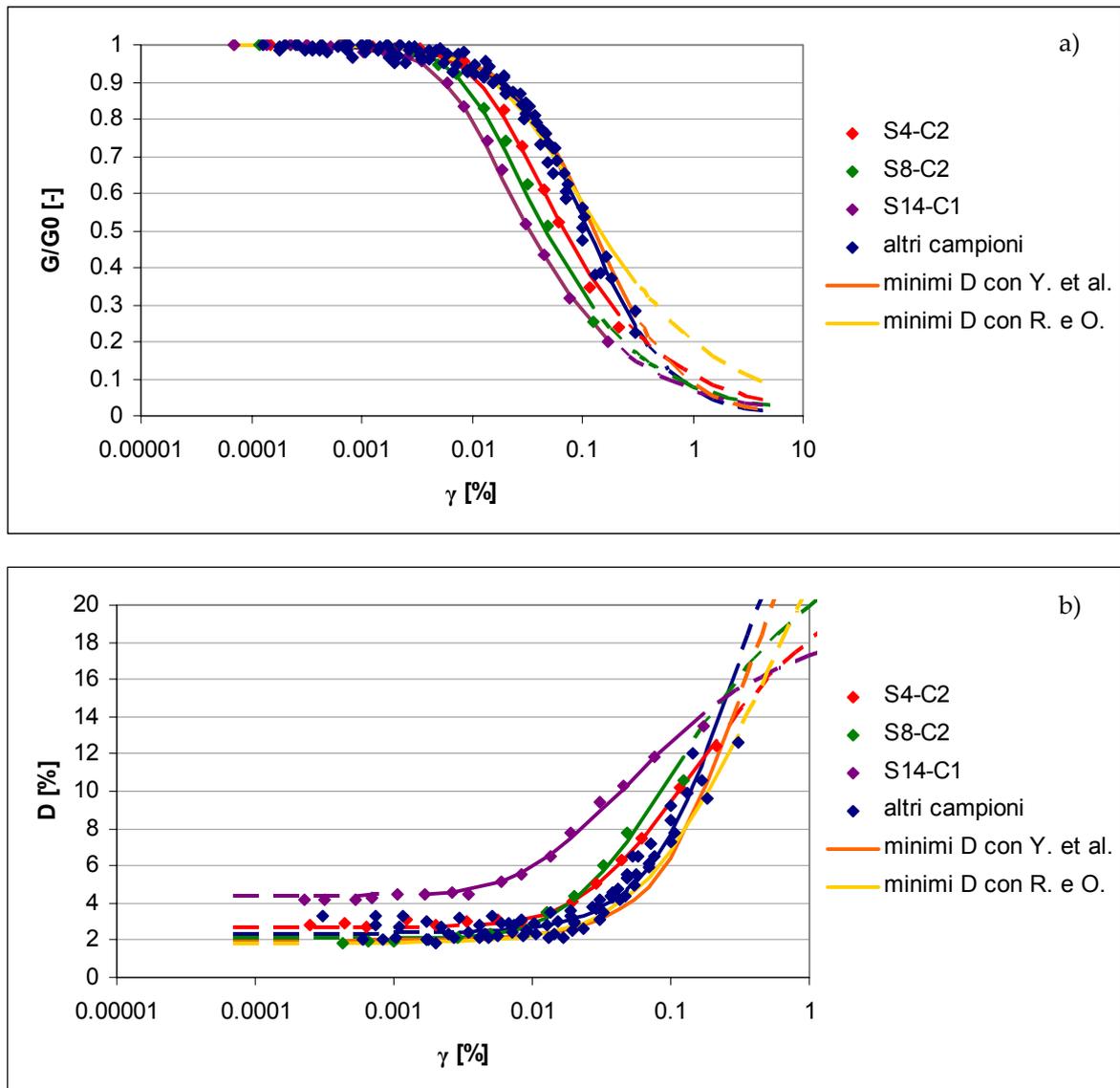


Figura 2.11 – Curve di decadimento (a) e curve di smorzamento (b) dei depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello. La linea gialla indica la curva costruita per i materiali organici utilizzando il modello di Ramberg e Osgood (non utilizzata); la linea arancione indica la curva costruita per i materiali organici utilizzando il modello di Yokota et al.; le altre sono relative ai terreni inorganici.

Un ultimo aspetto da considerare per quanto riguarda i terreni organici è quello relativo alla lignite. Tale materiale ha una consistenza ben maggiore di quella delle torbe, fino ad essere simile ad una roccia. È dunque evidente che il suo comportamento dinamico sarà ben diverso.

Tuttavia, nel sub-bacino di Barberino non è stato raccolto nessun campione che possa fornire indicazioni su proprietà, caratteristiche meccaniche e comportamento dinamico della lignite presente. Inoltre non si è trovata in letteratura alcuna informazione al riguardo: probabilmente, a causa della scarsa presenza di tali depositi, essi non sono stati mai indagati dal punto di vista del loro comportamento in condizioni sismiche, mentre gli studi sono sostanzialmente finalizzati allo sfruttamento dei giacimenti di lignite per la produzione di combustibile fossile. In mancanza dunque di ulteriori informazioni, si è ritenuto opportuno adottare per la lignite le stesse curve definite per le torbe (trattandosi in entrambi i casi di materiale organico, si è ipotizzata affinità nel comportamento dinamico). Per fortuna nell'area esaminata, i livelli di lignite pura sono abbastanza rari e poco spessi; si tratta perlopiù di argille lignitifere, per le quali si può supporre, data l'elevata componente inorganica, un comportamento simile a quello definito per i depositi di questo tipo. Pertanto anche in questo caso l'adozione di curve non molto discoste da quelle relative ai terreni inorganici si ritiene essere la scelta migliore. Tra l'altro nelle descrizioni del materiale non si parla mai di torba o argilla torbosa, ma di lignite o argilla lignitifera, questo fa ritenere che lo stato di carbonizzazione della lignite sia basso, e dunque che essa abbia un comportamento abbastanza simile a quello di una torba amorfa (cioè della torba con stato di carbonizzazione più elevato, e quindi più simile ad una lignite). Con il conforto di queste considerazioni, si sono adottate quindi anche per questo materiale le stesse curve costruite per le torbe.

2.2.6 Facies argillosa siltosa con intercalazioni ghiaiose (MGO1a1_v)

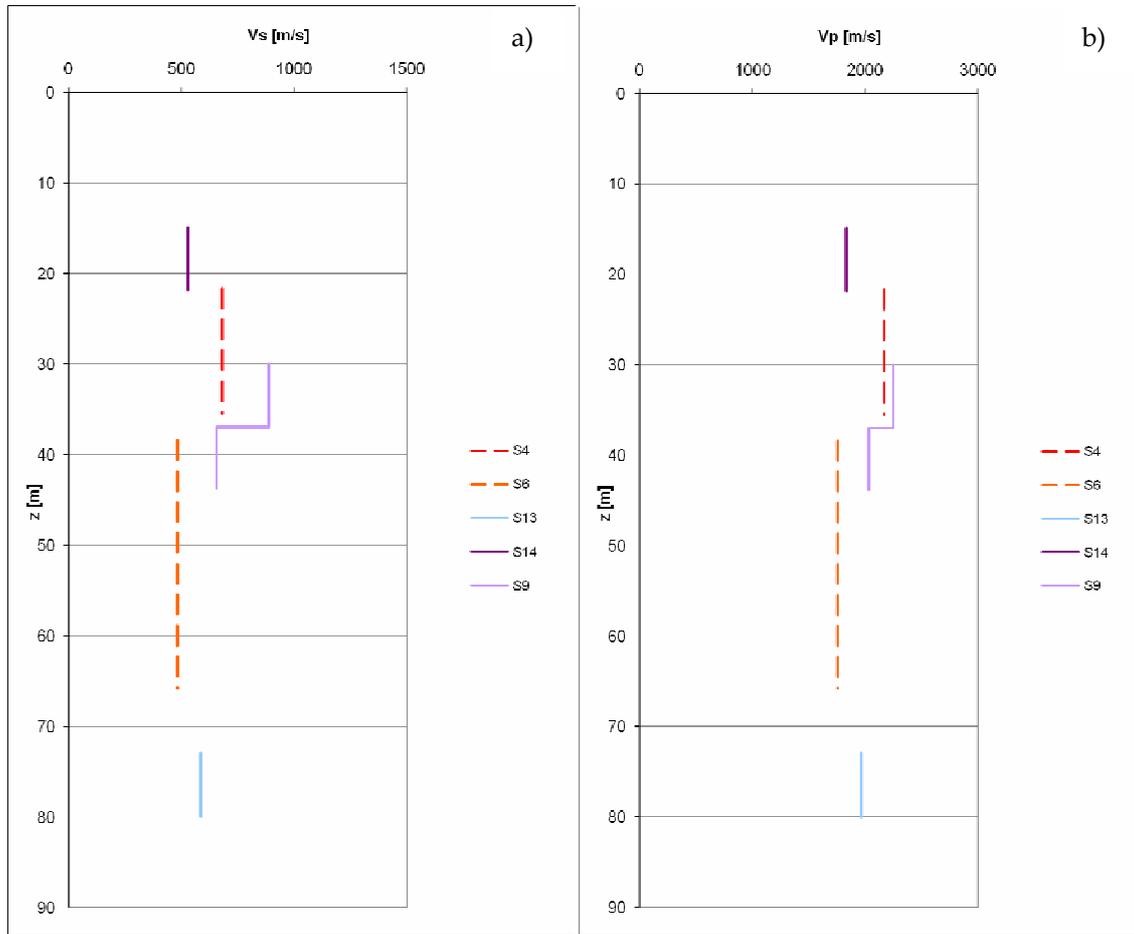


Figura 2.12 – Profili di velocità delle onde di taglio (a) e longitudinali (b) con la profondità ottenuti tramite prove down-hole e indagini sismiche a rifrazione per la facies argillosa siltosa con intercalazioni ghiaiose dei depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello.

La facies presumibilmente più antica dei depositi fluvio-lacustri è caratterizzata dalla sensibile presenza, in associazione alle argille, sempre prevalenti, di una componente più grossolana, siltosa e anche ghiaiosa. Essa risale forse alle prime fasi di sommersione del sub-bacino, quando il lago era poco profondo e poco esteso. La sua limitata ampiezza faceva sì che tutti i sedimenti portati dai torrenti, grossolani o fini, si depositassero insieme negli angusti spazi delle paleovalli parzialmente sommerse, ma ancora separate le une dalle altre dal substrato, risalente fin quasi alla superficie dell'acqua, quando non affiorante. Tali depositi sono presenti, con spessori variabili da pochi metri fino anche a 20 m, in quasi tutte le paleovalli esplorate, in particolare in quelle più profonde.

Questi sedimenti più antichi non sono spesso neppure ben individuabili tramite i sondaggi, perché indistinguibili da quelli superiori. Spesso si tratta di argille o limi con qualche intercalazione di ghiaia (ad esempio in S4 e S6); soltanto in S13, S14 e, in misura minore, S9, si può parlare di ghiaia eterometrica.

Come appare evidente dalla Figura 2.12, i risultati sia delle prove in foro che di quelle di superficie sono piuttosto dispersi. D'altra parte anche per questo tipo di terreno valgono le stesse considerazioni fatte per i depositi sovrastanti: il materiale eroso da ambienti diversi ha dato luogo a sedimenti dalle caratteristiche diverse. Quindi non rimane che procedere nello stesso modo utilizzato per la

facies argillosa, ossia legare la rigidezza degli strati presenti nelle varie sezioni ai valori di velocità misurati nella paleovalle cui la sezione appartiene.

Per quanto riguarda il comportamento dinamico, da questa formazione non sono stati prelevati campioni, e dunque non si hanno a disposizione dati con i quali costruire le curve di decadimento e di smorzamento. La natura più grossolana dei sedimenti potrebbe suggerire di fare ricorso a curve di letteratura definite per le ghiaie. Tuttavia si preferisce fare riferimento a dati relativi al sito in esame piuttosto che a correlazioni di tipo generale ricavate in altri contesti e per materiali di diversa origine. Inoltre anche per la facies più grossolana dei depositi fluvio-lacustri, l'argilla è presente in grande quantità quando non prevalente. Non si tratta infatti, in generale, di sedimenti ghiaiosi, ma di sedimenti a grana fine (argillosi o siltosi) con semplici intercalazioni ghiaiose, o alternanze di argille e ghiaie in abbondante matrice argillosa o limosa. Risulta quindi più appropriato ai fini della loro caratterizzazione utilizzare le misure relative ai campioni prelevati dai depositi fluvio-lacustri argillosi. Perciò, anziché ricercare una curva da utilizzare per tutti i depositi fluvio-lacustri grossolani, si è ritenuto opportuno adottare esattamente le stesse curve definite per i sedimenti superiori nell'ambito della stessa paleovalle, facendo in questo modo prevalere l'uguaglianza dell'ambiente di erosione e di deposizione sulla diversità delle granulometrie. In conclusione, si è ritenuto che la distinzione tra MGO1a1 e MGO1a1_v, rilevante dal punto di vista geologico, dal punto di vista sismico sia invece poco importante.

L'ultimo aspetto da considerare riguarda il peso di volume γ . Non avendo campioni a disposizione, esso può soltanto essere ipotizzato. Si è stabilito allora di assumere, di volta in volta, un valore intermedio tra quello dello strato superiore e quello del substrato e non attribuire un valore univoco alla formazione, ma di definirlo, sezione per sezione, in base ad altre caratteristiche da essa possedute nelle diverse paleovalli. Il valore del peso di volume utilizzato per questa formazione oscilla così tra 19.0 e 21.5 kN/m³.

2.2.7 Depositi fluviali del Bacino del Mugello (SIV) e depositi plio-quadernari eluvio-colluviali (b, a, bs)

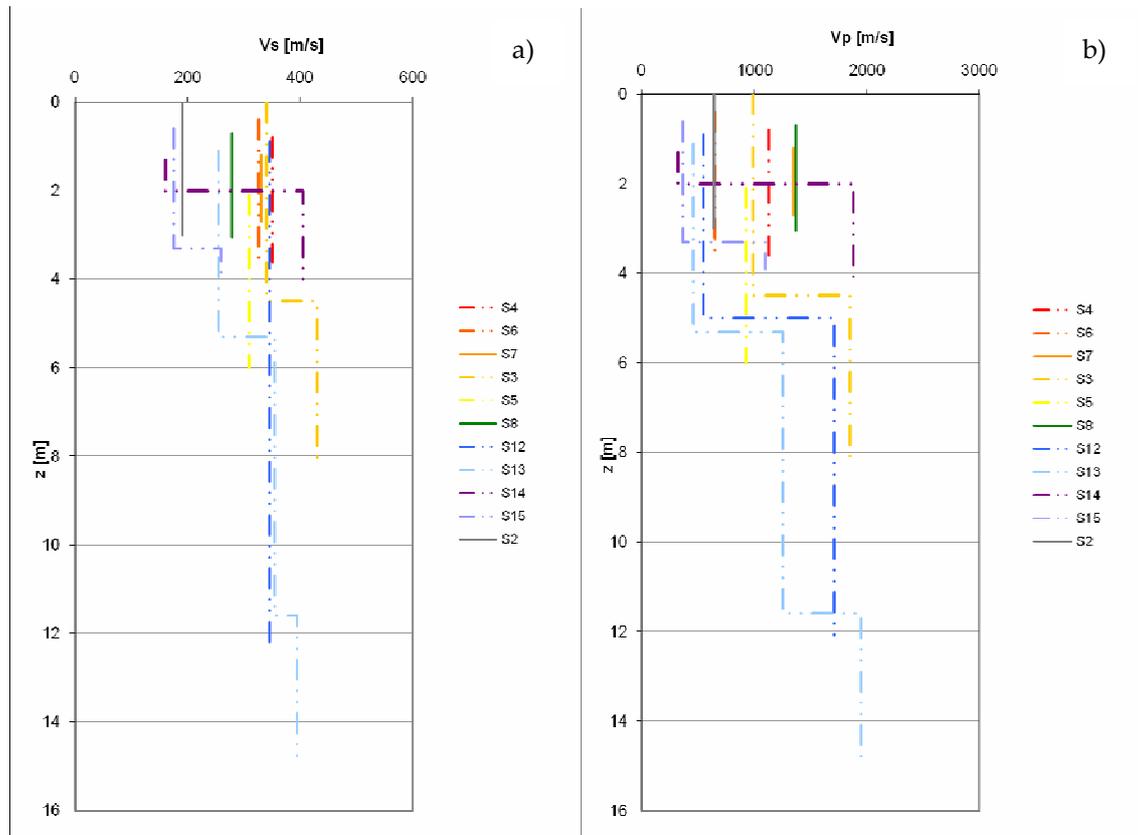


Figura 2.13 – Profili di velocità delle onde di taglio (a) e longitudinali (b) con la profondità ottenuti tramite prove down-hole per l'Unità di Luco di Mugello (SIV2) e per l'Unità di Sagginale (SIV3).

I depositi alluvionali terrazzati coprono con spessori relativamente sottili (qualche metro) i depositi fluvio-lacustri in gran parte del sub-bacino di Barberino. Quelli più recenti (Unità di Sagginale e Unità di Luco di Mugello, rispettivamente SIV3 e SIV2) sono presenti sul fondo delle vallate che i corsi d'acqua hanno inciso nei sedimenti plio-pleistocenici, mentre quelli più antichi (Unità di Scarperia, SIV1) si trovano sulla cima dei rilievi che fungono da spartiacque tra i vari torrenti una volta che essi sono entrati nel sub-bacino di Barberino, e rappresentano i depositi della prima fase alluvionale, subito dopo lo svuotamento dell'antico lago. Questi ultimi sono per la verità scarsamente rappresentati nel sub-bacino di Barberino (probabilmente perché erosi dagli stessi corsi d'acqua che li avevano formati), e poggiano talvolta direttamente sul substrato invece che sui depositi fluvio-lacustri.

Analizzando la Figura 2.13 e confrontando i risultati ottenuti per l'Unità di Luco di Mugello e l'Unità di Sagginale, non si registrano sostanziali differenze tra le due formazioni, la cui velocità delle onde di taglio è quasi sempre compresa fra 300 e 350 m/s. Per questo motivo, viste le difficoltà già precedentemente esposte circa l'eventualità di modellare diversamente le due unità, che paiono sostanzialmente avere lo stesso comportamento, oltre ad essere costituite dallo stesso tipo di terreno, si è deciso di attribuire ad entrambe gli stessi parametri. Inoltre, così come fatto per le formazioni precedenti, si è considerato più appropriato legare, per quanto possibile, i profili di velocità alla sezione o, ancor meglio, alla valle o addirittura al terrazzamento in cui essi sono stati effettuati.

Dai depositi alluvionali recenti è stato estratto un solo campione sul quale purtroppo non sono state condotte prove di laboratorio che permettessero la definizione del comportamento dinamico della formazione. Diversamente da quanto fatto a proposito dell'MGO1a1_v, in questo caso si è preferito ricorrere all'uso di correlazioni empiriche di letteratura. In particolare si è scelto di utilizzare la seguente curva di decadimento di letteratura (Rollins, 2000):

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + 16 \cdot \gamma \cdot (1.2 + 10^{-20 \cdot \gamma})}$$

Per quanto riguarda invece l'andamento del rapporto di smorzamento con la deformazione è stata adottata la seguente relazione proposta da Rollins et al. (1998):

$$D = 0.8 + 18 \cdot (1 + 0.15 \cdot \gamma^{-0.9})^{-0.75}$$

L'andamento delle curve sopra riportate è rappresentato in Figura 2.14.

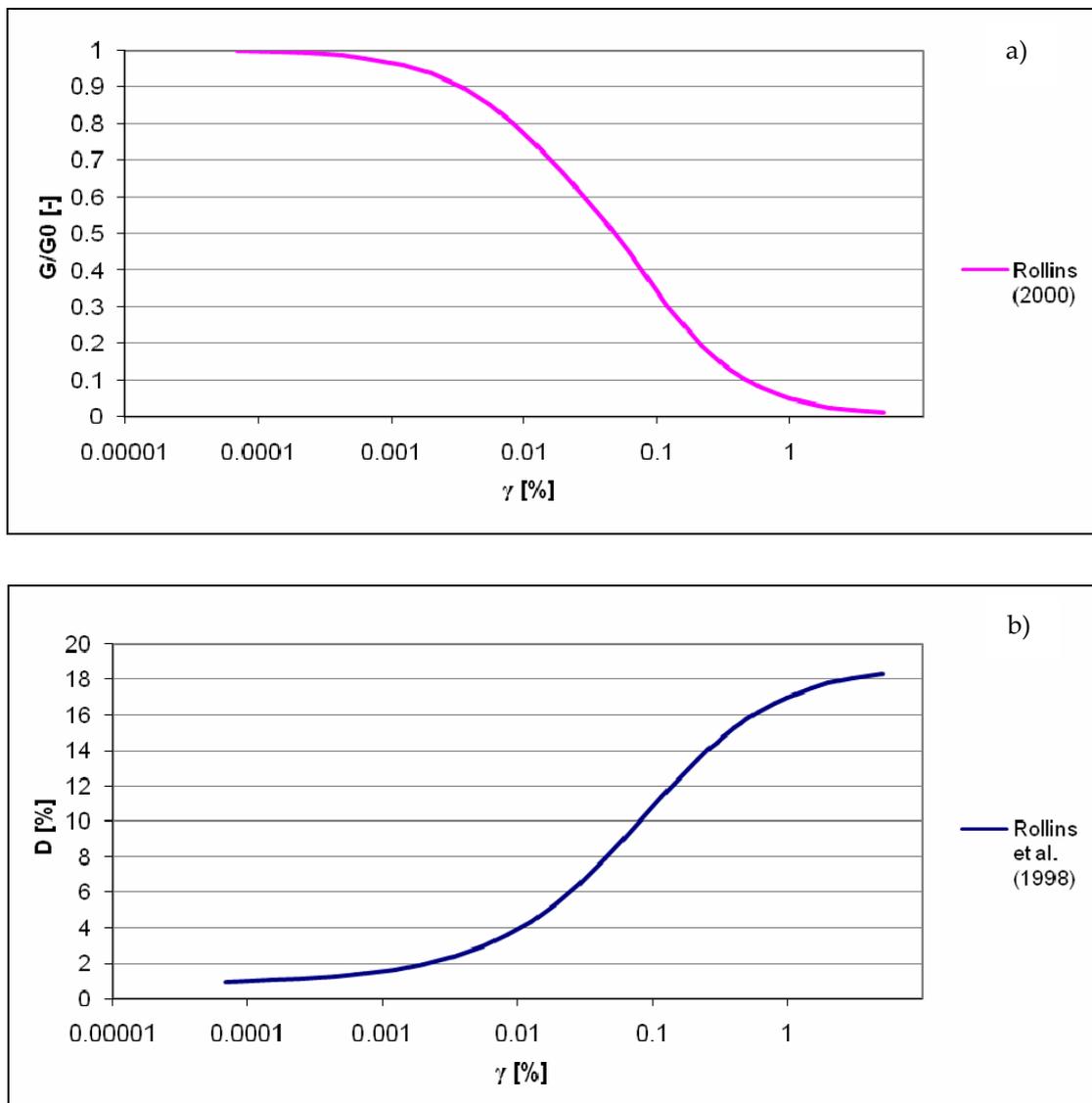


Figura 2.14 – Curve di decadimento (a) proposte da Rollins (2000) e curva di smorzamento (b) proposta da Rollins et al. (1998) per i terreni ghiaiosi.

L'ultimo aspetto da considerare è quello relativo al peso di volume. Nell'unico campione estratto dai depositi alluvionali recenti è stato determinato un valore pari a $\gamma = 20.51 \text{ kN/m}^3$, valore che si è utilizzato per tutti i depositi alluvionali.

Per quanto riguarda i depositi plio-quadernari eluvio-colluviali, su di essi non si hanno dati disponibili. I sedimenti di detrito di versante ed eluvio-colluviali (rispettivamente a e b_s) rappresentano una sottile coltre sovrastante i depositi alluvionali recenti o i depositi fluvio-lacustri alle estremità laterali delle vallate. I depositi alluvionali attuali (a) costituiscono invece il letto dei corsi d'acqua (la modellazione della risposta sismica locale in corrispondenza dei quali non è, evidentemente, di interesse).

Per quanto riguarda la velocità delle onde sismiche, si è tenuto conto del fatto che, in generale, si tratta sempre di materiale a grana grossa (delle dimensioni dei ciottoli e delle ghiaie per il detrito di versante e per i depositi alluvionali attuali, delle dimensioni delle ghiaie e delle sabbie per i depositi eluvio-colluviali) non molto addensato, pertanto si sono attribuiti ad essi i valori relativi allo strato superficiale dei depositi alluvionali recenti modellati nella sezione in esame. Si tratta evidentemente di una approssimazione, ma d'altra parte questi strati si trovano alle estremità delle sezioni, in genere in zone di poco interesse, ed hanno spessori molto limitati. Dal punto di vista dell'analisi di risposta sismica locale, quindi, hanno effetti trascurabili, anche perché il piano d'imposta delle fondazioni di eventuali costruzioni sarà di norma posto all'interno della formazione sottostante, considerata la potenza di poche decine di centimetri o al massimo di 1÷2 m di questi depositi.

Per gli stessi motivi ed in base alle stesse considerazioni, anche dal punto di vista del comportamento dinamico e del peso di volume, tali sedimenti saranno assimilati in tutto e per tutto allo strato superficiale dei depositi alluvionali recenti. In conclusione, si è deciso di adottare anche in questo caso le curve di decadimento e di smorzamento definite da Rollins per i materiali ghiaiosi ed un peso di volume di $\gamma = 20.51 \text{ kN/m}^3$.

3. Analisi della Risposta Sismica Locale

La valutazione della RSL costituisce un aspetto fondamentale per la protezione sismica delle opere ingegneristiche e di conseguenza per la salvaguardia delle vite umane, poiché consente di operare una previsione quantitativa degli effetti di sito che possono aver luogo al verificarsi di eventi di differente severità. Gli effetti di sito, modificazioni che riguardano tutti i parametri rappresentativi del moto sismico (durata, ampiezza, contenuto in frequenza e periodo fondamentale), possono essere così schematizzati:

- *Effetti stratigrafici 1D: sono legati alle caratteristiche geotecniche dei terreni ed evidenziati dall'insorgenza di fenomeni di risonanza;*
- *Effetti di valle 2D o 3D: sono correlati alla morfologia sepolta ed associati a fenomeni di generazione di onde di superficie (onde di Rayleigh e di Love) e di focalizzazione delle onde sismiche;*
- *Effetti topografici 2D o 3D: sono legati a specifiche condizioni geomorfologiche caratterizzate dalla presenza di superfici non piane, accidentate e irregolari, ed evidenziati da fenomeni di focalizzazione delle onde sismiche.*

La determinazione della RSL dei depositi reali è tuttavia un processo piuttosto complesso, perciò sono state messe a punto diverse metodologie di analisi, la cui distinzione consiste principalmente nel ricorso ad un approccio di tipo sismologico e strumentale, basato sulla registrazione di scosse di eventi reali o di microtremiti, oppure di tipo geotecnico, basato sull'applicazione di modelli numerici e adottato nel presente elaborato.

Per applicare il metodo geotecnico ai fini della valutazione degli effetti delle condizioni locali (morfologiche, stratigrafiche, geologiche e geotecniche) sulla propagazione delle onde sismiche è necessario definire per il sito in esame i seguenti aspetti:

- *il moto sismico di riferimento su roccia o terreno duro pianeggiante;*
- *lo schema morfologico e stratigrafico;*
- *le leggi costitutive e i parametri rappresentativi del comportamento dei diversi terreni in condizioni dinamiche.*

Il livello di approfondimento richiesto nella definizione dei suddetti aspetti varia in relazione alle caratteristiche dello strumento di calcolo adottato ai fini della simulazione numerica. Una sommaria distinzione tra i codici attualmente disponibili può essere fatta in base alla dimensionalità del modello (1D, 2D o 3D), al tipo di analisi condotta (in tensioni totali o in tensioni efficaci) e in relazione al tipo di legge costitutiva adottata per il terreno (comportamento lineare o non lineare).

Gli strumenti di calcolo più frequentemente impiegati fanno riferimento a modelli monodimensionali e bidimensionali ed eseguono l'analisi della risposta sismica locale in termini di tensioni totali, assumendo per il terreno un legame di tipo lineare equivalente tra sforzi e deformazioni. Nel presente lavoro il codice di calcolo utilizzato è QUAD4M, del quale è data qui di seguito una descrizione sintetica.

3.1 Codice di calcolo QUAD4M

QUAD4M è un codice di calcolo che effettua analisi bidimensionali agli elementi finiti (FEM) e che consente quindi di studiare sia gli effetti di risonanza nei depositi sia gli effetti della morfologia superficiale e sepolta.

Il deposito, lungo una sua sezione rappresentativa, viene discretizzato mediante una serie di elementi di forma quadrangolare o triangolare (la forma triangolare in genere viene utilizzata per definire meglio le zone di bordo o di cresta e le zone di discontinuità). La definizione di una mesh corretta e funzionale richiede un compromesso tra la schematizzazione che meglio si adatta alle caratteristiche geometriche, geotecniche e stratigrafiche del deposito e quella che permette la più rapida e stabile convergenza del programma alla soluzione. Relativamente alla discretizzazione in altezza degli strati, è stato utilizzato un semplice criterio di ottimizzazione per verificare che gli spessori ipotizzati fossero realmente in grado di trasferire superiormente la massima frequenza significativa dell'input sismico, assunta pari a 15 Hz. Si è fatto quindi ricorso alla seguente relazione empirica:

$$\Delta h = \frac{V_{s,\min}}{K \cdot f_{\max}}$$

dove, oltre alla massima frequenza significativa, compaiono lo spessore Δh dello strato, la velocità V_s minima delle onde di taglio nel singolo strato ed infine il coefficiente di riduzione K , per il quale si è adottato un valore pari a 4.

Tornando alla simulazione numerica, la sezione esaminata viene dunque discretizzata in un numero finito di elementi secondo uno schema a masse concentrate collegate tra loro da molle e smorzatori viscosi. Per ciascun elemento devono essere assegnate oltre alle coordinate dei nodi, le proprietà fisiche e meccaniche, in termini di densità o peso di volume, coefficiente di Poisson, modulo di taglio massimo G_0 e rapporto di smorzamento minimo D_0 . A ciascun tipo di terreno presente devono essere inoltre attribuite le curve rappresentative delle leggi di variazione del modulo di taglio normalizzato e del rapporto di smorzamento con la deformazione di taglio, ovvero $\frac{G(\gamma)}{G_0}$ e $D(\gamma)$.

Il calcolo della risposta sismica locale è ricondotto alla risoluzione delle equazioni del moto definite per ciascuno dei punti nodali della mesh nella forma:

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [C] \cdot \{\dot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = \{R(t)\}$$

dove:

- $[M]$ è la matrice delle masse concentrate;
- $[C]$ è la matrice dei coefficienti di smorzamento degli smorzatori viscosi;
- $[K]$ è la matrice delle costanti di rigidità delle molle;
- $\{R(t)\}$ è il vettore rappresentativo dell'eccitazione sismica;
- $\{u\}$ è il vettore degli spostamenti.

La soluzione viene ricavata utilizzando la tecnica di integrazione passo-passo di Wilson e Clough, che determina, mediante integrazione diretta nel dominio del tempo delle equazioni del moto sopra definite, la risposta al generico istante t in funzione della risposta all'istante precedente $t - \Delta t$.

Per tenere in considerazione anche la non linearità del comportamento del terreno il programma di calcolo QUAD4M assume per i materiali una legge costitutiva lineare equivalente, aggiornando le matrici di rigidità e smorzamento con un procedimento iterativo.

L'accelerogramma di input viene applicato alla base del deposito, modellato come sopra descritto, nella zona di frontiera fra il terreno e il substrato roccioso; pertanto anche questo dato deve essere opportunamente inserito in fase di modellazione, valutando eventualmente la possibilità di prevedere uno strato superficiale di alterazione del bedrock. Una delle modifiche più rilevanti introdotte da QUAD4M rispetto alla versione originaria consiste proprio nella possibilità di considerare un substrato deformabile anziché rigido, consentendo quindi una maggiore accuratezza nella modellazione.

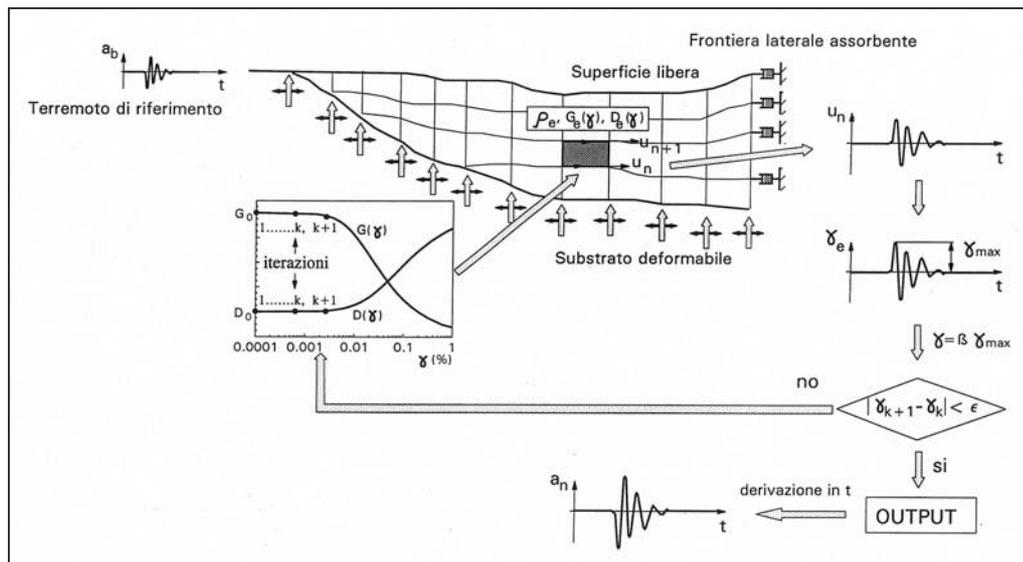


Figura 3.1: Schema operativo del codice di calcolo QUAD4M.

3.2 Modellazione delle sezioni

L'aspetto della modellazione che è stato affrontato in modo più diretto ha riguardato la definizione dei dati di input utilizzati dal programma.

Per ciascuna delle sezioni geologiche fornite dal Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica si è proceduto alla ricostruzione della geometria del deposito, campionando in sostanza i punti di frontiera di ciascuna delle unità litostratigrafiche individuate, mantenendo un passo di campionamento in direzione orizzontale pressoché costante e pari a 5 m, più fitto in corrispondenza di variazioni topografiche e morfologiche.

Per quanto riguarda invece il passo di campionamento in direzione verticale si è utilizzato il criterio di ottimizzazione prima citato e quindi, dove necessario, ovvero per le formazioni di spessore più elevato, è stata effettuata una suddivisione in sottostrati. Sono state costruite quindi delle poligoni alle quali sono state attribuite caratteristiche diverse in considerazione degli studi precedentemente esposti.

L'attribuzione di dette caratteristiche avviene tramite un secondo file input (il primo è evidentemente quello che riporta le coordinate dei nodi che costituiscono le poligoni), dove si riportano per ciascun sottostrato il peso di volume, il coefficiente di Poisson, il modulo di taglio massimo e il rapporto di smorzamento minimo. L'ultimo valore da inserire è un codice numerico pari a 0 se si intende modellare il sottostrato in esame come un mezzo elastico (per esempio nel caso della roccia alterata), oppure pari a 1 se si intende modellarlo come un mezzo visco-elastico (come nel caso specifico dei terreni costituenti il deposito).

Il terzo file di input è quello contenente le curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato $\frac{G(\gamma)}{G_0}$ e la legge di variazione del rapporto di smorzamento $D(\gamma)$ con la deformazione di taglio γ .

I valori che sono stati adottati sono naturalmente quelli descritti al Capitolo 2, opportunamente integrati, dove necessario, mediante dati di letteratura.

Nel seguito (Figure da 3.2 a 3.12) sono riportate le sezioni oggetto delle analisi della risposta sismica locale, così come fornite dal Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica della Regione Toscana.

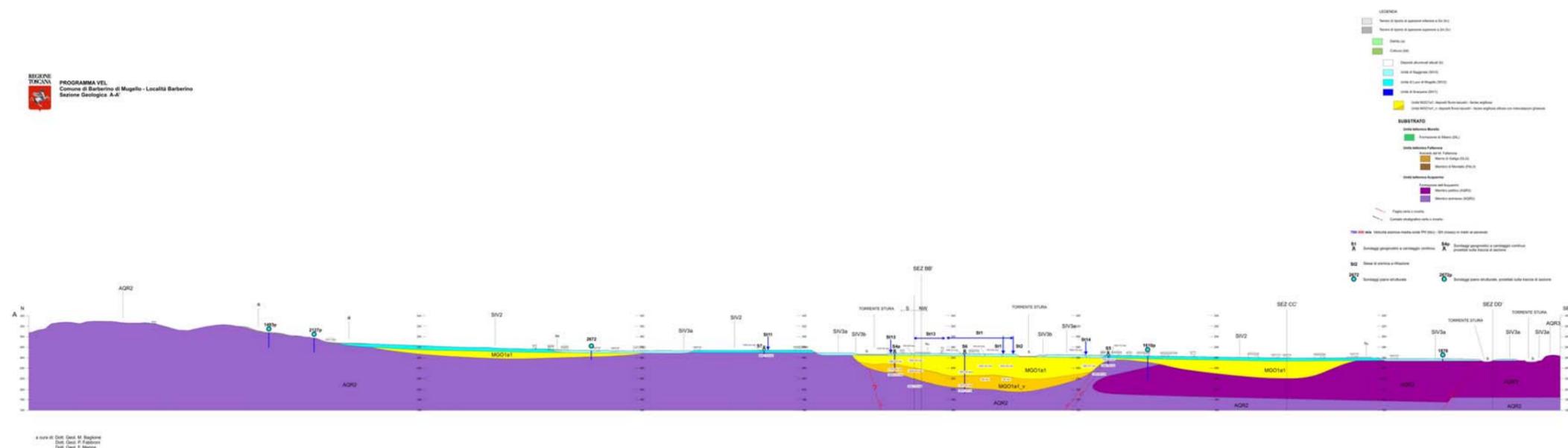


Figura 3.2: Sezione geologica A-A'.

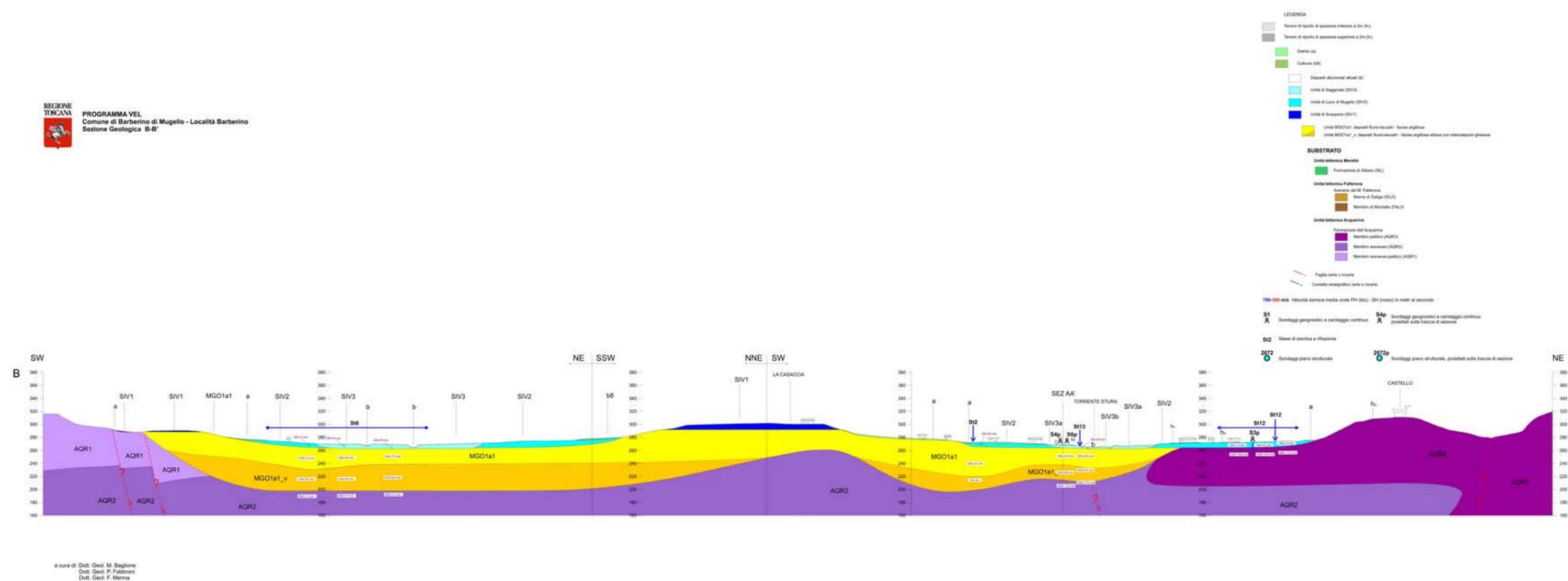


Figura 3.3: Sezione geologica B-B'.

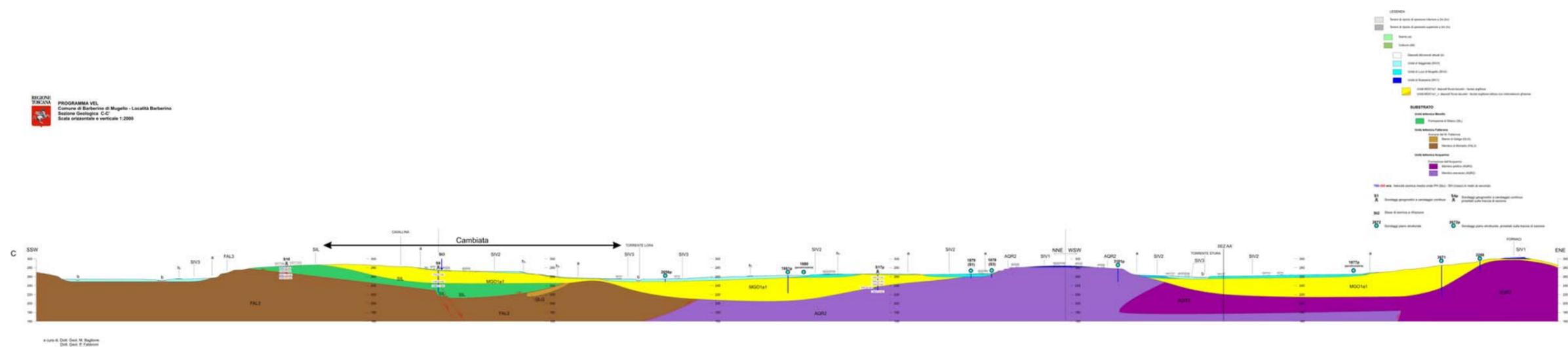


Figura 3.4: Sezione geologica C-C'.

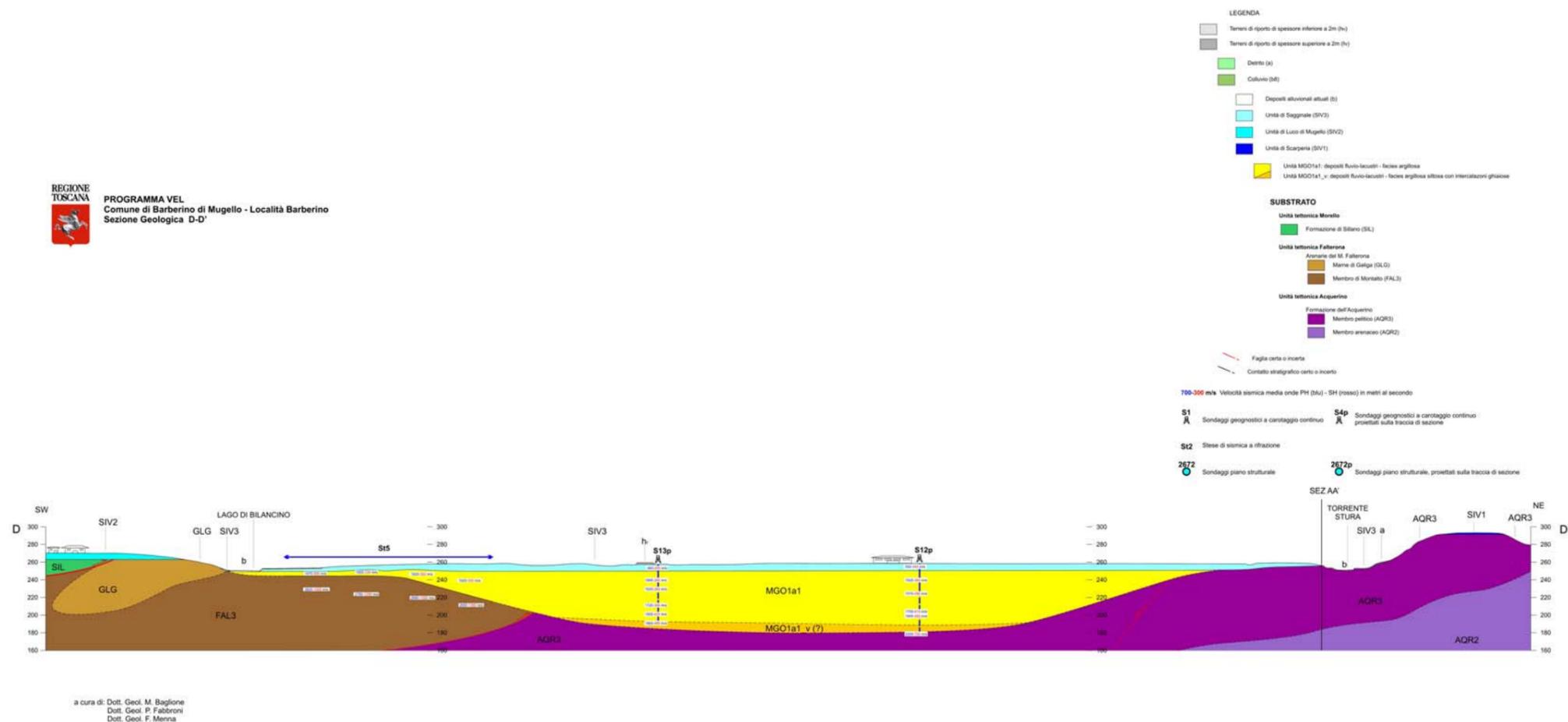


Figura 3.5: Sezione geologica D-D'.

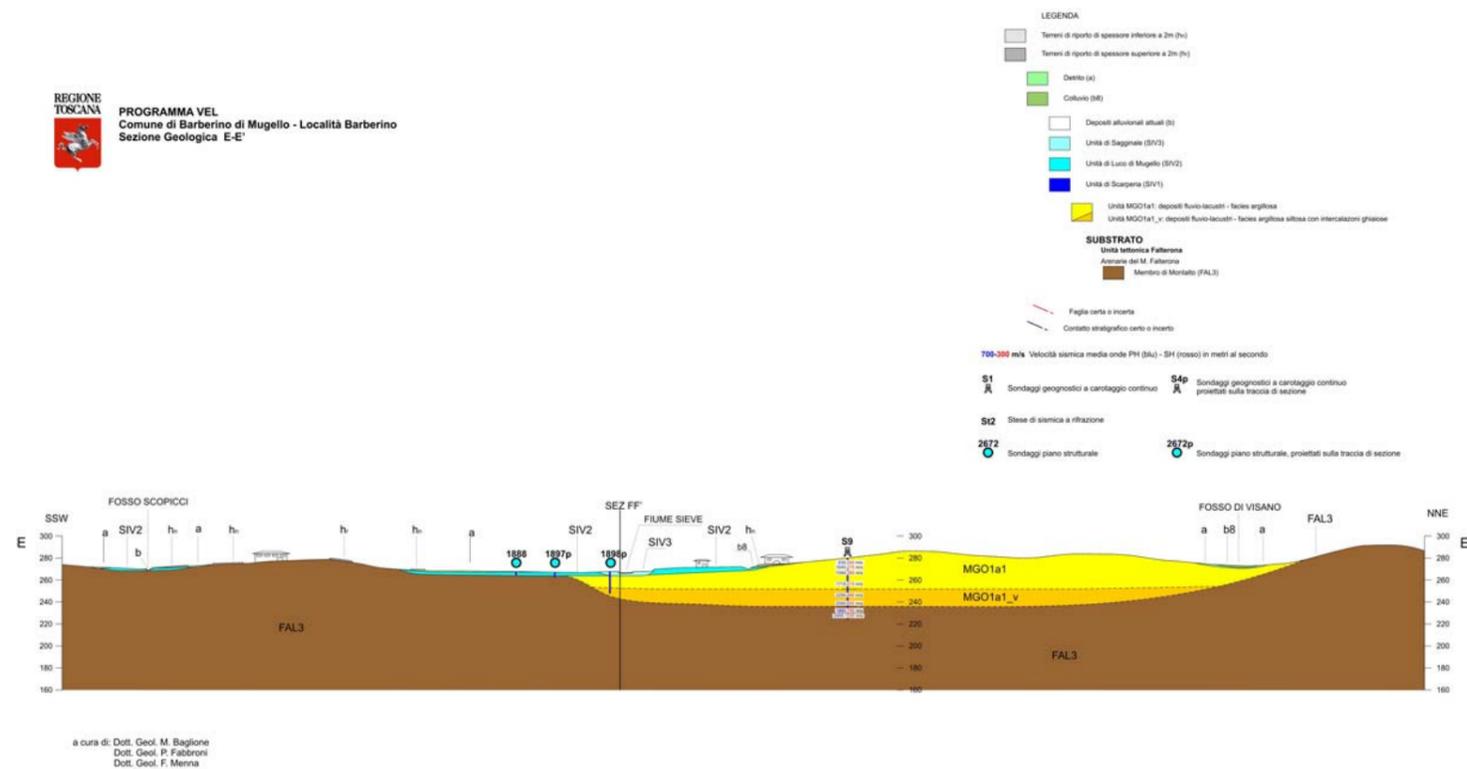


Figura 3.6: Sezione geologica E-E'.

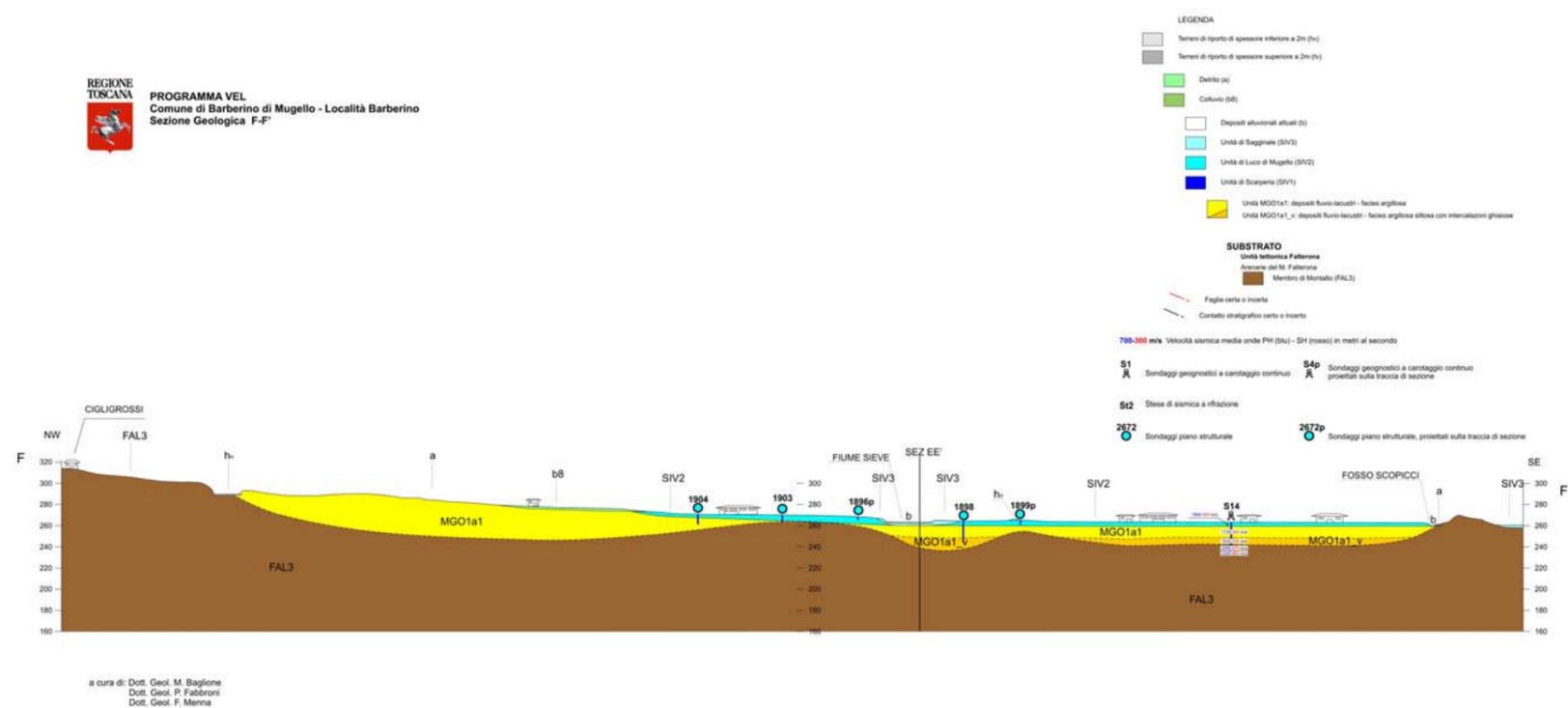


Figura 3.7: Sezione geologica F-F'.

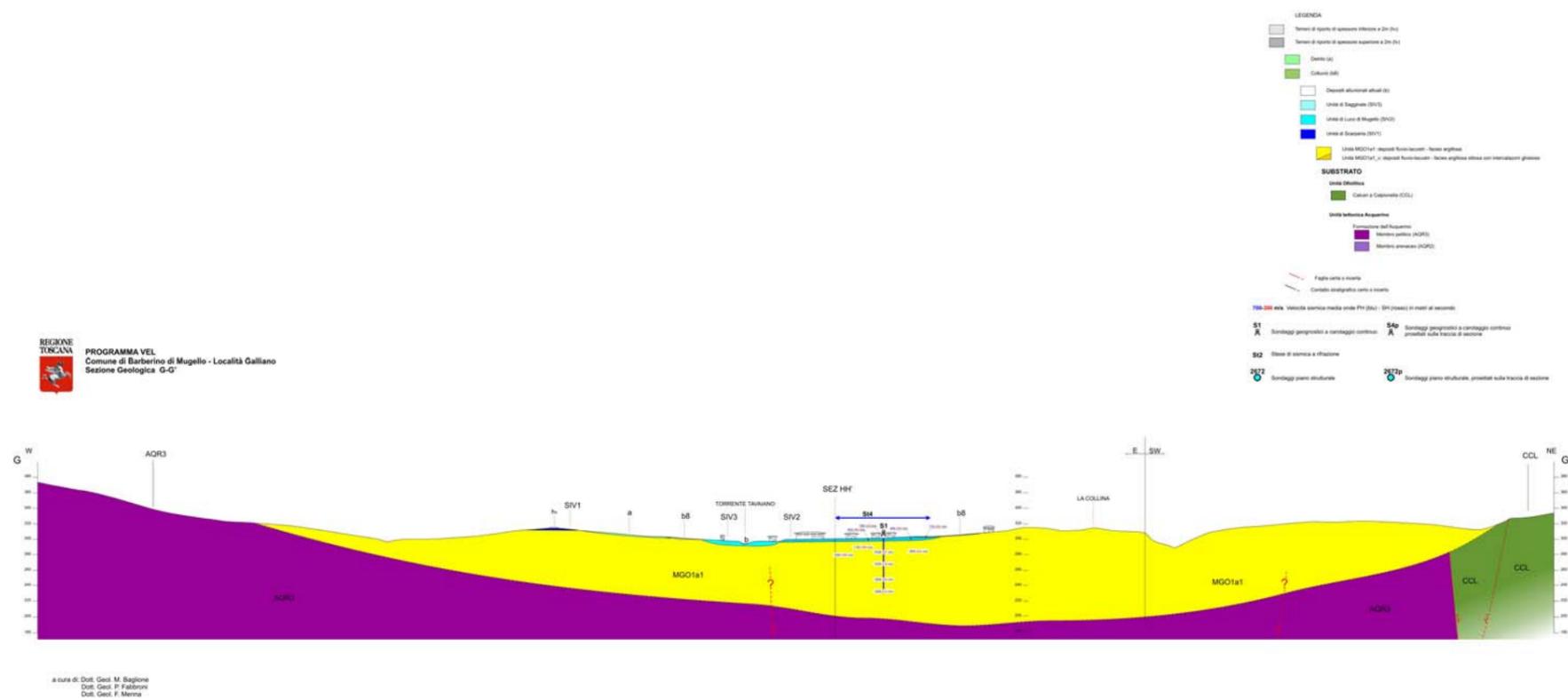


Figura 3.8: Sezione geologica G-G' (Galliano).

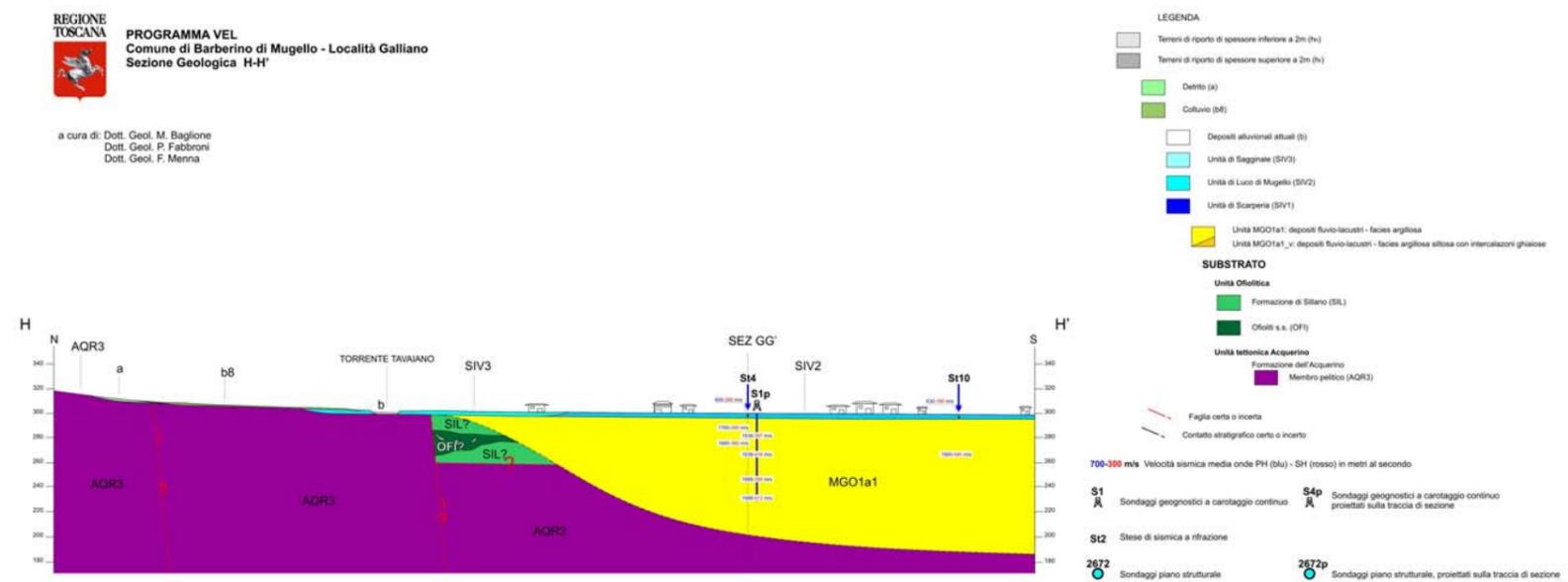


Figura 3.9: Sezione geologica H-H' (Galliano).

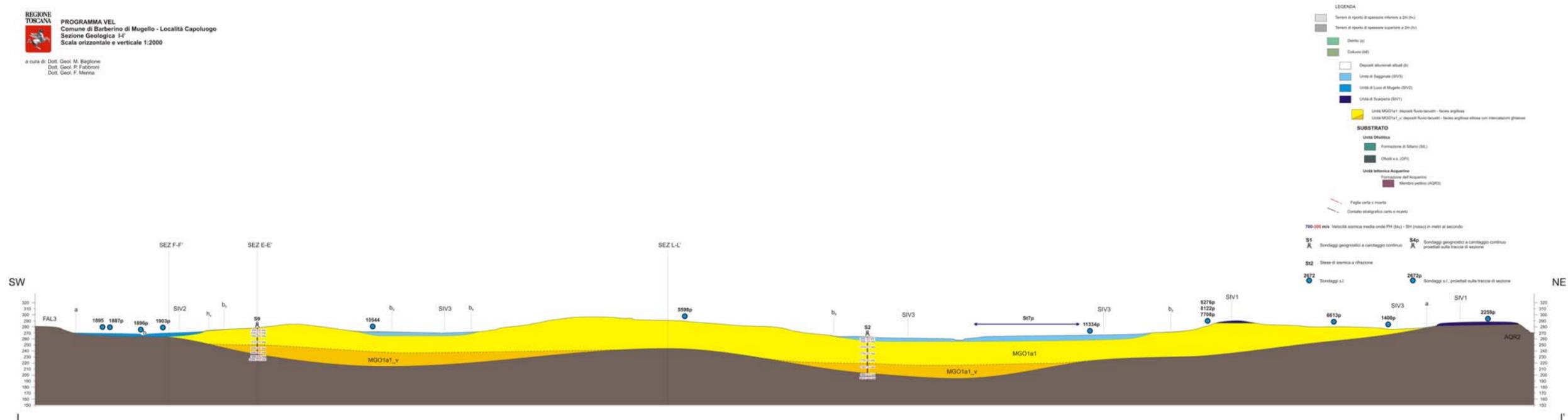


Figura 3.10: Sezione geologica I-I'.

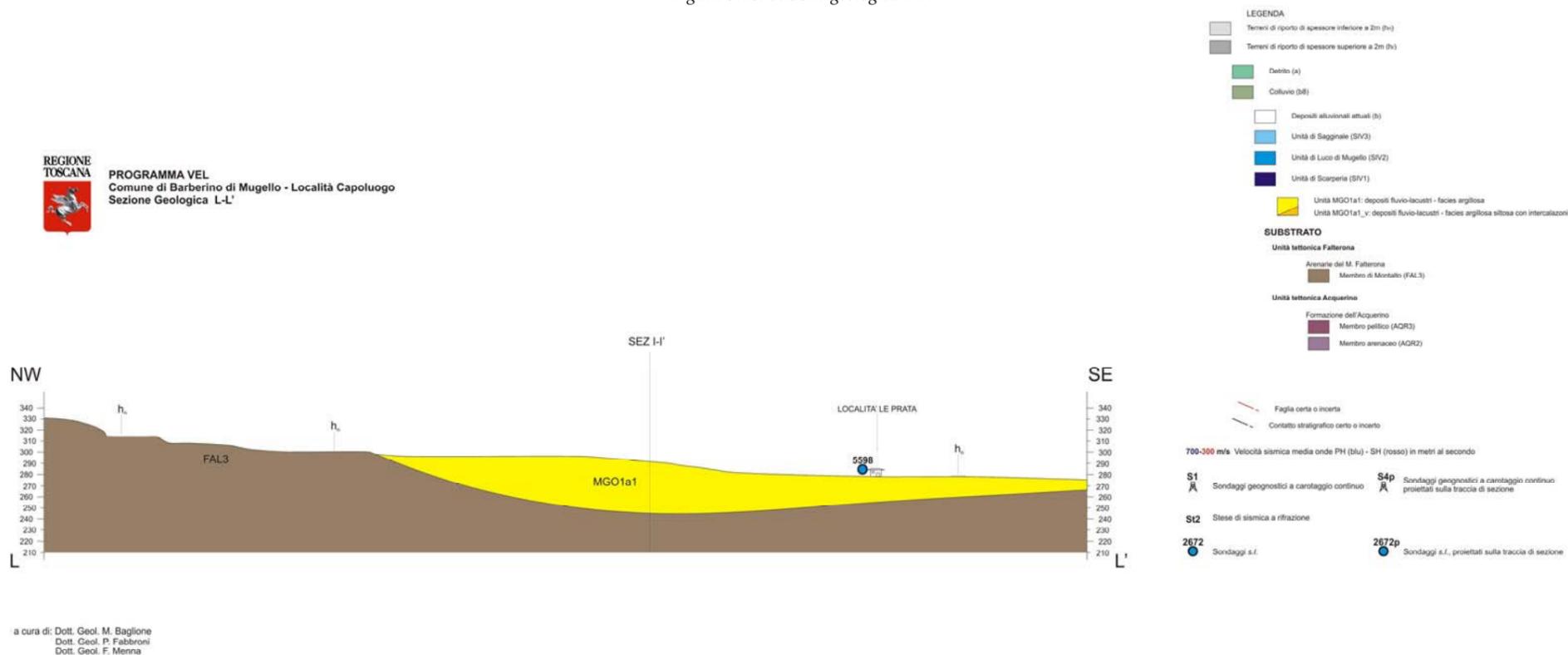


Figura 3.11: Sezione geologica L-L'.

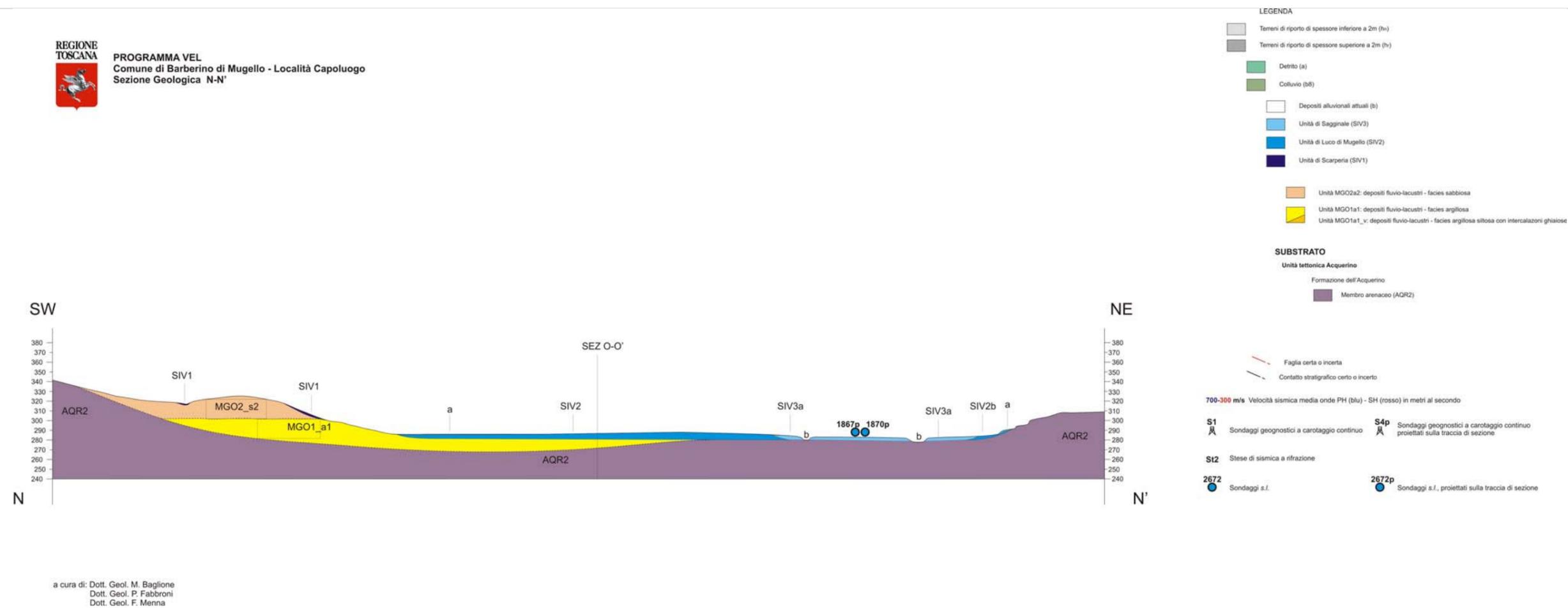


Figura 3.12: Sezione geologica N-N'.

Nelle Figure 3.13-3.28 sono rappresentate schematicamente le sezioni analizzate con la suddivisione in sottostrati operata per le varie formazioni; nelle Tabelle 3.1-3.16 sono invece riportati i valori delle caratteristiche fisico-meccaniche attribuibili ai materiali costituenti i diversi sottostrati.

Nelle figure l'asse delle ordinate è esasperato rispetto a quello delle ascisse, accentuando le differenze altimetriche e alterando in qualche misura la lettura dei grafici. È importante sottolineare inoltre che i valori letti sull'asse delle ordinate non corrispondono in linea generale alle quote topografiche, ma restituiscono lo sviluppo altimetrico del deposito in funzione del punto posto sul piano campagna in corrispondenza del quale è iniziato il campionamento ("zero"). Dall'osservazione delle Figure 3.13-3.28 emerge chiaramente il fatto che non è stato utilizzato un criterio univoco per tutte le sezioni modellate, anche se solitamente lo "zero" risulta posto in corrispondenza dell'estremo sinistro della sezione da esaminare.

3.2.1 Sezione A-A'

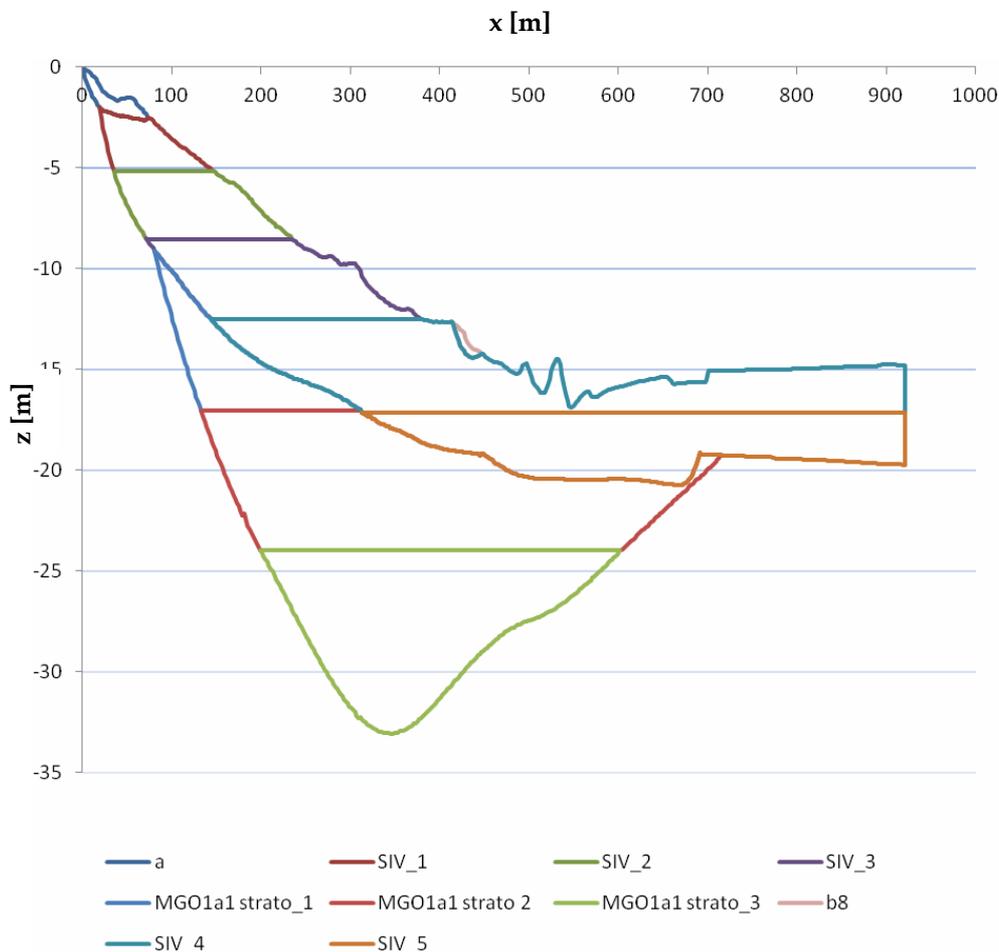


Figura 3.13 – Modello della Sezione A-A'.

I litotipi presenti nella sezione A-A', localizzata nella parte settentrionale dell'area di indagine, sono stati caratterizzati attraverso l'elaborazione dei risultati relativi ai quattro sondaggi geotecnici S3, S4, S6 ed S7, proprio in virtù della logica espressa nel Capitolo 2, cioè quella di legare, per quanto possibile, i parametri necessari ai fini della modellazione alla sezione o, ancor meglio, alla valle in cui essi sono stati rilevati.

L'unico sondaggio intercettato dalla sezione è l'S7, utilizzato per la caratterizzazione dei depositi fluviali; gli altri sondaggi sono stati utilizzati per definire le caratteristiche dei depositi fluvio-lacustri. Relativamente ai depositi fluviali ed eluvio-colluviali, data l'assenza di dati attendibili per la loro caratterizzazione, si è proceduto assimilandoli ai depositi alluvionali recenti, ovvero utilizzando le curve di decadimento e di smorzamento definite da Rollins per le ghiaie e ed un peso di volume $\gamma = 20.51$ kN/m³.

Nella tabella seguente si riportano i valori impiegati per ogni strato considerato.

Tabella 3.1 – Caratteristiche degli strati individuati all'interno del modello della sezione A-A'.

<i>Formazione</i>	γ [kN/m ³]	ν [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	<i>Curva di decadimento/ smorzamento</i>
a	15.52	0.35	133	3.100	Rollins
SIV_1	20.51	0.46	228	0.900	S7
SIV_2	20.51	0.46	228	0.900	S7
SIV_3	20.51	0.46	228	0.900	S7
SIV_4	20.51	0.46	228	0.900	S7
SIV_5	20.51	0.46	228	0.900	S7
b8	15.52	0.35	133	3.100	Rollins
MGO1a1_1	18.62	0.47	249	2.360	S3-S4-S6
MGO1a1_2	18.62	0.47	249	2.360	S3-S4-S6
MGO1a1_3	18.62	0.47	249	2.360	S3-S4-S6

3.2.2 Sezione A''-A'''

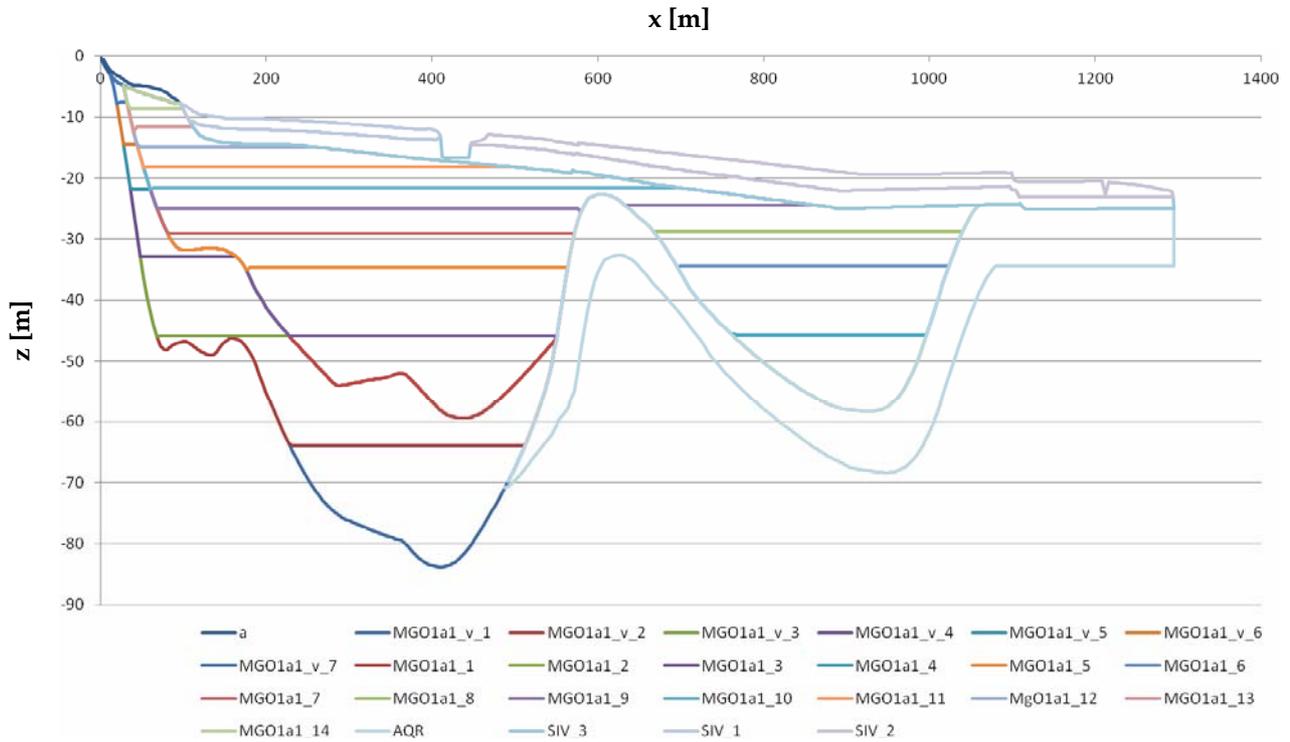


Figura 3.14 – Modello della Sezione A''-A'''.

La sezione A''-A''' rappresenta l'estensione in direzione sud-est della sezione A-A', rispetto alla quale manifesta peraltro una morfologia sepolta molto più articolata. Al di sotto di uno strato superficiale piuttosto sottile (sempre inferiore ai 10 m) di depositi alluvionali, sostanzialmente costituiti dalle Unità di Sagginale e di Luco di Mugello (SIV3 e SIV2), si trovano i depositi fluvio-lacustri (MGO1a1), parzialmente separati in due sub-bacini dal substrato in risalita in prossimità della parte centrale della sezione. All'interno del sub-bacino posto più a nord ovest, nella parte più bassa a contatto col substrato, si rileva anche la presenza della facies argillosa siltosa con intercalazioni ghiaiose dei depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello (MGO1a1_v).

Tabella 3.2 – Caratteristiche degli strati individuati all'interno del modello della sezione A''-A'''.

<i>Formazione</i>	γ [kN/m ³]	ν [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	<i>Curva di decadimento/ smorzamento</i>
a	15.52	0.35	133	3.100	Rollins
SIV_1	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
SIV_2	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
SIV_3	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
MGO1a1_14	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_13	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_12	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_11	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_10	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_9	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_8	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_7	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_6	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_5	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_4	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_3	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_2	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_1	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_v_7	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v_6	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v_5	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v_4	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v_3	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v_2	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v_1	20.00	0.45	689	2.080	S4
AQR	23.00	0.47	423	0.500	

3.2.3 Sezione B-B''

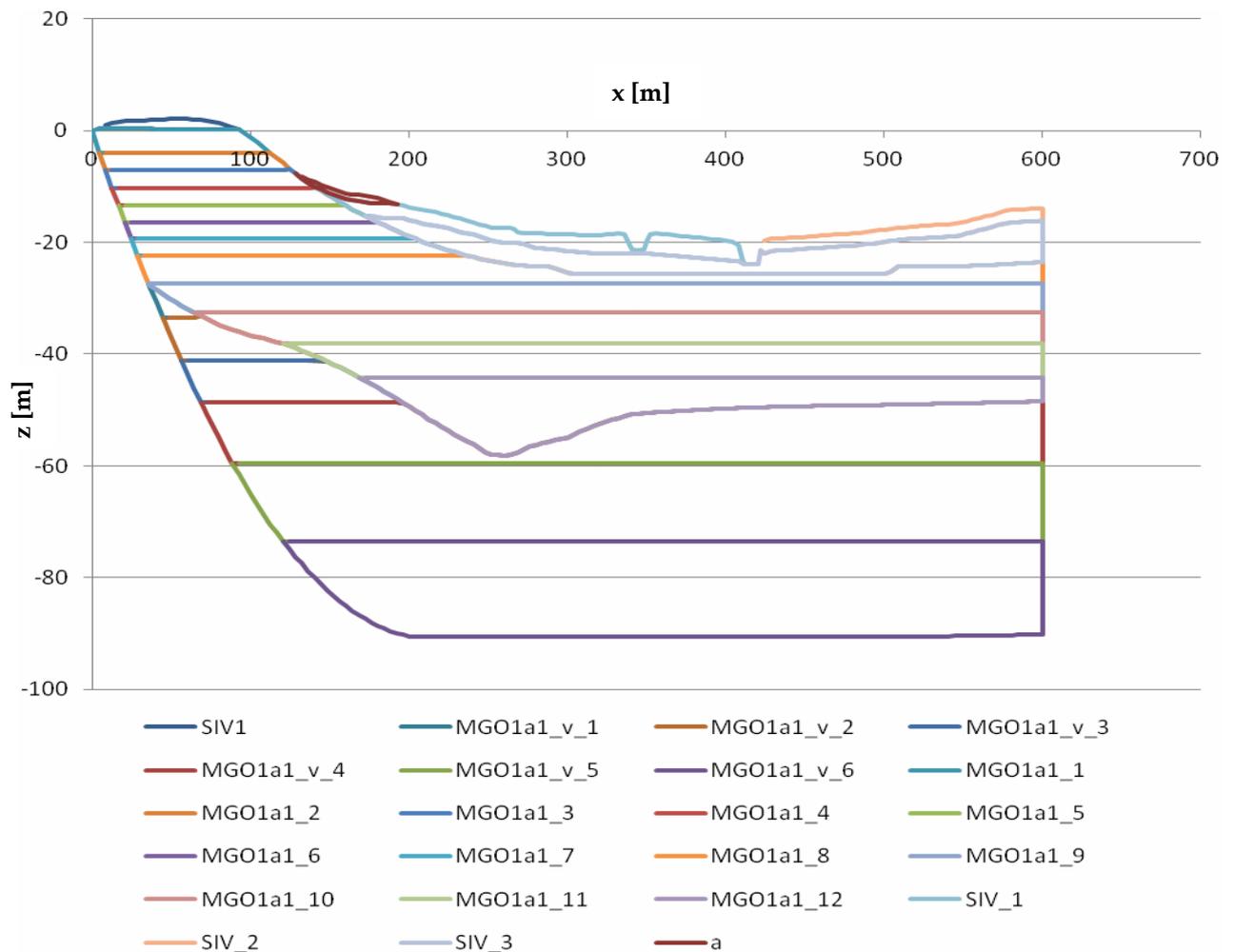


Figura 3.15 – Modello della Sezione B-B''.

La sezione B-B' risulta troppo estesa per poter essere analizzata dal codice di calcolo QUAD4M nella sua totalità, pertanto si è deciso di "tagliare" la sezione in due parti, denominate B-B'' e B''-B', e di analizzarle in maniera separata. Il "taglio" è avvenuto in un punto della sezione in cui l'andamento morfologico risulta pressoché costante, in modo tale da non trascurare in ciascuna delle due modellazioni gli eventuali effetti derivanti dalla presenza dell'altra. Proprio per questa ragione è stata prevista un'ampia fascia di sovrapposizione, che si estende per oltre 200 m.

La caratterizzazione della sezione B-B'', localizzata nella parte occidentale dell'area di Barberino, è risultata particolarmente impegnativa, in quanto nessuno dei sondaggi posti in prossimità della sezione era in grado di fornire informazioni utili in tal senso. Per questa ragione, come emerge chiaramente dalla Tabella 3.3, i depositi fluviali sono stati caratterizzati considerando tutti i sondaggi presenti nella zona indagata e calcolando la media aritmetica dei valori relativi a tale formazione. Nel caso invece dei depositi fluvio-lacustri sono stati utilizzati i sondaggi S4, S5 ed S6, posti a nord-est rispetto alla sezione considerata, ma comunque collocati all'interno del medesimo bacino. Infine per la caratterizzazione dei depositi fluvio-lacustri con facies argillosa siltosa si è fatto ricorso al sondaggio S4, l'unico disponibile nelle vicinanze.

Tabella 3.3 – Caratteristiche degli strati individuati all'interno del modello della sezione B-B''.

<i>Formazione</i>	γ [kN/m ³]	ν [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	<i>Curva di decadimento/ smorzamento</i>
SIV1	20.51	0.45	228	0.900	tutti S
a	15.52	0.35	133	3.100	S15
SIV_1	20.51	0.45	228	0.900	tutti S
SIV_2	20.51	0.45	228	0.900	tutti S
SIV_3	20.51	0.45	228	0.900	tutti S
MGO1a1_1	19.00	0.49	107	2.840	S4-S5-S6
MGO1a1_2	19.00	0.49	107	2.840	S4-S5-S6
MGO1a1_3	19.00	0.49	107	2.840	S4-S5-S6
MGO1a1_4	19.00	0.49	107	2.840	S4-S5-S6
MGO1a1_5	19.00	0.49	107	2.840	S4-S5-S6
MGO1a1_6	19.00	0.49	107	2.840	S4-S5-S6
MGO1a1_7	19.00	0.49	107	2.840	S4-S5-S6
MGO1a1_8	19.00	0.49	107	2.840	S4-S5-S6
MGO1a1_9	19.00	0.48	211	2.840	S4-S5-S6
MGO1a1_10	19.00	0.48	211	2.840	S4-S5-S6
MGO1a1_11	19.00	0.48	211	2.840	S4-S5-S6
MGO1a1_12	19.00	0.48	211	2.840	S4-S5-S6
MGO1a1_v_1	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v_2	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v_3	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v_4	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v_5	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v_6	20.00	0.45	689	2.080	S4

3.2.4 Sezione B''-B'

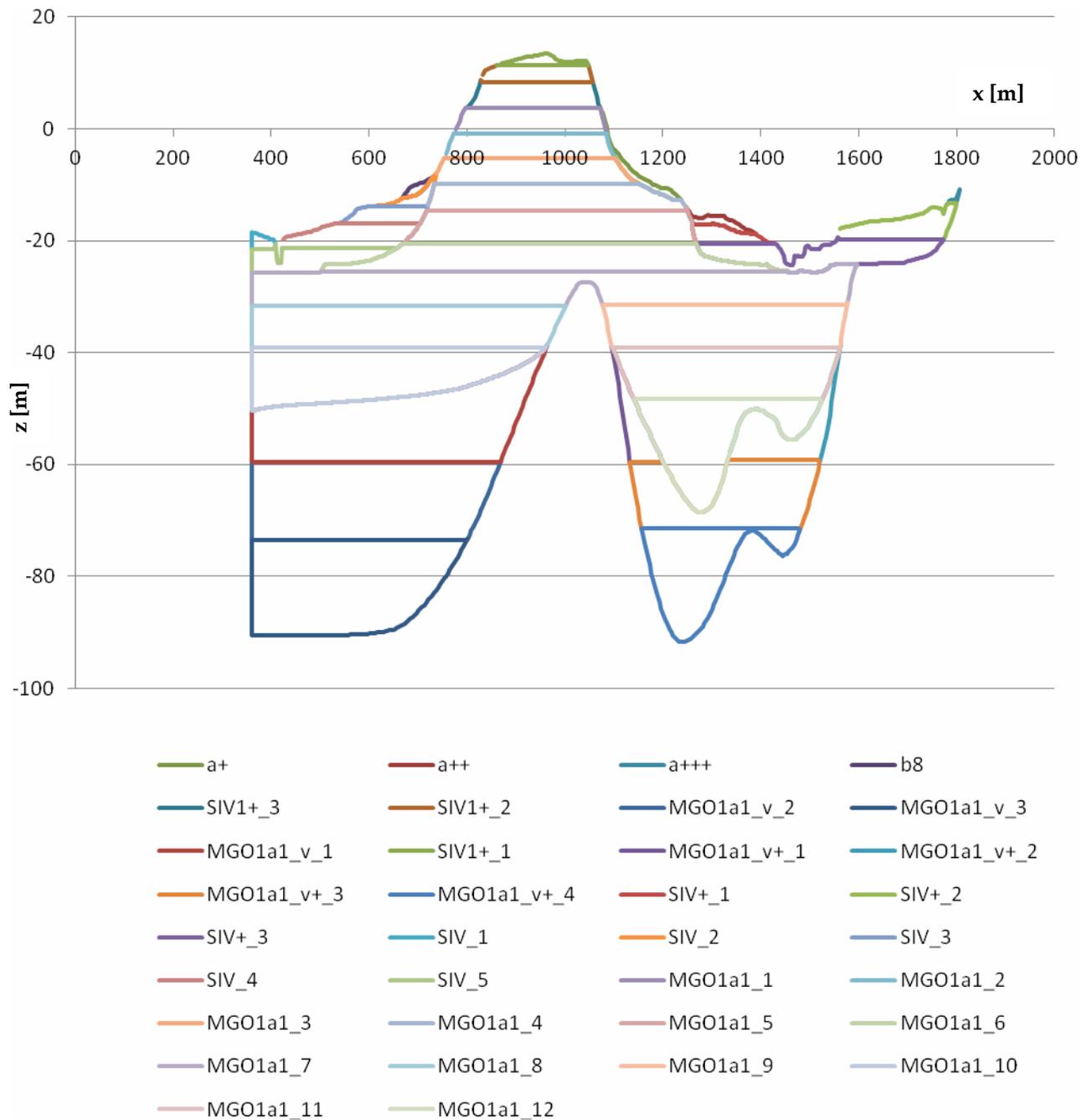


Figura 3.16 – Modello della Sezione B''-B'.

Tabella 3.4 – Caratteristiche degli strati individuati all'interno del modello della sezione B''-B'.

<i>Formazione</i>	γ [kN/m ³]	ν [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	<i>Curva di decadimento/ smorzamento</i>
SIV_1	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
SIV_2	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
SIV_3	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
SIV_4	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
SIV_5	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
b8	15.52	0.35	133	3.100	Rollins
SIV1+_1	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
SIV1+_2	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
SIV1+_3	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
a+	15.52	0.35	133	3.100	Rollins
a++	15.52	0.35	133	3.100	Rollins
SIV+_1	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
SIV+_2	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
SIV+_3	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
a+++	15.52	0.35	133	3.100	Rollins
MGO1a1_1	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_2	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_3	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_4	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_5	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_6	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_7	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_8	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_9	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_10	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_11	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_12	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_v_1	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v_2	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v_3	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v+_1	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v+_2	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v+_3	20.00	0.45	689	2.080	S4
MGO1a1_v+_4	20.00	0.45	689	2.080	S4

3.2.5 Sezione C-C', settore nord-orientale

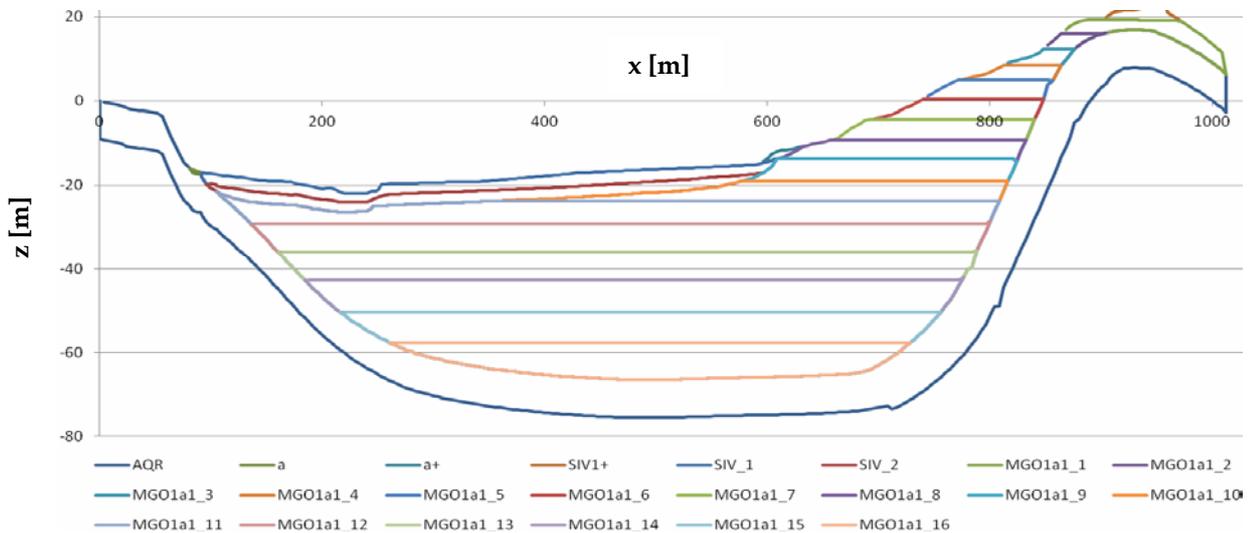


Figura 3.17 – Modello della Sezione C-C', settore nord-orientale.

Anche la sezione C-C', collocata nel settore centro meridionale dell'area di Barberino, è stata suddivisa, per motivi legati all'efficienza della modellazione mediante il codice di calcolo QUAD4M, in due sottosezioni, denominate C-C' nord e C-C' sud.

La sezione C-C' nord è caratterizzata dalla presenza di uno spessore molto elevato di materiale fluvio-lacustre (fino a 60 m) sovrastante il Membro pelitico della Formazione dell'Acquerino (AQR3). Nella parte più a sud ovest della sezione esaminata è presente uno strato di modesto spessore (sempre inferiore a 5 m) di depositi alluvionali appartenenti all'Unità di Sagginale (SIV3) e all'Unità di Luco di Mugello (SIV2), mentre l'Unità di Scarperia (SIV1) è riscontrabile solo in un brevissimo tratto verso nord est, dove va a coprire il materiale fluvio-lacustre che in quella zona è in affioramento.

Tabella 3.5 – Caratteristiche degli strati individuati all'interno del modello della sezione C-C', settore nord orientale.

<i>Formazione</i>	γ [kN/m ³]	ν [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	<i>Curva di decadimento/ smorzamento</i>
a	15.52	0.35	133	3.100	Rollins
SIV_1	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
SIV_2	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
a+	15.52	0.35	133	3.100	Rollins
SIV1+	20.51	0.42	226	0.900	S4_S5_S6
MGO1a1_1	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_2	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_3	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_4	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_5	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_6	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_7	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_8	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_9	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_10	19.00	0.49	107	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_11	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_12	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_13	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_14	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_15	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
MGO1a1_16	19.00	0.48	211	2.840	S4_S5_S6
AQR	23.00	0.47	423	0.500	S4_S5_S6

3.2.6 Sezione C-C', settore sud-occidentale

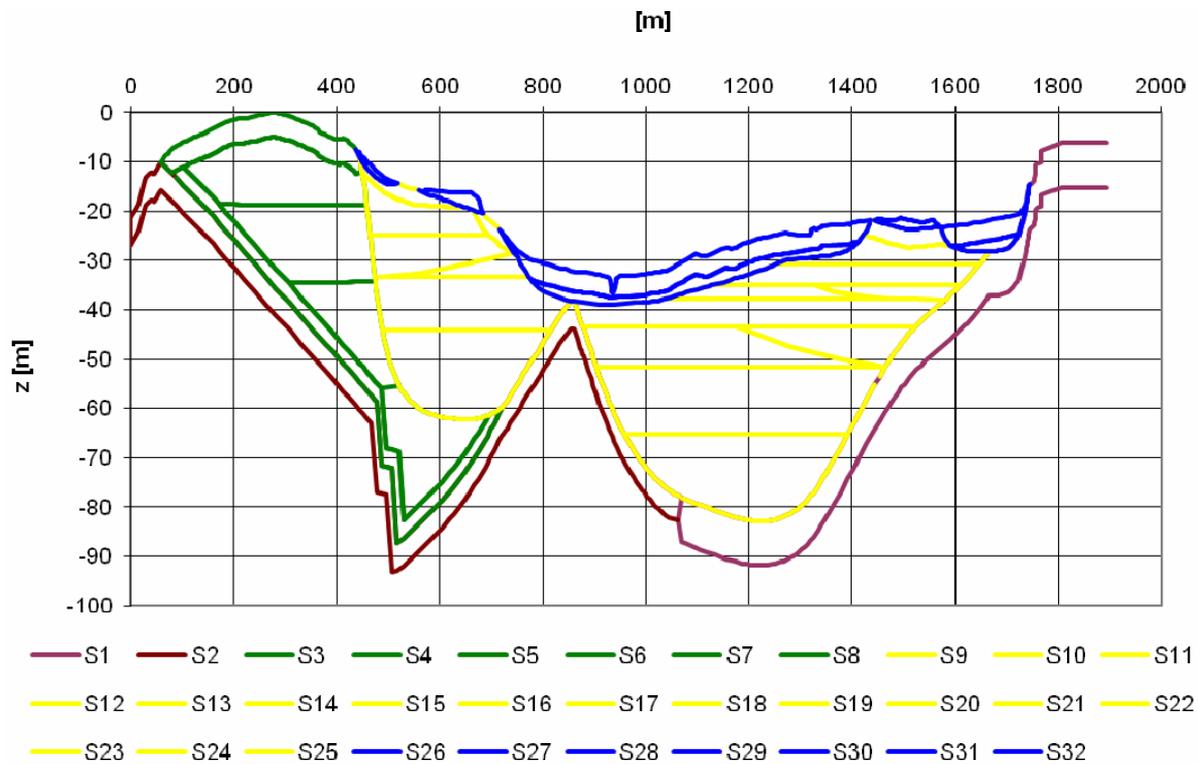


Figura 3.18 – Modello della Sezione C-C', settore sud-occidentale.

Il tratto sud-occidentale della sezione C-C' si estende dall'abitato di Cavallina fino alla parte meridionale di Barberino, in corrispondenza dei rilievi che separano la valle del Torrente Lora da quella del Torrente Stura.

La parte iniziale della sezione attraversa la valle della Sieve in un tratto che in realtà risulta esterno rispetto al sub-bacino di Barberino; essa risale quindi una sorta di "promontorio" per entrare poi nel sub-bacino di Barberino vero e proprio, dove attraversa la valle del Torrente Lora. In profondità si distinguono due paleovalle sepolte, i cui depositi fluvio-lacustri sono completamente separati, se si esclude qualche decina di centimetri di contatto al di sopra della massima quota di risalita del substrato. Quindi la sezione risale l'affioramento della Formazione dell'Acquerino che separa la valle del Lora da quella dello Stura, che è sormontato dal terrazzo alluvionale più antico (Unità di Scarperia).

La prima parte della sezione, quella corrispondente alla valle della Sieve, non è stata modellata: in questo tratto, infatti, il substrato è praticamente sempre affiorante, se si eccettua una sottile coltre alluvionale in prossimità del fiume. Tra l'altro, in questa zona, sia il piano di campagna sia il tetto del substrato sono praticamente orizzontali. Dunque, oltre ad essere trascurabili gli effetti stratigrafici, lo sono anche quelli di valle e topografici, e si può ipotizzare che i valori dell'amplificazione in quest'area siano molto prossimi all'unità, e che quindi risulti superfluo eseguire analisi di risposta sismica locale bidimensionali. Viene invece modellato il "promontorio" che separa la valle della Sieve da quella del Torrente Lora. Qui il substrato geologico, costituito dalla Formazione di Sillano, è in parte affiorante; tuttavia, come già detto nel Paragrafo 2.2.3, le caratteristiche di alterazione di questa formazione sono tali da non poterla ritenere un substrato dal punto di vista sismico. Essa viene dunque considerata come un deposito, con caratteristiche visco-elastiche. Un'analisi accurata sia degli effetti stratigrafici

sia di quelli topografici risulta in questo caso importante, perché in corrispondenza di tale "promontorio" si trova l'abitato di Cavallina. Superato un sistema di faglie dirette, il substrato viene sepolto al di sotto dei depositi fluvio-lacustri. Poco dopo, la Formazione di Sillano comincia ad assottigliarsi fino a scomparire: più a nord, essa era probabilmente stata già erosa prima che la subsidenza la portasse ad essere sommersa dal lago plio-pleistocenico. Nella paleovalle più settentrionale delle due attraversate dal tratto sud-occidentale della sezione C-C', si viene a trovare invece il contatto litologico fra le Arenarie del Falterona (a sud) e la Formazione dell'Acquerino (a nord), in particolare il membro pelitico-arenaceo (AQR2). Il membro pelitico superiore (AQR3) è stato probabilmente eroso, e rimane solo più ad ovest, nell'ampia conca attraversata dalla sezione D-D' e nella valle del Torrente Stura, dove è rinchiuso all'interno di una piega coricata.

Lungo la sezione C-C' sono stati eseguiti ben tre sondaggi, S8, S10 ed S17, tutti collocati proprio nel tratto esaminato. S10, il più a sud, eseguito nel "promontorio" che separa la valle della Sieve da quella del Torrente Lora, penetra nella Formazione di Sillano fino ad intercettare le Arenarie del Falterona, che qui raggiungono valori di velocità di propagazione delle onde sismiche molto elevati. La maggiore rigidità può essere imputabile ad una sorta di protezione dagli agenti atmosferici esercitata dalla sovrastante Formazione di Sillano. Questa non è presente dappertutto sopra le Arenarie del Falterona, tuttavia, ai fini della caratterizzazione, si è ritenuto più appropriato adottare i valori misurati nell'unico sondaggio effettuato nella zona all'interno di questa formazione, piuttosto che ipotizzare una variazione di rigidità assegnando, dove il Membro di Montalto non risulta "protetto" dal Dominio Ligure, i valori di velocità misurati nei ben più lontani sondaggi S9 e S14. Si è inoltre ritenuto opportuno considerare la probabile alterazione delle Arenarie del Falterona facendo proseguire lo strato di alterazione individuato nel sondaggio S10 anche dopo la fine del sovrascorrimento della Formazione di Sillano.

In corrispondenza del passaggio dalle Arenarie del Falterona alla Formazione dell'Acquerino è stato necessario modellare la discontinuità presente all'interno del substrato e si è proceduto all'esecuzione di due analisi. Nella prima si è assegnato a tutto il substrato il valore di rigidità caratteristico delle Arenarie del Falterona, nella seconda il valore di rigidità adottato per la Formazione dell'Acquerino. Relativamente a quest'ultima formazione, il sondaggio S17 rileva la presenza di uno strato superficiale molto alterato, al punto che il substrato affiorante è tornato allo stato di materiale incoerente. Esso, dunque, è stato modellato lungo tutto il tetto della formazione tenendo in considerazione questa specificità. Riguardo ai parametri da assegnare, esso è stato supposto a comportamento elastico, anche se, trattandosi di materiale incoerente, si sarebbe potuto modellare come uno strato visco-elastico, utilizzando curve di decadimento e di smorzamento di letteratura valide per le sabbie. La velocità delle onde di taglio in questo strato di alterazione non differisce molto da quella nello strato sottostante, litoidale ma sempre alterato: di conseguenza i due orizzonti sismici sono stati assimilati tra loro, così da formare un unico strato di alterazione di potenza pari a 9 m, con valore di rigidità medio pesato sullo spessore. Una leggera modifica rispetto alla morfologia reale, sicuramente senza alcun effetto sui risultati, vista anche la profondità, è stata effettuata in corrispondenza della discontinuità fra la Formazione dell'Acquerino e le Arenarie del Falterona. Qui infatti si è proceduto "regolarizzando" la superficie e andando a raccordare la base dello strato alterato della Formazione dell'Acquerino con la base dello strato alterato delle Arenarie del Falterona.

I sopracitati sondaggi S8 ed S17 individuano più in superficie la presenza di materiale organico, appartenente ad entrambi i livelli riscontrati nel sub-bacino di Barberino: nella paleovalle meridionale prevale la lignite, in quella settentrionale la torba, in associazione con la lignite. Ai due materiali, nonostante le ben diverse caratteristiche di compattezza, si assegna, in mancanza di dati e, per quanto riguarda la lignite, anche di curve di letteratura, lo stesso comportamento dinamico, come spiegato in modo più dettagliato nel Paragrafo 2.2.5. Dall'analisi dei due sondaggi emerge chiaramente che i tratti con prevalenza netta di materiale organico giungono al massimo a 2 m di spessore e tale quindi è il

valore che è stato assunto nel modello. Per quanto riguarda la forma da attribuire a questi strati ai fini della modellazione, si è supposto che si tratti di lenti e si è assegnato quindi un tetto orizzontale, mentre lo spessore, massimo al bordo dei depositi, è stato rastremato verso il centro, facendo risalire la base con gradiente sempre maggiore allontanandosi dalle sponde dell'antico lago.

Per quanto riguarda la parte superiore dei depositi fluvio-lacustri, si riscontra, sia nel settore meridionale sia in quello settentrionale, la presenza di uno strato di alterazione, ragione per la quale gli S23, S24 ed S25 sono stati modellati utilizzando curve di decadimento e di smorzamento differenti.

Tabella 3.6 – Caratteristiche degli strati individuati all'interno del modello della sezione C-C', settore sud-occidentale.

Strato	Formazione	γ [kN/m ³]	ν [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	Curva di decadimento/ smorzamento
Substrato	FAL3	23.00	0.39	5779	-	-
	AQR2	23.00	0.41	1199	-	-
S1	AQR2 (alterato)	23.00	0.47	423	2.000	-
S2	FAL3 (alterato)	23.00	0.39	3793	2.000	-
S3	SIL	20.76	0.47	581	6.857	S10-C2
S4	SIL	20.76	0.47	768	6.857	S10-C2
S5	SIL	20.76	0.47	768	6.857	S10-C2
S6	SIL	20.76	0.47	768	6.857	S10-C2
S7	SIL	20.76	0.47	768	6.857	S10-C2
S8	SIL	19.95	0.43	306	6.857	S10-C2
S9	MGO1a1	19.68	0.47	354	2.358	altri campioni
S10	MGO1a1	19.68	0.47	354	2.358	altri campioni
S11	MGO1a1	19.68	0.47	354	2.358	altri campioni
S12	MGO1a1	19.68	0.47	354	2.358	altri campioni
S13	MGO1a1	19.68	0.47	354	2.358	altri campioni
S14	MGO1a1	19.68	0.47	354	2.358	altri campioni
S15	MGO1a1	15.01	0.48	124	1.979	torbe
S16	MGO1a1	18.06	0.49	139	2.358	altri campioni
S17	MGO1a1	18.06	0.49	139	2.358	altri campioni
S18	MGO1a1	13.91	0.496	36	1.979	torbe
S19	MGO1a1	18.06	0.49	81	2.358	altri campioni
S20	MGO1a1	17.19	0.49	19	2.358	altri campioni
S21	MGO1a1	18.06	0.45	27	2.358	altri campioni
S22	MGO1a1	17.49	0.49	150	1.979	torbe
S23	MGO1a1	19.68	0.49	150	2.089	S8-C2
S24	MGO1a1	17.75	0.49	52	2.089	S8-C2
S25	MGO1a1	17.75	0.49	52	2.089	S8-C2
S26	SIV2/SIV3	20.51	0.46	263	0.900	Rollins
S27	SIV2/SIV3/a/b	20.51	0.28	136	0.900	Rollins
S28	SIV2	20.51	0.46	263	0.900	Rollins
S29	SIV2/a	20.51	0.28	136	0.900	Rollins
S30	SIV2	20.51	0.28	136	0.900	Rollins
S31	a	20.51	0.48	163	0.900	Rollins
S32	a	20.51	0.28	136	0.900	Rollins

Sulla base di approfondimenti che il Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica ha effettuato in un momento successivo, il modello geologico in questo tratto della sezione C-C' ha subito una piccola variazione. La zona interessata è stata quella del bacino sud-occidentale, nel quale sostanzialmente lo spessore attribuito alla Formazione di Sillano è diminuito a vantaggio di quello assegnato ai depositi fluvio-lacustri, che conseguentemente si trovano ad estendersi più ad ovest rispetto all'ipotesi di lavoro originaria. Ciò emerge chiaramente dalla Figura 3.19, che rappresenta in forma schematica la modifica introdotta, rispetto al modello iniziale (Figura 3.18).

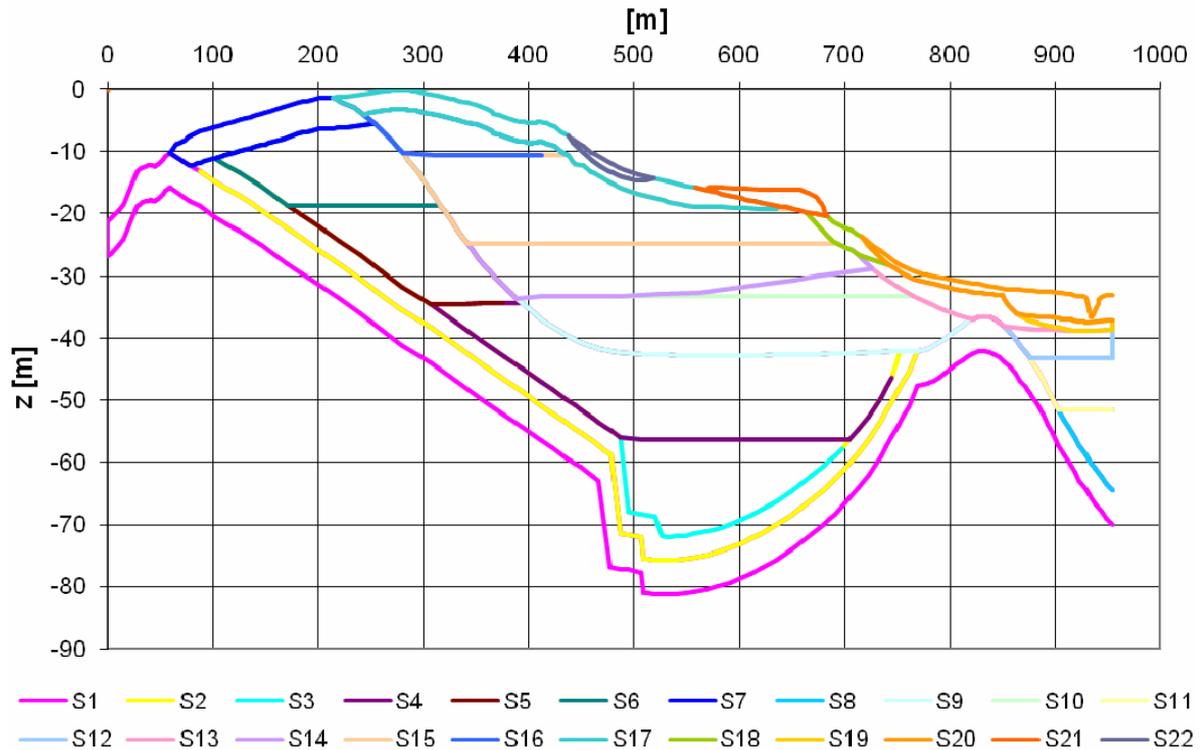


Figura 3.19 – Modello della Sezione C-C', settore sud-occidentale, corretta.

Di conseguenza è stato necessario ridefinire il modello e ripetere le analisi limitandosi a processare soltanto il tratto interessato, ovviamente estendendolo lateralmente in modo tale da poter cogliere lungo il resto della sezione l'effetto della modifica introdotta. Questo ha comportato la costruzione di un nuovo file di input, conforme al nuovo modello, le cui caratteristiche sono riportate nella Tabella 3.7.

Tabella 3.7 – Caratteristiche degli strati individuati all'interno del modello della sezione C-C', settore sud-occidentale, corretta.

Strato	Formazione	γ [kN/m ³]	ν [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	Curva di decadimento/ smorzamento
Substrato	FAL3	23.00	0.39	5779	-	-
	AQR2	23.00	0.41	1199	-	-
S1	FAL3 (alterato)	23.00	0.39	3793	2.000	-
S2	SIL	20.76	0.47	581	6.857	S10-C2
S3	SIL	20.76	0.47	768	6.857	S10-C2
S4	SIL	20.76	0.47	768	6.857	S10-C2
S5	SIL	20.76	0.47	768	6.857	S10-C2
S6	SIL	20.76	0.47	768	6.857	S10-C2
S7	SIL	19.95	0.43	306	6.857	S10-C2
S8	MGO1a1	19.68	0.47	354	2.358	altri campioni
S9	MGO1a1	19.68	0.47	354	2.358	altri campioni
S10	MGO1a1	19.68	0.47	354	2.358	altri campioni
S11	MGO1a1	19.68	0.47	354	2.358	altri campioni
S12	MGO1a1	18.06	0.49	139	2.358	altri campioni
S13	MGO1a1	18.06	0.48	247	2.358	altri campioni
S14	MGO1a1	17.49	0.49	150	1.979	torbe
S15	MGO1a1	19.68	0.49	150	2.089	S8-C2
S16	MGO1a2	19.68	0.49	150	2.089	S8-C2
S17	MGO1a1	17.75	0.49	52	2.089	S8-C2
S18	MGO1a1	17.75	0.49	52	2.089	S8-C2
S19	alluvioni	20.51	0.46	263	0.900	Rollins
S20	alluvioni	20.51	0.28	136	0.900	Rollins
S21	alluvioni	20.51	0.28	136	0.900	Rollins
S22	alluvioni	20.51	0.48	163	0.900	Rollins

3.2.7 Sezione D-D'

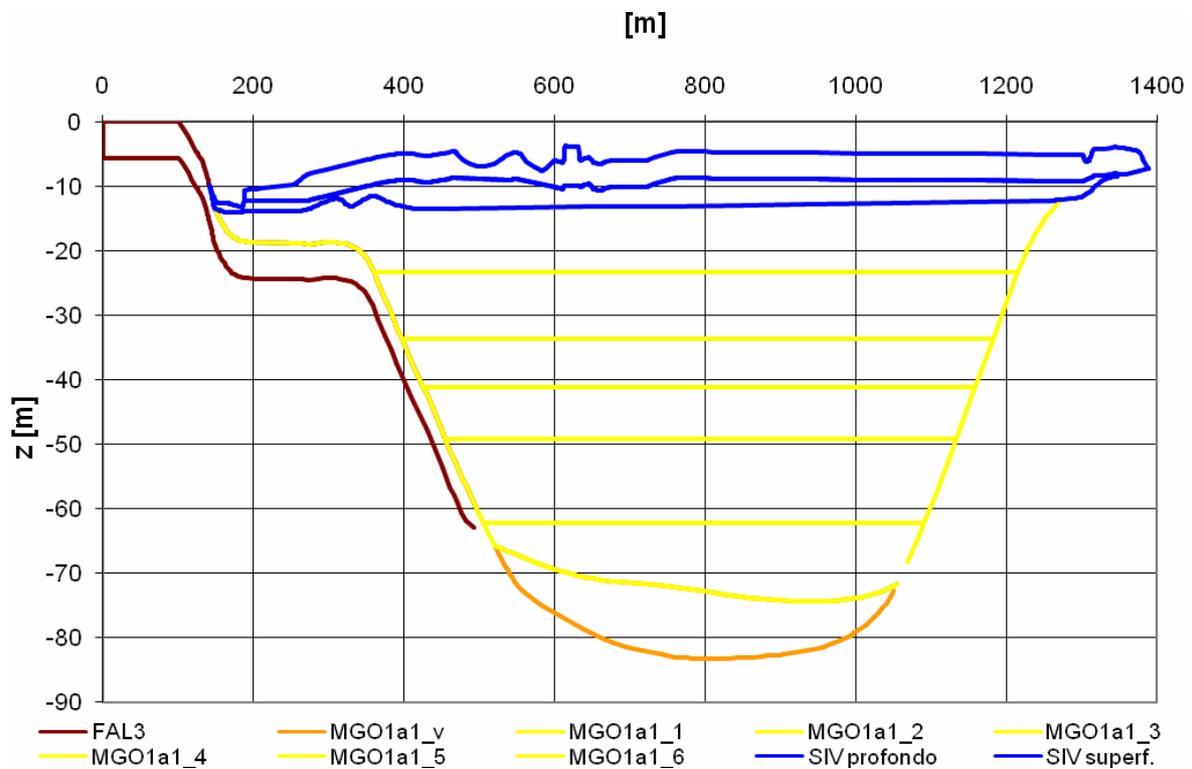


Figura 3.20 – Modello della Sezione D-D'.

La sezione D-D' è collocata nella parte sud-orientale dell'area di Barberino, ed è costituita da un deposito di materiale fluvio-lacustre di elevato spessore, che nella parte più profonda arriva ad 80 m circa, sovrastato da uno strato di modesto spessore (sempre inferiore a 10 m) di depositi alluvionali, costituiti sostanzialmente dall'Unità di Sagginale (SIV3). La peculiarità di questa sezione risiede tuttavia nelle caratteristiche del substrato, poiché essa intercetta la discontinuità litologica tra il Membro di Montalto delle Arenarie del Falterona (FAL3) e il Membro pelitico della Formazione dell'Acquerino (AQR3). La scelta su come procedere alla modellazione di tale discontinuità ha rappresentato un problema di notevole entità, poiché il codice di calcolo QUAD4M consente la modellazione di un'unica tipologia di substrato. Si è quindi deciso di modellare la sezione, prima considerando alla base un substrato omogeneo avente le caratteristiche di una delle due formazioni, poi considerando alla base un substrato omogeneo avente le caratteristiche dell'altra, combinando poi lungo la sezione i risultati ottenuti dalle analisi eseguite separatamente sui due modelli.

Dovendo poi attribuire a ciascun punto lungo la sezione un unico valore del fattore di amplificazione, si è deciso di assumere il massimo tra i due valori (ognuno ottenuto come media delle analisi eseguite con i 5 segnali di input) laddove questi erano significativamente diversi, oppure il valore ottenuto per il modello con substrato corrispondente a quello realmente presente in corrispondenza della verticale passante per il punto considerato laddove i risultati erano poco diversi tra loro.

Inoltre, sulla base dei risultati delle prove down-hole disponibili nell'area in esame, al Membro di Montalto è stato attribuito uno strato di alterazione superficiale, mentre per la Formazione dell'Acquerino il substrato si considera posto direttamente in contatto con i depositi fluvio-lacustri.

Un'altra particolarità di questa zona del sub-bacino consiste nella presenza di strati di varia potenza con elevato contenuto di materiale organico, costituiti principalmente da materiale torboso o lignitifero, ai quali, ai fini della modellazione, sono state assegnate le caratteristiche esposte nel Paragrafo 2.2.5.

Tabella 3.8 – Caratteristiche degli strati individuati all'interno del modello della sezione D-D'.

Strato	Formazione	γ [kN/m ³]	ν [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	Curva di decadimento/ smorzamento
Substrato	FAL3/GLG	23.00	0.39	5779	-	-
	AQR3	23.00	0.44	1215	-	-
S1	FAL3/GLG (alterato)	23.00	0.39	3793	2.000	-
S2	MGO1a1_v	21.50	0.45	750	2.358	altri campioni
S3	MGO1a1	19.00	0.47	366	2.358	altri campioni
S4	MGO1a1	17.58	0.47	273	2.358	altri campioni
S5	MGO1a1	17.58	0.48	189	2.358	altri campioni
S6	MGO1a1	13.91	0.48	96	1.979	torbe
S7	MGO1a1	13.91	0.49	96	1.979	torbe
S8	MGO1a1	17.58	0.49	140	2.358	altri campioni
S9	SIV3/b	20.51	0.46	263	0.900	Rollins
S10	SIV3	20.51	0.28	136	0.900	Rollins

3.2.8 Sezione E-E'

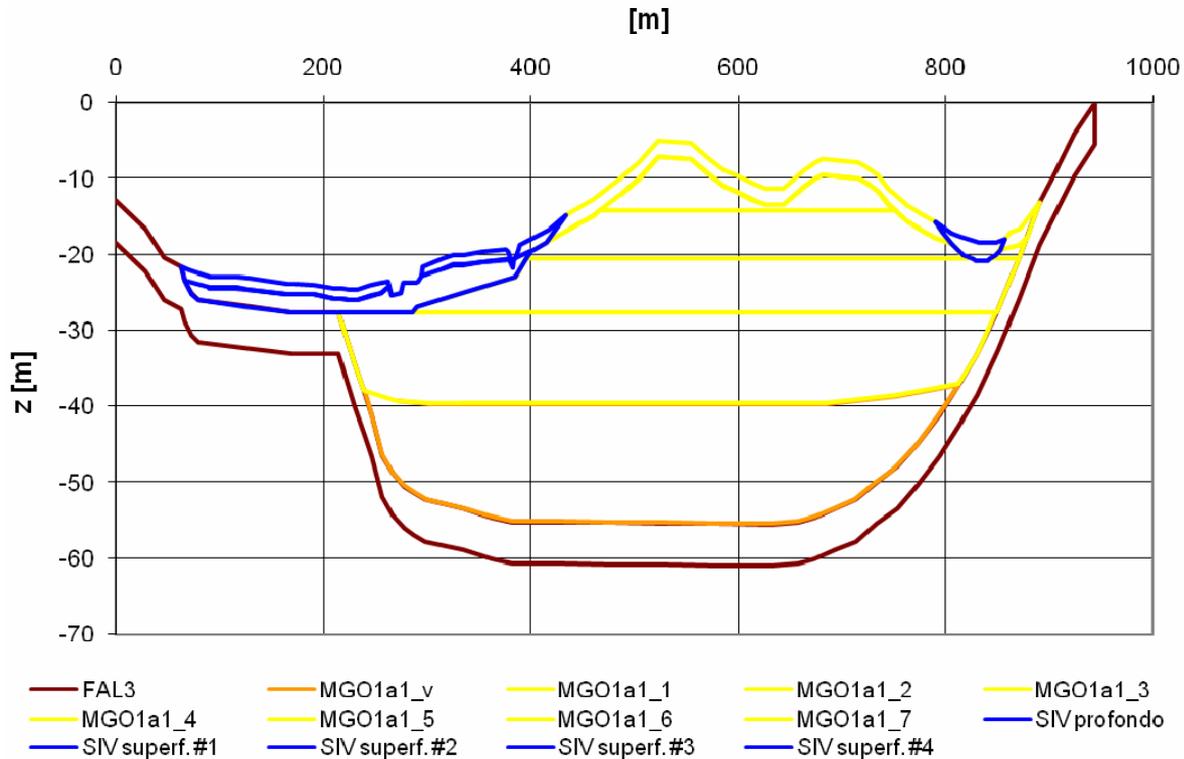


Figura 3.21 – Modello della Sezione E-E'.

La sezione E-E', posta all'estremità sud-occidentale del sub-bacino di Barberino, è caratterizzata dalla presenza di uno strato di elevato spessore di materiale fluvio-lacustre (MGO1a1), che raggiunge circa i 60 m in prossimità del sondaggio S9. La parte inferiore del deposito è contraddistinta dalla presenza della facies argillosa siltosa con intercalazioni ghiaiose (MGO1a1_v), mentre la parte superiore è caratterizzata dalla presenza di uno strato di alterazione superficiale. Procedendo in direzione sud-est si osservano strati sottili di depositi alluvionali, appartenenti all'Unità di Sagginale (SIV3) e all'Unità di Luco di Mugello (SIV2), dei quali tuttavia solo quello posto a contatto con l'MGO1a1 è stato modellato. Il substrato è costituito dal Membro di Montalto delle Arenarie del Falterona (FAL3), il quale è stato modellato considerando la presenza di uno strato di alterazione dello spessore di circa 5 m.

Tabella 3.9 – Caratteristiche degli strati individuati all'interno del modello della sezione E-E'.

Strato	Formazione	γ [kN/m ³]	ν [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	Curva di decadimento/ smorzamento
Substrato	FAL3	23.00	0.40	2439	-	-
S1	FAL3 (alterato)	23.00	0.41	1284	2.000	-
S2	MGO1a1_v	19.00	0.42	1156	2.358	altri campioni
S3	MGO1a1	18.50	0.45	500	2.358	altri campioni
S4	MGO1a1	17.59	0.47	266	2.358	altri campioni
S5	MGO1a1	19.15	0.49	148	2.358	altri campioni
S6	MGO1a1	19.15	0.49	148	2.358	altri campioni
S7	MGO1a1	17.95	0.47	73	2.358	altri campioni
S8	MGO1a1	17.95	0.47	15	2.358	altri campioni
S9	MGO1a1	17.95	0.47	15	2.358	altri campioni
S10	SIV2/SIV3/b	20.51	0.47	141	0.900	Rollins
S11	SIV2/SIV3	20.51	0.35	64	0.900	Rollins
S12	SIV2	20.51	0.35	64	0.900	Rollins
S13	b _s	20.51	0.35	64	0.900	Rollins
S14	a/b _s	20.51	0.35	64	0.900	Rollins

3.2.9 Sezione F-F'

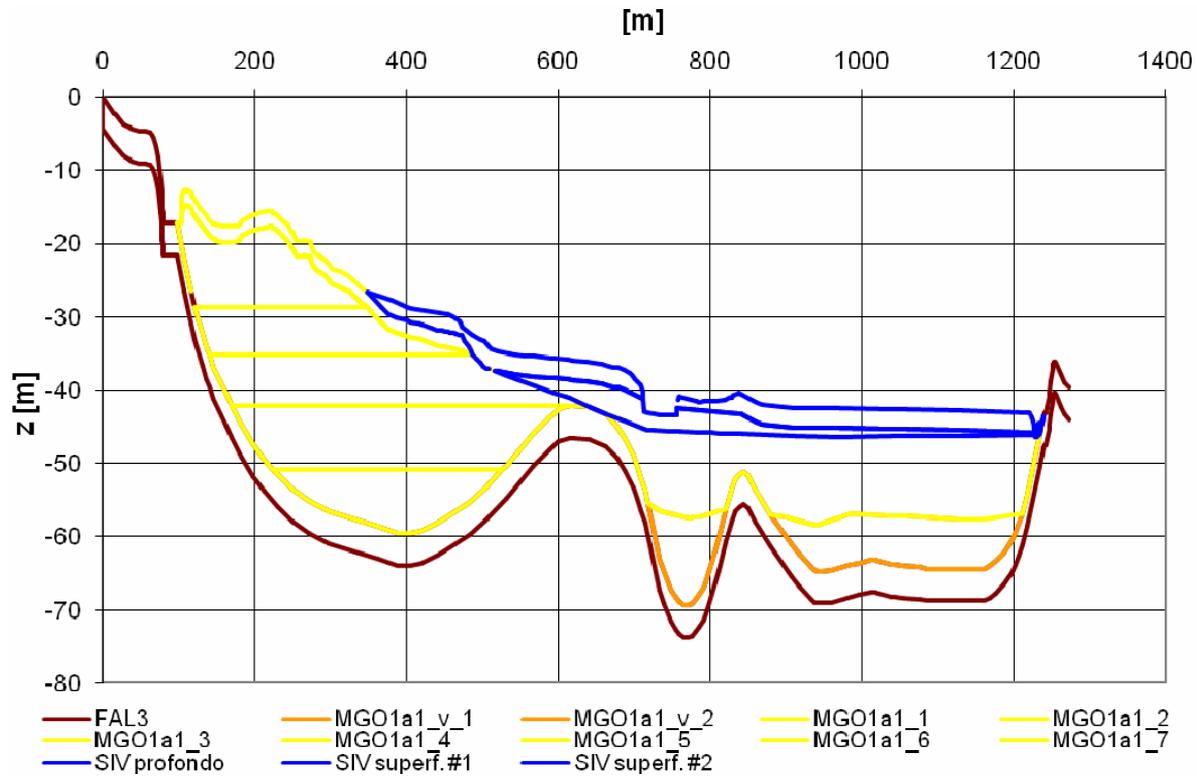


Figura 3.22 – Modello della Sezione F-F'.

Nella sezione F-F', posta anch'essa presso il margine sud-occidentale del sub-bacino di Barberino, incidente alla sezione E-E', è possibile individuare ben tre paleovalle di diversa estensione. In quella centrale ed in quella meridionale si riscontra la presenza della facies argillosa siltosa con intercalazioni ghiaiose (MGO1a1_v), che al contrario non è presente in quella settentrionale. In quest'ultima paleovalle si riscontrano gli spessori più elevati dell'unità MGO1a1, che affiora nella parte più estrema della sezione. Il substrato è costituito dalle Arenarie del Falterona, alle quali è stato attribuito uno spessore di alterazione di circa 6 m. Anche in questo caso si osserva la presenza di depositi alluvionali superficiali, il cui spessore non supera mai i 10 m.

In corrispondenza della sezione, situato nella paleovalle meridionale, è collocato il sondaggio S14, il quale è stato impiegato per la caratterizzazione dei litotipi presenti nelle paleovalle meridionale e centrale. Proprio in corrispondenza della paleovalle centrale si ha l'intersezione con la sezione E-E', per la caratterizzazione della quale sono stati utilizzati i risultati desunti dal sondaggio S9, adottati anche per la caratterizzazione della paleovalle settentrionale. Ciò introduce una parziale discordanza in prossimità dell'incrocio tra le sezioni E-E' ed F-F', poiché le caratteristiche assegnate agli strati sono sensibilmente differenti, tuttavia l'analisi della sezione ci ha spinti ad adottare questa soluzione. Per quanto riguarda invece la caratterizzazione dei depositi alluvionali, dal momento che sia per la sezione E-E' sia per la sezione F-F' si utilizza il medesimo sondaggio (S15), non vi è alcuna discordanza nella zona di intersezione.

Tabella 3.10 – Caratteristiche degli strati individuati all'interno del modello della sezione F-F'.

Strato	Formazione	γ [kN/m ³]	ν [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	Curva di decadimento/ smorzamento
Substrato	FAL3	23.00	0.41	1754	-	-
S1	FAL3 (alterato)	23.00	0.47	518	2.000	-
S2	MGO1a1_v	21.50	0.45	616	4.398	S14-C1
S3	MGO1a1_v	21.50	0.45	616	4.398	S14-C1
S4	MGO1a1	21.11	0.48	256	4.398	S14-C1
S5	MGO1a1	18.50	0.44	582	2.358	altri campioni
S6	MGO1a1	18.50	0.46	396	2.358	altri campioni
S7	MGO1a1	17.59	0.47	266	2.358	altri campioni
S8	MGO1a1	19.15	0.49	148	2.358	altri campioni
S9	MGO1a1	17.95	0.47	73	2.358	altri campioni
S10	MGO1a1	17.95	0.47	15	2.358	altri campioni
S11	SIV2/SIV3	20.51	0.47	141	0.900	Rollins
S12	SIV2/SIV3/b ₈	20.51	0.35	64	0.900	Rollins
S13	SIV2/SIV3/a/b	20.51	0.35	64	0.900	Rollins

Veniamo ora all'analisi delle sezioni che interessano l'area di Galliano, ovvero la sezione G-G', che taglia l'abitato in direzione ovest-est, e la sezione H-H', che procede in direzione nord-sud.

3.2.10 Sezione G-G' (Galliano)

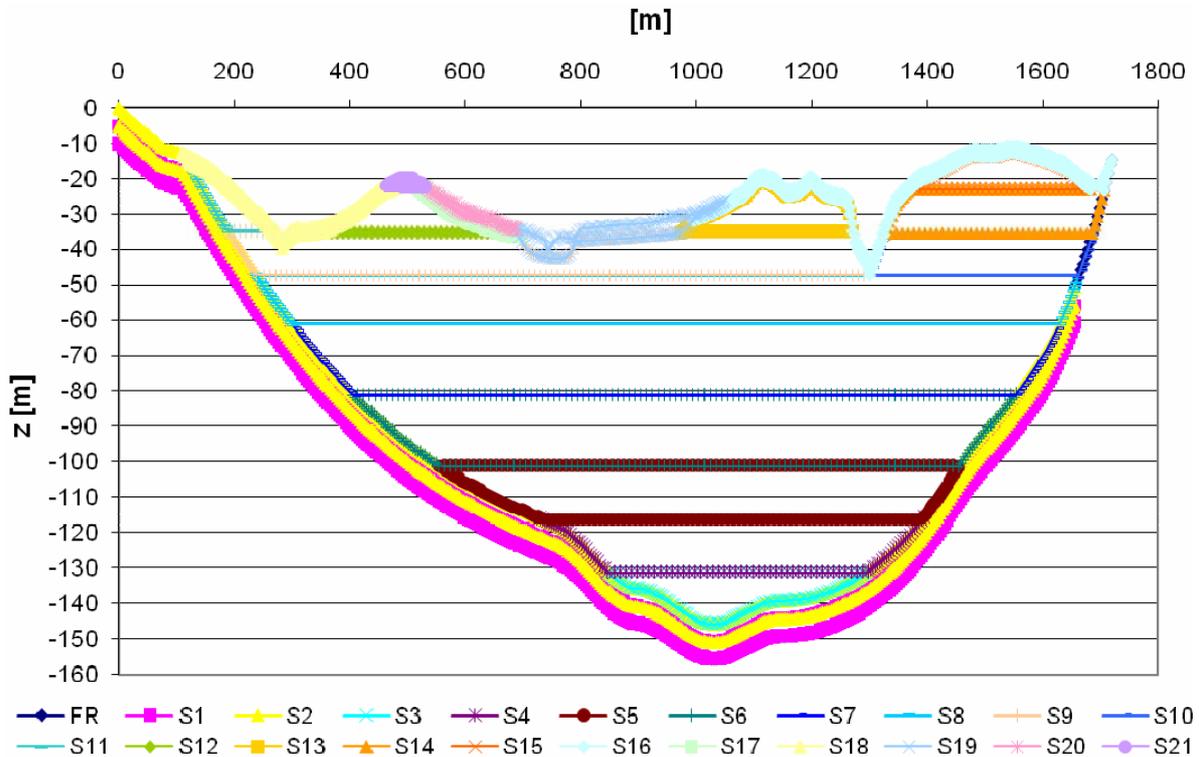


Figura 3.23 – Modello della Sezione G-G' (Galliano).

La sezione G-G' rileva la presenza di una paleovalle molto profonda costituita dai depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello (MGO1a1), caratterizzata da spessori elevati, tali da raggiungere nella parte centrale della paleovalle i 120 m di copertura. Per questo materiale, limitatamente alle zone in affioramento, è stato introdotto uno spessore di alterazione, con andamento parallelo a quello del piano campagna, modellato mediante l'introduzione di una degradazione delle caratteristiche di rigidità e di resistenza. Il substrato è costituito dal Membro pelitico della Formazione dell'Acquerino (AQR3), al quale, in fase di modellazione, è stato attribuito uno spessore di alterazione di 10 m in prossimità del contatto col deposito. L'estremità est mostra la presenza di un altro substrato, costituito dai Calcari a Calpionella (CCL), appartenenti all'Unità Ofiolitica, ai quali sono state attribuite le medesime caratteristiche del Membro pelitico della Formazione dell'Acquerino. Rispetto a quest'ultimo tuttavia, per quanto riguarda i CCL non è stato introdotto alcun tipo di alterazione del substrato in corrispondenza del contatto col deposito. Anche questa sezione è interessata dalla presenza di depositi fluviali ed eluvio-colluviali di piccolo spessore, collocati in corrispondenza del corso del Torrente Tavaiano.

Dal momento che l'area di Galliano è stata direttamente coinvolta nella campagna di indagine effettuata nell'ambito dei Programmi Regionali VEL e DOCUP, ai fini della caratterizzazione del materiale fluvio-lacustre in particolare, si è fatto ricorso ai risultati desunti dai sondaggi effettuati all'interno dell'area, nel caso specifico il sondaggio S11.

Tabella 3.11 – Caratteristiche degli strati individuati all'interno del modello della sezione G-G' (Galilieno).

Formazione	γ [kN/m ³]	ν [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	Curva di decadimento/ smorzamento
S1_AQR3	23.00	0.37	1491	2.000	-
S2_AQR3	23.00	0.37	2463	2.000	-
S3_MGO1a1	21.50	0.45	1168	3.838	S11-C3
S4_MGO1a1	21.50	0.45	987	3.838	S11-C3
S5_MGO1a1	21.50	0.45	821	3.838	S11-C3
S6_MGO1a1	19.70	0.48	246	3.838	S11-C3
S7_MGO1a1	19.70	0.47	348	3.838	S11-C3
S8_MGO1a1	19.70	0.47	317	2.966	S11-C2
S9_MGO1a1	19.70	0.47	317	2.966	S11-C2
S10_MGO1a1	19.70	0.47	317	2.966	S11-C2
S11_MGO1a1	19.70	0.47	317	2.966	S11-C2
S12_MGO1a1	19.70	0.47	317	2.966	S11-C2
S13_MGO1a1	19.70	0.47	317	2.966	S11-C2
S14_MGO1a1	19.70	0.47	317	2.966	S11-C2
S15_MGO1a1	19.70	0.47	317	2.966	S11-C2
S16_MGO1a1	17.95	0.47	15	2.358	altri campioni
S17_MGO1a1	17.95	0.47	15	2.358	altri campioni
S18_MGO1a1	17.95	0.47	15	2.358	altri campioni
S19_SIV	20.88	0.36	239	0.900	Rollins
S20_SIV	20.88	0.36	239	0.900	Rollins
S21_SIV	20.88	0.36	239	0.900	Rollins

3.2.11 Sezione H-H' (Galliano)

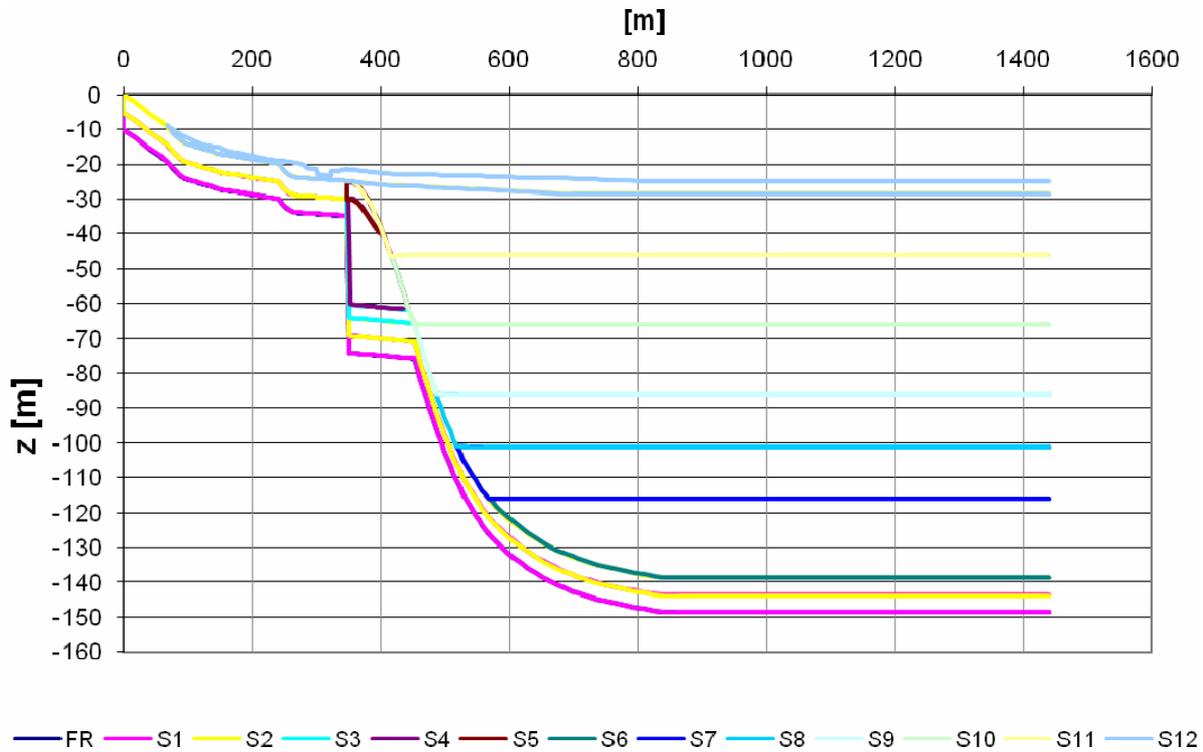


Figura 3.24 – Modello della Sezione H-H' (Galliano).

La sezione H-H' attraversa l'abitato di Galliano in direzione nord-sud, intersecando quasi ortogonalmente la sezione G-G' e, ovviamente come quest'ultima, è caratterizzata dalla presenza di un deposito di materiale fluvio-lacustre di elevato spessore, sovrastante un substrato costituito dal Membro pelitico della Formazione dell'Acquerino e sovrastato in prossimità del corso del Torrente Tavaiano da depositi fluviali ed eluvio-colluviali di esiguo spessore. Nella parte centrale della sezione è presente una sorta di "cuneo" di materiale di incerta attribuzione, appartenente presumibilmente alla Formazione di Sillano (SIL) e alle Ofioliti, comunque riconducibile all'Unità Ofiolitica.

Anche in questo caso, data la possibilità di impiegare i risultati di sondaggi effettuati direttamente nell'area di Galliano, è stato utilizzato il sondaggio S10 per la caratterizzazione della Formazione di Sillano ed il sondaggio S11 per la caratterizzazione dei depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello. Il substrato e i depositi fluviali e eluvio-colluviali invece sono stati caratterizzati facendo riferimento ai dati provenienti dai sondaggi di Barberino Capoluogo.

Tabella 3.12 – Caratteristiche degli strati individuati all'interno del modello della sezione H-H' (Galilleano).

Formazione	γ [kN/m ³]	ν [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	Curva di decadimento/ smorzamento
S1_AQR3	23.00	0.37	1491	2.000	-
S2_AQR3	23.00	0.37	2463	2.000	-
S3_SIL	20.76	0.47	581	6.857	S10-C2
S4_SIL	20.76	0.47	768	6.857	S10-C2
S5_SIL	19.95	0.43	306	6.857	S10-C2
S6_MGO1a1	21.50	0.45	1168	3.838	S11-C3
S7_MGO1a1	21.50	0.45	987	3.838	S11-C3
S8_MGO1a1	21.50	0.45	821	3.838	S11-C3
S9_MGO1a1	19.70	0.48	246	3.838	S11-C3
S10_MGO1a1	19.70	0.47	348	3.838	S11-C3
S11_MGO1a1	19.70	0.47	317	2.966	S11-C2
S12_MGO1a1	20.88	0.36	239	0.900	Rollins

3.2.12 Sezione I-I' nord

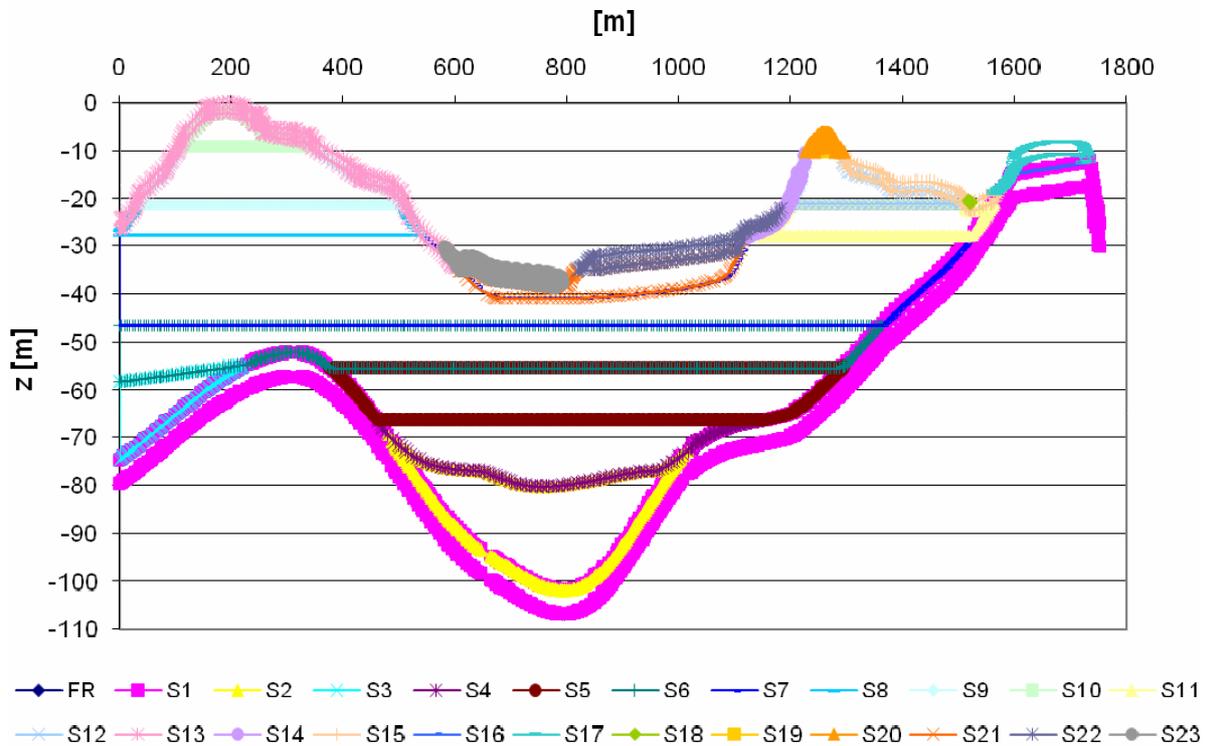


Figura 3.25 – Modello della Sezione I-I' nord.

L'estensione della sezione I-I' ha reso necessaria ai fini della modellazione mediante il codice di calcolo QUAD4M la sua suddivisione in due sottosezioni, denominate I-I' nord e I-I' sud. Analogamente a quanto fatto per la sezione B-B', il "taglio" è stato collocato in un punto della sezione caratterizzato da una morfologia piuttosto regolare ed inoltre è stata introdotta un'ampia fascia di sovrapposizione, comune alle due sezioni, la cui estensione è pari a 300 m circa.

La sezione I-I', collocata nella porzione sud-occidentale dell'area di Barberino, è caratterizzata dalla presenza di uno spessore piuttosto cospicuo di materiale fluvio-lacustre (MGO1a1), al di sopra del quale, per brevi tratti, si rilevano depositi di materiale alluvionale di piccolo spessore, appartenenti all'Unità di Sagginale (SIV3), all'Unità di Luco di Mugello (SIV2) e all'Unità di Scarperia (SIV1). Il substrato è costituito dal membro pelitico-arenaceo della Formazione dell'Acquerino (AQR2). In questa sezione si nota la presenza della facies argillosa siltosa con intercalazioni ghiaiose dei depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello (MGO1a1_v), alla quale, in fase di modellazione sono state attribuite le medesime curve di decadimento e di smorzamento dell'unità MGO1a1, ma che è caratterizzata da valori sensibilmente più elevati sia del peso di volume γ che del modulo di taglio iniziale G_0 (Tabella 3.13).

Secondo la logica espressa nel Capitolo 2 ai fini della caratterizzazione sono stati utilizzati i risultati ottenuti dall'analisi dei dati del sondaggio S2, collocato in corrispondenza della sottosezione I-I' nord.

Tabella 3.13 – Caratteristiche degli strati individuati all'interno del modello della sezione I-I' nord.

Formazione	γ [kN/m ³]	ν [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	Curva di decadimento/ smorzamento
S1_AQR2 alt	23.00	0.43	1463	2.000	-
S2_MGO1a1_v	21.50	0.44	1168	2.358	altri campioni
S3_MGO1a1_v	21.50	0.41	1736	2.358	altri campioni
S4_MGO1a1	19.50	0.48	230	2.358	altri campioni
S5_MGO1a1	19.50	0.48	197	2.358	altri campioni
S6_MGO1a1	19.00	0.49	90	2.358	altri campioni
S7_MGO1a1	19.00	0.49	90	2.358	altri campioni
S8_MGO1a1	19.00	0.49	90	2.358	altri campioni
S9_MGO1a1	19.00	0.49	90	2.358	altri campioni
S10_MGO1a1	19.00	0.49	90	2.358	altri campioni
S11_MGO1a1	19.00	0.49	90	2.358	altri campioni
S12_MGO1a1	19.00	0.49	90	2.358	altri campioni
S13_MGO1a1 alt	17.95	0.47	36	2.358	altri campioni
S14_MGO1a1 alt	17.95	0.47	36	2.358	altri campioni
S15_MGO1a1 alt	17.95	0.47	36	2.358	altri campioni
S16_SIV	20.51	0.47	141	0.900	Rollins
S17_SIV	20.51	0.35	64	0.900	Rollins
S18_SIV	20.51	0.35	64	0.900	Rollins
S19_SIV	20.51	0.47	141	0.900	Rollins
S20_SIV	20.51	0.35	64	0.900	Rollins
S21_SIV	20.51	0.47	141	0.900	Rollins
S22_SIV	20.51	0.35	64	0.900	Rollins
S23_SIV	20.51	0.35	64	0.900	Rollins

3.2.13 Sezione I-I' sud

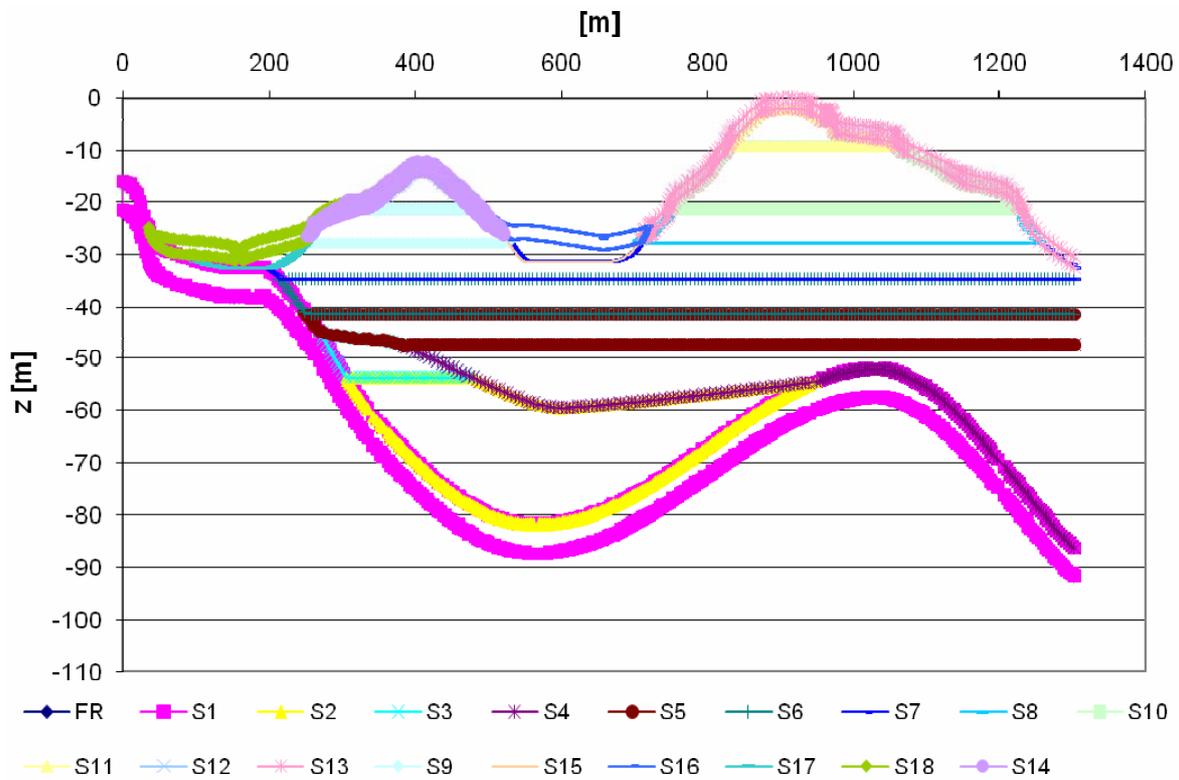


Figura 3.26 – Modello della Sezione I-I' sud.

Per quanto riguarda la sottosezione I-I' sud, la caratterizzazione dei litotipi presenti è stata realizzata facendo riferimento ai valori desunti dal sondaggio S9, posto in corrispondenza della sezione medesima. Ciò ha determinato, come vedremo nel Capitolo 4, dedicato all'analisi dei risultati della modellazione, una discrepanza nell'andamento medio del fattore di amplificazione in corrispondenza dell'area di sovrapposizione delle due sottosezioni. La ragione è quindi da ricercarsi proprio nel fatto che i due sondaggi S9 ed S2, sebbene vicini tra loro, hanno intercettato materiali con caratteristiche differenti, benché appartenenti alla stessa formazione, sostanzialmente a causa della diversità dell'ambiente di provenienza e di erosione. Considerando infatti la dispersione dei risultati relativi alla formazione MGO1a1, già sottolineata nel Paragrafo 2.2.4, questa è senza dubbio la motivazione più plausibile. Si esclude infatti la possibilità di eventuali errori nell'esecuzione dei sondaggi o nell'interpretazione dei risultati, poiché non sussiste nessun indizio che spinga a supportare questa tesi.

Tabella 3.14 – Caratteristiche degli strati individuati all'interno del modello della sezione I-I' sud.

Formazione	γ [kN/m ³]	ν [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	Curva di decadimento/ smorzamento
S1_AQR2 alt	23.00	0.41	1284	2.000	-
S2_MGO1a1_v	21.50	0.44	940	2.358	altri campioni
S3_MGO1a1_v	21.50	0.41	1736	2.358	altri campioni
S4_MGO1a1	18.50	0.44	582	2.358	altri campioni
S5_MGO1a1	18.50	0.44	582	2.358	altri campioni
S6_MGO1a1	18.50	0.45	500	2.358	altri campioni
S7_MGO1a1	17.59	0.47	266	2.358	altri campioni
S8_MGO1a1	19.15	0.49	148	2.358	altri campioni
S9_MGO1a1	19.15	0.49	148	2.358	altri campioni
S10_MGO1a1	17.95	0.47	73	2.358	altri campioni
S11_MGO1a1	17.95	0.47	73	2.358	altri campioni
S12_MGO1a1	17.95	0.47	73	2.358	altri campioni
S13_MGO1a1 alt	17.95	0.47	36	2.358	altri campioni
S14_MGO1a1 alt	17.95	0.47	36	2.358	altri campioni
S15_SIV	20.51	0.47	141	0.900	Rollins
S16_SIV	20.51	0.35	64	0.900	Rollins
S17_SIV	20.51	0.47	141	0.900	Rollins
S18_SIV	20.51	0.35	64	0.900	Rollins

3.2.14 Sezione L-L'

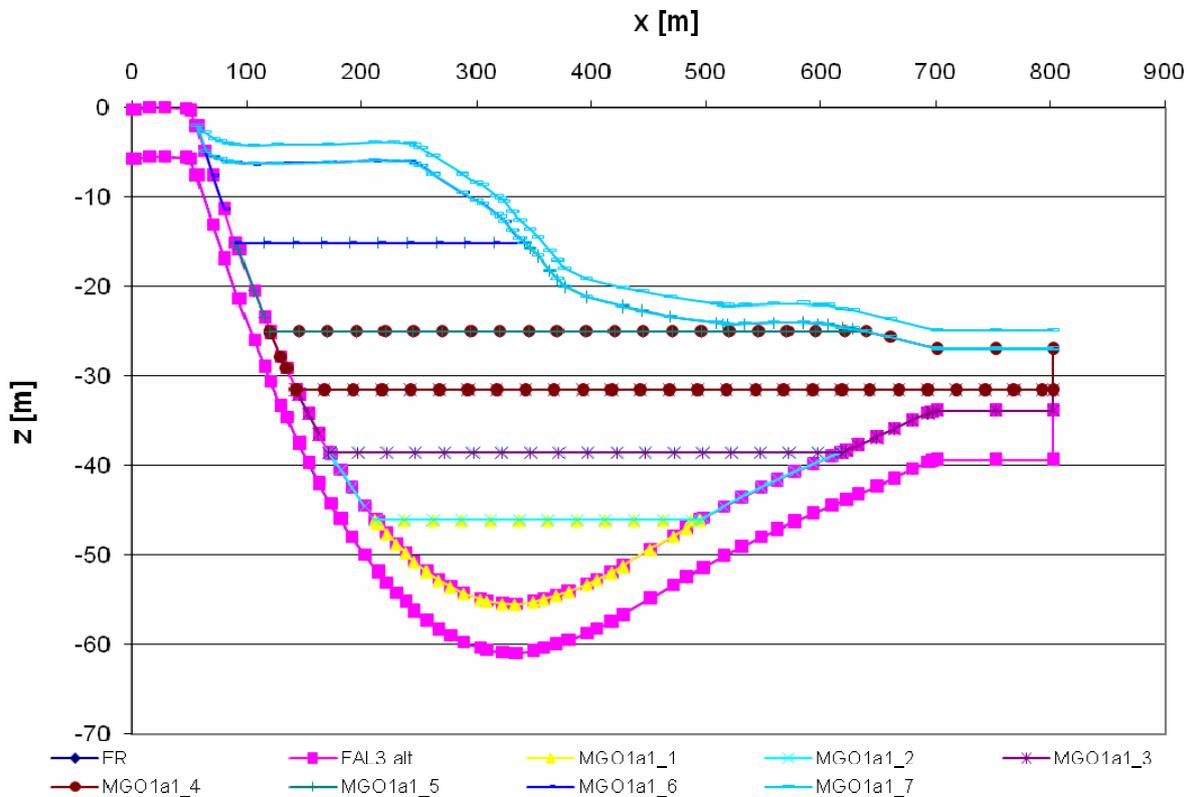


Figura 3.27 – Modello della Sezione L-L'.

La sezione L-L', posta nel settore sud-occidentale dell'area di Barberino, taglia quasi ortogonalmente la sezione I-I', ed è caratterizzata da un substrato profondo e da una copertura di materiale fluvio-lacustre. Il deposito raggiunge il suo spessore massimo, intorno ai 50 m, in corrispondenza della metà della sezione. La caratterizzazione in campo statico e dinamico, i cui parametri principali sono riassunti nella Tabella 3.15, è stata realizzata facendo riferimento ai valori desunti dal sondaggio S2.

Tabella 3.15 – Caratteristiche degli strati individuati all'interno del modello della sezione L-L'.

Formazione	γ [kN/m ³]	ν [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	Curva di decadimento/ smorzamento
FAL3 alt	23.00	0.41	1284	2.000	-
MGO1a1_1	19.00	0.48	90	2.358	altri campioni
MGO1a1_2	19.00	0.48	90	2.358	altri campioni
MGO1a1_3	19.00	0.48	90	2.358	altri campioni
MGO1a1_4	19.00	0.48	90	2.358	altri campioni
MGO1a1_5	19.00	0.48	90	2.358	altri campioni
MGO1a1_6	19.00	0.48	90	2.358	altri campioni
MGO1a1_7	17.95	0.47	15	2.358	altri campioni

3.2.15 Sezione N-N'

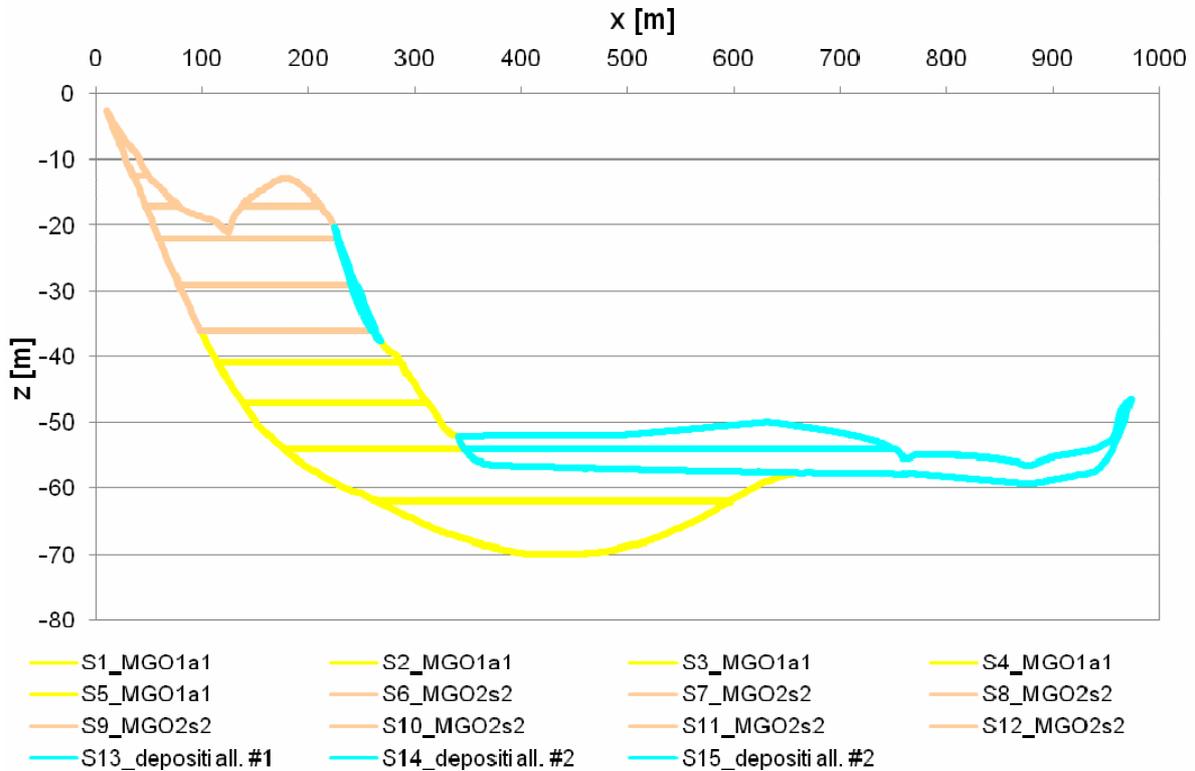


Figura 3.28 – Modello della Sezione N-N'.

La sezione N-N', collocata nell'area nord di Barberino, è costituita da uno spessore piuttosto cospicuo di materiale fluvio-lacustre, al di sopra del quale, prevalentemente nella parte nord-est, sono presenti depositi di materiale alluvionale, appartenenti all'Unità di Luco di Mugello (SIV2), all'Unità di Saggi-nale (SIV3) e in misura minore all'Unità di Scarperia (SIV1). Il substrato è costituito dal Membro peli-tico-arenaceo della Formazione dell'Acquerino (AQR2). In questa sezione si nota, oltre alla presenza della facies argillosa dei depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello (MGO1a1), anche quella della facies sabbiosa (MGO2s2), collocata nella zona ovest e presente in affioramento. Questa facies non è stata mai individuata nei sondaggi eseguiti a Barberino, benché molto numerosi, pertanto è stata car-atterizzata sulla base dell'analisi dei sondaggi eseguiti nell'ambito dei Programmi VEL e DOCUP presso l'area di Vicchio, più precisamente in località Capoluogo, come evidenziato anche nella Tabella 3.15.

Tabella 3.16 – Caratteristiche degli strati individuati all'interno del modello della sezione N-N'.

Formazione	γ [kN/m ³]	ν [-]	G_0 [MPa]	D_0 [%]	Curva di decadimento/ smorzamento
AQR	23.00	0.41	2735	-	-
S1_MGO1a1	18.00	0.44	775	2.525	altri campioni
S2_MGO1a1	18.00	0.45	487	2.525	altri campioni
S3_MGO1a1	18.00	0.47	272	2.525	altri campioni
S4_MGO1a1	18.00	0.49	139	2.525	altri campioni
S5_MGO1a1	18.00	0.49	139	2.525	altri campioni
S6_MGO2s2	19.77	0.46	913	5.660	Vicchio
S7_MGO2s2	19.77	0.46	913	5.660	Vicchio
S8_MGO2s2	19.77	0.46	913	5.660	Vicchio
S9_MGO2s2	19.77	0.46	913	5.660	Vicchio
S10_MGO2s2	19.77	0.48	307	5.660	Vicchio
S11_MGO2s2	19.77	0.42	234	5.660	Vicchio
S12_MGO2s2	19.77	0.46	913	5.660	Vicchio
S13_dep.all.#1	20.48	0.41	141	2.887	Rollins
S14_dep.all.#2	20.48	0.45	256	2.887	Rollins
S15_dep.all.#2	20.48	0.41	141	2.887	Rollins

4. Analisi dei risultati della modellazione

Dopo aver definito il moto sismico di riferimento e ricostruito il modello di sottosuolo come descritto nei capitoli precedenti, si è proceduto, per ciascuna delle sezioni esaminate, all'applicazione del modello bidimensionale sopra descritto.

Per elaborare le uscite di QUAD4M è stato utilizzato un post-processore appositamente messo a punto il quale fornisce due file di output: il primo riporta la sintesi dei parametri sismici e delle grandezze necessarie a caratterizzare il moto sismico (durata nominale, bracketed duration, durata di Trifunac e Brady, intensità di Arias, potenziale distruttivo, etc.), il secondo contiene i fattori di amplificazione ed è quello di maggiore interesse in questa fase.

A partire dai risultati così ottenuti, per ciascuna delle sezioni modellate, è stato determinato l'andamento del fattore di amplificazione prescelto ai fini della redazione della carta di microzonazione in funzione dei 5 input sismici impiegati. Successivamente è stato rappresentato in grafico l'andamento del fattore di amplificazione medio, ed è stata raffigurata, nello stesso grafico, la geometria della sezione esaminata, così da facilitare la lettura e l'interpretazione dei risultati.

Per fattore di amplificazione si intende in termini generali il rapporto tra un parametro relativo all'accelerogramma determinato in corrispondenza del piano di campagna e lo stesso parametro relativo all'accelerogramma di input. In linea teorica la scelta potrebbe ricadere su uno qualsiasi dei parametri rappresentativi dell'input sismico, tuttavia non tutte le scelte sono ugualmente significative.

Passiamo ora a definire nello specifico i fattori di amplificazione comunemente utilizzati.

FA ed FV:

Questi parametri sono stati per la prima volta introdotti in Italia dagli Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica, elaborati nel 2008 dal Gruppo di Lavoro per la MS per conto della Conferenza delle Regioni e delle Province autonome e del Dipartimento della protezione civile. Si tratta sostanzialmente dei rapporti tra i valori medi degli spettri di risposta in termini di pseudoaccelerazione S_A e di pseudovelocità S_V (con smorzamento $\xi = 0.05$) nell'intorno del periodo corrispondente alla massima ordinata dello spettro (TA o TV a seconda che ci si riferisca alla pseudoaccelerazione o alla pseudovelocità). TA e TV influiscono direttamente sull'ampiezza dell'intervallo di integrazione, come emerge dalle formule seguenti

$$SA_m = \frac{1}{TA} \int_{0,5 \cdot TA}^{1,5 \cdot TA} S_A(T) dT$$

$$SV_m = \frac{1}{0,4 \cdot TV} \int_{0,8 \cdot TV}^{1,2 \cdot TV} S_V(T) dT$$

Nella seconda relazione l'intervallo di integrazione è più ridotto perché solitamente l'andamento dello spettro in pseudovelocità risulta essere più regolare.

I due parametri si definiscono quindi come

$$FA = \frac{SA_{m,s}}{SA_{m,i}} = \frac{\frac{1}{TA_s} \int_{0,5 \cdot TA_s}^{1,5 \cdot TA_s} S_{A,s}(T) dT}{\frac{1}{TA_i} \int_{0,5 \cdot TA_i}^{1,5 \cdot TA_i} S_{A,i}(T) dT}$$

$$FV = \frac{SV_{m,s}}{SV_{m,i}} = \frac{\frac{1}{0,4 \cdot TV_s} \int_{0,8 \cdot TV_s}^{1,2 \cdot TV_s} S_{V,s}(T) dT}{\frac{1}{0,4 \cdot TV_i} \int_{0,8 \cdot TV_i}^{1,2 \cdot TV_i} S_{V,i}(T) dT}$$

I pedici s ed i fanno riferimento rispettivamente al segnale in superficie (ottenuto dall'analisi della risposta sismica locale) e al segnale di input.

Il primo è assunto come rappresentativo per le strutture più rigide (in muratura o con un limitato numero di piani), sensibili alle alte frequenze (ovvero a basso periodo proprio), mentre il secondo è più appropriato per le strutture flessibili, sensibili alle basse frequenze (ovvero ad alto periodo proprio).

In ambiente scientifico tuttavia sono state rilevate alcune problematiche legate all'utilizzo di tali definizioni. Le più significative sono ad esempio l'eccessiva dipendenza di FA ed FV dall'input sismico, la difficoltà di definizione dell'intervallo di integrazione dello spettro, legata alla complessa individuazione dei periodi TA e TV di massimo valore degli spettri, ed infine la variabilità nell'andamento di FA ed FV anche in condizioni litostratigrafiche regolari.

FPGA:

Il fattore di amplificazione più semplice ed immediato è FPGA, definito come rapporto tra le ordinate massime in valore assoluto dell'accelerogramma calcolato in superficie $a_{\max,s}$ e dell'accelerogramma di input $a_{\max,i}$, ovvero come

$$FPGA = \frac{a_{\max,s}}{a_{\max,i}}$$

La semplicità nella sua determinazione lo ha reso nel tempo il più usato, tuttavia il limite di questo approccio è evidente, poiché il solo picco di accelerazione è scarsamente rappresentativo della forma dell'accelerogramma, della sua frequenza e della durata e delle modificazioni da esso subite nell'attraversamento del deposito.

FHv:

Il fattore di amplificazione FHv è definito come il rapporto tra le intensità spettrali SI di Housner calcolate sugli spettri di risposta in pseudovelocità (con smorzamento $\xi = 0.05$) relativi al moto in superficie e al moto di input.

Rispetto alla proposta iniziale di Housner, che contemplava l'adozione di uno spettro di risposta relativo ad un rapporto di smorzamento $\xi = 0.02$ ed un intervallo di integrazione di T compreso tra 0.1 e 2.5 s, il parametro analogo attualmente e comunemente utilizzato fa riferimento ad un rapporto di smorzamento $\xi = 0.05$ e a due distinti intervalli di periodo, in funzione delle diverse tipologie di edifici. Il primo intervallo è compreso tra 0.1 e 0.5 s, il secondo tra 0.5 e 1.0 s. È importante sottolineare che nel caso contingente della microzonazione dei Comuni toscani maggiormente esposti al rischio sismico, il territorio è caratterizzato dalla presenza di strutture con periodi propri limitati, pertanto l'adozione di due differenti intervalli di integrazione consente di ricavare un valore del fattore di amplificazione relativo allo specifico campo di interesse, che in questo caso è costituito dalla prima delle espressioni seguenti:

$$FHv_{(0,1\div 0,5)} = \frac{SI_{(0,1\div 0,5),s}}{SI_{(0,1\div 0,5),i}}$$

$$FHv_{(0,5\div 1,0)} = \frac{SI_{(0,5\div 1,0),s}}{SI_{(0,5\div 1,0),i}}$$

dove $SI_{(0,1\div 0,5)}$ e $SI_{(0,5\div 1,0)}$ sono definiti rispettivamente come

$$SI_{(0,1\div 0,5)} = \int_{0,1}^{0,5} S_V(\xi, T) dT$$

$$SI_{(0,5\div 1,0)} = \int_{0,5}^{1,0} S_V(\xi, T) dT$$

FHa:

Recentemente è stato introdotto un nuovo parametro di amplificazione, analogo all’FHv, ma che si differenzia dal precedente per l’utilizzo degli spettri di risposta in pseudoaccelerazione del moto sismico in superficie e di quello di input.

L’adozione di fattori di amplificazione che fanno riferimento a grandezze integrali calcolate su intervalli del periodo ben definiti permette di ovviare ai problemi di instabilità e inaffidabilità dei risultati, frutto della variabilità degli estremi di integrazione, e alla forte dipendenza dalle caratteristiche del segnale di input, che sono invece significativi per FA ed FV.

Anche in questo caso gli intervalli di integrazione sono due, il primo significativo per le strutture più rigide, a basso periodo proprio, il secondo per le strutture più flessibili, ad elevato periodo proprio, e sono definiti secondo le espressioni:

$$FHa_{(0,1\div 0,5)} = \frac{\int_{0,1}^{0,5} S_{A,s}(\xi, T) dT}{\int_{0,1}^{0,5} S_{A,i}(\xi, T) dT}$$

$$FHa_{(0,5\div 1,0)} = \frac{\int_{0,5}^{1,0} S_{A,s}(\xi, T) dT}{\int_{0,5}^{1,0} S_{A,i}(\xi, T) dT}$$

Sulla base delle analisi condotte per la valutazione della risposta sismica locale del sito in esame, sembra ragionevole suggerire l'adozione del parametro $FH_{a(0,1+0,5)}$ quale fattore di amplificazione più idoneo ai fini della redazione della carta di microzonazione sismica. In linea generale infatti la scelta del fattore di amplificazione deve essere fondata sul rispetto dei seguenti requisiti:

- *Significatività rispetto alle caratteristiche del patrimonio edilizio presente nell'area;*
- *Regolarità dell'andamento in corrispondenza di condizioni litostratigrafiche omogenee;*
- *Capacità di contenere la maggior quantità possibile di informazioni sul segnale sismico;*
- *Stabilità dell'andamento al variare dell'input sismico;*
- *Capacità di consentire una stima immediata dell'entità dell'azione sismica.*

Date le caratteristiche del patrimonio edilizio presente nell'area in esame, contraddistinto dalla presenza di costruzioni ad elevata rigidità, in muratura o in cemento armato e a basso numero di piani, i fattori più significativi sono quelli caratteristici dei bassi periodi; è corretto quindi assumere come intervallo di periodo 0.1-0.5 s e scartare conseguentemente i fattori relativi agli alti periodi. Esistono poi motivi fondati di esclusione sia per l'FPGA che per l'FA, i quali non riescono a offrire garanzie sufficienti di stabilità ed affidabilità. Per quanto riguarda invece l' $FH_{v(0,1+0,5)}$ non esistono ragioni di esclusione specifiche, se non la considerazione che nella progettazione la definizione dell'azione sismica viene fatta a partire dallo spettro di risposta in pseudoaccelerazione e non in pseudovelocità.

Nelle figure seguenti, dalla 4.1 alla 4.13, sono sintetizzati i risultati delle analisi numeriche eseguite sulle sezioni descritte in dettaglio nel Capitolo 3. In particolare, oltre allo schema geologico della sezione (fornito dal CRPS e rappresentato nella parte inferiore di ciascuna figura) è riportato l'andamento del fattore FH_a in superficie, calcolato nell'intervallo di periodi 0.1-0.5 s, e ricavato come valore medio delle elaborazioni effettuate analizzando i 5 accelerogrammi di input selezionati (v. Capitolo 1).

La Figura 4.1 mostra lungo il profilo della sezione A-A' un'amplificazione significativa fino a valori pari a 2.2 in corrispondenza del centro del bacino, dove si rileva un incremento dello spessore della copertura di materiale fluvio-lacustre (MGO1a1) e dove conseguentemente si ha una concentrazione degli effetti di valle e di bordo.

Valori elevati dell'amplificazione ($FH_a > 1.5$) si osservano tra la progressiva a 120 m e quella a 530 m circa, rispetto all'origine posta in corrispondenza dell'estremo sinistro della sezione; si nota invece una minima amplificazione ($FH_a \approx 1.1$) in corrispondenza dell'area in cui il bedrock è sub-affiorante e l'unica copertura è costituita da uno strato di pochi metri di depositi fluviali (SIV), ovvero oltre la progressiva 670 m circa.

Barberino di Mugello, località Capoluogo - SEZIONE A-A'

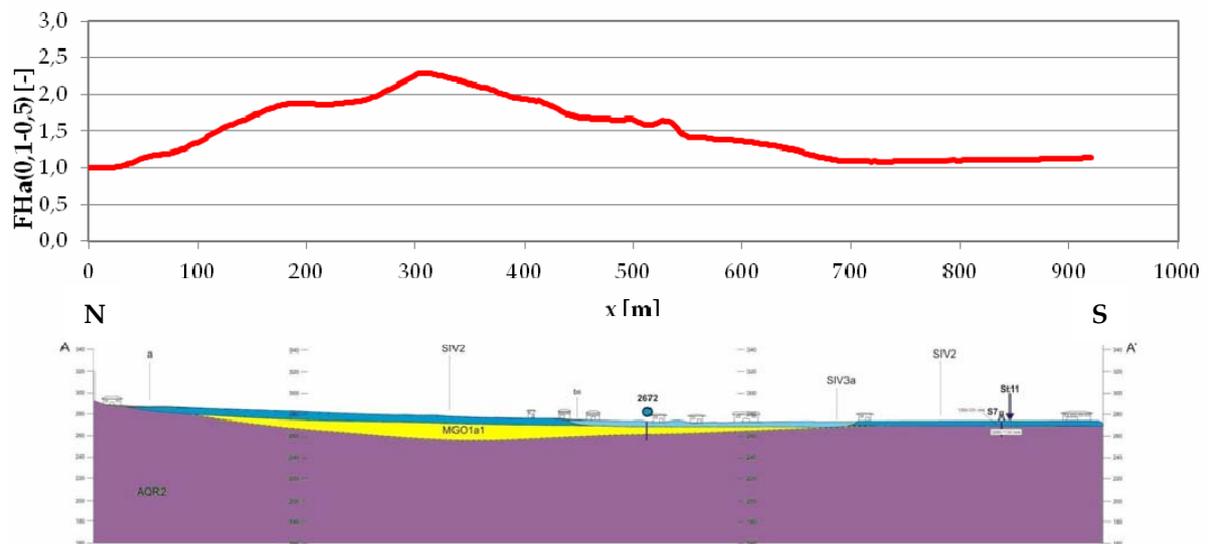


Figura 4.1 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FH_a(0.1-0.5)$ per la sezione A-A', Barberino Capoluogo.

Lungo la sezione A''-A''' (Figura 4.2) l'andamento del fattore di amplificazione $FH_{a(0.1-0.5)}$, mediato sui 5 input sismici, mostra marcati fenomeni di amplificazione in corrispondenza del centro di entrambe le paleovalli, dove, analogamente a quanto avviene nella sezione A-A' precedentemente esaminata, si concentrano sia gli effetti di bordo sia gli effetti di valle.

In particolare in corrispondenza dell'estremo sinistro della sezione i valori di FH_a sono inferiori a 1 per un tratto molto limitato (fino alla progressiva 40 m circa) in prossimità del fianco molto acclive del bacino. Risalgono poi rapidamente, in conseguenza di fenomeni di focalizzazione, nei 50 m successivi, fino a raggiungere un massimo elevato ($FH_a > 2.5$) in prossimità della progressiva 100 m, oltre la quale l'amplificazione si riduce, mantenendo comunque valori compresi tra 1.5 e 2 fino all'estremo destro (progressiva 550 m circa). Anche nella paleovalle meno profonda i valori di FH_a sono più contenuti, anche se comunque elevati, con valori intorno a 2 in prossimità della progressiva 900 m, dove si sommano gli effetti legati allo spessore del deposito agli effetti di focalizzazione indotti dall'inclinazione elevata del fianco del bacino. Nel tratto compreso tra le due paleovalli, in corrispondenza della risalita in superficie del bedrock, i fenomeni amplificativi invece si riducono, pur rimanendo significativi (il valore minimo di FH_a si ha in corrispondenza della progressiva a 620 m ed è pari a 1.45).

Un altro aspetto da sottolineare riguarda la diminuzione repentina dei valori di amplificazione in corrispondenza del torrente Stura, intorno alla progressiva a 400 m, dove, venendo a mancare la copertura costituita dallo strato di depositi fluviali e eluvio-colluviali poggianti sui depositi fluvio-lacustri, viene meno anche l'effetto amplificativo stratigrafico.

Nella zona meridionale della sezione, dove il bedrock è superficiale e coperto da uno strato di limitato spessore di depositi fluviali (SIV), si osservano effetti amplificativi contenuti ($FH_a < 1.5$ oltre la progressiva 1140 m circa).

Barberino di Mugello, località Capoluogo - SEZIONE A''-A'''

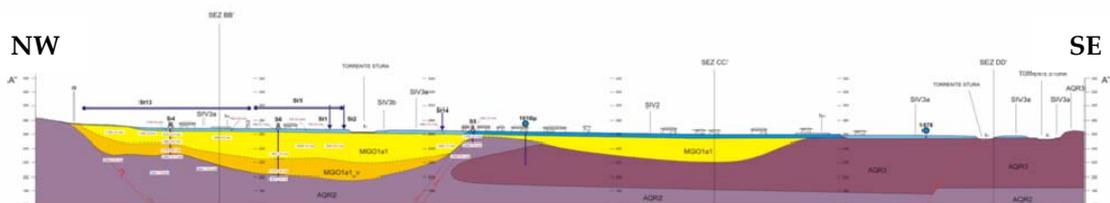
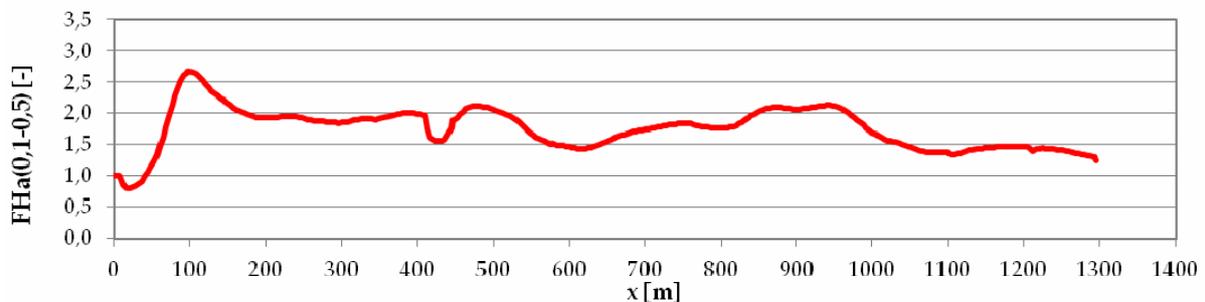


Figura 4.2 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FH_{a(0.1-0.5)}$ per la sezione A''-A''', Barberino Capoluogo.

La sezione B-B' è molto simile, sia nella morfologia che nella topografia, alla sezione A"-A'" precedentemente analizzata. Anche i materiali presenti sono gli stessi, di conseguenza la modellazione ha prodotto risultati analoghi.

I valori maggiori del fattore di amplificazione FH_a (con massimi intorno a 2 e imputabili a fenomeni di focalizzazione) sono raggiunti alla distanza di circa 100 m dalle sponde delle due paleovalli e non al centro, come avviene invece nella sezione precedente, poiché la morfologia dei due sub-bacini è tale da determinare nella zona centrale una situazione "monodimensionale". In questo caso infatti gli effetti stratigrafici predominano su quelli di bordo, che invece tornano ad essere significativi in prossimità delle zone di sponda.

Nel tratto di separazione tra le due paleovalli, dal momento che lo spessore della copertura di materiale fluvio-lacustre resta comunque significativo, la presenza di un substrato più vicino al piano campagna determina comunque una diminuzione di FH_a , ma meno marcata rispetto a quanto accade per la sezione A"-A'".

Inoltre, come già evidenziato per la sezione A"-A'", si osserva una riduzione del fattore di amplificazione considerato, in corrispondenza dei torrenti presenti all'interno dell'area in esame ed intercettati dalla sezione.

Barberino di Mugello, località Capoluogo - SEZIONE B-B'

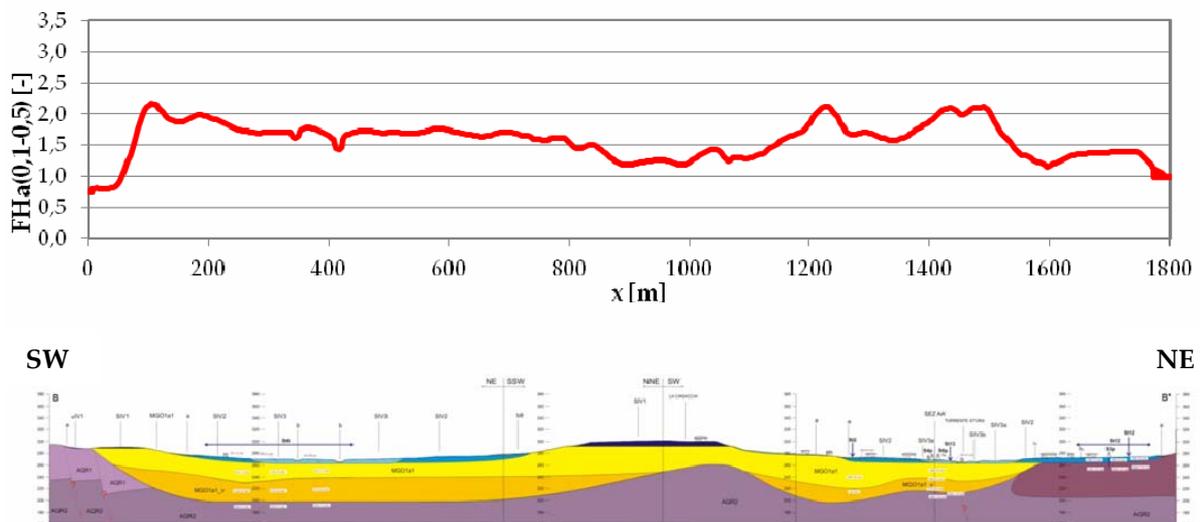


Figura 4.3 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FH_a(0.1-0.5)$ per la sezione B-B', Barberino Capoluogo.

Anche per la sezione C-C' nord la morfologia sepolta rivela la presenza di un bacino costituito da materiale fluvio-lacustre (MGO1a1), coperto nella parte sud-occidentale della sezione da un sottile strato di depositi fluviali e eluvio-colluviali. In questo settore il fianco del bacino ha una pendenza limitata e si osserva una diminuzione progressiva della copertura fluvio-lacustre con bedrock praticamente sub-affiorante. Il valore massimo di FH_a, pari a circa 1.8, si ha in corrispondenza della progressiva 200 m e tra la 150 m e la 350 m si osservano valori di FH_a superiori a 1.5.

In corrispondenza dell'estremità nord orientale il fianco del bacino è caratterizzato invece da una elevata pendenza e conseguentemente lo spessore dei depositi fluvio-lacustri è piuttosto elevato (lo spessore massimo è di circa 60 m). In prossimità della progressiva 750 m circa, FH_a raggiunge il valore massimo per l'intera sezione, pari circa a 2.

L'analogia con le sezioni precedentemente trattate è evidente e dunque si ripetono le stesse osservazioni già espresse a commento di tali sezioni.

Come per le sezioni precedenti i valori più elevati del fattore di amplificazione si riscontrano in prossimità delle sponde del sub-bacino, dove gli effetti stratigrafici si sommano a quelli di bordo mentre nella parte centrale i valori di FH_a sono più limitati (nel caso specifico tra le progressive 35 m e 600 m si osservano valori inferiori a 1.5); al contrario i valori di FH_a si riducono laddove il bedrock è pressoché affiorante.

Barberino di Mugello, località Capoluogo - SEZIONE C-C' nord

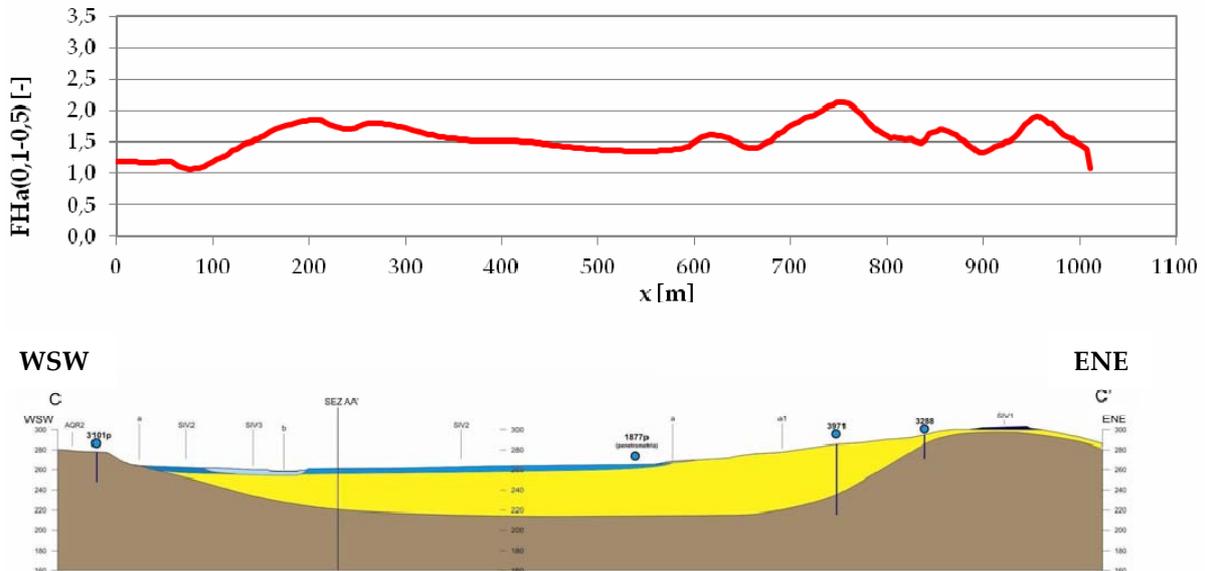


Figura 4.4 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FH_{a(0.1-0.5)}$ per la sezione C-C' parte nord, Barberino Capoluogo.

Anche per il settore sud-occidentale della sezione C-C', la presenza di una discontinuità sub-verticale nel substrato ha richiesto l'esecuzione di un numero doppio di analisi, che sono state svolte assumendo separatamente l'una o l'altra formazione di base.

La sezione esaminata presenta un andamento del fattore di amplificazione di tipo analogo per le due paleovalli; per ciascuna di esse si osserva infatti un andamento approssimativamente costante lungo tutta l'estensione della conca, variabile tra 2 e 2.5. La maggiore amplificazione è imputabile senza dubbio a fenomeni di focalizzazione delle onde sismiche, dovuti alla morfologia del contatto tra il deposito ed il substrato e si verifica sui fianchi delle due paleovalli in prossimità della zona di separazione tra i due bacini, dove il substrato risale. È opportuno osservare come il materiale appartenente alla Formazione di Sillano si comporti in questo contesto specifico alla pari di un materiale con minore rigidità, poiché l'entità dell'amplificazione è sostanzialmente confrontabile per le due paleovalli, delle quali la sud-occidentale interpone tra il materiale fluvio-lacustre e le Arenarie del Falterona uno strato consistente di Sillano.

La risalita delle Arenarie del Falterona verso la superficie, che sancisce la divisione dei due sub-bacini e la separazione tra la valle della Sieve e quella del Torrente Lora, costituisce invece una zona di bassa amplificazione, nonostante il forte contrasto di impedenza fra le Arenarie del Falterona e i depositi alluvionali superficiali. Il motivo può essere attribuito al limitato spessore della copertura, che qui è di poco superiore a 5 m. Il segnale sismico non "sente" la presenza dello strato di depositi alluvionali, la cui dimensione è di gran lunga inferiore alla sua lunghezza d'onda, e passa indisturbato attraverso di esso; la situazione è dunque analoga a quella di affioramento roccioso.

Un altro aspetto da sottolineare è che la presenza del sistema di faglie dirette, collocate in più settori della sezione, non determina alcun risentimento in superficie.

È inoltre da notare che gli strati con presenza di materiale organico non sembrano in questo caso avere alcun effetto sul fattore di amplificazione, probabilmente per i limitati spessori e le notevoli coperture, che ne smorzano le eventuali modifiche sul segnale.

Per quanto riguarda le differenze negli andamenti di $FHa_{(0.1-0.5)}$ ottenuti assegnando al substrato le caratteristiche delle Arenarie del Falterona o della Formazione dell'Acquerino, si osserva che esse non sono troppo marcate e gli andamenti tendono ad avvicinarsi quando la profondità del substrato diminuisce.

Il punto d'inizio della risalita del substrato e quello in cui le lenti di materiale organico raggiungono uno spessore tale da determinare sensibili cambiamenti nel segnale sismico si trovano all'incirca in corrispondenza della stessa ascissa, che è quella a partire dalla quale gli andamenti di FHa relativi ai due diversi substrati si avvicinano. Approssimativamente nella stessa posizione si trova anche la piccola scarpata che separa sulla superficie topografica l'Unità di Sagginale dall'Unità di Luco di Mugello, e che determina una leggera variazione nei valori del parametro amplificativo. È in corrispondenza di tale variazione, circa 250 m a NE del punto in cui la discontinuità fra le Arenarie del Falterona e la Formazione dell'Acquerino intercetta la base del deposito (intorno alla progressiva 1320 m), che è stato identificato il limite della settentrionale della zona di transizione. Definire un limite meridionale per la zona di transizione non ha senso, visto che, all'interno di essa, si segue senza soluzione di continuità l'andamento ottenuto per il Membro di Montalto, più cautelativo. A SW di tale posizione si assumeranno i valori ottenuti tramite le analisi eseguite assegnando al substrato le caratteristiche delle Arenarie del Falterona, a NE si assumeranno i valori ottenuti tramite le analisi eseguite assegnando al substrato le caratteristiche della Formazione dell'Acquerino.

Barberino di Mugello, località Capoluogo - SEZIONE C-C', parte sud

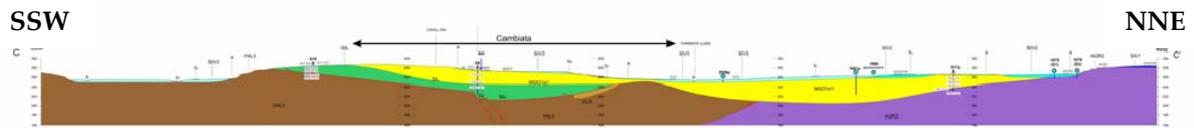
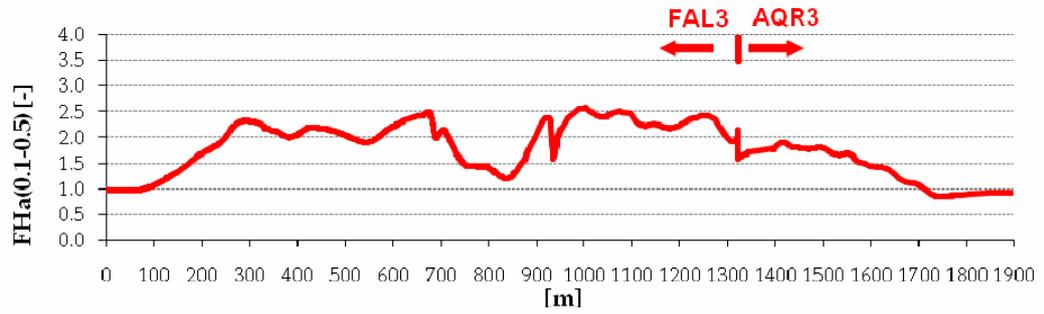


Figura 4.5 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FH_a(0.1-0.5)$ per la sezione C-C' parte sud, Barberino Capoluogo.

La sezione D-D' è caratterizzata, come già detto, da una discontinuità nel substrato roccioso, che ne differenzia la porzione meridionale, in cui esso è costituito dalle Arenarie del Falterona, dalla rimanente porzione, in cui esso è rappresentato dal Membro pelitico della Formazione dell'Acquerino. Poiché nel modello numerico è possibile assegnare un unico tipo di substrato, le analisi sono state condotte assumendo separatamente la presenza dell'una o dell'altra formazione. I risultati ottenuti hanno evidenziato che il comportamento della sezione a fronte delle due modellazioni è sostanzialmente analogo, indipendentemente dalle caratteristiche assegnate al substrato.

La situazione è quasi monodimensionale per quanto riguarda i bassi periodi, corrispondenti a lunghezze d'onda del segnale molto inferiori alle dimensioni orizzontali della conca. Inoltre, vista la profondità del deposito, il suo periodo proprio risulta piuttosto elevato, lontano dall'intervallo nel quale viene calcolato il fattore $FHa_{(0.1-0.5)}$. Esso, dunque, non solo non registra variazioni sostanziali per quasi tutta la lunghezza della sezione, rimanendo all'incirca costante, ma assume valori prossimi all'unità, perché le caratteristiche del deposito sono tali da non determinare alcuna sensibile amplificazione, anche grazie alla presenza dello strato di ghiaie di base (MGO1a1_v) che riduce il contrasto di impedenza tra deposito e bedrock. Anche gli effetti di focalizzazione sono modesti, visto che il substrato non presenta variazioni di quota repentine e il contrasto di impedenza tra il fluvio-lacustre e la Formazione dell'Acquerino non è particolarmente elevato.

La situazione è diversa all'estremità sud-occidentale della sezione, dove la copertura dei depositi fluvio-lacustri e sedimentari è piuttosto ridotta e i valori di $FHa_{(0.1-0.5)}$ sono più elevati, anche se comunque contenuti, con un massimo prossimo a 2 intorno alla progressiva 300 m. Qui è più evidente anche l'effetto della diversa natura del substrato, cui consegue un diverso contrasto di impedenza: il fattore di amplificazione attinge valori maggiori quando il substrato ha le caratteristiche delle Arenarie del Falterona rispetto a quando il substrato possiede le caratteristiche della Formazione dell'Acquerino, caratterizzato da V_s inferiori rispetto al precedente. D'altra parte in questa zona, vista la distanza del contatto litologico fra le due unità e la morfologia del substrato (che qui è superficiale e pressoché pianeggiante e soltanto dopo tende ad immergersi), si può affermare che l'unica formazione di base che influisce sul moto in superficie è quella che si trova effettivamente al di sotto del deposito, ovvero le Arenarie del Falterona.

Poiché $FHa_{(0.1-0.5)}$ non presenta grandi differenze fra l'assunzione per il substrato delle caratteristiche delle Arenarie del Falterona e l'assegnazione delle proprietà della Formazione dell'Acquerino, sono state ridotte al minimo le dimensioni della zona di transizione. All'interno di quest'ultima, sono stati adottati i valori più cautelativi, ovvero quelli relativi alle Arenarie del Falterona; a SW e a NE di essa, ovviamente, sono stati assunti rispettivamente i dati relativi alle Arenarie del Falterona e alla Formazione dell'Acquerino. Il limite settentrionale di tale zona (definire un limite meridionale non ha senso, visto che si segue senza soluzione di continuità l'andamento ottenuto per il Membro di Montalto) è stato posto a circa 100 m dall'intersezione della discontinuità litologica con la base del deposito (progressiva 600 m), quando si può ritenere pressoché concluso il tratto a maggior pendenza del substrato, e l'influenza dei bordi comincia a diventare meno importante rispetto quella della stratigrafia e della geometria del deposito.

Barberino di Mugello, località Capoluogo - SEZIONE D-D'

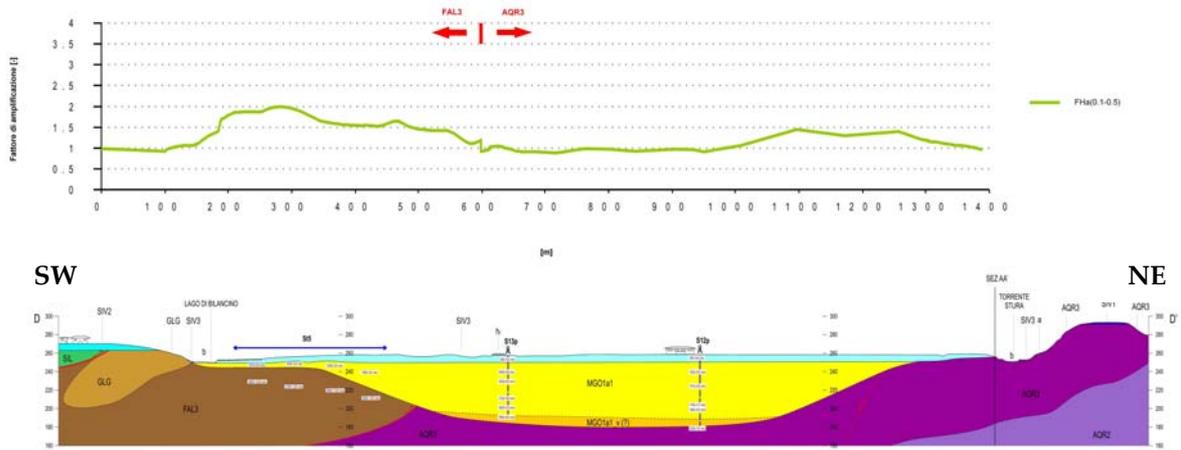


Figura 4.6 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FHa(0.1-0.5)$ per la sezione D-D', Barberino Capoluogo.

Lungo la sezione E-E' possono essere identificati tre tratti: la parte meridionale (lato SSW), nella quale il substrato è coperto soltanto da qualche metro di depositi alluvionali recenti; una zona "di transizione", in cui il tetto delle Arenarie del Falterona si approfondisce piuttosto velocemente, ed in cui, contemporaneamente, sul piano di campagna si trova il letto del Fiume Sieve; la parte centro-settentrionale (lato NNE), con un substrato prima profondo, quindi in dolce risalita, nella quale la superficie topografica presenta leggere ondulazioni che fungono da spartiacque fra la Sieve e il Fosso di Visano.

Si nota subito la dualità fra i risultati relativi alla parte meridionale (substrato superficiale) e alla parte centro-settentrionale (substrato profondo). Considerando una situazione monodimensionale, è noto che il periodo proprio di un deposito aumenta all'aumentare dello spessore. Dato che le frequenze maggiormente amplificate sono quelle prossime a quella propria del deposito, risulta evidente che nel primo caso saranno amplificate le alte frequenze (cioè i bassi periodi), nel secondo le basse frequenze (cioè gli alti periodi). $FHa_{(0.1-0.5)}$ infatti registra valori maggiori proprio nella zona meridionale, nella quale il deposito, avendo un basso periodo fondamentale, tende ad amplificare maggiormente le componenti a maggior frequenza del segnale sismico.

Nella zona centro-settentrionale, l'inclinazione dei bordi (in particolare di quello settentrionale) della paleovalle non è molto elevata, e quindi i fenomeni di focalizzazione risultano contenuti, mentre prevalgono gli effetti stratigrafici, con valori del fattore FHa complessivamente contenuti (il massimo, di poco superiore a 1.5, si ha in corrispondenza della progressiva 780 m). Al contrario, la zona in corrispondenza del corso della Sieve registra valori elevati dell'amplificazione con un massimo di FHa superiore a 3 (intorno alla progressiva 250 m): ciò potrebbe essere una conseguenza degli effetti di bordo, ovvero della focalizzazione delle onde sismiche determinata dalla risalita abbastanza rapida del substrato, che si sommano agli effetti topografici dovuti alla discontinuità rappresentata nell'andamento del piano di campagna dal letto della Sieve: si possono notare, infatti, i picchi in corrispondenza delle sponde del fiume, come accade alla sommità dei rilievi. Inoltre, sempre in corrispondenza del corso della Sieve, i depositi alluvionali vengono a trovarsi in contatto con lo strato a maggiore rigidità dei depositi fluvio-lacustri. Il contrasto di impedenza (tra l'altro in prossimità della superficie) fra questi due livelli sedimentari potrebbe essere anch'esso in parte responsabile degli alti valori del fattore di amplificazione rilevati in questa porzione della sezione.

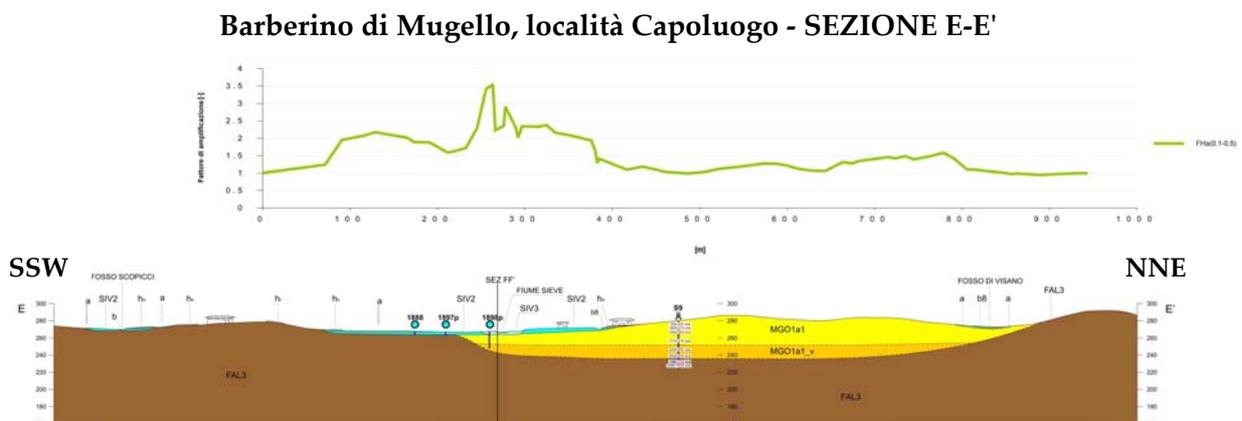


Figura 4.7 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FHa_{(0.1-0.5)}$ per la sezione E-E', Barberino Capoluogo.

Caratteristica propria della sezione F-F' è la presenza, nella parte centrale, di una paleovalle sepolta di profondità elevata rispetto alla sua larghezza. Una tale morfologia tende evidentemente ad amplificare gli effetti di bordo e di valle, ed infatti il fattore di amplificazione registra in questa zona il valore massimo. Ancora una volta, nel tratto di sezione in cui gli effetti di bordo sono massimi (FHa supera il valore 2 tra le progressive 720 m e 820 m), si ha anche il letto del Fiume Sieve; situazione opposta si ha in presenza del Fosso Scopici, all'estremità meridionale della sezione, dove l'irregolarità topografica è di piccole dimensioni.

Al centro della paleovalle situata sul lato NW si osserva che il fattore di amplificazione è pressoché costante e pari a 1.5, in prossimità del fianco NW, e fino ad una distanza di circa 100 m da questo, FHa attinge valori superiori a 1.5 con un massimo pari a 2 in corrispondenza della progressiva 220 m.

Per quanto riguarda invece l'ampia paleovalle all'estremità SE si riscontra una significativa amplificazione dovuta all'aumento del periodo proprio del deposito, ma non si evidenziano particolari effetti di focalizzazione.

Nella zona di separazione tra le due paleovalle, dove il substrato risale in prossimità della superficie (intorno alla progressiva 850 m) si osserva una riduzione di FHa: ciò può essere imputato al fatto che la lunghezza d'onda di tutte le componenti principali degli accelerogrammi è tale che il moto sismico non risente della sottile copertura dei depositi, per cui la situazione non differisce molto da quella di affioramento roccioso. Così, il fattore di amplificazione non si discosta sostanzialmente dal valore unitario, così come accade in assenza di copertura sedimentaria.

Barberino di Mugello, località Capoluogo - SEZIONE F-F'

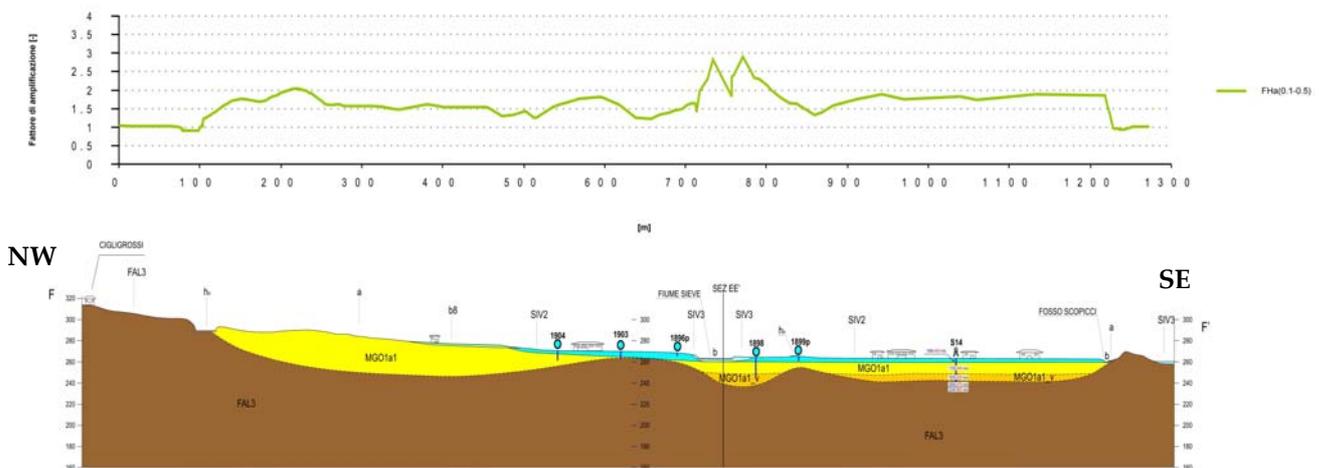


Figura 4.8 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FH_{a(0.1-0.5)}$ per la sezione F-F', Barberino Capoluogo.

L'andamento del fattore di amplificazione nel caso della sezione G-G' si presenta piuttosto articolato. Premesso che l'irregolarità presente nel tratto iniziale (fino alla progressiva 200 m) è probabilmente imputabile a fenomeni di smorzamento di radiazione presenti lungo la frontiera laterale, si individua comunque una prima zona di picco (con valori superiori a 1.5 tra le progressive 220 m e 420 m) in corrispondenza del bordo occidentale del sub-bacino, legata alla focalizzazione delle onde sismiche oltre che agli effetti di amplificazione stratigrafica. Proseguendo verso nord-est si osserva quindi una diminuzione del fattore di amplificazione, il quale si assesta su valori prossimi all'unità fino circa a metà del bacino, salvo registrare una significativa amplificazione ($FH_a \geq 1.5$) in corrispondenza del breve tratto in cui il deposito fluvio-lacustre è sovrastato dalle alluvioni recenti (a) e dai depositi fluviali dell'Unità di Scarperia (SIV1). Nella zona in cui si nota la presenza di una marcata e repentina irregolarità del profilo topografico, si riscontra addirittura un fenomeno di de-amplificazione del segnale sismico in ingresso al sito. Nella parte nord-est del sub-bacino si manifesta un fenomeno di focalizzazione simile a quello che ha luogo all'estremo opposto, che determina un incremento del fattore di amplificazione, seppure di piccola entità (valore massimo di FH_a intorno a 1.3 in corrispondenza della progressiva 1550 m).

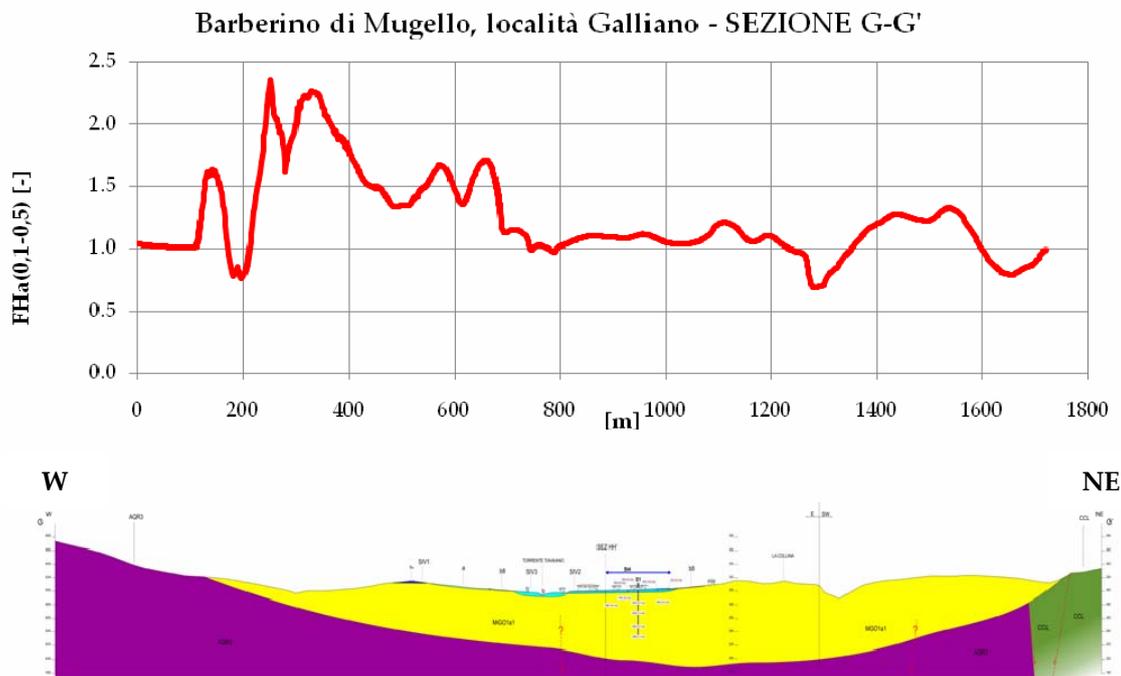


Figura 4.9 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FH_a(0.1-0.5)$ per la sezione G-G', Galliano.

Nel caso della sezione H-H' si osserva la presenza di un'unica zona di amplificazione, dove tuttavia il valore massimo raggiunto dal fattore $FHa(0.1-0.5)$ si colloca intorno a 1.5, quindi risulta essere piuttosto contenuto. La causa è imputabile a fenomeni di focalizzazione legati alla risalita del substrato, dunque si tratta di un tipico effetto di bordo. Procedendo in direzione sud, dato l'incremento progressivo dello spessore del deposito di materiale fluvio-lacustre, si riscontra una diminuzione del fattore di amplificazione e, a partire dalla traccia dell'intersezione con la sezione G-G' (in corrispondenza della progressiva 600 m), si nota una de-amplificazione del segnale sismico in ingresso al sito, imputabile alla elevata profondità del bedrock (spessore massimo pari a circa 115 m nell'estremo sud della sezione esaminata). Nella parte nord della sezione, dove il substrato è ricoperto solo da un sottile strato di depositi fluviali e eluvio-colluviali, il fattore di amplificazione praticamente non si discosta dal valore unitario, poiché, nonostante il notevole contrasto di impedenza tra i due materiali, lo spessore del deposito è così contenuto che non ci si discosta praticamente dalla situazione di bedrock affiorante. A sud del corso del Torrente Tavaiano, si rileva un brevissimo tratto di de-amplificazione, legato alla presenza dei litotipi appartenenti all'Unità Ofiolitica (SIL e OFI), i quali sono caratterizzati da valori di rigidità più elevati rispetto a quelli dei depositi fluvio-lacustri e ancor più dei depositi alluvionali.

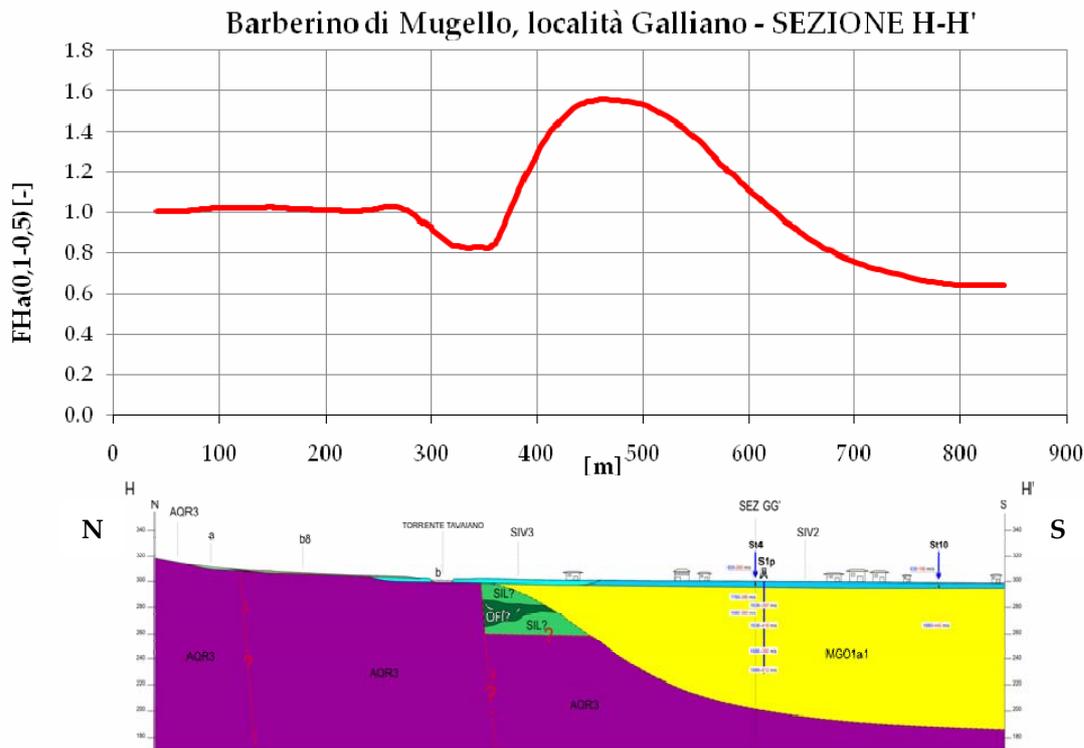


Figura 4.10 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FHa(0.1-0.5)$ per la sezione H-H', Galliano.

Come già descritto nei paragrafi 3.2.12 e 3.2.13, la sezione I-I' è stata suddivisa in due sottosezioni, denominate I-I' nord ed I-I' sud, in modo tale da garantirne una corretta modellazione mediante il codice di calcolo QUAD4M. Negli stessi paragrafi è stato anche sottolineato che l'utilizzo di due sondaggi differenti in fase di caratterizzazione ha comportato una discrepanza nell'andamento medio del fattore di amplificazione in corrispondenza dell'area di sovrapposizione delle due sottosezioni. Questo tratto infatti viene ad essere modellato in maniera differente a seconda che si assumano come riferimento i dati ricavati dal sondaggio S9 oppure dal sondaggio S2; da ciò deriva quindi un andamento differente del fattore di amplificazione. Si è posto quindi il problema di come procedere al raccordo tra i due tratti, poiché per i motivi già esposti nel capitolo precedente, sarebbe stato un errore trascurare i risultati di uno dei due sondaggi a vantaggio dell'altro, nonché una procedura poco ragionevole.

È noto che la procedura di modellazione mediante codici di calcolo agli elementi finiti, qualora ci si trovi a lavorare su una sezione "aperta", conduca a dei risultati maggiormente affetti da errore agli estremi della sezione. Questa è la ragione principale per la quale, quando si procede alla creazione delle poligonali che delimitano i litostrati, anziché interrompere il modello in corrispondenza dei limiti di interesse, si opera come se la sezione proseguisse ai due estremi, andando a creare una sorta di "zona cuscinetto". La mancanza di qualsiasi tipo di vincolo al movimento dei nodi posti sul bordo esterno del modello determina uno smorzamento di radiazione eccessivo rispetto alla realtà. Vincolando i nodi sui bordi esterni del modello con carrelli atti ad impedirne gli spostamenti orizzontali, si ottiene invece l'effetto opposto, ovvero quello di un "ostacolo" infinitamente rigido che riflette tutte le onde sismiche intrappolando l'energia all'interno del deposito e sovrastimando gli effetti amplificativi. Per questa ragione si procede estendendo la sezione al di là dei limiti della zona che si intende modellare, allontanando i bordi fino al punto in cui le condizioni al contorno, siano essi liberi o rigidamente vincolati, non abbiano influenza all'interno del tratto di sezione di interesse.

Alla luce di quanto esposto, il procedimento adottato è stato il seguente:

- È stata determinata l'estensione del tratto di sovrapposizione delle due sottosezioni; esso si articola tra le progressive 870.244 m e 1150.498 m;
- È stato attribuito un "peso" variabile tra 0 e 1 al valore del fattore di amplificazione determinato in corrispondenza di una data ascissa, in funzione della sua distanza dall'estremo della sezione corrispondente;
- Per la sezione I-I' sud: è stato attribuito peso 0 al fattore di amplificazione corrispondente all'ascissa massima determinata nella sezione, ovvero alla progressiva 1150.498 m e peso 1 al fattore di amplificazione corrispondente all'ascissa minima della sezione complementare, ovvero alla progressiva 870.244 m.
- Per la sezione I-I' nord: è stato attribuito peso 0 al fattore di amplificazione corrispondente all'ascissa minima determinata nella sezione, ovvero al valore 870.244 m, peso 1 al fattore di amplificazione corrispondente all'ascissa massima della sezione complementare, ovvero al valore 1150.498 m.
- Per ogni valore di ascissa appartenente al tratto di sovrapposizione, il corrispondente valore del fattore di amplificazione è il risultato della somma dei contributi della parte sud e della parte nord.

Analizzando più nel dettaglio l'andamento del fattore di amplificazione lungo la sezione, è possibile individuare tre zone di picco. La prima, posta in prossimità dell'estremo sud della sezione, è anche quella in cui si raggiungono i valori più elevati di $FHa_{(0.1-0.5)}$ (superiori a 2 nel tratto compreso tra le progressive 300 m e 500 m, con un picco molto accentuato intorno alla progressiva 400 m), presumibilmente legati all'effetto combinato dell'andamento topografico e degli effetti di focalizzazione dovuti

alla risalita del substrato nella parte terminale della paleovalle. La seconda, posta in prossimità dell'altro estremo della paleovalle sud (con un massimo pari a circa 2.5 sulla progressiva 800 m), e la terza zona di picco, collocata nella parte nord della sezione (con un valore massimo pari a circa 2.2 sulla progressiva 2150 m), sono verosimilmente legate anch'esse alla risalita del substrato.

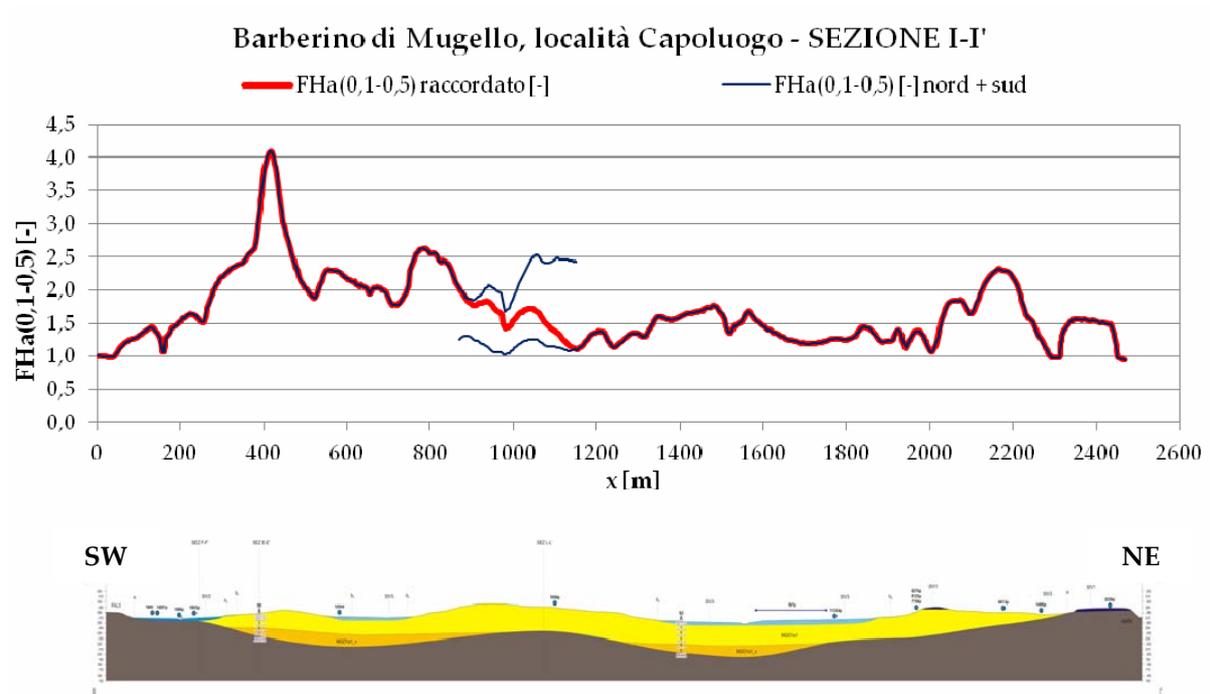


Figura 4.11 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FHa_{(0,1-0,5)}$ per la sezione I-I', Barberino Capoluogo.

Lungo la sezione L-L', costituita unicamente da un deposito di materiale fluvio-lacustre MGO1a1, poggiate sul substrato di Arenarie del Falterona (FAL3), si osserva la presenza di tre zone di amplificazione: una collocata nella parte nord-ovest, in prossimità della chiusura del sub-bacino, a circa 100 m di distanza, sulla progressiva 150 m, una centrale, in prossimità dell'intersezione con la sezione I-I' (intorno alla progressiva 320 m), una a sud-est adiacente alla fine della sezione.

La prima esprime un chiaro effetto di bordo, dovuto al fatto che la risalita del substrato, che si trova in affioramento in tutta la parte nord della sezione, determina un fenomeno di focalizzazione delle onde sismiche. Il valore del fattore di amplificazione resta comunque contenuto, poiché siamo intorno a 1.5.

La zona centrale presenta un picco non particolarmente accentuato ($FH_a \approx 1.4$) laddove si riscontra una lieve variazione altimetrica della superficie topografica, combinata ad una risalita graduale della frontiera deposito-substrato, che comporta, procedendo in direzione sud-est un assottigliamento progressivo dello spessore della copertura.

A partire dalla progressiva 450 m le amplificazioni sono elevate ($FH_a > 1.5$) e in corrispondenza dell'estremità sud-est della sezione, che rimane "aperta" e i cui risultati sono quindi in parte influenzati anche dalle condizioni al contorno, si registrano i valori di amplificazione più elevati, intorno a 2, dovuti presumibilmente alla diminuzione dello spessore e alla risalita del substrato, che comportano uno spostamento verso la superficie del contrasto di impedenza tra fluvio-lacustre e bedrock.

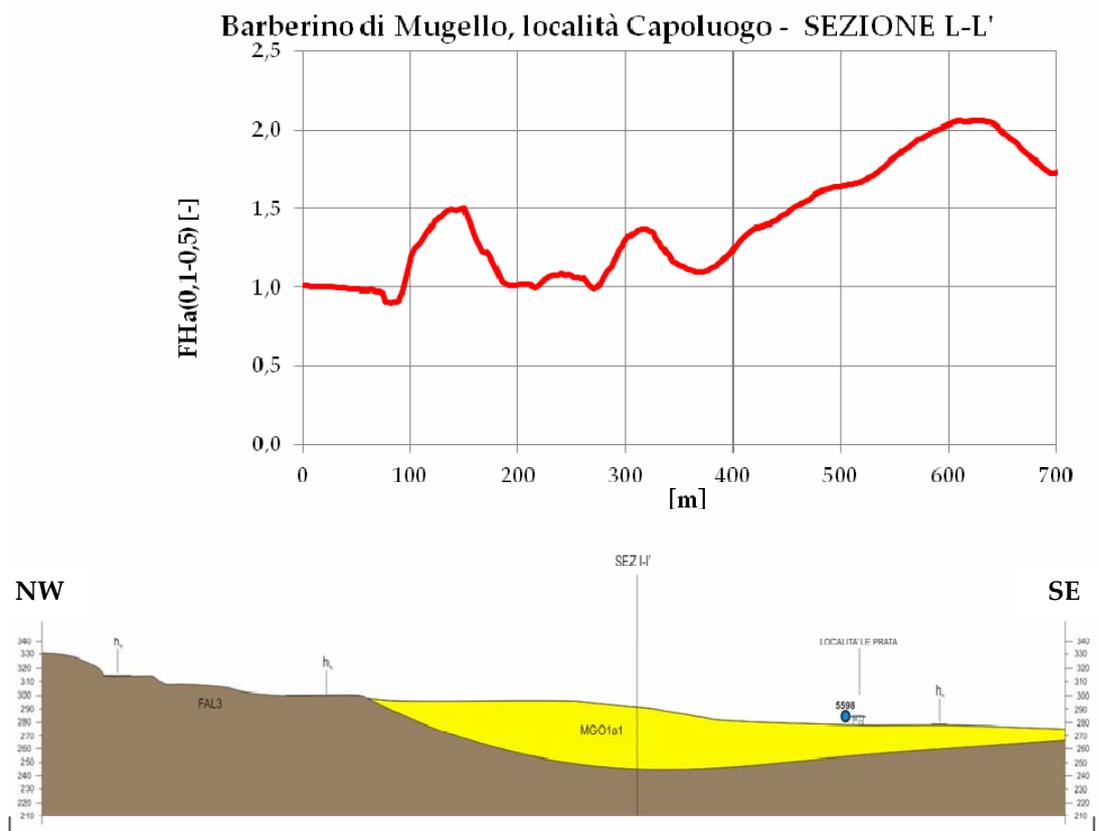


Figura 4.12 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FH_a(0.1-0.5)$ per la sezione L-L', Barberino Capoluogo.

La sezione N-N' è caratterizzata da un picco accentuato del fattore di amplificazione, prossimo al valore 2.3, collocato sulla verticale in corrispondenza della quale il deposito fluvio-lacustre, visto come la somma delle facies argillosa e sabbiosa, raggiunge il suo spessore massimo (in prossimità della progressiva 200 m). Esso è legato presumibilmente a fenomeni di focalizzazione, essendo collocato in prossimità del bordo del sub-bacino, che si sovrappongono alla presenza di effetti legati alla morfologia superficiale.

Nella zona centrale della sezione, laddove lo spessore del materiale fluvio-lacustre si assottiglia progressivamente fino ad esaurirsi ed è sovrastato dai depositi fluviali ed eluvio-colluviali, si osserva un'altra zona di amplificazione, sebbene in questo caso si raggiungano valori ben più modesti, pari a circa 1.5.

Nella zona nord-est della sezione, dove al di sopra del bedrock, costituito dal Membro pelitico-arenaceo della Formazione dell'Acquerino (AQR2), troviamo solo un sottile strato di depositi fluviali, sostanzialmente non si osserva amplificazione. Questo avviene perché, nonostante il contrasto di impedenza tra i due materiali risulti elevato, la copertura è così sottile da risultare non rilevante e dunque la situazione è analoga a quella di substrato affiorante.

Barberino di Mugello, località Capoluogo - SEZIONE N-N'

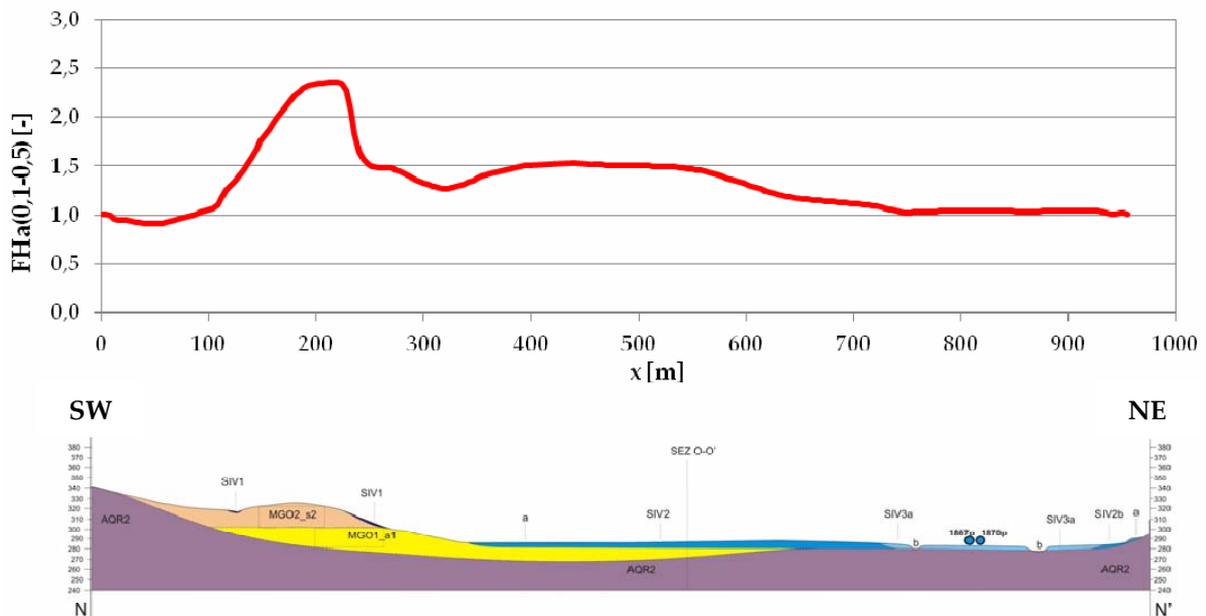


Figura 4.13 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FH_a(0,1-0,5)$ per la sezione N-N', Barberino Capoluogo.

5. Riferimenti bibliografici

Baglione M., Fabbroni P., D'Intinosante V. - a cura di - (in preparazione), *Comune di Barberino di Mugello - Riduzione del rischio sismico - Programma VEL - Relazione tecnica finale di sintesi*, Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica, Direzione Generale delle Politiche Territoriali e Ambientali, Regione Toscana, Firenze.

Boulanger R. W., Arulnathan R., Harder L. F. Jr., Torres R. A., Driller M. W. (1998), *Dynamic properties of Sherman Island peat*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, Issue 1, pp. 12-20, ASCE (American Society of Civil Engineers), New York, NY.

Caserta A., Martino S., Bozzano F., Govoni A., Marra F. (in corso di pubblicazione), *Dynamic properties of low velocity alluvial deposits influencing seismically-induced shear strains: the Grottaperfetta valley test-site (Rome - Italy)*, Bulletin of Earthquake Engineering, Springer, Berlin.

Colombi A., Compagnoni M., Pergalani F. (2011), *Risposta sismica locale: la MS come strumento discriminante per l'utilizzo di approcci semplificati o di specifiche analisi*, Supplemento ad Ingegneria Sismica, Anno XXVIII, n. 2, pp. 65-68, Patron Editore, Quarto Inferiore, Granarolo dell'Emilia, Bologna.

Crespellani T., Facciorusso J (2010), *Dinamica dei terreni per le applicazioni sismiche*, Dario Flaccovio Editore, Palermo.

Facciorusso J., Madaia C., Vannucchi G. (2009), *Dispense di Geotecnica*, Università degli Studi di Firenze, Firenze.

Gruppo di Lavoro MS (2008), *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*, Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma.

Hudson M. B., Idriss I. M., Beikae M. (1993), *QUAD4M - A computer program for evaluating the seismic response of soil structures by variable damping finite element procedures*, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA.

Hudson M. B., Idriss I. M., Beikae M. (1994), *User's manual for QUAD4M*, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA.

Iervolino I., Galasso C. (2010), *Tutorial di REXEL v. 2.6 beta - Selezione automatica di accelerogrammi naturali per l'analisi dinamica non lineare delle strutture*, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli "Federico II", Napoli.

Madaia C., Simoni G. (2010), *Confronto tra parametri rappresentativi dell'amplificazione locale ai fini della microzonazione sismica*, Riassunti estesi delle comunicazioni del 29° Convegno Nazionale del Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida, Prato.

Madaia C. (2011), *Dispense del corso di Ingegneria Geotecnica Sismica*, Università degli Studi di Firenze, Firenze.

Ministero delle Infrastrutture (2008), *D.M. 14/01/2008 (G.U. n. 29 del 04/02/2008), Norme tecniche per le costruzioni*, Roma.

Moreno C. A., Rodriguez E. E. (2004), *Dynamic behavior of Bogota's subsoil peat and its effect in seismic wave propagation*, Proceedings of the Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering, Paper n. 2632, Vancouver.

Puliti A. (2011), *Analisi bidimensionale di risposta sismica locale: Il caso di Barberino di Mugello*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Firenze, Firenze

Servizio Sismico Regionale (2007), *Istruzioni tecniche per le indagini geologiche, geofisiche, geognostiche e geotecniche per la valutazione degli effetti locali nei Comuni classificati sismici della Toscana, Vol. 5, Legenda per la realizzazione della cartografia geologica, geomorfologica e litologico-tecnica per le aree del Mugello*, Direzione Generale Politiche Territoriali e Ambientali, Regione Toscana, Firenze.

Wang C. (2012), *Analisi bidimensionale di risposta sismica locale finalizzate alla microzonazione di terzo livello. Il caso di Barberino di Mugello*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Firenze, Firenze