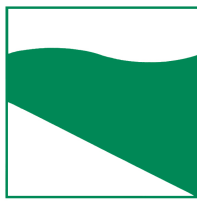




PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile



Regione Emilia Romagna



CONFERENZA DELLE REGIONI E  
DELLE PROVINCE AUTONOME

Attuazione dell'articolo 11 dalla legge 24 giugno 2009, n. 77

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Livello 3

Relazione illustrativa

Regione Emilia–Romagna  
Comune di San Benedetto Val di Sambro



Regione	Soggetto realizzatore	Data
EMILIA–ROMAGNA		
Studio realizzato con il contributo di cui all'OCPDC 532/2018 recepita con DGR 2047/2018	Dott. geologo Samuel Sangiorgi	Giugno 2023

## INDICE GENERALE

1	INTRODUZIONE.....	4
1.1	Contenuti dello studio.....	4
1.2	Riferimenti normativi.....	8
1.3	Gli elaborati a corredo dello studio.....	9
2	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO.....	12
2.1	Riferimenti bibliografici.....	12
2.2	Sismicità storica.....	12
2.3	Sorgenti sismogeniche e mappa pericolosità sismica INGV.....	13
2.4	Ulteriori elementi di riferimento per la pianificazione territoriale.....	14
2.4.1	<i>Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica.....</i>	<i>14</i>
2.4.2	<i>Il rischio sismico definito nel Piano Territoriale Metropolitano di Bologna.....</i>	<i>16</i>
3	ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA.....	18
3.1	Inquadramento geologico regionale.....	18
3.2	Ulteriori dati geologici e morfo-strutturali in aree con evidenze di attività tettonica recente.....	21
3.3	Stratigrafia.....	23
3.3.1	Elementi introduttivi.....	23
3.3.2	Unità Subliguridi.....	25
3.3.3	Unità Liguridi (formazioni “pre flysch”).....	25
3.3.4	Unità Liguridi.....	26
3.3.5	Depositi continentali quaternari.....	26
4	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	30
4.1	Dati pregressi e indagini eseguite per la MS di livello 2 (OCDPC 344/2016).....	30
4.2	Le indagini eseguite per la MS di livello 3 (OCDPC 532/2018).....	31
5	MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	36
5.1	Monteacuto Vallese e San Rocco.....	36
5.2	Ripoli (con ulteriori approfondimenti – OCDPC 532/2018).....	38
5.3	Trastullo.....	41
5.4	Santa Maria Maddalena (con ulteriori approfondimenti – OCDPC 532/2018).....	42

5.5	S. Andrea.....	47
5.6	Molino Nuovo e San Martino.....	48
5.7	San Benedetto Val di Sambro (con ulteriori approfondimenti – OCDPC 532/2018) .....	50
5.8	Villa Cedrecchia.....	55
5.9	Cedrecchia.....	56
5.10	Madonna dei Fornelli e Zaccanesca.....	57
5.11	Qualto.....	58
5.12	Montefredente – Il Borgo – Il Faldo – La Capanna.....	60
5.13	Castel dell'Alpi – Ca dei Falchetti.....	62
5.14	Pian del Voglio – Piano delle Ginestre – La Calcinata (con ulteriori approfondimenti – OCDPC 532/2018 )......	65
5.15	Pian di Balestra.....	69
5.16	Ca' dei Borelli.....	71
6	INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE.....	73
6.1	Frequenze naturali dei terreni.....	73
6.2	Substrato sismico e coperture.....	73
6.3	Ulteriori considerazioni sugli approfondimenti di “livello 3”.....	74
7	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI (MS LIVELLO 1-2).....	75
7.1	Cenni introduttivi.....	75
7.2	I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS e il livello di approfondimento delle MOPS.....	75
7.3	Calcolo dei fattori di amplificazione con approccio semplificato.....	76
	7.3.1 Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.....	76
	7.3.2 Zone di attenzione per instabilità.....	79
7.4	Effetti della topografia: calcolo dei fattori di amplificazione con approccio semplificato.....	80
7.5	Calcolo dei valori di “Hazard” (HSM).....	85
8	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI (MS LIVELLO 3).....	86
8.1	Cenni introduttivi sugli approfondimenti svolti.....	86
8.2	Calcolo dei fattori di amplificazione con modelli numerici bidimensionali della RSL.....	87

8.2.1	<i>Cenni metodologici</i> .....	87
8.2.2	<i>Dati di input</i> .....	89
8.2.3	<i>Esiti delle simulazioni numeriche</i> .....	92
8.3	Verifiche di stabilità dei pendii in condizioni sismiche.....	97
8.3.1	<i>Cenni metodologici</i> .....	97
8.3.2	<i>Esiti delle verifiche</i> .....	99
8.4	Calcolo dei valori di “Hazard”.....	100
9	ELABORATI CARTOGRAFICI.....	102
9.1	Carta delle Indagini (Tavola 1).....	102
9.2	Carta geologico–tecnica per la microzonazione sismica (Tavola 2).....	102
9.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3).....	103
9.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS (Tavola 4).....	104
9.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5).....	107
9.6	Carta di microzonazione sismica livello 2–3 (Tavole da 6 a 13).....	108
9.7	Carta della distribuzione dei valori di H (Tavole da 14 a 17).....	109
10	BIBLIOGRAFIA.....	110

# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 Contenuti dello studio

L'Unione Comuni Appennino Bolognese<sup>1</sup> e nello specifico il Comune di San Benedetto Val di Sambro hanno beneficiato di un'ulteriore assegnazione di contributi stanziati dal Dipartimento della Protezione Civile nazionale per l'aggiornamento degli studi di microzonazione sismica e CLE con approfondimenti della MS di "livello 3", come previsto dalla Legge 77/2009 e ai sensi dell'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 532/2018 (recepita dalla Regione Emilia-Romagna con Deliberazione della Giunta Regionale n. 2047/2018).

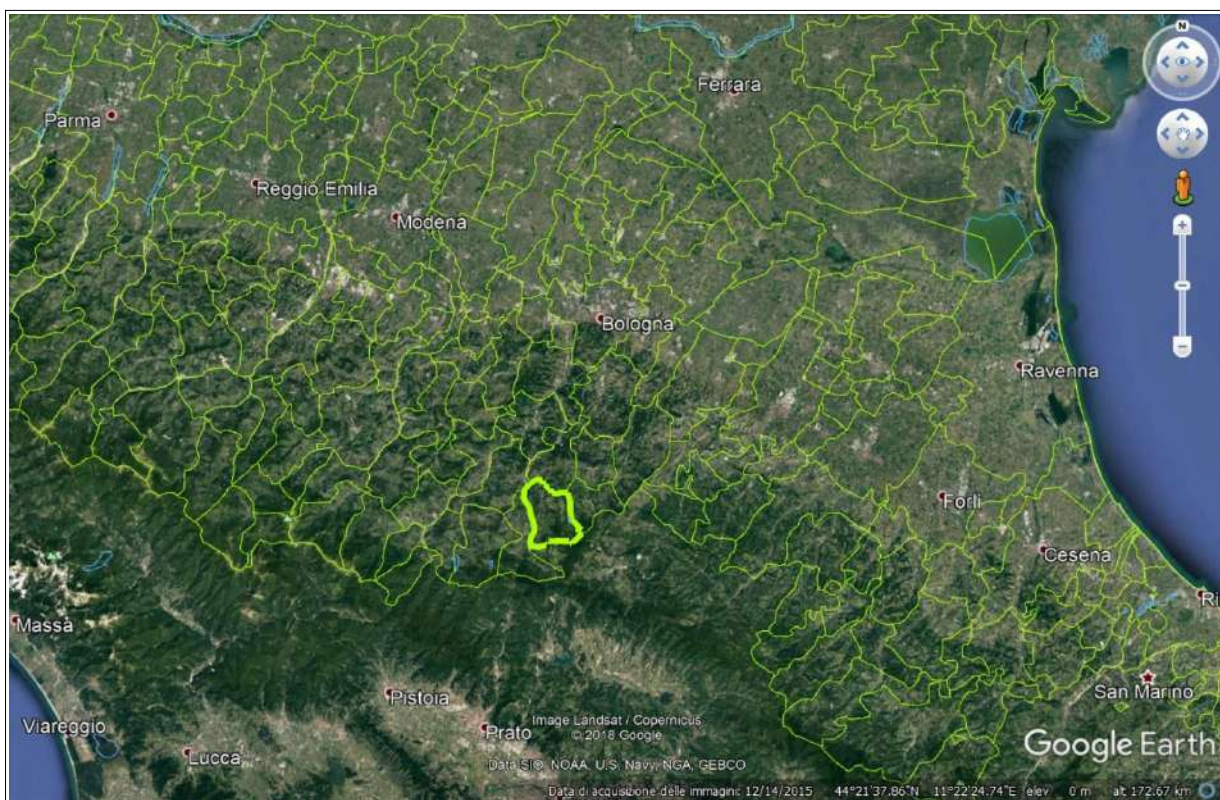
Occorre rammentare che il Comune di San Benedetto Val di Sambro è già risultato beneficiario di un precedente contributo per la realizzazione di studi di MS di "livello 2" e CLE del territorio di propria competenza ai sensi della Legge 77/2009 (OCDPC 344/2016, recepita dalla RER con DGR n. 2188/2016). Lo studio di MS di "livello 2" è stato svolto dal Raggruppamento costituito dai geologi professionisti Samuel Sangiorgi (Capogruppo), Raffaele Brunaldi, Maurizio Zamboni e Antonio Milioto e dall'ing. Marco Soglia (rilievi per l'analisi della CLE).

Questo ulteriore studio ha dunque permesso di svolgere le seguenti attività:

- l'esecuzione di nuove indagini geognostiche e geofisiche (penetrometrie DPSH; stendimenti sismici a rifrazione; registrazioni HVSR);
- un ampliamento delle aree studiate e con approfondimenti fino al "livello 2" e al "livello 3" per comprendere il territorio urbanizzato definito dalla pianificazione urbanistica comunale (PUG) ai sensi della LR n.24/2017
- l'aggiornamento degli studi di "livello 1" (è stata aggiornata anche la cartografia MOPS in conseguenza delle ulteriori indagini e approfondimenti svolti) e della MS di "livello 2". Si sono calcolati e rappresentati cartograficamente gli ulteriori fattori di amplificazione richiesti dagli Indirizzi regionali vigenti in materia di rischio sismico (DGR 476/2021);
- la realizzazione di nuove sezioni geotecniche e sismostratigrafiche rappresentative delle "zone di attenzione per instabilità di versante" interessate dagli approfondimenti di "livello 3"
- gli approfondimenti di "livello 3" consistiti in analisi numeriche bidimensionali della risposta sismica locale e in verifiche di stabilità dei pendii in condizioni sismiche delle "zone di attenzione per instabilità di versante" di interesse. Le verifiche hanno inoltre consentito di quantificare gli spostamenti attesi per i corpi di frana studiati;
- l'aggiornamento cartografico dell'Analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE);
- l'archiviazione dei nuovi dati disponibili e il complessivo adeguamento delle cartografie secondo gli standard di rappresentazione e archiviazione previsti per la MS e la CLE.

---

<sup>1</sup> L'Unione comprende anche il territorio comunale di San Benedetto Val di Sambro



*Figura 1.1 – Localizzazione del territorio amministrativo del Comune di San Benedetto Val di Sambro (foto aerea: "Google Earth")*

La figura 1.1 offre un inquadramento del limite comunale di San Benedetto Val di Sambro: si tratta di un territorio amministrativo situato in un contesto morfologico montano, di estensione areale totale pari a circa 66,5 Km<sup>2</sup> e con una popolazione di 4.189 abitanti (dato ISTAT 01/01/2023).

La figura 1.2 localizza con maggior dettaglio le aree urbane/urbanizzate (il Capoluogo e le frazioni) interessate dallo studio di microzonazione sismica.



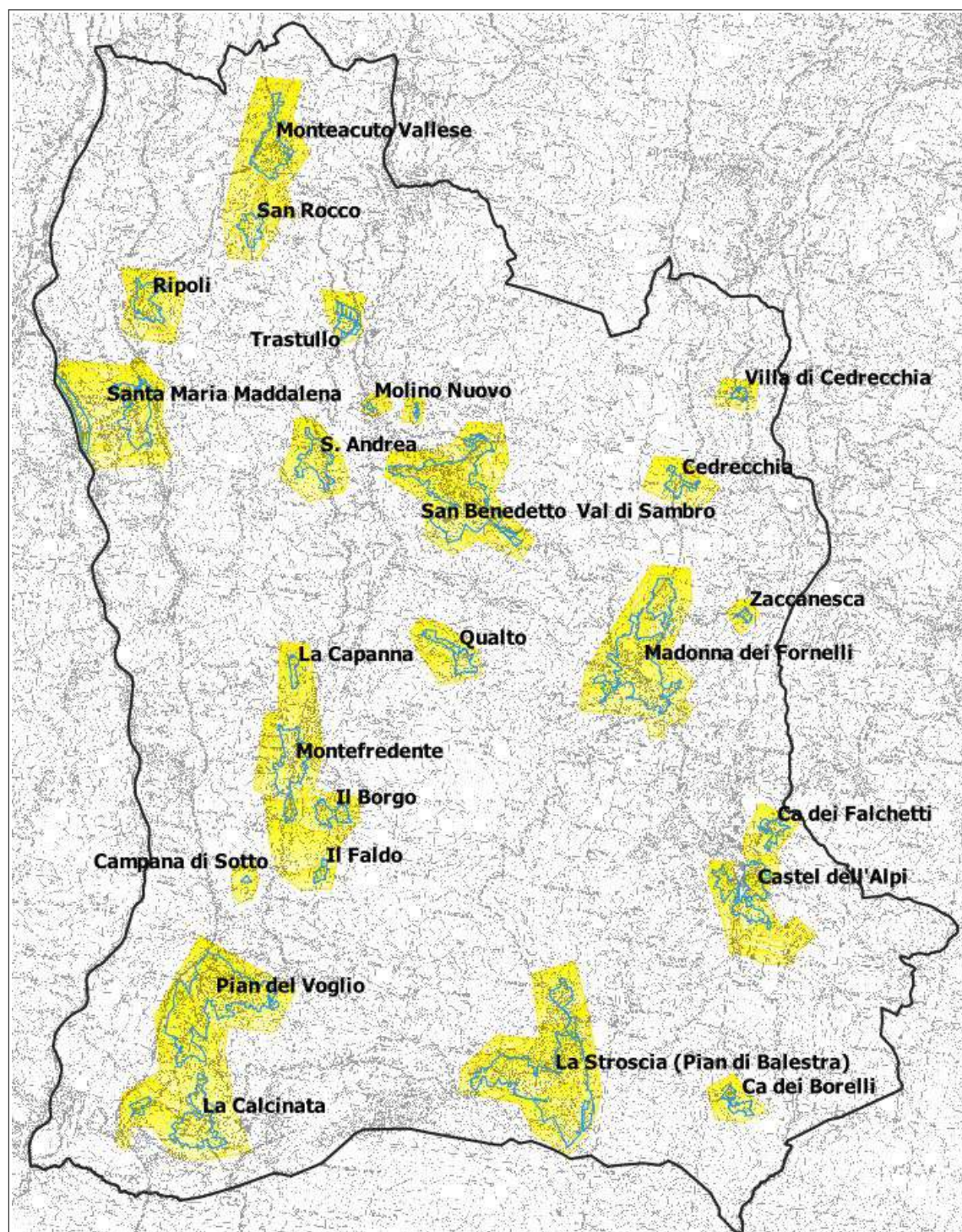


Figura 1.2 – Areali interessati dalla microzonazione sismica (in evidenziato giallo) e aree urbanizzate (limiti in azzurro)  
Base topografica della Regione Emilia-Romagna, scala 1:25.000

## 1.2 Riferimenti normativi

Il presente lavoro è redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato A2 della Delibera n. 2047/2018 della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna: *"criteri per la realizzazione degli studi di microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza, di cui*

*all'ordinanza del capo dipartimento della protezione civile n. 532/2018 e decreto del capo dipartimento della protezione civile del 9 agosto 2018*

Per quanto non specificato nel suddetto documento, i riferimenti tecnici per la realizzazione dello studio e per l'elaborazione e la redazione delle tavole cartografiche sono rappresentati dai seguenti testi:

- ✓ “Microzonazione sismica – Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.2”, redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, dicembre 2020), da qui in avanti “Standard CTMS 4.2”;
- ✓ “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica”, approvato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome e successive modifiche e integrazioni (Gruppo di lavoro MS, 2008; AA.VV., 2011), da qui in avanti “indirizzi ICMS”.

Nella redazione dello studio ci si è inoltre riferiti alle seguenti normative:

- ✓ Deliberazione della Giunta Regionale n. 630/2019 “Atto di Coordinamento Tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR n. 24/2017)”
- ✓ Deliberazione della Giunta Regionale n. 476/2021 (testo coordinato con le modifiche introdotte dalla DGR n. 564/2021) “Aggiornamento dell’Atto di Coordinamento Tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017) di cui alla alla deliberazione della Giunta regionale 29 aprile 2019, n. 630”
- ✓ LR N. 19/2008 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”;
- ✓ LR N.24/2017 “Disciplina regionale sulla tutela e l’uso del territorio”;
- ✓ DM del 17/01/2018 “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”.

### 1.3 Gli elaborati a corredo dello studio

Gli elaborati dello studio di microzonazione sismica per il Comune di San Benedetto Val di Sambro sono i seguenti:

- la presente Relazione Descrittiva (riprodotta in formato \*.pdf) che, oltre a caratterizzare e inquadrare le aree oggetto delle analisi nel contesto geologico, geomorfologico e sismotettonico regionale, descrive le metodologie seguite e illustra i risultati dello studio di microzonazione rappresentati nelle diverse cartografie;
- le tavole cartografiche (riprodotte in formato \*.pdf) elencate in tabella 1.1 e illustrate in dettaglio nel capitolo 8;
- l'archivio informatizzato dei dati delle indagini (alfanumerici e cartografici in formato \*.shp – shapefile; report prove in formato \*.pdf);



- le sezioni litotecniche di riferimento per il territorio studiato (riprodotte in formato \*.pdf), contenute nell'Allegato 1;
- i rapporti delle indagini di nuova esecuzione realizzate per questo ulteriore aggiornamento e per gli approfondimenti di “livello 3” (riprodotti in formato \*.pdf), contenuti nell'Allegato 2;
- le sezioni topografiche pubblicate per la stima degli effetti topografici per il territorio studiato fino al “livello 2” (riprodotte in formato \*.pdf), contenute nell'Allegato 3;
- le schede dei modelli numerici bidimensionali della RSL (riprodotte in formato \*.pdf), contenute nell'Allegato 4;
- i rapporti delle verifiche di stabilità di versante in condizioni sismiche (riprodotti in formato \*.pdf), contenuti nell'Allegato 5.

Elaborato cartografico	Sigla Tavola	Scala
Carta delle indagini	Tavola 1a/b/c	1:5.000
Carta geologico-tecnica	Tavola 2a/b	1:5.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3a/b	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)	Tavola 4a/b/c	1:5.000
Carta delle velocità delle onde di taglio S	Tavola 5a/b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica livello 3 – FA <sub>PGA</sub>	Tavola 6a/b/c	1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA <sub>SA1</sub>	Tavola 7a/b/c	1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA <sub>SA2</sub>	Tavola 8a/b/c	1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA <sub>SA3</sub>	Tavola 9a/b/c	1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA <sub>SA4</sub>	Tavola 10a/b/c	1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA <sub>SI1</sub>	Tavola 11a/b/c	1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA <sub>SI2</sub>	Tavola 12a/b/c	1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA <sub>SI3</sub>	Tavola 13a/b/c	1:5.000
Carta della distribuzione dei valori di H – H <sub>SM</sub>	Tavola 14a/b/c	1:5.000
Carta della distribuzione dei valori di H – H <sub>0408</sub>	Tavola 15	1:2.000
Carta della distribuzione dei valori di H – H <sub>0711</sub>	Tavola 16	1:2.000
Carta della distribuzione dei valori di H – H <sub>0515</sub>	Tavola 17	1:2.000

*Tabella 1.1 – Elaborati cartografici predisposti per lo studio di microzonazione sismica del Comune di San Benedetto Val di Sambro*

Tutti gli elaborati sono stati realizzati secondo le specifiche indicate nella DGR 2047/2018 della Regione Emilia-Romagna e considerando anche gli ulteriori aggiornamenti apportati dalla vigente DGR 476/2021. Per quanto riguarda l'archiviazione e la rappresentazione cartografica, vengono rispettate le specifiche riportate nelle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile con gli Standard MS 4.2 (CTMS, 2020). Si segnala a questo proposito che l'obbligo di attenersi in modo rigoroso ai suddetti standard di rappresentazione, ha vincolato il

presente lavoro sia a livello di articolazione delle tavole (numero e tipologia) e della relazione (titoli e ordine dei capitoli), che a livello di rappresentazione cartografica (tematismi rappresentati, legende e denominazioni, ma anche layout, colori e font dei caratteri) e di contenuti descrittivi.

Le cartografie elaborate hanno utilizzato come base topografica di riferimento i raster tipografici georeferenziati della Regione Emilia dalla Regione Emilia Romagna (DBTR scala 1.5.000), nella versione più aggiornata pubblicata on line (formato WMS). Per questo lavoro, la base topografica raster è stata georeferenziata secondo il sistema di riferimento richiesto, ovvero nelle coordinate "WGS\_1984\_UTM\_Zone\_33N", per produrre tutti gli strati informativi in formato numerico in coerenza con quanto richiesto dai già citati Standard MS.

## 2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 Riferimenti bibliografici

La sismicità di un territorio è strettamente connessa al suo contesto tettonico-strutturale, dunque alla presenza di strutture geologicamente “attive”. Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio vi è quindi l'indispensabile conoscenza della sua storia sismica (cioè di tutte le informazioni sui terremoti avvenuti nel passato) e della geologia strutturale locale, fattori strettamente connessi tra loro.

A supporto della redazione del presente capitolo, sono stati utilizzati i dati liberamente consultabili di database pubblici sviluppati da diversi enti e gruppi di ricerca:

- il *CPTI15 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 4.0* (Rovida et al., 2022; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15>), che raccoglie i parametri dei terremoti avvenuti in Italia con intensità massima  $\geq 5$  o magnitudo  $\geq 4.0$  d'interesse nella finestra temporale 1000–2020;
- il *DBMI15 versione 4.0 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani* utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI15 e provenienti da diverse fonti. È relativo ai terremoti con intensità massima  $\geq 5$  e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000–2020 (Locati et al., 2022 <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI>);
- il *CFTI5Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea* (Guidoboni et al., 2018), che riporta per numerose località i risentimenti di circa 300 tra i terremoti storici più forti avvenuti sul territorio italiano, e fornisce anche informazioni sul contesto storico, sociale e demografico in cui gli eventi si sono prodotti, sui parametri epicentrali, sugli effetti dei terremoti sull'ambiente fisico (fagliazione superficiale, frane sismo-indotte, liquefazioni, maremoti, ecc.), sul danneggiamento dei centri storici e di beni monumentali;
- la *Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale* (INGV, 2004; <http://esse1.mi.ingv.it/>) che definisce una “pericolosità di base” su un reticolo di punti di riferimento. Ad essi sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del sisma atteso, i valori di accelerazione orizzontale massima del suolo ( $a_g$ ) e dei principali “parametri spettrali”, da utilizzare per il calcolo dell'azione sismica;
- la *Zonazione Sismogenetica ZS9* (Meletti e Valensise, 2004 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica nel territorio nazionale di cui al punto precedente;
- il *Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane DISS versione 3.3.0* (DISS Working Group, 2021), che contiene sorgenti individuali e composite di terremoti, intese come una rappresentazione georeferenziata semplificata e in 3D di faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite) in grado di generare terremoti di M 5.5 o superiore.

### 2.2 Sismicità storica

Il DBMI15 (Locati et al., 2016), riporta per il Capoluogo 15 eventi sismici (figura 2.1) con modesti risentimenti per i manufatti esistenti (vi risultano associate massime intensità pari a 5–6). La scarsità di dati è imputabile alla mancanza o al non reperimento di fonti storiche.

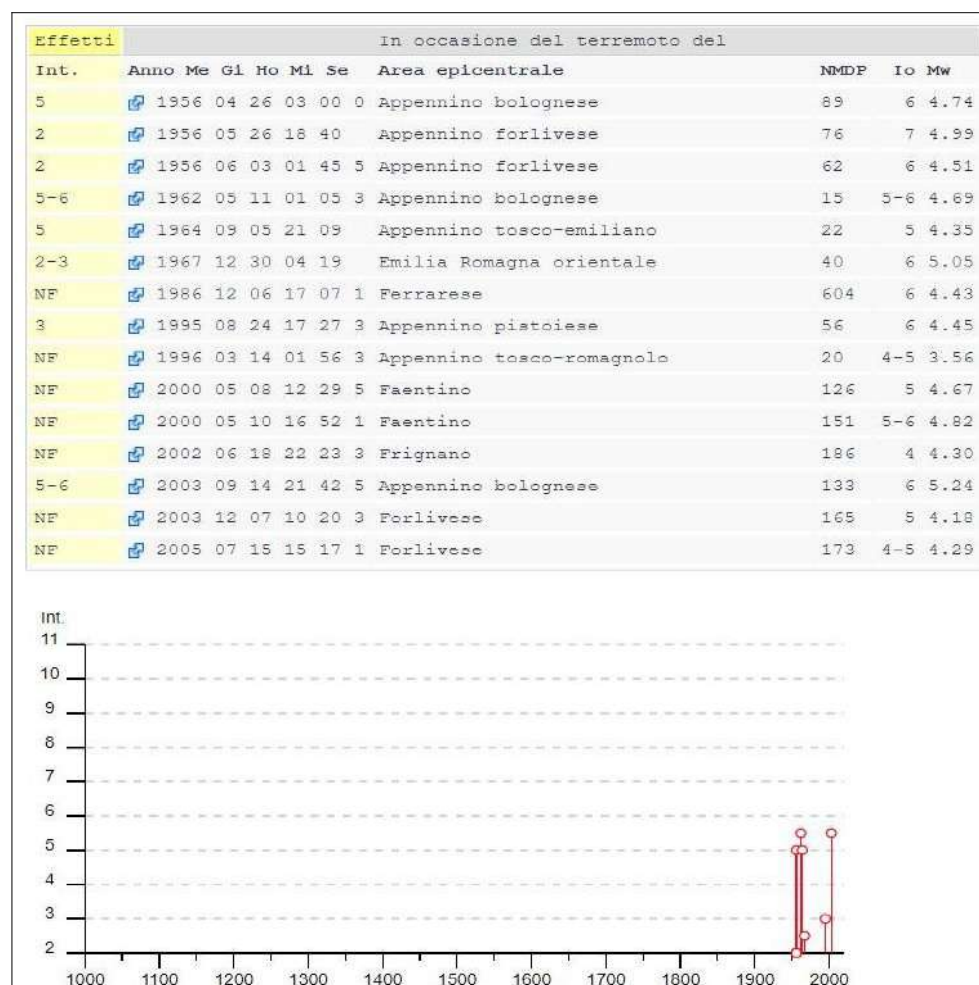


Figura 2.1- Terremoti significativi per il San Benedetto Val di Sambro e macrointensità stimata (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano)

## 2.3 Sorgenti sismogeniche e mappa pericolosità sismica INGV

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano - ZS9, prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, l'area in esame ricade nella Zona 913 (Appennino Emiliano-romagnolo), caratterizzata da un valore di  $Mw_{max}$  pari a 6.14. La zona sismogenica 913 è una delle zone in cui è stato scomposto longitudinalmente l'arco appenninico settentrionale e centrale da Parma fino all'Abruzzo, con eventi sismici riconducibili a meccanismi cinematici prevalentemente compressivi fino al suo margine, oppure a situazioni trascorrenti nelle zone di svincolo della struttura appenninica. Tutta la fascia è caratterizzata da terremoti storici che raramente hanno raggiunto valori molto elevati di magnitudo (fonte: INGV).

Il database DISS v. 3.3.0 (DISS Working Group, 2021) evidenzia come tutto il territorio di San Benedetto Val di Sambro ricada esternamente alle sorgenti sismogeniche definite per il territorio appenninico. In particolare, il Comune risulta a NE della sorgente "ITCS037 - Mugello-Città di Castello-Leonessa" (figura 2.2), che comprende una lunga fascia di territorio esteso



fino all'Appennino Umbro e caratterizzata da sismicità legata a meccanismi tettonici prevalentemente estensionali e profondità ipocentrali dei terremoti generalmente comprese tra 12 km e 22 km. La sorgente sismogenica individuale più vicina all'area di studio è localizzabile nel territorio del Mugello (ITIS087 Mugello Ovest), con l'evento più significativo del 23/06/1542 (magnitudo stimata  $M_w = 5,9$ ).

Un'ulteriore sorgente sismogenica individuale è localizzata a NE del territorio comunale ("ITIS058 "Loiano"), recentemente definita in seguito all'evento sismico del settembre 2003 ( $M_w = 5,3$ ).

Il territorio comunale può inoltre risentire di terremoti associabili all'estesa e più settentrionale fascia sismogenica complessa denominata "ITCS047 – Castelvetro di Modena–Castel San Pietro Terme". Questa fascia sismogenica è caratterizzata da una sismicità associata al fronte compressivo del margine appenninico bolognese affiorante.



Figura 2.2 – Localizzazione delle sorgenti sismogenetiche contenute nel database DISS (v.3.2.1). Foto aerea: Google Earth

## 2.4 Ulteriori elementi di riferimento per la pianificazione territoriale

### 2.4.1 Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica

La Regione Emilia-Romagna ha elaborato e approvato (con Delibera dell'Assemblea Legislativa n.112 del maggio 2007) gli <<Indirizzi per gli studi di Microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica>>, in coerenza con la LR n.20/2000

<<Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio>>. Questi indirizzi regionali per la microzonazione sismica, sono stati redatti sulla scorta degli esiti delle indagini sismiche che la Regione Emilia-Romagna ha effettuato nel territorio regionale negli ultimi 40 anni circa, assumendo come riferimento la “pericolosità di base” elaborata da INGV e recepita a livello nazionale con l'OPCM 3519/2006.

Con le successive DGR 2193/2015 e DGR 630/2019, vengono introdotti sostanziali aggiornamenti agli indirizzi tecnici di riferimento per le analisi sismiche da espletare a supporto della pianificazione territoriale e urbanistica. Queste revisioni hanno considerato come ulteriore riferimento anche le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC), le ulteriori esperienze scientifiche seguite ai recenti eventi sismici italiani (L'Aquila 2009; pianura emiliana del 2012) e, infine, le esperienze di applicazione della DAL 112/2007. In sintesi, le principali novità contenute nella la DGR 2193/2015 e nella DGR 630/2019 consistono:

- ✓ nelle rimodulazioni degli abachi di microzonazione sismica da considerarsi per le analisi semplificate (“livello 2”);
- ✓ nell'introduzione di un ulteriore fattore di amplificazione riferito all'intensità spettrale di Housner SI3 (per l'intervallo di periodo  $T$  compreso tra 0,5 s e 1,5 s);
- ✓ nell'introduzione dei fattori di amplificazione riferiti all'accelerazione spettrale SA1, SA2, SA3, SA4 (per intervalli di periodo  $T$  rispettivamente di 0,1–0,5s, 0,4–0,8s, 0,7–0,11s, 0,5–1,5s);
- ✓ nella definizione dell'input sismico ( $a_{g,ref}$  al sito di riferimento) che ora è definito in base ai valori di pericolosità sismica elaborati dall'INGV per tutto il territorio nazionale sui punti di una griglia di passo pari a 0,05° (mappa MPS04) in analogia con quanto previsto per le NTC 2008);
- ✓ nella richiesta di produrre cartografie delle frequenze naturali dei terreni a scala territoriale e a supporto del “primo livello” di approfondimento;
- ✓ nella richiesta di produrre una carta della distribuzione sul territorio dei valori di “Hazard”  $H_{SM}$  (Naso et al., 2019).

Gli ultimi aggiornamenti degli indirizzi regionali, apportati con la DGR 476/2021 (e DGR integrativa 564/2021), hanno infine riguardato la selezione di nuovi segnali (accelerogrammi) di riferimento per le analisi di risposta sismica locale negli studi di terzo livello.

Gli indirizzi RER forniscono gli elementi essenziali per espletare gli studi di pericolosità sismica secondo i tre “livelli” di approfondimento e forniscono inoltre tabelle e formule propedeutiche alla valutazione semplificata dell'amplificazione locale (microzonazione sismica di “secondo livello”).

Per quanto riguarda la  $a_g$  al sito di riferimento ( $a_{g,ref}$ ), la figura 2.3 riporta per il territorio comunale di San Benedetto Val di Sambro i punti della griglia INGV e i relativi valori di  $a_{refg}$  (mappa MPS04). Ai punti vengono attribuiti i parametri della pericolosità sismica di base e in particolare si attribuiscono il valore dell'accelerazione massima attesa su suolo rigido, con una



probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. La griglia di punti è costruita per tutto il territorio nazionale (densità di 20 punti per grado, circa un punto ogni 5 km) e la mappa MPS04 è diventata ufficialmente la mappa di riferimento per il territorio nazionale a seguito dell'Ordinanza PCM 3519/2006 (G.U. n.105 dell'11 maggio 2006).

Si evince che per il Capoluogo, il valore di  $a_{refg}$  (per terremoti con  $T_R = 475$  anni) è definito pari a 0,166g. Per il territorio amministrativo la pericolosità “di base” risulta in diminuzione da sud a NNO.

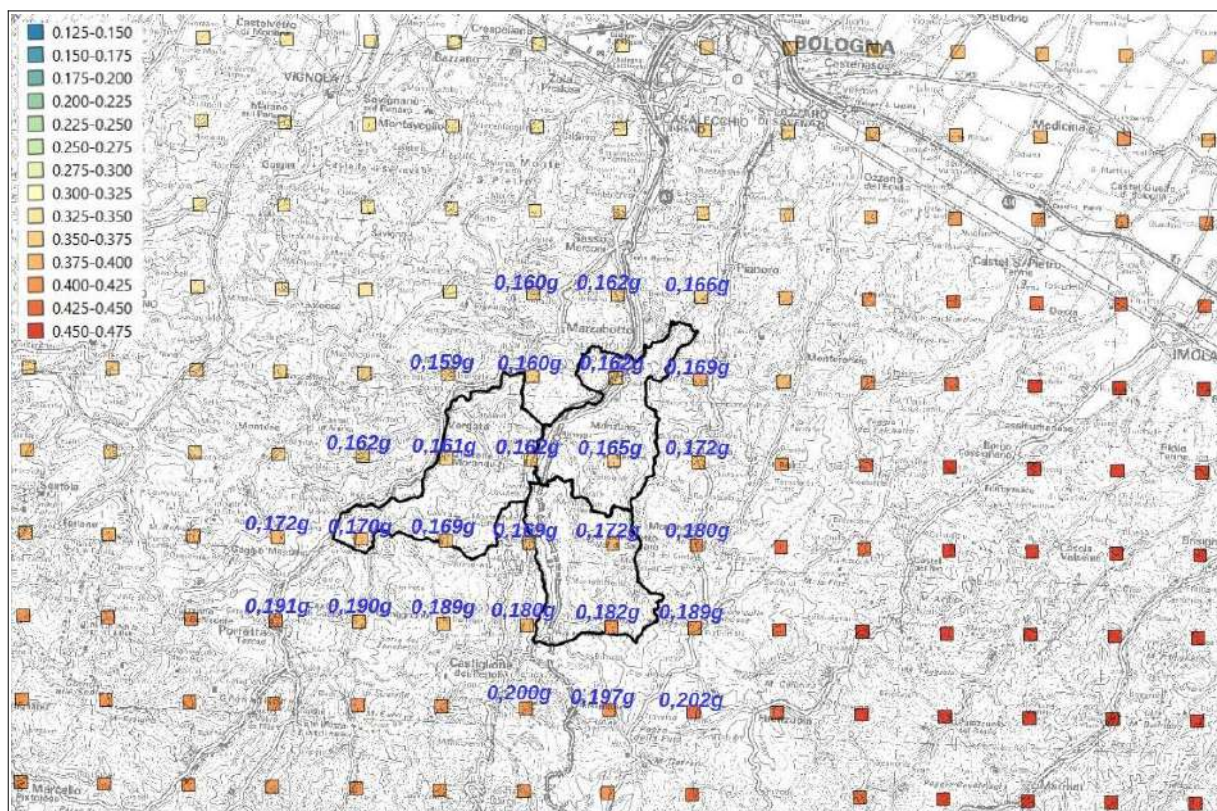


Figura 2.3 – Reticolo INGV di pericolosità sismica. La figura è tratta dalla Relazione Illustrativa redatta per lo studio di MS di “livello 2” precedentemente svolto per i Comuni di Grizzana Morandi, Monzuno e San Benedetto Val di Sambro (OCDPC 344/2016; DGR 2188/2016)

#### 2.4.2 Il rischio sismico definito nel Piano Territoriale Metropolitano di Bologna

La Città Metropolitana di Bologna ha provveduto all'aggiornamento<sup>2</sup> degli studi di pericolosità sismica preliminare dell'intero territorio amministrativo, ai sensi della DGR n.630/2019. Gli esiti di tali studi sono stati recepiti assunti nel Piano e in particolare è stata redatta la <<Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali>> (alla scala 1:25.000 per la collina/montagna), che fornisce:

- un primo livello di approfondimento e identifica le condizioni geologiche e morfologiche che possono determinare effetti locali sulla base dei quali è possibile definire potenziali

<sup>2</sup> aggiornamento dei contenuti della <<Variante al PTCIP in materia di Rischio Sismico>> approvata con Delibera del Consiglio Provinciale del n°57 del 28/10/2013

scenari di pericolosità sismica locale;

- una prima distinzione del territorio sulla base degli effetti locali attesi in caso di evento sismico e, per ciascuna tipologia di esse, vengono indicate le indagini e/o le analisi di approfondimento che devono essere effettuate dagli strumenti di pianificazione successivi.



### 3 ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA

#### 3.1 Inquadramento geologico regionale<sup>3</sup>

L'assetto geologico strutturale generale del territorio comunale di San Benedetto Val di Sambro e del territorio contermino, è attribuibile al contesto montano più ampio di “catena appenninica” settentrionale. Il settore di catena appenninica del territorio in esame è caratterizzato da un generale assetto strutturale a falde sovrapposte (Elter, 1960; Reuter & Groscurth, 1978), sviluppatosi principalmente nel Terziario in seguito alla collisione tra due blocchi continentali rappresentati dalla zolla Europea (o Sardo-Corsa), e della microplacca Adria o Apula o Adriatico-Padana. Il processo di collisione è stato preceduto dalla chiusura di un'area oceanica: il paleoceanico ligure o ligure-piemontese, precedentemente interposto tra di esse (Abbate et alii, 1970).

La catena deriva pertanto dalla deformazione di differenti domini paleogeografici meso-cenozoici: il *Dominio ligure* (corrispondente in larga misura all'area oceanica), il *Dominio sub ligure*, sviluppato sulla crosta assottigliata africana adiacente alla zona oceanica, e il *Dominio toso-umbro* di pertinenza adriatico-padana.

Oltre a questi domini entra a far parte dell'Appennino settentrionale il *Dominio epiligure* (Ricci Lucchi & Ori, 1985; Bettelli et alii, 1989) formato da sedimenti depositi a partire dall'Eocene medio sulle unità Liguri già tettonizzate.

La chiusura dell'Oceano ligure e la collisione tra i due blocchi continentali portano alla formazione di un prisma di accrezione (Treves, 1984) costituito da rocce deformate per raschiatura ed appilamento a spese degli originari sedimenti depositi sui domini citati. Rocce che inizialmente occupavano aree paleogeografiche tra loro affiancate vengono a sovrapporsi, con i terreni del Dominio ligure accavallati su quelli del subligure e di ambedue sul Dominio toso-umbro-marchigiano costituito a sua volta da elementi strutturali sovrapposti.

Nell'appennino emiliano, le Liguridi affioranti sul versante padano, tradizionalmente definite “Liguridi esterne”, non presentano impronte di carattere metamorfico e non risultano aver conservato testimonianza dell'originario substrato oceanico sul quale esse si depositarono e dal quale si scollarono durante l'orogenesi appenninica. Rocce ofiolitiche, tuttavia, sono presenti anche nelle Successioni delle Liguridi esterne, ma sotto forma di masse isolate (anche di considerevoli dimensioni, incluse tettonicamente o per fenomeni di frana). Le Liguridi esterne offrono indirette testimonianze della vicinanza del margine continentale (microplacca Adria).

L'orogenesi dell'Appennino settentrionale, che ha scomposto i vari domini paleogeografici appilando e giustappponendo tra loro in modo complicato le successioni stratigrafiche tanto da rendere problematica la ricostruzione degli originari rapporti, è il risultato di movimenti tettonici complessi sviluppatisi in un arco di tempo che dal Cretaceo superiore giunge sino

---

<sup>3</sup> Sintesi estratta dalle “Note Illustrative” della Carta Geologica d'Italia scala 1:50.000 (fogli 237 e 252)

all'attuale. Le varie fasi di questa evoluzione sono solitamente raggruppate in cicli principali:

- 1) il primo ciclo in ordine di tempo comprende le “fasi liguri” (o mesoalpine) ed ha interessato i Domini liguri, interno ed esterno e, probabilmente, anche quello subligure. Esso si considera concluso con l'inizio della deposizione nell'Eocene medio dei terreni della Successione epiligure;
- 2) Il secondo ciclo, miocenico, comprende le “fasi toscane s.l.” (o neoalpine) durante le quali si ha la messa in posto sui Domini toscano-umbri delle Unità liguri e subliguri già tettonizzate e della sovrastante Successione epiligure.

La tettonica delle Liguridi esterne risulta caratterizzata da una prima fase con pieghe isoclinali compresse (Casnedi, 1982; Marini, 1982; Meccheri et alii, 1982; Marroni, 1991; Vescovi, 1991; Bettelli et alii, 1994; 1996), seguita da una seconda fase che ha prodotto un ulteriore raccorciamento ed ha ripiegato le strutture precedenti. Ambedue le fasi sono a vergenza europea, opposta a quella che caratterizza le fasi successive. Esse portano ad una profonda ristrutturazione del prisma di accrezione Ligure che, successivamente durante le fasi toscane, non subirà, tranne poche eccezioni, ulteriori sostanziali modifiche.

L'insieme delle fasi liguri porta ad un appilamento delle successioni deposte nei Domini Liguri in estese falde e alla chiusura dell'oceano ligure-piemontese. I movimenti avvengono in ambiente subacqueo e su questi terreni corrugati si impostano vari bacini minori entro cui si depositano le sequenze detritiche Epiliguri.

Le fasi toscane sono caratterizzate a partire dall'Oligocene superiore dalla collisione delle due zolle continentali l'Europea (o Sardo-Corsa) e l'Apula con una tettonica a *thrusts* e falde, prima con sottoscorrimento verso ovest delle Unità toscane al di sotto delle Unità tettoniche subliguri e liguri già impilate e successivamente di quelle umbro-marchigiane al di sotto delle precedenti. Vengono così ad individuarsi le principali unità tettoniche che ora costituiscono l'ossatura della catena appenninica settentrionale in cui la parte più profonda dell'edificio è occupata dal nucleo metamorfico apuano (Carmignani et alii, 1978) al quale si sovrappone la Falda toscana a sua volta sovrascorsa dalle Subliguridi e dalle Liguridi.

La strutturazione dell'Appennino è dunque strettamente connessa da un lato all'evoluzione estensionale del Mediterraneo occidentale e dall'altro al contemporaneo sottoscorrimento del basamento padano-adriatico e delle coperture meso-cenozoiche al di sotto di quello ligure-toscano (Tomaselli et alii, 1992) e della catena neoformata. Tale strutturazione ha portato le Unità tettoniche Liguri e Subliguri con sovrapposte stratigraficamente le formazioni Epiliguri a costituire una estesa coltre alloctona che a partire da] Miocene inferiore si accavalla via via sugli altri domini (quelli Toscani e quelli Umbro-Marchigiani) sino al margine della catena.

In figura 3.1 è rappresentato il quadro geologico strutturale più ampio che identifica i rapporti tra catena e Pianura Padana. Questa figura, pubblicata nelle Note Illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (2004), riporta una sezione geologica di sintesi, ricostruita da Castiglione dei Pepoli, passando per Bologna, fino al fiume Po.

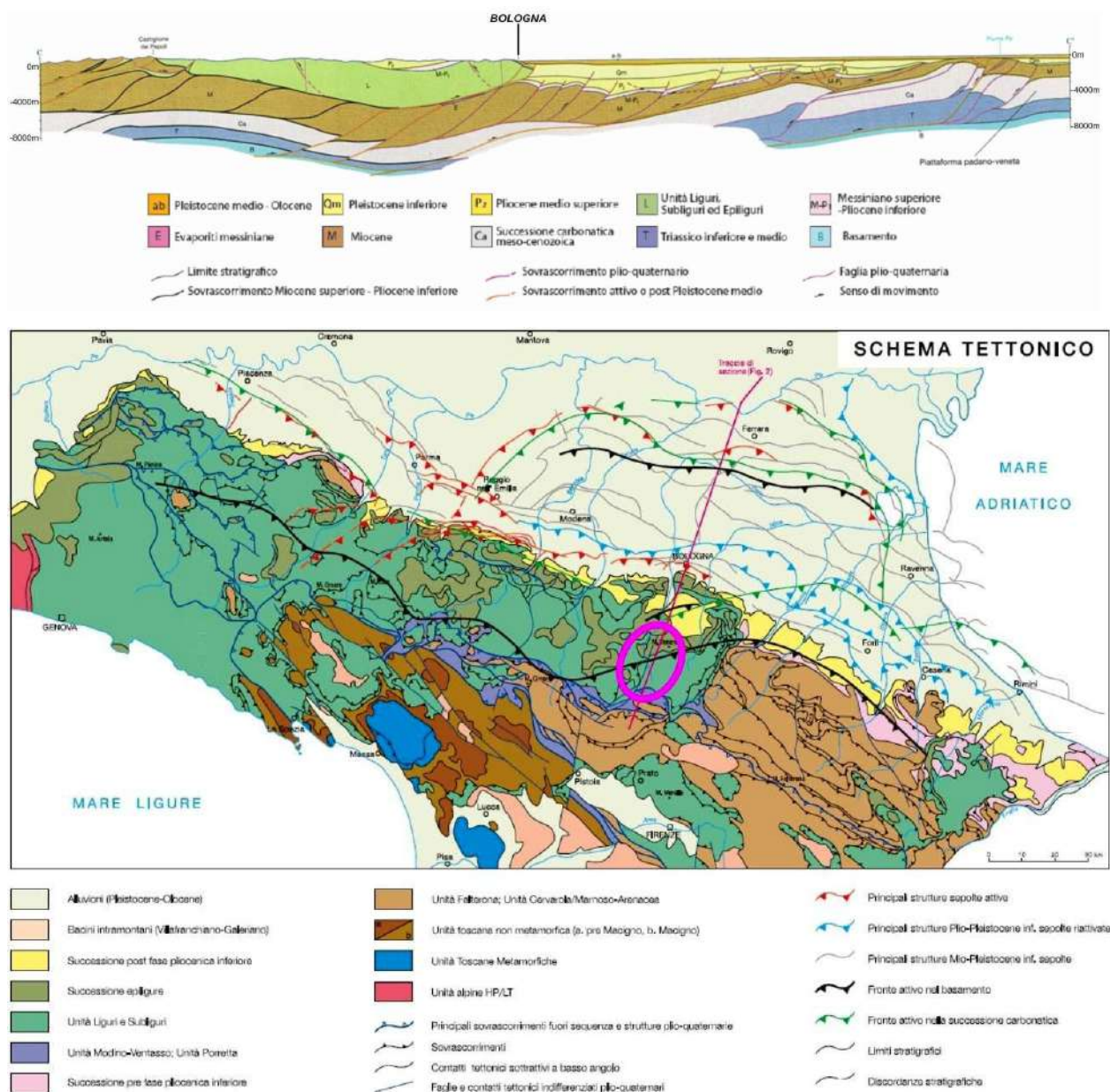


Figura 3.1 – Schema geologico e tettonico del territorio emiliano-romagnolo, tratto dalle “Note Illustrative alla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna” (ed. 2004). Il territorio studiato è localizzato nel cerchiato fucsia

In figura 3.1 è rappresentato il quadro geologico strutturale più ampio che identifica i rapporti tra catena e Pianura Padana. Questa figura, pubblicata nelle Note Illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (2004), riporta una sezione geologica di sintesi, ricostruita da Castiglione dei Pepoli, passando per Bologna, fino al fiume Po.

La figura 3.2 presenta un ulteriore e più aggiornato schema tettonico del territorio emiliano-romagnolo tratto dalle Note Illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe (edizione 2016).



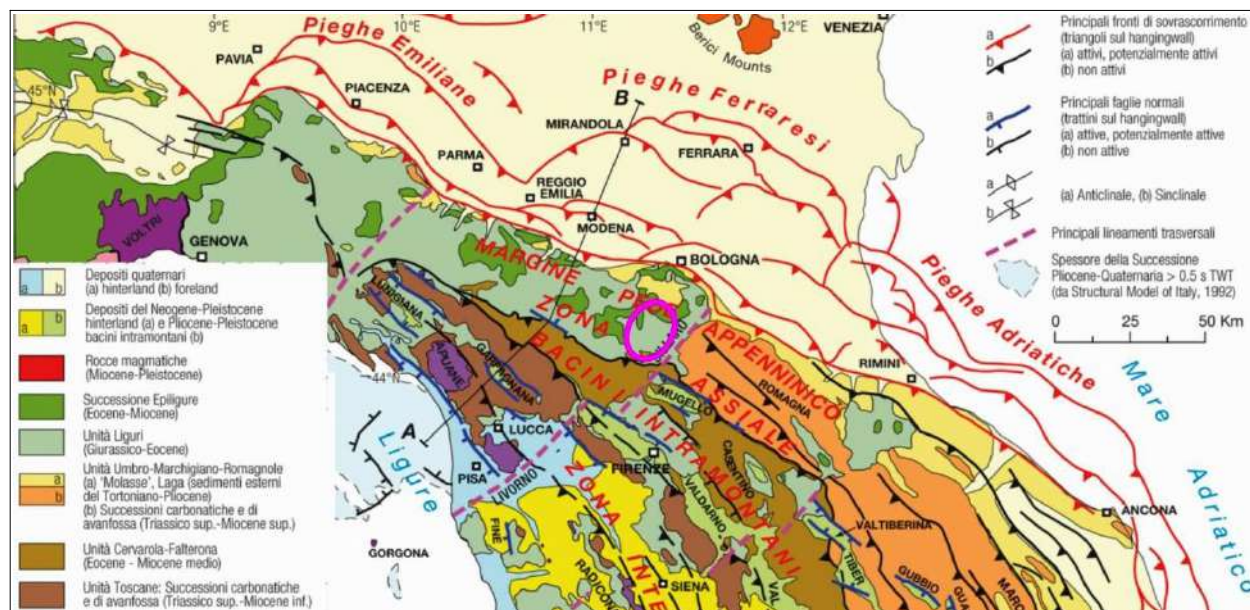


Figura 3.2 – Schema tettonico emiliano-romagnolo tratto dalle “Note Illustrative alla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna a aree limitrofe” (ed. 2016). Il Territorio studiato è localizzato nel cerchiato fucsia

### 3.2 Ulteriori dati geologici e morfo-strutturali in aree con evidenze di attività tettonica recente

Le “Note Illustrative” prodotte a corredo della carta sismotettonica dell'Emilia-Romagna, nelle due edizioni fin qui pubblicate (2004 e 2016), hanno approfondito su particolari evidenze di attività tettonica recente riscontrate in settori di catena, di margine e di pianura della regione. Rilievi geologici, sismici nonché studi morfo-tettonici indicano come la tettonica attiva sia generalmente caratterizzata dalla presenza di strutture compressive attive, come sovrascorrimenti e piegamenti, come evidenziano anche i meccanismi focali di terremoti noti (Gasparini et alii, 1985; Boccaletti et alii, 1985; Anderson & Jackson, 1987; Frepoli & Amato, 1997; Mariucci et alii, 1999; Benedetti et alii, 2000–2003; Selvaggi et alii, 2001).

Vari Autori, hanno descritto strutture tettoniche trasversali all'asse principale, orientate NNE–SSW, che svincolano la catena in questo settore caratterizzato da deformazione attiva prevalentemente lungo il “thrust” appenninico (Ghelardoni, 1965; Bortolotti, 1966; Castellarin et al., 1985; v. anche Martelli, 2015; Martelli et al. 2017; ecc.).

Rispetto al territorio in esame, l'andamento geografico del principale spartiacque, posto più a sud rispetto al territori di studio, evidenzia come la catena appenninica risulti dislocata tra le valli del Panaro e del Sillaro. In particolare, l'area del crinale appenninico tra Pracchia (Pistoia) e Castiglione dei Pepoli risulta compreso in una delle principali fasce di deformazione trasversale di questa parte della catena (figura 3.3). Sono infatti individuabili strutture con direzione NE–SW, come ad esempio la faglia localizzata nella valle del F. Reno (da Pontepetri a Ponte alla Venturina, con una lunghezza di oltre 15 km) le cui caratteristiche morfologiche (fianchi acclivi; andamento rettilineo) suggeriscono attività recente quaternaria.



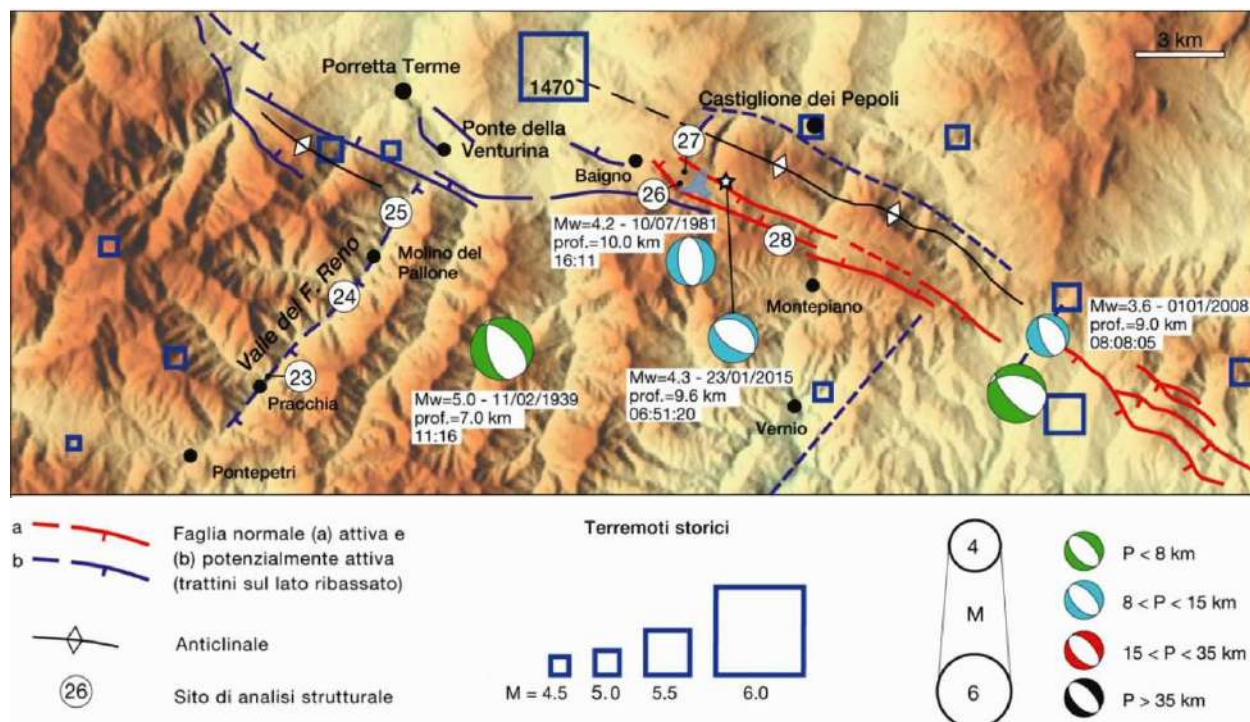


Figura 3.3 – Mappa schematica dell'area di crinale appenninico tra Valle del Reno e Castiglione dei Pepoli (da: Note Illustrative Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe – ed. 2016)

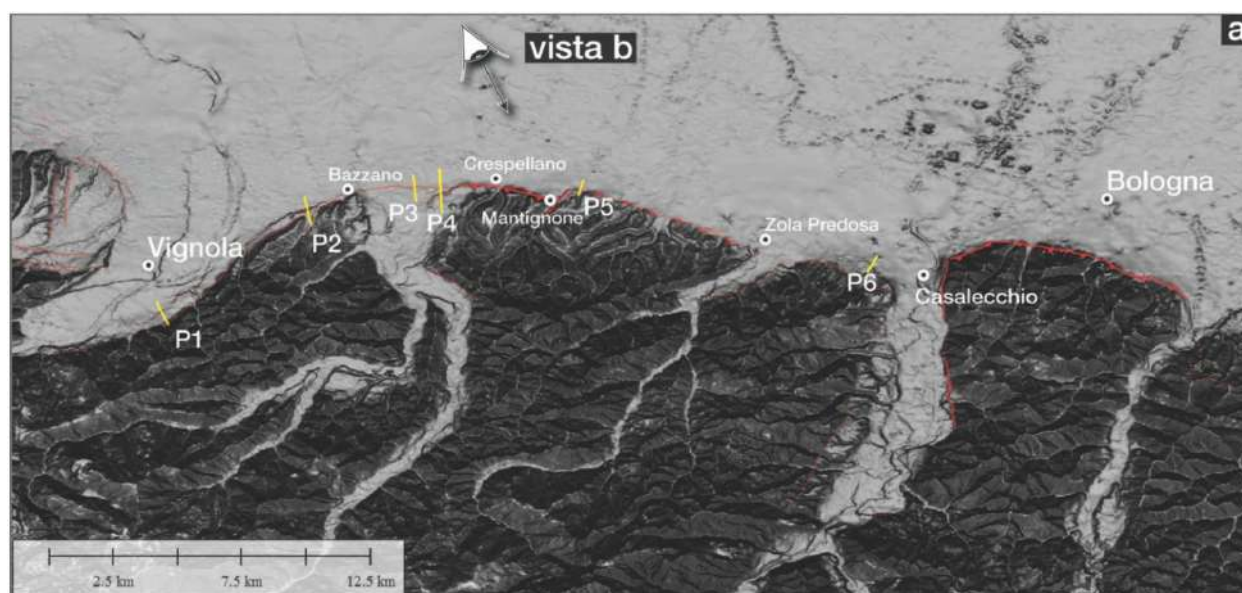


Figura 3.4 – Elaborazione DEM del fronte affiorante del margine appenninico tra Vignola e Bologna (da: Note Illustrative Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe – ed. 2016)

Il territorio studiato appare dunque inserirsi in un contesto più ampio di attività deformative tettoniche relativamente recenti. Ulteriori evidenze sono infatti riscontrabili più a nord, ovvero lungo il limite morfologico collina-pianura, dove si possono individuare strutture trascorrenti minori che dislocano il fronte del margine affiorante tra le valli dei fiumi Panaro e Reno. In particolare, nel settore Casalecchio-Bologna, si riscontra una dislocazione sinistra del fronte di

quasi 4 km (Boccaletti et al., 2004), con il limite morfologico collina–pianura, ad est del Reno, che risulta infatti più avanzato verso nord (figura 3.4).

### 3.3 Stratigrafia

#### 3.3.1 Elementi introduttivi

I dati conoscitivi sono derivati dalla Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, consultabile anche on line nel sito del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. Un ulteriore riferimento per questo lavoro, è rappresentato anche dalla Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (progetto CARG).

Il territorio comunale di San Benedetto Val di Sambro è costituito da substrato marino affiorante appartenente al dominio Ligure. Solo per un limitato settore sud-occidentale (a sud di Pian del Voglio), il substrato roccioso risulta di dominio subligure. La figura 3.5 rappresenta un'ulteriore schema di sintesi delle principali litologie (affioranti o meno).

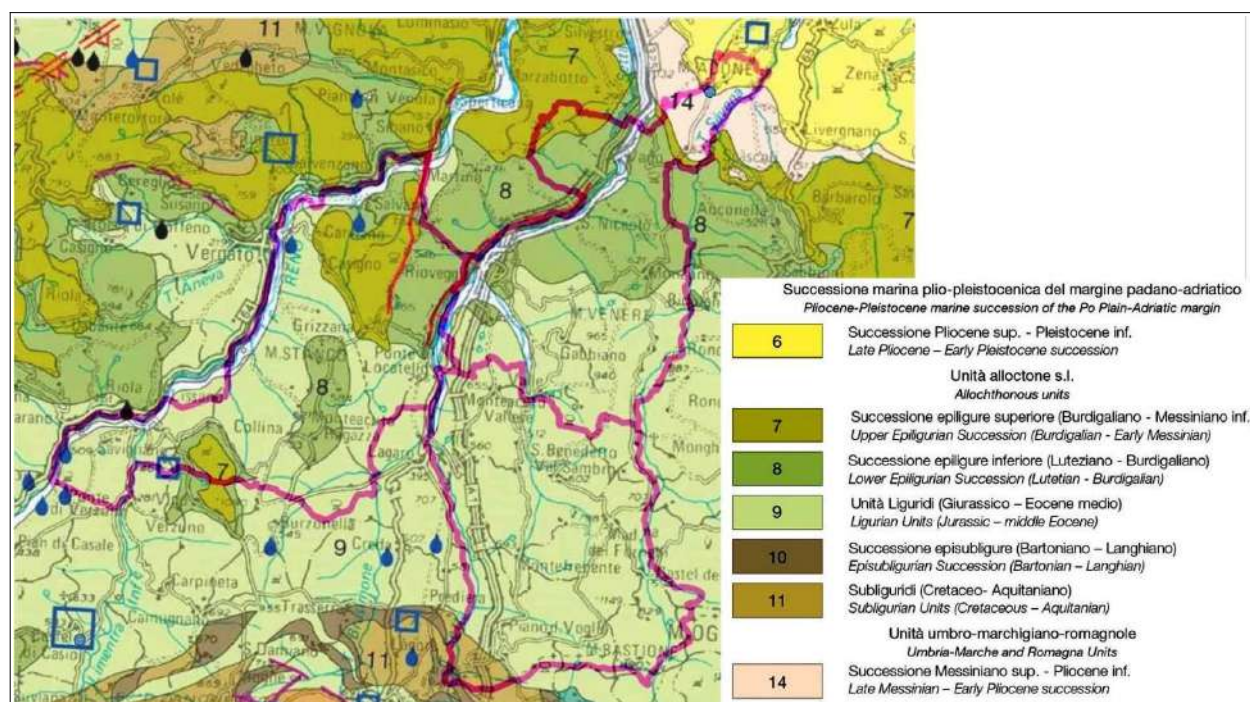


Figura 3.5 – Stralcio della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe (ed. 2016) e della sua legenda (unità geologiche affioranti). La figura è tratta dalla Relazione Illustrativa redatta per lo studio di MS di “livello 2” precedentemente svolto per i Comuni di Grizzana Morandi, Monzuno e San Benedetto Val di Sambro (OCDPC 344/2016; DGR 2188/2016)

Le unità litostratigrafiche Subliguri sono qui rappresentate da argilliti a struttura scagliosa per le elevate deformazioni tettoniche (“Argille Varicolori”).

Le unità litostratigrafiche Liguri sono rappresentate da formazioni torbiditiche di età tardo cretacea e paleogenica per le quali è stato possibile ricostruire delle originarie successioni stratigrafiche e da formazioni, genericamente definibili come "pre-flysch" (Complessi di base Auctti), che si presentano per lo più deformate in modo pervasivo con la distruzione



dell'originario ordine stratigrafico. Queste ultime costituiscono in gran parte ciò che nei Fogli della Carta Geologica d'Italia a scala 1:100.000 era definito come "Complesso caotico" e "Complesso indifferenziato".

I depositi continentali di età quaternaria (figura 3.6) sono infine rappresentati da depositi alluvionali (terrazzati e non) e locali depositi di conoide torrentizia, inoltre depositi di versante s.l. e depositi eluvio-colluviali.

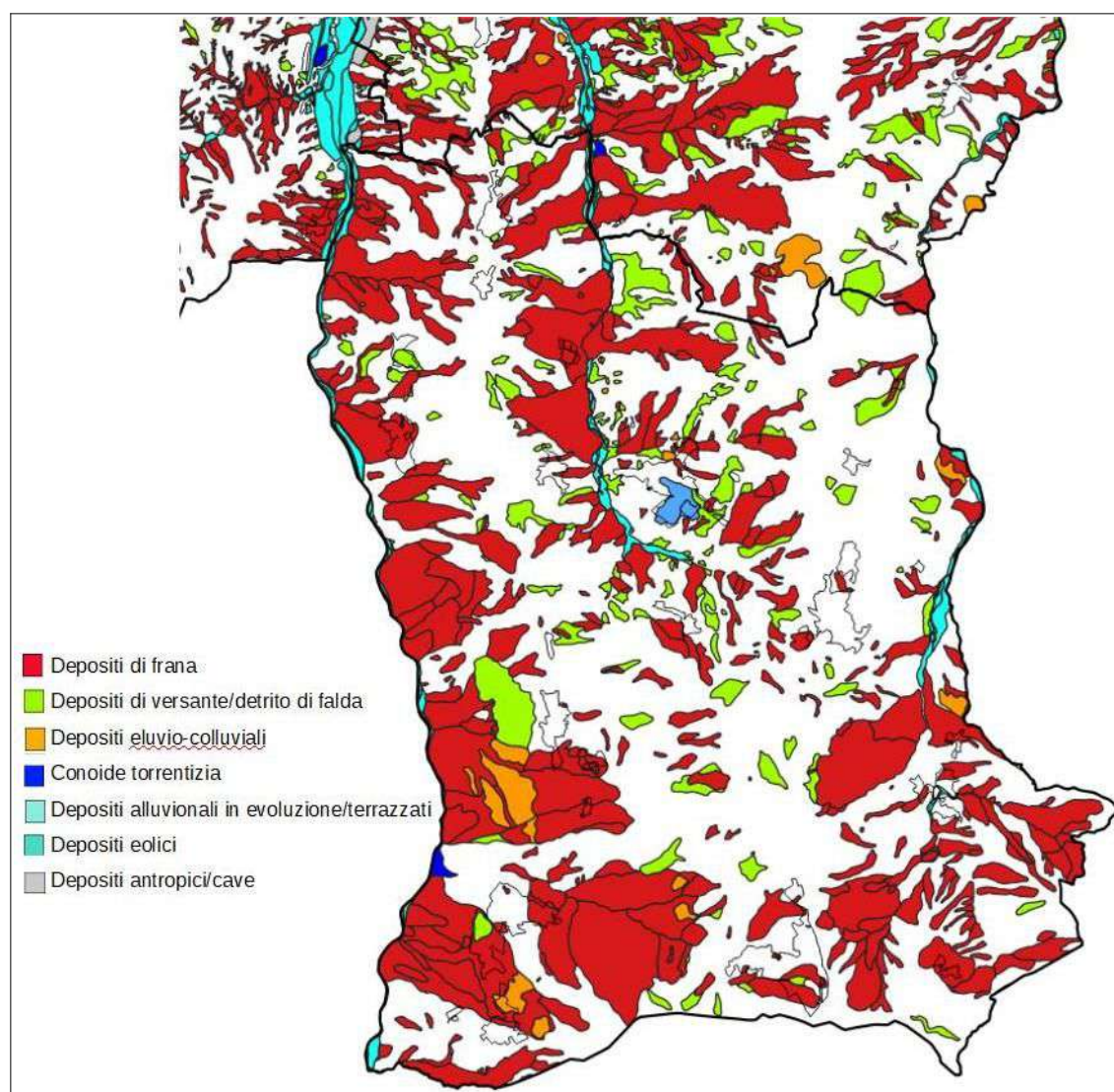


Figura 3.6 – Depositi continentali quaternari nel territorio comunale di San Benedetto Val di Sambro (fonte dati vettoriali: SGSS Regione Emilia-Romagna)

Nei successivi paragrafi verranno descritte con maggior dettaglio le singole unità litostratigrafiche affioranti (dai termini più antichi ai più recenti) e i depositi quaternari che interessano il territorio studiato di San Benedetto Val di Sambro. Ulteriori elementi conoscitivi di carattere geomorfologico e stratigrafico, a supporto della modellazione del sottosuolo degli areali studiati, verranno inoltre illustrati nel capitolo 5.

### 3.3.2 Unità Subliguridi

#### **AVC – Argilliti Variegate con Calcari**

Argilliti, talora marnose, bruno verdastre o grigio-verdi, talora in bande blu, nocciola in superficie alterata, in strati sottili con intercalate calcilutiti grigie (bianco-giallastre in superficie alterata), in strati da sottili a molto spessi, a volte marnose al tetto, e siltiti e arenarie fini in strati sottili. Rapporto A/C >1. Strati calcareo-marnosi grigi, biancastri se alterati, da spessi a molto spessi, con base calcarenitica fine; brecce a matrice argillosa bruna a prevalenti clasti di calcari tipo palombini; argilliti grigio-piombo in livelli di spessore decimetrico alternate a calcari silicei grigio-blaustrati in strati sottili e medi. Localmente sono presenti di brecce di ofalciti e gabbri (bo) e basalti brecciati (Bb). Deformazione tettonica molto intensa che dà origine ad una foliazione ben marcata estremamente pervasiva nelle argilliti, mentre i livelli più competenti si presentano sottoforma di boudins e cerniere sradicate; solo molto raramente la stratificazione originale è preservata. Deposito di ambiente marino profondo. Contatto inferiore non affiorante; interdigitazioni con BAP. Potenza fino a circa 800 m. Età deposizionale: Cretaceo inf. – Eocene.

### 3.3.3 Unità Liguridi (formazioni “pre flysch”)

#### **APA – ARGILLE A PALOMBINI**

Argilliti ed argilliti siltose grigio scure, più raramente verdi, rossastre o grigio-azzurrognole, fissili (nella pelite è spesso presente un clivaggio scaglioso a carattere pervasivo), alternate a calcilutiti silicizzate grigio chiare e grigio-verdi, biancastre in superficie alterata, talvolta con base arenitica da fine a grossolana, in strati da medi a spessi (molto spesso discontinui per motivi tettonici) e più rari calcari marnosi grigi e verdi in strati spessi. Rapporto Argilla/Calcare quasi sempre >1. Frequenti intercalazioni di siltiti ed arenarie torbiditiche fini (talora mangesifere) a tetto pelitico in letti molto sottili e sottili di colore grigio scuro (o beige se alterate) e di calcareniti medio-grossolane in strati da medi a spessi. La formazione in genere è intensamente deformata con perdita dell'originario ordine stratigrafico alla scala dell'affioramento; gli strati calcilutitici sono spesso “boudinati”, a luoghi silicizzati, pervasivamente fratturati e caratterizzati da una fitta rete di vene di calcite, spalmature verdastre sulle superfici di strato e frattura concoide. All'interno della formazione sono talora stati cartografati lembi di ofioliti (of) giurassiche, fino a decametrici.

Sedimentazione pelagica argillosa, intervallata da risedimentazione di fanghi carbonatici. Contatti ovunque tettonici o non affioranti. Potenza geometrica variabile da alcune decine ad alcune centinaia di metri. Età deposizionale: da: Cretaceo inf. A: Turoniano

#### **AVT – ARGILLE VARIEGATE DI GRIZZANA MORANDI**

Argilliti e argille rosso violacee, verdastre, grigio-scure e grigio azzurrognole, con subordinate siltiti grigio-scure o nere mangesifere, in strati sottili o molto sottili e calcilutiti grigio-verdi in strati sottili e medi. Formazione intensamente deformata con perdita dell'originario ordine stratigrafico alla scala dell'affioramento. Pelagiti e torbiditi distali di ambiente di piana abissale.



Contatto inferiore non preservato. Potenza fino a 200 m circa. Età deposizionale: da: Cenomaniano A: Santoniano superiore .

### *3.3.4 Unità Liguridi*

#### **MLL – FORMAZIONE DI MONTE MORELLO**

Torbiditi a basi calcarenitiche e calcilutitiche prevalentemente fini, passanti a calcari marnosi ed a marne verdine o biancastre, in banchi e strati da spessi a molto spessi. Localmente areniti fini in strati da medi a spessi di colore grigio, marrone all'alterazione. Contatti tettonici con le altre formazioni. Torbiditi di ambiente marino profondo. Potenza geometrica da pochi metri fino a 600 m. Età deposizionale: Ypresiano–Luteziano

#### **MOV – FORMAZIONE DI MONTE VENERE**

Torbiditi arenaceo–marnose con base fine grigio–chiaro, in strati da medi a molto spessi fino a banchi di oltre 15 m, al tetto intervalli sottili o medi di argille scure o nerastre. Intercalazioni metriche di strati arenaceo–pelitici da sottili a spessi grigio brunastri, con rapporto A/P >1, a luoghi prevalenti sugli strati calcareo–marnosi. Le areniti hanno composizione arcosica e possono avere cementazione scarsa, specie quelle a grana più grossolana.. Paleocorrenti con provenienza dai quadranti meridionali. Torbiditi di ambiente marino profondo. Contatto inferiore non preservato. Potenza di oltre 900 m. Età deposizionale: Campaniano sup. – Maastrichtiano sup.

#### **MOH – FORMAZIONE DI MONGHIDORO**

Torbiditi arenaceo–pelitiche in strati generalmente spessi, raramente molto spessi, con rapporto A/P @ 2/1. Si intercalano intervalli metrici di strati sottili e medi con rapporto A/P = 1/2. Le arenarie sono gradate con base a granulometria da media a grossolana, talora microconglomeratica, localmente poco cementate, di colore grigio scuro ma generalmente marroni o giallastre per alterazione ed ossidazione dei minerali femici; passano ad argilliti più o meno siltose di colore nerastro. Nella parte bassa della formazione sono presenti torbiditi a base arenacea e tetto calcareo–marnoso con abbondanti tracce di fucoidi. Localmente distinta una litofacies arenacea (MOHa), caratterizzata da strati da sottili a spessi con rapporto A/P >>1, potente fino a 300 m. Torbiditi di piana bacinale. Limite inferiore graduale su MOV, dove non tettonizzato. La potenza geometrica massima è di qualche centinaio di metri. Età deposizionale: Maastrichtiano sup. – Paleocene.

### *3.3.5 Depositi continentali quaternari*

#### ***Depositi alluvionali:***

##### ***b1 – Depositi alluvionali in evoluzione***

Costituiti da ghiaie, talora embriciate, sabbie e limi argillosi di origine fluviale, attualmente soggetti a variazioni dovute alla dinamica fluviale; detrito generalmente incoerente e caotico,

costituito da clasti eterometrici ed eterogenei, talora arrotondati, in matrice sabbiosa, allo sbocco di impluvi e valli secondarie. Sono talora fissati da vegetazione.

#### *i1 – Conoide torrentizia in evoluzione*

Depositi alluvionali, prevalentemente ghiaiosi, a forma di ventaglio aperto verso valle, in corrispondenza dello sbocco di valli e vallecole trasversali ai corsi d'acqua principali ove la diminuzione di pendenza provoca la sedimentazione del materiale trasportato dall'acqua, soggetti ad evoluzione dovuta alla dinamica torrentizia.

#### *i2 – Conoide torrentizia inattiva*

Depositi alluvionali, prevalentemente ghiaiosi, a forma di ventaglio aperto verso valle, in corrispondenza dello sbocco di valli e vallecole trasversali ai corsi d'acqua principali ove la diminuzione di pendenza provoca la sedimentazione del materiale trasportato dall'acqua, attualmente non soggetti ad evoluzione.

#### **AES7 – Depositi del subsistema di Villa Verrucchio**

Ghiaie sovrastate da limi più o meno sabbiosi, organizzate in alcuni ordini di terrazzi intravallivi. Al tetto suoli non calcarei di colore bruno scuro, sovrastanti altri suoli non calcarei. Il fronte di alterazione è spesso complessivamente fino a 2 m circa. Sono individuati nel fondovalle del torrente Setta, presso Rioveggio – Canova. Limite inferiore erosivo e discordante sui sottostanti depositi marini. Spessore massimo di 70 m circa nel sottosuolo della pianura. Età deposizionale: Pleistocene sup.

#### **AES8 – Depositi del subsistema di Ravenna**

Nelle porzioni intravallive, sono costituite da ghiaie di canale fluviale passanti a limi ed argille. Le ghiaie hanno uno spessore fino a tre metri circa; i depositi fini sovrastanti hanno uno spessore variabile fino a due metri circa. Età: Pleistocene sup. – Olocene.

#### **AES8a – Unità di Modena (AES8a)**

Il Subsistema di Ravenna distingue una unità di rango gerarchico inferiore che, dove presente, ne costituisce il tetto stratigrafico. Il limite superiore è sempre affiorante e generalmente costituito da un suolo calcareo; il limite inferiore è costituito da una superficie di erosione fluviale nelle aree intravallive e dal contatto netto sul suolo non calcareo (o scarsamente calcareo). Età deposizionale: post-romana (IV–VI sec. d.C. – Attuale).

#### **a1 – Deposito di frana attiva**

Deposito gravitativo con evidenze di movimenti in atto o recenti, costituito da litotipi eterogenei, raramente monogenici, ed eterometrici, più o meno caotici. La tessitura dei depositi è condizionata dalla litologia del substrato e dal tipo di movimento prevalente. La maggior parte dei depositi di frana del territorio appenninico è comunque di tipo complesso ed è il risultato di più tipi di movimento sovrapposti nello spazio e nel tempo (tipicamente scorrimenti/colamenti). La tessitura prevalente risulta costituita da clasti di dimensioni variabili

immersi in una abbondante matrice pelitica e/o sabbiosa.

***a1a – Deposito di frana per crollo e/o ribaltamento***

Deposito originato da distacco di rocce litoidi da un pendio acclive e messo in posto con processi di caduta libera, rimbalzo e rotolamento di ciottoli e massi. L'accumulo detritico è costituito da materiale eterogeneo ed eterometrico, con frammenti litoidi di dimensioni variabili tra qualche cmc e decine di mc, privo di matrice o in matrice sabbioso-pelitica a luoghi alterata e pedogenizzata. E' caratteristica la riattivazione improvvisa e la estrema velocità del movimento.

***a1b – Deposito di frana per scivolamento***

Deposito originato dal movimento verso la base del versante di una massa di terra o roccia, che avviene in gran parte lungo una superficie di rottura o entro una fascia, relativamente sottile, di intensa deformazione di taglio.

***a1d – Deposito di frana per colamento lento***

Deposito messo in posto da movimento distribuito in maniera continuata all'interno della massa spostata. Le superfici di taglio all'interno di questa sono multiple, temporanee e generalmente non vengono conservate. I materiali coinvolti sono per lo più coesivi. I depositi più frequenti sono costituiti in prevalenza da una matrice pelitica e/o pelitico-sabbiosa che include clasti di dimensioni variabili.

***a1g – Deposito di frana complessa***

Deposito messo in posto in seguito alla combinazione nello spazio e nel tempo di due o più tipi di movimento.

***a1h – Deposito di frana attiva per scivolamento in blocco o DGPV***

Deposito costituito da masse di dimensioni più o meno rilevanti di roccia che, pur scivolando lungo una o più superfici di scorrimento, traslazionale e/o rotazionale, conservano al loro interno la coerenza stratigrafica della roccia di provenienza. Si trovano spesso nella parte alta dei versanti e su vaste superfici e sono in grande prevalenza in stato di attività quiescente o soggette a movimenti estremamente lenti. Sono caratterizzate frequentemente dalla presenza di insediamenti storici. Le DGPV (Deformazioni gravitative profonde di versante) sono movimenti di masse che coinvolgono interi versanti e che si attuano attraverso una deformazione per lo più lenta e progressiva della massa rocciosa senza che sia presente in profondità un vero piano di scorrimento. Anch'esse presentano caratteristiche di movimenti estremamente lenti. Le due tipologie sono spesso di difficile distinzione e pertanto nella cartografia geologica regionale risultano rappresentate insieme.

***a2 – Deposito di frana quiescente***

Deposito gravitativo senza evidenze di movimenti in atto o recenti ma con possibilità di riattivazione, costituito da litotipi eterogenei, raramente monogenici, ed eterometrici, più o

meno caotici. La tessitura dei depositi è condizionata dalla litologia del substrato e dal tipo di movimento prevalente. La maggior parte dei depositi di frana del territorio appenninico è comunque di tipo complesso ed è il risultato di più tipi di movimento sovrapposti nello spazio e nel tempo (tipicamente scorrimenti/colamenti). La tessitura prevalente risulta costituita da clasti di dimensioni variabili immersi in una abbondante matrice pelitica e/o sabbiosa.

***a2b – Deposito di frana per scivolamento***

(descrizione analoga a a1b)

***a2d – Deposito di frana per colamento lento***

(descrizione analoga a a1d)

***a2g – Deposito di frana complessa***

(descrizione analoga a a1g)

***a2h – Deposito di frana per scivolamento in blocco***

(descrizione analoga a a1H)

***a3 – Depositi di versante***

Costituito da litotipi eterogenei ed eterometrici più o meno caotici. Frequentemente l'accumulo si presenta con una tessitura costituita da clasti di dimensioni variabili immersi e sostenuti da una matrice pelitica e/o sabbiosa (che può essere alterata per ossidazione e pedogenesi), a luoghi stratificato e/o cementato. La genesi può essere gravitativa, da ruscellamento superficiale e/o da soliflusso.

***a4 – Deposito eluvio-colluviale***

Coltre di materiale detritico, generalmente fine (sabbie, limi e peliti) prodotto da alterazione "in situ" o selezionato dall'azione mista delle acque di ruscellamento e della gravità, con a luoghi clasti a spigoli vivi o leggermente arrotondati.

Vengono inoltre assunte alcune perimetrazioni relative a depositi antropici (aree di cava) situate nel fondovalle del Setta.



## 4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

### 4.1 Dati pregressi e indagini eseguite per la MS di livello 2 (OCDPC 344/2016)

La fase iniziale di lavoro svolta per gli studi di MS di livello 2 (OCDPC 344/2016) ha previsto la raccolta, selezione e riordino delle indagini geognostiche/geofisiche e di laboratorio disponibili per il territorio di San Benedetto Val di Sambro. In questo senso, si è potuto disporre di un discreto numero di prove geognostiche e geofisiche di repertorio fornite dall'Amministrazione comunale. Si tratta di prove relative a indagini geologiche, archiviate presso l'Ufficio Tecnico comunale e svolte per gli interventi più significativi di progettazione esecutiva (permessi di costruire) o per interventi di pianificazione (es: Variante Generale al Piano Regolatore e Varianti specifiche; Piani Particolareggiati; ecc.).

Le prove pregresse, considerate per lo studio di microzonazione e implementate nel database che costituisce l'archivio delle indagini per questo lavoro, risultano così distinte per tipologia:

- ✓ n. 38 carotaggi (a carotaggio continuo o a distruzione di nucleo);
- ✓ n. 13 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)
- ✓ n. 53 prove penetrometriche dinamiche superpesanti (DPSH)
- ✓ n. 3 prove penetrometriche dinamiche medie (DM)
- ✓ n. 1 prova sismica in foro "Down-Hole" (DH)
- ✓ n. 4 stendimenti sismici a rifrazione (SR)
- ✓ n. 6 stendimenti sismici attivi MASW;
- ✓ n. 7 registrazioni microtremori sismici a stazione singola (HVSr)

Per gli studi di MS di livello 2 (OCDPC 344/2016) sono state inoltre eseguite prove integrative con lo scopo di disporre di ulteriori conoscenze geognostico/geofisiche del sottosuolo investigato, in relazione alla complessità sismostratigrafica locale e alla quantità/qualità di indagini di repertorio già disponibili. In questo senso, sono state eseguite le seguenti ulteriori indagini:

- ✓ n. 16 **prove penetrometriche dinamiche superpesanti (DPSH)** → eseguite con mezzo semovente cingolato "Pagani" e spinte fino a "rifiuto strumentale".
- ✓ n. 8 **stendimenti sismici attivi MASW** → Le prove MASW hanno consentito la stima della velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio ( $V_s$ ) nel sottosuolo fino a circa 35÷40 metri di profondità. La metodologia per la realizzazione di una indagine sismica MASW ha previsto acquisizioni dei segnali sismici con sismografo multicanale ABEM RAS24 a 24 canali, generati da sorgenti energizzanti artificiali lungo lo stendimento dei geofoni.
- ✓ n. 70 **registrazioni microtremori a stazione singola (HVSr)** → con registrazioni di 18 minuti e frequenza di campionamento di 128 Hz, eseguite con strumento "Tromino" della Micromed.

La figura 4.1 offre una localizzazione/distribuzione di sintesi delle indagini di repertorio e delle indagini integrative eseguite per questo studio.

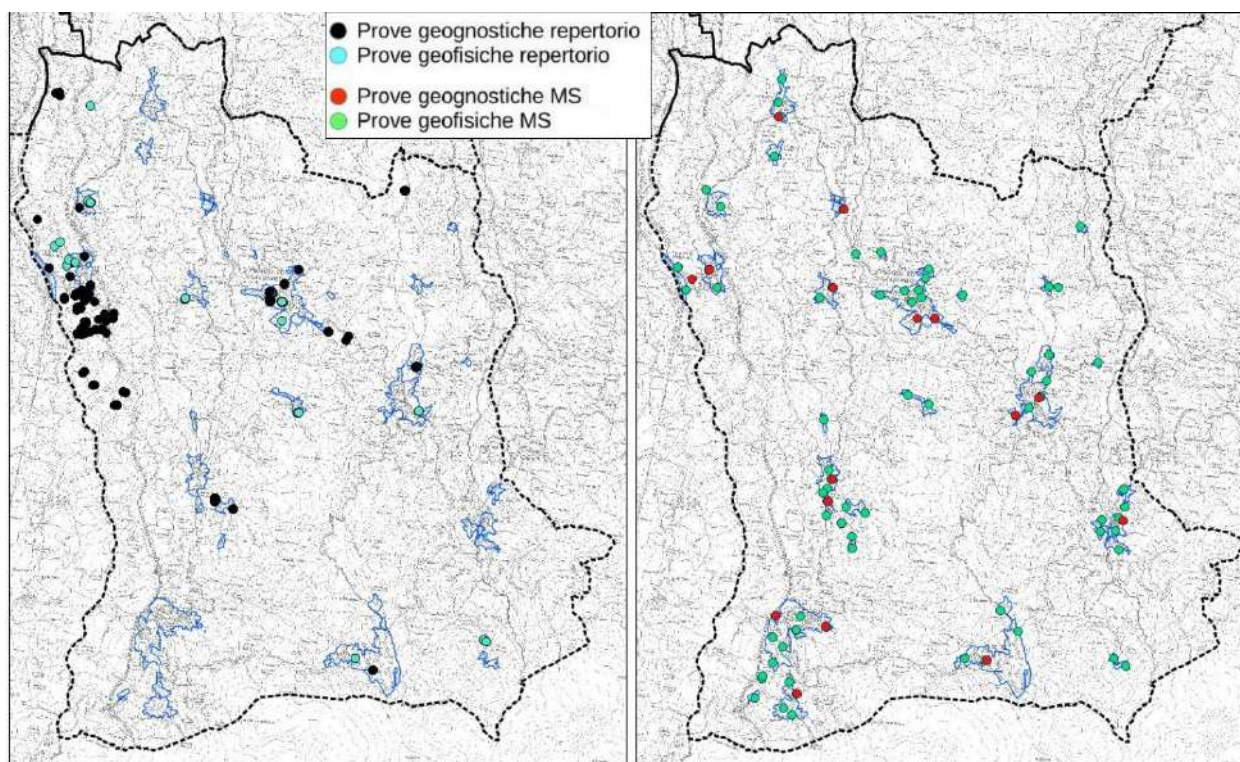


Figura 4.1 – Localizzazione delle indagini di repertorio (a sx) e delle indagini integrative (a dx) eseguite per questo studio

## 4.2 Le indagini eseguite per la MS di livello 3 (OCDPC 532/2018)

Per questo ulteriore aggiornamento della MS e per poter svolgere approfondimenti di “livello 3” sono state eseguite ulteriori indagini integrative. Più in particolare, le nuove indagini realizzate a integrazione dei dati già disponibili sono state realizzare nelle seguenti “zone di attenzione per instabilità di versante”:

- del settore SE Capoluogo (n. 1 **penetrometria dinamica DPSH**; n. 1 **stendimento sismico a rifrazione**; n. 2 **registrazioni dei microtremori a stazione singola HVSR**);
- presso la frazione Ripoli (n. 1 **penetrometria dinamica DPSH**; n. 4 **registrazioni dei microtremori a stazione singola HVSR**);
- presso la frazione Santa Maria Maddalena (n. 1 **registrazione dei microtremori a stazione singola HVSR**);
- presso Pian del Voglio–La calcinata (n. 1 **penetrometria dinamica DPSH**; n. 1 **stendimento sismico a rifrazione**; n. 1 **registrazione dei microtremori a stazione singola (HVSR)**);





Foto 4.1 – secuzione degli stendimenti sismici a rifrazione realizzati a Villa d'Aiano



Foto 4.42– Esecuzione della prova CPT (Capoluogo)

## 5 MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Il contesto geologico generale, descritto nel capitolo 3 e gli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche disponibili e di nuova esecuzione hanno permesso la classificazione e la modellazione del sottosuolo finalizzata alla caratterizzazione sismica.

Le conoscenze litostratigrafiche degli areali studiati vengono sintetizzate nella Carta Geologico Tecnica, che riporta le litologie superficiali prevalenti e nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS), che presenta la suddivisione del territorio comunale sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica profonda (fino al bedrock sismico) nel territorio studiato.

Il modello di sottosuolo è basato anche su quanto indicato nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna, in particolare per la redazione della carta geologico-tecnica. Dalla cartografia geologica regionale sono desunti, ad esempio, i limiti delle unità litostratigrafiche affioranti o meno nonché i limiti delle coperture quaternarie (frane; depositi di versante; depositi alluvionali di fondovalle; ecc.).

Nei seguenti paragrafi vengono descritti gli elementi ritenuti essenziali ai fini della caratterizzazione sismica delle aree studiate. Rispetto al precedente studio (OCDPC 344/2016), viene inoltre approfondita la caratterizzazione delle “zone di attenzione per instabilità” interessate dagli approfondimenti di “livello 3”.

### 5.1 Montecuto Vallese e San Rocco

Le due frazioni si insediano sul crinale spartiacque tra il bacino idrografico del Setta (a ovest) e quello del Sambro (a est). I rilievi sono caratterizzati da substrato roccioso con alternanze di livelli lapidei/arenacei e pelitici, attribuiti alla Formazione di Monte Venere (MOV) nel settore studiato nord e alla Formazione di Monghidoro (MOH) nel settore meridionale (San Rocco). La stratificazione risulta rovesciata, da nord vergente a SE vergente nel settore meridionale (San Rocco). Nei versanti la cartografia geologica RER individua diffuse forme di dissesto (per scivolamento e/o colamento) con zone di coronamento che intersecano i perimetri urbanizzati (figura 5.1).

Le indagini effettuate e disponibili (DPSH; HVSR; MASW) evidenziano coperture fino a circa 10 metri, presumibilmente legate al disfacimento superficiale del substrato roccioso, che risulta tuttavia alterato tettonicamente (figura 5.2). Le registrazioni HVSR confermano questa condizione, con amplificazioni spettrali H/V (da moderate ad alte) a frequenze alte (figura 5.2). Per i rilievi e le creste, le sezioni topografiche elaborate per questo studio hanno consentito di stimare amplificazioni morfologiche comprese tra 1,1 e 1,2.



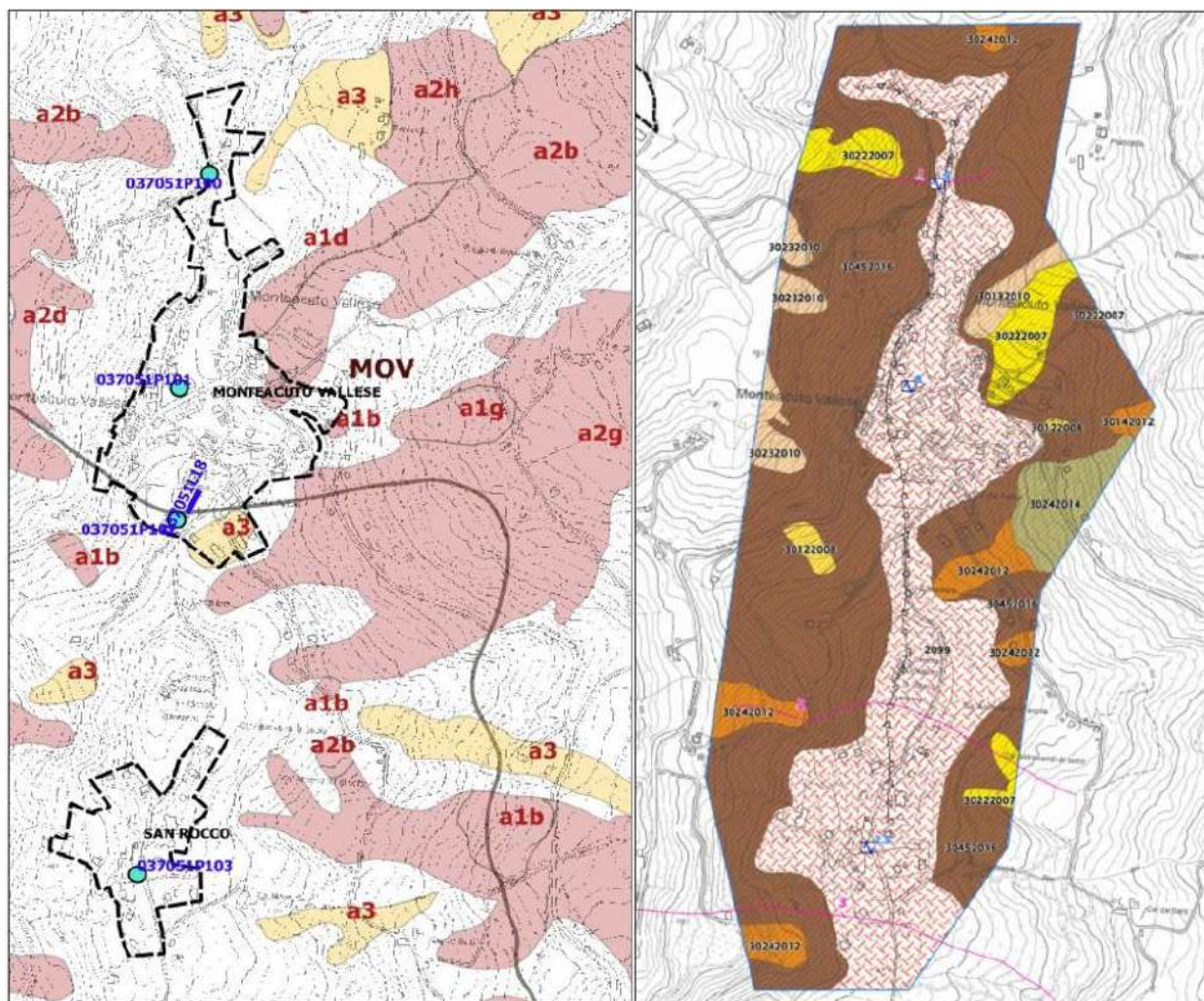


Figura 5.1 – A sx: substrato geologico, coperture quaternarie e discontinuità tettoniche rilevate. Si riportano le prove geognostiche/geofisiche di riferimento. A dx: delimitazione delle zone MOPS

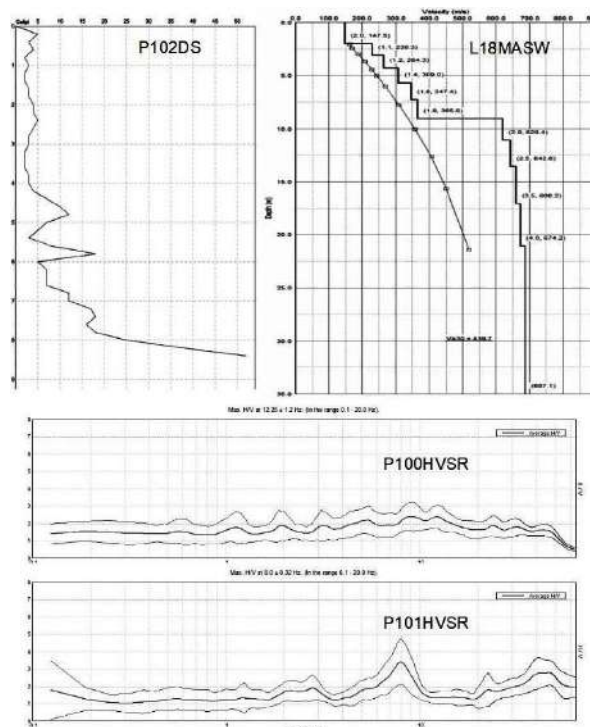


Figura 5.2 – Penetrometria DPSH, MASW (modello sismostratigrafico) e registrazioni effettuate presso Montebello Vallesse

## 5.2 Ripoli (con ulteriori approfondimenti – OCDPC 532/2018)

La frazione Ripoli si colloca sul versante a mezza costa in dx idrografica del torrente Setta. I rilievi sono caratterizzati da alternanze di livelli lapidei/arenacei e pelitici, attribuiti alla Formazione di Monghidoro (MOH), con stratificazione rovesciata prevalentemente immergente verso est.

L'abitato è prevalentemente insediato su coperture di versante, inoltre la cartografia geologica RER rileva nei versanti circostanti forme di dissesto (prevalentemente per scivolamento e complesse) che lambiscono in alcuni tratti anche il perimetro urbanizzato (figura 5.3). A ovest di Ripoli, la porzione basale del versante fino al fondo valle del torrente Setta, è inoltre interessata da estese frane attive per scivolamento in blocco.

Le indagini disponibili (DPSH; MASW; HVSR) hanno evidenziato settori di territorio con coperture (dep. di versante e bedrock superficiale molto alterato) fino a circa 10 metri (figura 5.4), mentre il substrato roccioso affiorante risulta “non rigido” e alterato per deformazioni tettoniche, con Vs30 relativamente basse (approssimabili a 400÷500 m/s).

A valle delle aree abitate la presenza di pendii acclivi ha necessitato l'elaborazione di sezioni topografiche, con stima delle amplificazioni morfologiche comprese tra 1,1 e 1,2.

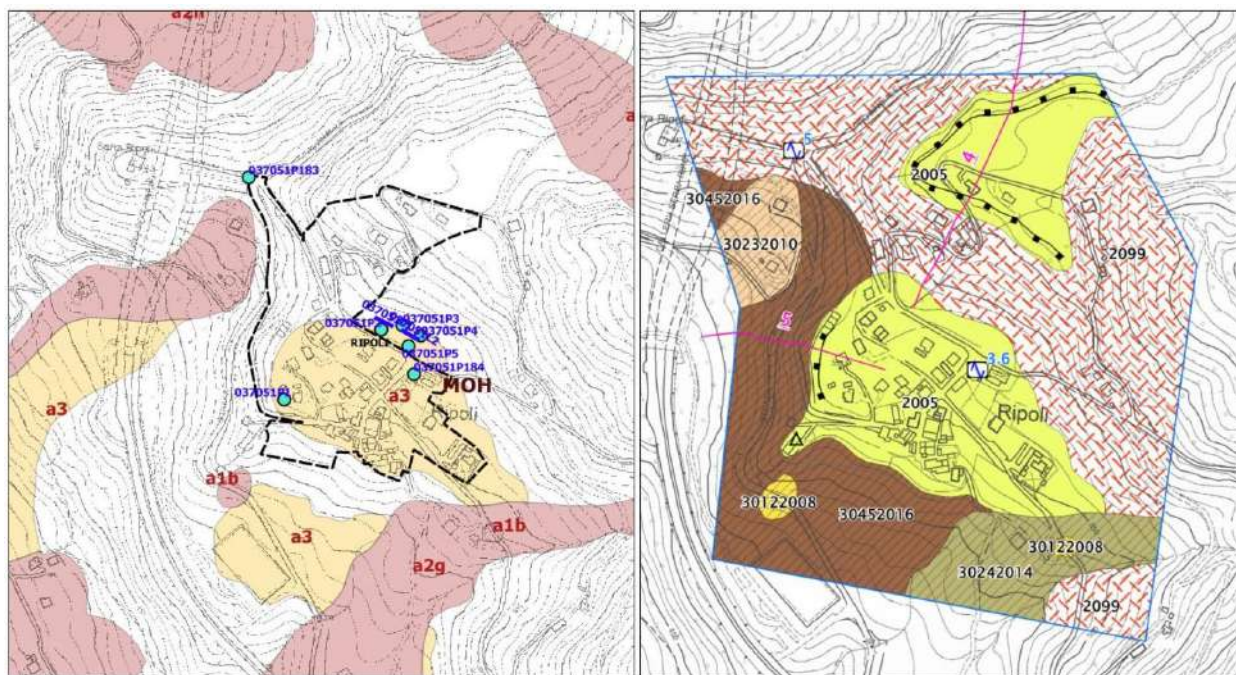
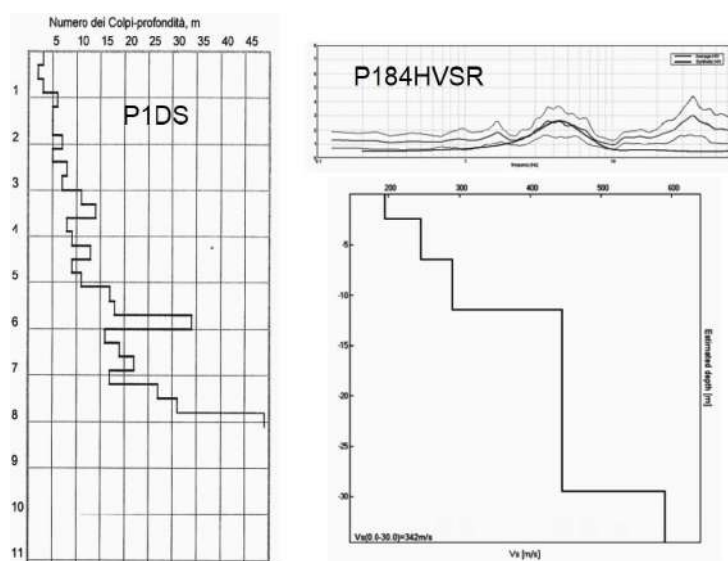


Figura 5.3 – A sx: substrato geologico, coperture quaternarie e discontinuità tettoniche rilevate. Si riportano le prove geognostiche/geofisiche di riferimento. A dx: delimitazione delle zone MOPS

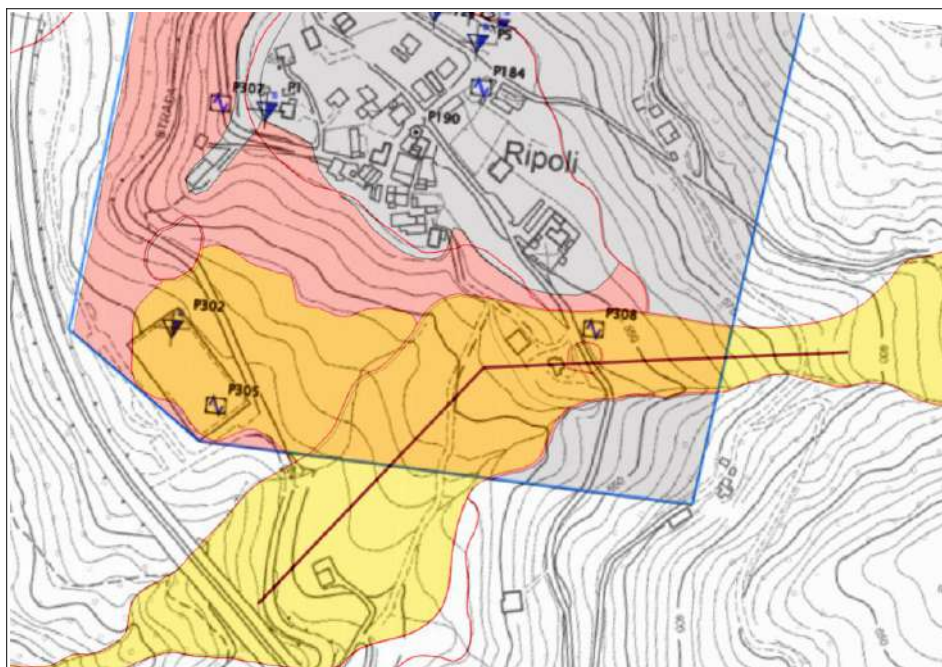


Figura 5.4 – DPSH e registrazione HVSR (con modello sismostratigrafico) effettuate nel settore di abitato con coperture (MOPS 2005)



Il pendio a sud di Ripoli (“zona di attenzione per instabilità di versante”), come evidenziato nella figura 5.5, è stato oggetto di ulteriori indagini finalizzate a una migliore caratterizzazione sismostratigrafica e geotecnica e propedeutiche agli approfondimenti di “livello 3” (con modellazioni numeriche della RSL 2D e analisi della stabilità in condizioni sismiche). In questo senso, sono state eseguite nuove registrazioni sismiche HVSR e una penetrometria DPSH spinta fino a “rifiuto strumentale”.

Figura 5.5 – Indagini geognostiche/geofisiche e areale oggetto di approfondimenti di “livello 3” (frana quiescente complessa e depositi di versante) evidenziati in giallo). Viene riportata anche la traccia della sezione sismostratigrafica e litotecnica (“sezione 2” elaborata a supporto degli approfondimenti



La prova DPSH e il confronto delle due registrazioni HVSR, eseguite rispettivamente su accunolo di frana (“P308”) e su deposito di versante (“P305”) conferma sostanzialmente il quadro conoscitivo già disponibile e in particolare evidenzia spettri H/V confrontabili nelle forme, con spessori delle coperture (sedimenti rimaneggiati con caratteristiche sismostratigrafiche

equiparabili) inferiori a 10 m e sovrastanti il substrato marino MOH (più alterato fino a circa 15÷20 metri dal p.c.), poi ancora caratterizzato da Vs pari a circa 500 m/s fino a profondità di 35÷45 metri.

Figura 5.5 – Confronto tra registrazioni HVSr eseguite nel versante meridionale di Ripoli (accumulo di frana quiescente e depositi di versante)

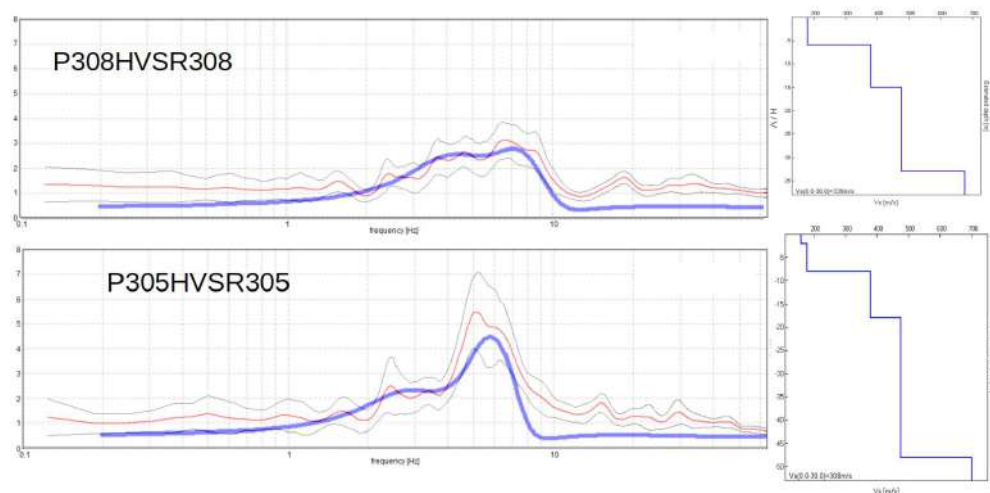
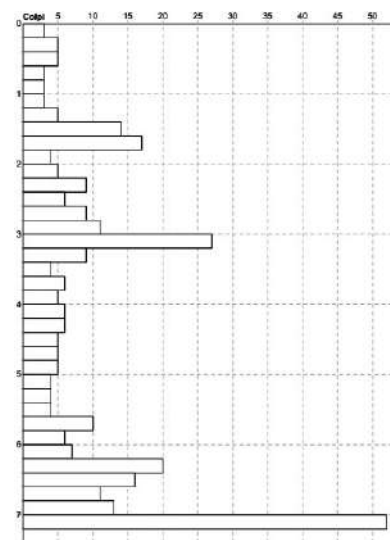


Figura 5.6 – Diagramma delle resistenze (n. colpi DPSH) della prova "P302" eseguita per questo studio nel versante meridionale di Ripoli



STRATO 1 – Suolo/dep. frana (limi e argille prevalenti)  
Curve decadimento: "EPRI (93), 0-20 ft"  
 $V_s = 160 \text{ m/s}$   $\gamma = 1700 \text{ kg/mc}$   $\gamma_{sat} = 1850 \text{ kg/mc}$   
 $C_u = 0,40 \text{ kg/cm}^2$   $c' = 0,05 \text{ kg/cm}^2$   $\phi' = 21^\circ$

STRATO 2 – Dep. frana/versante (limi e limi sabbiosi consistenti)  
Curve decadimento: "EPRI (93), 20-50 ft"  
 $V_s = 180 \text{ m/s}$   $\gamma = 1800 \text{ kg/mc}$   $\gamma_{sat} = 2000 \text{ kg/mc}$   
 $C_u = 0,85 \text{ kg/cm}^2$   $c' = 0,11 \text{ kg/cm}^2$   $\phi' = 24^\circ$

STRATO 3 – MOH alterato  
Curve decadimento: "Average rock"  
 $V_s = 380 \text{ m/s}$   $\gamma = 2100 \text{ kg/mc}$

STRATO 4 – MOH  
Curve decadimento: "Average rock"  
 $V_s = 475 \text{ m/s}$   $\gamma = 2200 \text{ kg/mc}$

STRATO 5 – Bedrock sismico  
 $V_s > 800 \text{ m/s}$   $\gamma = 2200 \text{ kg/mc}$

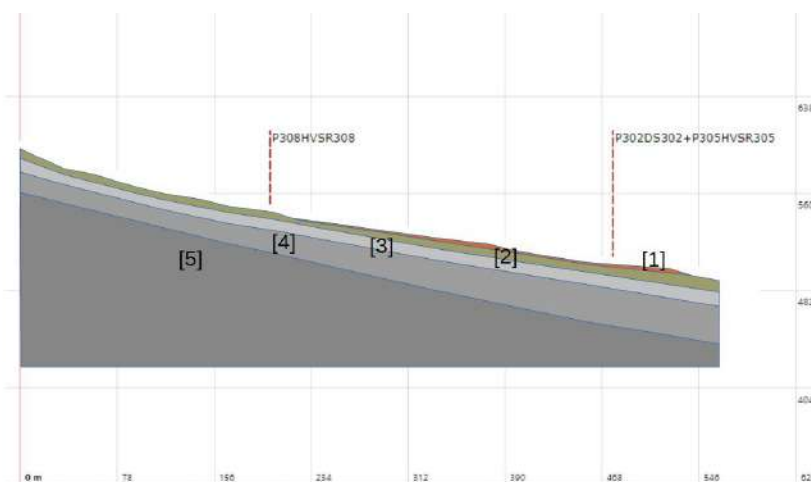


Figura 5.7 – Sintesi della caratterizzazione sismostratigrafica e geotecnica della sezione 2 (Ripoli)



Le indagini hanno permesso di elaborare una nuova sezione sismostratigrafica e geotecnica (“sezione 2”) che sono risultate di riferimento per le modellazioni numeriche bidimensionali della RSL e per le successive verifiche di stabilità in condizioni sismiche (vedi figura 5.7). Occorre rammentare come le coperture più superficiali possano condizionare significativamente la risposta sismica locale e inoltre rappresentare uno “strato critico” per la stabilità del versante rispetto al sottosuolo roccioso più profondo. Come vedremo, le verifiche di stabilità in condizioni sismiche si sono basate su algoritmi di calcolo e dati di input esaustivi per simulazioni su “pendii in terra”, per consentire lo svolgimento di verifiche considerando la possibilità di scivolamenti poco profondi per rotture di taglio e spostamenti cosismici negli strati più superficiali (vedi strati 1-2-3, figura 5.7). Per i risultati si rimanda rispettivamente ai contenuti dell'allegato 4 (<<Schede modelli numerici della RSL 2D>>) e dell'allegato 5 (<<Stabilità versanti>>).

### 5.3 Trastullo

Il toponimo ricade al piede del pendio in sinistra idrografica del torrente Sambro. La carta geologica RER indica che il substrato roccioso è da attribuire alla Formazione di Monte Venere (MOV) nel piede del versante abitato, e alla Formazione di Monghidoro (MOH) nel settore da mezza costa fino ai sovrastanti rilievi di crinale meridionale (San Rocco). La cartografia RER indica tuttavia che il versante di interesse è incluso in un'estesa forma di dissesto per scivolamento in blocco quiescente (figura 5.8).

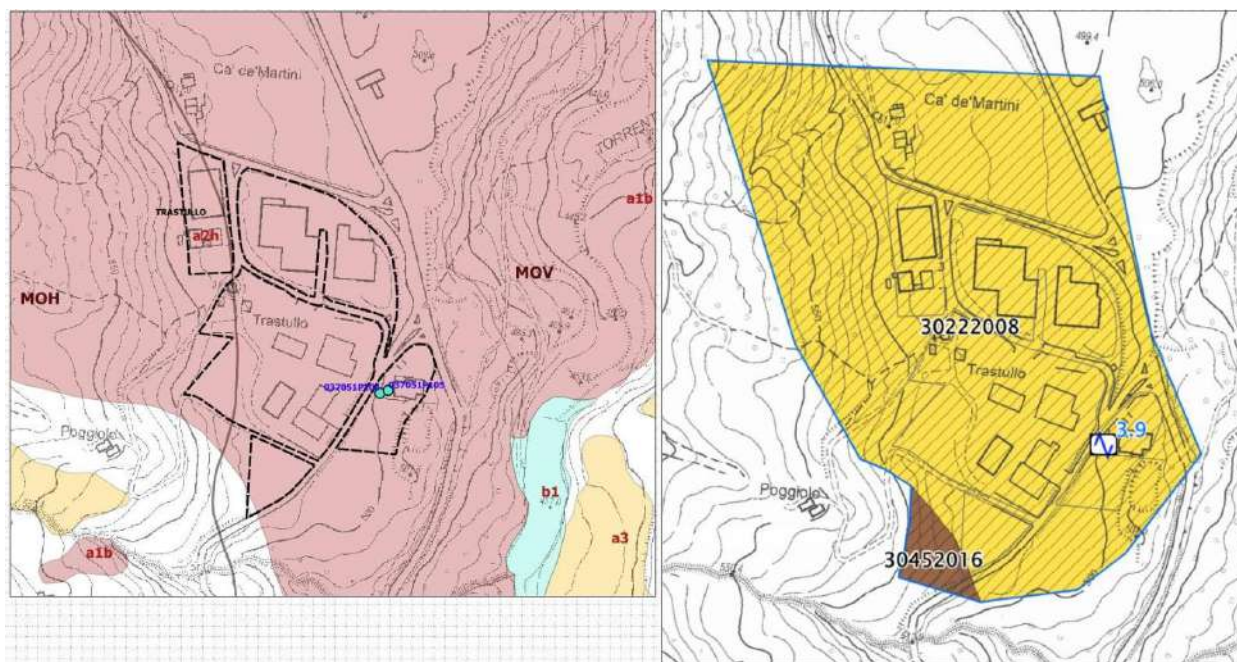
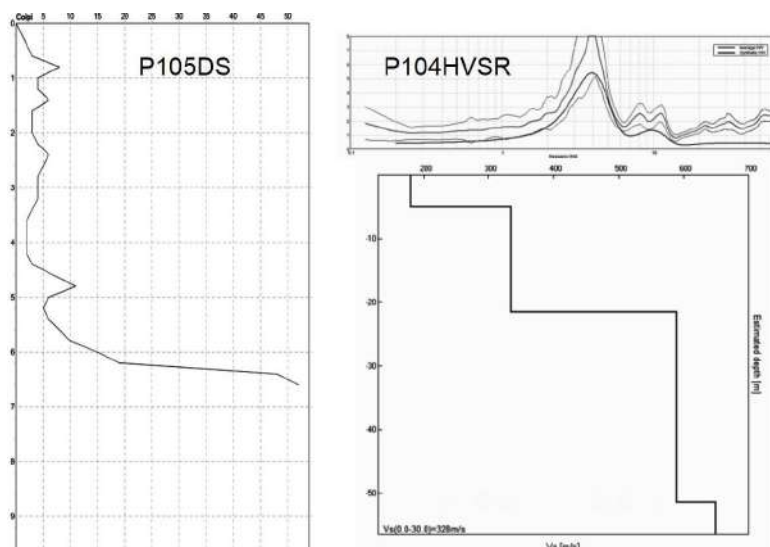


Figura 5.8– A sx: substrato geologico, coperture quaternarie e discontinuità tettoniche rilevate. Si riportano le prove geognostiche e geofisiche di riferimento. A dx: delimitazione delle zone MOPS

Le indagini effettuate (DPSH; HVSR) hanno evidenziato coperture scarsamente resistenti fino a circa -6 metri, tuttavia la registrazione HVSR evidenzia un elevato picco spettrale H/V a medie frequenze (circa 4 Hz) che è presumibilmente associato a un marcato riflettore sismico più profondo (circa 20 metri?), come indicato anche in figura 5.9. Tale riflettore è stato interpretato come base dei depositi, molto alterati, dislocati dalla frana.

*Figura 5.9 – Penetrometria DPSH e registrazione HVSR (con modello sismostratigrafico locale) eseguite presso il toponimo Trastullo*



#### 5.4 Santa Maria Maddalena (con ulteriori approfondimenti – OCDPC 532/2018)

La frazione è situata nel versante in destra idrografica del torrente Setta. Gran parte del perimetro abitato viene a ricadere in un ampio corpo di frana che è stata recentemente riclassificata come scivolamento in blocco o DGPV (Deformazioni gravitative profonde di versante). La riclassificazione<sup>4</sup> ha comportato un aggiornamento delle MOPS definite dallo studio di MS. La frana di scivolamento in blocco o DGPV è stata quindi individuata come microzona omogenea “2016” (figura 5.10). Occorre rammentare che questa tipologia di dissesto coinvolge volumi di roccia molto estesi, con deformazioni per lo più lente e progressive della massa rocciosa e spesso senza una chiara localizzazione del vero piano di scorrimento. Gli scivolamenti in blocco, inoltre, conservano al loro interno la coerenza stratigrafica della roccia di provenienza.

Nel pendio a NO di Santa Maria Maddalena viene inoltre delimitato un altro importante movimento franoso classificato di tipologia complessa, anch'esso interessato da approfondimenti geognostici/geofisici e presumibilmente caratterizzato da superfici di scorrimento profonde. Nella cartografia MOPS aggiornata questo movimento franoso è stato individuato con la sigla “2017” (figura 5.10).

La riclassificazione dei movimenti franosi che coinvolgono l'abitato si è basata su ulteriori e recenti studi. Il versante Ripoli-Santa Maddalena è stato oggetto di estese indagini, monitoraggi e interventi di consolidamento effettuati per conto della società Autostrade SpA, a supporto

<sup>4</sup> Riclassificazione successiva allo studio di MS “livello 2” svolto ai sensi dell'OCDPC 344/2016 e DGR 2188/2016

della progettazione e costruzione dei viadotti e delle gallerie della recente “Variante di Valico” dell’autostrada A1. Sono quindi disponibili molti dati di carattere geognostico e geofisico (sondaggi a carotaggio continuo e “Down-Hole”; stendimenti a rifrazione; ecc.), utili per la caratterizzazione sismostratigrafica di questo versante fino a profondità superiori a 100 metri.

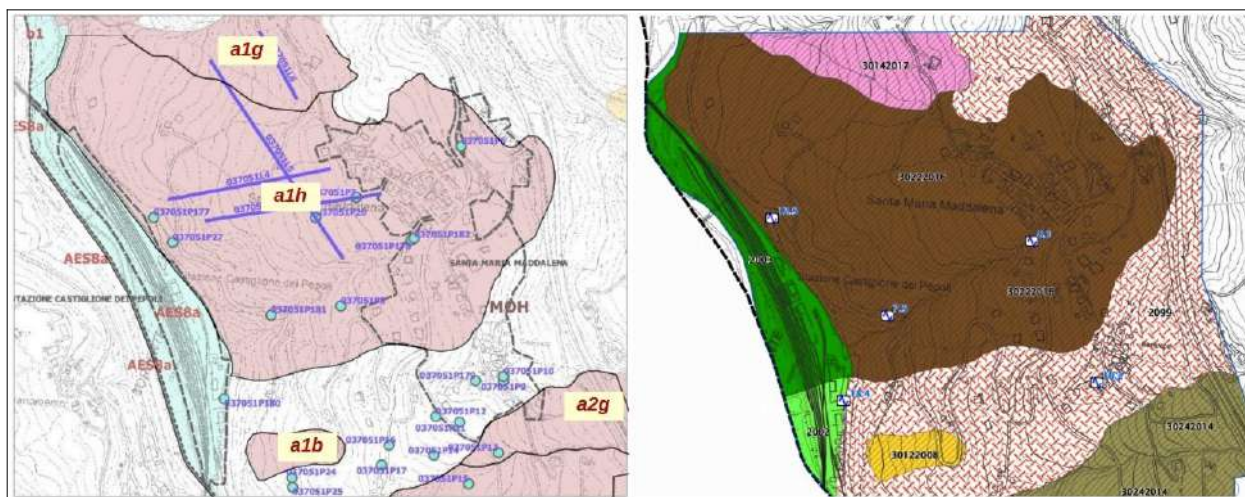
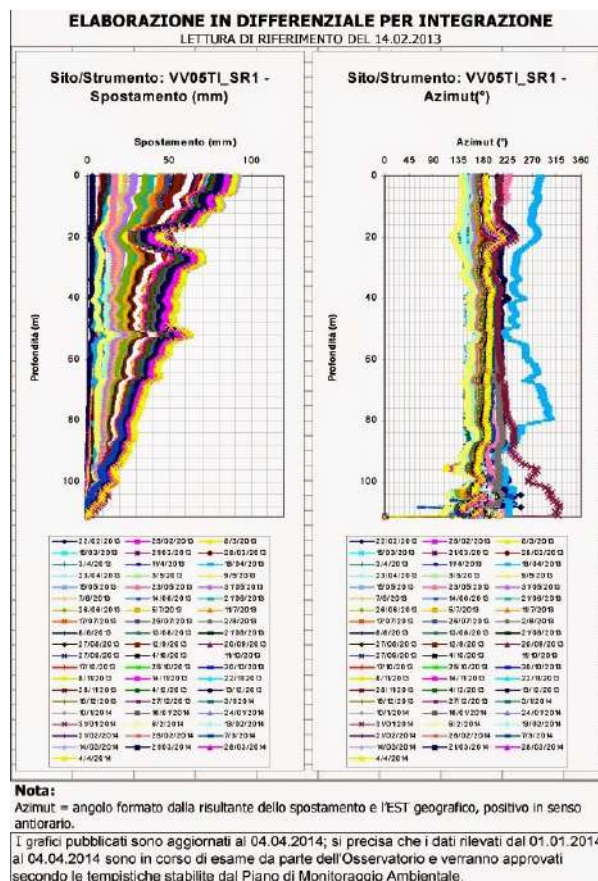


Figura 5.10 – A sx: substrato geologico, coperture quaternarie e discontinuità tettoniche rilevate. Si riportano le prove geognostiche/geofisiche di riferimento. A dx: delimitazione delle zone MOPS aggiornate (OCDPC 532/2018)

Durante le fasi di scavo delle gallerie, nel versante di Ripoli-Santa Maddalena si sono riattivati movimenti franosi quiescenti. Gli studi svolti hanno finora evidenziato come gli spostamenti misurati negli inclinometri dislocati in tutto il pendio risultino riconducibili a movimenti da profondi a più superficiali del substrato roccioso, costituito dalle alternanze di livelli lapidei e strati pelitici della Formazione di Monghidoro (MOH). Inoltre, questi movimenti risulterebbero caratterizzati da comportamento prevalentemente duttile (e non fragile), al quale corrispondono lenti scorrimenti progressivi (a partire anche da 90 m di profondità – figura 5.11) prevalentemente riscontrabili negli intervalli pelitici oppure lungo superfici di rottura profonde già esistenti.

Figura 5.11 – Grafici di sintesi di alcune misure inclinometriche raccolte nel versante Ripoli-Santa Maddalena





Rispetto allo stato di quiescenza dell'ampio dissesto, questi movimenti risulterebbero essere stati temporaneamente accelerati dai lavori di costruzione delle gallerie e dalla conseguente modifica del contesto idrogeologico locale. Gli spostamenti risultano, a tutt'oggi, ancora monitorati.

Le indagini svolte per Soc. Autostrade SpA nel corpo di frana per scivolamento in blocco (o DGPV) hanno riscontrato la presenza di coperture più superficiali fino a circa 5÷15 metri di profondità, con Vs comprese tra 200 e 300 m/s. Anche gli ulteriori dati raccolti (compresi i risultati delle specifiche indagini svolte per gli studi di MS), confermano nel pendio una diffusa presenza di coperture più superficiali di spessore variabile da 3÷5 fino a 10÷15 metri. Si tratta di uno spessore di limi e argille sabbiose che risultano di media consistenza, comunque penetrabili da prove penetrometriche (CPT; DPSH ecc.) e dunque equiparabili meccanicamente a "terre" (figure 5.12 e 5.13).

Le indagini hanno poi rilevato un sottostante sismostrato già caratterizzato da discreta rigidità, con Vs comprese tra 400 e 500 m/s e di spessore variabile rispetto al p.c. (profondo fino a circa -15÷45 metri), come meglio evidenziato nelle rappresentazioni dei dati in figura 5.12. Questo secondo sismostrato risulta di più difficile interpretazione stratigrafica, tuttavia attribuito a depositi detritici e/o a substrato roccioso alterato per dislocazioni. Questi risultati stratigrafici e geofisici appaiono comunque coerenti con la tipologia di frana (per scivolamento in blocco o DGPV) e con la sua importante estensione/profondità: l'ammasso roccioso dislocato, anche nella sua parte meno profonda, appare infatti conservare in buona parte la coerenza stratigrafica dell'ammasso roccioso intatto.

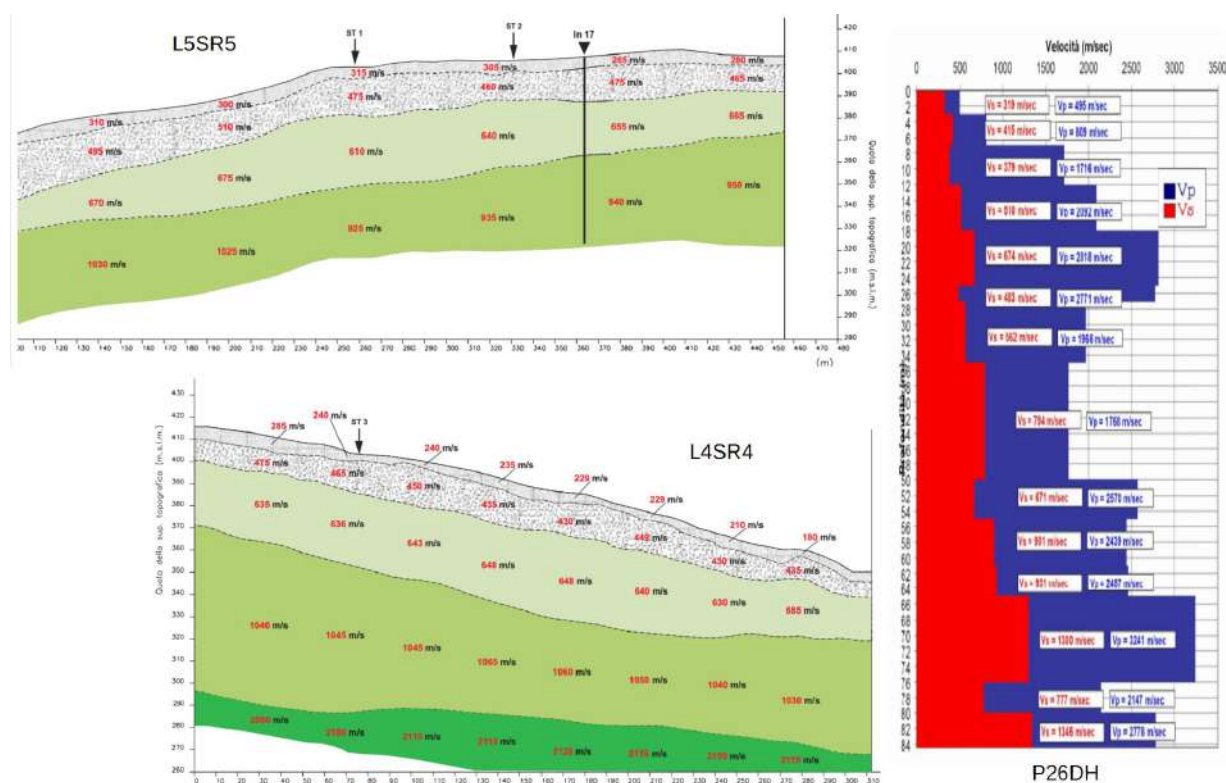


Figura 5.12 – “Down-Hole” (P26DH) e stendimenti sismici a rifrazione (L4SR e L5SR) effettuati per conto di Autostrade SpA nel 2011 (versante a valle di Santa Maria Maddalena – corpo della frana per scivolamento in blocco/DGPV)



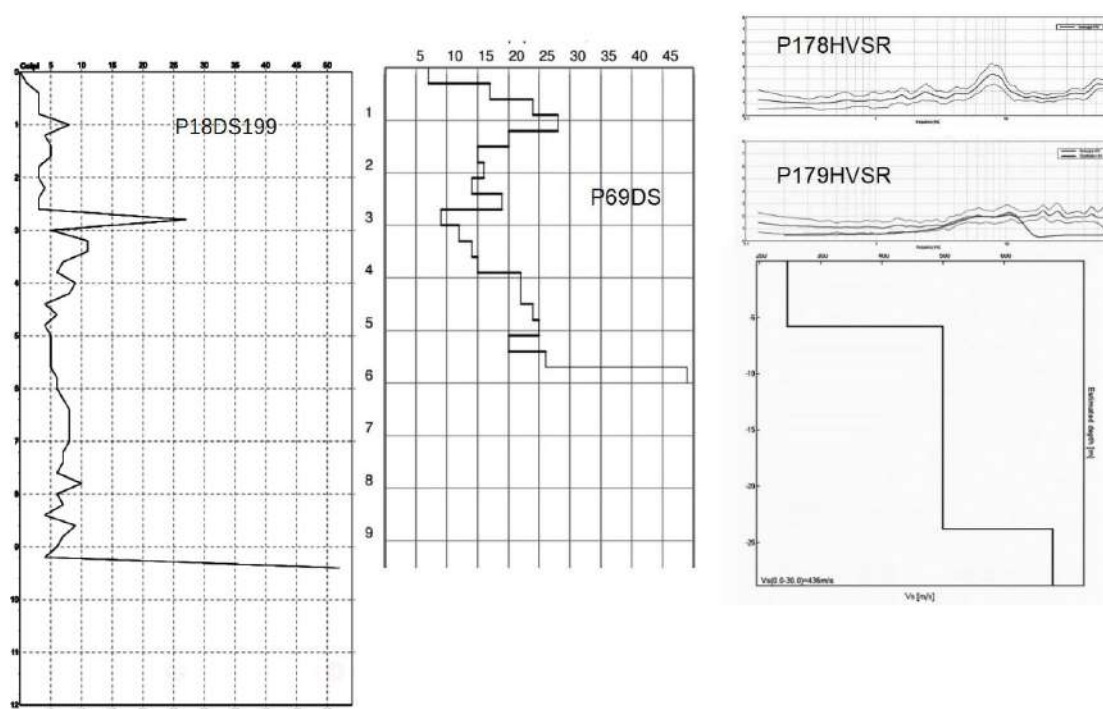


Figura 5.13 – Penetrometria DPSH e registrazioni HVSR (con modello sismostratigrafico) eseguite presso Santa Maria Maddalena per la MS (OCDPC 344/2016)

Le sezioni sismiche a rifrazione e la “Down-Hole” disponibili indicano poi a maggiori profondità un ulteriore incremento delle Vs a maggiori profondità fino a “bedrock rigido” ( $V_s > 800$  m/s).

Un ulteriore stendimento sismico a rifrazione ha inoltre permesso di investigare il corpo di frana classificata complessa (sigla MOPS: 2017), a NO di Santa Maria Maddalena (figura 5.14). Anche in questo caso, i risultati riscontrano coperture più superficiali fino a circa 5÷7 metri di profondità, poi ancora uno spessore variabile (circa 15÷30 metri) di depositi detritici e/o di substrato roccioso molto alterato per dislocazioni, tuttavia ancora caratterizzato da discreta rigidezza ( $V_s$  medie di 400÷500 m/s).

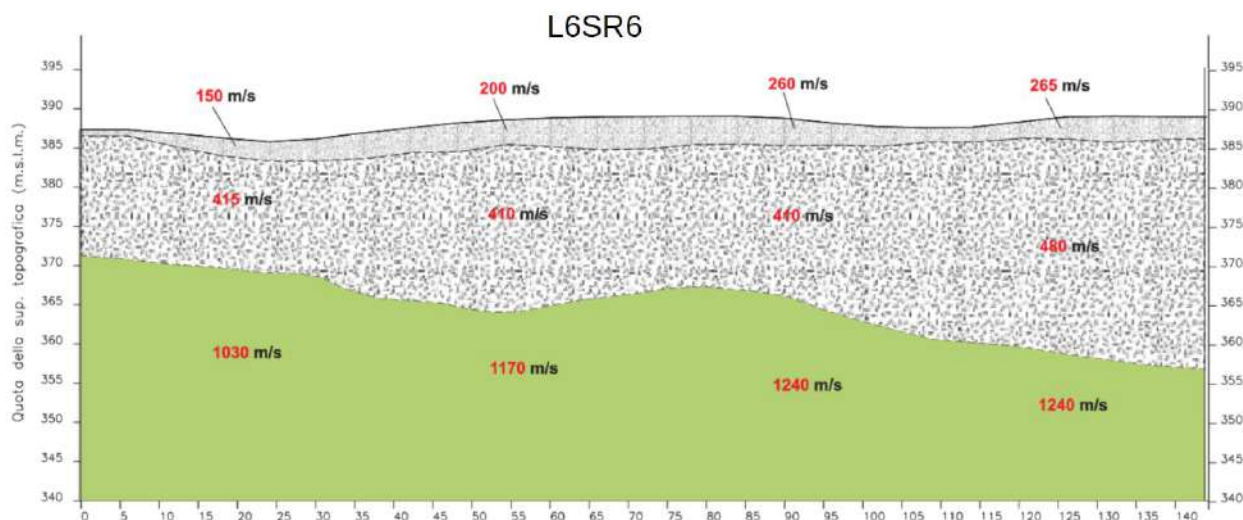
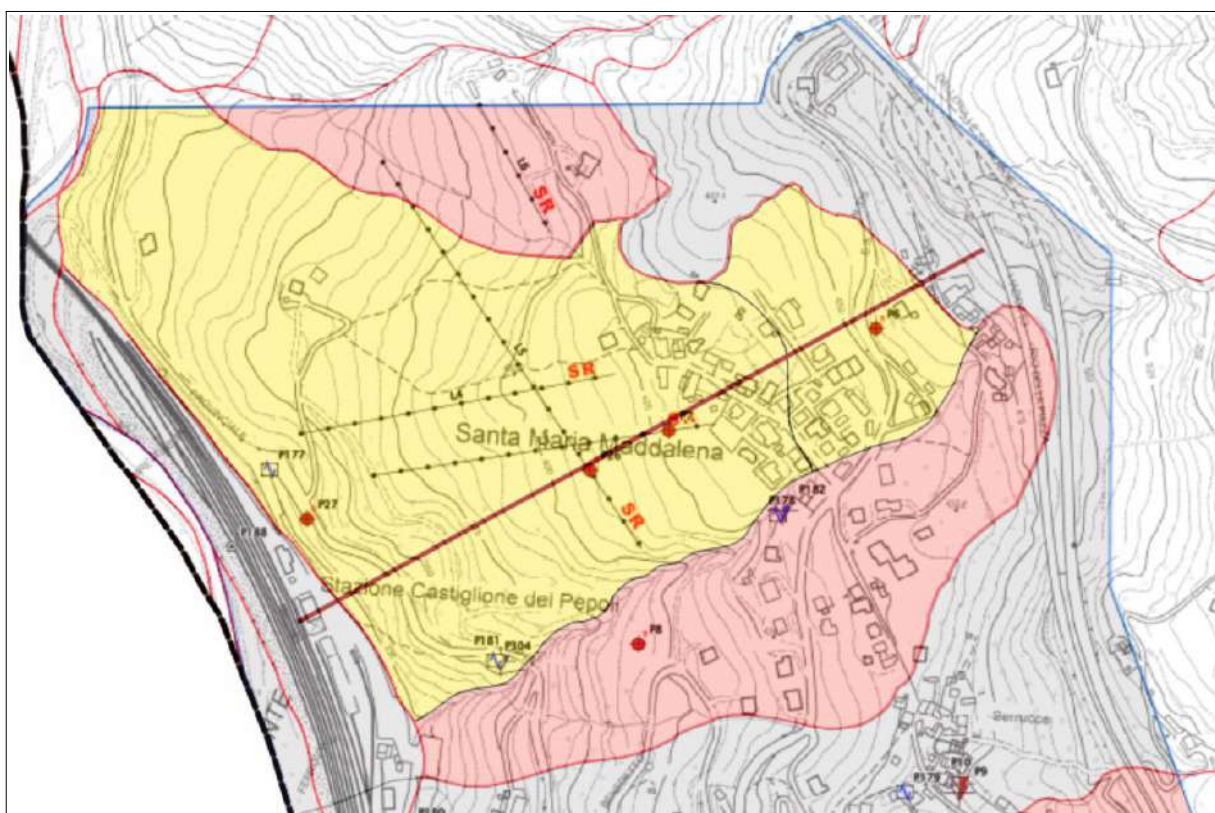


Figura 5.14 – Stendimento sismico a rifrazione (L6SR) effettuato per conto di Autostrade SpA nel 2011 (versante a valle di Santa Maria Maddalena – corpo della frana complessa)

In conclusione, anche in questo contesto di versante, le indagini disponibili evidenziano una complessiva presenza di coperture più superficiali “soffici” sovrapposte a ulteriori depositi di frana che risultano ben più rigidi, cioè con caratteristiche simostratigrafiche ancora equiparabili a substrato roccioso in posto ( $V_s$  medie di  $400 \div 500$  m/s). Le coperture più superficiali costituiscono, pertanto, una condizione fortemente condizionante la risposta sismica locale.

Le coperture più superficiali rappresenterebbero uno “strato critico” anche per quanto riguarda la stabilità di versante e in questo senso i dati inclinometrici raccolti per conto di Autostrade SpA hanno riscontrato spostamenti e deformazioni anche in questo primo spessore di terreni, con sprofondamenti e/o sollevamenti nel pendio che risultano causa o concausa delle lesioni riscontrate in alcuni edifici.

I dati di sottosuolo disponibili hanno consentito di elaborare una nuova sezione simostratigrafica e geotecnica (“sezione 3”) che interseca l’accumulo di frana per scivolamento in blocco (MOPS 2016). La “sezione 3” è risultata di riferimento per gli approfondimenti sismici di “livello 3” svolti in questa porzione di versante e cioè per le modellazioni numeriche bidimensionali della RSL e per le ulteriori verifiche di stabilità del pendio in condizioni sismiche. La figura 5.15 indica la parte di versante interessata da approfondimenti sismici di “livello 3”, mentre la figura 5.16 riporta la sintesi della caratterizzazione simostratigrafica e geotecnica rappresentata nella “sezione 3”.



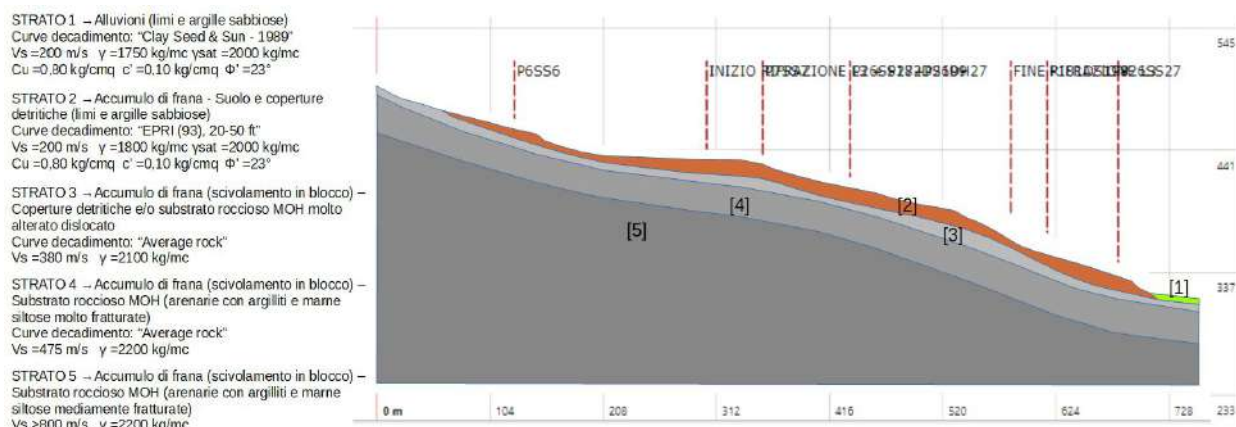


Figura 5.16 – Sintesi della caratterizzazione sismostratigrafica e geotecnica della sezione 3 (Santa Maria Maddalena)

Come vedremo, vista la complessità del versante, le analisi di stabilità in condizioni sismiche si sono basate su algoritmi di calcolo e dati di input esaustivi per simulazioni su “pendii in terra”, per consentire lo svolgimento di verifiche considerando la possibilità di scivolamenti poco profondi per rotture di taglio e spostamenti cosismici negli strati più superficiali (vedi strati 2–3, vedi figura 5.16).

Per i risultati, invece, si rimanda rispettivamente ai contenuti dell'allegato 4 (<<Schede modelli numerici della RSL 2D>>) e dell'allegato 5 (<<Stabilità versanti>>).

## 5.5 S. Andrea

La frazione si colloca a mezza costa nel versante in destra idrografica del torrente Sambro, con rilievi localmente caratterizzati da alternanze di livelli lapidei/arenitici e peliti (substrato roccioso attribuito alla Formazione di Monghidoro – MOH). La cartografia geologica RER rileva forme di dissesto quiescenti (per scivolamento), con zone di coronamento che intersecano il perimetro abitato (figura 5.17); le superfici di scorrimento hanno coinvolto presumibilmente il bedrock superficiale più alterato.

Le indagi disponibili (penetrometrie DPSH; HVSR) hanno evidenziato coperture fino a 3÷4 metri (figura 5.18), riconducibili a disfacimento/alterazione del bedrock affiorante, con registrazioni HVSR che riscontrano massime amplificazioni spettrali H/V a frequenze alte (5,5÷10 Hz).



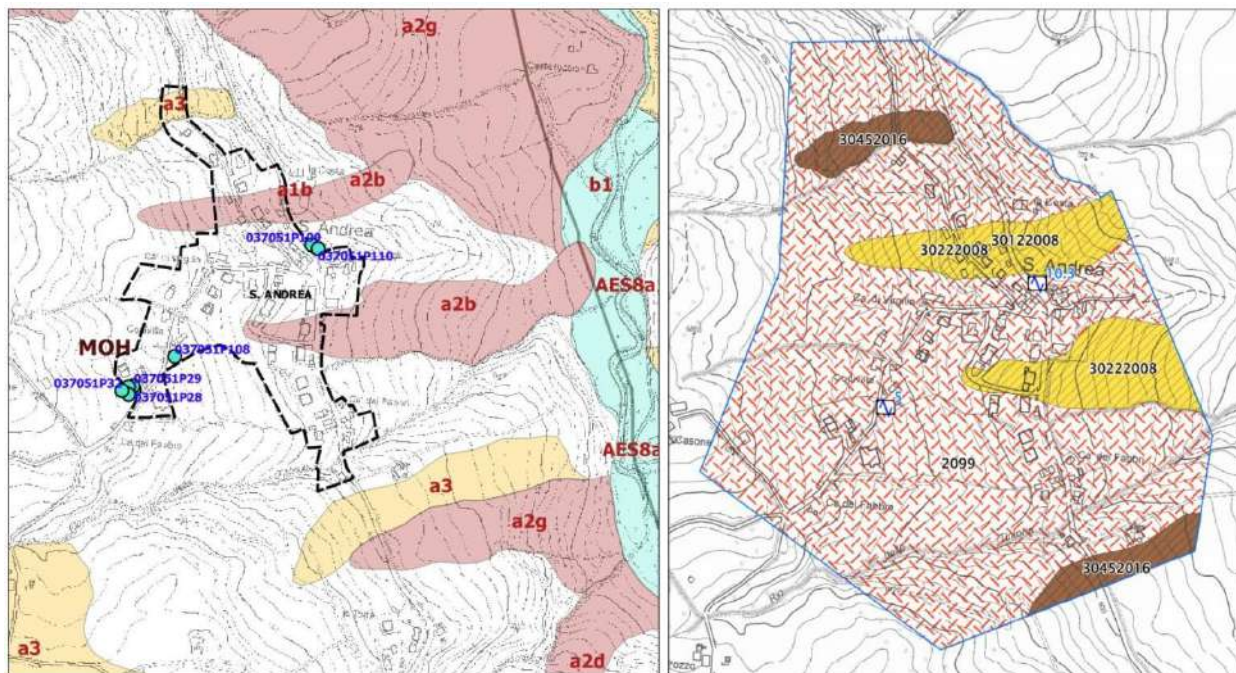
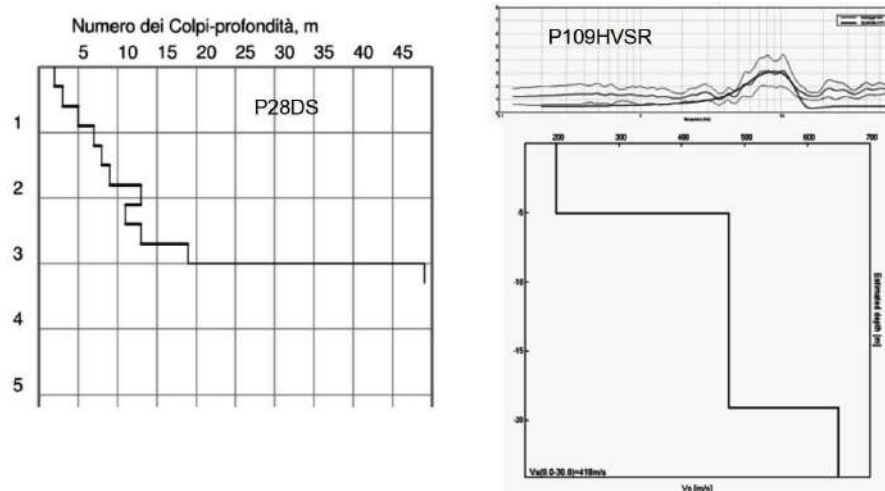


Figura 5.17 – A sx: substrato geologico, coperture quaternarie e discontinuità tettoniche rilevate. Si riportano le prove geognostiche/geofisiche di riferimento. A dx: delimitazione delle zone MOPS

Figura 5.18 – Prova penetrometrica CPT e registrazione HVSR (con modello sismostratigrafico) eseguite presso S. Andrea

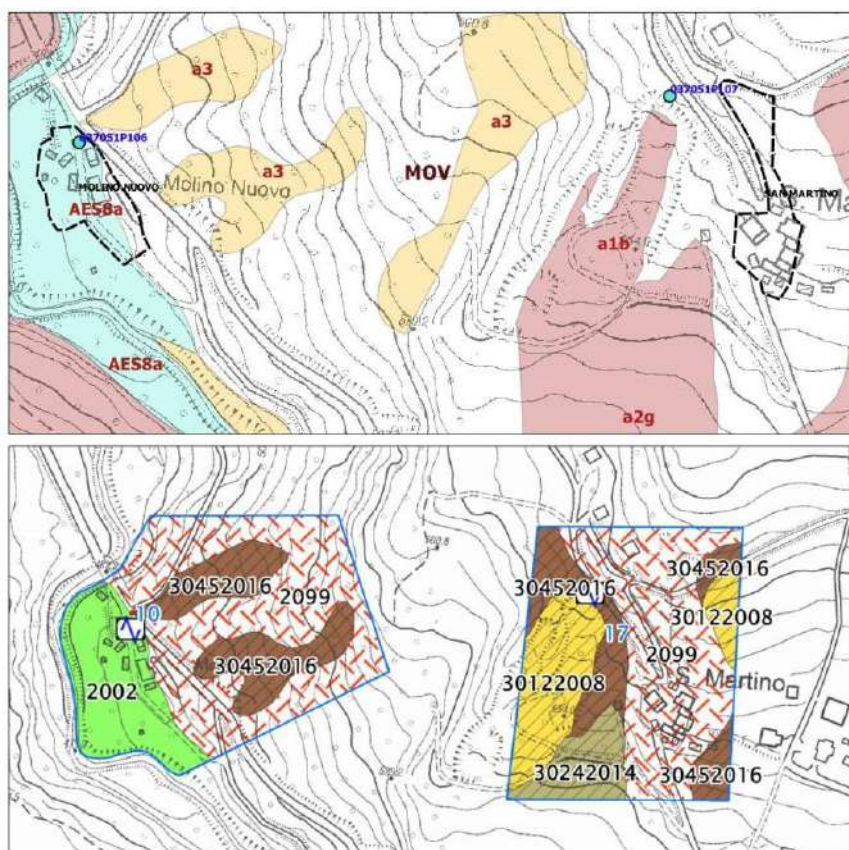


## 5.6 Molino Nuovo e San Martino

I due toponimi sono situati nel versante in destra idrografica del torrente Sambro; in particolare, Molino Nuovo si insedia al piede, sui depositi alluvionali terrazzati del corso d'acqua. Il substrato che caratterizza il pendio e il fondovalle è localmente costituito da alternanze di livelli lapidei/arenitici e peliti (Formazione di Monte Venere – MOV).



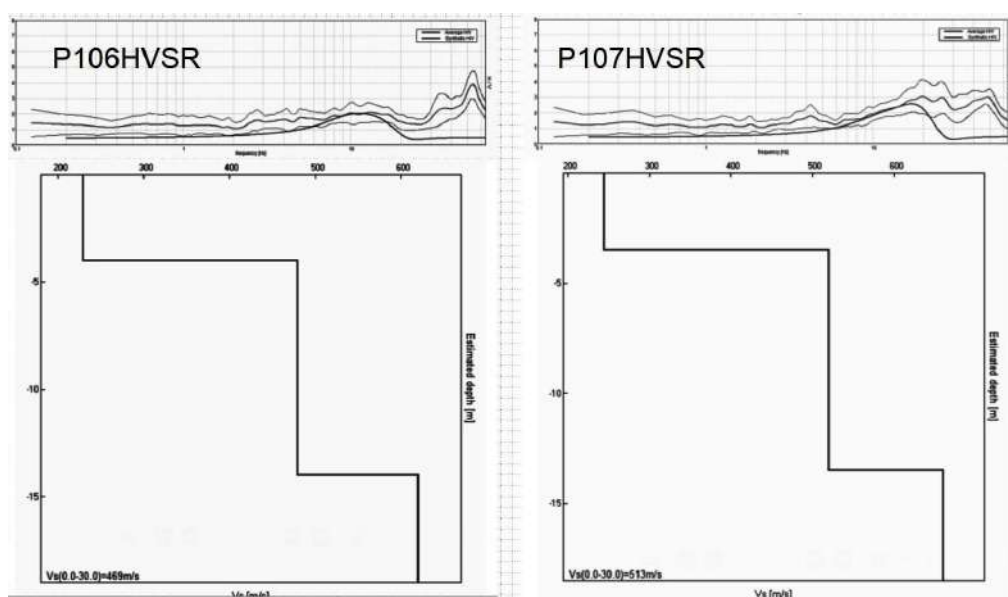
Figura 5.19 – In alto: substrato geologico, coperture quaternarie e discontinuità tettoniche rilevate. Si riportano le prove geognostiche/geofisiche di riferimento. In basso: delimitazione delle zone MOPS



La cartografia geologica RER rileva nel pendio di interesse depositi di versante e forme di dissesto (scivolamento e complesse), che lambiscono anche il perimetro urbanizzato (figura 5.19).

Le registrazioni HVSR effettuate evidenziano massime amplificazioni spettrali H/V ad alte frequenze (10÷17 Hz), associabili a coperture fino a 3÷4 metri (figura 5.20).

Figura 5.20 – Registrazioni HVSR eseguite nel fondovalle presso Molino Nuovo (a sx) e nel versante presso San Martino (a dx)

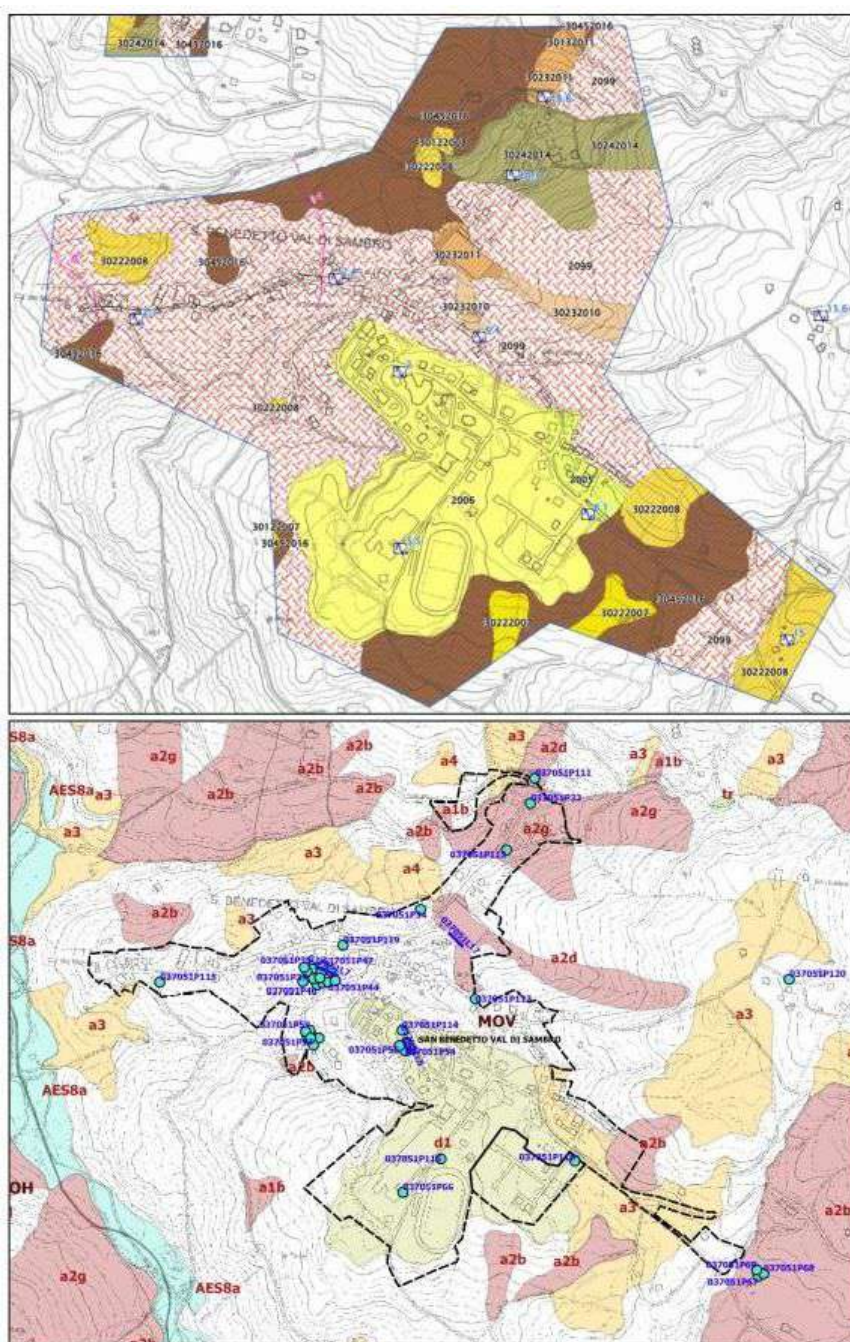


## 5.7 San Benedetto Val di Sambro (con ulteriori approfondimenti – OCDPC 532/2018)

Il Capoluogo è situato nel versante a mezza costa, in destra idrografica del torrente Sambro. I rilievi sono caratterizzati da substrato roccioso costituito da alternanze di livelli lapidei/arenitici e peliti (Formazione di Monte Venere – MOV). Le giaciture stratigrafiche eterogenee (con strati anche rovesciati) evidenziano le complesse deformazioni tettoniche che hanno coinvolto il bedrock locale. La cartografia geologica RER rileva come un'ampia porzione meridionale dell'abitato risulti insediato su coperture di origine eolica e (in minor misura) su depositi di versante. La cartografia regionale delimita anche forme di dissesto quiescenti (per scivolamento, colamento e complesse), con zone di coronamento che intersecano in alcuni casi anche il perimetro urbanizzato.

Per il Capoluogo sono state raccolte (tra quelle di repertorio e quelle eseguite per la MS ai sensi dell'OCDPC 344/2016) molte indagini geognostiche/geofisiche (sondaggi; penetrometrie DPSH e CPT; stendimenti MASW e registrazioni HVSr), con una buona distribuzione delle stesse. La figura 5.21 riporta uno stralcio della cartografia MOPS e la localizzazione delle prove geognostiche e geofisiche di riferimento per la MS OCDPC 344/2016.

*Figura 5.21 – In alto: delimitazione delle zone MOPS. In basso: substrato geologico, coperture quaternarie e discontinuità tettoniche rilevate. Si riportano le prove geognostiche/geofisiche di riferimento per la MS OCDPC 344/2016*





Le indagini geognostiche evidenziano spessori di coperture “soffici” (depositi eolici e/o di versante; depositi di frana; bedrock molto alterato) fino a circa 9÷12 metri (figura 5.22).

Anche le ricostruzioni sismostratigrafiche desunte dalle indagini MASW e HVSR confermano coperture “soffici” diffuse in tutto il perimetro dell'abitato (figure 5.23 e 5.24), individuate anche nei settori ove il substrato risulterebbe affiorante (molto alterato?). Le registrazioni HVSR hanno riscontrato massimi spettrali H/V, di intensità anche elevata, a frequenze medio alte (in particolare tra 5,5÷10,3 Hz) e dunque associabili alla base delle coperture sopra descritte. Sono tuttavia evidenti ulteriori alti spettrali a medio-basse frequenze (1,9÷2,5 Hz), che in alcuni casi risultano frequenze fondamentali, imputabili a riflettori profondi oltre 30 metri, nel substrato MOV “non rigido” ancora alterato e caratterizzato da Vs comprese tra 400 e 500 m/s).

Per questo ulteriore studio sono state eseguite nuove indagini (penetrometria DPSH, stendimento sismico a rifrazione e registrazioni HVSR) nella porzione di versante a SE del territorio urbanizzato del Capoluogo. Si tratta di un pendio con previsioni edificatorie, tuttavia compreso in “zona di attenzione per instabilità di versante” (deposito di frana quiescente per scivolamento).

Figura 5.22 – Penetrometrie DPSH rappresentative eseguite presso San Benedetto Val di Sambro

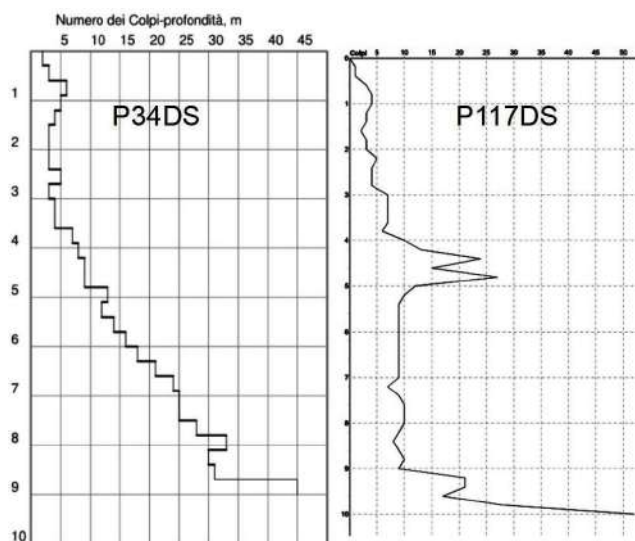
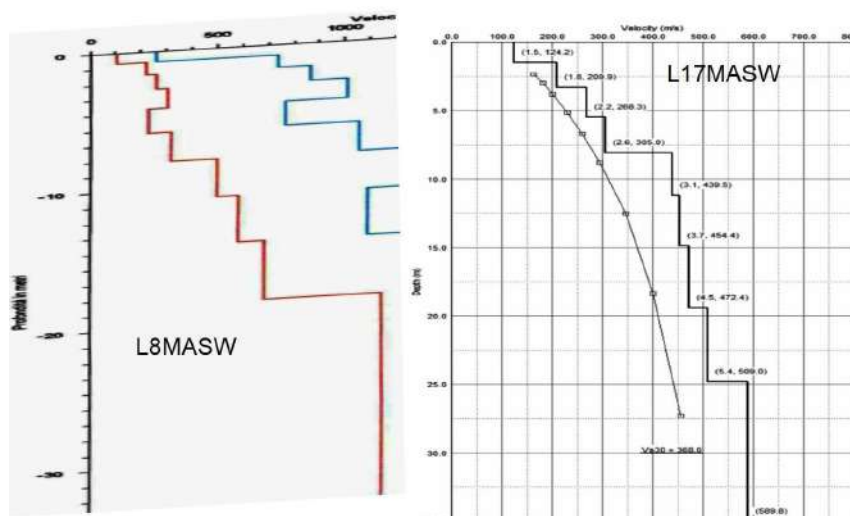


Figura 5.23 – Stendimenti MASW eseguiti presso San Benedetto Val di Sambro e modelli sismostratigrafici



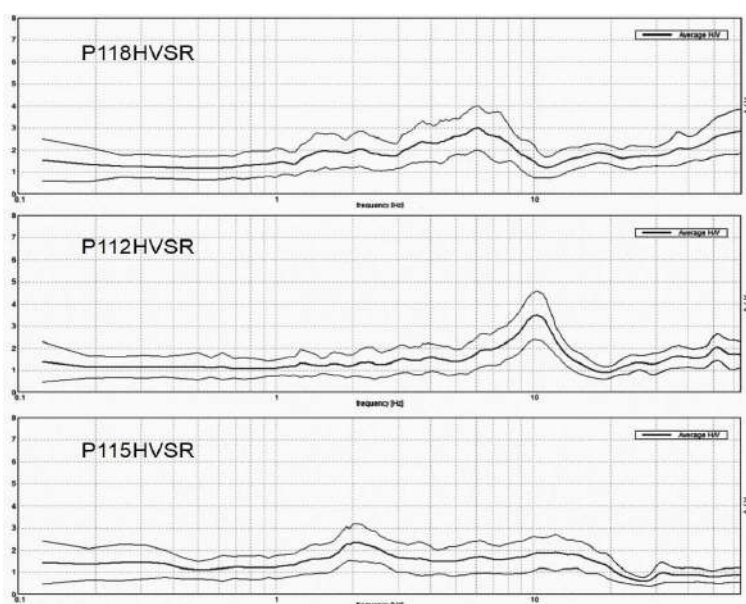


Figura 5.24 – Regrazioni sismiche HVSR rappresentative eseguite presso San Benedetto Val di Sambro

La figura 5.25 offre una rappresentazione delle indagini complessivamente disponibili rispetto all'areale studiato (anch'esso evidenziato), mentre le figure 5.26 e 5.27 rappresentano i diagrammi di sintesi dei risultati ottenuti

Le indagini geognostiche e geofisiche hanno dunque consentito di elaborare una nuova sezione sismostratigrafica e geotecnica rappresentata nella figura 5.28 ("sezione 1") e che risulta di riferimento per le modellazioni numeriche bidimensionali della RSL e per le successive verifiche di stabilità in condizioni sismiche svolte per questo areale.

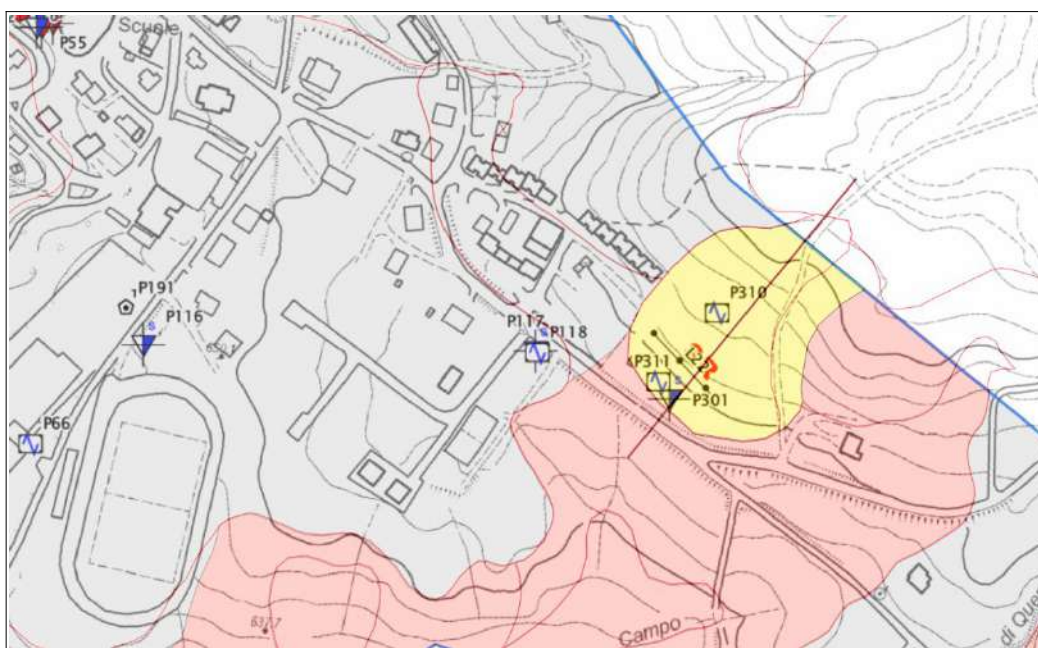


Figura 5.25 – Indagini geognostiche e geofisiche e areale interessato dagli approfondimenti di "livello 3" (frana quiescente per scivolamento, evidenziata in giallo). Viene riportata anche la traccia della sezione sismostratigrafica e litotecnica ("sezione 1")



Figura 5.26 – Penetrometria DPSH (P301DS301) eseguita per gli approfondimenti della MS di “livello 3”

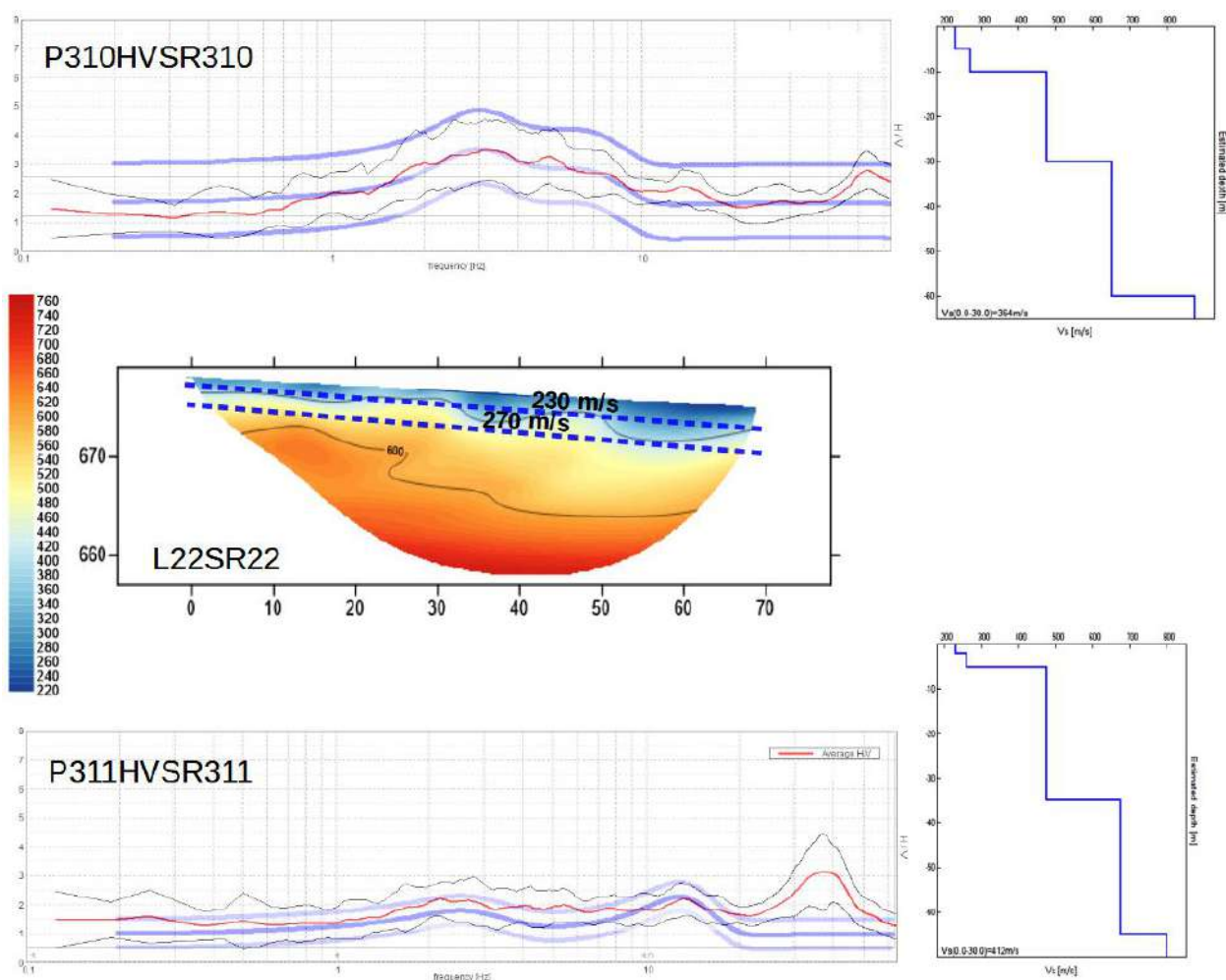
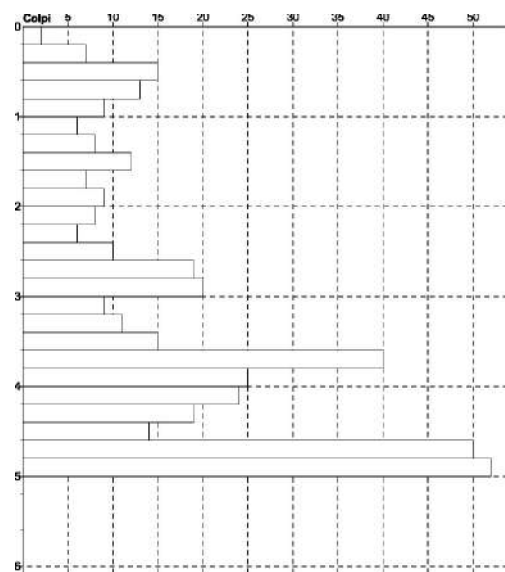


Figura 5.27 – Regrazioni sismiche HVSR e stendimento sismico a rifrazione eseguiti nell'area di approfondimento fino al “livello 3”

Le nuove indagini eseguite hanno evidenziato coperture costituiti da sedimenti rimaneggiati di spessori fino a 5÷10 metri, discretamente consistenti (vedi figura 5.26). Per i risultati si rimanda

rispettivamente ai contenuti dell'allegato 4 (<<Schede modelli numerici della RSL 2D>>) e dell'allegato 5 (<<Stabilità versanti>>).

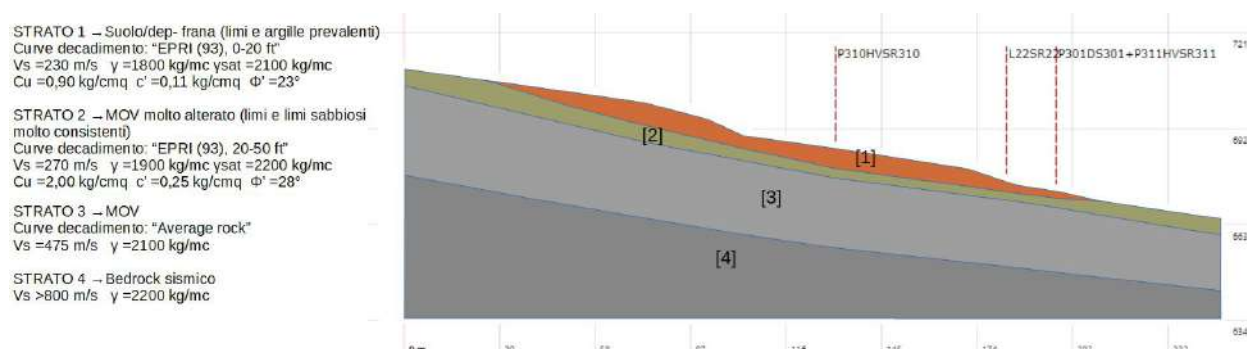


Figura 5.28 – Sintesi della caratterizzazione sismostratigrafica e geotecnica della sezione 1 (Capoluogo)

## 5.8 Villa Cedrecchia

L'abitato di questo toponimo si colloca a mozzocosta del pendio in sinistra idrografica del torrente Savena. Il substrato roccioso affiorante nel versante è costituito da alternanze di livelli lapidei/arenitici e peliti (Formazione di Monte Venere – MOV).

La cartografia geologica RER indica come l'abitato sia insediato su coperture di versante e su depositi di frana quiescente per colamento (figura 5.29).

La registrazione HVSR effettuata su tali coperture (figura 5.30) ha evidenziato elevate amplificazioni spettrali H/V a frequenze alte, riconducibili a modesti spessori (fino a 3÷4 metri), mentre per il bedrock aggiorante circostante viene stimata una Vs30 =450 m/s.

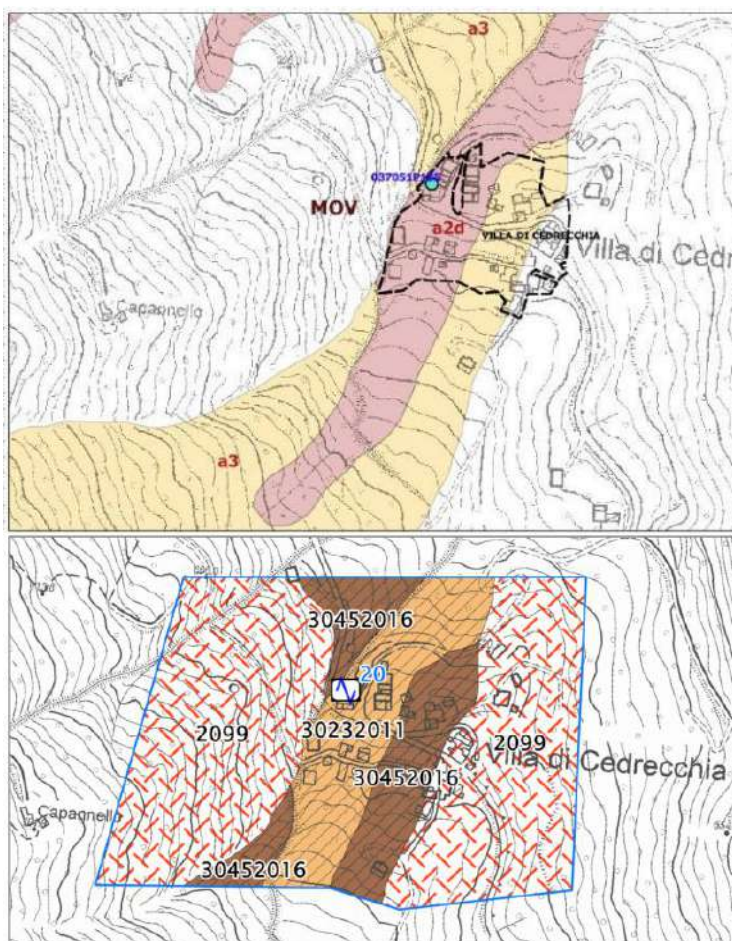
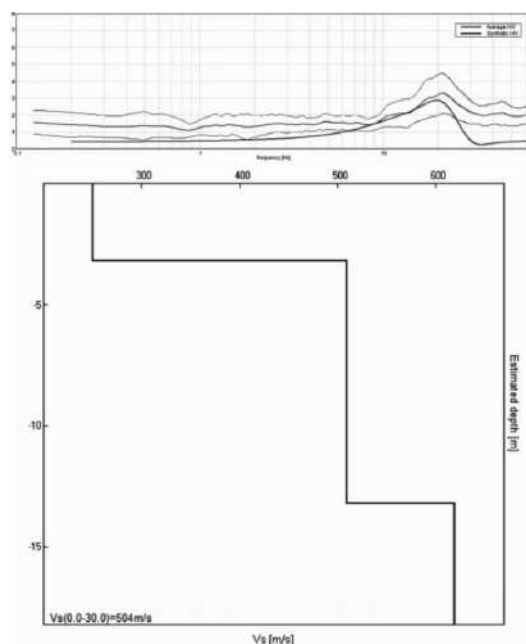


Figura 5.29 – In alto: substrato geologico, coperture quaternarie e discontinuità tettoniche rilevate. Si riportano le prove geognostiche/geofisiche di riferimento. In basso: delimitazione delle zone MOPS

Figura 5.30 – Registrazione HVSR effettuata presso Villa Cedrecchia e relativo modello sismostratigrafico



## 5.9 Cedrecchia

L'abitato di Cedrecchia è situato nel medesimo versante, a SE di Villa Cedrecchia, a quote tuttavia più elevate (a circa 800 m slm). I rilievi sono sempre caratterizzati da substrato roccioso costituito da alternanze di livelli lapidei/arenacei e pelitici (Formazione di Monte Venere – MOV). Le giaciture stratigrafiche rilevate (immersioni eterogenee, con strati rovesciati) sono l'evidenza delle significative deformazioni tettoniche che hanno coinvolto il bedrock locale (figura 5.31).

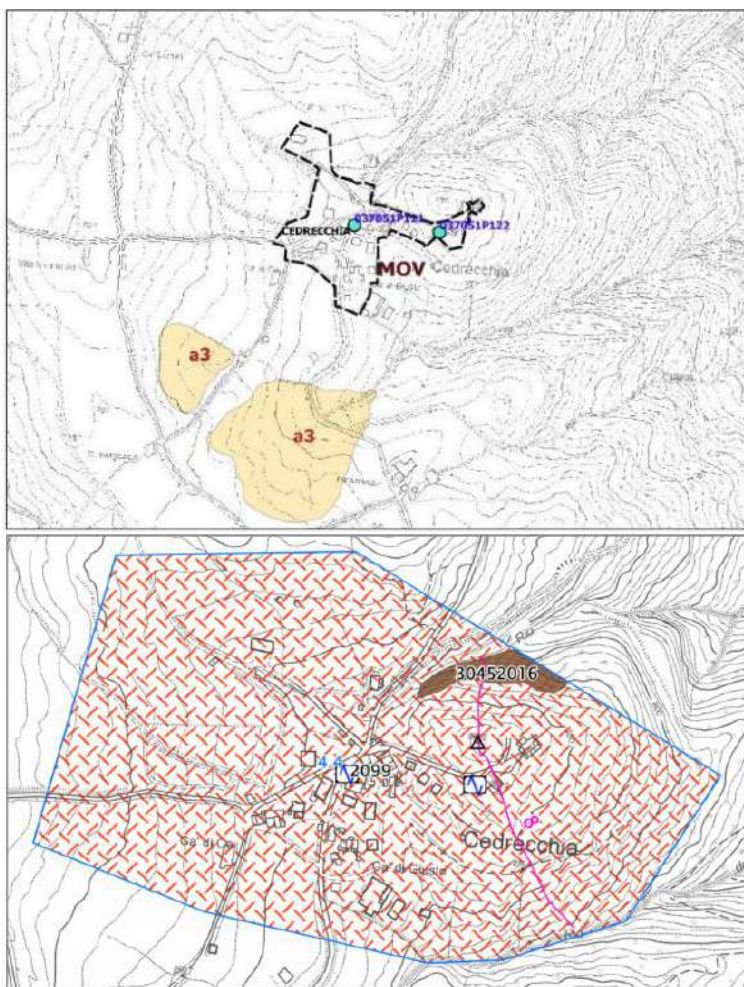


Figura 5.31 – In alto: substrato geologico, coperture quaternarie e discontinuità tettoniche rilevate. Si riportano le prove geognostiche/geofisiche di riferimento. In basso: delimitazione delle zone MOPS

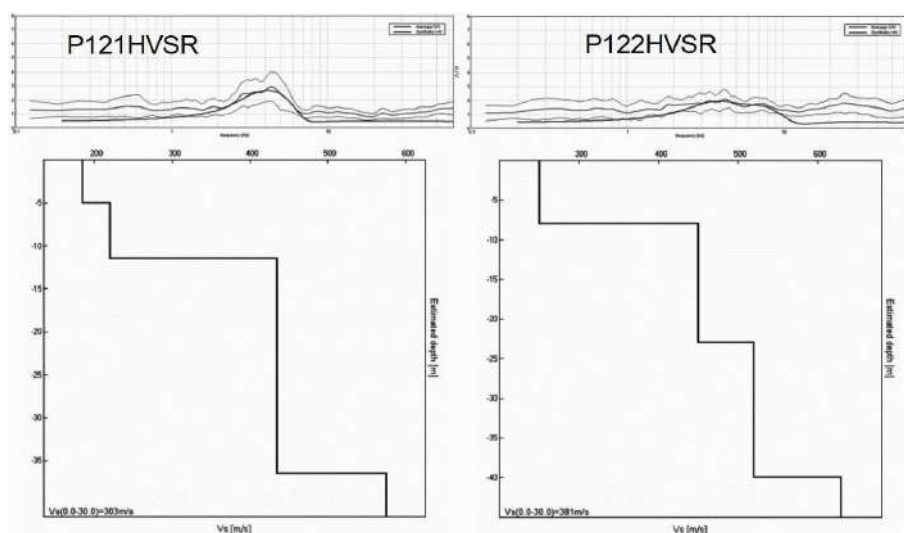
Le registrazioni HVSR effettuate hanno evidenziato amplificazioni H/V a frequenze medio-alte



(4,4 Hz) nel settore meno acclive, presumibilmente caratterizzato da coperture (bedrock molto alterato).

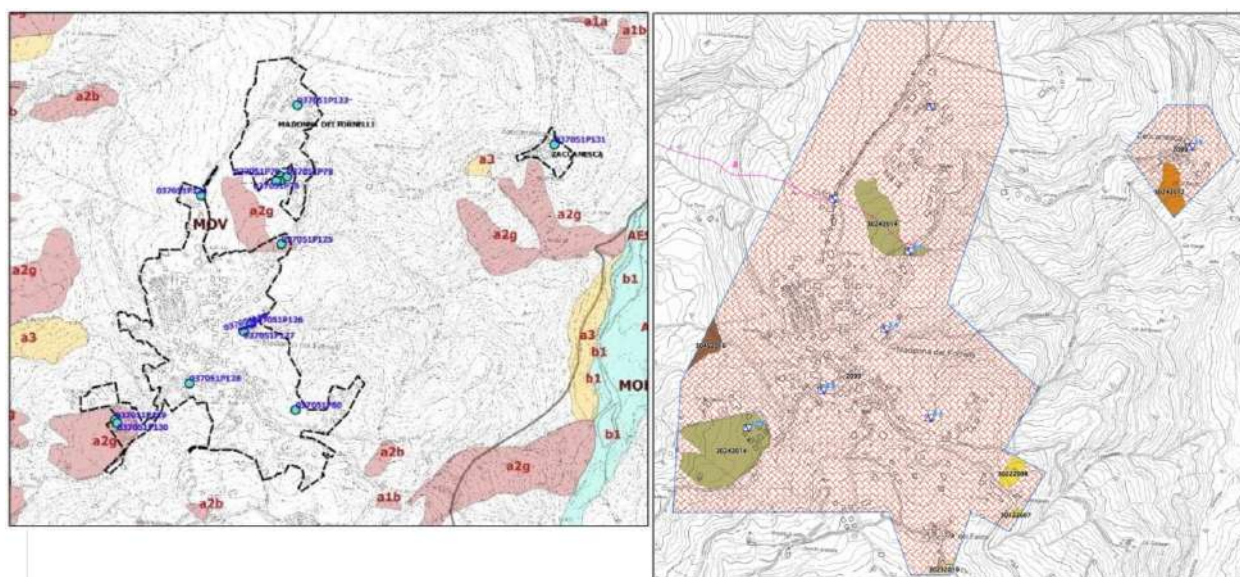
Nel settore di versante più acclive (con pendenze fino a circa 40° e considerato potenzialmente instabile) il substrato affiorante risulta sempre detensionato/alterato e con Vs30 stimata pari a circa 381 m/s (figura 5.32).

*Figura 5.32 – RegISTRAZIONI HVSR effettuate a Cedrecchia e relativi modelli sismostratigrafici*



## 5.10 Madonna dei Fornelli e Zaccanesca

La frazione di Madonna dei Fornelli e il toponimo Zaccanesca ricadono ancora su rilievi caratterizzati da substrato roccioso costituito da alternanze di livelli lapidei/arenacei e pelitici della Formazione di Monte Venere (figura 5.33).



*Figura 5.33– In alto: substrato geologico, coperture quaternarie e discontinuità tettoniche rilevate. Si riportano le prove geognostiche/geofisiche di riferimento. In basso: delimitazione delle zone MOPS*

Le giaciture eterogenee (con strati anche rovesciati) evidenziano le significative deformazioni tettoniche che hanno coinvolto il bedrock locale. Le indagini disponibili (DPSH; MASW; HVSR) risultano sufficientemente distribuite ed evidenziano che:

1. nel settore centro-meridionale di Madonna dei Fornelli e nel toponimo Zaccanesca sono presenti coperture “soffici” fino a 5÷7 metri, presumibilmente riconducibili a disfacimento del bedrock superficiale molto alterato (figura 5.34). le registrazioni HVSR evidenziano amplificazioni spettrali, anche elevate, a frequenze alte (5,6÷10,4 Hz);
2. nel settore più settentrionale dell'abitato di Madonna dei Fornelli le coperture non risultano significative, tuttavia il substrato MOV ancora risulta scarsamente rigido e alterato (con Vs30 approssimabile a 450 m/s). Le registrazioni HVSR non riscontrano amplificazioni spettrali H/V significative (figura 5.35).

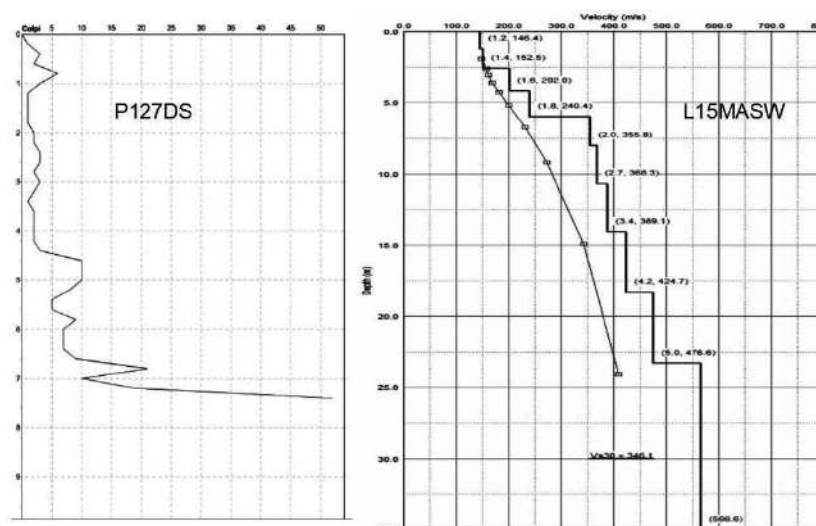


Figura 5.34- Penetrometria DPSH e MASW ( modello sismostratigrafico) e registrazioni HVSR rappresentative del settore centro-meridionale di Madonna dei Fornelli

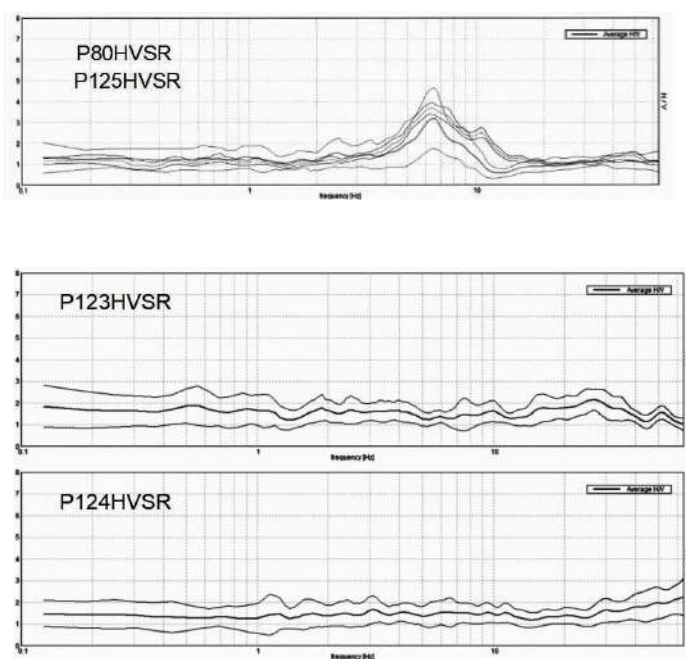
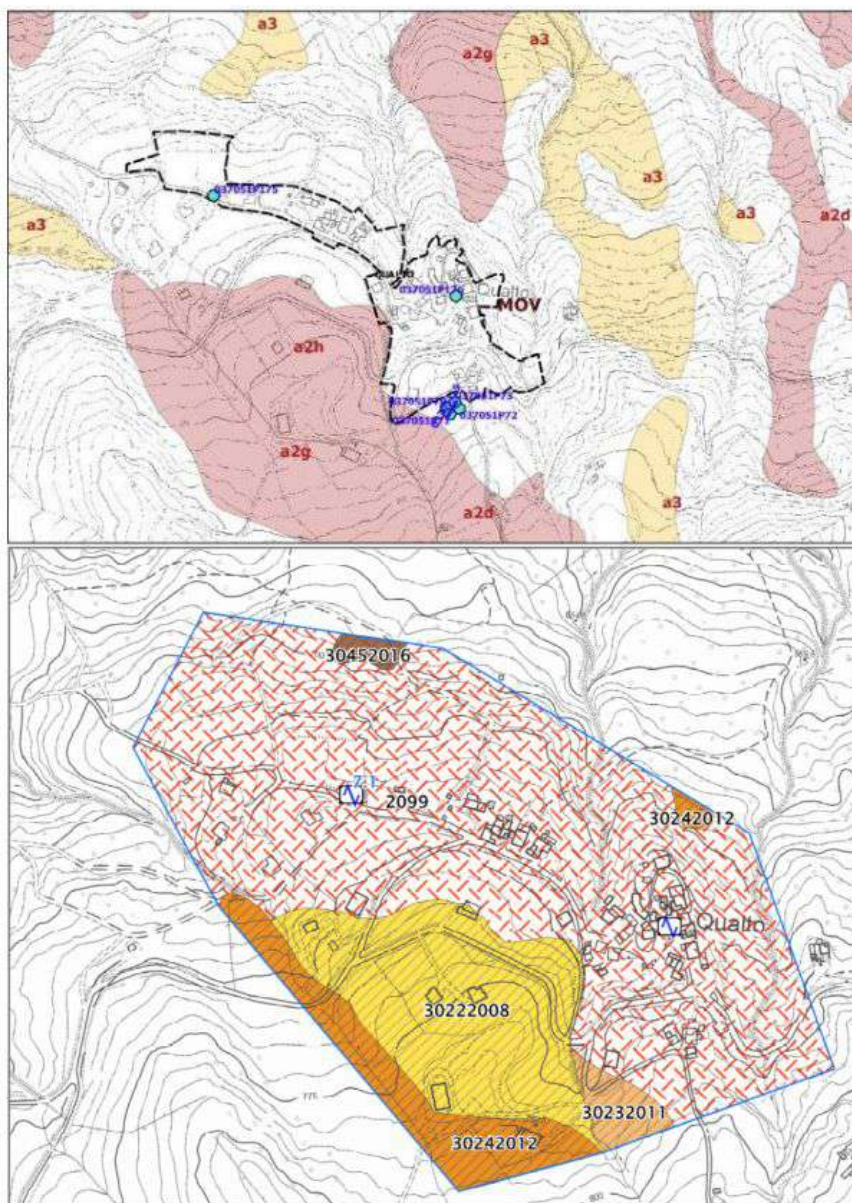


Figura 5.35- Registrazioni HVSR rappresentative del settore più settentrionale di Madonna dei Fornelli

## 5.11 Qualto

L'abitato di Qualto è anch'esso insediato su rilievi costituiti da substrato roccioso con alternanze di livelli lapidei/arenacei e pelitici (Formazione di Monte Venere – MOV). La cartografia geologica RER rileva nei pendii sottostanti depositi di versante e forme di dissesto di tipologia d'innesco per lo più complessa; a sud, una frana per scivolamento a blocchi lambisce il perimetro urbanizzato (figura 5.36).



*Figura 5.36 - In alto: substrato geologico, coperture quaternarie e discontinuità tettoniche rilevate. Si riportano le prove geognostiche/geofisiche di riferimento. In basso: delimitazione delle zone MOPS*

Le indagini disponibili per l'abitato (DPSH; MASW; HVSR) evidenziano spessori superficiali “soffici” (bedrock affiorante molto alterato?) fino a profondità di circa 5÷10 metri (figura 5.37) sovrastanti bedrock caratterizzato da Vs di circa 500 m/s. Le registrazioni HVSR hanno riscontrato moderate amplificazioni spettrali anche ad alte frequenze (7,1 Hz), che confermano la presenza delle coperture diffuse nell'areale studiato.



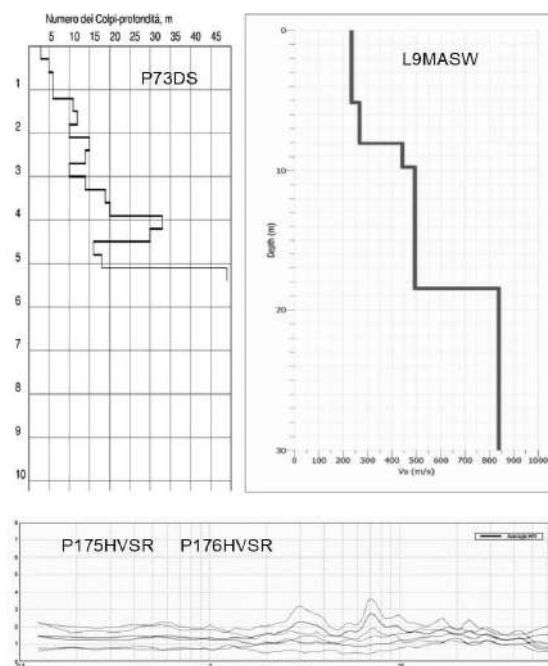


Figura 5.37– Penetrometria DPSH, registrazioni HVSR e MASW (modello sismostratigrafico) eseguite presso Qualto

## 5.12 Montefredente – Il Borgo – Il Faldo – La Capanna

Morfologicamente, i toponimi “Il Faldo” e “La Capanna” ricadono su versanti, mentre Montefredente e il toponimo “La Capanna”, ricadono in aree di crinale. I rilievi sono caratterizzati da substrato roccioso con alternanze di livelli lapidei/arenacei e pelitici attribuiti alla Formazione di Monghidoro (MOH).

La cartografia geologica RER rileva nei versanti circostanti “La Capanna” diffuse forme di dissesto (prevalentemente di tipologia complessa e depositi di versante. Frane quiescenti complesse e depositi di versante si rilevano nei pendii fino a Montefredente, tuttavia senza lambire i perimetri dell'area urbanizzata fino al settore più meridionale della frazione, dove si rilevano ampie forme di dissesto di versante complesse quiescenti che interessano anche gran parte degli abitati “il Borgo” e “il Faldo”. Questi ultimi due toponimi sono interessati anche da frane attive di scivolamento di limitata estensione che coinvolgono depositi già attribuiti a più ampi franamenti quiescenti (figura 5.38).

Le indagini disponibili (DPSH; MASW; HVSR) risultano sufficientemente distribuite ed evidenziano che:

1. presso il toponimo “La Capanna” e fino al settore più centro-settentrionale di Montefredente, le registrazioni HVSR disponibili riscontrano amplificazioni spettrali H/V ad alte frequenze ( $10; 1 \div 13,3$  Hz) associabili a coperture “soffici” (bedrock molto alterato?) di spessore fino a 4÷5 metri;
2. il settore centro-meridionale dell'abitato di Montefredente è caratterizzato da coperture (depositi di versante e/o bedrock molto alterato?) di maggior spessore, fino a circa 10 metri (figura 5.39), con registrazioni HVSR che rilevano massime amplificazioni H/V a

frequenze medio-alte (3,8÷5,6 Hz). Il sottostante substrato MOH risulta tuttavia scarsamente rigido fino ad almeno 30 metri di profondità ( $V_s$  tra 350÷500 m/s);

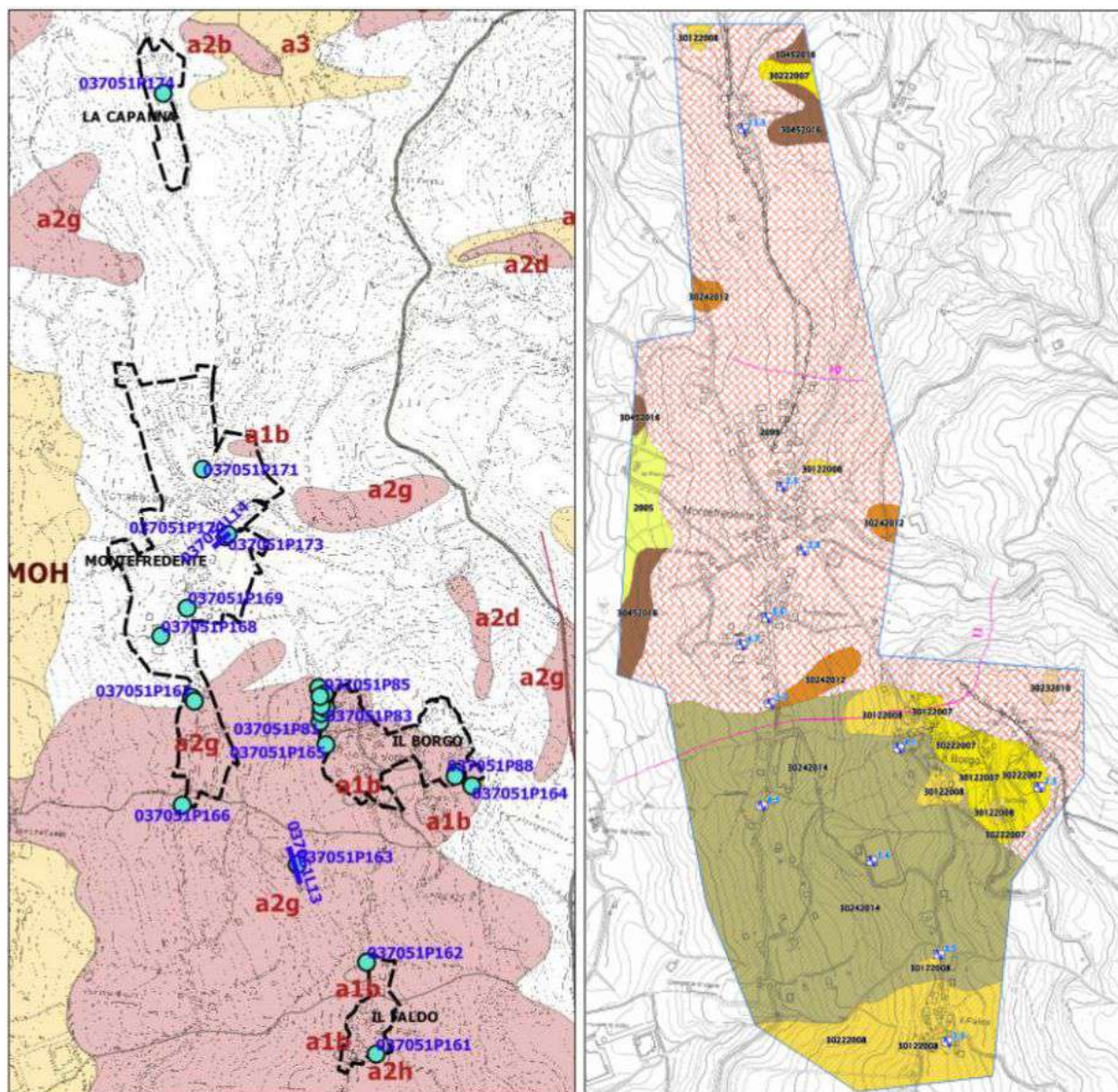


Figura 5.38 – A sx: substrato geologico, coperture quaternarie e discontinuità tettoniche rilevate. Si riportano le prove geognostiche/ geofisiche di riferimento. A dx: delimitazione delle zone MOPS

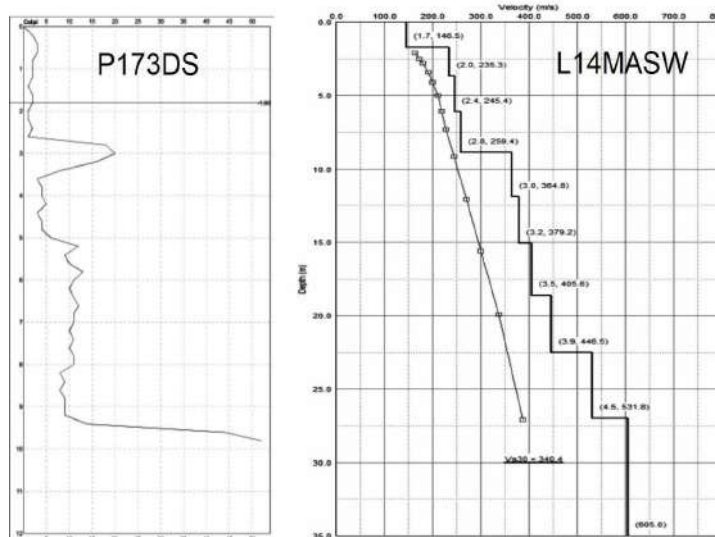
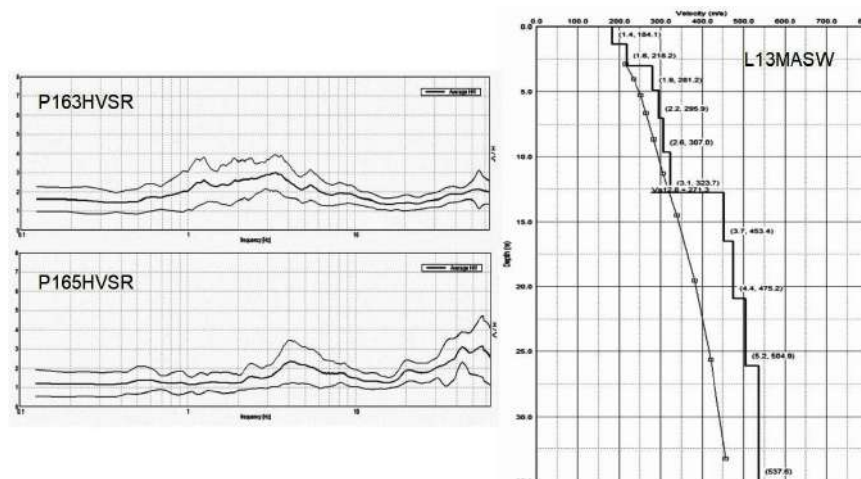


Figura 5.39 – Penetrometria DPSH e MASW (modello sismostratigrafico) eseguite presso Montefredente

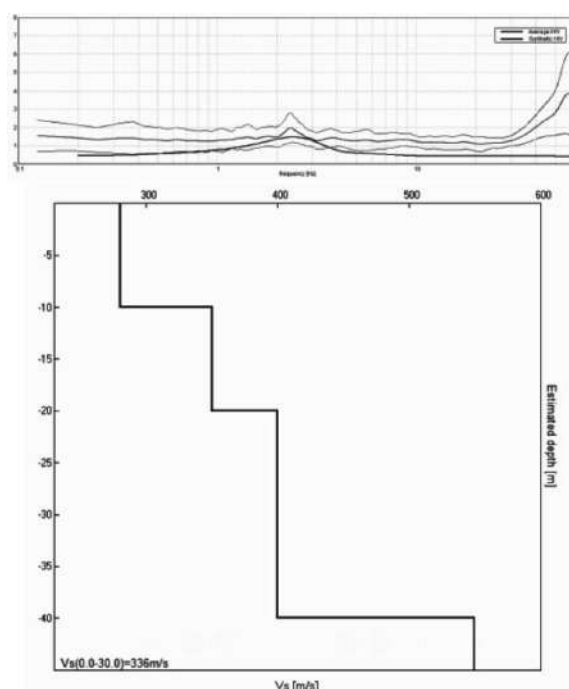
3. nel settore più meridionale dell'abitato di Montefredente, e inoltre presso i toponimi “il Faldo” e “il Borgo” (solo parte dell'abitato occidentale), sono rilevati depositi frana quiescente complessa, scarsamente rigidi, fino a spessori di 13÷15 metri (figura 5.40);
4. l'abitato più orientale del toponimo “il Borgo” è anch'esso incluso in aree di franamento quiescente complesso con coperture stimate fino a circa 10 metri (su bedrock alterato). Sono rilevate alcune frane di scivolamento recenti di minore ampiezza che hanno interessato tali coperture.

Figura 5.40 – Regrazioni HVSR (P163) e MASW (modello sismostratigrafico) eseguite presso Montefredente e “il Borgo” (P165)



Il settore di crinale di “il Borgo”, è caratterizzato da antiche zone di coronamento di frane e tuttavia il bedrock MOH, seppure alterato ( $V_{s30}$  approssimabile a 350 m/s) risulta sub affiorante (figura 5.41). Le prove DPSH disponibili (P88; P89; P90) si arrestano per rifiuto a -2 metri circa.

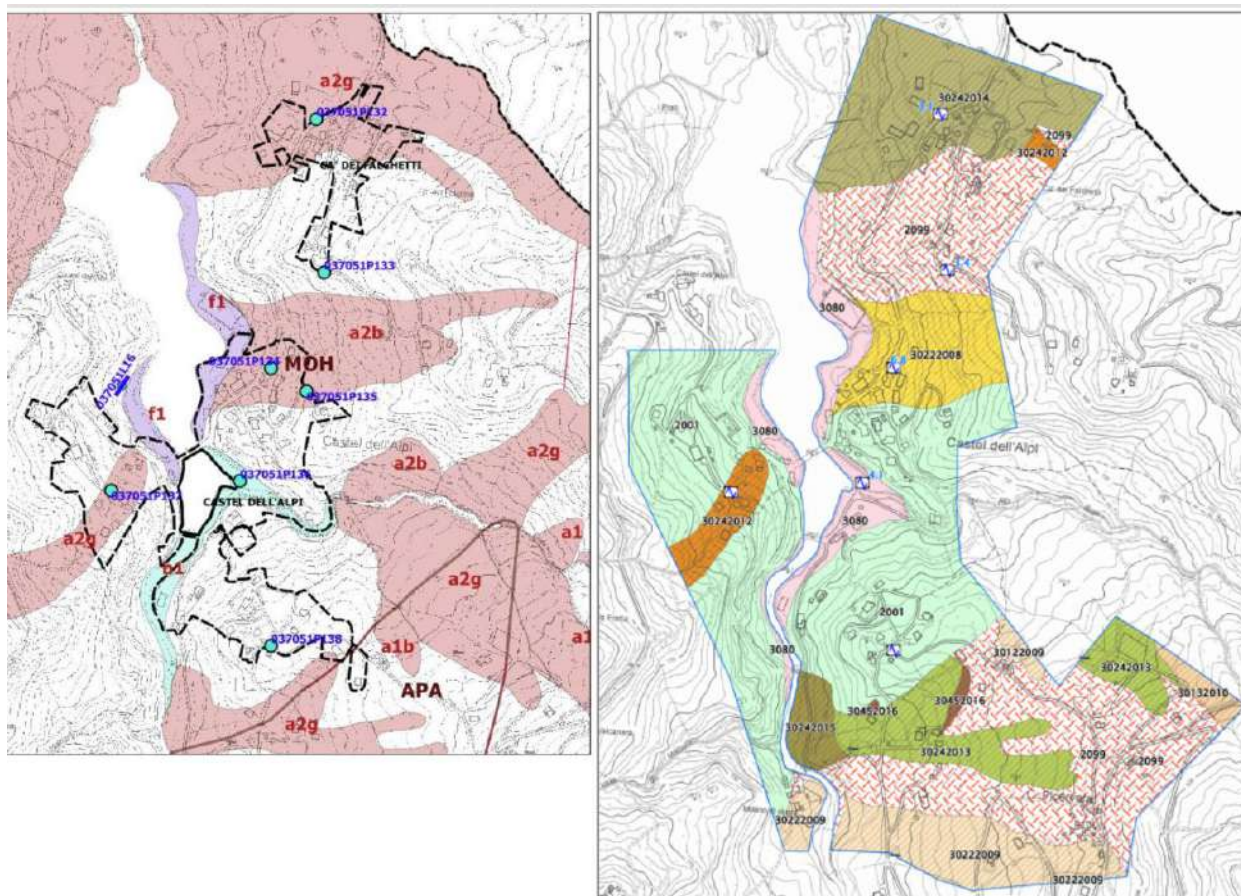
Figura 5.41 – Regrazioni HVSR (P163) e MASW (modello sismostratigrafico) eseguite presso Montefredente e “il Borgo” (P165)



### 5.13 Castel dell'Alpi – Ca dei Falchetti

Le due frazioni ricadono su versanti caratterizzati da substrato roccioso con alternanze di livelli lapidei/arenacei e pelitici attribuiti alla Formazione di Monghidoro (MOH). La cartografia geologica RER rileva forme di dissesto quiescenti (per scivolamento e complesse) che intersecano i settori più settentrionali dei due abitati (figura 5.42).





*Figura 5.42- A sx: substrato geologico, coperture quaternarie e discontinuità tettoniche rilevate. Si riportano le prove geognostiche/geofisiche di riferimento. A dx: delimitazione delle zone MOPS*

Le giaciture eterogenee (con strati anche rovesciati) evidenziano le significative deformazioni tettoniche che hanno coinvolto il bedrock locale.

Castel dell'Alpi si sviluppa nei pendii al piede dell'omonimo lago formatosi dallo sbarramento del torrente Savena per franamenti avvenuti nel 1951. per questa frazione, le indagini disponibili (DPSH; MASW; HVSr) evidenziano per il bedrock “non rigido” affiorante nei versanti una Vs approssimabile a 400 m/s, con registrazioni HVSr prive di amplificazioni (figura 5.43). Occorre evidenziare come in prossimità dell'invaso è stata cautelativamente definita una “zona di attenzione” per cedimenti differenziali, giustificata dalla presenza di depositi alluvionali in evoluzione e/o depositi palustri di spessore e caratteristiche meccaniche presumibilmente scadenti. Il settore settentrionale della frazione (nel versante destro), ricade su depositi di frana quiescente per scivolamento: le indagini disponibili (HVSr; DPSH) evidenziano spessori delle coperture amplificabili fino a circa 5÷7 metri, con amplificazioni H/V elevate riscontrate a circa 5,8 Hz (figura 5.44).

Per la frazione Ca dei Falchetti, le indagini disponibili (HVSR) consentono di stimare lo spessore delle coperture di frana (sulle quali si sinedia l'abitato) fino a circa 15÷17 metri (figura 5.45).

Figura 5.43-  
Registrazioni HVSR e  
stendimento MASW  
(modello  
sismostratigrafico)  
eseguite a Castel  
dell'Alpi

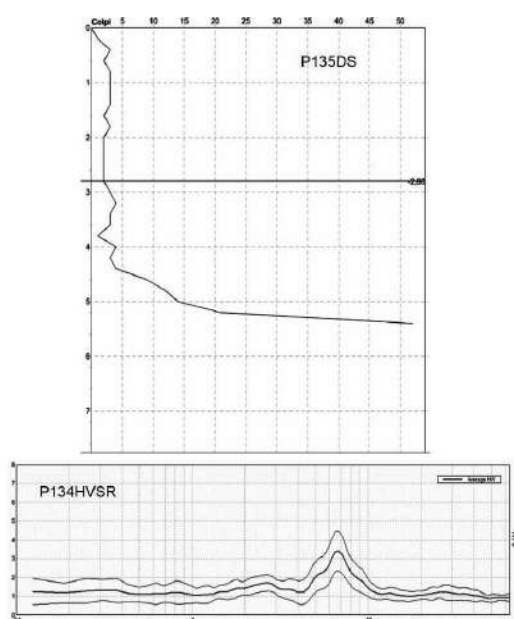
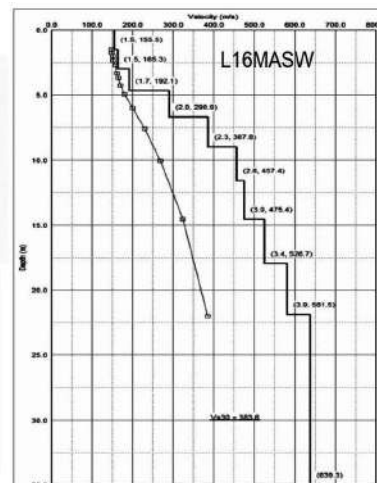
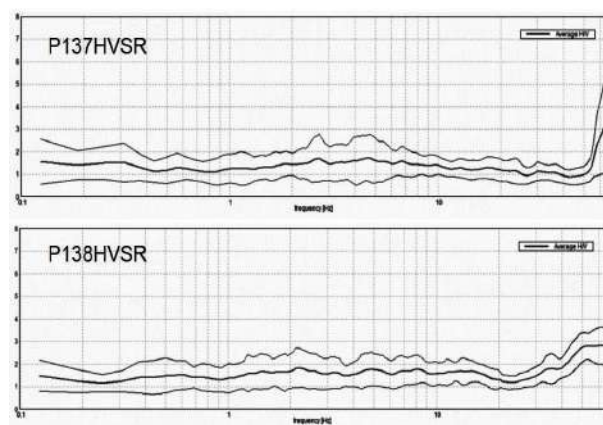
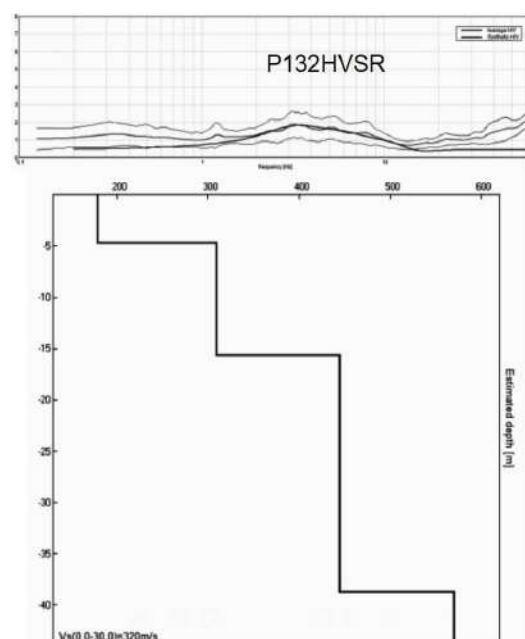


Figura 5.44- Registrazione HVSR e DPSH eseguite a Castel dell'Alpi

Figura 5.45- Registrazione HVSR e modello sismostratigrafico  
rappresentativo di Ca dei Falchetti





### 5.14 Pian del Voglio – Piano delle Ginestre – La Calcinata (con ulteriori approfondimenti – OCDPC 532/2018 )

L'abitato di Pian del Voglio si insedia su versanti in destra idrografica del torrente Setta, caratterizzati da substrato roccioso con alternanze di livelli lapidei/arenacei e pelitici attribuiti alla Formazione di Monghidoro (MOH), mentre il settore orientale del Piano delle Ginestre è caratterizzato da bedrock argillitico intensamente tettonizzato (Argilliti variegata con calcari – AVC).

La cartografia geologica RER evidenzia come ampi settori orientali e occidentali di questo abitato e del toponimo “La Calcinata” risultino sviluppati su estese frane quiescenti per scivolamento in blocco (figura 5.46).

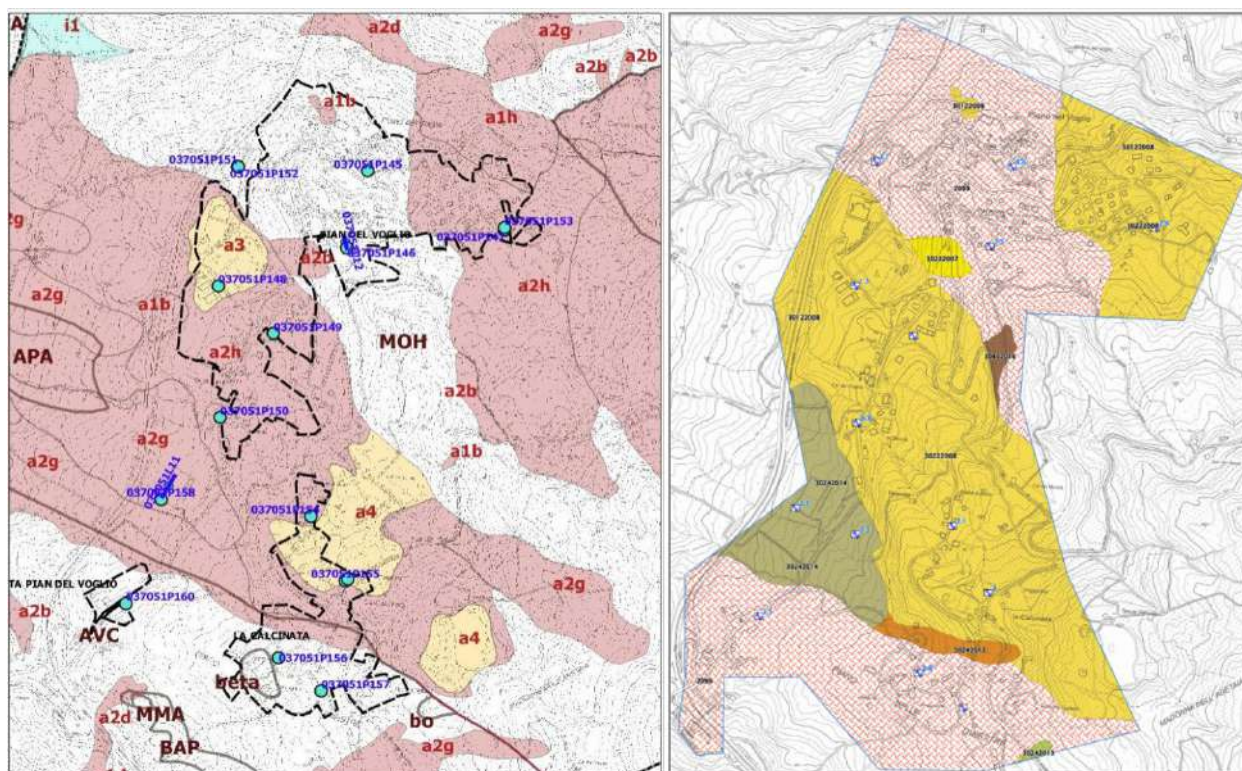


Figura 5.46 – A sx: substrato geologico, coperture quaternarie e discontinuità tettoniche rilevate. Si riportano le prove geognostiche/geofisiche di riferimento (MS OCDPC 344/2016). A dx: delimitazione delle zone MOPS

Per Pian del Voglio, le indagini disponibili (DPSH e soprattutto gli stendimenti MASW e le registrazioni HVSR) hanno evidenziato diffuse coperture amplificabili, in parte riconducibili ai depositi di frana e in parte riconducibili a substrato affiorante molto alterato. Nel settore orientale di Pian del voglio, le coperture presentano spessori fino a circa 10 metri (figura 5.47), mentre in tutto il settore occidentale del versante e della stessa frazione le coperture (depositi di frana) si sono considerati spessori fino a circa 25÷27 m (con Vs25 approssimabili a 250 m/s), visto che le registrazioni HVSR hanno evidenziato significativi massimi spettrali H/V a medie frequenze, e prevalentemente a 3,1÷3,3 Hz (figura 5.48).



Il settore orientale del Piano delle Ginestre (toponimo “Calcinata”), è invece caratterizzato da bedrock argillitico intensamente tettonizzato AVC con Vs30 stimata pari a  $340 \div 360$  m/s (figura 5.49).

Figura 5.47– Penetrometria DPSH e  
stendimento MASW (modello  
sismostratigrafico) eseguite a Pian del  
Voglio

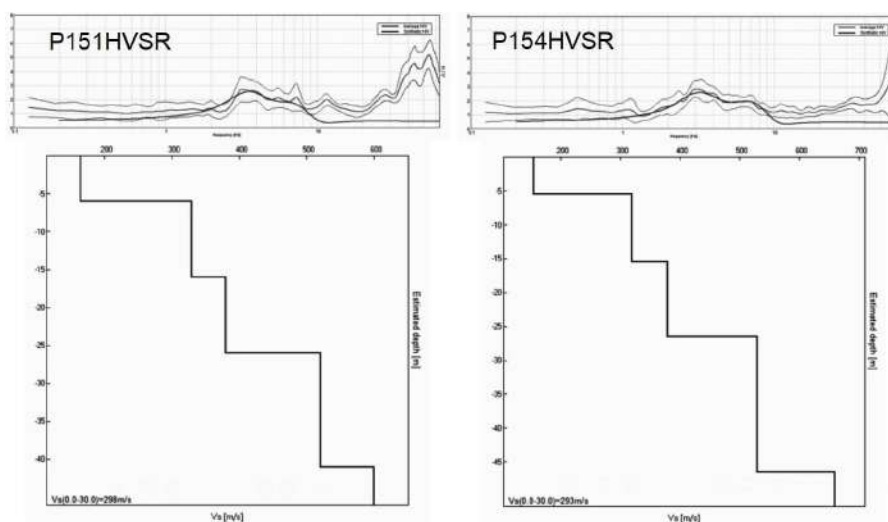
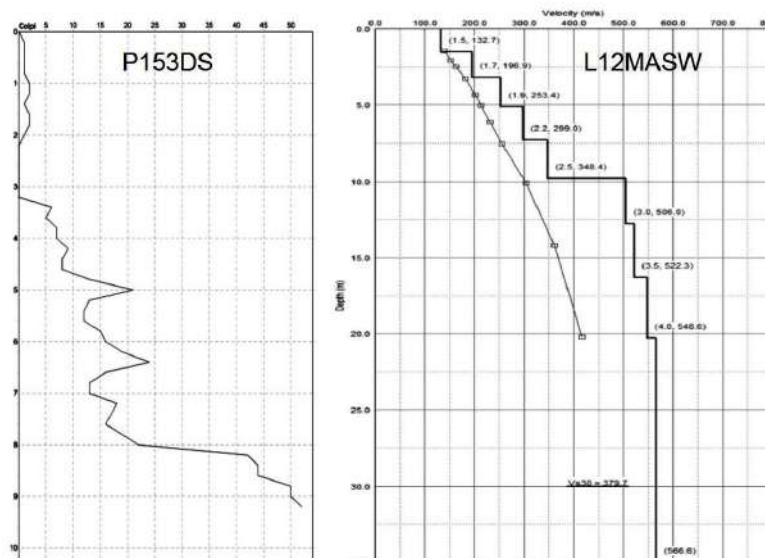
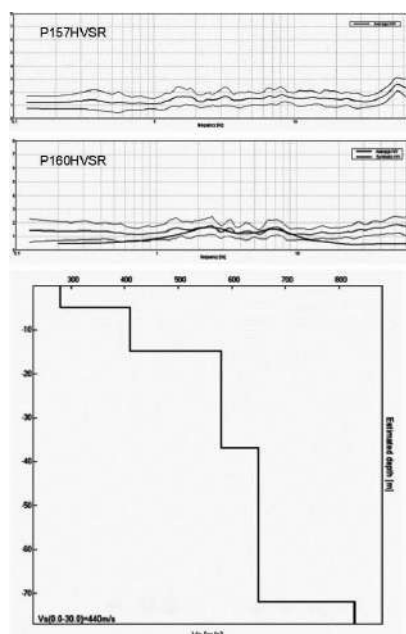
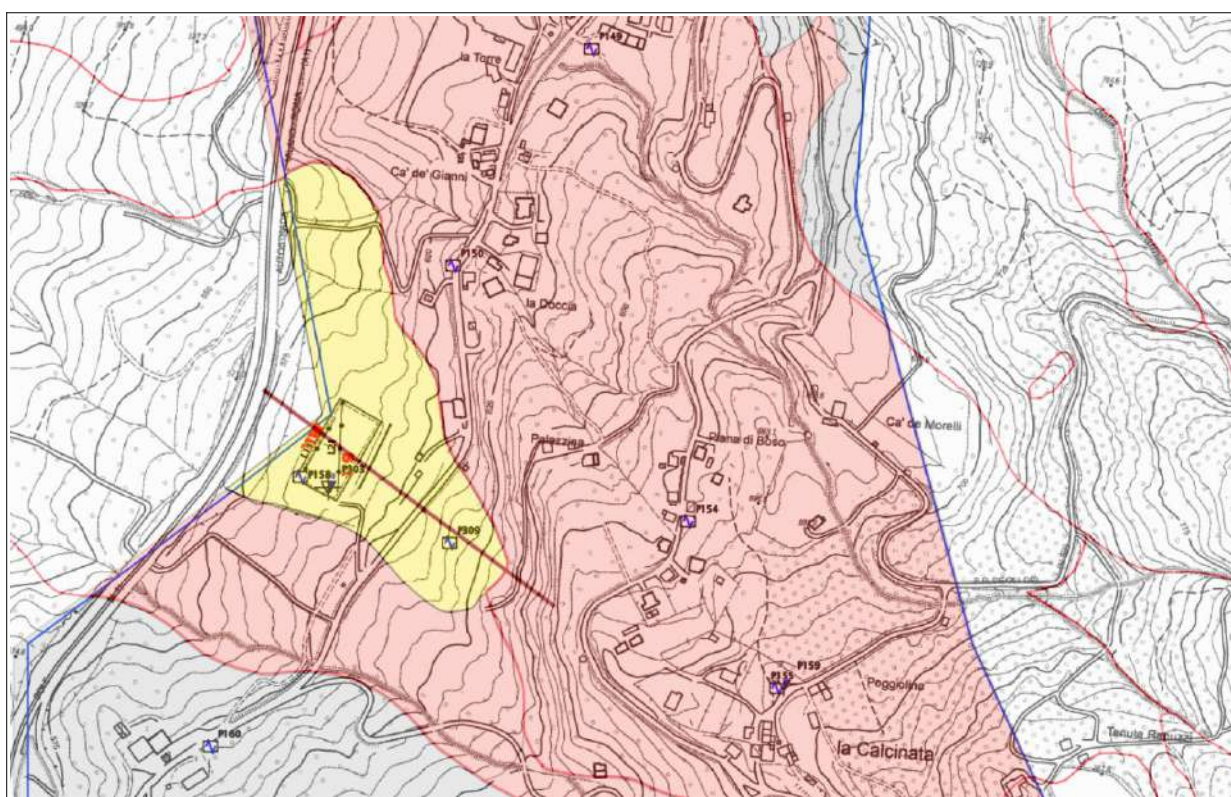


Figura 5.48– Registrazioni  
HVSR eseguite nel settore  
occidentale di Pian del Voglio  
e modello sismostratigrafici  
elaborati

Figura 5.49– Registrazioni HVSR eseguite presso Piano delle  
Ginestre



Per questo ulteriore aggiornamento della MS sono state eseguite ulteriori indagini (penetrometria DPSH; stendimento sismico a rifrazione e un'ulteriore registrazione HVSR nel versante), finalizzate a una migliore caratterizzazione sismostratigrafica e geotecnica e propedeutiche agli approfondimenti di “livello 3” che hanno interessato una parte di versante a NO di Calcinata e caratterizzato da un movimento franoso quiescente complesso che ha presumibilmente rimobilizzato una parte dell'ampia frana per scivolamento in blocco sulla quale si insedia questo nucleo abitativo. Gli approfondimenti, come vedremo, hanno dunque consentito di elaborare modellazioni numeriche della RSL 2D e analisi della stabilità in condizioni sismiche del “pendio in terra”. Le indagini ora disponibili per questa porzione di versante (vedi figura 5.50) hanno infatti confermato la presenza di coperture di sedimenti rimaneggiati, con spessori fino a 10÷12 metri (figura 5.51).



*Figura 5.50 – Indagini geognostiche/geofisiche e areale oggetto di approfondimenti di “livello 3” (frana quiescente complessa, evidenziata in giallo). Viene riportata anche la traccia della sezione sismostratigrafica e litotecnica (sezione 4) elaborata a supporto degli approfondimenti*

In particolare, le indagini geognostiche e geofisiche hanno permesso di elaborare una nuova sezione sismostratigrafica e geotecnica (“sezione 4”) che è risultata di riferimento per la modellazione numerica bidimensionale della RSL e per le successive verifiche di stabilità in condizioni sismiche. Per i risultati si rimanda rispettivamente ai contenuti dell'allegato 4 (<<Schede modelli numerici della RSL 2D>>) e dell'allegato 5 (<<Stabilità versanti>>). La successiva figura 5.52 offre una sintesi della caratterizzazione sismostratigrafica e geotecnica della sezione considerata.

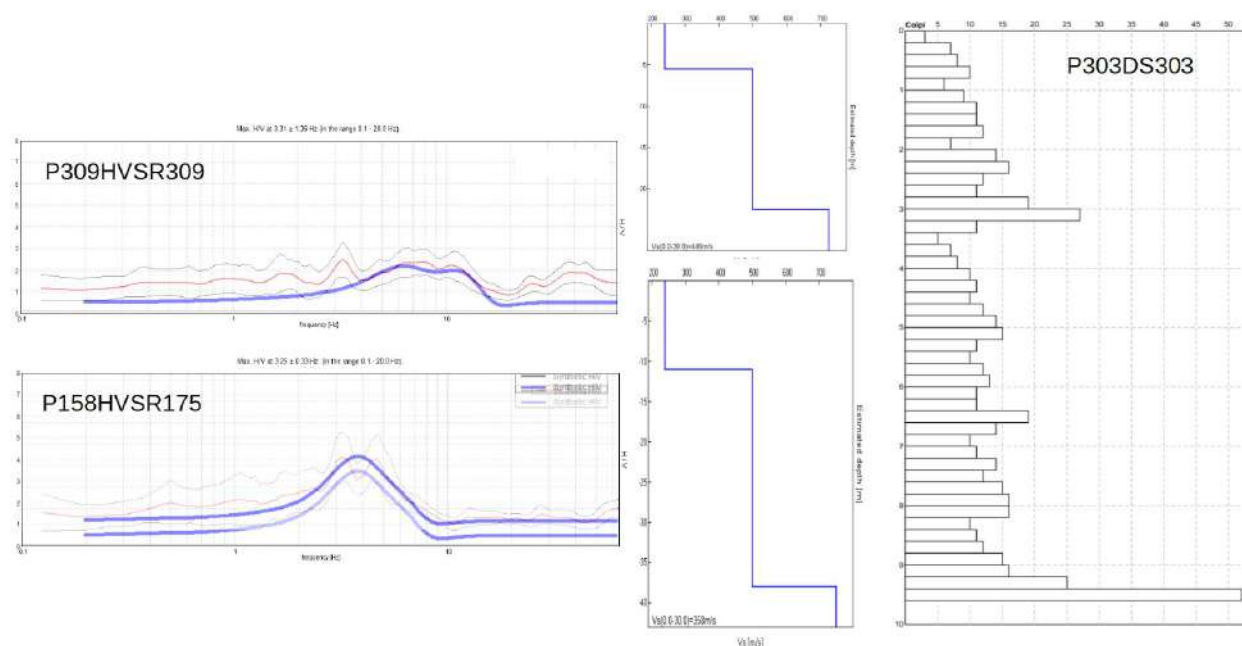


Figura 5.51 – Indagini eseguite nell'areale con approfondimenti di "livello 3" a NO di "La Calcinata" (depositi di frana quiescente complessa)

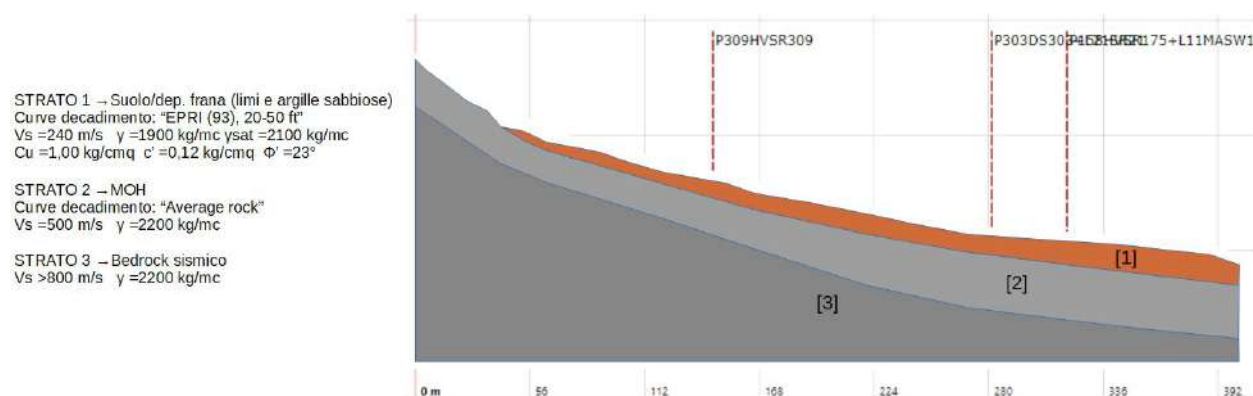


Figura 5.52 – Sintesi della caratterizzazione sismostratigrafica e geotecnica della sezione 4 presso Pian del Voglio - La Calcinata

## 5.15 Pian di Balestra

L'abitato presso Pian di Balestra è situato in rilievi caratterizzati da substrato roccioso con alternanze di livelli lapidei/arenacei e pelitici (Formazione di Monte Venere – MOV). La cartografia geologica RER riporta forme di dissesto di versante quiescente (prevalentemente di tipologia complessa), che intersecano anche il perimetro urbanizzato (figura 5.53).

Le indagini ( DPSH; MASW; HVSR) di repertorio e di nuova esecuzione hanno riscontrato che:

1. i settori settentrionali e centro-occidentale dell'areale studiato sono caratterizzati da substrato roccioso MOV affiorante (con  $V_{s30}$  approssimabile a 500 m/s) e/o coperture



di modesto spessore. Le registrazioni HVSR non evidenziano amplificazioni spettrali H/V (figura 5.54);

- la restante porzione di areale studiato è invece caratterizzato da diffusa presenza di coperture “soffici” amplificabili di modesto spessore (fino a 5÷7 metri), prevalentemente riconducibili a disfacimento superficiale del bedrock e a depositi di frana (figura 5.55).

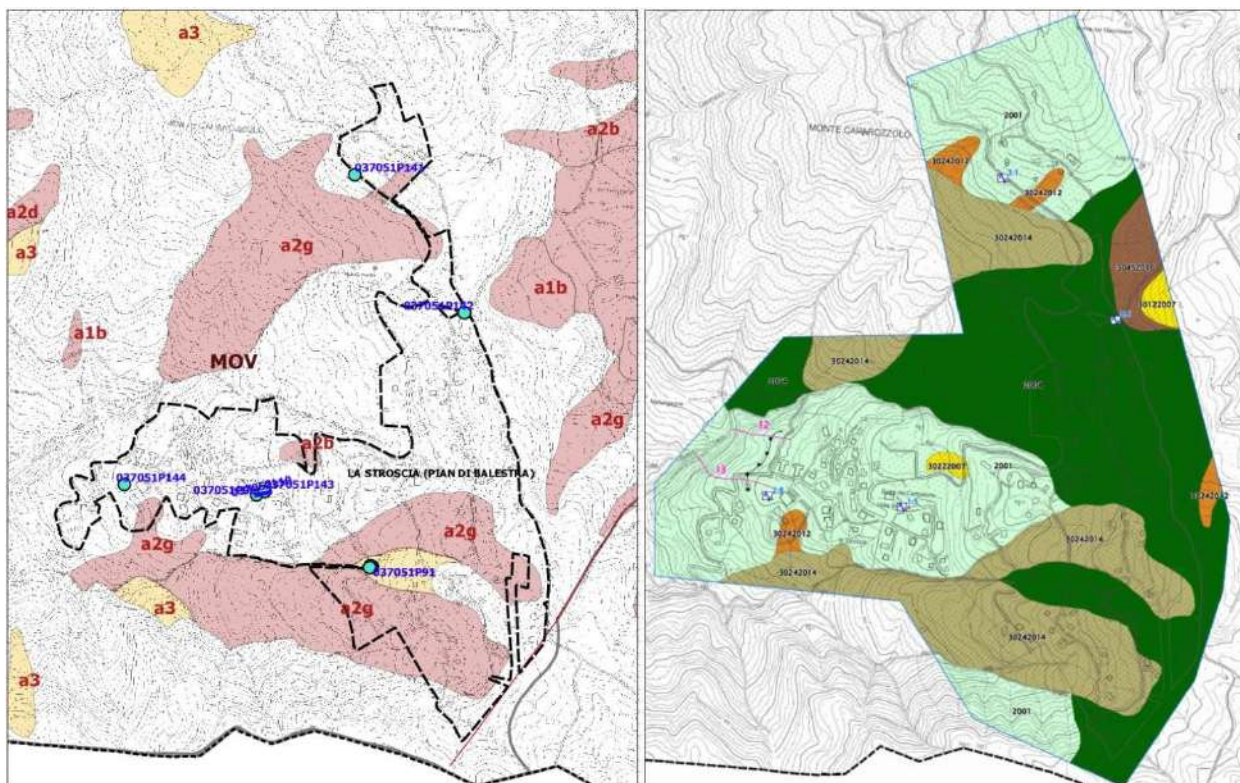


Figura 5.53 – A sx: substrato geologico, coperture quaternarie e discontinuità tettoniche rilevate. Si riportano le prove geognostiche/geofisiche di riferimento. A dx: delimitazione delle zone MOPS

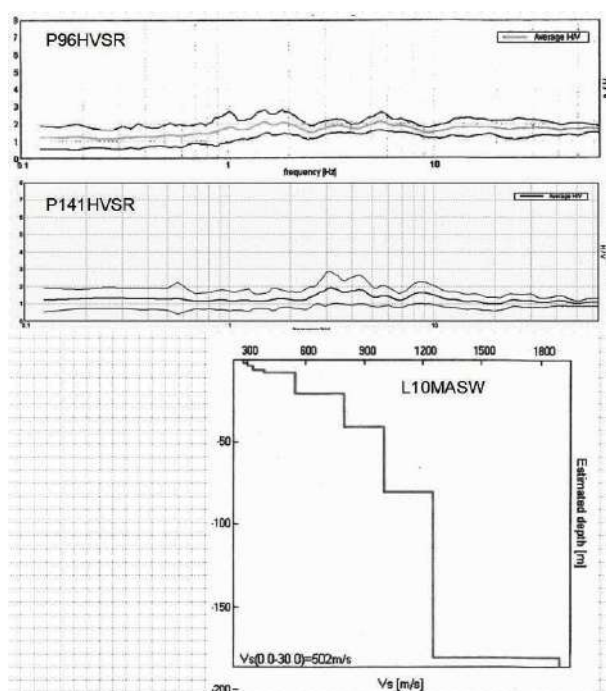


Figura 5.54– Registrazioni HVSR eseguite presso Pian di Balestra

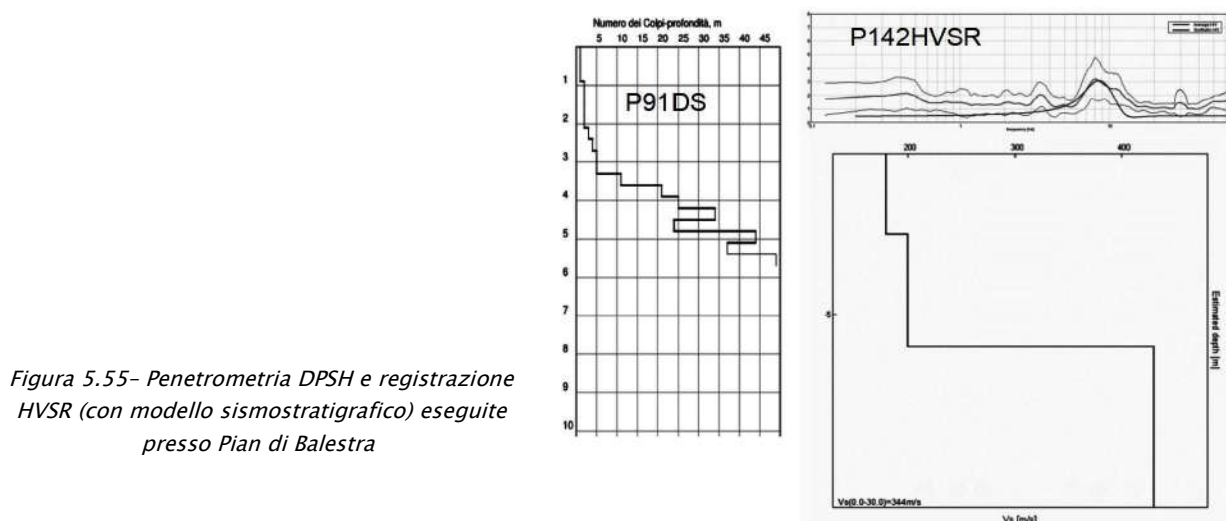


Figura 5.55- Penetrometria DPSH e registrazione HVSR (con modello sismostratigrafico) eseguite presso Pian di Balestra

## 5.16 Ca' dei Borelli

Il toponimo è situato in pendio con rilievi caratterizzati da substrato roccioso con alternanze di livelli lapidei/arenacei e pelitici attribuiti alla Formazione di Monghidoro (MOH). La cartografia geologica RER riporta giaciture eterogenee nella stratificazione del bedrock, evidenziando le significative deformazioni tettoniche che hanno coinvolto il bedrock locale. La cartografia riporta diffuse forme di dissesto di versante e in particolare l'abitato è collocato in depositi di frana per scivolamento in blocco (figura 5.56).

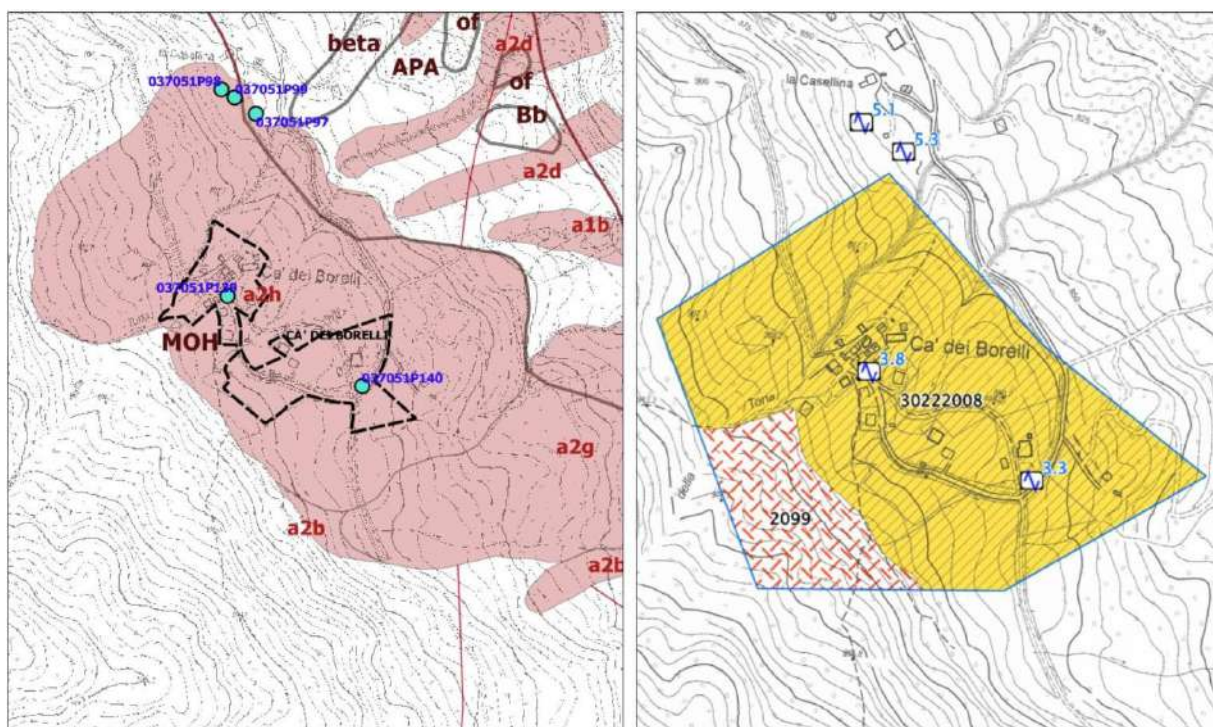
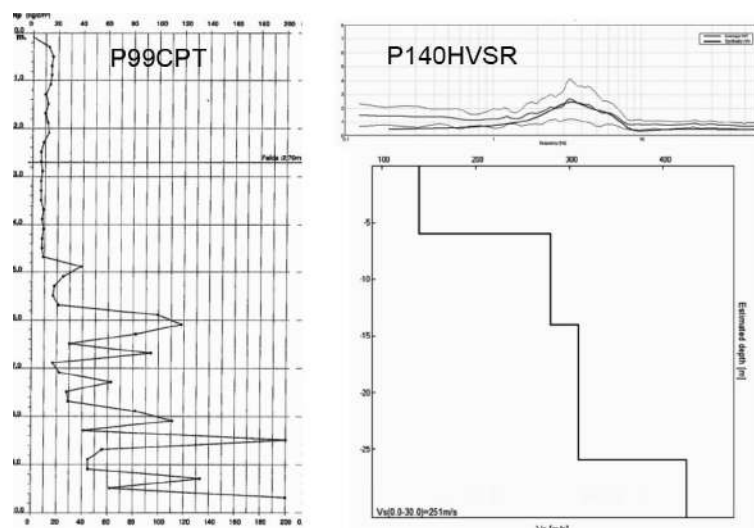


Figura 5.56 – A sx: substrato geologico, coperture quaternarie e discontinuità tettoniche rilevate. Si riportano le prove geognostiche/geofisiche di riferimento. A dx: delimitazione delle zone MOPS

Per questo areale di studio sono disponibili prove penetrometriche CPT e registrazioni HVSR. I dati delle prove CPT evidenziano coperture fino a circa 10 metri, tuttavia le registrazioni HVSR riscontrano amplificazioni spettrali significative anche a frequenze medie ( $3,3 \div 3,8$  Hz) con modellazioni sismostratigrafiche che indicano coperture amplificabili fino a  $25 \div 27$  metri con  $V_s$  equivalente approssimabile a 250 m/s (figura 5.57).

*Figura 5.57- Penetrometria CPT e registrazione HVSR (con modello sismostratigrafico) eseguite presso Ca' dei Borelli*





## 6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

Nel presente capitolo vengono esaminate le principali scelte effettuate a scopo interpretativo, riprendendo quanto già esposto per delineare la struttura dello studio di MS di livello 2 e proseguendo con l'esposizione del percorso logico seguito per gli ulteriori approfondimenti di livello 3, videnziandone le ragioni e gli elementi a sostegno, ma cercando anche di valutarne le inevitabili incertezze e le eventuali criticità.

### 6.1 Frequenze naturali dei terreni

A supporto dello studio di MS di livello 2 (OCDPC 344/2018) sono state complessivamente raccolte e/o realizzate 77 misure di rumore ambientale (microtremore a stazione singola). Per gli approfondimenti di “livello 3” sono state realizzate altre 8 registrazioni associate alle indagini geognostiche e alle altre indagini geosifiche eseguite. In generale tali misure hanno permesso di accertare la presenza o l'assenza di contrasti di impedenza nei terreni indagati, consentendo un'ulteriore la verifica delle determinazioni già fatte nello studio di “livello 2”.

Negli ambiti montani, tali misurazioni, correlate con dati stratigrafici o misure di Vs, hanno permesso spesso di associare i picchi principali di H/V alla profondità del contatto tra i depositi terrazzati e di versante con il substrato, in genere sempre alterato nei primi metri.

Questo per la ragione principale che l'ampiezza di tali picchi, talvolta assai pronunciata, è direttamente legata alla differenza di velocità degli strati. La <<carta delle frequenze naturali dei terreni>>. prevista dalla DGR 476/2021, evidenzia quanto sopra descritto e riporta tutti i punti di misura di rumore ambientale realizzati a supporto del presente studio e di archivio.

### 6.2 Substrato sismico e coperture

Le indagini geofisiche disponibili ed eseguite per la MS di “livello 2” e per gli ulteriori approfondimenti di “livello 3” (OCDPC 532/2018) hanno evidenziato un substrato roccioso eterogeneo in termini di litotipi e frequentemente caratterizzato da spessori superficiali di alterazione. Negli areali studiati di San Benedetto Val di Sambro, il bedrock marino è inoltre sempre risultato “non rigido” e sono dunque sempre attesi effetti di amplificazione anche in presenza di limitati spessori di coperture, poiché tali successioni, sebbene costituiscano il substrato, sono tutte caratterizzate da velocità di propagazione delle onde di taglio S relativamente basse (in genere Vs compresa tra 400 e 500 m/s).

Il confronto fra i risultati della campagna di misure di microtremore HVSr e i dati derivati dalle indagini geognostiche e geofisiche eseguite negli ambiti di studio hanno spesso permesso di correlare le frequenze naturali dei terreni misurate con i dati stratigrafici a conferma di quanto sopra descritto. In particolare, i picchi spettrali H/V a frequenze medio-alte sono stati in genere ben correlati al contrasto di impedenza presente tra coperture più “soffici” e substrato, più o

meno alterato e tuttavia in grado di indurre contrasti di impedenza a volte anche marcati ( $H/V > 3,0$ ).

### 6.3 Ulteriori considerazioni sugli approfondimenti di “livello 3”

Il territorio di San Benedetto Val di Sambro è caratterizzato da versanti con un'estesa presenza di movimenti franosi che hanno interessato prevalentemente le coperture di versante in s.s. e in altri casi anche il substrato marino più alterato (es. frane per scivolamento in blocco). Gli approfondimenti di “livello 3” hanno dunque consentito di elaborare modellazioni numeriche bidimensionali della RSL per appurare l'entità delle differenze laterali dell'amplificazione e di effettuare simulazioni di stabilità, in condizioni sismiche, in porzioni di versante che comprendono settori di territorio urbano.

In particolare, gli studi si sono concentrati in alcune parti di pendio con depositi quiescenti di frana a SE del Capoluogo, presso la frazione Ripoli e il nucleo abitativo “La Calcinata” (Pian del Voglio).

Ulteriori approfondimenti sismici si sono svolti nel versante di Ripoli–Santa Maria Maddalena, interessato da riattivazioni di un movimento franoso per scivolamento in blocco o DGPV. Come già descritto nel precedente capitolo (par. 5.4), si tratta di un ampio corpo di frana, recentemente riclassificato a seguito degli studi svolti per conto di Autostrade SpA. Gli studi hanno evidenziato lenti scorrimenti progressivi nel substrato roccioso (Formazione di Monghidoro – MOH) a partire da 90 metri di profondità e di carattere prevalentemente duttile (e non fragile). Le indagini disponibili hanno inoltre evidenziato la presenza di coperture più superficiali “soffici” sovrapposte a ulteriori depositi di frana che risultano ben più rigidi, cioè con caratteristiche simostratigrafiche ancora equiparabili all'ammasso roccioso in posto ( $V_s$  medie di 400÷500 m/s).

Anche per quanto riguarda Ripoli–Santa Maria Maddalena, le coperture più superficiali rappresentano una condizione fortemente condizionante la risposta sismica locale. Le coperture più superficiali costituirebbero uno “strato critico” anche per quanto riguarda la stabilità di versante (come confermato dagli studi svolti, con evidenze di sprofondamenti e/o sollevamenti nel pendio che risultano causa o concausa delle lesioni riscontrate in alcuni edifici). Per Ripoli–Santa Maria Maddalena, i dati di sottosuolo disponibili hanno dunque permesso di svolgere modellazioni numeriche bidimensionali della RSL e ulteriori verifiche di stabilità del pendio in condizioni sismiche che, tuttavia, vista la complessità del versante, si sono basate su algoritmi di calcolo e dati di input esaustivi per simulazioni su “pendii in terra”, per consentire lo svolgimento di verifiche considerando la possibilità di scivolamenti poco profondi per rotture di taglio e spostamenti cosismici negli strati più superficiali.

## 7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI (MS LIVELLO 1-2)

### 7.1 Cenni introduttivi

Il fine ultimo dello studio di microzonazione sismica di “livello 2” è quello di consentire una suddivisione del territorio indagato in:

- zone “stabili”
- zone “stabili suscettibili di amplificazione” → a loro volta suddivise in aree a diverso grado di amplificazione da quantificare con analisi semplificate (abachi)
- zone “di attenzione” → a loro volta suddivise per tipologia di instabilità, con stima della pericolosità da ricavare in termini quantitativi (ulteriori analisi di livello 3)

Come riportato nelle note introduttive degli standard di MS (v.4.2), i risultati degli studi sono fondamentalmente riconducibili alla carta delle MOPS (microzone omogenee in prospettiva sismica) e alla cartografia di MS (microzonazione sismica).

Occorre rammentare che la carta delle MOPS è riferita unicamente al “livello 1” di approfondimento e perciò le zone individuate hanno approfondimenti esclusivamente di tipo qualitativo. La cartografia di MS può avere sia zone con approfondimenti di “livello 2”, sia zone con approfondimenti di “livello 3”.

Per il Comune di San Benedetto Val di Sambro, lo studio sismico di livello 2 (MS OCDPC 344/2016) ha permesso di valutare i fattori di amplificazione sismica semplificata delle MOPS individuate per gli areali di studio. La stima dell'amplificazione si è basata sul modello di sottosuolo locale valutato per le aree studiate (cfr capitolo 5). Occorre tuttavia precisare che questo successivo studio di MS, espletato ai sensi dell'OCDPC 532/2018, ha consentito un ulteriore aggiornamento dei fattori di amplificazione che sono stati quantificati considerando gli abachi predisposti dalla Regione Emilia-Romagna e riportati nella DGR 476/2021 (Allegato A2), sempre riferiti a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche e che tengono conto delle caratteristiche litologiche e morfologiche e della profondità del bedrock sismico.

I paragrafi del presente capitolo illustrano i risultati dello studio e le metodologie di elaborazione utilizzate per determinare i diversi fattori di amplificazione sul territorio e per identificare le zone di attenzione per instabilità.

### 7.2 I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS e il livello di approfondimento delle MOPS

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, sono stati calcolati i fattori di amplificazione di ogni zona studiata. I fattori di amplificazione indicati nella DGR regionale n. 630/2019 sono calcolati per un tempo di ritorno dell'evento sismico pari a  $T_r = 475$  (con smorzamento  $\zeta = 5\%$ ) e si riferiscono a:



- FA PGA → rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione ricavata alla superficie del deposito e ricavata sull'affioramento “rigido” ( $PGA/PGA_0$ ). Il fattore di amplificazione dipende dalla frequenza di eccitazione armonica, dal fattore di smorzamento D e dal rapporto tra l'impedenza sismica, prodotto tra densità-velocità, della roccia base e quella del deposito;
- FA SA – Rapporto dell'intensità spettrale in accelerazione ricavata alla superficie del deposito e ricavata sull'affioramento “rigido”. I fattori di amplificazione calcolati si riferiscono ai quattro seguenti intervalli di integrazione del periodo proprio T:
  - SA1 → 0,1s–0,5s [ $FA_{01-05s}$ ]
  - SA2 → 0,4s–0,8s [ $FA_{04-08s}$ ]
  - SA3 → 0,7s–1,1s [ $FA_{04-11s}$ ]
  - SA4 → 0,5s–1,5s [ $FA_{05-15s}$ ] solo per le aree di pianura/costa
- FA SI – Intensità spettrale di Housner → indicatore della pericolosità sismica, definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità per determinati periodi dello scuotimento. Nel nostro caso, si devono determinare i fattori di amplificazione per i tre seguenti intervalli di integrazione del periodo proprio T:
  - SI1 → 0,1s–0,5s [ $FH_{01-05s}$ ]
  - SI2 → 0,5s–1,0s [ $FH_{05-10s}$ ]
  - SI3 → 0,5s–1,5s [ $FH_{05-15s}$ ] solo per le aree di pianura/costa

## 7.3 Calcolo dei fattori di amplificazione con approccio semplificato

### 7.3.1 Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

Il calcolo dei fattori di amplificazione ha interessato le aree urbanizzate/urbanizzabili, i principali nuclei abitati sparsi e un'opportuna fascia di territorio adiacente.

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, nello studio di microzonazione sismica di livello 2, i fattori di amplificazione vengono calcolati con approccio semplificati mediante l'utilizzo di abachi. In tal senso, si sono utilizzati gli abachi di riferimento per gli studi di MS in Emilia-Romagna (DGR 476/2021), sulla base delle differenti caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo ritenute importanti dal punto di vista della risposta sismica locale (cfr. capitolo 5).

La seguente tabella 7.1 riporta la sintesi riepilogativa dei fattori di amplificazione (FA) riferibili alle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS). Per maggior chiarezza, vengono indicati i FA delle zone MOPS che interessano gli areali di studio. Si riportano i parametri (spessori; VsH; VS30) necessari per il calcolo dei FA.

Si precisa che tutte le MOPS sono attribuite al macrocontesto “Appennino\*” (Allegato A2 DGR 476/2021) e si è considerato un substrato sismico “non rigido”, come spiegato nei precedenti

capitoli.

Tabella 7.1 Montecuto Vallesse e San Rocco

ZONA (MOPS)	LOCALITA'	VS/SPESSORI	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SI1	SI2	NOTE
2099	Territorio vasto (crinale)	VSH10=250	2,0	1,9	1,5	1,4	1,9	1,4	In zone di cresta sono stati ulteriormente calcolati FA topografici (da 1,1 a 1,2)

Tabella 7.2 Ripoli

ZONA (MOPS)	LOCALITA'	VS/SPESSORI	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SI1	SI2	NOTE
2005	Aree sparse	VSH10=250	2,0	1,9	1,5	1,4	1,9	1,4	In zone di versante sono stati ulteriormente calcolati FA topografici (da 1,1 a 1,2)
2099	Zona di versante	VS30=400	1,8	1,7	1,6	1,4	1,7	1,5	

Tabella 7.3 Santa Maria Maddalena

ZONA (MOPS)	LOCALITA'	VS/SPESSORI	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SI1	SI2	NOTE
2002	Fondovalle Setta sud	VSH5=250	1,6	1,5	1,4	1,3	1,5	1,4	
2003	Fondovalle Setta nord	VSH10=250	2,0	1,9	1,5	1,4	1,9	1,4	
2099	Serrucce	VSH5=250	1,6	1,5	1,4	1,3	1,5	1,4	

Tabella 7.4 Sant'Andrea

ZONA (MOPS)	LOCALITA'	VS/SPESSORI	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SI1	SI2	NOTE
2099	Territorio vasto	VSH5=200	2,0	1,8	1,4	1,3	1,7	1,4	

Tabella 7.5 Molino Nuovo e San Martino

ZONA (MOPS)	LOCALITA'	VS/SPESSORI	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SI1	SI2	NOTE
2002	Fondovalle Sambro	VSH5=250	1,6	1,5	1,4	1,3	1,5	1,4	
2099	Versante Molino Nuovo - San Martino	VSH5=250	1,6	1,5	1,4	1,3	1,5	1,4	

Tabella 7.6 Capoluogo

ZONA (MOPS)	LOCALITA'	VS/SPESSORI	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SI1	SI2	NOTE
2005	Via Belvedere	VSH10=200	2,2	2,3	1,8	1,5	2,3	1,6	
2006	Zona campo sportivo e scuole	VSH10=200	2,2	2,3	1,8	1,5	2,3	1,6	
2099	Territorio vasto	VSH10=250	2,0	1,9	1,5	1,4	1,9	1,4	In zone di cresta sono stati ulteriormente calcolati FA topografici (da 1,1 a 1,2)

Tabella 7.7 Villa Cedrecchia

ZONA (MOPS)	LOCALITA'	VS/SPESSORI	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SI1	SI2	NOTE
2099	Aree sparse	VS30=450	1,6	1,6	1,5	1,3	1,6	1,4	

Tabella 7.8 Cedrecchia

ZONA (MOPS)	LOCALITA'	VS/SPESSORI	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SI1	SI2	NOTE
2099	Territorio vasto	VSH10=200	2,2	2,3	1,8	1,5	2,3	1,6	In zone di cucuzzolo sono stati ulteriormente calcolati FA topografici (da 1,1 a 1,4)
	Cucuzzolo	VS30=400	1,8	1,7	1,6	1,4	1,7	1,5	

Tabella 7.9 Madonna dei Fornelli e Zaccanesca

ZONA (MOPS)	LOCALITA'	VS/SPESSORI	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SI1	SI2	NOTE
2099	Crinale Madonna dei Fornelli	VS30=400	1,8	1,7	1,6	1,4	1,7	1,5	In zone di cresta sono stati ulteriormente calcolati FA topografici (1,1)
	Territorio vasto Madonna dei Fornelli - Zaccanesca	VSH5=200	2,0	1,8	1,4	1,3	1,7	1,4	

Tabella 7.10 Qualto

ZONA (MOPS)	LOCALITA'	VS/SPESSORI	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SI1	SI2	NOTE
2099	Territorio vasto	VSH10=250	2,0	1,9	1,5	1,4	1,9	1,4	

Tabella 7.11 Montefredente – Il Borgo – Il Faldo – La Capanna

ZONA (MOPS)	LOCALITA'	VS/SPESSORI	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SI1	SI2	NOTE
2005	Versante ovest Montefredente	VSH10=200	2,2	2,3	1,8	1,5	2,3	1,6	
2099	La Capanna (crinale)	VSH5=200	2,0	1,8	1,4	1,3	1,7	1,4	In zone di cresta sono stati ulteriormente calcolati FA topografici (da 1,1 a 1,2)
	Montefredente	VSH10=200	2,2	2,3	1,8	1,5	2,3	1,6	
	Il Borgo (crinale)	VS30=350	1,9	1,9	1,7	1,4	1,9	1,5	

Tabella 7.12 Castel dell'Alpi – Cà dei Falchetti

ZONA (MOPS)	LOCALITA'	VS/SPESSORI	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SI1	SI2	NOTE
2001	Castel dell'Alpi	VS30=400	1,8	1,7	1,6	1,4	1,7	1,5	
2099	Cà dei Falchetti	VSH15=250	2,1	2,2	1,9	1,5	2,3	1,6	
	Versante sud Castel dell'Alpi	VSH5=150	2,3	2,2	1,6	1,4	2,1	1,4	

Tabella 7.13 Pian del Voglio – Piano delle Ginestre (La Calcinata)

ZONA (MOPS)	LOCALITA'	VS/SPESSORI	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SI1	SI2	NOTE
2099	Pian del Voglio	VSH10=250	2,0	1,9	1,5	1,4	1,9	1,4	
	Versante ovest Pian del Voglio	VSH25=300	2,0	2,2	2,0	1,5	2,3	1,7	
	Piano delle Ginestre	VS30=450	1,6	1,6	1,5	1,3	1,6	1,4	

Tabella 7.14 Pian di Balestra

ZONA (MOPS)	LOCALITA'	VS/SPESSORI	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SI1	SI2	NOTE
2001	Val Serena – Pian di Balestra nord	VS30=500	1,4	1,4	1,4	1,3	1,4	1,4	In zone di versante sono stati ulteriormente calcolati FA topografici (da 1,1 a 1,2)
2004	Pian di Balestra	VSH5=200	2,0	1,8	1,4	1,3	1,7	1,4	



Tabella 7.15 Cà dei Borelli

ZONA (MOPS)	LOCALITA'	VS/SPESSORI	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SI1	SI2	NOTE
2099	Versante	VSH25=250	2,1	2,3	2,7	1,9	2,5	2,3	

### 7.3.2 Zone di attenzione per instabilità

Il calcolo dei fattori di amplificazione ha interessato anche le aree perimetrate come “zone di attenzione per instabilità di versante”, come richiesto negli Standard MS v. 4.2 (CTMS, 2020) della protezione Civile. Tuttavia, sono aree ove vengono richiesti ulteriori approfondimenti (livello 3).

Le aree instabili perimetrate sono desunte dalla cartografia geologica RER (superfici di frana già classificate), dall'Inventario del dissesto RER e dalla cartografia di PSAI – Bacino del Reno. Per quanto riguarda la cartografia di PSAI, lo studio di MS ha dunque considerato sia le aree di dissesto (in gran parte coincidenti con l'inventario del dissesto del SGSS regionale), sia le zone di possibile evoluzione già perimetrate e oggetto di specifica normativa urbanistica.

Per il calcolo dei fattori di amplificazione semplificati (che andranno tuttavia confermati con studi di approfondimento di livello 3), si è dunque considerato il contesto litostratigrafico e sismico locale e stimato lo spessore di sedimento rimaneggiato compatibile con la presunta profondità del piano di taglio/scivolamento della frana.

Più in generale e soprattutto nel caso di frane di modesta estensione, oppure nelle zone di possibile evoluzione del dissesto, si è spesso considerato come intervallo maggiormente amplificabile la profondità delle eventuali coperture e/o il bedrock alterato del circostante versante stabile, visto che il piano di taglio dovrebbe verosimilmente interessare solamente tale spessore. Tuttavia, lo stesso criterio di stima è stato cautelativamente adottato anche per alcune frane di notevole estensione (es. frane di scivolamento in blocco o DGPV; frane complesse con piani di scivolamento profondi; ecc.) e che coinvolgono volumi di roccia molto estesi, spesso senza una chiara localizzazione del vero piano di scorrimento. Dati di sottosuolo disponibili per queste tipologie di frana hanno spesso evidenziato la presenza di coperture più superficiali “soffici” sovrapposte agli ulteriori depositi di frana che risultano ben più rigidi, cioè con caratteristiche simostratigrafiche ancora equiparabili all'ammasso roccioso in posto. Anche in questi casi, le coperture più superficiali rappresentano una condizione fortemente condizionante la risposta sismica locale.

Le frane sono state classificate considerando sia la tipologia di movimento (crollo; colata; scorrimento; ecc.), sia le principali condizioni morfologiche distinguendo, ove possibile, le zone di distacco da quelle di prevalente accumulo. Non si è invece considerato lo stato di attività, di non facile definizione soprattutto in chiave d'analisi sismica: gli eventuali ulteriori approfondimenti riguardanti le condizioni di attivazione/riattivazione del dissesto dovranno infatti basarsi sugli esiti di pericolosità sismica di base e di amplificazione locale derivata dallo studio di microzonazione sismica.

## 7.4 Effetti della topografia: calcolo dei fattori di amplificazione con approccio semplificato

Per gli areali urbanizzati/urbanizzabili, lo studio ha considerato anche gli effetti morfologici dei pendii più acclivi ( $<15^\circ$ ) e in particolare le configurazioni geometriche bidimensionali e tridimensionali (es. cucuzzoli, creste, dorsali allungate) di altezza superiore a 30 metri.

Il calcolo dei fattori di amplificazione topografica è stato espletato secondo quanto indicato negli Indirizzi regionali vigenti (DGR 476/2021) e come schematizzato nella figura 7.1.

In base alla geometria descritta in figura 7.1, il valore del fattore di amplificazione topografica ST è dato dalla seguente relazione:

$ST = 1 + 0,8 \cdot (\alpha - \beta - 0,4)$  sul segmento BC

dove:

$b$  = valore minimo tra  $20\alpha$  e  $(H+10)/4$

$\alpha$  è il gradiente del fronte più ripido e  $\beta$  del fronte meno ripido.

$ST = 1$  in A ( $a = H/3$ )

$St = 1$  in D ( $c = H/4$ )

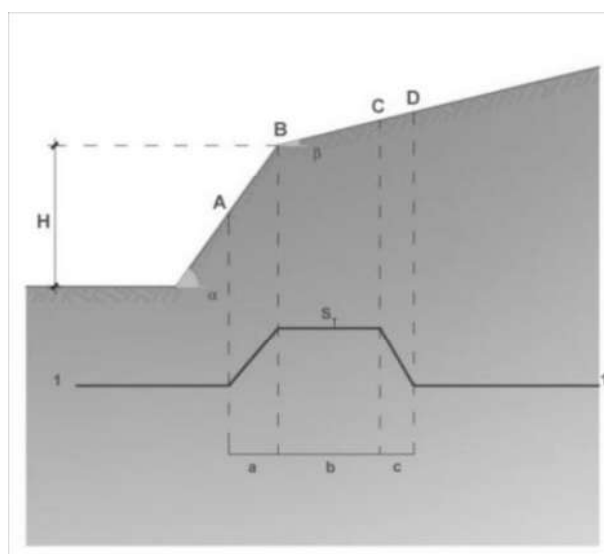
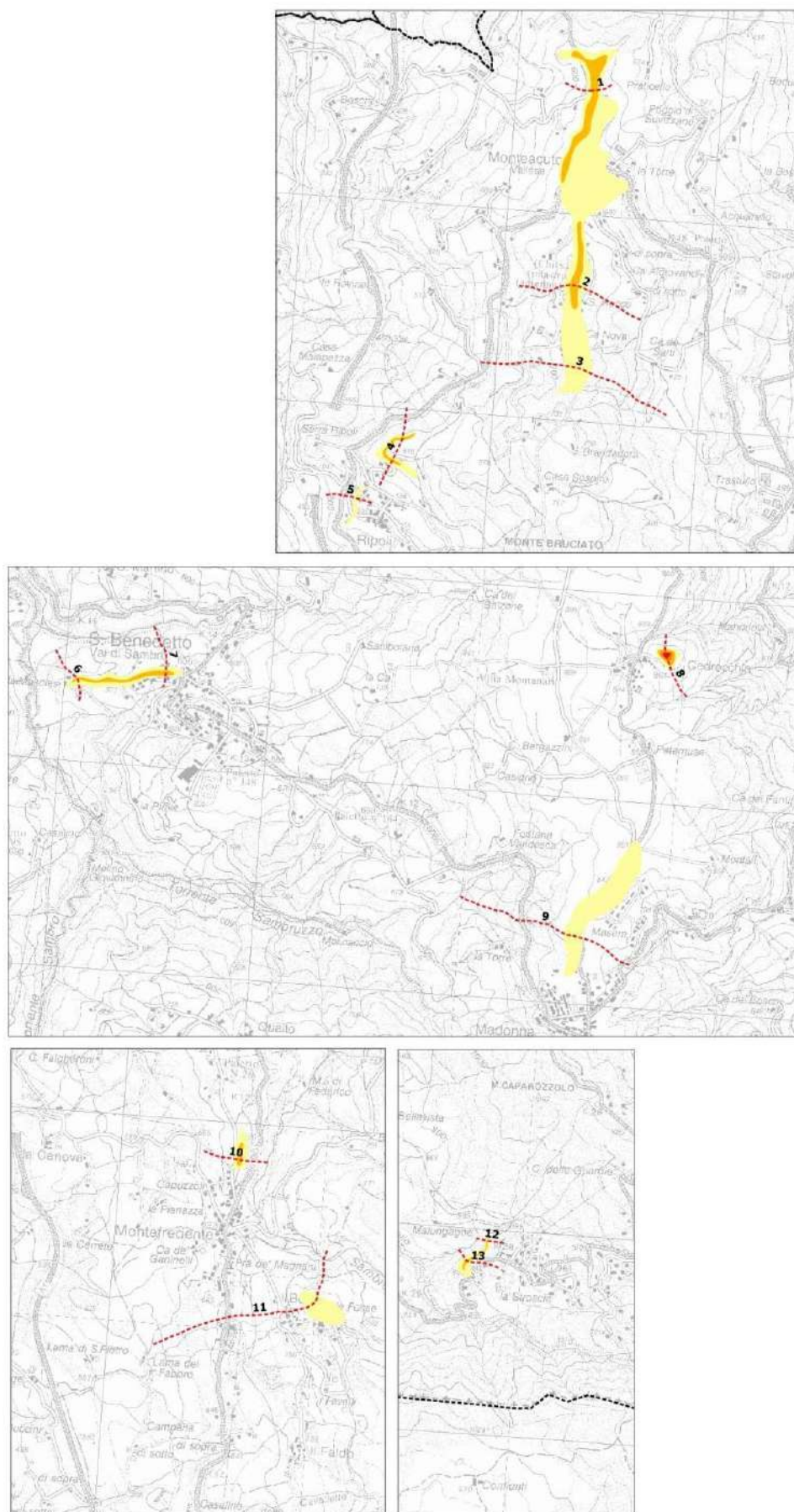


Figura 7.1 - Schema geometrico per il calcolo degli effetti della topografia (cfr. DGR 476/2021)

L'analisi ha dunque richiesto l'elaborazione di sezioni topografiche, rappresentate nella figura 7.2, con sintetizzati gli esiti di calcolo di ST e delle relative aree di influenza. Le tracce sono state elaborate mediante software GIS e base topografica CTR regionale (scala 1:5.000). Nell'Allegato 3 vengono riportate con maggior dettaglio plano-altimetrico le sezioni elaborate e vengono riportati i parametri di calcolo del punto caratterizzato da massima amplificazione topografica.

Le analisi morfologiche hanno evidenziato possibilità di amplificazione topografica in settori del principale crinale presso gli abitati di Cedrecchia, Montecuto Vallese, Montefredente, Ripoli, San Benedetto Val di Sambro e ulteriori località. Occorre precisare che in alcuni casi le aree di interferenza sono state estrapolate in modo più cautelativo, cioè comprendendo l'intera cresta e/o cucuzzolo, in ragione del contesto morfologico riscontrabile. Gli esiti di ST sono dunque compresi tra 1,1 e 1,4.



*Figura 7.2 –  
Localizzazione delle  
sezioni topografiche di  
riferimento e  
delimitazione delle zone  
di amplificazione ST  
calcolate*



## 7.5 Calcolo dei valori di “Hazard” ( $H_{SM}$ )

Questo ulteriore aggiornamento della MS ha consentito di calcolare i valori di  $H_{SM}$  (Naso et al., 2019), parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in  $\text{cm/s}^2$ ), dato dal prodotto del parametro *Acceleration Spectrum Intensity* ( $ASI_{UHS}$ ), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per l'intervallo di periodi  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ , diviso per  $\Delta T$  (in questo caso pari a 0,4s) e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

$$H_{SM} = (ASI_{UHS} / \Delta T) * FA$$

I valori di  $ASI_{UHS} / \Delta T$

sono stati calcolati considerando il punto centroide della zona considerata e i punti della griglia INGV (con dati già disponibili nella pagina web dedicata agli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica a cura del SGSS).

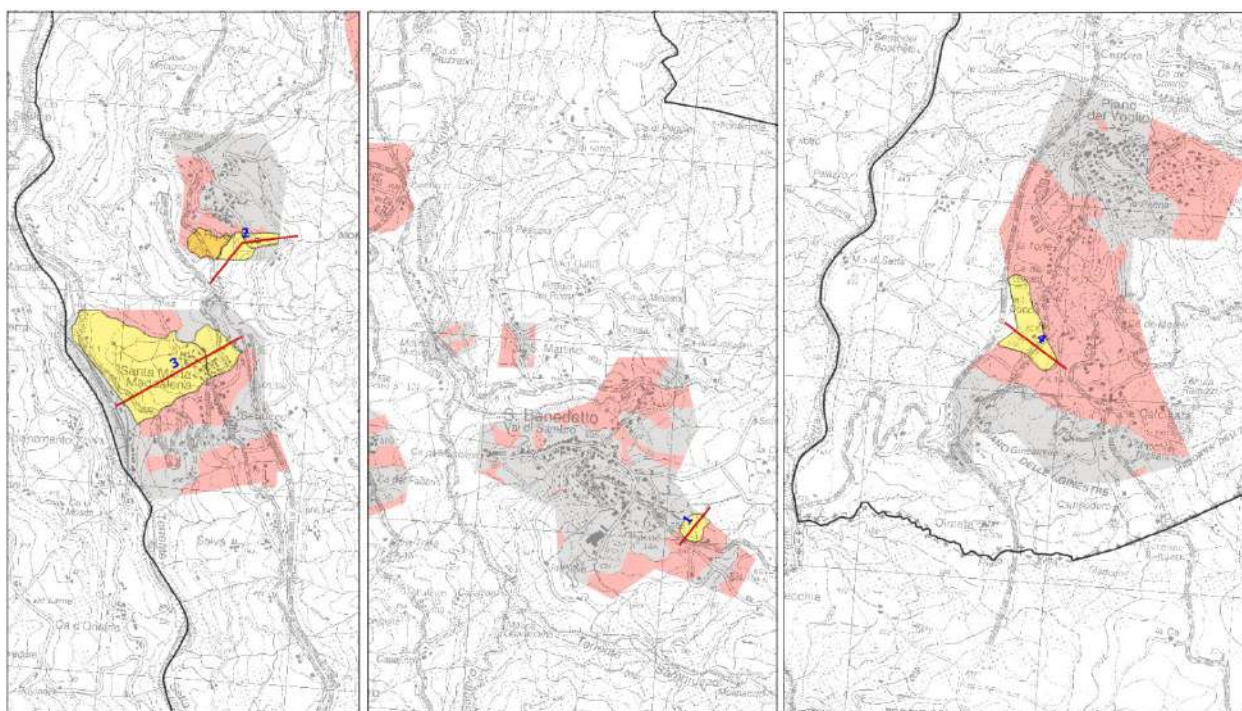
Le elaborazioni evidenziano valori tendenzialmente più alti negli areali caratterizzati da coperture sovrastanti il substrato roccioso, cioè con un contributo importante all'esito di  $H_{SM}$  indotto da fattori di amplificazione più elevati.

## 8 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI (MS LIVELLO 3)

### 8.1 Cenni introduttivi sugli approfondimenti svolti

Gli approfondimenti di “livello 3” svolti ai sensi dell'OCDPC 532/2018 hanno interessato alcuni settori di versante caratterizzati da potenziale instabilità di versante in caso di sisma. Si tratta, infatti di areali classificati come “frane quiescenti complesse” oppure “frane quiescenti per scivolamento” e che coinvolgono terreni situati nel territorio urbanizzato del Capoluogo e nel pendio a NO del toponimo “La Calcinata” (Pian del Voglio), comprendente un'area di emergenza desunta dal Piano di Protezione Civile comunale.

Ulteriori approfondimenti sismici si sono svolti nel versante di Ripoli-Santa Maria Maddalena, interessato da riattivazioni di un movimento franoso per scivolamento in blocco o DGPV che coinvolge volumi di roccia molto estesi. Come già precedentemente descritto (vedi paragrafo 5.4), per questa parte di versante i dati di sottosuolo disponibili hanno consentito di svolgere modellazioni numeriche bidimensionali della RSL e ulteriori verifiche di stabilità del pendio in condizioni sismiche che, tuttavia, hanno considerato esclusivamente la possibilità di scivolamenti poco profondi per rotture di taglio e spostamenti cosismici negli strati più superficiali.



*Figura 8.1 – Zone di attenzione per instabilità di versante interessate dagli approfondimenti sismici di “livello 3” (in evidenziato giallo). Si riportano anche le tracce delle sezioni sismostratigrafiche e geotecniche elaborate a supporto degli approfondimenti*

Come già descritto, in queste zone si sono concentrate le ulteriori indagini geognostiche/geofisiche e di laboratorio eseguite per questo studio, permettendo un ulteriore

raffinamento dello stato conoscitivo sismostratigrafico e geotecnico dei terreni di interesse. La figura 8.1 offre un'individuazione delle aree interessate dagli approfondimenti. Come vedremo, ai fini della necessaria caratterizzazione delle aree di interesse sono state elaborate quattro nuove sezioni sismostratigrafiche e geotecniche, anch'esse riportate nella figura 8.1.

Gli approfondimenti svolti hanno dunque permesso di elaborare modelli numerici bidimensionali della RSL e di espletare verifiche di stabilità in condizioni sismiche dei versanti di interesse, con stima degli spostamenti cosismici (anch'essi quantificati sulla base dei risultati della risposta sismica locale).

## **8.2 Calcolo dei fattori di amplificazione con modelli numerici bidimensionali della RSL**

### *8.2.1 Cenni metodologici*

Sulla base della caratterizzazione sismostratigrafica già descritta nel capitolo 5, è proceduto all'elaborazione di cinque analisi numeriche della risposta sismica locale di tipo bidimensionale per quantificare la RSL lungo le corrispondenti sezioni sismostratigrafiche, nonché per valutare eventuali effetti di amplificazione considerando la variabilità delle condizioni di contorno (morfologia di superficie; stratigrafia e morfologia sepolta). Le elaborazioni numeriche sono state eseguite con l'utilizzo del codice di calcolo LSR2D, software che consente di effettuare un'analisi di risposta sismica locale di tipo bidimensionale, lineare equivalente, con il metodo agli elementi finiti.

Si rammenta che il modello lineare equivalente studia il comportamento tra tensione e deformazione del terreno basandosi sul modello di Kelvin-Voigt e la strategia implementata nel processamento di calcolo consiste sostanzialmente nel fare riferimento alle soluzioni visco-elastiche lineari per la propagazione delle onde sismiche adeguando in modo iterativo i parametri costitutivi in funzione del livello deformativo indotto dal moto sismico nel terreno. La risposta non lineare del terreno tramite il modello viscoelastico-lineare equivalente viene riassunta attraverso le curve di riduzione del modulo di taglio e di incremento del rapporto di smorzamento. Ciò rappresenta un adeguato compromesso tra semplificazione delle analisi ed accuratezza dei risultati.



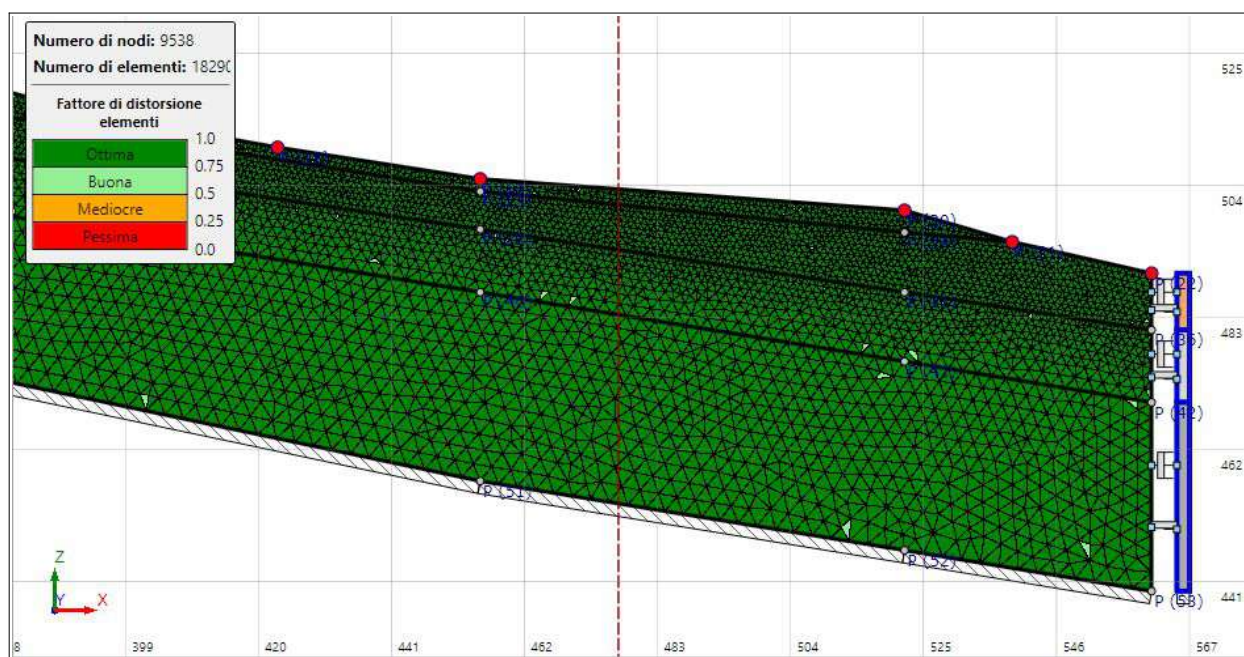


Figura 8.2 – Mesh generate attraverso il codice di calcolo LSR2D (riproduzione parziale del modello elaborato per Ripoli (“sezione 2”))

L'approccio utilizzato dal software LSR2D, per la soluzione visco-elastica lineare all'interno della modalità di calcolo iterativa, utilizza il metodo degli elementi finiti (FEM). In particolare, gli strati definiti nei modelli sismostratigrafici sono stati discretizzati dal software (in modalità semiautomatica) in “mesh” di elementi finiti piani di forma triangolare, consentendo un'efficace modellazione delle variazioni geometriche così come delle irregolarità della superficie topografica e dei contatti stratigrafici (figura 8.2).

Il software LSR2D consente di gestire le condizioni al contorno imposte sui modelli e in particolare si sono imposte condizioni di free field ai lati delle sezioni mediante vincoli cinematici che impediscono gli spostamenti verticali dei nodi di bordo e smorzatori viscosi alla base del modello, in modo da tenere conto della presenza del substrato sottostante.

Il software LSR2D è in grado di eseguire una sequenza di analisi lineari complete, con l'aggiornamento successivo dei parametri di rigidità e smorzamento in funzione delle caratteristiche della colonna litologica. Il risultato della procedura iterativa di calcolo della RSL è altro che la storia temporale di accelerazione, velocità e spostamento di ogni grado di libertà del modello FEM. Il processo di analisi che si è seguito può essere così schematizzato:

- scelta degli input sismici (accelerogrammi) di riferimento;
- definizione del modello sismostratigrafico locale;
- elaborazione degli accelerogrammi di output, degli spettri di risposta elastici e dei fattori di amplificazione indicati dalla DGR 476/2021.

### 8.2.2 Dati di input

Dalla piattaforma WebGIS all'indirizzo <http://egeos-test.eucentre.it/rer/home.html> è possibile scaricare gli input sismici (accelerogrammi) su sito rigido selezionati per ciascun nodo del reticolo di riferimento considerato dalle NTC vigenti, interno al territorio della Regione Emilia-Romagna. La figura 8.3 individua i nodi del reticolo di riferimento per gli approfondimenti svolti a San Benedetto Val di Sambro.

Ai sensi della DGR 476/2021, l'input sismico è definito da un gruppo di 7 accelerogrammi reali, registrati su roccia, spettro-compatibili in media agli spettri di normativa definiti nelle NTC vigenti, per periodi di ritorno di 475 anni.

La seguente tabella 8.1 contiene le informazioni sui tre set di accelerogrammi selezionati e riferiti e riferiti al nodo più vicino agli areali oggetto di approfondimenti e più in particolare riporta: magnitudo ( $M_w$ ) dell'evento che ha generato l'accelerogramma; distanza epicentrale (km) alla quale è avvenuta la registrazione; fattore di scala rispetto all'accelerogramma originario, nome della banca-dati alla quale appartiene l'input originario; nome dell'accelerogramma all'interno della banca-dati. I tre set di accelerogrammi sono stati dunque utilizzati per le seguenti analisi numeriche bidimensionali:

- set "TR475\_ID18060" → modello "sezione2" (Ripoli)
- set "TR475\_ID18061" → modelli "sezione 1" (Capoluogo) e "sezione 3" (Santa Maria Maddalena)
- set "TR475\_ID18282" → modello "sezione4" (Pian del Voglio)

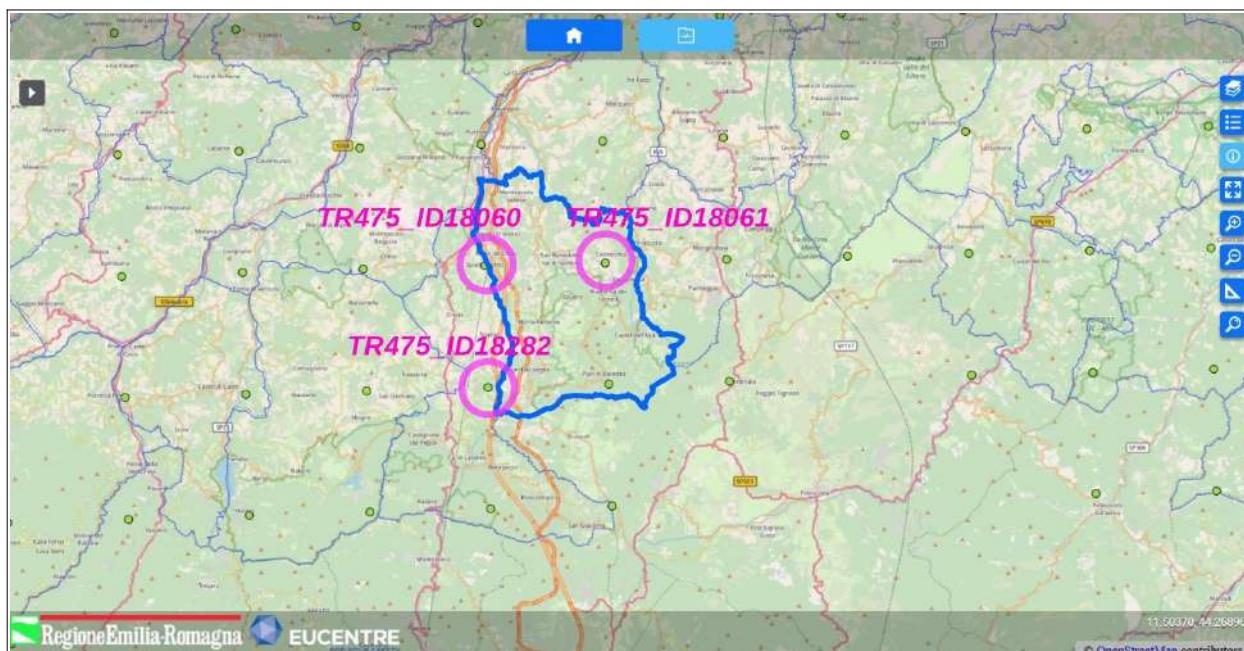


Figura 8.3 – Localizzazione dei nodi del reticolo di riferimento per gli input sismici di San Benedetto Val di Sambro. Nel cerchiato fucsia sono evidenziati i nodi utili per lo studio di MS

**TR475\_ID18060**

Progr.	Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.2	29.9	2.28%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.50%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	5.99	54.21	2.82%	NGA	RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2
CDC(4)	6.93	83.53	1.66%	NGA	RSN804_LOMAP_SSF205.AT2
CDC(5)	6.69	38.07	1.25%	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2
CDC(6)	6.6	31	0.70%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(7)	5.9	14.4	2.97%	ESM	IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC.ASC

**TR475\_ID18061**

Progr.	Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.9	62.9	0.69%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790415.061941.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.51%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	6.93	94.31	1.90%	NGA	RSN797_LOMAP_RIN090.AT2
CDC(4)	6.69	38.07	1.17%	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2
CDC(5)	6.6	31	0.71%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(6)	6.6	62	1.26%	KiKnet	SAGH050503201053.EW2
CDC(7)	6.1	97	1.44%	KiKnet	MYGH041103280724.EW2

**TR475\_ID18282**

Progr.	Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.9	62.9	0.71%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790415.061941.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.54%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	6.93	94.31	1.94%	NGA	RSN797_LOMAP_RIN090.AT2
CDC(4)	6.69	38.07	1.20%	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2
CDC(5)	6.6	31	0.72%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(6)	6.6	62	1.29%	KiKnet	SAGH050503201053.EW2
CDC(7)	6.1	97	1.48%	KiKnet	MYGH041103280724.EW2

Tabella 8.1 – Dati relativi agli accelerogrammi selezionati per le analisi numeriche di RSL (DGR 476/2021)

Gli input accelerometrici sono stati scalati considerando le  $a_{g,ref}$  che caratterizzano gli areali di interesse.

Definiti gli input di scuotimento, il codice di calcolo LSR2D richiede l'inserimento dei modelli sismostratigrafici rappresentativi dell'area di studio. In questo senso, è necessario definire:

- ✓ numero e spessore degli strati di sottosuolo, profondità del bedrock sismico
- ✓ proprietà elastiche per ogni strato ( $V_s$  o modulo di taglio massimo  $G_0$ )
- ✓ leggi di variazione normalizzata di  $G$  e rapporti di smorzamento minimo  $D_0$  per ogni strato

Il successivo passo è dunque quello di definire il bedrock sismico, la stratigrafia e i relativi principali parametri sismici. Come già scritto, il supporto conoscitivo, per quanto riguarda il sottosuolo è fornito dagli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite nell'area di studio e dalle ulteriori indagini di repertorio. Si rimanda al precedente capitolo 5 e ai contenuti dell'allegato 4 (<<Schede modelli numerici della RSL 2D>>).

Per ogni sismostrato, il codice di elaborazione, richiede l'inserimento delle fondamentali proprietà dinamiche del suolo, rappresentate dal fattore di smorzamento  $D$  e dal modulo di rigidezza a taglio  $G$ . Mentre i valori di rigidezza iniziale  $G$  sono stati determinati sulla base delle indagini geofisiche (stima delle  $V_s$ ), le caratteristiche di deformazione a taglio e smorzamento dei sedimenti sottoposti a sollecitazioni impulsive possono essere determinate da prove di laboratorio oppure possono essere adottati modelli disponibili in letteratura, già implementati nel software di calcolo "LSR". Si sono dunque considerati gli esiti



bibliografici delle curve di decadimento EPRI (93) per i sedimenti più profondi (“0÷20 ft”; “20÷50 ft”; “50÷120 ft”) e infine per bedrock “non rigido” (“Average rock”). La seguente figura 8.4 riporta le curve D e G di riferimento per questo studio.

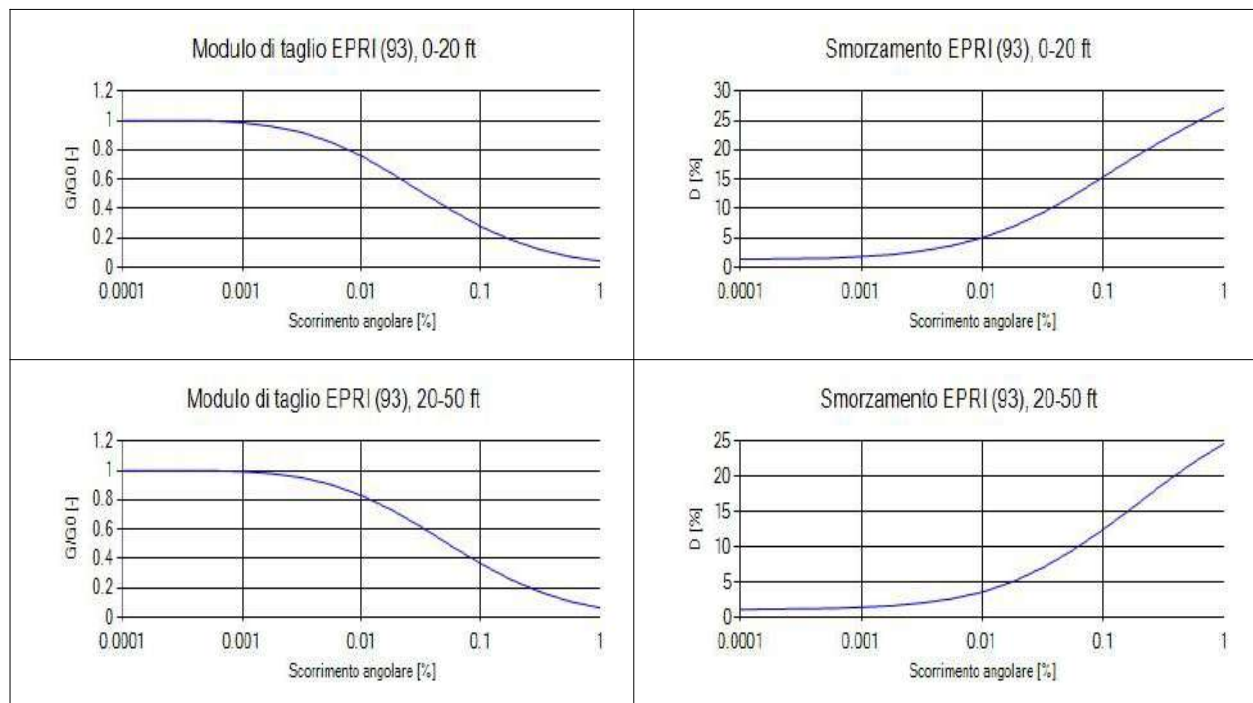


Figura 8.4 – Curve di decadimento dei sedimenti utilizzati per l'analisi numerica di RSL (DGR 476/2021). A sx: moduli di rigidezza a taglio. A dx: smorzamento  $D$

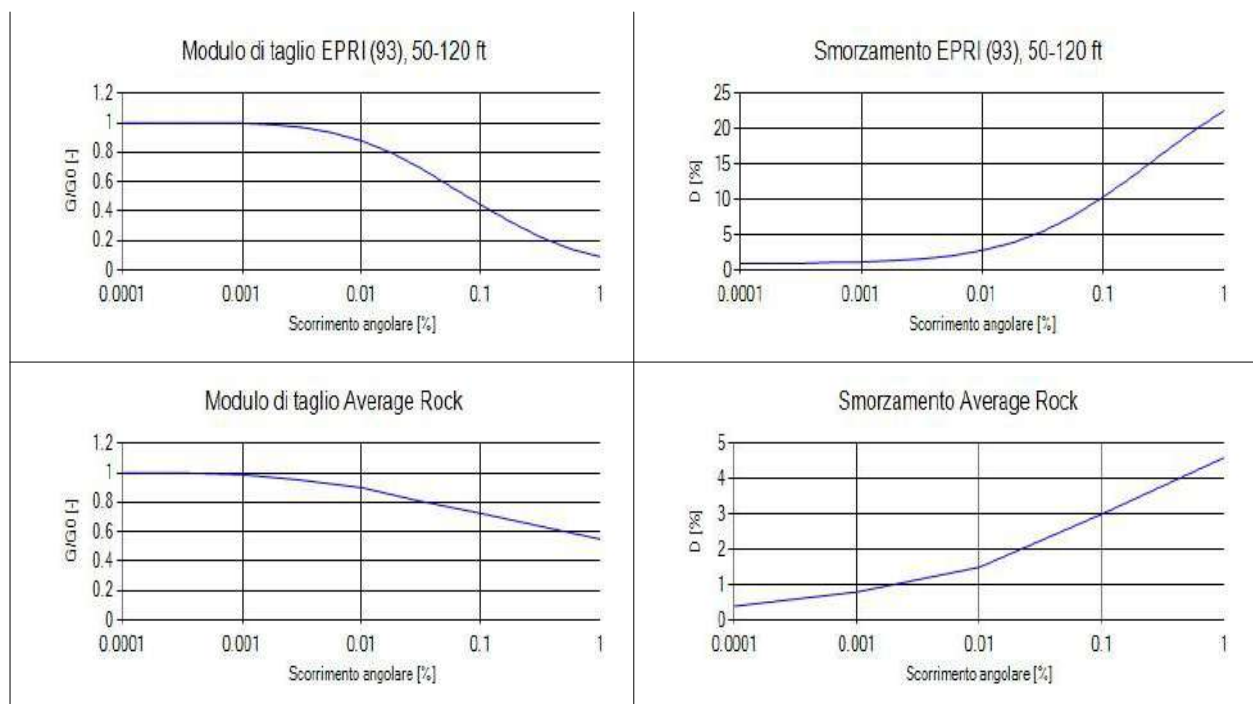


Figura 8.4 (segue) – Curve di decadimento dei sedimenti utilizzati per l'analisi numerica di RSL (DGR 476/2021). A sx: moduli di rigidezza a taglio. A dx: smorzamento  $D$

### 8.2.3 Esiti delle simulazioni numeriche

La risposta sismica locale è stata analizzata lungo tutto il profilo orografico in termini di storie temporali di velocità e accelerazioni. Nella figura 8.5 si è riportato, a titolo di esempio, l'output bidimensionale relativo ai massimi valori di accelerazione ricavati per la “sezione 3” (Santa Maria Maddalena).

Tuttavia, è più interessante monitorare la risposta in superficie in corrispondenza di uno o più punti di controllo in modo da comprendere quelli che sono gli effetti indotti dal sito sull'amplificazione della sorgente sismica. In questo senso, lungo i profili delle quattro sezioni sono stati selezionati punti di controllo sui quali sono state esportate le storie temporali in accelerazione e velocità, gli spettri di risposta e calcolati i fattori di amplificazione (FA).

Si rammenta che i fattori di amplificazione (FA) rappresentano il rapporto fra lo scuotimento sismico valutato per la condizione geolitologica specifica e il corrispondente scuotimento relativo al tetto del bedrock sismicamente rigido. I FA da determinare ai sensi della DGR 476/2021, si riferiscono a una pericolosità che considera un tempo di ritorno del sisma pari a  $TR=475$  anni e con smorzamento  $\zeta=5\%$ . La figura 8.6 riporta, a titolo di esempio, gli esiti di FA ricavati nei punti di controllo relativi alla “sezione 3” di Santa Maria Maddalena. La successiva figura 8.7 rappresenta, invece, i punti di controllo della RSL (con relativi valori di SA4) della medesima sezione.

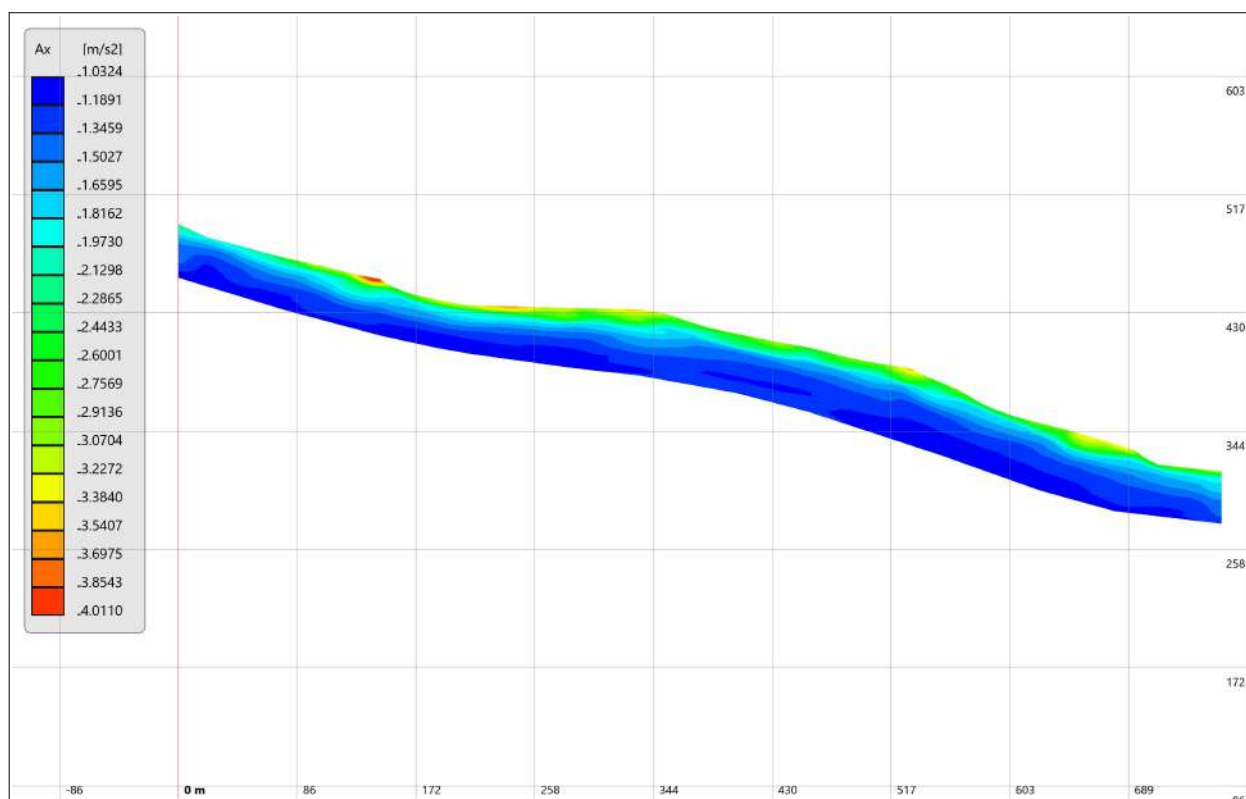


Figura 8.5 – Modellazione numerica della RSL: distribuzione bidimensionale dell'intensità di accelerazione ( $m/s^2$ ) ricavata nella “sezione 3” presso Santa Maria Maddalena

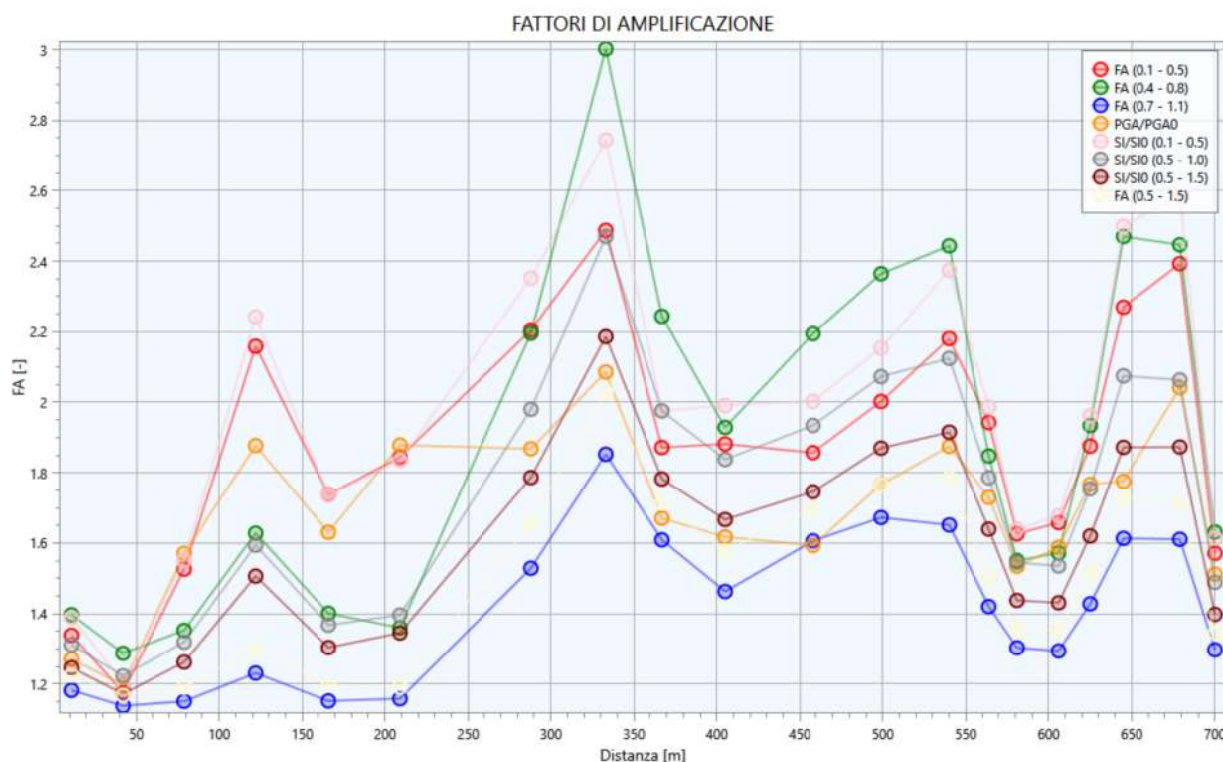


Figura 8.6 - Modellazione numerica della RSL: grafico di sintesi dei fattori di amplificazione (DGR 476/2021) calcolati nei punti di controllo della "sezione 3" presso Santa Maria Maddalena

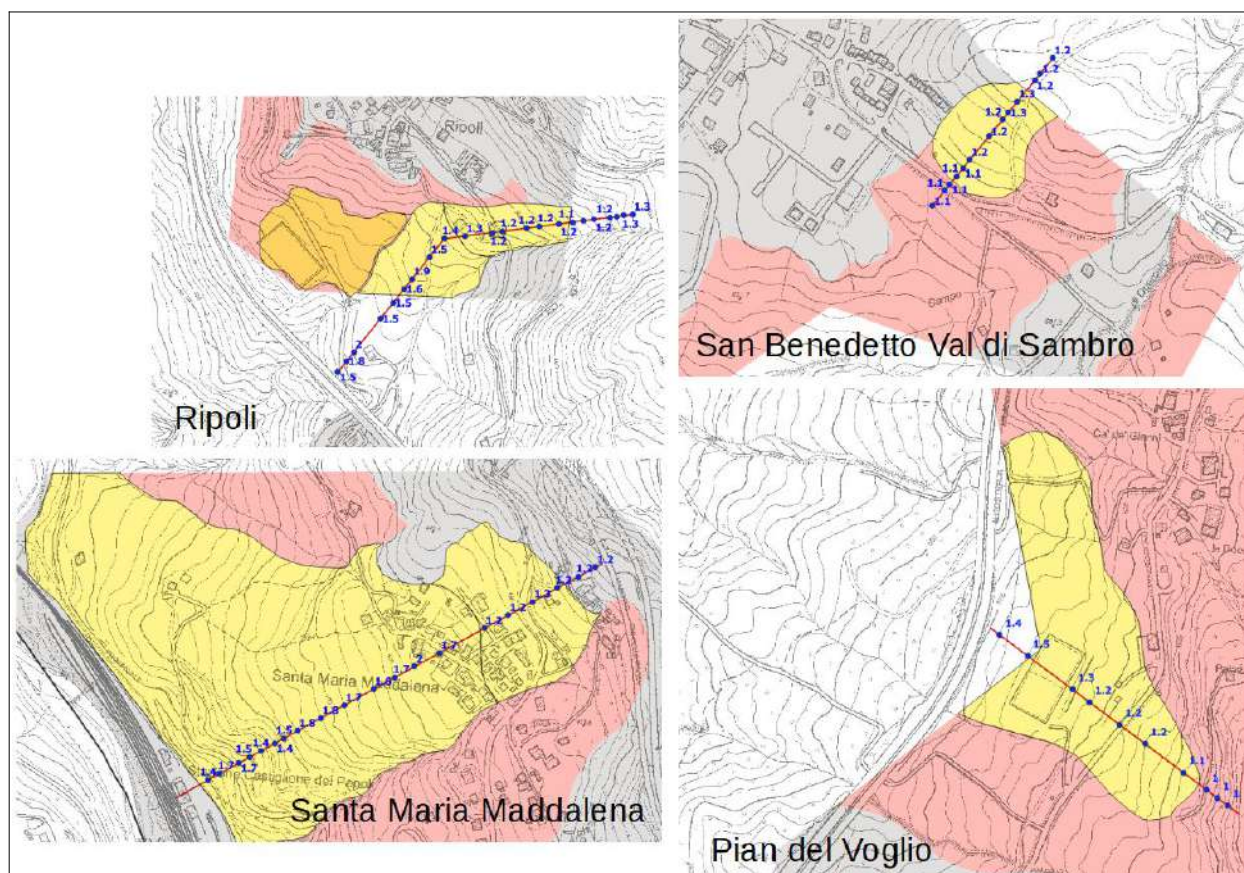


Figura 8.7 - Modellazione numerica della RSL: punti di controllo con riportati i FA relativi all'intervallo 0,5s-1,5s (SA4)



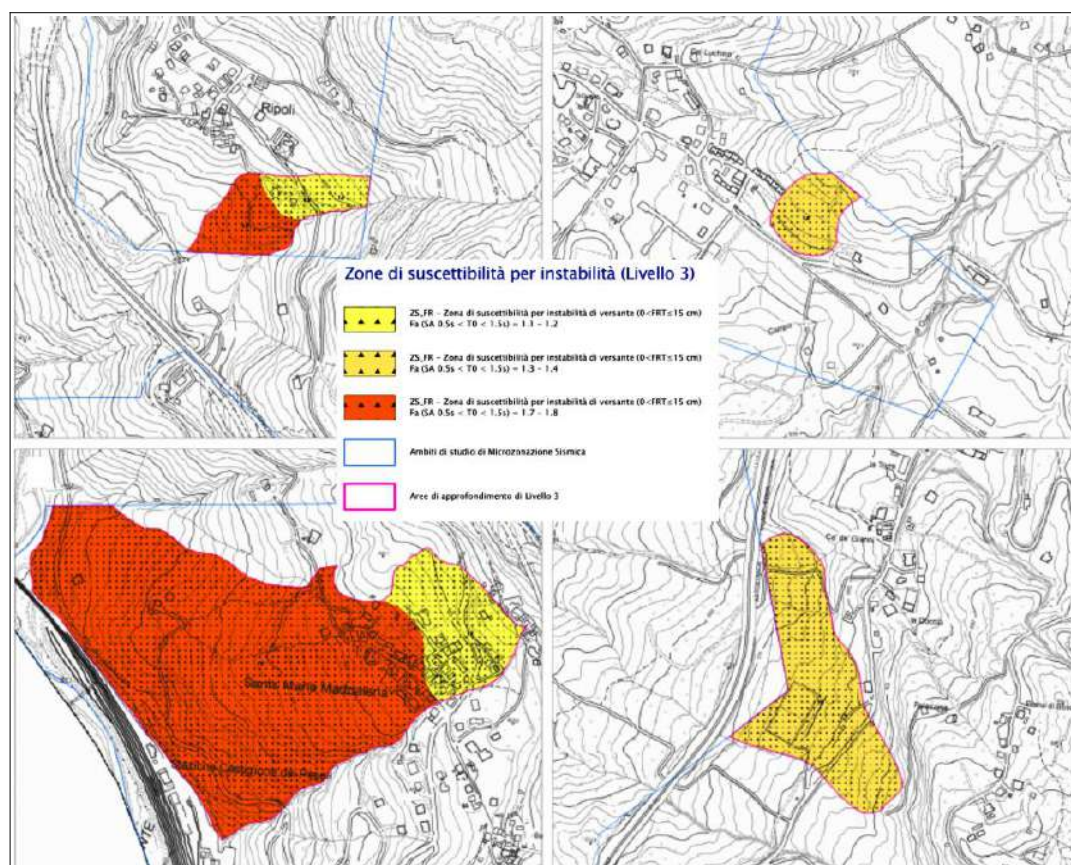


Figura 8.8 – Modellazione numerica della RSL: stralcio della carta di microzonazione sismica livello 3 – FA<sub>0,5-1,5s</sub> (SA4)

Questo studio ha dunque permesso di riquantificare per le “zone di attenzione per instabilità di versante” selezionate i fattori di amplificazione e le modellazioni numeriche della RSL. In questo senso, la figura 8.8 riporta uno stralcio della carta di microzonazione sismica di “livello 3” relativa al FA<sub>0,5-1,5s</sub> (SA4 ai sensi della DGR 476/2021). Occorre precisare che la possibilità di disporre di numerosi punti di controllo ha consentito di attribuire all’areale complessivamente studiato risultati di RSL differenziati e basati sulla media dei valori derivati.

Sulla base dei risultati delle simulazioni di RSL numeriche, si sono dunque prodotte anche le cartografie di MS relative ai fattori di amplificazione SA4 (0,5s–1,5s) e SI3 (0,5s–1,5s) per gli areali oggetto di approfondimenti.

Le seguenti tabelle 8.2–8.3–8.4–8.5 riportano la sintesi dei fattori di amplificazione sismica calcolati dalla RSL numerica e attribuiti agli areali oggetto di approfondimenti.

MOPS	DESCRIZIONE SINTETICA	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3	NOTE
2008	Zona di prevalente accumulo per frana di scorrimento (sezione 1)	2,1	2,2	1,5	1,2	1,3	2,2	1,5	1,4	

Tabella 8.2 – Sintesi dei fattori di amplificazione derivati dalla modellazione numerica della RSL. Si indicano le MOPS e la sezione sismostratigrafica e litotecnica di riferimento (areale presso San Benedetto Val di Sambro)

MOPS	DESCRIZIONE SINTETICA	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3	NOTE
2014	Zona di prevalente accumulo per frana complessa (sezione 2)	2,2	2,2	1,5	1,2	1,2	2,2	1,5	1,4	Comprende un limitato areale di accumulo rimobilizzato più superficiale per frana di scorrimento classificata "attiva" (2008)
2014	Zona di prevalente accumulo per frana complessa (sezione 2)	2,1	2,4	2,3	1,6	1,7	2,6	2,0	1,9	

*Tabella 8.3 – Sintesi dei fattori di amplificazione derivati dalla modellazione numerica della RSL. Si indicano le MOPS e la sezione sismostratigrafica e litotecnica di riferimento (areale presso Ripoli)*

MOPS	DESCRIZIONE SINTETICA	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3	NOTE
2016	Zona di prevalente accumulo per frana di scivolamento in blocco o DGPV (sezione 2 – settore NE )	1,8	1,8	1,5	1,2	1,2	1,8	1,4	1,4	
2016	Zona di prevalente accumulo per frana di scivolamento in blocco o DGPV (sezione 2 – settore SO )	1,8	2,0	2,2	1,5	1,7	2,2	1,9	1,8	

*Tabella 8.4 – Sintesi dei fattori di amplificazione derivati dalla modellazione numerica della RSL. Si indicano le MOPS e la sezione sismostratigrafica e litotecnica di riferimento (areale presso Santa Maria Maddalena)*

MOPS	DESCRIZIONE SINTETICA	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3	NOTE
2014	Zona di prevalente accumulo per frana complessa (sezione 4)	2,0	2,1	1,5	1,2	1,3	2,2	1,5	1,5	

*Tabella 8.5 – Sintesi dei fattori di amplificazione derivati dalla modellazione numerica della RSL. Si indicano le MOPS e la sezione sismostratigrafica e litotecnica di riferimento (areale presso Pian del Voglio)*

Occorre precisare che la variabilità dei fattori di amplificazione è prevalentemente correlabile alla variabilità (anche di pochi metri) degli spessori delle coperture/o della rigidità del sottostante substrato marino più alterato. In minor misura (e poco significativi), si evidenziano limitati incrementi dei FA correlabili alla morfologia superficiale del pendio e che comunque interessano i sedimenti più superficiali (vedi figura 8.5).

## 8.3 Verifiche di stabilità dei pendii in condizioni sismiche

### 8.3.1 Cenni metodologici

Questo studio ha permesso di effettuare verifiche di stabilità in condizioni dinamiche per le parti di versante già interessate dagli approfondimenti della RSL con modellazioni numeriche bidimensionali. Come precedentemente descritto, si tratta di versanti costituiti da corpi di frana quiescenti<sup>5</sup> e che coinvolgono depositi di versante in s.s. e/o substrato roccioso molto alterato,

<sup>5</sup> Ad esclusione di alcune frane "attive", di limitata estensione e profondità, che tuttavia coinvolgono terreni già rimaneggiati/mobilizzati di maggior spessore

investigato da indagini geognostiche (penetrometrie dinamiche e statiche; sondaggi a carotaggio continuo con prelievo di campioni; ecc.). Verifiche di stabilità hanno tuttavia interessato anche il versante presso le frazioni Ripoli – Santa Maria Maddalena e in particolare il pendio formato dal movimento franoso per scivolamento in blocco o DGPV che coinvolge volumi di roccia molto estesi. Tuttavia, vista la complessità del versante, le verifiche svolte hanno considerato esclusivamente la possibilità di scivolamenti poco profondi per rotture di taglio e spostamenti cosismici negli strati più superficiali.

Tutte le analisi sono state infatti eseguite considerando il “pendio in terra”, con superfici di scivolamento generate in modalità “random” all’interno dello spessore di frana e/o delle coperture più superficiali con caratteristiche meccaniche più scadenti (depositi di versante; bedrock molto alterato investigato da indagini geognostiche). Si sono dunque escluse verifiche per superfici di scorrimento interne al sottostante bedrock (roccia), anche nel caso della frana per scivolamento in blocco di Ripoli – Santa Maria Maddalena, caratterizzata da un ampio corpo di frana con lenti scorrimenti profondi nel substrato roccioso, di carattere prevalentemente duttile (e non fragile).

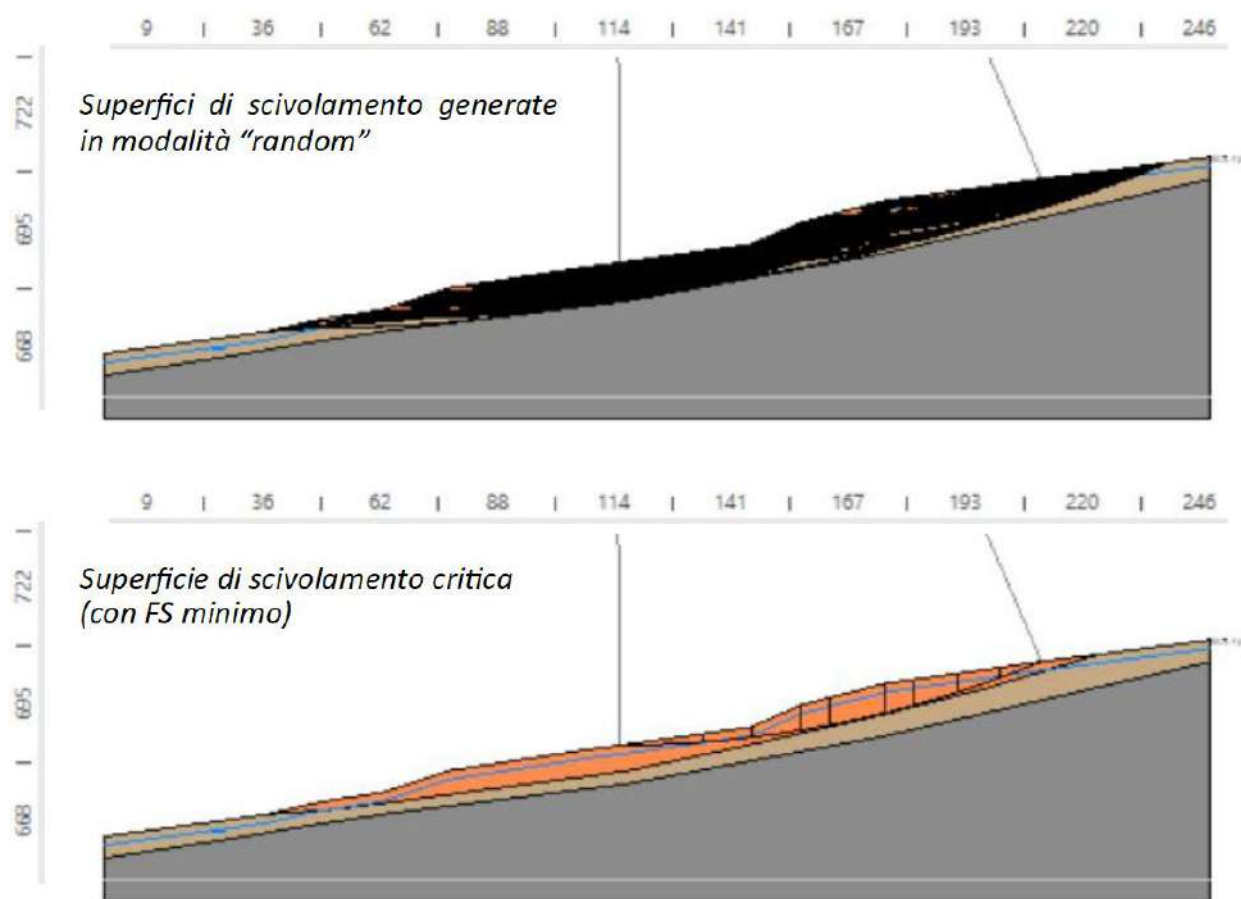


Figura 8.9 – Verifiche di stabilità di versante in condizioni sismiche: esempio di simulazione effettuata per la frana quiescente di scorrimento a San Benedetto Val di Sambro (vedi “sezione 1”)

La geometria della maglia dei centri considerata nelle simulazioni ha inoltre permesso di generare superfici di scivolamento in grado di valutare, sull’intero sviluppo del versante



considerato, il comportamento di un possibile scivolamento verso valle di una massa il più possibile estesa rispetto (figura 8.9).

Le verifiche sono state eseguite con il supporto dei software “SLOPE – Stabilità dei pendii” e “QSIM – Analisi di stabilità in condizioni sismiche” sviluppati dalla società Geostru.

Occorre precisare che le verifiche di stabilità sono state svolte considerando il “metodo di Jambu” (1967). Per l’analisi in condizioni dinamiche si è invece considerato l’approccio di Newmark, utilizzando il modulo software QSIM in grado di ricavare l’andamento degli spostamenti e delle velocità durante la fase sismica. Ciò ha permesso di calcolare lo spostamento massimo permanente considerando gli accelerogrammi rappresentativi derivati dalla RSL numerica sito specifica.

### 8.3.2 *Esiti delle verifiche*

Per il territorio di San Benedetto Val di Sambro si sono svolte le seguenti verifiche di stabilità in condizioni sismiche:

- su pendio rappresentato nella “sezione 1” in corrispondenza di un corpo di frana quiescente per scivolamento, situato nel Capoluogo;
- su pendio rappresentato nella “sezione 2” in corrispondenza del corpo di frana quiescente complessa, situato nella frazione Ripoli. In particolare sono state condotte due verifiche rispettivamente nella zona di accumulo “a monte” (verifica 1) e nella zona di accumulo “a valle” (verifica 2);
- su pendio rappresentato nella “sezione 3” in corrispondenza del corpo di frana per scivolamento in blocco o DGPV, situato nella località Santa Maria Maddalena. Come già descritto, le verifiche hanno considerato la stabilità dei depositi di frana più superficiali (verifiche su “pendio in terra”);
- su pendio rappresentato nella “sezione 4” in corrispondenza del corpo di frana quiescente, situato in località Pian del Voglio.

I risultati delle verifiche sono da ritenersi piuttosto cautelativi. Le simulazioni hanno infatti considerato parametri meccanici ridotti (vedi Allegato 4”), inoltre un livello piezometrico nell’intero versante collocato a -2 metri dalla quota campagna (soggiacenza sempre minore rispetto a quanto riscontrato nelle indagini in sito).

La seguente tabella 8.6 riassume i risultati delle verifiche. Per ogni dettaglio sulle singole verifiche si rimanda invece all’Allegato 5 “Verifiche di stabilità di versante in condizioni sismiche”. In base agli input cautelativi implementati nelle verifiche, i risultati evidenziano come la stabilità dei pendii analizzati sia prevalentemente condizionata dal contesto idrogeologico locale. Le condizioni più critiche vengono infatti riscontrate nell’areale di accumulo di frana di Santa Maria Maddalena (“sezione 3”), dove le condizioni meccaniche e idrogeologiche imposte condizionano e riducono significativamente la complessiva stabilità del pendio (vedi decremento del fattore di sicurezza  $F_s$ ) con massimi spostamenti sismici attesi fino a poco più di 6 cm.

Occorre rammentare che i risultati di massimo spostamento della frana di scivolamento vengono rappresentati nella cartografia di microzonazione sismica per gli areali con approfondimento di “livello 3” secondo gli standard CTMS di classificazione FRT.

Verifiche e localizzazione di riferimento	Fs minimo	Accelerazione critica Kc [g]	Massimo spostamento FRT [cm]
San Benedetto Val di Sambro (sezione 1)	1,57	0,201	3,9
Ripoli – Accumulo di frana “a monte” (sezione 2)	2,09	0,287	0,3
Ripoli – Accumulo di frana “a valle” (sezione 2)	1,69	0,209	1,0
Santa Maria Maddalena (sezione 3)	1,05	0,082	6,4
Pian del Voglio (sezione 4)	1,57	0,201	3,9

Tabella 8.6 – Sintesi dei risultati delle verifiche di stabilità in condizioni sismiche

## 8.4 Calcolo dei valori di “Hazard”

Per gli areali interessati dalla microzonazione sismica con approfondimenti di “livello 3”, lo studio ha consentito di calcolare i valori di H (Naso<sup>6</sup> et al., 2019), parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in [g]).

Per gli areali con approfondimenti di “livello 3”, si sono infatti svolte modellazioni numeriche della RSL. I valori di H sono stati perciò calcolati mediante il rapporto tra i valori integrali degli spettri in accelerazione (Sa) dei punti di controllo rappresentativi di output ricavati dalla modellazione numerica della RSL per gli intervalli di periodo  $0,1s \leq T \leq 0,5s$  ( $H_{SM}$ ),  $0,4s \leq T \leq 0,8s$  ( $H_{0408}$ ),  $0,7s \leq T \leq 1,1s$  ( $H_{0711}$ ) e  $0,5s \leq T \leq 1,5s$  ( $H_{0515}$ ) e i rispettivi  $\Delta T$  di riferimento e cioè  $0,4s$  ( $H_{SM}$ ),  $0,4s$  ( $H_{0408}$ ),  $0,4s$  ( $H_{0711}$ ),  $1,0s$  ( $H_{0515}$ ).

Gli esiti di H sono calcolati e rappresentati, come unità di misura, in [g].

MODELLO RSL	LOCALITA' DI RIFERIMENTO	MOPS DI RIFERIMENTO	SPETTRO SA RIFERIMENTO	SUM AREA SA <sub>0105</sub> (g*s)	SUM AREA SA <sub>0408</sub> (g*s)	SUM AREA SA <sub>0711</sub> (g*s)	SUM AREA SA <sub>0515</sub> (g*s)	H <sub>0105</sub> (g)	H <sub>0408</sub> (g)	H <sub>0711</sub> (g)	H <sub>0515</sub> (g)
Sezione 1 (P. Controllo_7)	San Benedetto Val di Sambro	2008	San Benedetto Val di SambroPSAO01_m	0.297	0.117	0.064	0.165	0.74	0.29	0.16	0.16
Sezione 2 (P. Controllo_10)	Ripoli	2014	San Benedetto Val di SambroPSAO02_m	0.306	0.121	0.062	0.160	0.77	0.30	0.16	0.16
Sezione 2 (P. Controllo_15)	Ripoli	2014	San Benedetto Val di SambroPSAO03_m	0.338	0.179	0.076	0.204	0.84	0.45	0.19	0.20
Sezione 3 (P. Controllo_13)	S. Maria Maddalena	2016	San Benedetto Val di SambroPSAO04_m	0.275	0.120	0.064	0.162	0.69	0.30	0.16	0.16
Sezione 3 (P. Controllo_23)	S. Maria Maddalena	2016	San Benedetto Val di SambroPSAO05_m	0.299	0.211	0.091	0.240	0.75	0.53	0.23	0.24
Sezione 4 (P. Controllo_17)	Pian del Voglio	2014	San Benedetto Val di SambroPSAO06_m	0.328	0.137	0.071	0.186	0.82	0.34	0.18	0.19

Tabella 8.7 – Sintesi del calcolo dei valori di  $H_{SM}$  e  $H_{VARI}$  (Naso et al., 2019) ricavati dagli spettri Sa medi di output ottenuti dalla modellazione numerica della RSL

<sup>6</sup> “Maps for land management: from geology to seismic hazard” – Maso G.; Martelli L.; Baglione M.; Brammerini F.; Castenetto S.; D'Intinosante V.; Ercolelli G. (2019).

*Tabella 8.8 – Classificazione di  $H_{SM}$  per gli intervalli di periodo di riferimento (stralcio tabella 2 riportata nelle “Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni”, CTMS v.2.0)*

Intervalli di periodo	Classificazione $H_{SM}[g]$			
	Basso ( $ZS4_{SM}$ )	Medio ( $ZS3_{SM}$ )	Alto ( $ZS2_{SM}$ )	Molto alto ( $ZS1_{SM}$ )
$T1_{(0.1-0.5)}$	$\leq 0.21$	0.22-0.54	0.55-0.85	$\geq 0.86$
$T2_{(0.4-0.8)}$	$\leq 0.14$	0.15-0.34	0.35-0.55	$\geq 0.56$
$T3_{(0.7-1.1)}$	$\leq 0.09$	0.10-0.22	0.23-0.35	$\geq 0.36$

La tabella 8.7 riporta per ogni singolo modello di RSL i valori di  $H_{SM}$  e  $H_{VARI}$  così calcolati per gli areali con approfondimenti di “livello 3”. Per una migliore comprensione, nella tabella viene anche riportato il nome del file relativo allo spettro medio in accelerazione di output.

Sulla base della classificazione di  $H_{SM}$  proposta dalla CTMS (vedi tabella 8.8), si ricavano valori di “hazard” da ritenersi complessivamente alti per i bassi intervalli di periodo e medio/alti per i più alti intervalli di periodo, in relazione ai risultati della RSL espletata con simulazioni numeriche.



## 9 ELABORATI CARTOGRAFICI

### 9.1 Carta delle Indagini (Tavola 1)

Gli studi di microzonazione sismica hanno consentito di riordinare e selezionare le conoscenze di sottosuolo pregresse, fondate sugli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche di repertorio e sugli esiti delle prove integrative.

In questo senso, la “Carta delle Indagini”, realizzata alla scala 1:5.000, permette la visione di insieme delle localizzazioni delle prospezioni geologiche e geofisiche realizzate nel territorio comunale di San Benedetto Val di Sambro, raccolte e archiviate in formato digitale per il presente studio. Per una descrizione più dettagliata sulla tipologia delle indagini disponibili e in particolare di quelle eseguite per gli studi di MS (OCDPC 344/2016 e OCDPC 532/2018) si rimanda al Capitolo 4.

La cartografia identifica il tipo di prova con la simbologia riportata negli <<Standard di rappresentazione e archiviazione informatica>> CTMS (v.4.2), distinguendo la tipologia delle prove e indicando in etichetta il sito oggetto delle indagini.

### 9.2 Carta geologico–tecnica per la microzonazione sismica (Tavola 2)

La <<Carta geologico–tecnica>>, elaborata alla scala 1:5.000, ha lo scopo di fornire ulteriori elementi per la definizione del modello di sottosuolo meno profondo, necessario per lo studio di microzonazione sismica.

In particolare, la cartografia geologico–tecnica ha suddiviso il territorio studiato sulla base del controllo dei dati tessiturali desunti dalle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo (analisi tessiturali; classificazione dei campioni prelevati) e dalle prove penetrometriche, disponendo anche di dati numerici.

L'elaborazione di questa cartografia è basata sul criterio delle classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.4.2). Negli areali con substrato affiorante, la classificazione geotecnica ha considerato le principali caratteristiche del bedrock già riportate nel data base della cartografia geologica regionale. Il territorio di studio è stato suddiviso nelle classi USCS/AGI riportate in figura 9.1.

La cartografia geologico–tecnica inoltre riporta:

- ✓ forme di superficie e sepolte (picchi isolati; creste; orli di scarpata morfologica; orli di terrazzo fluviale; conoidi; faglie)
- ✓ aree di instabilità di versante
- ✓ elementi geologici e idrogeologici (giaciture strati e sondaggi/pozzi)
- ✓ le tracce delle sezioni geologiche tecniche di riferimento per questo lavoro.

	RI	Terreni contenenti resti di attività antropica			
	GM	Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo – argine/barre/canali (es)		ML	Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità – eluvi/colluvi (ec), terrazzo fluviale (tf), depositi eolici (ls)
	GC	Ghiaie argillose, miscela di ghiaia, sabbia e argilla – conoide alluvionale (ca)		PT	Torbe ed altre terre fortemente organiche – lacustre (lc)
	LP	Lapideo		SFCO	Coesico sovraconsolidato fratturato o detensionato
	ALS	Alternanza di litotipi stratificato		SFCOS	Coesico sovraconsolidato stratificato fratturato o detensionato
	SFGR	Granulare cementato fratturato o detensionato		SFALS	Alternanza di litotipi stratificato fratturato o detensionato

Figura 8.1 – Stralcio della legenda complessiva della Tavola 2 – Carta geologico-tecnica: si riportano le classi geotecniche USCS/AGI che caratterizzano il sottosuolo del territorio studiato di San Benedetto Val di Sambro

### 9.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3)

La <<Carta delle frequenze naturali dei terreni>>, elaborata alla scala 1:10.000, riporta la suddivisione del territorio comunale in aree per classi di frequenza, secondo quanto indicato nella DGR 476/2021:  $f_0 \leq 1$  Hz,  $1 < f_0 \leq 2$  Hz,  $2 < f_0 \leq 8$  Hz,  $f_0 > 8$  Hz.

Lo studio di microzonazione ha dunque permesso di proporre una classificazione delle frequenze di possibile amplificazione/risonanza distinguendo le seguenti classi (con colori differenti).

La tavola permette di discriminare le misure anche in base all'entità del rapporto spettrale H/V riferito a contrasti di impedenza alla base delle coperture, in particolare discriminando le prove che hanno ricavato rapporti:  $H/V < 2$  (ampiezze basse);  $2 \leq H/V < 3$  (ampiezze moderate);  $H/V \leq 3$  (ampiezze elevate).

I dati acquisiti attraverso l'estesa campagna di misure di microtremore realizzata a supporto del presente studio, correlati coi dati geognostici disponibili, hanno permesso di individuare zone in cui gli spessori delle coperture continentali e/o del substrato roccioso marino alterato sono significativi per la risposta sismica locale, di definire la profondità del tetto di quello che può essere definito in alcuni casi il substrato rigido e di individuare quindi le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie, per la definizione dei fattori di amplificazione.

## 9.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS (Tavola 4)

La cartografia MOPS, elaborata alla scala 1:5.000, rappresenta la suddivisione del territorio comunale in “zone omogenee in prospettiva sismica”. Tale carta rappresenta l’elaborato fondamentale della microzonazione sismica di livello 1.

La delimitazione delle MOPS ha tenuto in considerazione sia gli aspetti litostratigrafici (rigidezza del substrato roccioso affiorante; presenza di coperture “soffici” ecc.), sia gli aspetti geomorfologici dell’areale stesso, anch’esse in grado di condizionare sia la risposta sismica, sia la complessiva stabilità di versante. Rispetto alle diverse litologie distinte nella carta geologico-tecnica, estendendo la valutazione a profondità maggiore, si sono tuttavia effettuate delle semplificazioni, accorpendo alcune stratigrafie analoghe e cercando di utilizzare un criterio di similarità dal punto di vista della possibile risposta sismica e delle criticità locali.

Nel territorio studiato non si riscontrano “zone stabili”, tuttavia si sono distinte sette “zone stabili suscettibili di amplificazioni” (MOPS denominate da “2001” a “2006”), compresa la parte di territorio caratterizzato da substrato affiorante molto alterato (“2099”). Sono state inoltre definite undici “zone di attenzione per instabilità” che individuano le principali criticità correlabili ad eventi sismici individuate per il territorio studiato. In questo senso le MOPS potenzialmente instabili sono correlabili ai seguenti effetti cosismici:

- possibile instabilità di versante (MOPS denominate da “2007” a “2016”). I movimenti franosi perimetrati sono stati classificati per meccanismi di movimento, indicando anche la presenza di accumulo o distacco e i principali depositi (coperture o substrato roccioso) coinvolti nel dissesto;
- possibili cedimenti differenziali/crollo/cavità/ sinkhole (“3080”). In questa tipologia di instabilità vengono comprese anche le aree di cava e i tombamenti antropici.

La carta riporta, inoltre, le “forme di superficie e sepolte” (già presenti nella carta geologico-tecnica), i punti di misura di rumore ambientale (con l’indicazione della frequenza fondamentale) e le tracce delle sezioni topografiche realizzate per determinare i fattori di amplificazione “ft” (MS “livello 2”).

Nello schema seguente (figura 8.2) sono riportate le descrizioni sintetiche delle MOPS classificate come “Zone stabili suscettibili di amplificazioni”. Come si può notare, per ciascuna microzona è riportato lo spessore delle coperture che è stato considerato nel calcolo dei fattori di amplificazione, comprensivo di un’eventuale porzione di bedrock alterato.

Nel successivo schema (figura 8.3) vengono inoltre riportate per le “zone stabili suscettibili di amplificazione” i rispettivi rapporti stratigrafici rappresentativi.



<b>2099</b>	Zona 99 – Substrato affiorante fratturato o detensionato.
<b>2001</b>	Zona 1 – Substrato affiorante non rigido. Litotipi prevalenti: rocce costituite da alternanze di livelli lapidei e livelli pelitici (MOH/MOV).
<b>2002</b>	Zona 2 – Coperture alluvionali fini su bedrock non rigido in parte alterato (MOH/MOV). Spessore medio coperture: 5 metri.
<b>2003</b>	Zona 3 – Coperture alluvionali fini su bedrock non rigido in parte alterato (MOH). Spessore medio coperture: 10 metri.
<b>2004</b>	Zona 4 – Depositi di versante e/o eluvi-colluvi su bedrock non rigido in parte alterato (MOV). Spessore medio coperture: 5 metri.
<b>2005</b>	Zona 5 – Depositi di versante e/o eluvi-colluvi su bedrock in parte fratturato o detensionato (MOH/MOV). Spessore medio coperture: 10 metri.
<b>2006</b>	Zona 6 – Coperture eoliche su bedrock in parte fratturato o detensionato (MOV). Spessore medio coperture: 10 metri.

Figura 8.2 – Stralcio della legenda della Tavola 4 – Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (“zone stabili suscettibili di amplificazioni”)

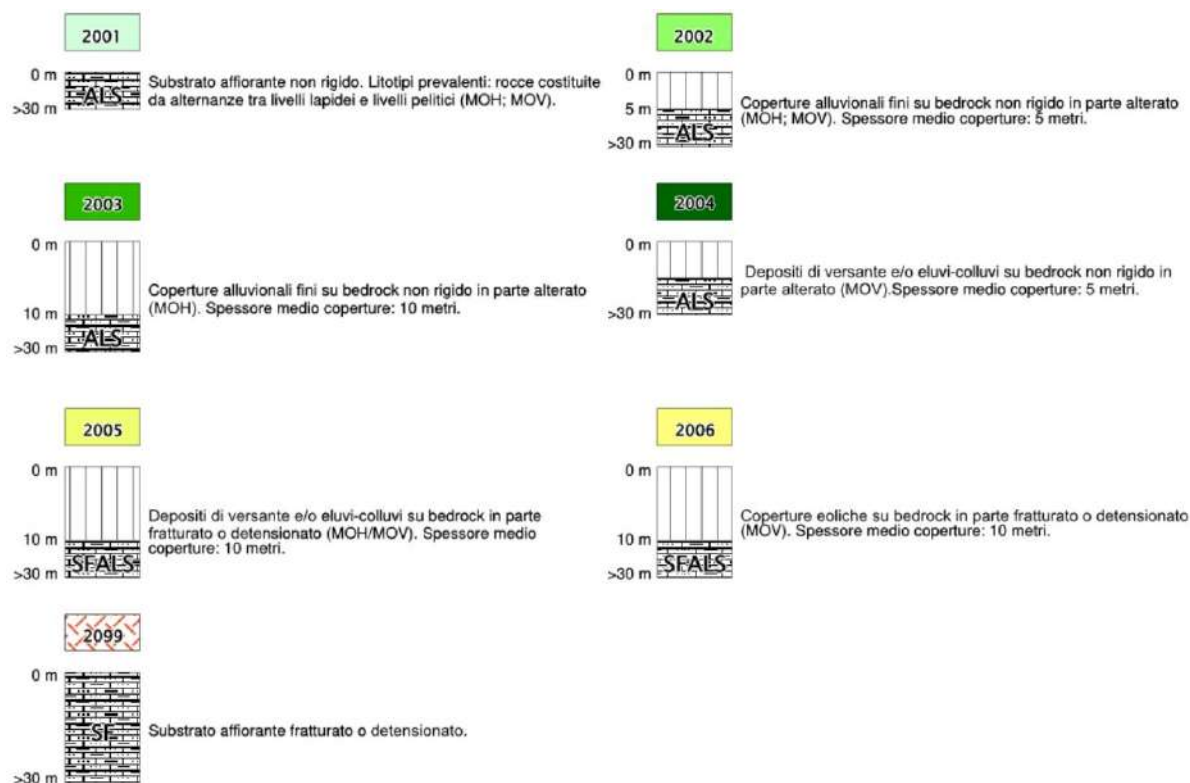


Figura 8.3 – Schemi dei rapporti stratigrafici rappresentativi delle “zone stabili suscettibili di amplificazioni”

Nei due seguenti schemi (figura 8.4 e figura 8.5) vengono infine riportate le descrizioni sintetiche delle MOPS classificate come “Zone di attenzione per instabilità” e i rispettivi rapporti stratigrafici rappresentativi.

<b>2007</b>	ZA_FR 7 (3012/3022) – Zona di prevalente distacco per frana di scorrimento nel bedrock lapideo-pelitico, con spessori medi <3 metri.	<b>2013</b>	ZA_FR 13 (3024) – Zona di prevalente distacco per frana complessa nelle argilliti tettonizzate (scagliose), con spessori medi <3 metri.
<b>2008</b>	ZA_FR 8 (3012/3022) – Zona di prevalente accumulo per frana di scorrimento derivato da bedrock lapideo-pelitico, con spessori medi compresi tra 5 e 15 metri.	<b>2014</b>	ZA_FR 14 (3024) – Zona di prevalente accumulo per frana complessa derivato da bedrock lapideo-pelitico, con spessori medi compresi tra 5 e 15 metri.
<b>2009</b>	ZA_FR 9 (3012) – Zona di prevalente accumulo per frana di scorrimento derivato da argilliti tettonizzate (scagliose), con spessori medi di 5 metri.	<b>2016</b>	ZA_FR 16 (3022) – Zona di prevalente accumulo per frana di scivolamento in blocco o per deformazioni gravitative profonde (fino a circa 100 m?) derivato da bedrock lapideo-pelitico, con coperture superficiali più alterate (suolo e bedrock molto fratturate e/o detensionato per dislocazione) fino a profondità di 5-15 metri.
<b>2010</b>	ZA_FR 10 (3013/3023) – Zona di prevalente distacco per colata nel bedrock lapideo-pelitico, con spessori medi <3 metri.	<b>2017</b>	ZA_FR 17 (3014) – Zona di prevalente accumulo per frana complessa (fino a circa 25÷35m) derivato da bedrock lapideo-pelitico, con coperture superficiali più alterate (suolo e bedrock molto fratturato e/o detensionato per dislocazione) fino a profondità di 5-7 metri.
<b>2011</b>	ZA_FR 11 (3013/3023) – Zona di prevalente accumulo per colata derivato da bedrock lapideo-pelitico, con spessori medi compresi tra 5 e 10 metri.	<b>2018</b>	ZA_FR 18 (3045) – Zona di potenziale evoluzione di frana.
<b>2012</b>	ZA_FR 12 (3014/3024) – Zona di prevalente distacco per frana complessa nel bedrock lapideo-pelitico, con spessori medi <3 metri.	<b>3080</b>	ZA_CD – Zona di attenzione per cedimenti differenziali nei depositi fini palustri.

Figura 8.4– Stralcio della legenda della Tavola 4 – Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (“zone di attenzione per instabilità”)

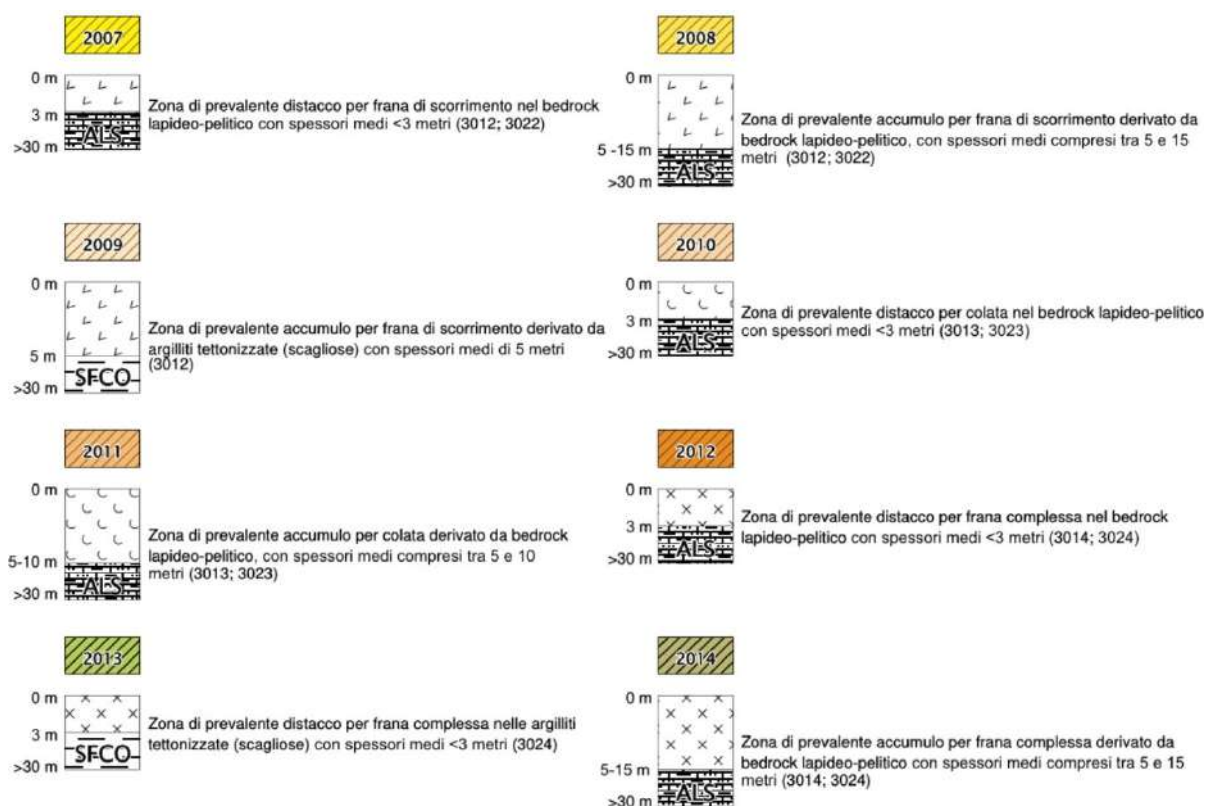


Figura 8.5 – Schemi dei rapporti stratigrafici rappresentativi delle “zone stabili di attenzione per instabilità”

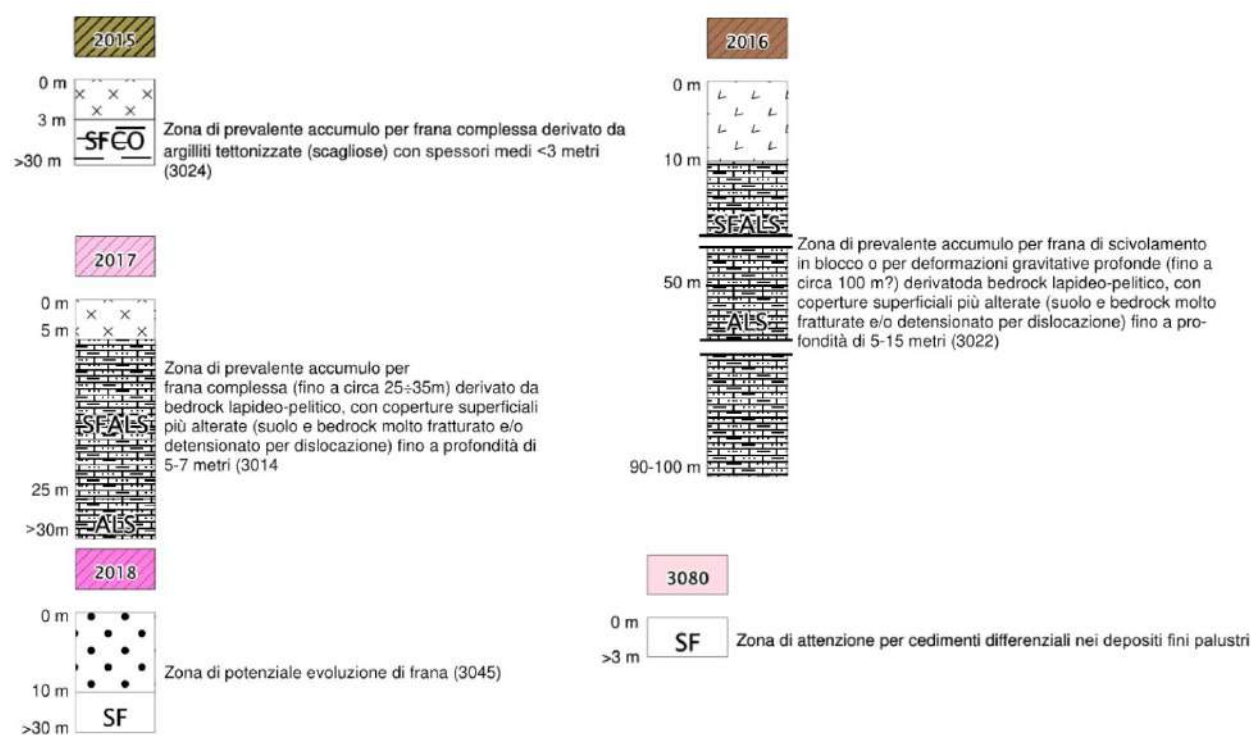


Figura 8.5 (segue) - Schemi dei rapporti stratigrafici rappresentativi delle "zone stabili di attenzione per instabilità"

## 9.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5)

La <<Carta delle velocità delle onde di taglio S>>, elaborata alla scala 1:10.000, localizza tutti i punti di misura di  $V_s$ , con indicazione, per ogni punto di controllo, del valore della media armonica nei primi 30 metri della velocità delle onde sismiche di taglio ( $V_{s_{30}}$ ) oppure della  $V_sH$ .

Nelle situazioni di sottosuolo caratterizzate da coperture di minore spessore e in grado di condizionare il campo di moto verso la superficie, si sono riportati anche i valori di  $V_sH$ . Tale parametro risulta di fondamentale importanza per la caratterizzazione della risposta sismica locale, sia valutata con approccio semplificato (DGR 476/2021; criteri nazionali ICMS 2008), sia da valutare con modellazioni numeriche.

Si segnala che il calcolo della  $V_sH$  ha interessato ampi settori del territorio studiato, per la presenza di coperture quaternarie sovrastanti il substrato marino più rigido oppure per la presenza di substrato roccioso molto alterato e/o detensionato e con  $V_s$  tali da non considerarsi bedrock sismico fino a 30 metri di profondità.

Informazioni relative alle tipologie d'indagine e agli esiti delle  $V_s$  misurate nelle aree di approfondimento, sono riportate nei precedenti capitoli (in particolare nel capitolo 5) a cui si rimanda per eventuali approfondimenti.

## 9.6 Carta di microzonazione sismica livello 2-3 (Tavole da 6 a 13)

Le cartografie <<carta di microzonazione sismica livello 3>> sono elaborate alla scala 1:5.000 e riportano le “zone stabili suscettibili di amplificazione” e le “zone di attenzione” riscontrate nel territorio studiato di San Benedetto Val di Sambro, riconducibili prevalentemente a instabilità di versante e in alcuni limitati areali a potenziali cedimenti differenziali/crollo di cavità/sinkhole. Rappresentano gli elaborati finali di sintesi del presente studio di microzonazione sismica.

Si tenga presente che le zone stabili suscettibili di amplificazione derivano dalla cartografia MOPS (Tavola 4) e tuttavia:

- alle “zone stabili suscettibili di amplificazione” vengono attribuiti i parametri di amplificazione considerati (FA Pga; FA e FH) attraverso la suddivisione del territorio studiato in classi di amplificazione, come previsto dagli Indirizzi della CTMS e come indicato negli Standard di rappresentazione per la microzonazione sismica (v. 4.2). Si rammenta che agli areali studiati i fattori di amplificazione sono attribuiti sulla base degli abachi regionali (cfr. DGR 476/2021, allegato A2).
- Per le “zone di attenzione per instabilità” (“livello 2”) vengono attribuiti i parametri di amplificazione considerati (FA Pga; FA e FH) ancora attribuiti sulla base degli abachi regionali (cfr. capitolo 7) e considerando il contesto litostratigrafico e sismico locale. La stima dello spessore di sedimento rimaneggiato e maggiormente amplificabile è compatibile con la presunta profondità del piano di taglio/scivolamento della frana.
- Per le “zone suscettibili di instabilità” (“livello 3”) e per gli areali complessivamente interessati dagli approfondimenti di “livello 3” i parametri di amplificazione considerati (FA Pga; FA e FH) derivano dai risultati delle modellazioni numeriche bidimensionali della RSL come descritto nel capitolo 8.

La grafica standard (colore pieno) consente di attribuire alle zone di suscettibilità i rispettivi parametri di amplificazione (ricavati dalle modellazioni numeriche di RSL).

Si rammenta che per “zone suscettibili di instabilità” le tavole di microzonazione riportano anche i risultati di massimo spostamento della frana di scivolamento, rappresentati nella cartografia secondo gli standard CTMS di classificazione FRT.

In sintesi, sono state elaborate le seguenti otto cartografie di microzonazione sismica:

- ✓ Carta di microzonazione sismica livello 2 e 3 Tavola 6 –  $FA_{PGA}$  → riporta il fattore di amplificazione FA PGA (rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA0);
- ✓ Carta di microzonazione sismica livello 2 e 3 Tavola 7 –  $FA_{0,1-0,5s}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,1 e 0,5 secondi);
- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 2 e 3 Tavola 8 –  $FA_{0,4-0,8s}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,4 e 0,8 secondi);



- ✓ Carta di microzonazione sismica livello 2 e 3 Tavola 9 –  $FA_{0.7-1.1s}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,7 e 1,1 secondi);
- ✓ Carta di microzonazione sismica livello 3 Tavola 10 –  $FA_{0.5-1.5s}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,5 secondi);
- ✓ Carta di microzonazione sismica livello 2 e 3 Tavola 11 –  $FH_{0.1-0.5s}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,1 e 0,5 secondi);
- ✓ Carta di microzonazione sismica livello 2 e 3 Tavola 12 –  $FH_{0.5-1.0s}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,0 secondi);
- ✓ Carta di microzonazione sismica livello 3 Tavola 13 –  $FH_{0.5-1.5s}$  → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,5 secondi).

## 9.7 Carta della distribuzione dei valori di H (Tavole da 14 a 17)

Le mappe di pericolosità sismica denominate rispettivamente:

- <<Distribuzione dei valori di H –  $H_{SM}$ >> (scala 1: 5.000)
- <<Distribuzione dei valori di H –  $H_{0408}$ >> (scala 1: 2.000)
- <<Distribuzione dei valori di H –  $H_{0711}$ >> (scala 1: 2.000)
- <<Distribuzione dei valori di H –  $H_{0515}$ >> (scala 1: 2.000)

Rappresentano cartograficamente gli esiti di “Hazard” derivati dalla microzonazione sismica di “livello 2” (solo  $H_{SM}$ ) e dalla microzonazione sismica di “livello 3”.

Si rammenta che il valore di H rappresenta un parametro di pericolosità che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in [g]). Per ulteriori dettagli sull’analisi di H si rimanda al paragrafo 7.5 (per gli areali con approfondimenti fino al “livello 2” e al paragrafo 8.4 (per gli areali con approfondimenti fino al “livello 3”).

## 10 BIBLIOGRAFIA

AA.VV. (2005) – Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. Deliverable D23.12 of the SESAME project, 62 pp, April 2005. Available at <http://www.SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>.

AA.VV. (2011) – Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n.2.

Albarello D. e Castellaro S. (2011) – Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. In AA.VV. (2011) – Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n.2.

Basili R., G. Valensise P. Vannoli, P. Burrato, U. Fracassi, S. Mariano, M.M. Tiberti, E. Boschi (2008) – The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology. Tectonophysics.

Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Severi P. e Vannucci G. (2004) – Carta sismotettonica della regione Emilia-Romagna; Note illustrative. A cura di : Boccaletti M. e Martelli L., Servizio geologico sismico e dei suoli.

Castellaro S., Mulargia F. e Bianconi L. (2005) – Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique. Geologia e tecnica ambientale, 3.

Castellaro S. e Mulargia F. (2011) – Seismic soil classification from a different perspective. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13–15.

Castellaro S. (2012) – H/V: un contributo oltre Vs30. In "Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici" a cura di Mucciarelli M.

Cerrina Feroni A., Martelli L., Martinelli P. & Ottria G. (2002) – Carta geologico-strutturale dell'Appennino emiliano-romagnolo in scala 1:250.000. Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, sismico e dei Suoli – CNR, Istituto di Georisorse e Geoscienze, Pisa. S.EL.CA., Firenze.

Città Metropolitana di Bologna – Tavola 4 – *Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali*.

Commissione tecnica per la microzonazione sismica (dicembre 2020) – Microzonazione sismica – Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.2. <https://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/23-standard-ms-e-cle>.

DISS Working Group (2021). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.3.0: *A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/diss3.3.0>

Gruppo di lavoro MS (2008) – *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Dvd. Disponibili nel sito web del Dipartimento della Protezione Civile, area “Rischio Sismico” all'indirizzo: [http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir\\_pk=395&cms\\_pk=15833](http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir_pk=395&cms_pk=15833) .

Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Sgattoni G., Valensise G. (2018) – CFTI5Med, *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.–1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.–1500)*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). doi: <https://doi.org/10.6092/ingv.it-cfti5>.

Guidoboni E., Ferrari G., Tarabusi G., Sgattoni G., Comastri A., Mariotti D., Ciuccarelli C., Bianchi M.G., Valensise G. (2019), *CFTI5Med, the new release of the catalogue of strong earthquakes in Italy and in the Mediterranean area*, Scientific Data 6, Article number: 80 (2019). doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9>

ISIDe Working Group (2010) – Italian Seismological Instrumental and parametric database. [Online], Available: <http://iside.rm.ingv.it>.

ISPRA (2009) – *Carta Geologica d'Italia, Fogli 236 e 237*. Coord. Scientifico: Regione Emilia-Romagna. ISPRA, Servizio Geologico d'Italia – Regione Emilia-Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli. SystemCart, Roma.

Lanzo G. & Silvestri F. (1999) – *Risposta Sismica Locale*. Edizioni Hevelius

Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Antonucci A. (2022). *Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 4.0*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.4>

Martelli L. (coord.), Bonini M., Calabrese L., Corti G., Ercolessi G., Molinari F. C., Piccardi L., Pondrelli S., Sani F. (2017): *Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe. Con note illustrative*. Regione Emilia-Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli. Con note illustrative e CD. DREAM Italia.

Martelli (2015) – *I terremoti dell'Appennino Bolognese*. La geologia. Nueter, XLI, n. 82, 387–395.

Meletti M., Valensise G (a cura di) (2004) – *Zonazione sismogenetica ZS9 – App.2 al Rapporto conclusivo*. Gruppo di lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (Ordinanza PCM 3274/2003), Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. <http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>.

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

Ministero delle Infrastrutture (2018) – D.M. 17/01/2018 (G.U. n.42 del 20/02/2018 – Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni.

Naso G., Martelli L., Baglione M., Brammerini F., Castenetto S., D'Intinosante V., Ercolessi G. (2019): *Maps for land management: from geology to seismic hazard*, Boll. Geof. Teor. Appl.,

Vol. 60, DOI 10.4430/bgta0263.

Pieri M. e Groppi G. (1981) – Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy). Progetto Finalizzato Geodinamica, publ.n° 414, C.N.R., 23.

*Regione Emilia Romagna – Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – Carta Geologica in scala 1:10.000 della regione Emilia-Romagna – cartografia interattiva consultabile on line:* [https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia\\_sgss](https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss)

Regione Emilia Romagna – Legge Regionale n.19/2008 – “Norme per la riduzione del rischio sismico, con le modifiche apportate dalla L.R. 6 luglio 2009, n.6 “Governo e riqualificazione solidale del territorio”. BURER n. 184 del 30/10/2008.

*Regione Emilia Romagna – Legge Regionale n.24/2017 – “Disciplina regionale sulla tutela e l’uso del territorio”*

Regione Emilia Romagna – *Delibera Regionale n.112/2007 – “Approvazione dell’atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell’art. 16, comma 1, della LR 20/2000 Disciplina generale sulla tutela del territorio, in merito a <<Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica>>”.*

*Regione Emilia Romagna – Delibera della Giunta Regionale n.2193/2015 – “Art. 16 della L.R. n.20 del 24/3/2000. Approvazione aggiornamento dell’atto di coordinamento tecnico denominato <<Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica>>, di cui alla deliberazione dell’Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112”.*

*Regione Emilia Romagna – Delibera della Giunta Regionale n. 630/2019 – “Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale ed urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n.24/2017”. BURER. n. 143 del 6 maggio 2019 parte seconda.*

*Regione Emilia Romagna – Delibera della Giunta Regionale n. 476/2021 (e DGR integrativa n.564/2021)– Aggiornamento dell’“Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale ed urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n.24/2017”. Di cui alla Deliberazione della Giunta Regionale 29 aprile 2019 n.630. BURERT n. 137 del 12/5/2021 (parte seconda) e BURERT n. 111 del 20/04/2021.*

Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P., Antonucci A. (2022). *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 4.0.* Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.4>.