



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DICEA
DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA CIVILE
E AMBIENTALE

Università degli Studi di Firenze

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Convenzione stipulata in data 30/11/2011 tra la Regione Toscana – Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica e l'Università degli Studi di Firenze – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICEA) dal titolo "Realizzazione di analisi di modellazione bidimensionale sui terreni di alcuni Comuni significativi del Mugello e della Provincia di Arezzo nell'ambito del Programma Regionale VEL"

RELAZIONE FINALE

Comune di Vicchio

Responsabile della Ricerca: Prof. Ing. Giovanni Vannucchi

Gruppo di Lavoro: Prof. Ing. Giovanni Vannucchi, Prof. Ing. Claudia Madaï, Dott. Ing. Johann Facciorusso, Dott. Ing. Elisa Gargini

Maggio 2014

INDICE

INTRODUZIONE	2
1. ANALISI E DEFINIZIONE DELL'INPUT SISMICO	4
2. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA, GEOFISICA E GEOTECNICA	10
2.1. SINTESI DELLE INDAGINI DISPONIBILI SUI TERRENI.....	10
2.2. CARATTERIZZAZIONE DEI TERRENI IN CAMPO STATICO E DINAMICO.....	16
2.2.1. <i>I substrati: Marne di Vicchio (VIC) e Arenarie di Monte Senario (AMS)</i>	<i>22</i>
2.2.2. <i>Depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello (MGO2a2, MGO2s2).....</i>	<i>24</i>
2.2.3. <i>Depositi fluviali del Bacino del Mugello (SIV), depositi alluvio-colluviali (e_{3s}, b_s) e depositi antropici (h_r)</i>	<i>26</i>
3. ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE	29
3.1. CODICE DI CALCOLO QUAD4M.....	30
3.2. CODICE DI CALCOLO STRATA.....	32
3.3. MODELLAZIONE DELLE SEZIONI	34
3.3.1. <i>Sezione 1 - Vicchio capoluogo.....</i>	<i>40</i>
3.3.2. <i>Sezione 2 - Vicchio capoluogo.....</i>	<i>42</i>
3.3.3. <i>Sezione 3 - Vicchio capoluogo.....</i>	<i>45</i>
3.3.4. <i>Sezione 4A - Vicchio capoluogo.....</i>	<i>48</i>
3.3.5. <i>Sezione 4B - Vicchio capoluogo</i>	<i>50</i>
3.3.6. <i>Sezione 1 - Vicchio Case Caldetta</i>	<i>52</i>
3.3.7. <i>Sezione 2 - Vicchio Case Caldetta</i>	<i>54</i>
3.3.8. <i>Sezione 3 - Vicchio Case Caldetta</i>	<i>56</i>
3.3.9. <i>Sezione 4 - Vicchio Case Caldetta</i>	<i>57</i>
4. ANALISI DEI RISULTATI DELLA MODELLAZIONE	58
5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	72

Introduzione

Nella presente Relazione sono illustrati i risultati dello studio finalizzato alla valutazione della risposta sismica locale nel territorio del Comune di Vicchio di Mugello (FI), oggetto della Convenzione stipulata in data 30/11/2011 tra la Regione Toscana – Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica (CRPS) e l'Università degli Studi di Firenze – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICEA).

Lo studio è stato condotto in 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 definizione del modello geologico.

Il territorio di Vicchio 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 $a_g = 0.1984$ 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. 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.

L'abitato di Vicchio di Mugello si sviluppa in prevalenza lungo la pianura alluvionale posta in sinistra idrografica del Fiume Sieve, ad una quota media di 200 m s.l.m.; frazioni con minore estensione geografica, che non sono state oggetto di studio, sono ubicate nel versante più a nord a quote superiori. L'area del capoluogo è caratterizzata da un centro storico collocato nella parte centrale dell'abitato e da fasce in espansione urbanistica poste sia verso est che verso ovest, dove insiste l'area industriale più estesa del Comune. Ulteriori aree produttive sono presenti in direzione sud-est in località Case Caldetta lungo il corso del Fiume Sieve, in corrispondenza di un'ansa dello stesso.

Lo studio ha avuto l'obiettivo di fornire al CRPS, lungo alcune sezioni geologiche da esso determinate, l'andamento dei più comuni fattori di amplificazione sismica. Dopo aver effettuato un confronto tra diversi fattori, è stato individuato, in collaborazione con lo stesso CRPS, 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) nonché gli interventi di miglioramento e adeguamento sismico sugli edifici pubblici esistenti.

1. Analisi e definizione dell'input sismico

L'input sismico è costituito dai segnali accelerometrici ricavati da banche dati contenenti le registrazioni relative ad eventi sismici reali; nello specifico sono stati forniti 7 accelerogrammi spettrocompatibili estratti dai data base ESMD, NGA, K-NET e ITACA, le cui caratteristiche principali sono sintetizzate in Tabella 1.1. La scelta è stata effettuata da EUCENTRE, su commissione del Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica, pertanto si rimanda al materiale da esso consegnato per ogni considerazione relativa alla scelta e alle caratteristiche di tali segnali.

Gli accelerogrammi effettivamente utilizzati tuttavia sono stati ottenuti scalando i valori di picco delle registrazioni al valore di picco su suolo rigido atteso nel sito in esame, pari ad $a_g = 0.1984$ g. Il valore atteso è stato determinato per il sito in esame considerando un edificio in classe d'uso II, con una vita nominale di 50 anni, con riferimento allo stato limite di salvaguardia della vita, da cui consegue un periodo di ritorno di 475 anni.

Tabella 1.1 – Accelerogrammi spettro-compatibili selezionati da EUCENTRE.

<i>Input sismico</i>	<i>ID registrazione</i>	<i>Fonte</i>	<i>Magnitudo Mw (-)</i>	<i>Distanza epicentrale R (Km)</i>	<i>Scaling factor SF (%)</i>
Vicchio_1	000182xa	ESMD	6.87	11.00	0.59
Vicchio_2	000200ya	ESMD	6.68	65.00	0.76
Vicchio_3	0765y	NGA	6.93	28.64	0.42
Vicchio_4	1091x	NGA	6.69	38.07	1.32
Vicchio_5	IWT0100305261824	K-NET	7.00	50.50	1.08
Vicchio_6	SAG0010503201053	K-NET	6.60	36.18	1.57
Vicchio_7	20090406_013239ITDPC_CLN__WEC	ITACA	6.30	31.60	2.44

I 7 accelerogrammi di riferimento sono stati elaborati ricavando in particolare i valori di durata (nominale e bracketed) e i valori del PGA (che trattandosi di accelerogrammi scalati coincidono tutti col valore $a_g = 0.1984$ g). Dall'analisi delle storie temporali in termini di velocità relativa e spostamento relativo sono stati derivati rispettivamente i valori di PGV e PGD.

Si è quindi proceduto al calcolo degli spettri di Fourier e alla determinazione della frequenza fondamentale (e in modo indiretto del periodo predominante) per ciascuno degli input sismici.

Sono stati elaborati gli spettri di risposta e da essi, in particolare dallo spettro di risposta in termini di pseudovelocità e applicando semplicemente il metodo dei trapezi, sono stati calcolati i valori dell'intensità spettrale di Housner (SI).

Di seguito si riportano quindi gli accelerogrammi selezionati da EUCENTRE (Figura 1.1), gli spettri di Fourier (Figura 1.2), gli spettri di risposta in termini di accelerazione spettrale (Figura 1.3) e la tabella riassuntiva dei parametri sismici più significativi dei segnali assunti come input sismici di riferimento per la modellazione (Tabella 1.2).

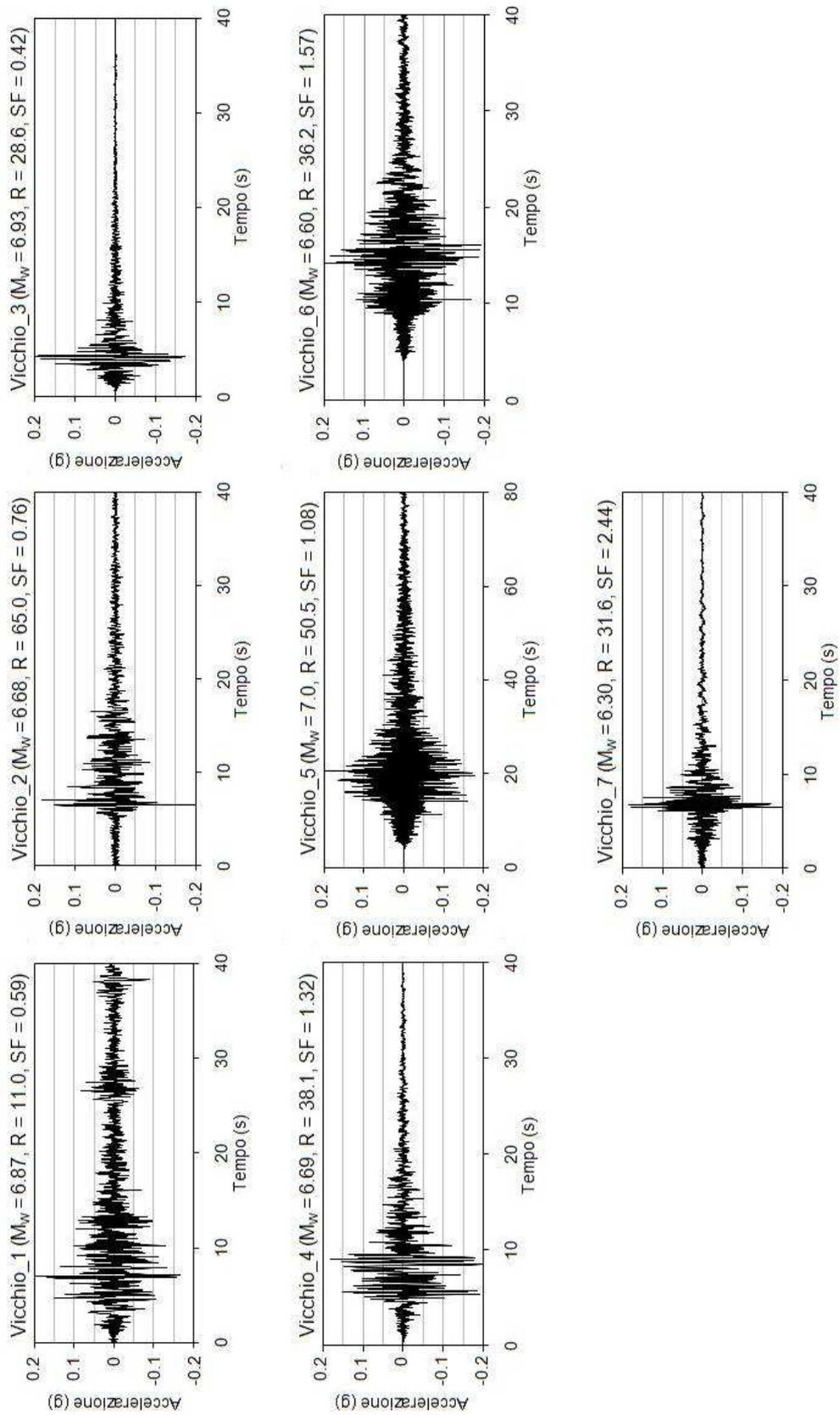


Figura 1.1 – Accelerogrammi spettro-compatibili individuati per il territorio di Vicchio da EUCEN-TRE.

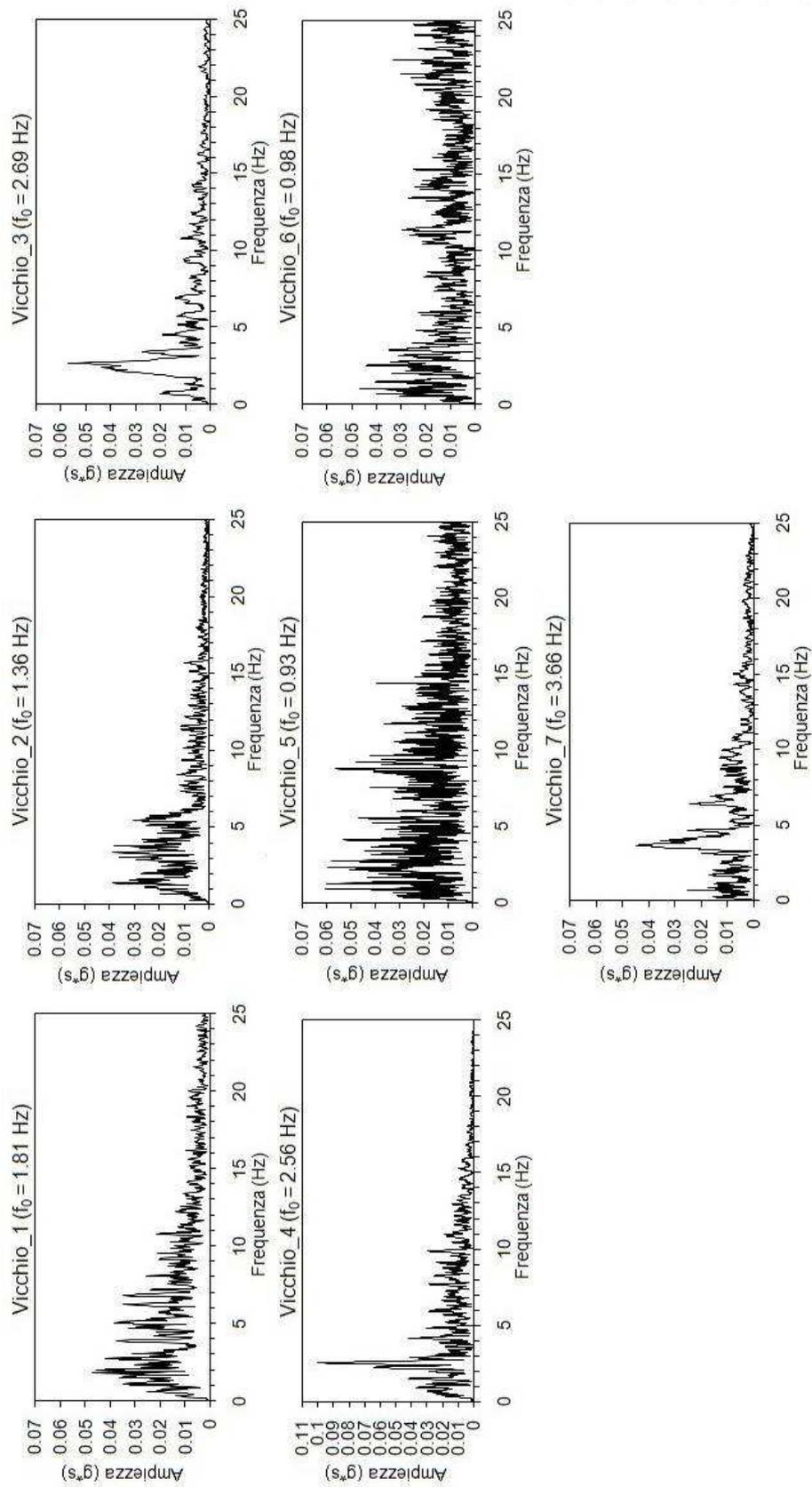


Figura 1.2 – Spettri di Fourier relativi agli accelerogrammi spettro-compatibili individuati per il territorio di Vicchio da EUCENTRE.

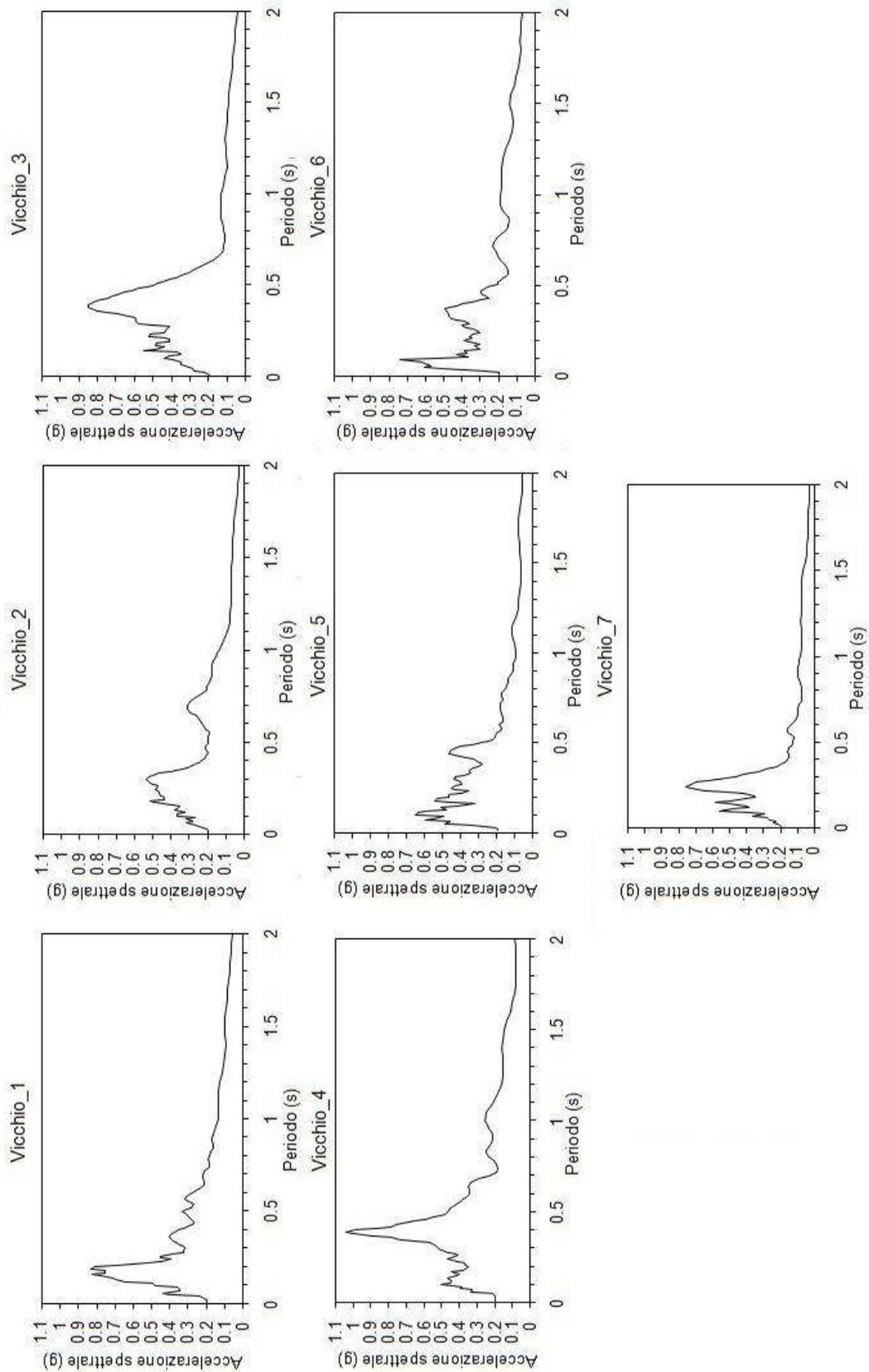


Figura 1.3 – Spettri di risposta relativi agli accelerogrammi spettro-compatibili individuati per il territorio di Vicchio da EUCENTRE.

Tabella 1.2 – Caratteristiche degli accelerogrammi utilizzati per le analisi di risposta sismica locale (N = numero di punti campionati, Δt = passo di campionamento).

	Vicchio_1:	Vicchio_2:	Vicchio_3:	Vicchio_4:	Vicchio_5:	Vicchio_6:	Vicchio_7:
N (-)	3997	4001	7989	2001	8001	4001	8001
Δt (s)	0.010	0.010	0.005	0.020	0.010	0.010	0.005
Durata nominale (s)	39.96	47.94	39.94	40.00	191.99	298.99	90.00
Durata bracketed (s)	35.18	10.50	3.47	10.88	29.74	14.11	3.89
PGA (g)	0.1984	0.1984	0.1984	0.1984	0.1984	0.1984	0.1984
PGV (m/s)	0.0337	0.0299	0.0316	0.0494	0.0350	0.0349	0.0223
PGD (m)	0.0044	0.0035	0.0043	0.0068	0.0050	0.0051	0.0038
Frequenza fondamentale (Hz)	1.8066	1.3550	2.6855	2.5574	0.9338	0.9766	3.6560
Periodo predominante (s)	0.5535	0.7380	0.3724	0.3910	1.0708	1.0240	0.2735
Intensità di Housner (cm)	55.3766	41.8907	63.9978	82.8994	49.2894	58.7770	32.0410

È stato infine operato un confronto tra accelerogrammi, spettri di Fourier e spettri di risposta, ed un'analisi dei parametri sismici sopra nominati nel tentativo di valutare l'opportunità di escludere uno o più di uno tra gli input assegnati. Questo processo non ha tuttavia suggerito motivi sufficienti di esclusione, pertanto in fase di modellazione sono stati impiegati tutti i 7 input sismici.

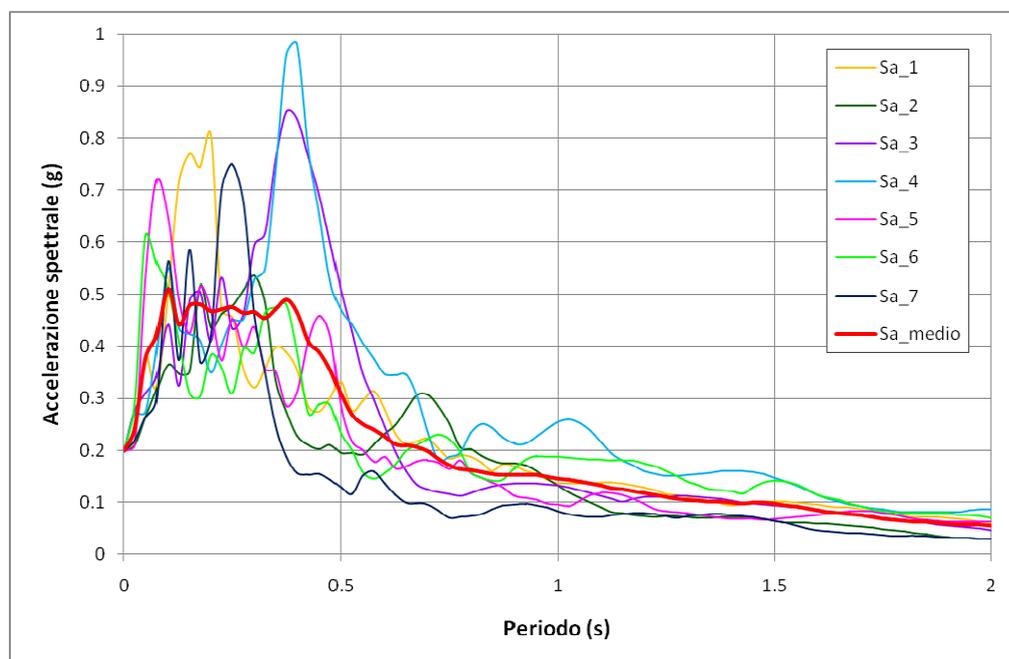


Figura 1.4 – Spettri di risposta relativi agli accelerogrammi spettro-compatibili individuati per il territorio di Vicchio da EUCENTRE.

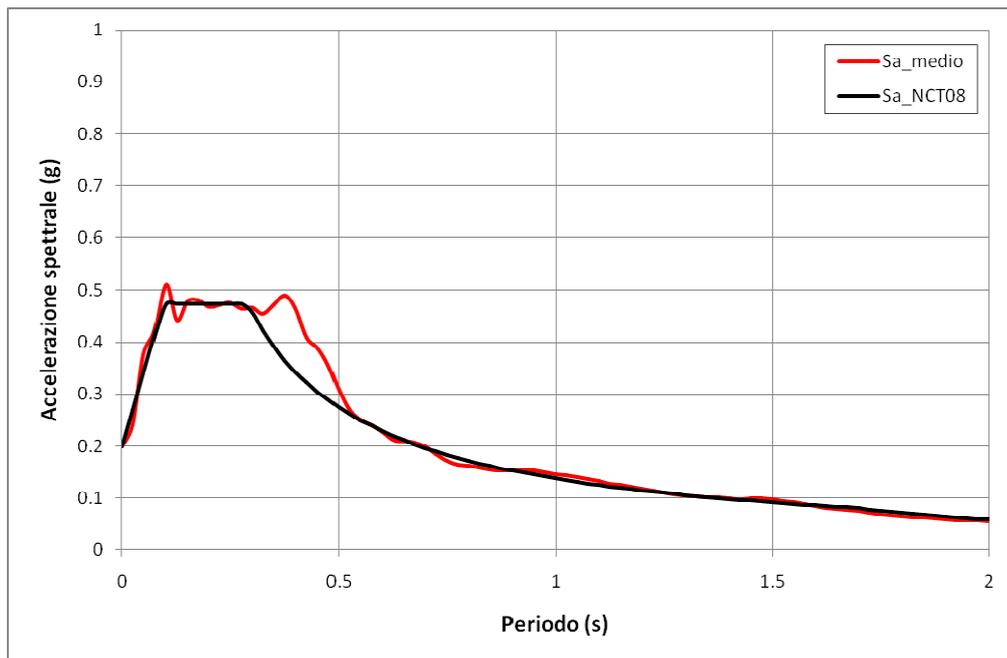


Figura 1.5 - Confronto dello spettro medio con lo spettro di target.

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 e litologia 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), la Regione Toscana ha finanziato un consistente numero di indagini in sito 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 della Sezione Geotecnica del DICEA per l'esecuzione delle analisi di RSL.

In particolare le località interessate da indagine nell'ambito dei Programmi VEL e DOCUP sono state nel complesso le seguenti:

- ✓ Vicchio capoluogo e Vicchio Case Caldeta, poste lungo il corso del Fiume Sieve;
- ✓ Rupecanina e Santo Stefano, appartenenti al bacino idrografico del Torrente Arsella;
- ✓ Caselle, Molezzano, Gattaia e Santa Maria a Vezzano, ubicate nel bacino idrografico del Torrente Muccione, a nord di Vicchio capoluogo;
- ✓ Lo Spinoso e La Gracchia, situate sul fondovalle della Sieve, ad ovest del capoluogo.

La caratterizzazione dei terreni è stata effettuata per tutte le aree sopracitate, mentre le analisi di risposta sismica locale hanno interessato esclusivamente le località di Vicchio capoluogo e Vicchio Case Caldeta.

In Tabella 2.1 è riportato il quadro complessivo delle indagini in sito e di laboratorio acquisite dal data base regionale allo scopo di definire un modello geotecnico adeguato per il sito in esame.

Nell'area di Vicchio sono stati effettuati 5 sondaggi a carotaggio continuo, denominati S1, S2, S3, S5, S6, ed in ciascuno di essi è stata eseguita una prova down-hole. I sondaggi S1 ed S5 sono stati effettuati nell'area est del capoluogo, S3 ed S6 nell'area ovest, mentre il sondaggio S2 è stato l'unico realizzato in località Vicchio Case Caldeta. Sono stati prelevati in totale 5 campioni indisturbati, sui quali sono state eseguite prove di classificazione, prove per la determinazione delle caratteristiche meccaniche, prove edometriche, prove per la determinazione del comportamento dinamico. Inoltre sono state eseguite 11 indagini sismiche a rifrazione, denominate St1, St3, St4, St5, St6, St7, St8, St9, St10, St11, St12.

In riferimento alle prove di laboratorio, per ciascuno dei campioni analizzati sono state specificate la localizzazione, la denominazione, la profondità di estrazione del campione e le prove eseguite; relativamente alle prove di sismica a rifrazione è stato indicato il numero di riferimento delle stese sismiche predisposte nell'area.

Tabella 2.1 – Località, denominazione, profondità di estrazione e prove disponibili.

<i>località</i>	<i>sondaggio</i>	<i>campione</i>	<i>profondità (m)</i>	<i>prove di laboratorio</i>	<i>prove in sito</i>	
<i>Case Caldeta</i>	S2	SH1	3.00 - 3.60	CL, Gr, EDO, RC, VTL, Tx CK ₀ U	DH-S2	SR (St7, St8, St9)
<i>Capoluogo ovest</i>	S3	SH1	3.00 - 3.60	CL, Gr, EDO, Tx CID	DH-S3	SR (St4, St5, St6)
<i>Capoluogo ovest</i>	S3	SH2	6.00 - 6.40	CL, Gr, EDO, RC, CTxP CAU		
<i>Capoluogo ovest</i>	S6	SH1	1.50 - 2.00	CL, Gr, RC, CTS	DH-S6	SR (St3, St11, St12)
<i>Capoluogo ovest</i>	S6	SH2	7.00 - 7.50	CL, Gr, RC, Tx CIU		
<i>Capoluogo est</i>	S1	-	-	-	DH-S1	SR (St1, St10)
<i>Capoluogo est</i>	S5	-	-	-	DH-S5	

CL = prove di classificazione

Gr = analisi granulometrica

EDO = prova di consolidazione edometrica a carico controllato

RC = prova di colonna risonante

Tx CID = prova triassiale consolidata isotropicamente drenata

Tx CIU = prova triassiale consolidata isotropicamente non drenata

Tx CK₀U = prova triassiale consolidata in condizioni K₀ non drenata

CTxP CAU = prova triassiale ciclica "Property" consolidata anisotropicamente non drenata

CTS = prova di taglio torsionale ciclico

VTL = misura diretta di velocità delle onde elastiche

DH = prova down-hole

SR = prova sismica a rifrazione

St = stesa sismica

Dopo aver confrontato l'adattamento di diversi modelli ai dati sperimentali desunti dalle prove di colonna risonante (RC), sono stati adottati il modello di Ramberg e Osgood (1943), di equazione

$$\gamma = \frac{\tau}{G_0} + C \cdot \left| \frac{\tau}{G_0} \right|^R \quad (2.1)$$

per esprimere l'andamento di $G(\gamma)/G_0$ e il modello iperbolico modificato di Yokota et al. (1981), di equazione

$$\frac{D}{D_{max}} = e^{-\lambda \cdot \frac{G}{G_0}} \quad (2.2)$$

per esprimere l'andamento di $D(\gamma)$.

Relativamente ai litotipi fortemente caratterizzati dalla presenza di materiale ghiaioso si è fatto ricorso all'uso di modelli empirici di letteratura; in particolare si è scelto di utilizzare la curva di decadimento di Rollins (2000) di equazione

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + 16 \cdot \gamma \cdot (1.2 + 10^{-20 \cdot \gamma})} \quad (2.3)$$

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

$$D = 0.8 + 18 \cdot (1 + 0.15 \cdot \gamma^{-0.9})^{-0.75} \quad (2.4)$$

In Figura 2.1 si riporta uno stralcio della carta geologica di Vicchio, in località capoluogo, con l'ubicazione dei sondaggi e delle stese sismiche; nella stessa figura sono rappresentate anche le tracce di quattro sezioni geologiche individuate dal CRPS, oggetto delle analisi di risposta sismica locale descritte nella presente Relazione. Nella Figura 2.2 è riportato uno stralcio della carta geologica di Casse Caldeta, contenente le stesse informazioni sopra descritte, incluse le tracce delle 4 sezioni.

In entrambe le carte sono stati indicati anche i sondaggi ed i pozzi censiti nell'archivio della Provincia di Firenze. Nell'impossibilità di poter eseguire ulteriori sondaggi infatti, per la risoluzione di alcune problematiche emerse nel corso dell'analisi, si è reso necessario effettuare un ulteriore approfondimento, esaminando il materiale preesistente e raccogliendo le informazioni presenti nelle stratigrafie allegate alle procedure di autorizzazione e di concessione dei pozzi di captazione delle acque. Tali procedure prevedono infatti l'obbligo di presentare una relazione idrogeologica che descriva l'assetto strutturale e la successione stratigrafica locale. Dalla banca dati provinciale sono stati quindi reperiti i dati dei pozzi presenti nell'area di interesse, con particolare attenzione alle stratigrafie delle opere di presa ubicate presso le tracce delle sezioni, utilizzate per integrare le informazioni a disposizione. Il lavoro di revisione ed approfondimento appena descritto ha consentito di definire con maggiore affidabilità le sezioni geologiche.

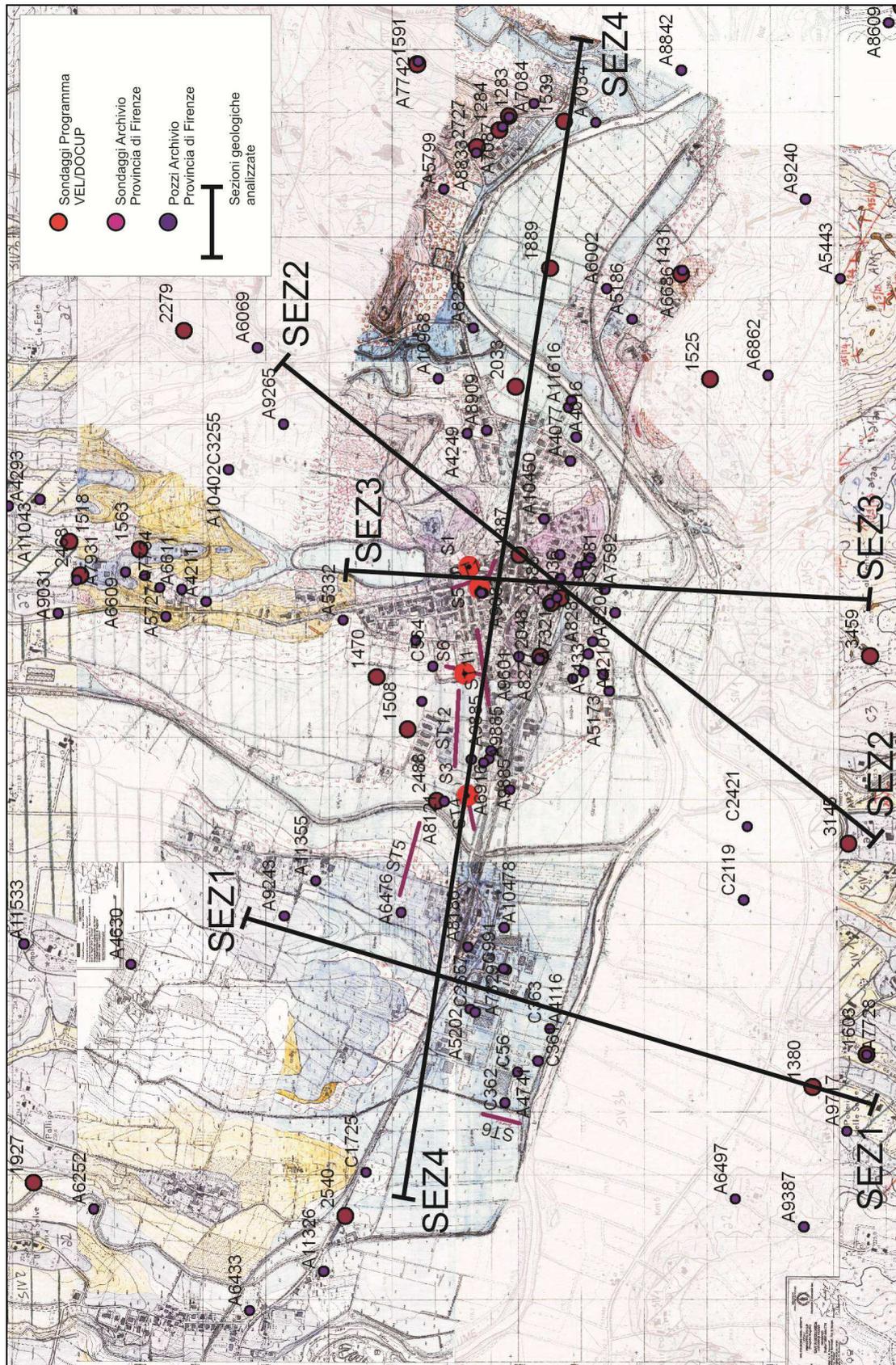


Figura 2.1 – Carta geologica di Vicchio capoluogo con ubicazione delle indagini (stese sismiche e sondaggi) e tracce delle sezioni modellate.

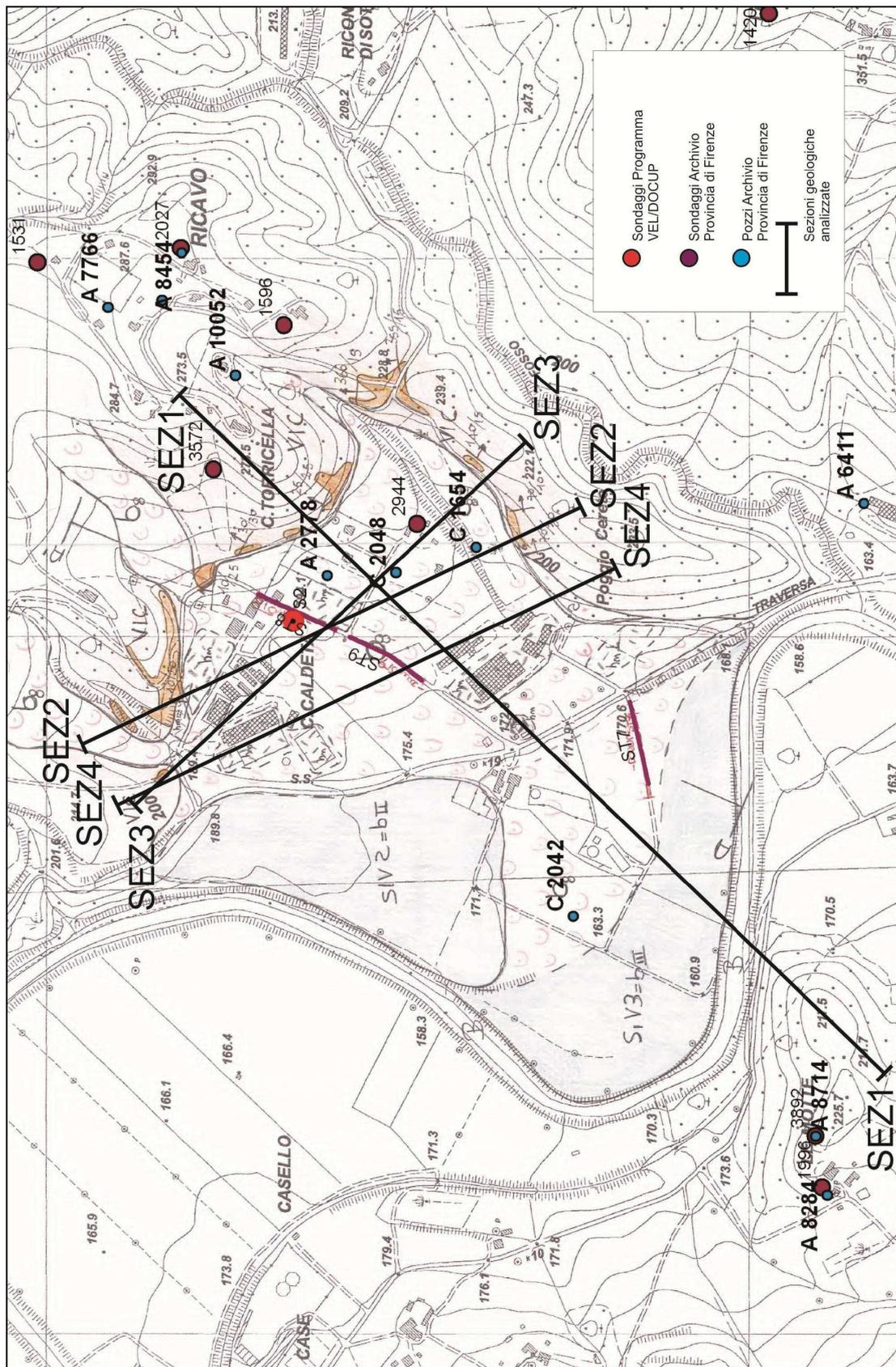


Figura 2.2 – Carta geologica di Vicchio Case Caldetta con ubicazione delle indagini (stese sismiche e sondaggi) e tracce delle sezioni modellate.

Dall'analisi della cartografia fornita dal CRPS ed in parte sopra riportata nelle Figure 2.1 e 2.2, emerge che il substrato Pre-Pliocenico, affiorante in località Case Caldeta, è costituito da Unità riferibili al Dominio Toscano (Unità tettonica Falterona) e al Dominio Subligure (Unità tettonica Canetolo).

Procedendo dal basso verso l'alto i depositi Plio-Quaternari sovrastanti il substrato sono distinti in:

- ✓ depositi fluvio-lacustri di riempimento del Bacino del Mugello (distinti in tre unità sulla base delle principali superfici di discordanza riconosciute a scala di Bacino nella cartografia geologica nazionale);
- ✓ depositi fluviali del Bacino del Mugello;
- ✓ depositi alluvio-colluviali recenti.

Al di sopra dei depositi alluvionali si trovano infine i depositi antropici, caratterizzati dalla presenza di terreni di riporto.

L'area del capoluogo, delimitata dal Torrente Pesciola ad ovest e dal Torrente Muccione ad est, è attraversata dalla SS551 del Mugello, dall'infrastruttura ferroviaria e da un tratto del Fiume Sieve.

Il capoluogo si colloca in un'area pressoché pianeggiante della valle alluvionale, su depositi terrazzati di II e III ordine, raccordati da una fascia di depositi colluviali. Nel sito in esame si osserva quindi la presenza di una diffusa copertura di depositi alluvionali terrazzati di diversi ordini (nel caso specifico SIV2 e SIV3), tutti costituiti, dal basso stratigrafico verso l'alto, da ciottoli, sabbie e limi fluviali. Al di sotto sono presenti depositi fluvio-lacustri prevalentemente argilloso-limosi (MGO2a2), ma anche in facies sabbiosa (MGO2s2). Il substrato, di natura arenacea e riconducibile all'Unità tettonica Falterona e all'Unità tettonica Canetolo (VIC e AMS), non è affiorante per un ampio intorno della zona indagata.

L'area produttiva di Case Caldeta è situata ad est di Vicchio, nella zona in cui il Fiume Sieve cambia orientazione e scorre in direzione NO-SE. L'intero perimetro, di forma subcircolare, si posiziona in sinistra idrografica del Fiume Sieve ed ha come limite orientale Casa Torricella e come margine meridionale il crinale di Poggio Cereto.

Dal punto di vista geologico l'area presenta una copertura di depositi eluvio-colluviali (b_s) sovrastanti depositi palustro-lacustri ($e3_s$). Questi ultimi, rinvenuti esclusivamente in sondaggi effettuati a Caldeta e Firenzuola, sono riferibili a piccoli specchi lacustri intravallivi temporanei associati ad antichi sbarramenti da frana di aste fluviali. In questa area il substrato è costituito dalle Marne di Vicchio (VIC).

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 ai risultati di prove 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 indicati nella Tabella 2.1 sono riassunti per ciascun campione di ciascun sondaggio nella Tabella 2.2, che riepiloga i parametri più significativi relativi alla caratterizzazione delle diverse unità litostратigrafiche in campo statico ed in campo dinamico.

Ai fini dell'analisi della risposta sismica locale infatti l'elemento di maggior interesse è costituito proprio dalle proprietà dinamiche desunte dalle prove esaminate. Per tale ragione dunque si riportano i risultati in termini di profili di velocità delle onde sismiche (Figure 2.3 e 2.4 e Tabella 2.3) e di curve di decadimento e di smorzamento per le varie formazioni presenti nell'area (Tabella 2.4 e Figura 2.8), così da ricavare i parametri necessari alla modellazione.

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 bassi livelli di deformazione) mediante la relazione

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2 \quad (2.5)$$

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

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - \nu)}{1 - 2\nu}} \quad (2.6)$$

Riportiamo quindi per ciascuna formazione i soli profili di V_s e V_p , essendo le altre grandezze significative ricavabili dalle precedenti come appena descritto.

Tabella 2.2 – Tabella riepilogativa dei principali parametri geotecnici.

	CALDETA	VICCHIO OVEST		VICCHIO OVEST	
Sondaggio	S2	S3		S6	
Campione	SH1	SH1	SH2	SH1	SH2
Unità	e _{3s}	SIV3	MGO2a2	h _r	MGO2s2
Profondità campione (m)	3.00 - 3.60	3.00 - 3.60	6.00 - 6.40	1.50 - 2.00	7.00 - 7.50
γ (kN/m ³)	19.27 (CL) 19.29 (EDO) 20.09 (RC)	19.36 (CL) 20.05 (EDO) -	19.89 (CL) 19.52 (EDO) 19.28 (RC)	15.52 (CL) - 15.96 (RC)	19.77 (CL) - 19.58 (RC)
γ_a (kN/m ³)	15.77 (EDO)	16.37 (EDO)	15.29 (EDO)	-	-
G _s (-)	2.735	2.715	2.737	2.679	2.709
w (%)	22.0 (CL) 22.3 (EDO) 23.0 (RC)	22.0 (CL) 22.4 (EDO) -	29.0 (CL) 27.7 (EDO) 28.2 (RC)	10.0 (CL) - 10.9 (RC)	19.0 (CL) - 19.3 (RC)
w _L (%)	60	-	63	-	43
w _P (%)	22	-	29	-	19
I _P (%) (o IP)	38	-	34	-	24
CLASSIF. USCS	CH	-	CH	-	CL
e ₀ (-)	0.702 (EDO) 0.643 (RC)	0.627 (EDO) -	0.756 (EDO) 0.784 (RC)	- 0.841 (RC)	- 0.614 (RC)
C _r (-)	0.0299	0.0166	0.0532	-	-
C _c (-)	0.2226	0.1727	0.4086	-	-
C _s (-)	0.0781	0.0361	0.1345	-	-
σ_{v0} (kPa)	60.3	67.8	121.6	-	-
σ'_P (kPa)	260	360	1000	-	-
OCR (-)	4.31	5.31	8.22	-	-
$\sigma'_a = \sigma'_r$ (kPa)	40	-	120	75	100
D ₀ (%)	3.20	-	2.00	3.05	5.66
G ₀ (MPa)	39.00	-	66.00	61.02	92.82
ϕ' (°)	-	33.29 (TxCID)	-	-	25.44 (TxCIU)
c' (kPa)	-	21.59 (TxCID)	-	-	18.27 (TxCIU)

In Figura 2.3 è riportato l'andamento di V_s (Figura 2.3 a) e V_p (Figura 2.3 b) con la profondità z ottenuto a partire dalle prove down-hole effettuate nell'ambito dei Programmi regionali VEL e DOCUP nell'area di Vicchio.

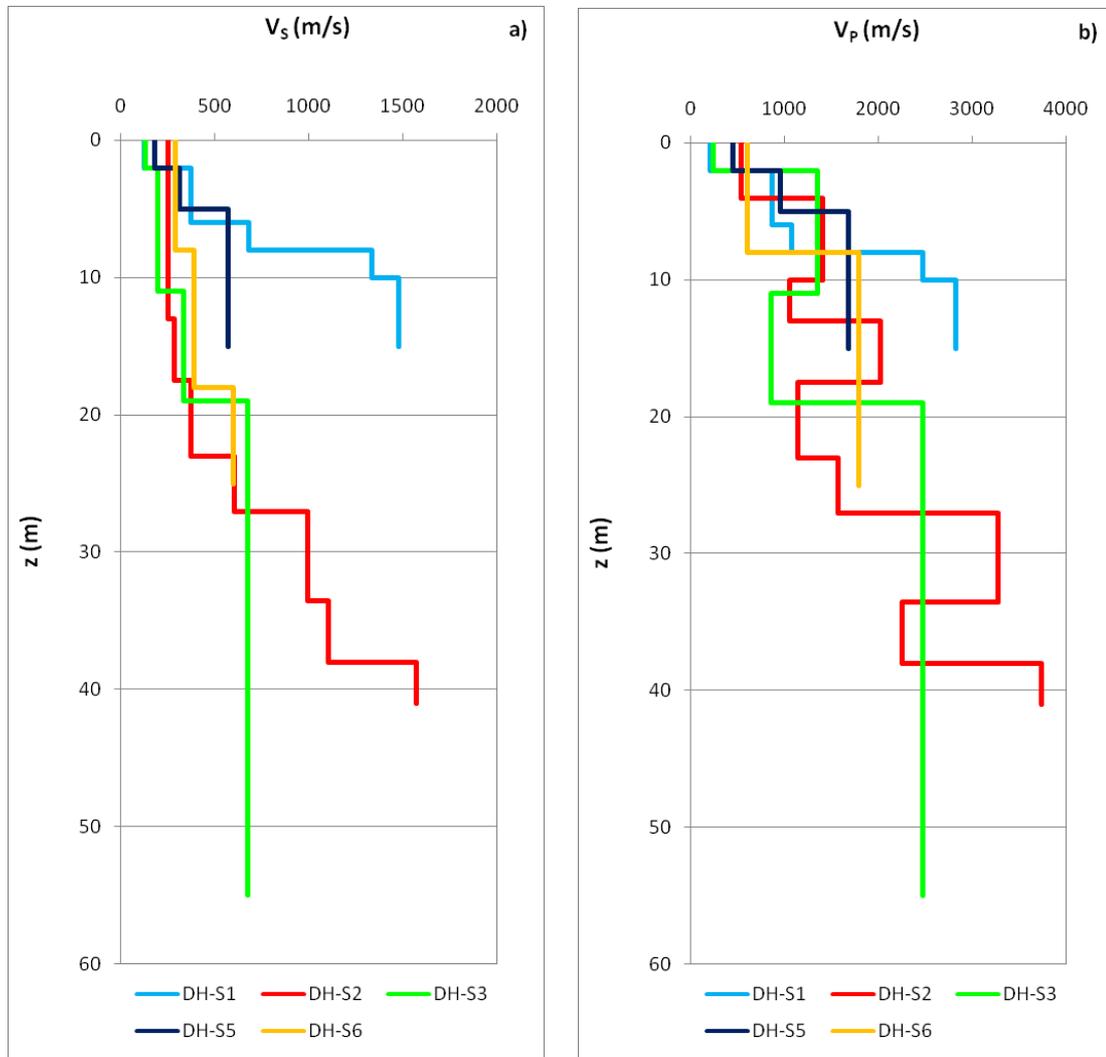


Figura 2.3 – Profili di velocità delle onde di taglio (a) e longitudinali (b) con la profondità da prove down-hole effettuate a Vicchio capoluogo e Case Caldetta.

In Figura 2.4 sono riportati i medesimi profili di velocità, rappresentando però in modo differenziato le unità litologiche alle quali essi sono attribuiti; questo dato risulta particolarmente utile nella successiva fase di redazione del modello geotecnico di riferimento.

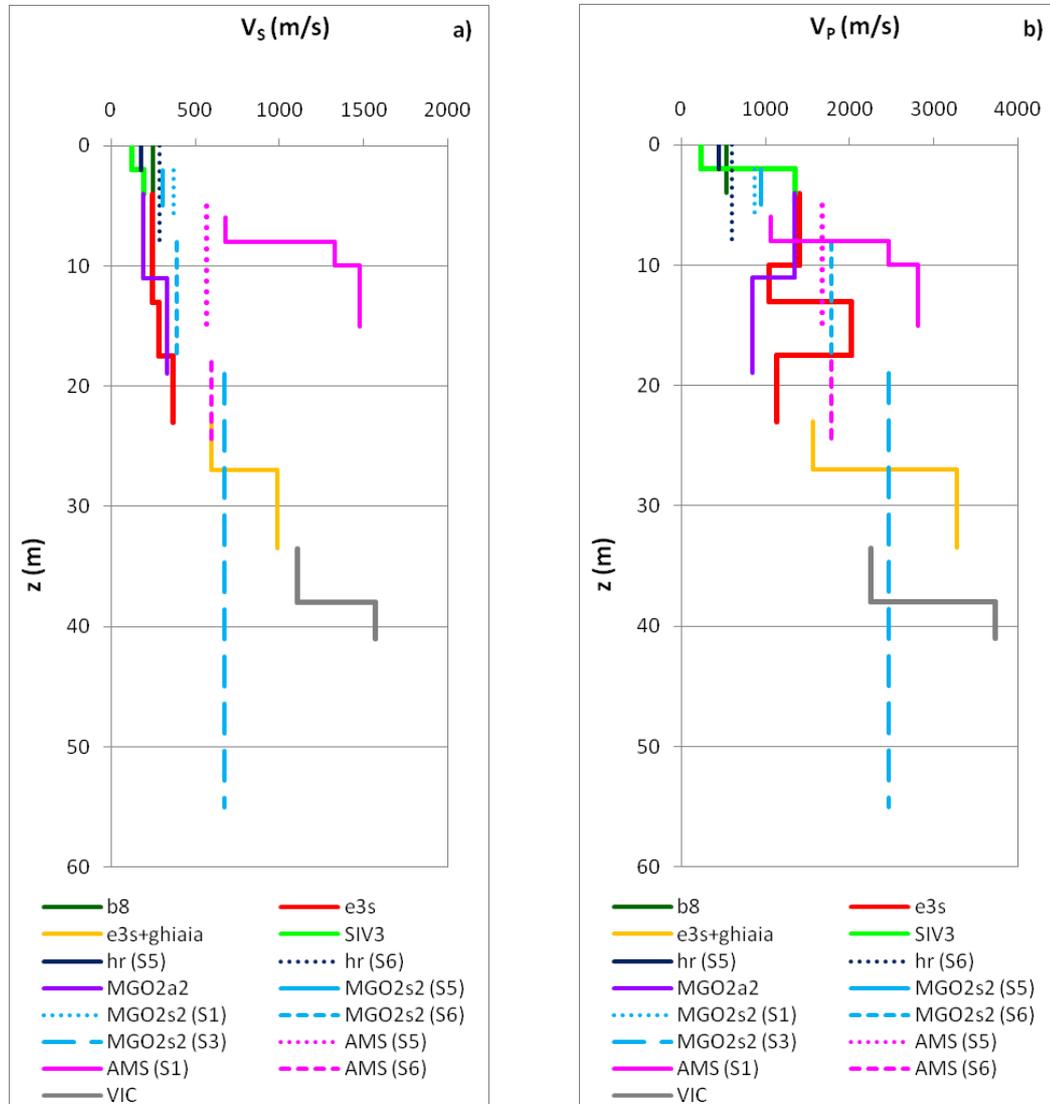


Figura 2.4 – Profili di velocità delle onde di taglio (a) e longitudinali (b) con la profondità ottenuti da prove down-hole differenziati in funzione delle unità litologiche presenti.

Per favorire ulteriormente questa lettura, i valori di V_s e V_p , per ciascuna delle formazioni geologiche in esame e per fasce di profondità, sono riassunti anche in Tabella 2.3, partendo dal substrato e proseguendo verso la superficie del deposito.

Tabella 2.3 – Andamento velocità-profondità per le unità litologiche presenti nel sito in esame.

Substrato (Unità tettonica del Falterona e Unità tettonica Canetolo)

VIC			AMS		
<i>z (m)</i>	<i>V_s (m/s)</i>	<i>V_P (m/s)</i>	<i>z (m)</i>	<i>V_s (m/s)</i>	<i>V_P (m/s)</i>
33.5 - 38	1105	2250	5 - 15	570	1680
38 - 41	1570	3730	6 - 8	680	1070
			8 - 10	1330	2470
			10 - 15	1475	2817
			18 - 25	600	1790

Depositi fluvio-lacustri del bacino del Mugello

MGO2s2			MGO2a2		
<i>z (m)</i>	<i>V_s (m/s)</i>	<i>V_P (m/s)</i>	<i>z (m)</i>	<i>V_s (m/s)</i>	<i>V_P (m/s)</i>
2 - 5	310	955	4 - 11	194	1354
2 - 6	372	870	11 - 19	333	852
8 - 18	390	1790			
19 - 55	673	2470			

Depositi palustro-lacustri di sottosuolo, depositi eluvio-colluviali, depositi fluviali, depositi antropici

<i>e3_s</i>			<i>b_s</i>			<i>h_r</i>		
<i>z (m)</i>	<i>V_s (m/s)</i>	<i>V_P (m/s)</i>	<i>z (m)</i>	<i>V_s (m/s)</i>	<i>V_P (m/s)</i>	<i>z (m)</i>	<i>V_s (m/s)</i>	<i>V_P (m/s)</i>
4 - 10	250	1410	0 - 4	250	540	0 - 2	180	450
10 - 13	250	1050	SIV3			0 - 8	290	600
13 - 17.5	285	2025	<i>z (m)</i>	<i>V_s (m/s)</i>	<i>V_P (m/s)</i>			
17.5 - 23	370	1140	0 - 2	128	243			
23 - 27 (*)	600	1570	2 - 4	194	1354			
27 - 33.5 (*)	990	3270						

(*) e3_s + ghiaia

Per quanto riguarda la Tabella 2.3 è necessario spiegare le peculiarità che si osservano per le unità litostratigrafiche denominate AMS, MGO2s2 ed h_r, le quali sono state intercettate da più di un sondaggio.

Consideriamo ad esempio la formazione delle Arenarie di Monte Senario (AMS):

- La DH-S5 ha evidenziato per un intervallo di profondità pari a 10 m, dei valori di V_s e V_P rispettivamente pari a 570 m/s e 1680 m/s;
- La DH-S1 ha evidenziato per i primi 2 m i valori V_s = 680 m/s e V_P = 1070 m/s, per i successivi 2 m i valori V_s = 1330 m/s e V_P = 2470 m/s, per i 5 m successivi infine i valori V_s = 1475 m/s e V_P = 2817 m/s;
- La DH-S6 ha invece rilevato per un intervallo di spessore 7 m i valori V_s = 600 m/s e V_P = 1790 m/s.

Per quanto riguarda invece l'unità MGO2s2 si ha che:

- Il primo valore di velocità è stato determinato in corrispondenza della DH-S5, che ha evidenziato per un intervallo z pari a 3 m valori di V_s e V_P rispettivamente pari a 310 m/s e 955 m/s;

- La DH-S1 ha invece rilevato per un intervallo di spessore 4 m i valori $V_s = 372$ m/s e $V_P = 870$ m/s;
- La DH-S6 ha evidenziato per uno spessore di 10 m i valori $V_s = 390$ m/s e $V_P = 1790$ m/s;
- La DH-S3 ha rilevato per uno spessore z pari a 36 m i valori $V_s = 673$ m/s e $V_P = 2470$ m/s.

Infine per quanto riguarda i terreni h:

- La DH-S5 ha evidenziato per un intervallo z pari a 2 m valori di V_s e V_P rispettivamente pari a 180 m/s e 450 m/s;
- La DH-S6 ha invece rilevato per un intervallo di spessore 8 m i valori $V_s = 290$ m/s e $V_P = 600$ m/s.

2.2.1. I substrati: Marne di Vicchio (VIC) e Arenarie di Monte Senario (AMS)

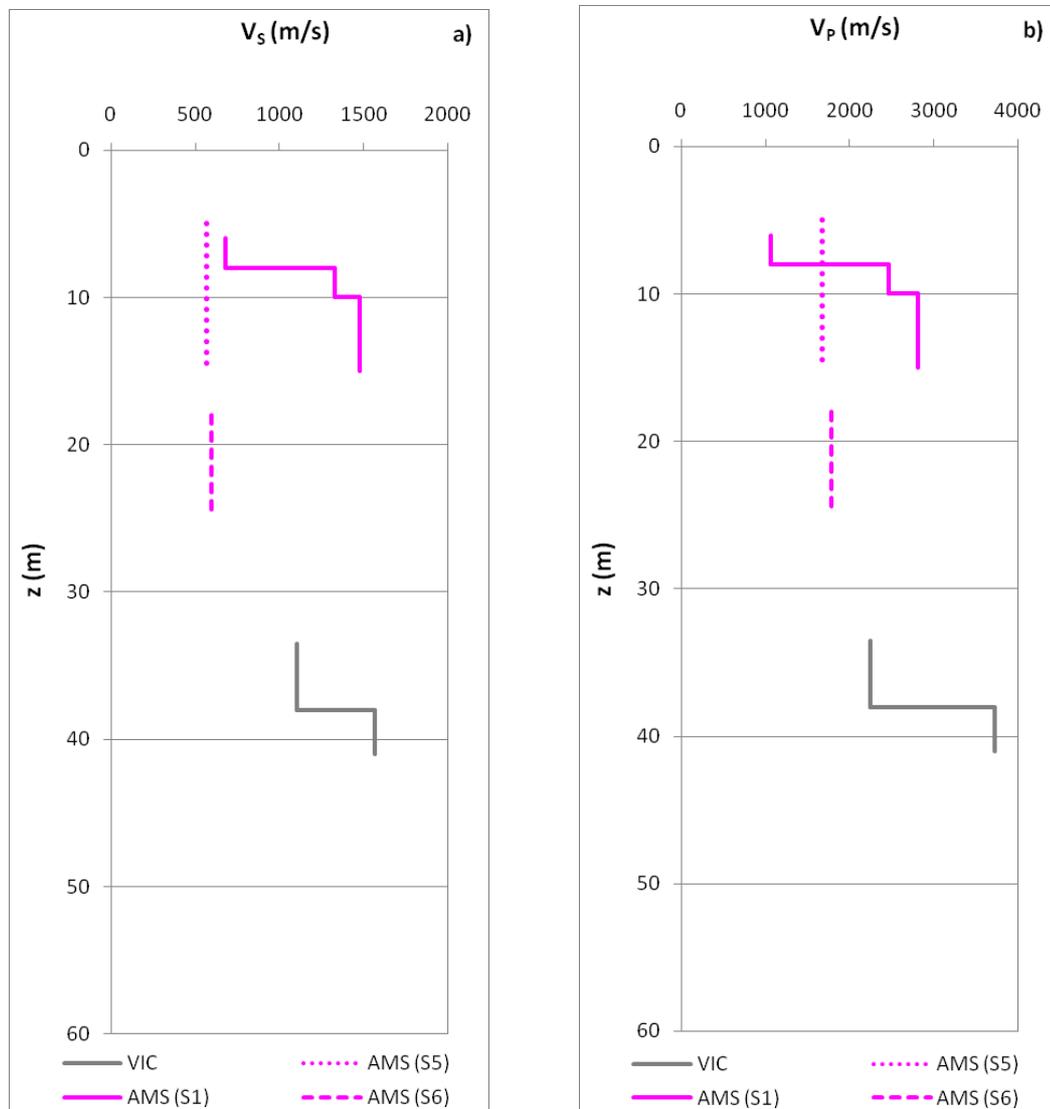


Figura 2.5 – Profili di velocità delle onde di taglio (a) e longitudinali (b) con la profondità ottenuti da prove down-hole per le Marne di Vicchio (VIC) (linea grigia) e per le Arenarie di Monte Senario (AMS) (linea rosa).

Le Marne di Vicchio, i cui valori di velocità sono stati rilevati dalla DH-S2 effettuata in località Case Caldetta (Figura 2.5, linea grigia), dove risultano per un ampio tratto in affioramento, costituiscono nell'ambito della presente analisi il bedrock sismico, oltrechè quello geologico.

In assenza di dati più specifici, relativamente alla caratterizzazione di questa formazione, si è fatto prevalentemente ricorso a valori di letteratura; così ad esempio il peso di volume γ attribuito alla roccia è pari a $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$.

Come affermato in precedenza, noti i valori di γ , e dunque di ρ , e di 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. Essendo però 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 ogni livello deformativo.

Nella modellazione tuttavia, pur mantenendo invariata l'assunzione di bedrock elastico, è stata introdotta la presenza di uno strato di alterazione del bedrock marnoso (indicato nel seguito con VIC_{alt}), al quale è stato attribuito lo stesso peso di volume $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$, valori di V_s e V_p rispettivamente pari a 1105 m/s e 2250 m/s e $D_0 = 2\%$.

Le Arenarie di Monte Senario (AMS), che affiorano estesamente nel centro storico di Vicchio, pur costituendo un substrato dal punto di vista geologico, non possono considerarsi tali dal punto di vista geotecnico e sismico. Esse infatti possiedono caratteristiche più simili a quelle di un terreno duro che di una roccia, e tali sono anche i valori di velocità delle onde sismiche rilevati dalle prove down-hole (Figura 2.5, linea rosa) e dalla sismica a rifrazione. Tale substrato presenta velocità ascrivibili ad un bedrock sismico solo nella stesa St1 ed anche la prova DH-S1 restituisce valori di V_s superiori a 1330 m/s. Nelle altre stese, sia quelle ubicate nel capoluogo, sia quelle collocate nella zona produttiva ad ovest, le Arenarie di Monte Senario presentano valori di velocità molto vicini a quelli massimi attribuite all'unità MGO2s2. Dunque i valori elevati di V_s registrati in corrispondenza del centro storico sono qui limitati e a livello metodologico l'estensione di questo dato all'intera area di indagine costituirebbe un grave errore. Poiché l'alterazione del materiale non interessa solo una porzione limitata e circoscritta, ma al contrario risulta un fenomeno diffuso, esteso al complesso del materiale, fatta eccezione per la porzione in affioramento in prossimità del centro storico, ai fini della modellazione l'AMS non può costituire il bedrock sismico.

Da ciò consegue l'impossibilità di attribuire a questo materiale un comportamento approssimativamente elastico lineare o addirittura rigido e la necessità di adottare delle curve di decadimento e di smorzamento più adatte a descriverne le caratteristiche meccaniche e le capacità dissipative. In assenza di prove di colonna risonante effettuate su campioni appartenenti allo strato di alterazione di AMS (indicato nel seguito con AMS_{alt}), anziché adottare delle curve tratte dalla letteratura, sono stati utilizzati i risultati di una prova di colonna risonante effettuata sul campione S10-SH2 prelevato all'interno della Formazione di Sillano presso Barberino di Mugello, ai quali sono stati adattati i modelli di Ramberg e Osgood (1943) e di Yokota et al (1981) (equazioni 2.1 e 2.2).

Per quanto riguarda il peso di volume si è attribuito alla formazione il valore $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$.

2.2.2. Depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello (MGO2a2, MGO2s2)

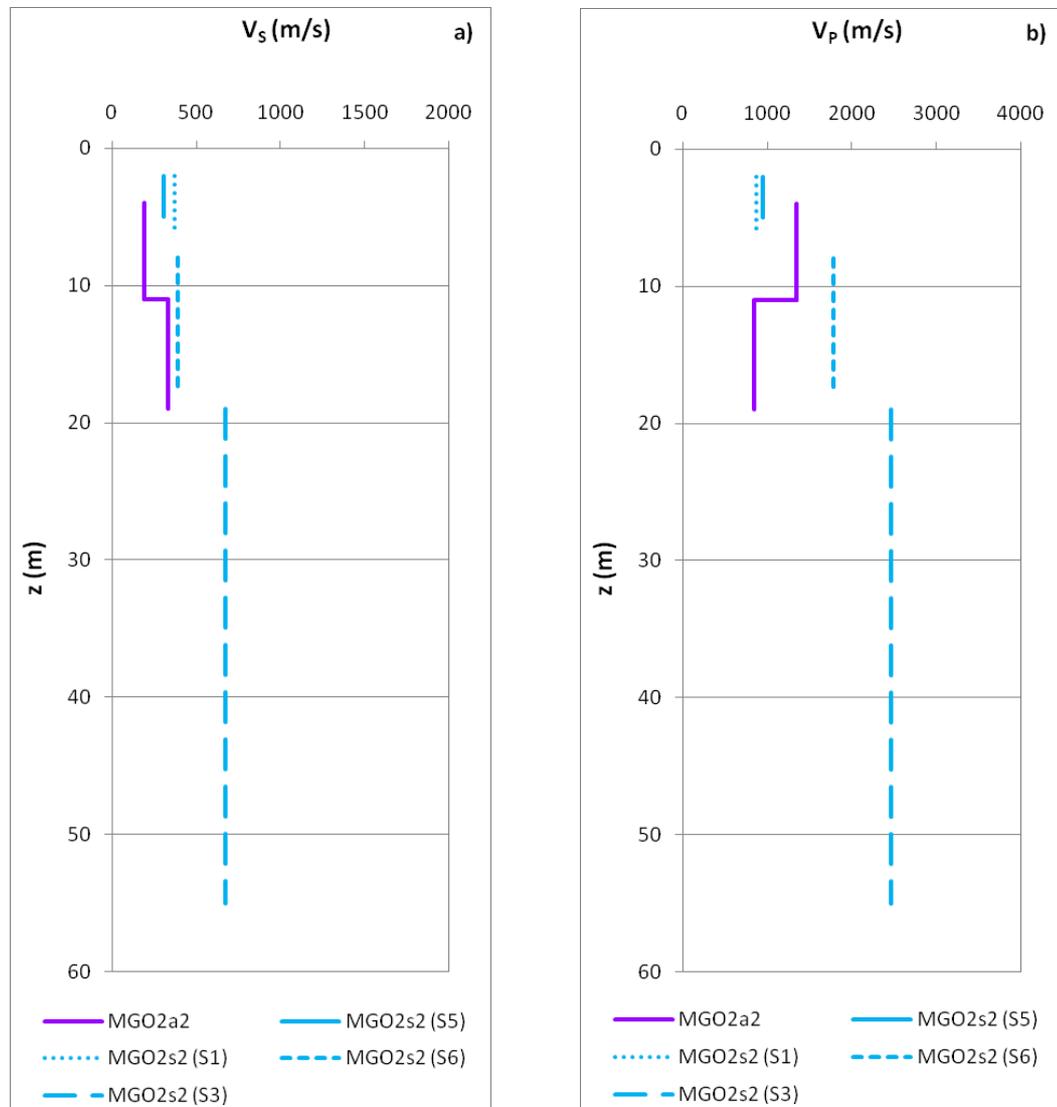


Figura 2.6 – Profili di velocità delle onde di taglio (a) e longitudinali (b) con la profondità ottenuti da prove down-hole per i depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello (MGO2a2 si riferisce alla facies argillosa, in viola, MGO2s2 indica la facies sabbiosa, in azzurro).

I depositi fluvio-lacustri costituiscono la principale formazione nell'area di studio, raggiungendo spessori particolarmente cospicui, fino a 150 m circa, ricoperti per ampi tratti da uno strato di spessore molto più esiguo di depositi alluvionali superficiali. In sostanza nell'area di Vicchio capoluogo l'intero deposito, i cui effetti stratigrafici sono stati valutati attraverso le analisi di risposta sismica locale, appartiene a questa formazione.

Le prove down-hole (Figura 2.6), ma soprattutto quelle di sismica a rifrazione hanno evidenziato la presenza di due sismostrati con differenti parametri geofisici: uno strato superiore, prevalentemente argilloso (MGO2a2), con spessore da pochi metri fino a circa 50 m e con valori di V_s compresi tra 190 e 330 m/s ed uno strato inferiore (MGO2s2), costituito da materiale prevalentemente sabbioso con intercalazioni ghiaiose e velocità V_s comprese tra 310 e 670 m/s.

Per caratterizzare questo materiale non è stato necessario ricorrere a valori di letteratura, ma è stato sufficiente adottare i risultati delle analisi di laboratorio effettuate sui campioni dei sondaggi S3 ed S6 eseguiti a Vicchio.

Per quanto riguarda il peso di volume è stato utilizzato un valore $\gamma = 19.89 \text{ kN/m}^3$ per il litotipo MGO2a2, mentre per MGO2s2 è stato adottato un valore $\gamma = 19.77 \text{ kN/m}^3$ (γ da prove di classificazione, Tabella 2.2).

In relazione alle curve di decadimento e di smorzamento sono stati utilizzati i risultati di due prove di colonna risonante (RC) effettuate sui campioni S3-SH2 ed S6-SH2 prelevati a Vicchio, ai quali sono stati adattati il modello di Ramberg e Osgood (1943) e il modello di Yokota et al. (1981) (equazioni 2.1 e 2.2).

2.2.3. Depositi fluviali del Bacino del Mugello (SIV), depositi alluvio-colluviali (e3s, bs) e depositi antropici (hr)

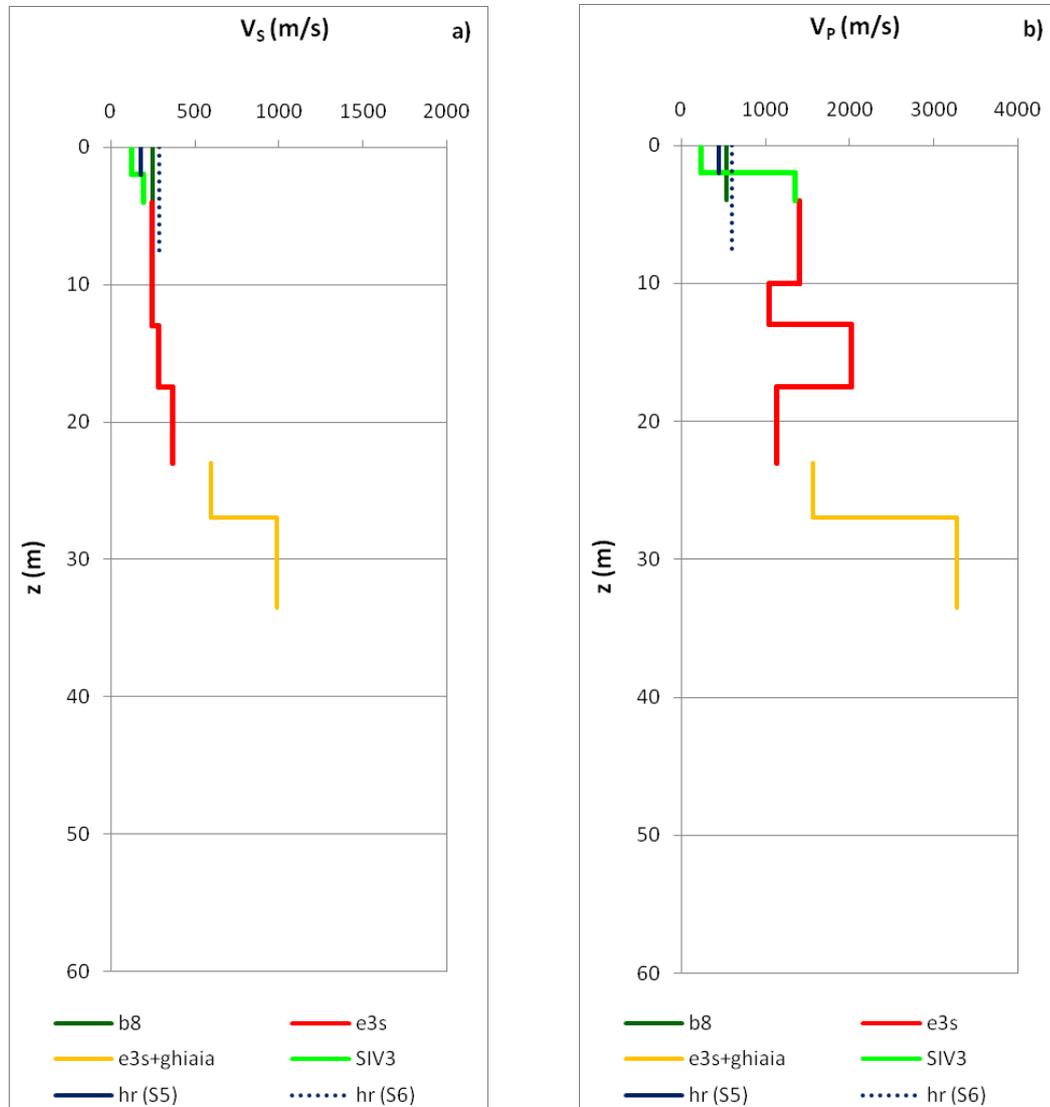


Figura 2.7 – Profili di velocità delle onde di taglio (a) e longitudinali (b) con la profondità ottenuti da prove down-hole per le formazioni SIV, bs, e3s (ed e3s+ghiaia) e hr.

I depositi alluvionali terrazzati coprono con spessori relativamente sottili (solo qualche metro) i depositi fluvio-lacustri in gran parte del sub-bacino di Vicchio ed in misura minore anche a Case Caldetta. La copertura è costituita prevalentemente dall'Unità di Sagginale (SIV3) e dall'Unità di Luco di Mugello (SIV2) mentre l'Unità di Scarperia (SIV1), la più antica, è scarsamente presente nell'area in esame. In corrispondenza della porzione a sud e ad est del centro abitato tali depositi poggiano direttamente sul substrato litoide, mentre nella porzione centrale nord e nord-ovest si trovano al di sopra dei depositi fluvio-lacustri con i quali vanno a formare un deposito piuttosto profondo, come già evidenziato.

Viste le difficoltà derivanti dall'eventualità di modellare in modo differenziato le unità SIV2 e SIV3, che sembrano sostanzialmente avere lo stesso comportamento, oltre ad essere costituite dallo stesso

tipo di terreno, si è deciso di attribuire ad entrambe le medesime curve di decadimento e di smorzamento. In assenza di prove di colonna risonante effettuate su campioni prelevati all'interno del SIV a Vicchio, sono stati utilizzati i risultati di una prova di colonna risonante effettuata sul campione S5-SH1 appartenente alla medesima formazione presente nell'area di Rufina.

Per quanto riguarda il peso di volume si è attribuito a SIV3 il valore $\gamma = 19.36 \text{ kN/m}^3$, mentre per SIV2 è stato utilizzato il valore $\gamma = 20.51 \text{ kN/m}^3$ (γ da prove di classificazione, Tabella 2.2).

Per i depositi alluvio-colluviali, soltanto i depositi palustro-lacustri di sottosuolo, $e3_s$, sono stati caratterizzati in modo approfondito. All'interno di questa formazione è stato estratto un campione indisturbato sottoposto a prova di colonna risonante, per cui le curve di decadimento del modulo di taglio e di incremento del rapporto di smorzamento utilizzate nell'analisi della RSL sono quelle ottenute dai dati sperimentali relativi al campione S2-SH1 di Case Caldeta.

Dalla prova down-hole effettuata in corrispondenza del sondaggio S2 è emersa la presenza, in prossimità della zona di contatto con le Marne di Vicchio, di uno strato con forte presenza di ghiaia, il quale è stato caratterizzato in modo diverso, ricorrendo all'uso di modelli empirici di letteratura. In particolare si è scelto di utilizzare la curva di decadimento di Rollins (2000) e la curva di smorzamento di Rollins et al. (1998) espresse dalle relazioni 2.3 e 2.4.

Il valore del peso di volume γ impiegato per il litotipo $e3_s$ è pari a 19.27 kN/m^3 , mentre quello utilizzato per lo stesso litotipo contenente materiale ghiaioso ($e3_s + \text{ghiaia}$) è 20.51 kN/m^3 (γ da prove di classificazione, Tabella 2.2).

Ai depositi eluvio-colluviali, denominati con la sigla b_s , è stato assegnato un peso di volume γ pari a 19.27 kN/m^3 , mentre le curve ad esso attribuite sono quelle di Rollins (2000) e Rollins et al. (1998) del litotipo $e3_s + \text{ghiaia}$.

Infine è stato caratterizzato anche il sottile strato di riporto h_r , al quale è stato assegnato $\gamma = 15.52 \text{ kN/m}^3$ (γ da prove di classificazione, Tabella 2.2); in relazione alle curve di decadimento e di smorzamento sono stati utilizzati i risultati di una prova RC effettuata sul campione S6-SH1 prelevato a Vicchio, ai quali sono stati adattati il modello di Ramberg e Osgood (1943) ed il modello di Yokota et al. (1981) secondo le equazioni 2.1 e 2.2.

Tutti i parametri di adattamento ai dati sperimentali dei modelli impiegati per la rappresentazione di $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$ sono riportati nella Tabella 2.4. Nell'ultima colonna della tabella è indicato il campione sul quale è stata effettuata la prova di colonna risonante dalla quale sono stati estratti i dati sperimentali utilizzati.

Nella Figura 2.8 sono rappresentate per tutti i litotipi presenti nell'area di studio e sopra descritti le curve di decadimento della rigidità (Figura 2.8 a) e di incremento del rapporto di smorzamento (Figura 2.8 b) in funzione della deformazione di taglio.

Tabella 2.4 – Tabella riepilogativa dei parametri di adattamento ai dati sperimentali dei modelli utilizzati per la definizione delle curve di decadimento e di smorzamento.

Unità	Parametri curva $G(\gamma)/G_0$	Parametri curva $D(\gamma)$	Colonna Risonante (RC)
b_8	eq. (2.3)	eq. (2.4)	-
$e3_s + \text{ghiaia}$	eq. (2.3)	eq. (2.4)	-
$e3_s$	eq. (2.1) C = 986.81 R = 3.02	eq. (2.2) $D_{\max} = 18.54$ $\lambda = -1.73$	S2-SH1
$SIV2$	eq. (2.1) C = 1317.95 R = 2.54	eq. (2.2) $D_{\max} = 26.83$ $\lambda = -2.42$	S5-SH1 (Rufina)
$SIV3$	eq. (2.1) C = 1317.95 R = 2.54	eq. (2.2) $D_{\max} = 26.83$ $\lambda = -2.42$	S5-SH1 (Rufina)
h_r	eq. (2.1) C = 509.45 R = 2.54	eq. (2.2) $D_{\max} = 21.98$ $\lambda = -1.93$	S6-SH1
$MGO2a2$	eq. (2.1) C = 1208.93 R = 3.06	eq. (2.2) $D_{\max} = 26.76$ $\lambda = -2.39$	S3-SH2
$MGO2s2$	eq. (2.1) C = 449.16 R = 2.52	eq. (2.2) $D_{\max} = 19.85$ $\lambda = -1.23$	S6-SH2
AMS_{alt}	eq. (2.1) C = 17049.04 R = 3.12	eq. (2.2) $D_{\max} = 16.13$ $\lambda = -0.86$	S10-SH2 (Barberino)
AMS	$G(\gamma)/G_0 = 1$	$D(\gamma) = 2\%$	-
VIC_{alt}	$G(\gamma)/G_0 = 1$	$D(\gamma) = 2\%$	-

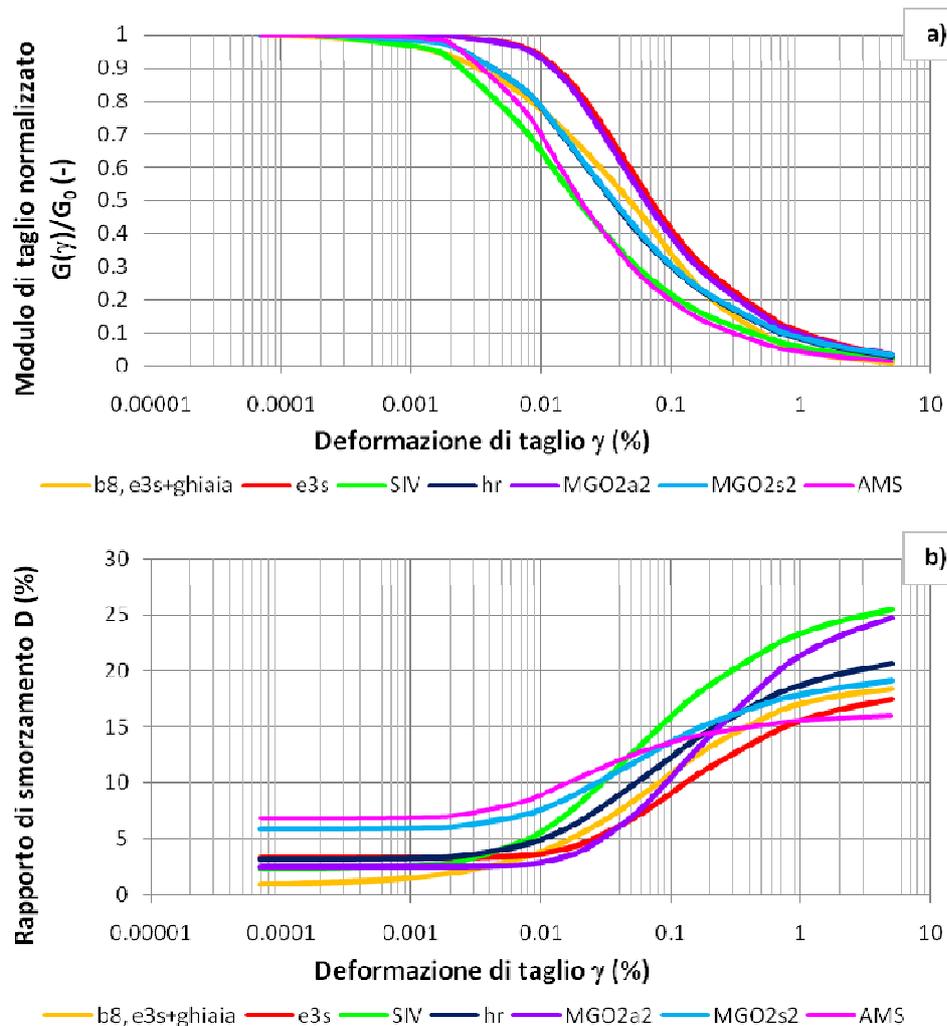


Figura 2.8 – Curve di decadimento della rigidezza (a) e di incremento del rapporto di smorzamento (b) con la deformazione di taglio ottenute per le unità litologiche presenti nell'area di Vicchio.

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 (ampiezza, durata, contenuto in frequenza e periodo fondamentale), possono essere così schematizzati:

- *Effetti stratigrafici 1D: sono legati alla successione stratigrafica e 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 del quale si riferisce 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 (Hudson et al., 1994); tuttavia, su alcune verticali nell'area di Vicchio capoluogo è stata eseguita anche un'analisi monodimensionale per mezzo del codice di calcolo STRATA (Kottke & Rathje, 2008).

Nel seguito è fornita una descrizione sintetica dei due codici utilizzati.

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 20 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 in m, la velocità V_s minima delle onde di taglio nel singolo strato in m/s ed infine il coefficiente di riduzione K , per il quale si è adottato un valore pari a 5.

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 assegnati 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.

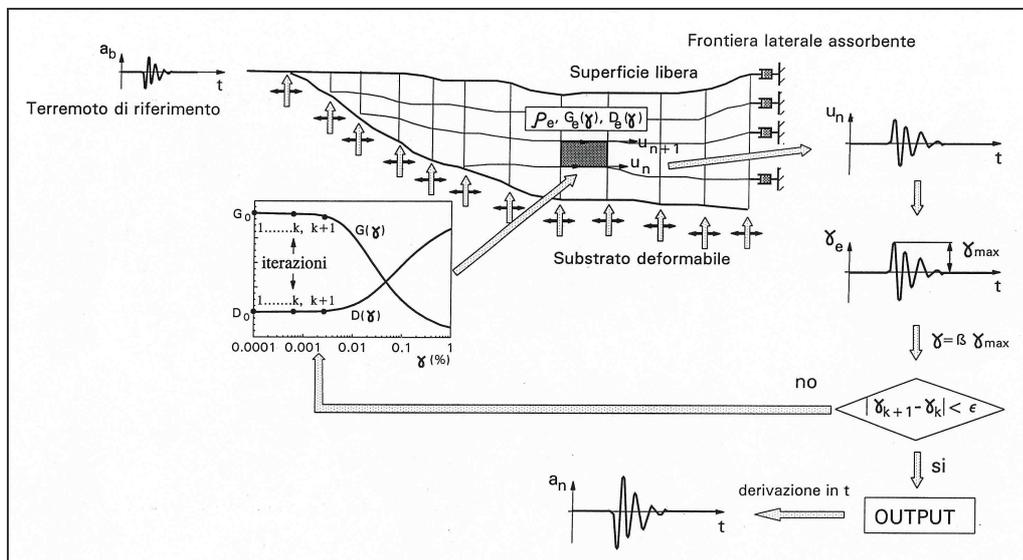


Figura 3.1: Schema operativo del codice di calcolo QUAD4M.

3.2. Codice di calcolo STRATA

STRATA è un codice monodimensionale che implementa la procedura utilizzata dal codice di calcolo SHAKE91 (Idriss & Sun, 1972) ed esegue analisi della RSL in campo elastico lineare e lineare equivalente. Questo software consente l'utilizzo come file di input sia di serie temporali sia di sequenze generate attraverso la Random Vibration Theory (RVT) e permette di modellare la risposta del terreno lungo la verticale fornendo all'utente un'ampia scelta di output.

In questo caso ovviamente, trattandosi di un codice 1D, è possibile indagare la risposta limitatamente alle verticali esplorate e dunque evidenziare i soli effetti di amplificazione stratigrafici. Queste analisi sono state condotte come supplemento a quelle effettuate mediante il software QUAD4M, con l'obiettivo di operare un confronto tra le due metodologie in un intorno delle verticali esplorate. Tale confronto è stato effettuato in particolare per la Sezione 2 e la Sezione 3 di Vicchio capoluogo, utilizzando per STRATA lo stesso modello geotecnico alla base della modellazione effettuata con QUAD4M. Inoltre il deposito, lungo le verticali selezionate, è stato discretizzato utilizzando lo stesso criterio di ottimizzazione già impiegato per la suddivisione in altezza degli elementi della mesh adottata per le analisi con QUAD4M.

In questo metodo la verticale di indagine è schematizzata come una colonna multistrato continua e ad ogni sottostrato, considerato omogeneo a comportamento visco-elastico lineare, è applicata l'equazione della trave a taglio:

$$\rho_i \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = G_i \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} + \eta_i \cdot \frac{\partial^3 u_i}{\partial z^2 \partial t} \quad \text{con } \eta_i = \frac{2G_i D_i}{\omega_i}$$

Il problema è risolto nel dominio delle frequenze, imponendo la congruenza degli spostamenti al contatto tra due strati successivi e la condizione $\tau = 0$ sulla superficie libera.

La modellazione avviene quindi discretizzando la verticale in un numero finito di sottostrati; a ciascuno di essi si assegnano lo spessore h_i , la densità ρ_i , il valore di V_{si} e le curve rappresentative delle leggi di variazione del modulo di taglio normalizzato e del rapporto di smorzamento con la de-

mazione di taglio, ovvero $\frac{G_i(\gamma)}{G_{0i}}$ e $D_i(\gamma)$. Per poter tener conto della non linearità del compo-

tamento del terreno, viene impiegato un approccio lineare equivalente, che consiste in una sequenza di analisi lineari in cui G e D vengono continuamente aggiornati, fino a convergenza, mediante una procedura iterativa. Vengono inoltre definiti per il bedrock sismico la densità ρ , il valore di V_s e quello dello smorzamento iniziale D_0 .

Una volta assegnati quindi gli accelerogrammi di input rappresentati in Figura 1.1, applicando il modello sopra descritto, il cui schema operativo è riportato in Figura 3.2, sono stati richiesti in uscita il profilo di a_{max} con la profondità e gli spettri di risposta elastici in termini di accelerazione al bedrock (outcrop) e sulla superficie del deposito che, come descritto in maniera più approfondita nel seguito della presente relazione, sono necessari alla definizione del fattore di amplificazione utilizzato per stimare la RSL.

Per completare questo confronto è stata infine effettuata la stessa analisi "forzando" il codice di calcolo QUAD4M ad operare in modo monodimensionale, effettuando l'analisi su una colonna di materiale di larghezza pari a 5 m avente le medesime caratteristiche di quella modellata con STRATA. Abbiamo dunque predisposto un file di input nel quale i nodi della colonna di terreno fossero vincolati in maniera tale da riprodurre lo schema della trave a taglio impiegato da STRATA.

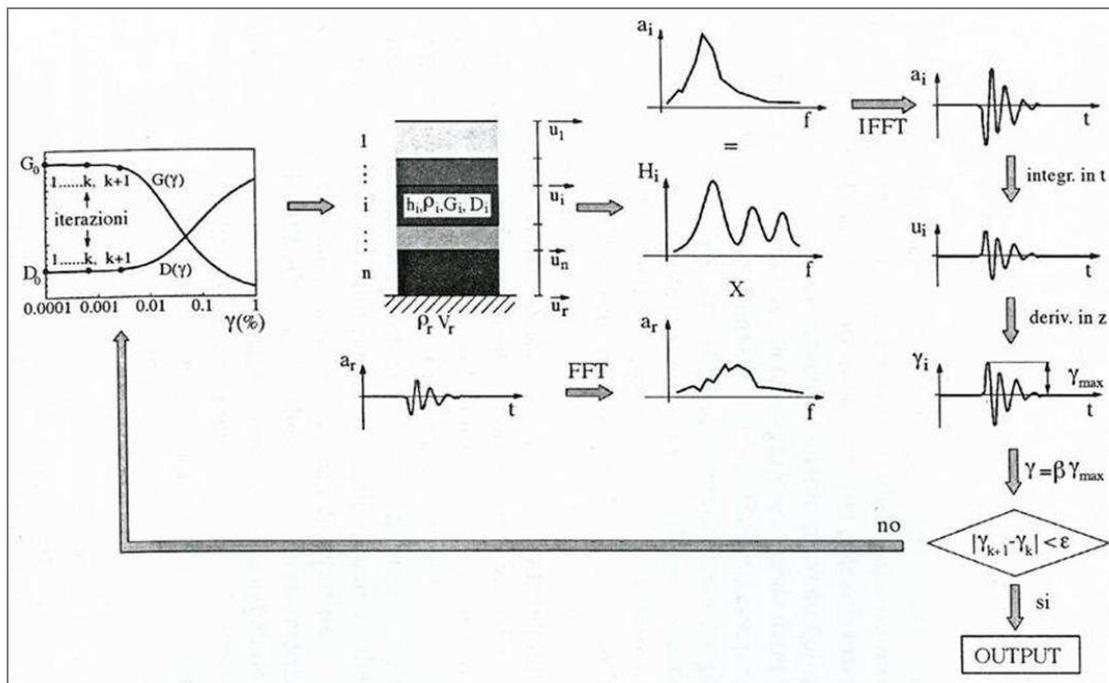


Figura 3.2: Schema operativo del codice di calcolo STRATA.

Invece, per quanto riguarda la Sezione 1 di Vicchio capoluogo, in accordo con il Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica, si è deciso di effettuare solamente analisi di tipo monodimensionale; pertanto sono state identificate alcune verticali significative in corrispondenza delle quali operare le analisi mediante STRATA, caratterizzando i litotipi presenti secondo quanto descritto nel Paragrafo 2.2.

3.3. Modellazione delle sezioni

L'aspetto più impegnativo della modellazione ha riguardato la definizione dei dati di input utilizzati dal programma QUAD4M per le analisi 2D.

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, 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 poligonali alle quali sono state attribuite caratteristiche diverse in considerazione degli studi precedentemente illustrati.

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 poligonali), 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 .

Al modello, costituito dalle sezioni geologiche di riferimento, 4 per Vicchio capoluogo e 4 per l'area produttiva di Case Caldetta, sono stati attribuiti i parametri geotecnici e geofisici descritti nel Capitolo 2 e sintetizzati nelle tabelle riportate precedentemente (Tabella 2.2 riepilogativa dei principali parametri geotecnici, Tabella 2.3 relativa alle indagini geofisiche mediante prove down-hole, Tabella 2.4 riepilogativa dei parametri di adattamento ai dati sperimentali dei modelli utilizzati per la definizione delle curve di decadimento e di smorzamento).

Nel seguito (Figure da 3.3 a 3.10) sono riportate le sezioni oggetto delle analisi della risposta sismica locale, così come fornite dal Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica della Regione Toscana; in Figura 3.11 è mostrata la legenda.

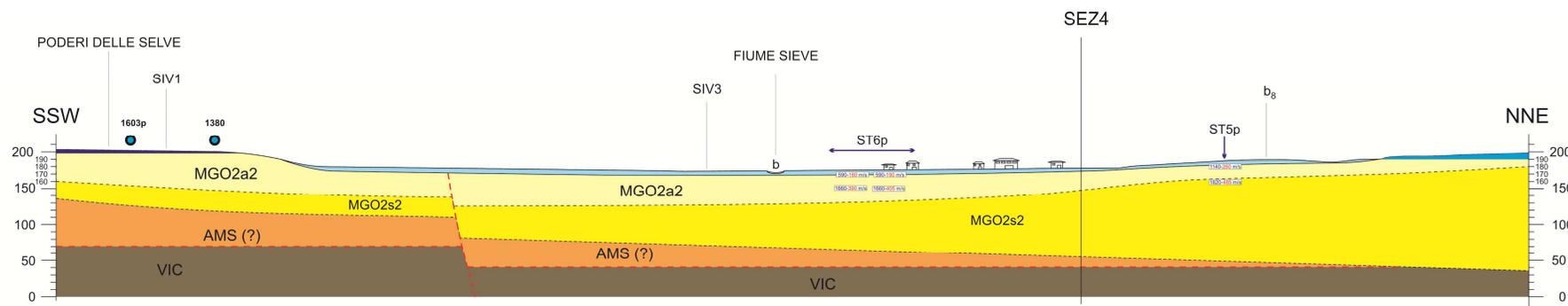


Figura 3.3: Sezione 1 - Vicchio capoluogo.

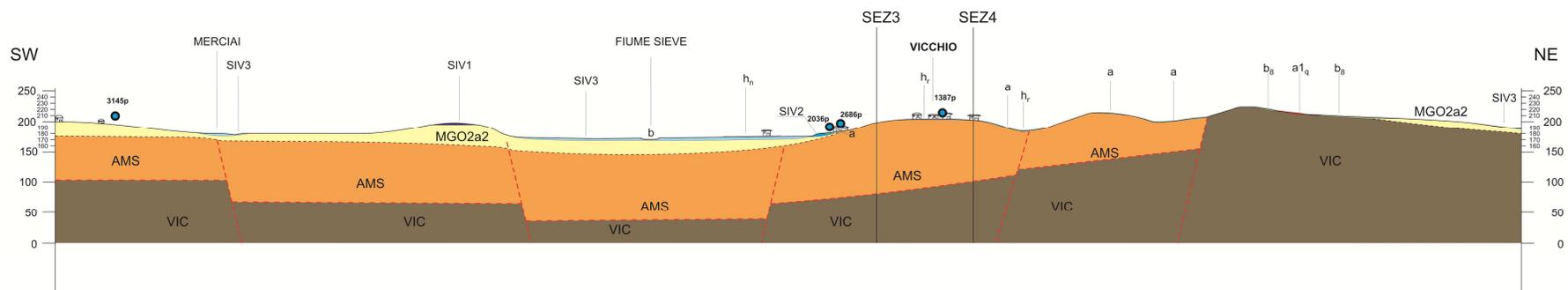


Figura 3.4: Sezione 2 - Vicchio capoluogo.

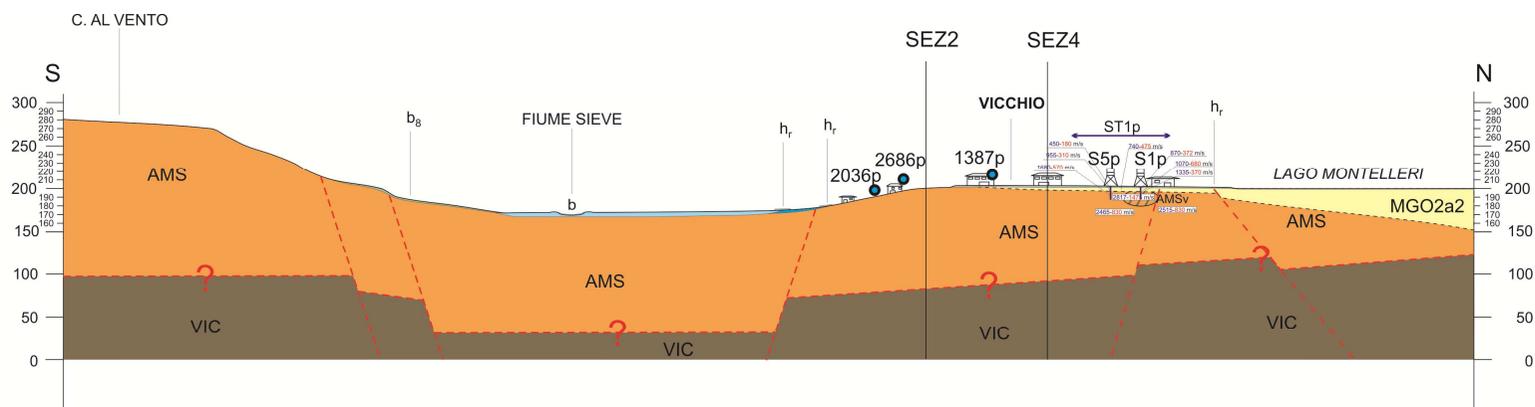


Figura 3.5: Sezione 3 - Vicchio capoluogo.

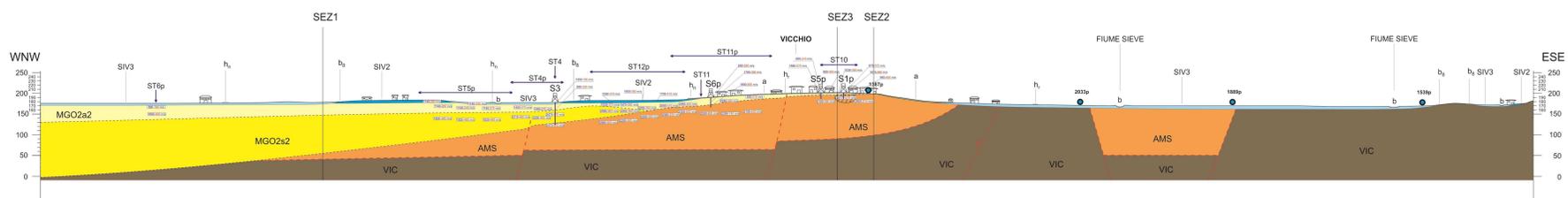


Figura 3.6: Sezione 4 - Vicchio capoluogo.

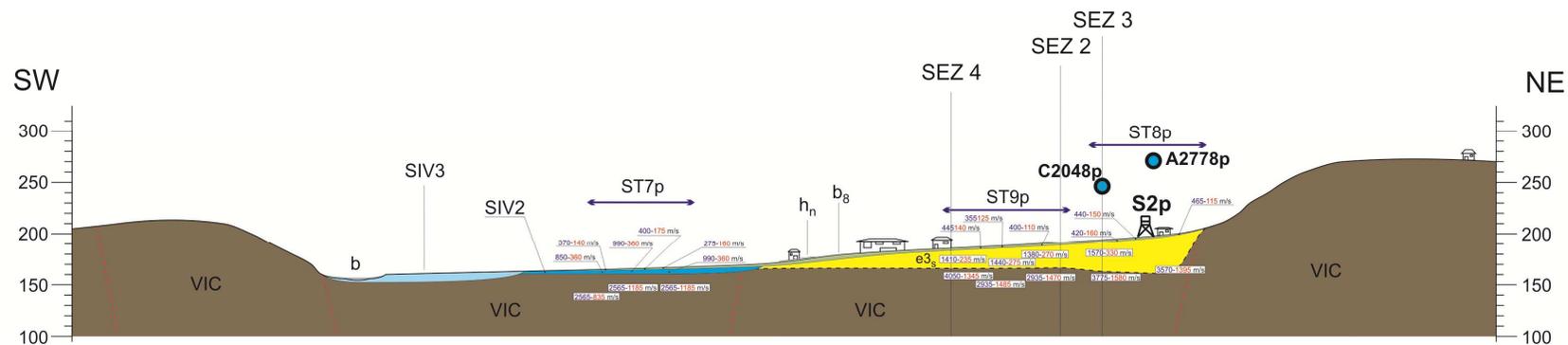


Figura 3.7: Sezione 1 - Vicchio Case Caldetta.

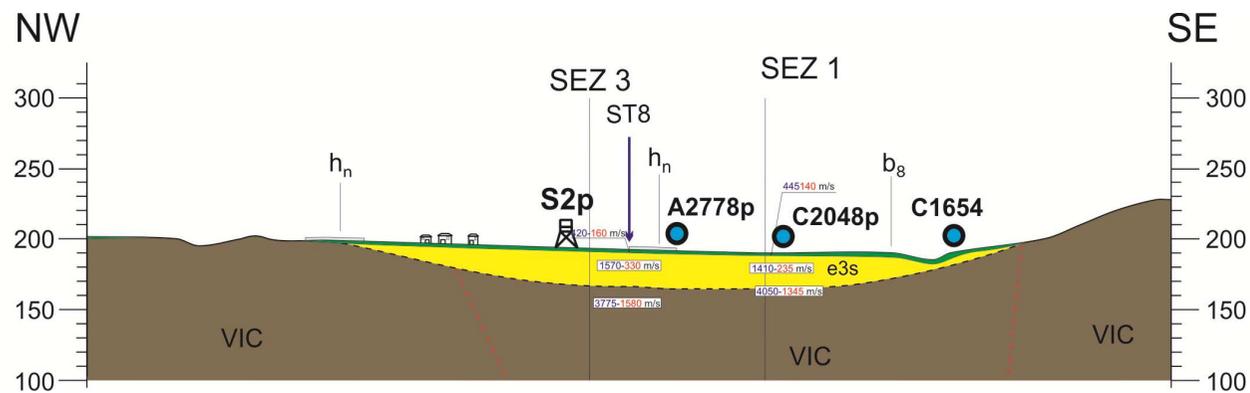


Figura 3.8: Sezione 2 - Vicchio Case Caldetta.

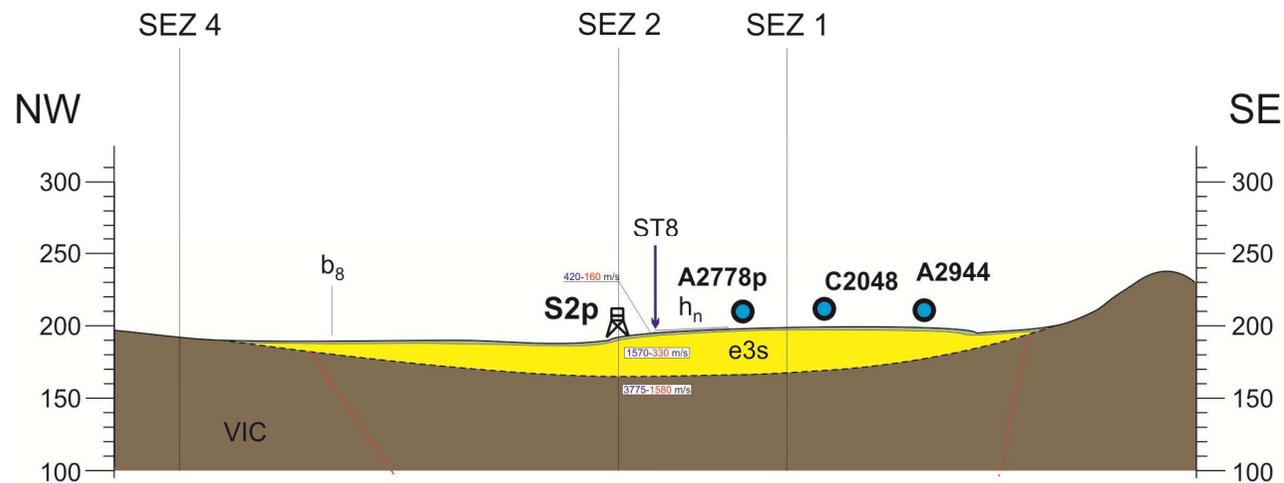


Figura 3.9: Sezione 3 - Vicchio Case Caldeta.

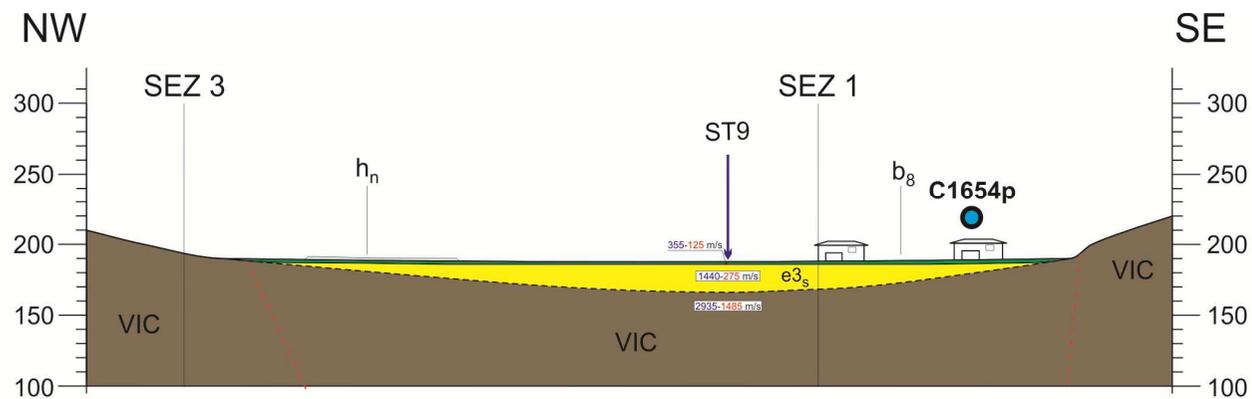


Figura 3.10: Sezione 4 - Vicchio Case Caldeta.

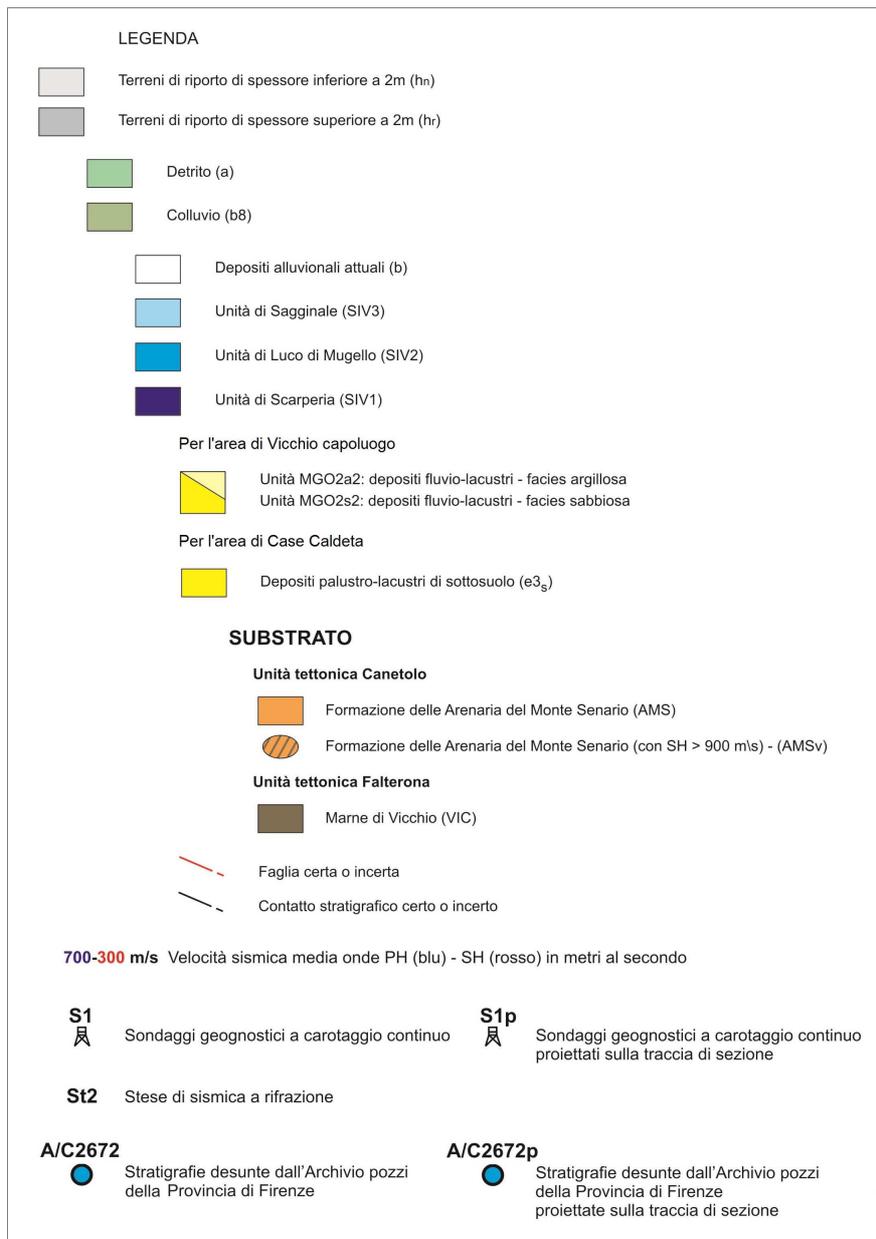


Figura 3.11: Legenda sezioni geologiche Vicchio capoluogo e Vicchio Case Caldetta.

Veniamo ora alla modellazione delle sezioni che interessano l'area di Vicchio, riportando per prime quelle relative all'area di Vicchio capoluogo e successivamente quelle relative a Case Caldetta.

In particolare, nelle Figure 3.13-3.20 sono rappresentate schematicamente le sezioni sulle quali sono state eseguite analisi 2D con il codice QUAD4M, evidenziando la suddivisione in sottostrati operata per le varie formazioni; in queste figure l'asse delle ordinate è esasperato rispetto a quello delle ascisse, accentuando le differenze altimetriche ed 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 (lo "zero"). Dall'osservazione delle Figure 3.13-3.20 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.

3.3.1. Sezione 1 - Vicchio capoluogo

Sulla Sezione 1, localizzata nella parte più occidentale del capoluogo, come anticipato al Paragrafo 3.2, sono state condotte soltanto analisi di tipo monodimensionale, mediante l'impiego dei codici di calcolo STRATA e QUAD4M.

Sono state quindi concordate col Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica le 12 verticali indicate in Figura 3.12 e in corrispondenza di esse è stata effettuata l'analisi della RSL.

Procedendo dalla base verso la superficie del deposito, i litotipi coinvolti nella modellazione sono le Marne di Vicchio (VIC), che costituiscono il bedrock sismico, le Arenarie di Monte Senario (AMS), i depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello, nelle facies sabbiosa e argillosa (rispettivamente MGO2s2 e MGO2a2) ed infine i depositi fluviali del Bacino del Mugello (SIV1, SIV2 e SIV3).

Si osserva che, mentre lo spessore dell'AMS e dell'MGO2a2 va progressivamente a ridursi procedendo da SSW in direzione NNE, fino addirittura a scomparire nel caso delle Arenarie in corrispondenza della verticale V11, l'MGO2s2 registra un incremento di spessore avanzando verso NNE.

Quello che è possibile cogliere dall'analisi dei risultati della modellazione 1D è proprio l'effetto stratigrafico, legato alla successione dei litotipi e alla variazione degli spessori coinvolti, riportati per ciascuna delle verticali indagate nella Tabella 3.1, procedendo dalla superficie del deposito verso il substrato.

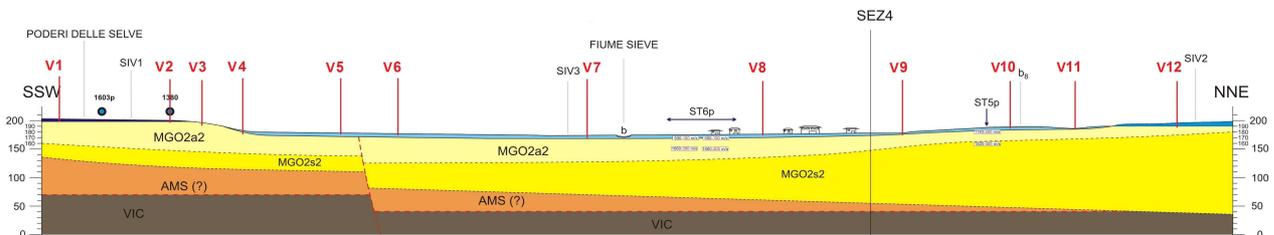


Figura 3.12 – Modello stratigrafico della Sezione 1 - Vicchio capoluogo.

Tabella 3.1 – Successione stratigrafica relativa alle verticali indagate.

Verticale n.	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12
Unità	Δh (m)											
SIV	5	3	-	3	6	7	6	6	1	6	1	6
MGO2a2 (1)	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
MGO2a2 (2)	33	44	44	30	27	38	34	28	15	12	10	9
MGO2s2	25	29	29	28	27	45	58	74	100	116	124	136
AMS _{alt}	63	48	47	44	41	40	29	20	13	7	3	-
VIC _{alt}	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Nella Tabella 3.2 sono stati indicati per ogni litotipo presente i valori di γ , ν , G_0 , D_0 ; nell'ultima colonna della tabella è stato indicato il sondaggio utilizzato per ricavare le curve di decadimento e di smorzamento assegnate al litotipo.

Tabella 3.2 – Caratteristiche dei litostrati relativi alle verticali modellate lungo Sezione 1 - Vicchio capoluogo.

Unità	γ (kN/m ³)	ν (-)	G_0 (MPa)	D_0 (%)	Curva di decadimento/ smorzamento
SIV	19.36	0.49	74	2.260	S5 (Rufina)
MGO2a2 (1)	19.89	0.49	76	2.000	S3
MGO2a2 (2)	19.89	0.41	225	2.000	S3
MGO2s2	19.77	0.46	913	5.660	S6
AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
VIC _{alt}	25.00	0.34	3112	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1$; $D(\gamma) = 2\%$

3.3.2. Sezione 2 - Vicchio capoluogo

La Sezione 2 e la Sezione 3 sono collocate nella parte orientale dell'abitato di Vicchio e su entrambe, come anticipato al Paragrafo 3.2, sono state effettuate analisi di tipo bidimensionale e monodimensionale; queste ultime hanno interessato le 13 verticali (da V1 a V13) indicate in Figura 3.13, la cui ubicazione è stata concordata col CRPS.

Al di sopra del bedrock sismico, rappresentato dalle Marne di Vicchio, si trova un deposito prevalentemente costituito dalle Arenarie di Monte Senario (AMS), le quali risultano in affioramento per un ampio tratto nella parte nord-orientale della sezione, ovvero a destra della figura. In questa area esse assumono, come evidenziato dal sondaggio S1, valori di V_s molto elevati, diversamente da quanto emerge in altre zone dalle indagini down-hole. Pertanto la presenza di un nucleo arenaceo più rigido è stata opportunamente modellata per le Sezioni 2, 3 e 4 nell'intorno del sondaggio S1.

Nella parte centrale e sud-occidentale della sezione le Arenarie di Monte Senario sono sovrastate dai depositi fluvio-lacustri in facies argillosa (MGO2a2), che fatta eccezione per la porzione centrale, dove è presente una copertura ridotta di depositi fluviali costituiti dall'Unità di Sagginale (SIV3), affiorano anch'essi per un ampio tratto.

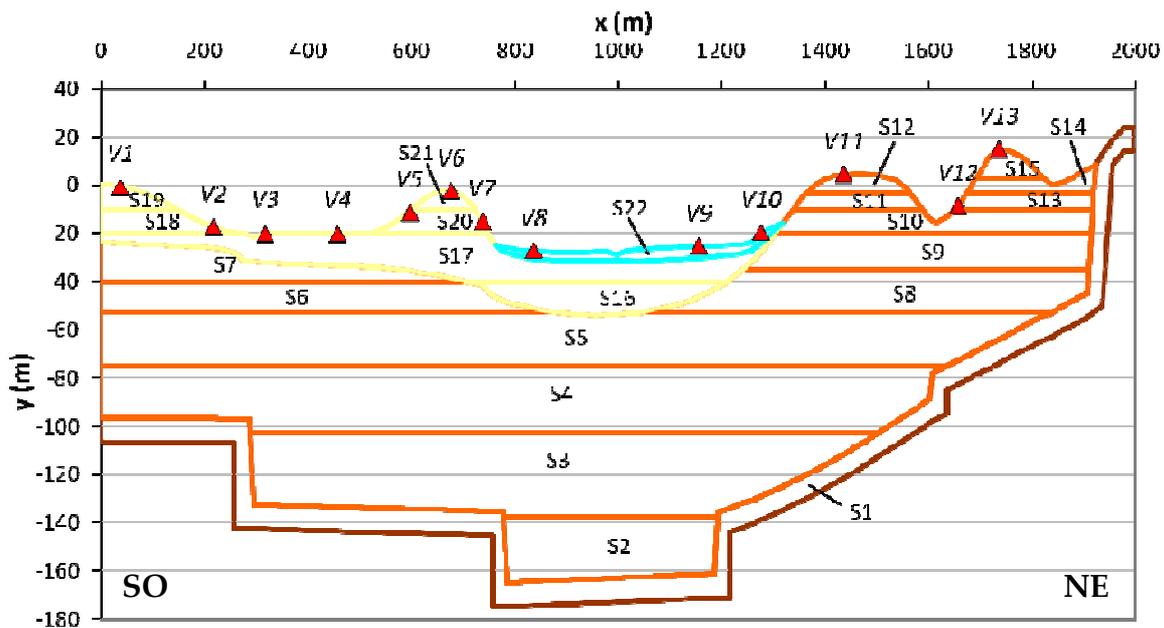


Figura 3.13 – Modello stratigrafico della Sezione 2 - Vicchio capoluogo.

Nella Tabella 3.3 sono stati indicati per ogni litotipo coinvolto, partendo dal bedrock e procedendo verso la superficie del deposito, i valori di γ , ν , G_0 , D_0 ed il sondaggio a partire dal quale sono state determinate le curve di decadimento e di smorzamento (Tabella 2.4).

Tabella 3.3 – Caratteristiche dei litostrati relativi alla Sezione 2 - Vicchio capoluogo.

<i>Strato</i>	<i>Unità</i>	$\gamma(kN/m^3)$	$\nu(-)$	$G_0 (MPa)$	$D_0 (%)$	<i>Curva di decadimento/ smorzamento</i>
S1	VIC _{alt}	25.00	0.34	3112	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2 \%$
S2	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S3	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S4	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S5	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S6	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S7	AMS _{alt}	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
S8	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S9	AMS _{alt}	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
S10	AMS _{alt}	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
S11	AMS	23.00	0.31	5101	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2 \%$
S12	AMS	23.00	0.16	1084	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2 \%$
S13	AMS	23.00	0.31	5101	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2 \%$
S14	AMS	23.00	0.16	1084	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2 \%$
S15	AMS	23.00	0.16	1084	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2 \%$
S16	MGO2a2	19.89	0.41	225	2.000	S3
S17	MGO2a2	19.89	0.49	76	2.000	S3
S18	MGO2a2	19.89	0.49	76	2.000	S3
S19	MGO2a2	19.89	0.49	76	2.000	S3
S20	MGO2a2	19.89	0.49	76	2.000	S3
S21	MGO2a2	19.89	0.49	76	2.000	S3
S22	SIV	19.36	0.49	74	2.260	S5 (Rufina)

Per quanto riguarda invece la modellazione monodimensionale, sono indicati nella Tabella 3.4 i litotipi coinvolti nella modellazione e gli spessori in questione lungo le 13 verticali analizzate, partendo dalla superficie del deposito fino ad arrivare al substrato ed in Tabella 3.5 le caratteristiche assegnate a ciascun litotipo.

Tabella 3.4 – Successione stratigrafica relativa alle verticali indagate.

Verticale n.	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13
Unità	Δh (m)												
SIV	-	-	-	-	-	-	-	3	5	4	-	-	-
MGO2a2 (1)	24	9	12	13	24	36	25	9	10	4	-	-	-
MGO2a2 (2)	-	-	-	-	-	-	2	11	6	-	-	-	-
AMS (1)	16	14	8	7	4	1	-	-	-	8	25	25	25
AMS (2)	57	57	93	93	94	95	93	113	115	95	76	38	29
AMS (3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	18
AMS (4)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	1	7
VIC	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Tabella 3.5 – Caratteristiche dei litostrati relativi alle verticali modellate lungo Sezione 2 - Vicchio capoluogo.

Unità	γ (kN/m ³)	ν (-)	G_0 (MPa)	D_0 (%)	Curva di decadimento/ smorzamento
SIV	19.36	0.49	74	2.260	S5 (Rufina)
MGO2a2 (1)	19.89	0.49	76	2.000	S3
MGO2a2 (2)	19.89	0.41	225	2.000	S3
AMS (1) (*)	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
AMS (2) (*)	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
AMS (3)	23.00	0.16	1084	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1$; $D(\gamma) = 2\%$
AMS (4)	23.00	0.31	5101	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1$; $D(\gamma) = 2\%$
VIC	25.00	0.34	3112	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1$; $D(\gamma) = 2\%$

(*) AMS (1) e AMS (2) costituiscono l'AMS_{alt}

3.3.3. Sezione 3 - Vicchio capoluogo

Sulla Sezione 3, che taglia trasversalmente l'abitato di Vicchio capoluogo, sono state effettuate analisi di tipo bidimensionale e monodimensionale; queste ultime sono state realizzate in corrispondenza delle 13 verticali (da V1 a V13) riportate nella Figura 3.14.

In questa area il deposito è costituito prevalentemente da materiale arenaceo (AMS), caratterizzato da uno spessore molto consistente, che raggiunge i 180 m circa nella zona nord, a sinistra della figura. Questo spessore si riduce progressivamente procedendo verso sud, dove le arenarie sono sovrastate dai depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello in facies argillosa (MGO2a2), mentre nella parte centrale della sezione è presente una sottile copertura di depositi fluviali costituiti dall'Unità di Saggi-nale (SIV3), che rappresenta il terrazzo alluvionale più recente.

Nella Tabella 3.6 sono riportate per i litotipi presenti le caratteristiche necessarie alla modellazione mediante il codice di calcolo bidimensionale QUAD4M. Come già evidenziato per la Sezione 2, anche in questo caso si è tenuto conto della presenza di un nucleo arenaceo più rigido posto in prossimità del sondaggio S1; questo spiega i valori numerici impiegati per i litostrati S9 ed S10.

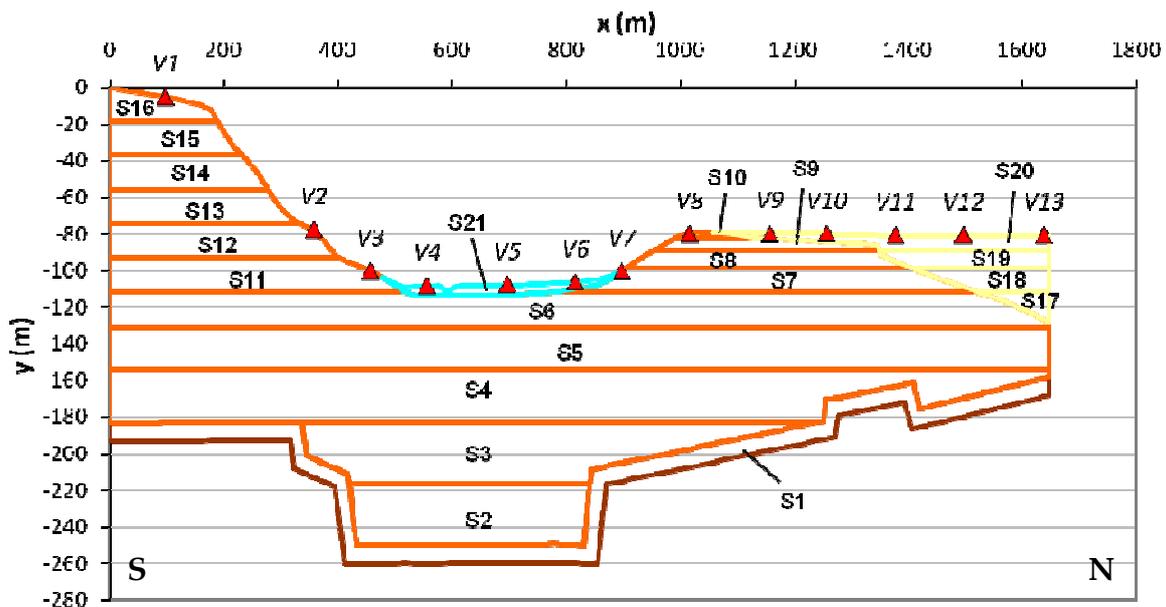


Figura 3.14 – Modello stratigrafico della Sezione 3 - Vicchio capoluogo.

Tabella 3.6 – Caratteristiche dei litostrati relativi alla Sezione 3 - Vicchio capoluogo.

<i>Strato</i>	<i>Unità</i>	$\gamma(kN/m^3)$	$\nu(-)$	$G_0 (MPa)$	$D_0 (%)$	<i>Curva di decadimento/ smorzamento</i>
S1	VIC _{alt}	25.00	0.34	3112	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2 \%$
S2	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S3	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S4	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S5	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S6	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S7	AMS _{alt}	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
S8	AMS _{alt}	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
S9	AMS	23.00	0.31	5101	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2 \%$
S10	AMS	23.00	0.16	1084	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2 \%$
S11	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S12	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S13	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S14	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S15	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S16	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S17	MGO2a2	19.89	0.41	225	2.000	S3
S18	MGO2a2	19.89	0.49	76	2.000	S3
S19	MGO2a2	19.89	0.49	76	2.000	S3
S20	MGO2a2	19.89	0.49	76	2.000	S3
S21	SIV	19.36	0.49	74	2.260	S5 (Rufina)

Nella Tabella 3.7 sono riportati i litotipi coinvolti nella modellazione monodimensionale e gli spessori in gioco lungo le 13 verticali analizzate, partendo dal piano campagna e procedendo verso il bedrock sismico. Anche nelle analisi 1D effettuate per le sezioni 1, 2 e 3 è stata modellata la presenza di uno strato di alterazione del bedrock, al quale è stato attribuito uno spessore di 10 m, caratterizzato da valori di V_s e V_p rispettivamente pari a 1105 m/s e 2250 m/s e da un valore del rapporto di smorzamento $D_0 = 2\%$.

La Tabella 3.8 richiama infine le principali caratteristiche delle formazioni presenti nella sezione in esame.

Tabella 3.7 – Successione stratigrafica relativa alle verticali indagate.

Verticale n.	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13
Unità	Δh (m)												
SIV	-	-	-	5	5	4	-	-	-	-	-	-	-
MGO2a2 (1)	-	-	-	-	-	-	-	-	3	5	14	28	31
MGO2a2 (2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15
AMS (1)	-	-	-	-	-	1	11	23	23	23	16	2	-
AMS (2)	178	125	150	137	137	138	94	86	77	59	52	58	32
AMS (3)	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-
AMS (4)	-	-	-	-	-	-	-	7	6	4	-	-	-
VIC	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Tabella 3.8 – Caratteristiche dei litostrati relativi alle verticali modellate lungo la Sezione 3 - Vicchio capoluogo.

Unità	γ (kN/m ³)	ν (-)	G_0 (MPa)	D_0 (%)	Curva di decadimento/ smorzamento
SIV	19.36	0.49	74	2.260	S5 (Rufina)
MGO2a2 (1)	19.89	0.49	76	2.000	S3
MGO2a2 (2)	19.89	0.41	225	2.000	S3
AMS (1) (*)	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
AMS (2) (*)	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
AMS (3)	23.00	0.16	1084	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1$; $D(\gamma) = 2\%$
AMS (4)	23.00	0.31	5101	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1$; $D(\gamma) = 2\%$
VIC	25.00	0.34	3112	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1$; $D(\gamma) = 2\%$

(*) AMS (1) e AMS (2) costituiscono l'AMS_{alt}

3.3.4. Sezione 4A - Vicchio capoluogo

La Sezione 4, che percorre longitudinalmente l'abitato di Vicchio, 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 4A e 4B, e di analizzarle in maniera separata. Questo "taglio" è avvenuto intorno ai 2300 m circa, in prossimità del tratto in cui il bedrock è sub-affiorante e l'unica copertura presente è costituita da uno strato di pochi metri di depositi fluviali.

La Sezione 4A, che schematizza la zona ovest di Vicchio capoluogo, risulta essere molto articolata, come si desume dalla Figura 3.15. Nella parte più ad ovest si trovano i depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello, nelle due facies argillosa (MGO2a2) e sabbiosa (MGO2s2), mentre ad est il deposito è costituito principalmente dalle Arenarie di Monte Senario (AMS). Procedendo da ovest verso est infatti la progressiva diminuzione degli spessori di MGO2a2 ed MGO2s2 corrisponde ad un incremento dello spessore di AMS.

Se si fa eccezione per un tratto ad est con estensione di circa 600 m, in corrispondenza del quale è presente in affioramento una sottile copertura di depositi antropici (hr), lo strato più superficiale è sempre costituito dai depositi fluviali del Bacino del Mugello; in particolare si osserva un'alternanza tra l'Unità di Sagginale (SIV3) e l'Unità di Luco di Mugello (SIV2).

Nella Tabella 3.9 sono riportate le caratteristiche dei litostrati coinvolti nella modellazione della sezione in esame. I valori numerici utilizzati per i sottostrati S12 ed S13 sono relativi al nucleo di AMS più rigido già evidenziato nel corso delle analisi delle Sezioni 2 e 3.

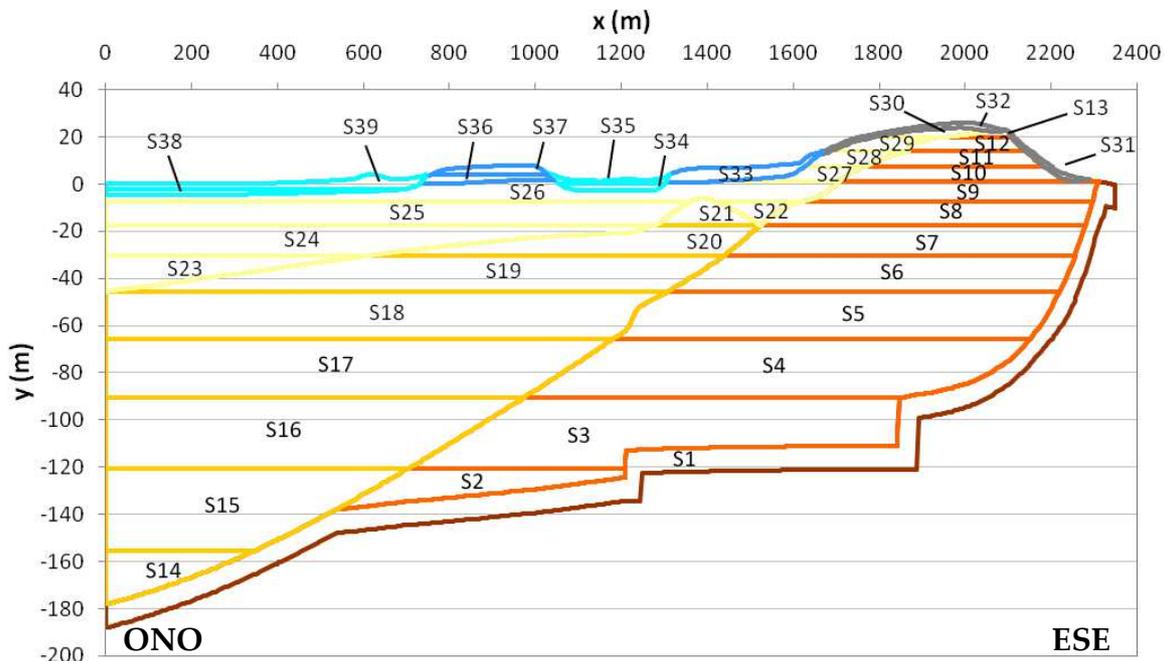


Figura 3.15 – Modello stratigrafico della Sezione 4A - Vicchio capoluogo.

Tabella 3.9 – Caratteristiche dei litostrati relativi alla Sezione 4A - Vicchio capoluogo.

Strato	Unità	$\gamma(kN/m^3)$	$\nu(-)$	$G_0 (MPa)$	$D_0 (%)$	Curva di decadimento/ smorzamento
S1	VIC _{alt}	25.00	0.34	3112	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2 \%$
S2	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S3	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S4	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S5	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S6	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S7	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S8	AMS _{alt}	23.00	0.44	844	6.857	S10 (Barberino)
S9	AMS _{alt}	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
S10	AMS _{alt}	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
S11	AMS _{alt}	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
S12	AMS	23.00	0.31	5101	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2 \%$
S13	AMS	23.00	0.16	1084	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2 \%$
S14	MGO2s2	19.77	0.46	911	5.660	S6
S15	MGO2s2	19.77	0.46	911	5.660	S6
S16	MGO2s2	19.77	0.46	911	5.660	S6
S17	MGO2s2	19.77	0.46	911	5.660	S6
S18	MGO2s2	19.77	0.46	911	5.660	S6
S19	MGO2s2	19.77	0.46	911	5.660	S6
S20	MGO2s2	19.77	0.46	911	5.660	S6
S21	MGO2s2	19.77	0.48	307	5.660	S6
S22	MGO2a2	19.89	0.41	225	2.000	S3
S23	MGO2a2	19.89	0.41	225	2.000	S3
S24	MGO2a2	19.89	0.41	225	2.000	S3
S25	MGO2a2	19.89	0.41	225	2.000	S3
S26	MGO2a2	19.89	0.49	76	2.000	S3
S27	MGO2a2	19.89	0.49	76	2.000	S3
S28	MGO2a2	19.89	0.49	76	2.000	S3
S29	MGO2a2	19.89	0.49	76	2.000	S3
S30	MGO2a2	19.89	0.49	76	2.000	S3
S31	hr	15.52	0.35	133	3.050	S6
S32	hr	15.52	0.35	133	3.050	S6
S33	SIV	20.51	0.41	271	3.110	S5 (Rufina)
S34	SIV	19.36	0.49	74	2.260	S5 (Rufina)
S35	SIV	19.36	0.31	32	2.260	S5 (Rufina)
S36	SIV	20.51	0.41	271	3.110	S5 (Rufina)
S37	SIV	20.51	0.41	271	3.110	S5 (Rufina)
S38	SIV	19.36	0.49	74	2.260	S5 (Rufina)
S39	SIV	19.36	0.31	32	2.260	S5 (Rufina)

3.3.5. Sezione 4B - Vicchio capoluogo

La Sezione 4B (Figura 3.16), che schematizza la zona est di Vicchio capoluogo, è costituita da uno strato di alterazione del bedrock dello spessore di 10 m, sovrastato da una copertura di depositi fluviali del Bacino del Mugello, formati principalmente dall'Unità di Sagginale (SIV3) e dall'Unità di Luco di Mugello (SIV2). Nella parte centrale della sezione si riscontra la presenza di un "cuneo" di Arenarie di Monte Senario che vanno a formare un deposito di spessore molto cospicuo, pari a 120 m circa.

Nella Tabella 3.10 sono stati indicati per ogni litostrato i valori di γ , ν , G_0 , D_0 ed il sondaggio a partire dal quale sono state determinate le curve di decadimento e di smorzamento.

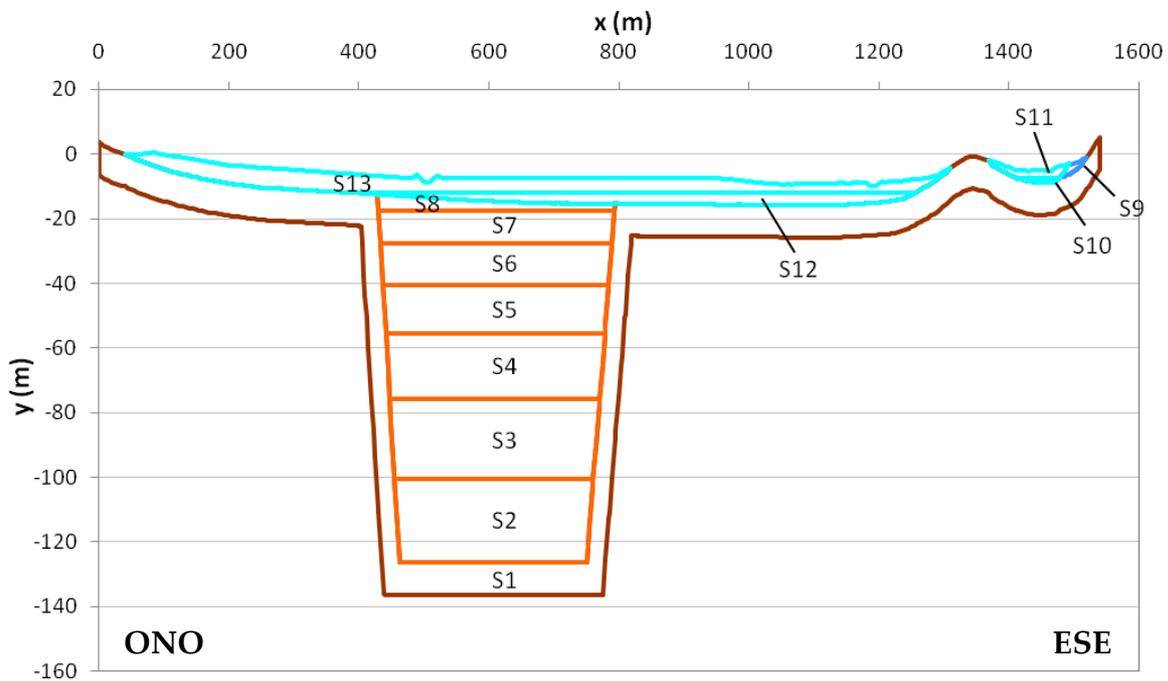


Figura 3.16 – Modello stratigrafico della Sezione 4B - Vicchio capoluogo.

Tabella 3.10 – Caratteristiche dei litostrati relativi alla Sezione 4B - Vicchio capoluogo.

<i>Strato</i>	<i>Unità</i>	$\gamma(kN/m^3)$	$\nu(-)$	$G_0 (MPa)$	$D_0 (%)$	<i>Curva di decadimento/ smorzamento</i>
S1	VIC _{alt}	25.00	0.34	3112	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2 \%$
S2	AMS _{alt}	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
S3	AMS _{alt}	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
S4	AMS _{alt}	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
S5	AMS _{alt}	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
S6	AMS _{alt}	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
S7	AMS _{alt}	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
S8	AMS _{alt}	23.00	0.43	762	6.857	S10 (Barberino)
S9	SIV	19.36	0.49	74	2.260	S5 (Rufina)
S10	SIV	19.36	0.49	74	2.260	S5 (Rufina)
S11	SIV	19.36	0.49	74	2.260	S5 (Rufina)
S12	SIV	19.36	0.49	74	2.260	S5 (Rufina)
S13	SIV	20.51	0.41	271	3.110	S5 (Rufina)

3.3.6. Sezione 1 - Vicchio Case Caldeta

Le sezioni relative alla località Case Caldeta risultano molto differenti rispetto alle sezioni di Vicchio capoluogo per estensione, morfologia e in gran parte anche per i litotipi coinvolti. In questa regione infatti non viene mai evidenziata la presenza né di materiale arenaceo riconducibile alle Arenarie di Monte Senario (AMS), né la presenza dei depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello (MGO2a2 ed MGO2s2).

Come accennato in precedenza, l'area di Case Caldeta è contraddistinta dalla presenza di una copertura di depositi colluviali di versante (b_s) sovrastanti i depositi palustro-lacustri di sottosuolo (e_{3s}); al di sotto di tali depositi si colloca il substrato roccioso, costituito dalle Marne di Vicchio (VIC). La Sezione 1 (Figura 3.17) si differenzia dalle successive per la presenza nella parte sud-ovest (a sinistra in figura) dei depositi fluviali del Bacino del Mugello denominati SIV3 e SIV2, ovvero dell'Unità di Sagginale e dell'Unità di Luco di Mugello.

Nella Tabella 3.11 sono stati indicati per ogni litostrato i valori di γ , ν , G_0 , D_0 ed il sondaggio a partire dal quale sono state determinate le curve di decadimento e di smorzamento. Come anticipato nel Paragrafo 2.2.3, in questo caso è stato necessario fare ricorso a valori di letteratura per descrivere le curve dei depositi eluvio-colluviali (b_s) e dell' e_{3s} con presenza di materiale ghiaioso. Invece, per caratterizzare ai fini della modellazione i depositi palustro-lacustri è stato utilizzato l'unico sondaggio presente nel sito di Case Caldeta, ovvero il sondaggio S2.

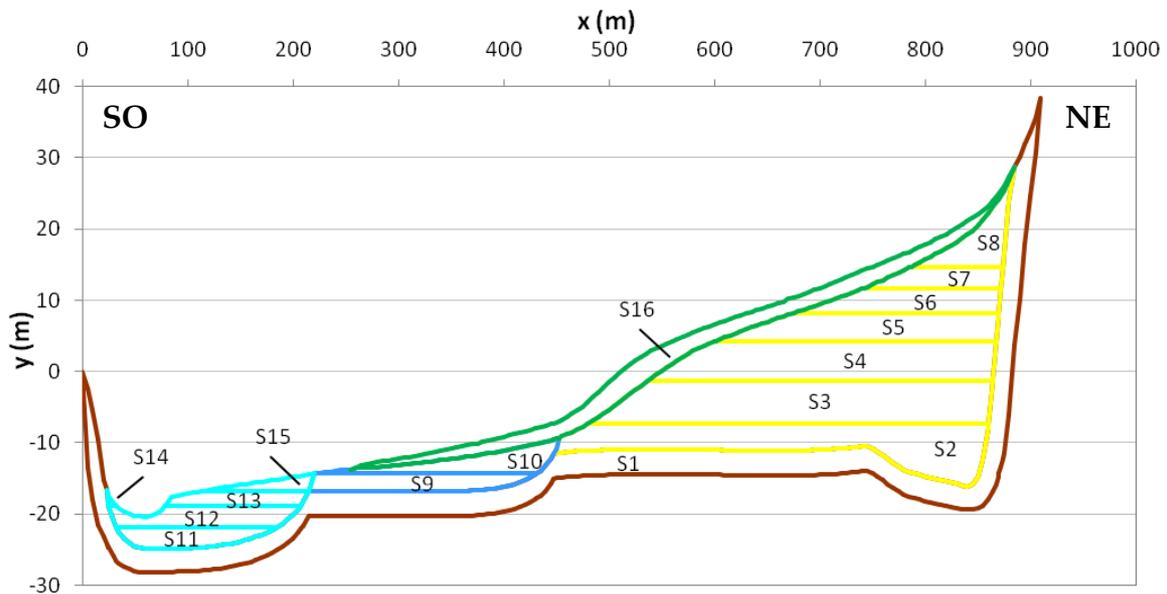


Figura 3.17 – Modello stratigrafico della Sezione 1 - Vicchio Case Caldeta.

Tabella 3.11 – Caratteristiche dei litostrati relativi alla Sezione 1 - Vicchio Case Caldata.

<i>Strato</i>	<i>Unità</i>	$\gamma(kN/m^3)$	$\nu(-)$	$G_0 (MPa)$	$D_0 (%)$	<i>Curva di decadimento/ smorzamento</i>
S1	VIC _{alt}	25.00	0.34	3112	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2 \%$
S2	e3 _s + ghiaia	20.51	0.41	753	0.900	Rollins, 2000; Rollins et al., 1998
S3	e3 _s + ghiaia	20.51	0.41	753	0.900	Rollins, 2000; Rollins et al., 1998
S4	e3 _s	19.27	0.44	269	3.200	S2
S5	e3 _s	19.27	0.49	160	3.200	S2
S6	e3 _s	19.27	0.47	123	3.200	S2
S7	e3 _s	19.27	0.48	123	3.200	S2
S8	e3 _s	19.27	0.48	123	3.200	S2
S9	SIV	20.51	0.41	271	3.110	S5 (Rufina)
S10	SIV	20.51	0.41	271	3.110	S5 (Rufina)
S11	SIV	19.36	0.49	74	2.260	S5 (Rufina)
S12	SIV	19.36	0.49	74	2.260	S5 (Rufina)
S13	SIV	19.36	0.49	74	2.260	S5 (Rufina)
S14	SIV	19.36	0.49	74	2.260	S5 (Rufina)
S15	SIV	19.36	0.49	74	2.260	S5 (Rufina)
S16	b _s	19.27	0.36	123	0.900	Rollins, 2000; Rollins et al., 1998

3.3.7. Sezione 2 - Vicchio Case Caldeta

Le Sezioni 2, 3 e 4 di Case Caldeta mostrano una morfologia sepolta simile tra loro e più regolare rispetto alla Sezione 1, caratterizzata dalla presenza di un substrato marnoso (VIC) sovrastato dai depositi palustro-lacustri di sottosuolo ($e3_s$) e da una copertura superficiale di depositi eluvio-colluviali (b_s).

Tuttavia le differenze nella morfologia superficiale e nello spessore delle coperture danno luogo, come vedremo nel capitolo successivo, a variazioni non trascurabili dal punto di vista dell'amplificazione del moto sismico.

Per quanto riguarda la Sezione 2 (Figura 3.18) la superficie topografica è caratterizzata da una lieve diminuzione di quota procedendo da nord-ovest verso sud-est, ovvero da sinistra verso destra in figura, e dalla presenza del letto di un affluente del Fiume Sieve in prossimità della progressiva 480 m.

La caratterizzazione in campo statico e dinamico, i cui parametri principali sono riassunti nella Tabella 3.12, è stata realizzata facendo riferimento principalmente ai valori desunti dal sondaggio S2.

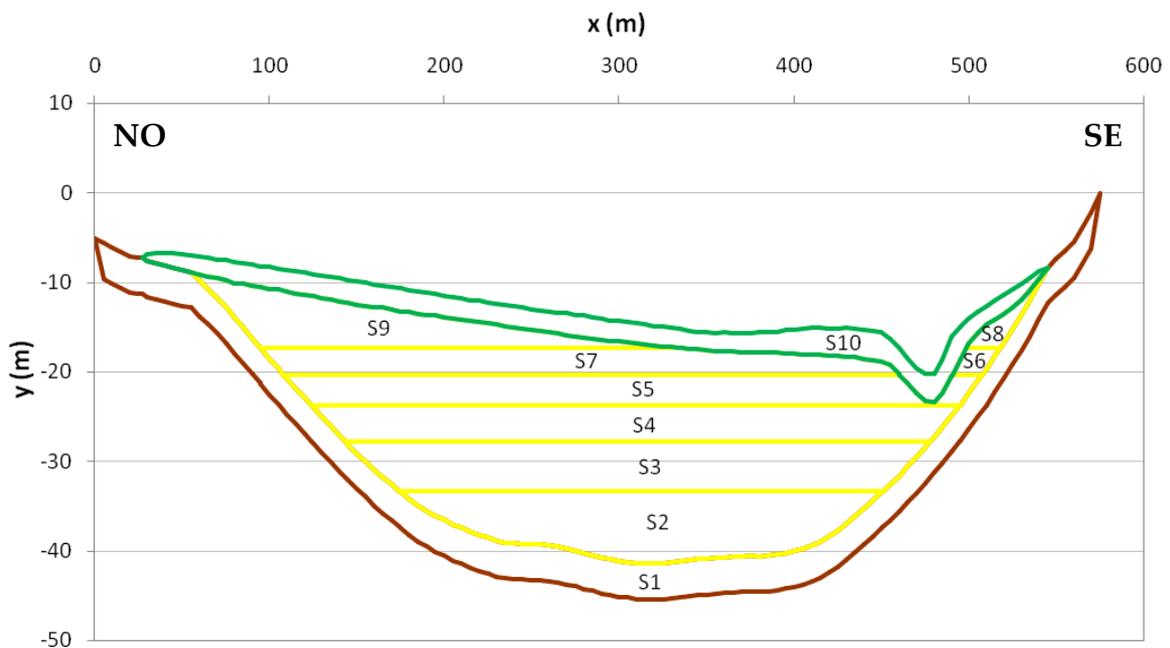


Figura 3.18 – Modello stratigrafico della Sezione 2 - Vicchio Case Caldeta.

Tabella 3.12 – Caratteristiche dei litostrati relativi alla Sezione 2 - Vicchio Case Caldeta.

<i>Strato</i>	<i>Unità</i>	γ (kN/m ³)	ν (-)	G_0 (MPa)	D_0 (%)	<i>Curva di decadimento/ smorzamento</i>
S1	VIC _{alt}	25.00	0.34	3112	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2 \%$
S2	e3 _s + ghiaia	20.51	0.41	753	0.900	Rollins, 2000; Rollins et al., 1998
S3	e3 _s	19.27	0.44	269	3.200	S2
S4	e3 _s	19.27	0.49	160	3.200	S2
S5	e3 _s	19.27	0.47	123	3.200	S2
S6	e3 _s	19.27	0.48	123	3.200	S2
S7	e3 _s	19.27	0.48	123	3.200	S2
S8	e3 _s	19.27	0.48	123	3.200	S2
S9	e3 _s	19.27	0.48	123	3.200	S2
S10	b _s	19.27	0.36	123	0.900	Rollins, 2000; Rollins et al., 1998

3.3.8. Sezione 3 - Vicchio Case Caldeta

La Sezione 3 è contraddistinta da un incremento graduale e progressivo dello spessore dei depositi palustro-lacustri lungo la direttrice NW-SE, ovvero procedendo da sinistra verso destra della Figura 3.19; esso raggiunge il suo valore massimo in prossimità del centro della sezione. La superficie topografica della sezione è invece caratterizzata dalla presenza di una lieve discontinuità altimetrica in corrispondenza della verticale del sondaggio S2p, localizzata in prossimità della progressiva 300m.

In Tabella 3.13 sono riassunti i principali parametri relativi alla caratterizzazione dei materiali in campo statico e dinamico.

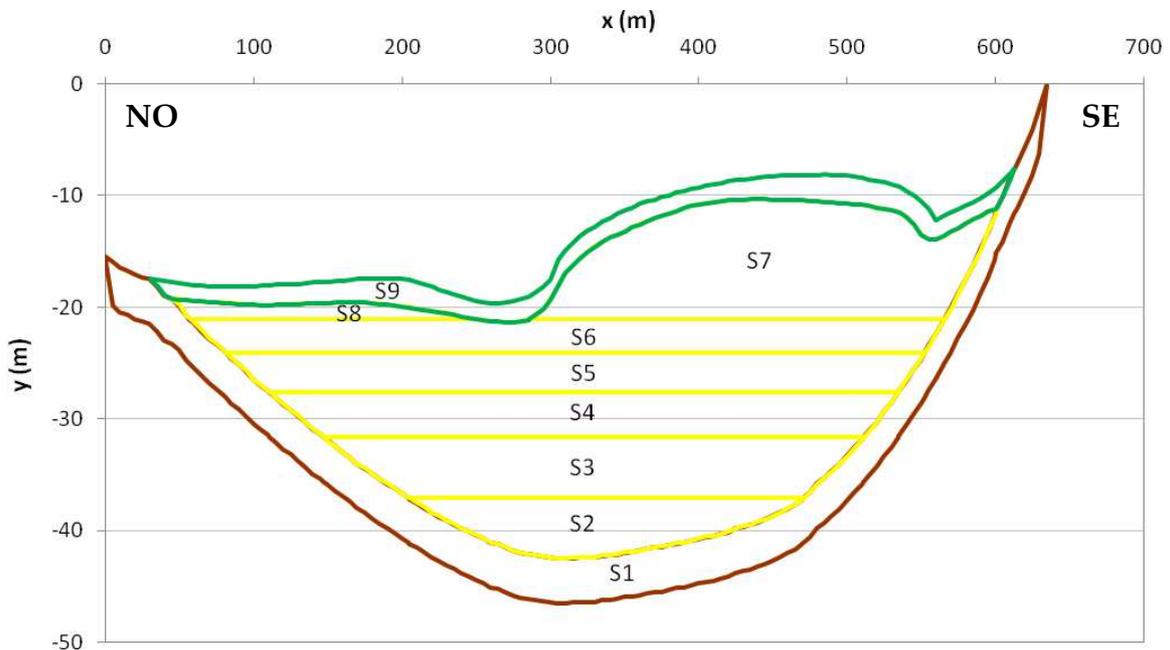


Figura 3.19 – Modello stratigrafico della Sezione 3 - Vicchio Case Caldeta.

Tabella 3.13 – Caratteristiche dei litostrati relativi alla Sezione 3 - Vicchio Case Caldeta.

Strato	Unità	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$\nu(-)$	$G_0(\text{MPa})$	$D_0(\%)$	Curva di decadimento/ smorzamento
S1	VIC _{alt}	25.00	0.34	3112	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2\%$
S2	e3 _s + ghiaia	20.51	0.41	753	0.900	Rollins, 2000; Rollins et al., 1998
S3	e3 _s	19.27	0.44	269	3.200	S2
S4	e3 _s	19.27	0.49	160	3.200	S2
S5	e3 _s	19.27	0.47	123	3.200	S2
S6	e3 _s	19.27	0.48	123	3.200	S2
S7	e3 _s	19.27	0.48	123	3.200	S2
S8	e3 _s	19.27	0.48	123	3.200	S2
S9	b ₈	19.27	0.36	123	0.900	Rollins, 2000; Rollins et al., 1998

3.3.9. Sezione 4 - Vicchio Case Caldeta

In questa sezione il profilo della superficie topografica ha un andamento molto regolare e pressoché orizzontale, mentre il profilo del contatto tra i depositi palustro-lacustri e le Marne di Vicchio è contraddistinto da un incremento graduale di profondità che raggiunge il suo massimo in corrispondenza della verticale della stesa sismica St9, intorno alla progressiva dei 400 m, come è possibile osservare dalla Figura 3.20.

La caratterizzazione in campo statico e dinamico dei litotipi presenti, i cui parametri principali sono riassunti nella Tabella 3.14, anche in questo caso è stata realizzata facendo riferimento principalmente ai valori ricavati dal sondaggio S2.

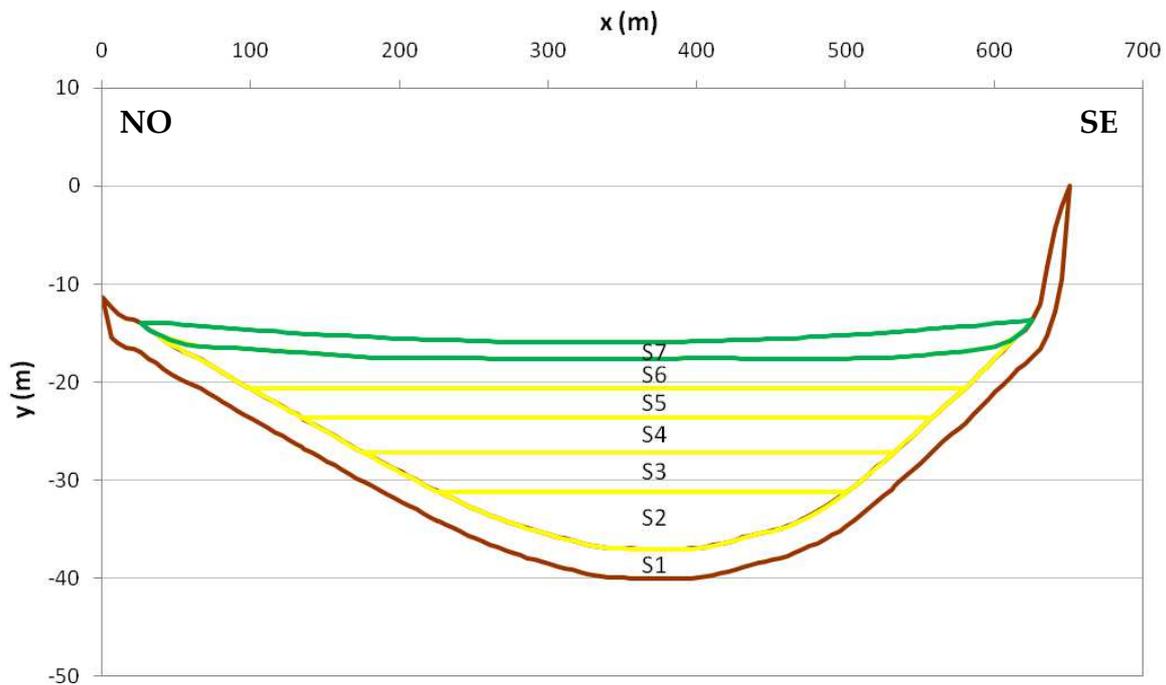


Figura 3.20 – Modello stratigrafico della Sezione 4 - Vicchio Case Caldeta.

Tabella 3.14 – Caratteristiche dei litostrati relativi alla Sezione 4 - Vicchio Case Caldeta.

Strato	Unità	$\gamma(kN/m^3)$	$\nu(-)$	$G_0 (MPa)$	$D_0 (%)$	Curva di decadimento/ smorzamento
S1	VIC _{alt}	25.00	0.34	3112	2.000	$G(\gamma)/G_0 = 1; D(\gamma) = 2 \%$
S2	e3 _s	19.27	0.44	269	3.200	S2
S3	e3 _s	19.27	0.49	160	3.200	S2
S4	e3 _s	19.27	0.47	123	3.200	S2
S5	e3 _s	19.27	0.48	123	3.200	S2
S6	e3 _s	19.27	0.48	123	3.200	S2
S7	b _s	19.27	0.36	123	0.900	Rollins, 2000; Rollins et al., 1998

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 dei modelli monodimensionali e/o bidimensionali sopra descritti.

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, durata bracketed, 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 7 input sismici impiegati ed analizzati nel Capitolo 1. 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

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

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

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 dei due parametri (FA) 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 (FV) è più appropriato per le strutture flessibili, sensibili alle frequenze più basse (ovvero con periodo proprio più alto).

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:

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

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

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

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

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

FHa:

Più 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:

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

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

Sulla base delle analisi condotte per la valutazione della risposta sismica locale nel territorio comunale di Vicchio, sembra ragionevole suggerire l'adozione del parametro $FHa_{(0,1+0,5)}$ 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 da 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' $FHv_{(0,1+0,5)}$ 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 4.9, 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 FHa in superficie, calcolato nell'intervallo di periodo 0.1-0.5 s, e ricavato come valore medio delle elaborazioni effettuate analizzando i 7 accelerogrammi di input selezionati (vedi Capitolo 1).

Come sarà evidenziato più in dettaglio nel seguito, si può anticipare che l'area di Vicchio capoluogo è caratterizzata da valori di amplificazione più contenuti rispetto a quelli ottenuti per l'area di Vicchio Case Caldetta. Infatti per le sezioni del capoluogo il fattore di amplificazione è compreso tra 0.5 e 2.2, contemplando quindi anche la presenza di tratti di deamplificazione, mentre per Case Caldetta l'intervallo è compreso tra 1 e 3.7. Questo è riconducibile sostanzialmente alla differente natura dei materiali che costituiscono i depositi presenti nelle due zone, che nel capoluogo sono riconducibili alle Arenarie di Monte Senario (AMS) e ai depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello (MGO2a2 ed MGO2s2), mentre nell'area di Caldetta sono costituiti dai depositi palustro-lacustri di sottosuolo (e3s).

La Figura 4.1 mostra i valori puntuali dell' $FH_{a(0.1-0.5)}$ ottenuti dalla modellazione monodimensionale in corrispondenza delle 12 verticali di indagine, poste lungo il profilo della Sezione 1 di Vicchio capoluogo.

I risultati ottenuti con i due codici di calcolo, STRATA e QUAD4M, risultano essere sostanzialmente in buon accordo ed i valori di STRATA, come accade anche per le altre sezioni sulle quali è stata effettuata l'analisi 1D, sono sempre leggermente superiori rispetto a quelli ottenuti tramite QUAD4M.

Il range di variabilità del fattore di amplificazione è compreso tra 1.1 e 1.9; i valori più elevati si rilevano nell'area posta verso NNE, dove il deposito è costituito da uno spessore molto elevato di depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello, prevalentemente formati dall'MGO2s2, ovvero dalla facies sabbiosa, e da una sottile copertura di depositi fluviali.

Dall'analisi dei risultati relativi a questa sezione, e che sono stati confermati anche per le altre sezioni di Vicchio capoluogo, è possibile osservare che, a parità delle altre condizioni:

- la presenza di una copertura di depositi fluviali (SIV1, SIV2, SIV3) determina un lieve incremento del fattore di amplificazione considerato;
- l'incremento dello spessore dei depositi fluvio-lacustri del Bacino del Mugello (MGO2a2, MGO2s2) comporta una diminuzione del fattore di amplificazione; la stessa tendenza si rileva anche per le Arenarie di Monte Senario (AMS), seppure con decrementi di minore entità.

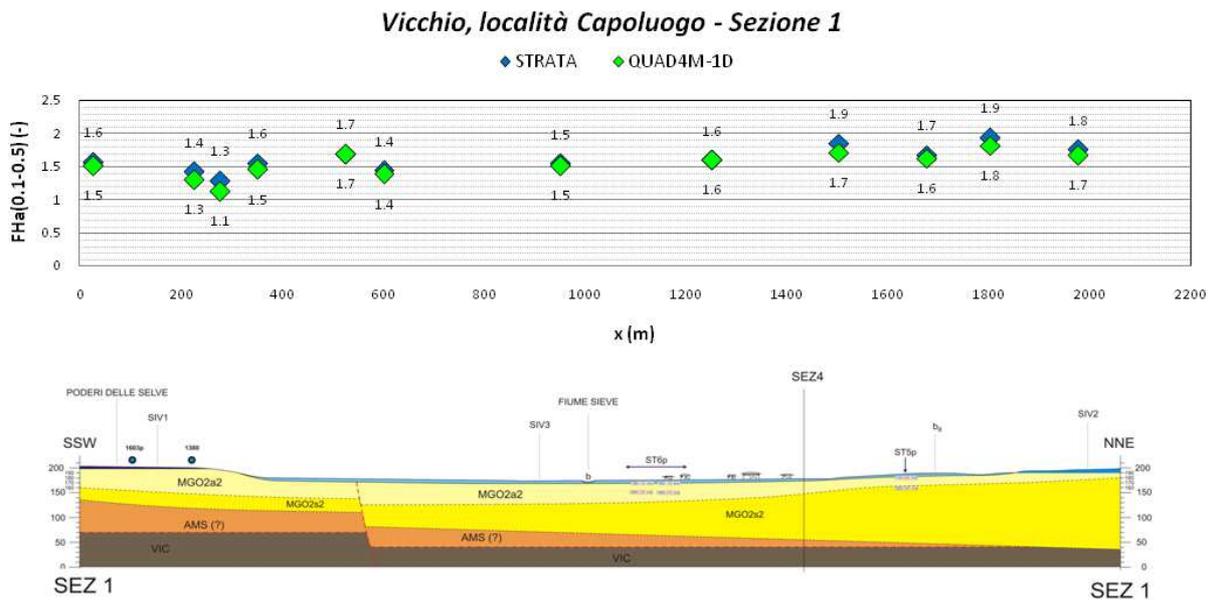


Figura 4.1 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FH_{a(0.1-0.5)}$ per la Sezione 1 - Vicchio capoluogo.

Nella Figura 4.2 è mostrato l'andamento del fattore di amplificazione $FH_{a(0.1-0.5)}$, mediato sui 7 input sismici, ottenuto per la Sezione 2 a seguito delle analisi monodimensionali e bidimensionali condotte.

Analogamente a quanto evidenziato per la Sezione 1, anche in questo caso si rileva un buon accordo tra i valori puntuali ottenuti in corrispondenza delle 13 verticali di indagine; inoltre anche la curva continua che riproduce l'andamento del fattore di amplificazione ottenuto dall'analisi 2D manifesta lo stesso trend. Le differenze più marcate si concentrano laddove è più forte la presenza di effetti bidimensionali, che naturalmente non possono essere colti dalle analisi 1D, ovvero in corrispondenza delle verticali V10, V12 e V13, nel lato NE della sezione.

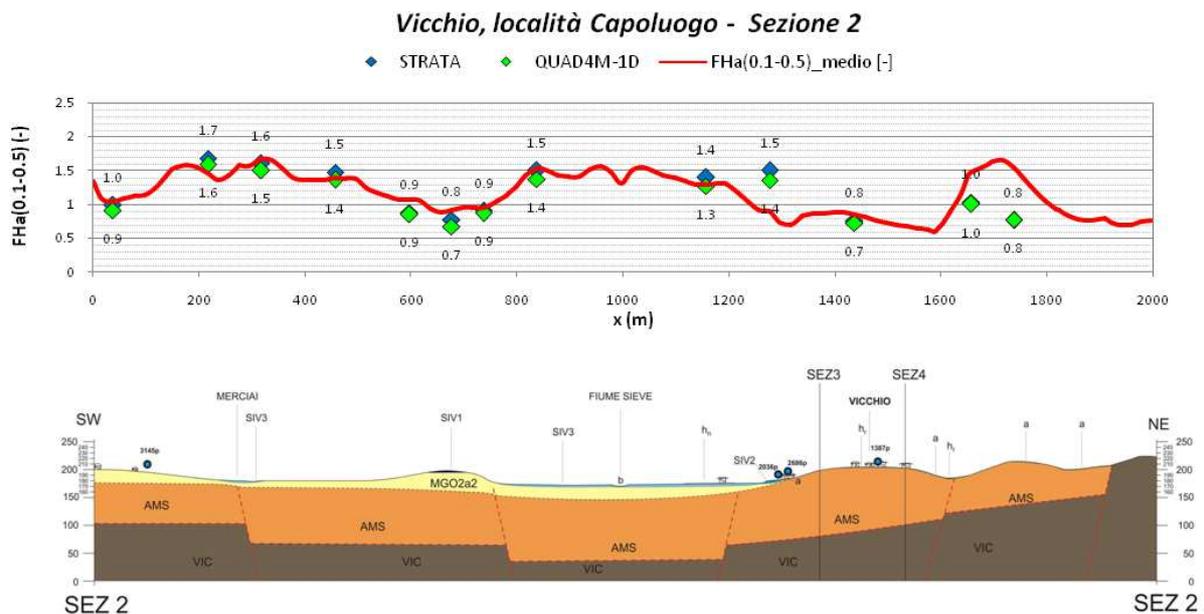


Figura 4.2 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FH_{a(0.1-0.5)}$ per la Sezione 2 - Vicchio capoluogo.

La parte sinistra della sezione, quella a SW, è caratterizzata dalla presenza di una frontiera laterale aperta; pertanto, al fine di modellare la perdita di energia legata allo smorzamento di radiazione, ovvero al fine di evitare la generazione di onde riflesse artificialmente introdotte nella regione di interesse, si è adottato l'accorgimento di considerare una frontiera laterale assorbente, opportunamente modellata nel corso dell'analisi bidimensionale. Tuttavia, anche facendo ricorso a questa soluzione, i risultati numerici nel tratto iniziale potrebbero non essere particolarmente rappresentativi. In questo caso però esiste un buon accordo tra i risultati ottenuti dalle 3 simulazioni, dal quale possiamo dedurre una buona affidabilità delle analisi condotte.

Indicativamente fino alla progressiva dei 1300 m possiamo affermare che la variabilità nell'andamento dell' FH_a è legata essenzialmente alle variazioni dello spessore dell'MGO2a2, dunque la natura dell'amplificazione è legata a fattori stratigrafici, ad eccezione della parte sommitale del rilievo presente tra le progressive 600 e 750 m circa, dove il modello 2D evidenzia valori di FH_a maggiori rispetto al modello 1D, imputabili ad effetti topografici. Per questa ragione le analisi 1D e 2D sono in buon accordo nel tratto sopracitato, all'interno del quale viene raggiunto il massimo valore dell' $FH_{a(0.1-0.5)}$, intorno a 1.7.

In corrispondenza del Fiume Sieve, intorno alla progressiva a 1000 m, si segnala una diminuzione repentina dei valori di amplificazione; questa particolarità, come vedremo anche in seguito, si manifesta ogniqualvolta si incontra l'alveo di un fiume.

Procedendo verso NE si giunge ad un tratto della sezione nel quale il deposito è costituito esclusivamente dalle Arenarie di Monte Senario, che vanno a formare due rilievi topografici di modesta entità. In corrispondenza di essi la curva dell'FHa manifesta due picchi, fino a raggiungere un massimo di poco inferiore a 1.7 in prossimità della progressiva dei 1700 m, come conseguenza di fenomeni di focalizzazione delle onde sismiche in prossimità del fianco molto acclive del bacino.

In corrispondenza dell'estremo destro della sezione i valori di FHa sono inferiori a 1 per circa 200 m, ma lungo tutta la sezione vi sono altri tratti nei quali si osserva una deamplificazione. Tuttavia, ai fini della redazione della carta di microzonazione sismica di terzo livello, in questi tratti è opportuno assumere un fattore di amplificazione pari a 1.

Analogamente alla Sezione 2, anche la Sezione 3 manifesta un buon accordo tra i valori puntuali ottenuti per le 13 verticali esaminate con la modellazione monodimensionale e la curva continua relativa alla modellazione bidimensionale.

In questo caso la sezione ha due frontiere laterali aperte; la sostanziale coincidenza dei valori numerici ottenuti per le tre simulazioni in prossimità dei tratti di chiusura ci conferma la correttezza nella schematizzazione delle frontiere.

Come emerge chiaramente dalla Figura 4.3, la sezione è caratterizzata da valori di amplificazione molto ridotti, che superano l'unità quasi esclusivamente nel tratto a N, oltre la progressiva 1300 m, quando le Arenarie di Monte Senario sono sovrastate dall'MGO2a2 ed il valore massimo, pari a 1.5, viene raggiunto in prossimità della progressiva a 1400 m.

Nel tratto centrale della sezione, nel quale lo strato arenaceo è sovrastato da una sottile copertura di depositi fluviali, si riscontrano valori di $FHa_{(0.1-0.5)}$ di poco inferiori all'unità; inoltre, come già evidenziato per la Sezione 2, si osserva una riduzione del fattore di amplificazione considerato in corrispondenza dell'alveo del Fiume Sieve.

Come già affermato in precedenza, ai fini della redazione della carta di microzonazione è opportuno non considerare la presenza di tratti di deamplificazione del segnale sismico, assumendo in questi tratti un valore di FHa unitario.

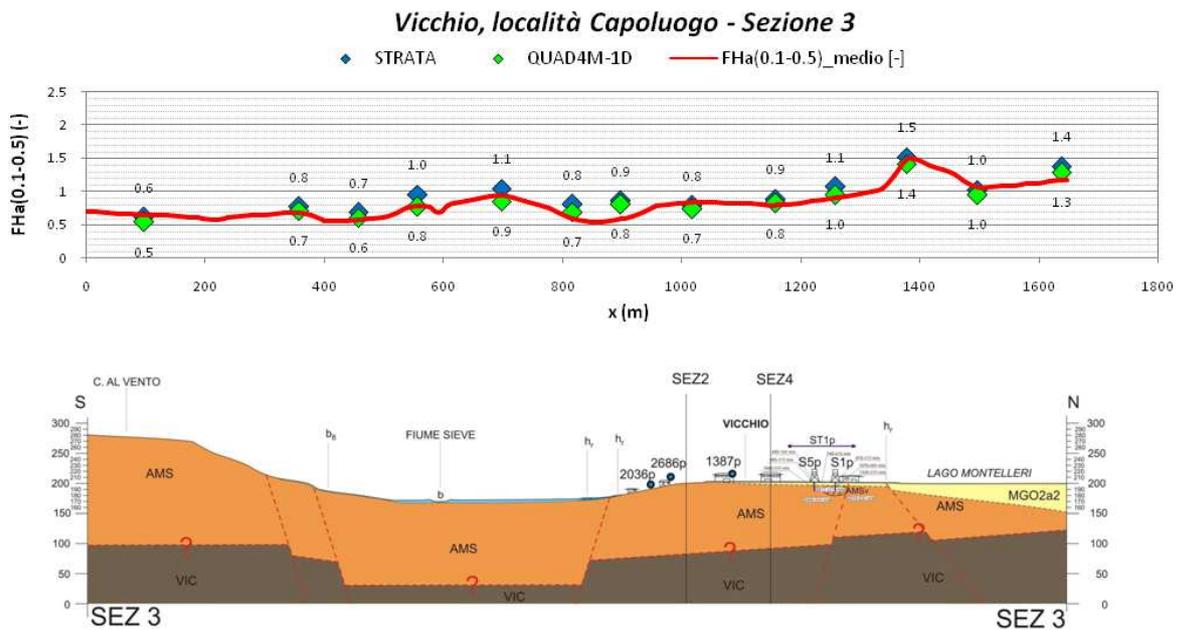


Figura 4.3 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FHa_{(0.1-0.5)}$ per la Sezione 3 - Vicchio capoluogo.

Per la Sezione 4 di Vicchio capoluogo e per le quattro sezioni di Case Caldetta sono state effettuate soltanto analisi di tipo bidimensionale, pertanto non è possibile operare un confronto con i valori puntuali ottenuti dalle analisi monodimensionali come per le sezioni precedenti.

In relazione alla Sezione 4A, l'andamento dell' $FH_{a(0.1-0.5)}$ rappresentato in Figura 4.4 mostra dei tratti di deamplificazione ai quali, come già affermato in precedenza, è opportuno attribuire un valore numerico pari a 1 ai fini della redazione della carta di microzonazione sismica.

Si rilevano invece tre tratti di amplificazione: il primo tra le progressive 400 e 700 m, il secondo tra 1100 e 1400 m ed il terzo tra 1700 e 2000 m. Per tutti i tratti indicati non si osserva la presenza di un unico picco isolato, ma si hanno invece delle oscillazioni più o meno marcate, in particolar modo per il primo tratto, nel quale si raggiunge il valore di amplificazione più elevato, pari a 2.1. Queste oscillazioni sembrerebbero essere riconducibili a ragioni di carattere numerico, legate alle modalità di modellazione dei litostrati (vedi Figura 3.15).

L'andamento generale conferma comunque quanto osservato a proposito della Sezione 1, ovvero che, a parità di tutti gli altri fattori, la diminuzione dello spessore di MGO2a2, MGO2s2 ed AMS comporta un incremento del fattore di amplificazione. La stessa tendenza si osserva anche in presenza di una copertura di depositi fluviali, ed è la ragione per la quale nel tratto WNW, parte a sinistra della sezione in figura, nonostante la presenza di un elevato spessore di depositi fluvio-lacustri, il fattore di amplificazione risulti comunque intorno a 1.2.

In corrispondenza dell'estremo ESE, a destra in figura, la diminuzione dell' FH_a indotta dall'incremento dello spessore di copertura dello strato arenaceo è invece contrastata dai fenomeni di focalizzazione delle onde sismiche dovuti alla morfologia del contatto tra il deposito ed il substrato in risalita.

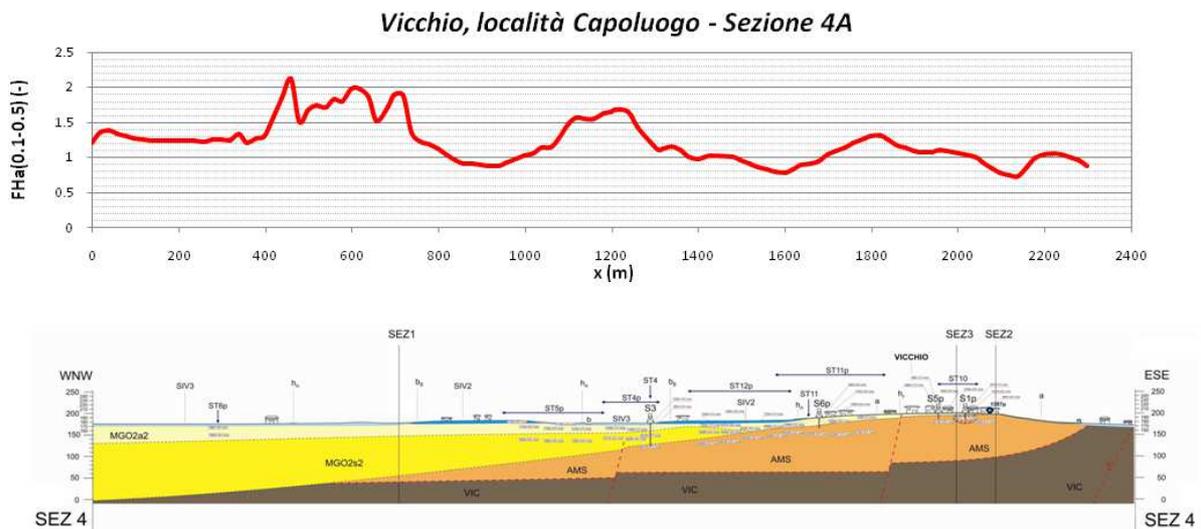


Figura 4.4 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FH_{a(0.1-0.5)}$ per la Sezione 4A - Vicchio capoluogo.

Per quanto riguarda la Sezione 4B, riprodotta qui di seguito nella Figura 4.5, l'aspetto che colpisce immediatamente è la marcata simmetria della curva rappresentativa del fattore di amplificazione rispetto al "cuneo" arenaceo collocato tra i 400 e gli 800 m.

In corrispondenza della parte centrale del cuneo il fattore di amplificazione medio raggiunge un valore massimo pari a circa 2; si riduce bruscamente fino a valori inferiori all'unità in prossimità dei fianchi per poi risalire rapidamente raggiungendo di nuovo un valore massimo intorno a 2 a distanza di circa 300-350 m dal centro del cuneo e mantenendosi approssimativamente costante per tutta l'estensione dei due tratti ai lati del cuneo in cui il bedrock è sovrastato da una sottilissima copertura di SIV3 (Unità di Sagginale).

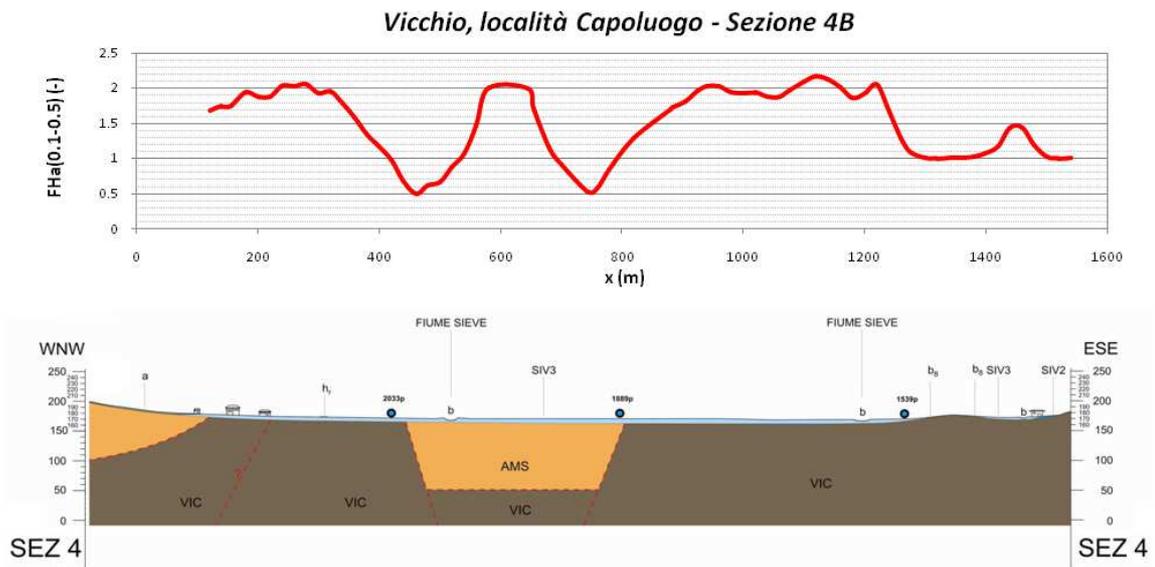


Figura 4.5 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FH_a(0.1-0.5)$ per la Sezione 4B - Vicchio capoluogo.

Per quanto riguarda la Sezione 1 di Case Caldetta è possibile affermare che il fattore di amplificazione esaminato, il cui andamento medio è rappresentato in Figura 4.6, in corrispondenza del corso del Fiume Sieve manifesta una prima amplificazione (seppur di modesta entità perchè intorno al valore 1.5) presumibilmente legata all'azione combinata degli effetti di bordo e degli effetti topografici dovuti alla discontinuità rappresentata dal letto del fiume nell'andamento del piano di campagna.

In prossimità della parte centrale del deposito fluviale SIV3 il segnale sismico viene nuovamente amplificato, raggiungendo un valore di poco inferiore a 2.5. La causa potrebbe essere ascrivibile all'elevato contrasto di impedenza tra l'Unità di Sagginale e le Marne di Vicchio.

Anche in corrispondenza della parte centrale del deposito fluviale SIV2 il segnale è amplificato, ma in maniera meno sensibile, dato che il valore del fattore di amplificazione è inferiore a 1.5. Questo avviene probabilmente perché il substrato è molto superficiale e dunque la lunghezza d'onda delle componenti principali degli accelerogrammi è tale che il moto sismico non risente della sottile copertura dei depositi e la situazione non differisce molto da quella di bedrock affiorante.

Procedendo in direzione nord-est verso la chiusura del deposito, si osserva un incremento progressivo del fattore di amplificazione, che raggiunge il valore massimo, intorno a 3.7, poco prima della verticale del sondaggio S2p, probabilmente per effetto della focalizzazione delle onde sismiche determinata dalla rapida risalita del substrato.

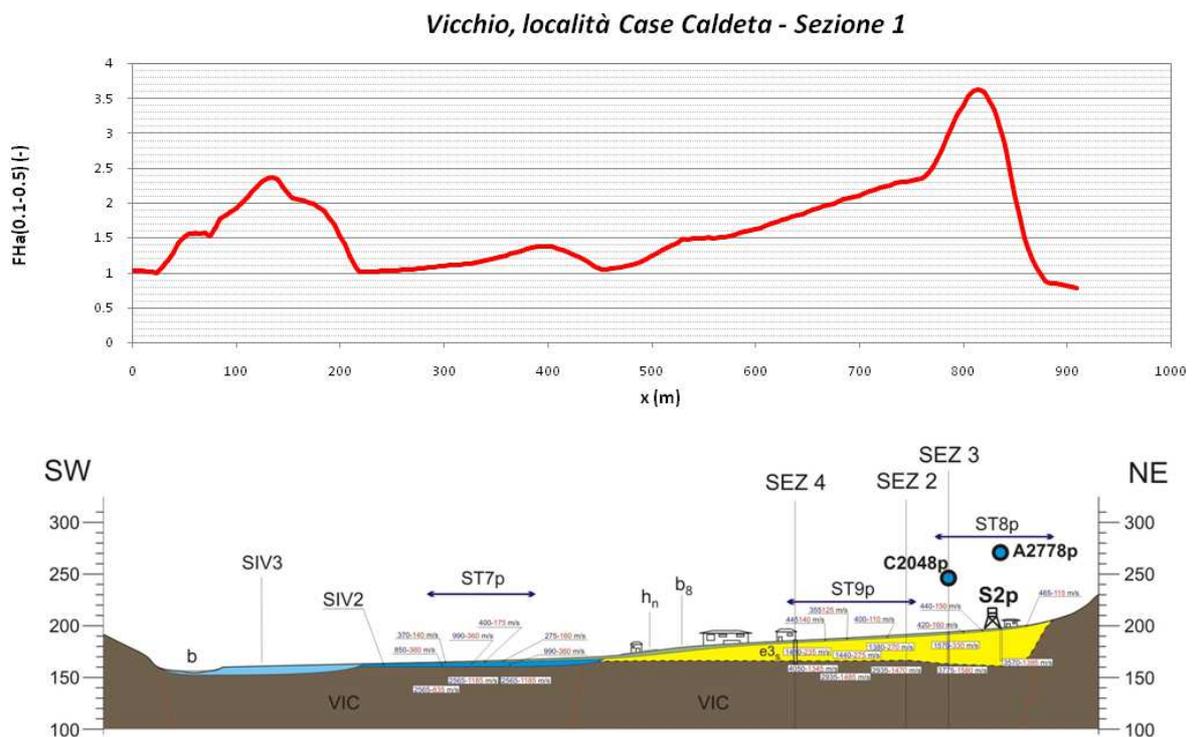


Figura 4.6 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FH_{(0.1-0.5)}$ per la Sezione 1 - Vicchio Case Caldetta.

Relativamente alla Sezione 2 di Case Caldetta, procedendo da sinistra verso destra, ovvero da NW verso SE, si osserva un incremento progressivo dell'amplificazione che raggiunge il valore massimo, pari a 3.3, in corrispondenza della verticale del sondaggio S2p. Segue una diminuzione dell'amplificazione e un successivo aumento, fino a registrare un nuovo picco, seppure caratterizzato da un valore di amplificazione più ridotto rispetto al precedente, intorno a 3, in corrispondenza della verticale del pozzo di captazione C2048p.

La presenza del letto del torrente, analogamente a quanto evidenziato per la sezione precedente in corrispondenza del letto della Sieve, determina un ulteriore picco di amplificazione, pari a 1.8, quindi molto più piccolo rispetto ai precedenti, dovuto sia agli effetti di bordo sia agli effetti topografici.

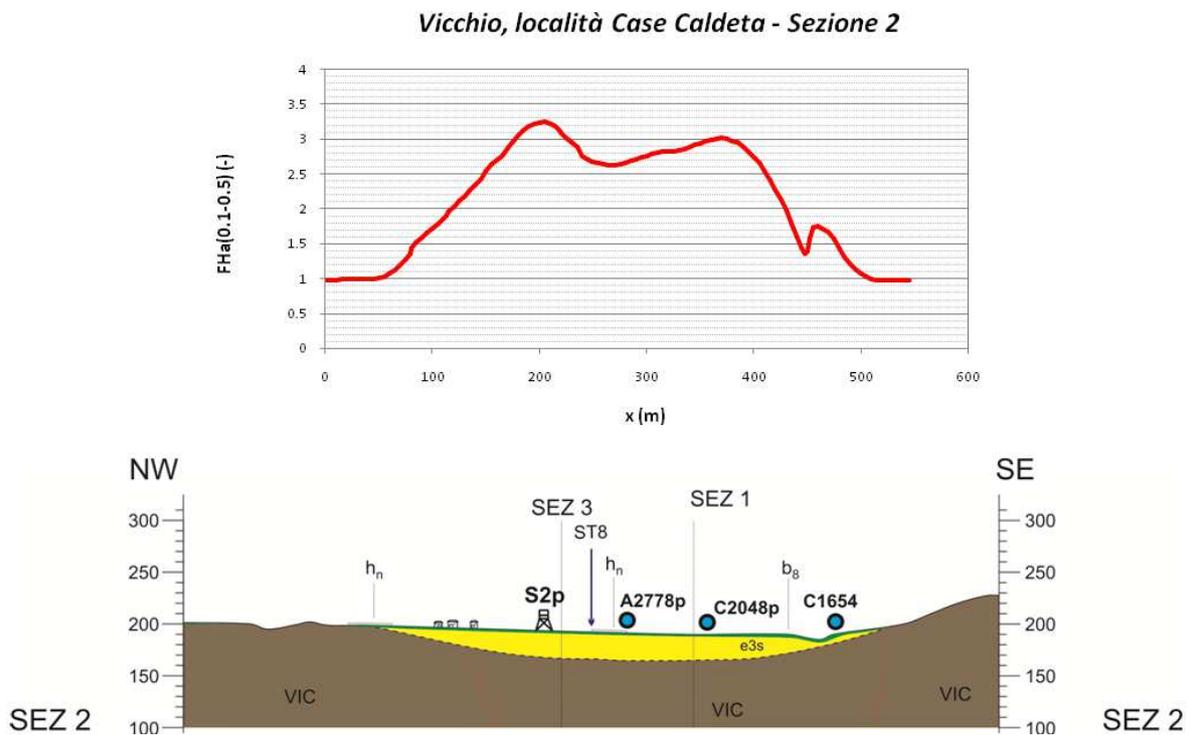


Figura 4.7 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FH_a(0.1-0.5)$ per la Sezione 2 - Vicchio Case Caldetta.

Nella Sezione 3 la superficie topografica risulta caratterizzata dalla presenza di una lieve discontinuità altimetrica, posta in corrispondenza della verticale del sondaggio S2p, che influisce sull'andamento del fattore di amplificazione.

Si osserva un primo tratto in cui il fattore di amplificazione assume valore 1, poiché la condizione poco si differenzia da quella di substrato affiorante.

Intorno alla progressiva dei 200 m si ha un primo picco di amplificazione in corrispondenza del quale si raggiunge il valore di 3.3.

In prossimità della discontinuità altimetrica si rileva un altro lieve picco, il cui valore risulta essere di poco inferiore a 2.5.

Nell'intorno dell'intersezione tra la Sezione 3 e la Sezione 1, dove lo spessore del deposito diventa più consistente, si registra la presenza di un ulteriore picco di amplificazione, di valore pari a 2.3.

In prossimità della progressiva dei 500 m si rileva l'ultimo picco, caratterizzato da un valore intorno a 2, oltre il quale si osserva una progressiva diminuzione di $FH_{\alpha(0.1-0.5)}$.

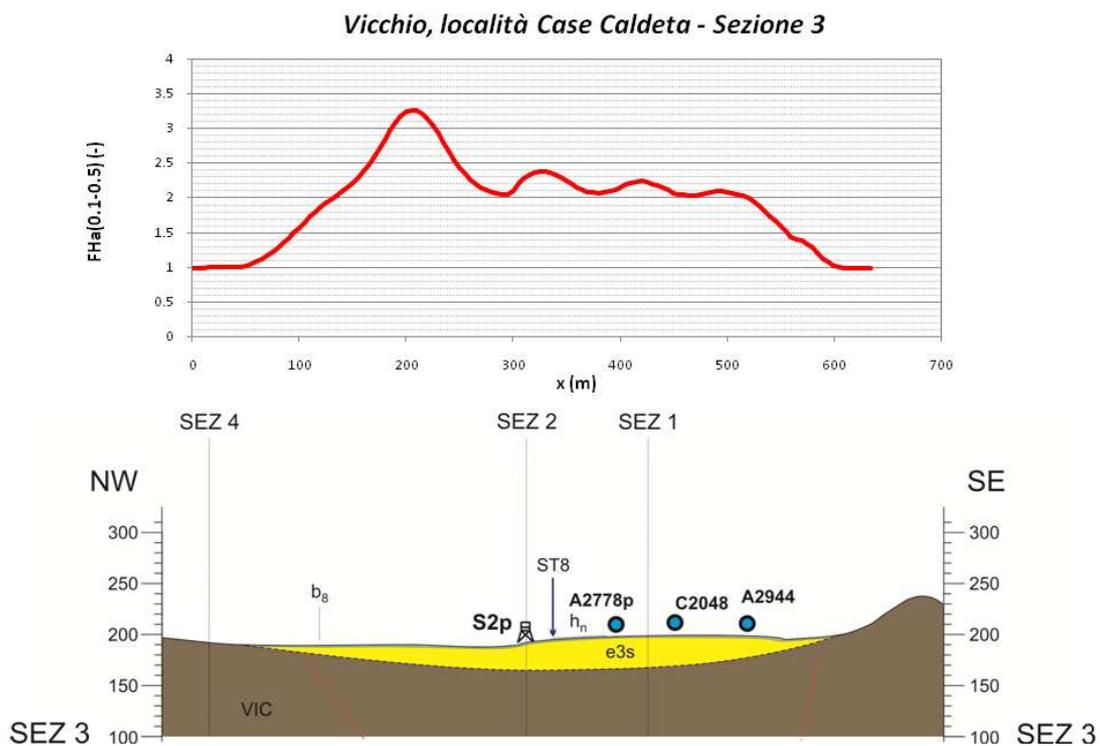


Figura 4.8 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FH_{\alpha(0.1-0.5)}$ per la Sezione 3 - Vicchio Case Caldetta.

Per quanto riguarda la Sezione 4 di Case Caldeta, rappresentata nella Figura 4.9, l'andamento del fattore di amplificazione registra la presenza di un unico picco di valore pari a 3.1 in concomitanza della verticale della stesa St9, ovvero del punto più profondo del deposito.

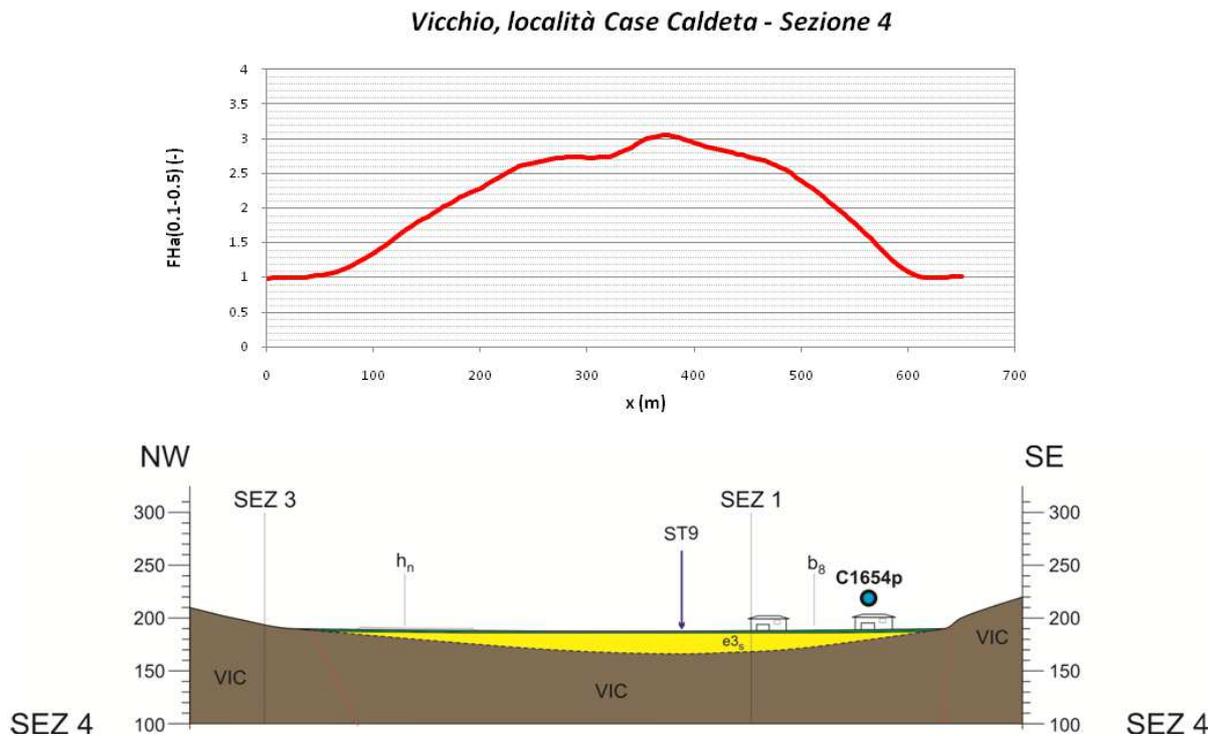


Figura 4.9 – Andamento medio del fattore di amplificazione $FHa(0.1-0.5)$ per la Sezione 4 - Vicchio Case Caldeta.

Il Responsabile della Ricerca
Prof. Ing. Giovanni Vannucchi

Firenze, Maggio 2014

5. Riferimenti bibliografici

Baglione M., Fabbroni P., D'Intinosante V. - a cura di - (in preparazione). *Comune di Vicchio - 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.

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.

Crespellani T., Facciorusso J., (2000). *Elementi di Dinamica dei Terreni e Ingegneria Geotecnica nelle Aree Sismiche*, Vol.I e II, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Ingegneria Civile, Sezione geotecnica, Firenze.

Facciorusso J., Madi ai 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.

Madi ai 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.

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.