



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

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

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione illustrativa

Regione Emilia – Romagna
Comune di Mezzani



Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia Romagna	Dott. Geol. Massimiliano Trauzzi	Dicembre 2016

INDICE

1.	Introduzione	2
2.	Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento.....	5
2.1	Inquadramento geologico	5
2.2	Caratteristiche sismotettoniche.....	8
2.3	Sismicità del territorio.....	13
2.4	Classificazione sismica comunale.....	15
3.	Dati geotecnici e geofisici	17
4.	Modello del sottosuolo	18
5.	Interpretazioni e incertezze	19
6.	Metodologie di elaborazione e risultati.....	20
7.	Elaborati cartografici di primo e secondo livello.....	22
7.1	Carta delle indagini	22
7.2	Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica.....	23
7.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni	28
7.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica.....	29
7.5	Carte delle velocità delle onde di taglio S	30
8.	Approfondimenti di terzo livello	32
8.1	Area considerata	32
8.2	Risposta sismica locale	32
8.2.1	Pericolosità sismica di base	32
8.2.2	Segnali in input	34
8.2.3	Modello geofisico del sottosuolo.....	35
8.2.4	Codice di calcolo per la valutazione della RSL	41
8.2.5	Risultati della modellazione numerica.....	42
8.2.6	RSL per il sito del sondaggio S1.....	44
8.3	Verifica del rischio di liquefazione	48
8.3.1	Magnitudo di riferimento	51
8.3.2	Analisi dei risultati	53
8.4	Carte di microzonazione sismica	56
9.	Bibliografia	58
10.	Allegati	60

1. INTRODUZIONE

Nella presente Relazione illustrativa vengono descritte le attività svolte e i risultati ottenuti nel corso dello studio di Microzonazione Sismica (MS) del Comune di Mezzani (Provincia di Parma).

Gli studi di Microzonazione Sismica hanno l'obiettivo di razionalizzare le conoscenze in merito alle alterazioni che lo scuotimento sismico può subire in superficie e di fornire informazioni utili al governo del territorio, alla progettazione, alla pianificazione per l'emergenza e alla ricostruzione post sisma.

La MS consente di suddividere il territorio esaminato in base alla presenza e alla distribuzione dei fenomeni di possibile amplificazione dello scuotimento, legati alle caratteristiche litostratigrafiche e morfologiche delle singole aree considerate ed ai possibili fenomeni di instabilità e deformazione permanente in esse attivati dal sisma. L'insieme di queste conoscenze sul comportamento dei terreni durante un evento sismico e sui possibili effetti indotti dallo scuotimento, è un indispensabile strumento di prevenzione e di riduzione del rischio sismico, particolarmente efficace, se realizzato e applicato durante la pianificazione urbanistica, per indirizzare le scelte di trasformazione verso aree a minore pericolosità.

Tutte le attività svolte ed in particolare l'elaborazione e la redazione degli elaborati richiesti, sono state effettuate nel rispetto dei seguenti riferimenti tecnici:

- “Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica” - Versione 3.0, Roma, ottobre 2013 - Elaborato e approvato nell'ambito dei lavori della Commissione tecnica per la microzonazione sismica, nominata con DPCM 21 aprile 2011 (di seguito “SRAI”)
- “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica” approvati dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome e successive modifiche e integrazioni (di seguito “ICMS”)
- criteri per la realizzazione degli studi di microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza, di cui all'OCDPC n. 171/2014 e decreto del Capo del Dipartimento della Protezione Civile del 4 agosto 2014
- indicazioni per l'archiviazione informatica, rappresentazione e fornitura dei dati degli studi di microzonazione sismica e dell'analisi della condizione limite per l'emergenza, di cui all'OCDPC n. 171/2014 e Decreto del 4 agosto 2014 del Capo del Dipartimento della Protezione Civile
- DGR 2193/2015. Deliberazione della Giunta della Regione Emilia Romagna n. 2193 del 21 dicembre 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 e

urbanistica” di cui alla Deliberazione dell’Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112

Il presente studio di Microzonazione Sismica, attuato in conformità a quanto stabilito dai riferimenti tecnici sopraelencati e dal capitolato tecnico è articolato nei seguenti tre livelli di approfondimento:

- **PRIMO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO, con:**
 - definizione del modello geologico di base per la microzonazione sismica (litologia, stratigrafia, tettonica e loro rapporti geometrici);
 - individuazione delle aree suscettibili di effetti locali in cui effettuare le successive indagini di microzonazione sismica;
 - definizione del tipo di effetti attesi;
 - indicazione, per ogni area, del livello di approfondimento necessario.

- **SECONDO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO, con:**
 - conferma delle condizioni di pericolosità indicate dal 1° livello ed eventuale nuova perimetrazione delle aree ove effettuare la microzonazione sismica;
 - suddivisione dettagliata del territorio, in base all’amplificazione attesa, secondo aree con maggiore o minore pericolosità sismica;
 - conferma o migliore definizione delle aree, indicate dal 1° livello, in cui si ritengono necessari approfondimenti di 3° livello con l’indicazione delle indagini e analisi da effettuare.

- **TERZO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO, con:**
 - conferma delle condizioni di pericolosità indicate dai precedenti livelli di approfondimento ed eventuale nuova perimetrazione delle aree in cui effettuare la microzonazione sismica.
 - valutazione più approfondita della risposta sismica locale, in termini di amplificazione e/o stima degli indici di rischio, nelle aree soggette a liquefazione e densificazione.

Le aree oggetto di MS presentano una superficie complessiva di 3.803 Ha, corrispondente a circa il 10% dell’intero territorio comunale.

Per l’archiviazione dei dati e l’editing dei documenti sono stati seguiti gli standard di riferimento forniti dall’Allegato D della Delibera regionale e dagli SRAI (Standard di rappresentazione e archiviazione informatica).

Per l'inserimento dei dati alfanumerici dei siti, delle indagini e dei parametri è stato utilizzato l'apposito software: "MS - SoftMS", versione 4.0.

I dati cartografici sono stati allestiti in formato vettoriale (*shapefile*) e gli elaborati sono stati prodotti in digitale (pdf con risoluzione di 300 dpi).

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

2.1 Inquadramento geologico

Il Comune di Mezzani, dal punto di vista geologico, ricade nella pianura parmense, la quale, a sua volta, è compresa in quella emiliano-romagnola che costituisce il settore meridionale della pianura padana, la più grande pianura alluvionale d'Italia, edificata dai depositi del fiume Po e dei suoi affluenti.

Essa ha cominciato a formarsi nel Pleistocene medio, circa 500.000 anni fa, quando, a seguito del sollevamento in atto, il mare si è spostato dal margine appenninico, via via sempre più verso est, sino alla sua attuale posizione.

Il sottosuolo è contraddistinto da un forte accumulo di sedimenti alluvionali quaternari che appoggiano, con discontinuità a discordanza semplice, sul substrato di sedimenti marini del pliocene superiore e del pleistocene inferiore.

L'assetto di tale corpo sedimentario è il risultato dell'evoluzione deposizionale dei corsi d'acqua, legata sia alle variazioni climatiche pleistoceniche sia ai recenti movimenti tettonici della zona di margine, vale a dire di quella fascia interposta tra la Pianura s.l. in abbassamento e l'Appennino in sollevamento.

E' possibile riconoscere nella Pianura dell'Emilia-Romagna alcuni ambienti deposizionali: le conoidi alluvionali sono tipiche della zona pedeappenninica, ad esse fa seguito la piana alluvionale, che passa verso costa alla piana deltizia del fiume Po ed alla piana costiera.

I sedimenti di questi ambienti deposizionali sono costituiti prevalentemente da: ghiaie nelle conoidi alluvionali; sabbie, limi ed argille nella piana alluvionale; sabbie nella piana deltizia e costiera.

Nel sottosuolo i depositi della pianura costituiscono un cuneo che si allarga velocemente procedendo dal margine appenninico verso nord; lo spessore massimo di questi depositi arriva ad oltre 600 metri.

L'assetto geostrutturale delle formazioni prequaternarie è caratterizzato da una successione plicativa ad anticlinali e sinclinali spesso fagliate e sovrascorse, con assi a vergenze appenniniche.

In tale schema la pianura parmense è compresa nell'arco delle pieghe emiliane caratterizzate da due distinti fasci di *thrust*: il primo, più meridionale, detto fronte di accavallamento appenninico (P.T.F.), definisce il limite della catena appenninica affiorante; il secondo, detto fronte di accavallamento esterno (E.T.F), definisce il limite dell'Appennino sepolto, rappresentato dalle strutture anticlinali di Busseto e di Brè, che proseguono, verso SE, nelle strutture di Collecchio e Parma (cfr. Fig. 1), a nord della quale è ubicato il Comune di Mezzani (a ciò consegue che lo spessore dei depositi continentali nella zona di studio risulta di alcune centinaia di metri).

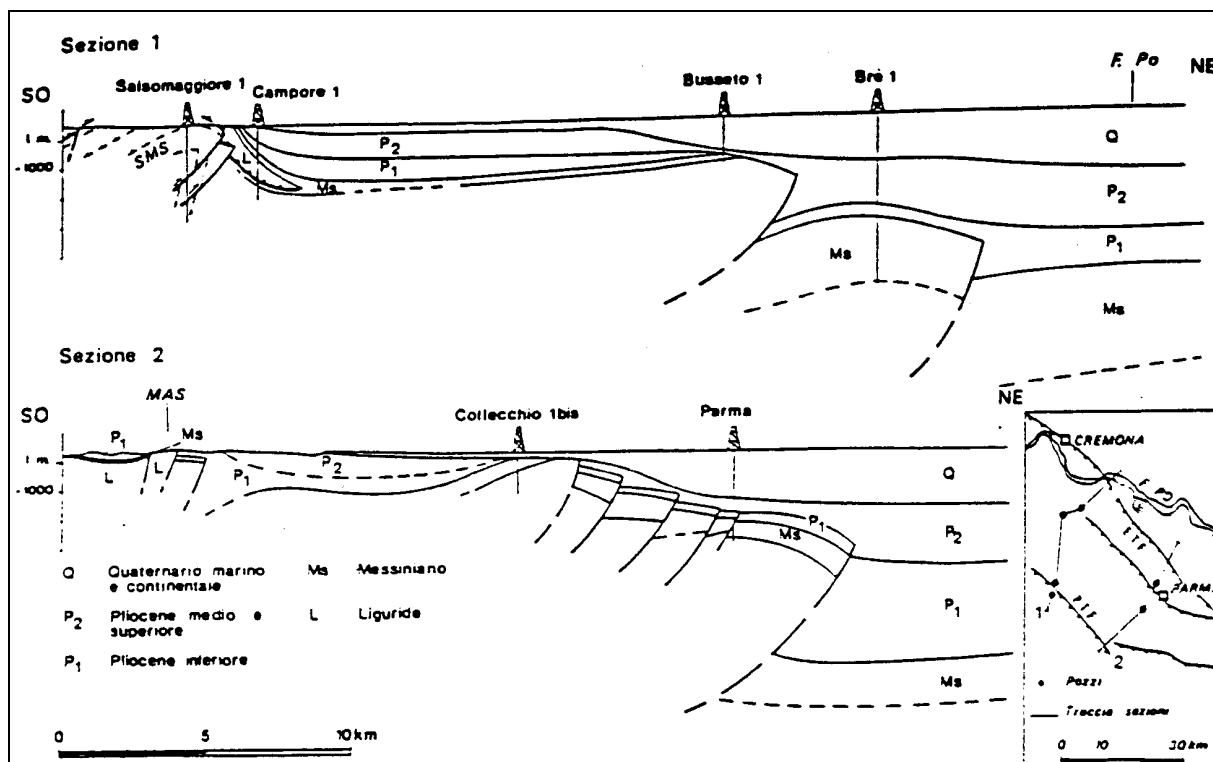


Fig. 1 - Sezioni geologiche dal Fronte di accavallamento pedeappenninico (PTF) al Fronte di accavallamento esterno (ETF) (da Bernini e Papani, 1987)

Queste strutture risultano tagliate trasversalmente dalle linee tettoniche del Taro e dello Stirone che determinano un inarcamento (in pianta) della linea dei *thrust*.

L'andamento strutturale dell'Appennino sepolto può essere interpretato come effetto di una compressione e di un raccorciamento crostale che, secondo i moderni schemi geodinamici, risulta legato ad un doppio fenomeno di subduzione e/o ispessimento della crosta. In tale quadro d'insieme si giustifica lo sviluppo della rete idrografica maggiore che risulta conforme ai principali assi di sinclinali sepolte.

A scala padana la successione quaternaria ha un forte carattere regressivo con sabbie e peliti torbiditiche alla base, seguite da un prisma sedimentario fluvio-deltizio, progradante, ricoperto al tetto da depositi continentali.

In conformità con quanto assunto dal Servizio Geologico e cartografico della Regione Emilia-Romagna, le unità stratigrafiche definite ed utilizzate nel presente studio rientrano nella classe delle Sequenze Deposizionali *sensu Mitchum et Al.* (1977).

Dal punto di vista gerarchico si distinguono due Sequenze Principali (Supersistemi secondo la terminologia delle U.B.S.U.) denominate come segue:

- Supersistema del Quaternario Marino, costituito da terreni parali e marini depositi tra il Pliocene superiore e il Pleistocene medio.
- Supersistema Emiliano-Romagnolo, costituito da depositi di ambiente continentale depositi a partire da 650.000 anni BP.

Nel complesso i depositi superficiali, in comune di Mezzani, sono relativi all'Alloformazione Emiliano-Romagnola Superiore, a sua volta suddivisa in sottunità denominate Subsintemi.

Essa è caratterizzata da due direzioni di progradazione: la prima, assiale, est-vergente, originata dal fiume Po; la seconda, trasversale, nordest-vergente, originata dai sistemi di alimentazione appenninica.

Sulla base delle direzioni di progradazione possono essere individuate le seguenti classi di sistemi deposizionali:

- pianura pedemontana ad alimentazione appenninica
- pianura alluvionale ad alimentazione appenninica
- pianura alluvionale di alimentazione assiale (paleo Po)
- pianura alluvionale di alimentazione mista

Il territorio del Comune di Mezzani ricade all'interno del sistema deposizionale pianura alluvionale ad alimentazione mista, più a sud, e ad alimentazione assiale, nel settore più settentrionale.

Con riferimento alla cartografia geologica della Regione Emilia-Romagna – Progetto CARG, elaborata secondo i concetti di stratigrafia sequenziale sopraccitati, i depositi affioranti nell'areale di studio possono essere attribuiti al Subsistema di Ravenna, di età olocenica. Questi sono costituiti da sabbie e limi stratificati con copertura di limi argillosi o limi sabbiosi. Lo spessore massimo raggiunto dall'unità è inferiore a 20 m mentre il profilo di alterazione varia da qualche decina di cm fino ad 1 m. Il tetto è rappresentato dalla superficie deposizionale, per gran parte relitta, corrispondente al piano topografico, mentre il contatto di base è discordante sulle unità più antiche.

Tali depositi presentano una stratificazione di tipo cuneiforme, la cui granulometria è in stretto rapporto con l'energia delle correnti fluviali che li hanno originati: i sedimenti grossolani sono il risultato di una deposizione avvenuta in ambiente di canale fluviale, di argine o di rotta, mentre, quelli fini di una sedimentazione per tracimazione avvenuta in zone distali dall'alveo attivo (piana inondabile).

Su base morfologica, archeologica e pedostratigrafica, all'interno del Subsistema di Ravenna, viene distinta un'unità di rango gerarchico inferiore: l'unità di Modena, costituita da una successione sedimentaria la cui deposizione è inquadrabile nell'ambito degli eventi alluvionali che hanno caratterizzato gli ultimi 1.500 anni di storia evolutiva.

2.2 Caratteristiche sismotettoniche

Un elemento fondamentale nella valutazione del rischio sismico di un'area è l'identificazione delle faglie attive. Sebbene esistano, infatti, strutture a scorrimento lento asismico (*fault creep o tectonic creep*), molte delle faglie attive sono considerate sorgenti sismiche in quanto lo scorrimento istantaneo dei due lati delle stesse, che avviene allorché lo stress supera la resistenza delle rocce, genera il rilascio di onde elastiche che si propagano in tutte le direzioni. A tali faglie sismogenetiche è associato il maggior rischio.

Per la definizione di faglia attiva si fa normalmente riferimento alla possibilità che una faglia possa attivarsi in un intervallo di tempo futuro che interessa la nostra società. D'altra parte le faglie che hanno la maggiore probabilità di muoversi in un futuro prossimo sono da ricercarsi tra quelle che si sono mosse nelle fasi più recenti della storia geologica. Così una delle definizioni più comunemente accettata è quella della *U.S Nuclear Regulatory Commission* (1982), che definisce attive le faglie che presentano un'attivazione negli ultimi 35.000 anni o almeno due negli ultimi 500.000 anni.

La Carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna alla scala 1:250.000, oltre alla definizione della pericolosità sismica locale e all'individuazione di strutture potenzialmente sismogenetiche, offre anche un quadro delle relazioni fra attività tettonica attuale e i rischi naturali. In detto lavoro, infatti, l'analisi comparata della sismicità e delle strutture attive, evidenti per la loro espressione sia morfologica che geologica, unitamente ad una riconsiderazione dei dati disponibili sui movimenti verticali del suolo (sollevamento dei terrazzi alluvionali, subsidenza, evoluzione del reticolo idrografico) e alla ricostruzione delle isobate delle 2 principali e più recenti superfici di discontinuità del sottosuolo (rispettivamente 450.000 anni, base del SERS, e 10.000 anni, base dell'Olocene), ha permesso di ottenere un quadro neotettonico e sismotettonico ben definito del territorio indagato.

Esaminando la Fig. 2, che può essere considerata lo schema di sintesi sull'attività neotettonica in Emilia-Romagna, emerge che le zone a maggiore sollevamento, con tassi >1 mm/anno, sono individuabili nella parte alta della catena, corrispondente al settore a monte del principale raddoppio crostale a conferma dell'attività di questa struttura.

L'area a sollevamento intermedio, con tassi mediamente ≥ 1 mm/anno, corrisponde al settore immediatamente retrostante la struttura superficiale del margine che da Bologna si estende verso NW fino alla valle del Taro.

Le aree a minore sollevamento (<1 mm/anno) si collocano immediatamente a valle della struttura crostale.

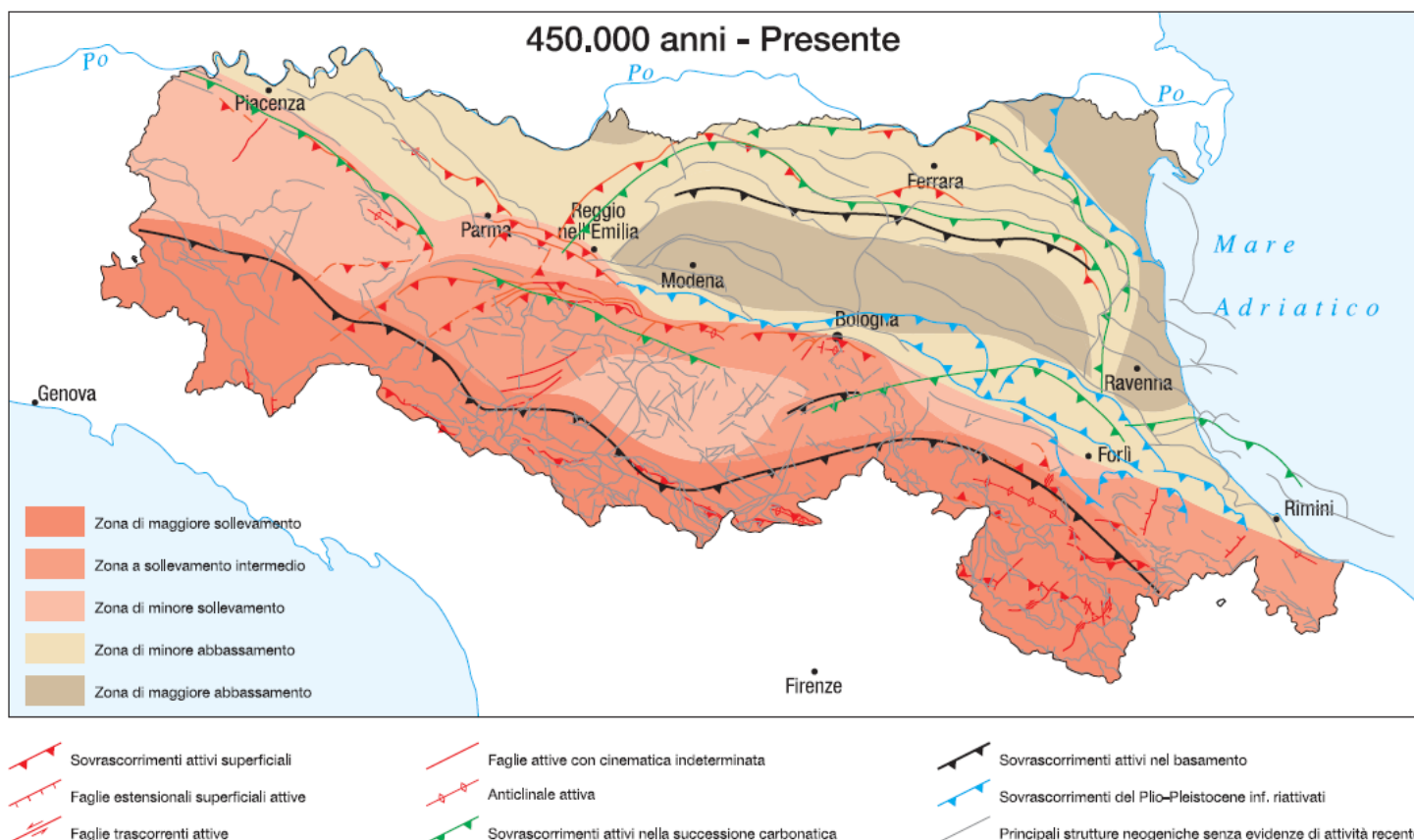


Fig. 2 - Schema di sintesi sull'attività neotettonica in Emilia-Romagna

Anche in pianura le zone di minore abbassamento, con tassi <1 mm/anno, corrispondono alle aree maggiormente interessate dalle strutture attive. Le strutture di questo settore sono sepolte e non mostrano, generalmente, evidenze in superficie.

In particolare, il sistema attivo delle Pieghe Emiliane a nord di Parma corrisponde al limite tra la zona in minore sollevamento della catena con la zona di minore abbassamento della pianura.

La sismicità legata alle strutture superficiali, con ipocentri mediamente ad una profondità inferiore a 15 km, risulta molto diffusa in catena e più localizzata in pianura, soprattutto in corrispondenza della dorsale ferrarese.

I meccanismi focali calcolati risultano compressivi e trascorrenti indicando direzioni di compressione sia NE-SW che NW-SE. I meccanismi focali distensivi sono nettamente secondari. Risulta quindi che la cinematica delle principali strutture attive superficiali è di tipo transpressivo.

La sismicità crostale, con ipocentri mediamente compresi tra 15 e 35 km, mostra una distribuzione simile a quella più superficiale ma con una densità inferiore. Anche in questo caso i meccanismi focali risultano compressivi e trascorrenti con direzioni di compressione sia NW-SE che NE-SW ed i meccanismi distensivi sono rari e ben localizzati.

La sismicità più profonda, con ipocentri oltre i 35 km, fino ad oltre 50 km, è sempre diffusa nel settore di catena e in corrispondenza del margine appenninico-padano, e decisamente minore in pianura. I meccanismi focali calcolati sono in accordo con quanto riscontrato nei livelli strutturali superiori.

Risulta così un modello geodinamico attivo in cui le strutture superficiali della copertura, quelle crostali nonché quelle del mantello, sebbene tra loro distinte, sono tutte coerenti e inquadrabili in un sistema transpressivo che rispetto alle zone esterne dell'avampaese padano, relativamente stabili, assume il significato di un sistema di ordine inferiore all'interno di una zona di trascorrenza destra.

In Fig. 3 è riportata la distribuzione delle strutture attive rispettivamente della copertura, della crosta e del mantello con una zonazione delle aree che maggiormente risentono della loro attività. Per questa zonazione si è tenuto conto anche degli effetti superficiali quali le aree di maggiore sollevamento in catena e di minore abbassamento in pianura, come pure della distribuzione delle aree a maggiore frequenza di fenomeni franosi. Si osserva che il comune di Mezzani non è situato in zona di maggior risentimento degli effetti delle faglie attive.

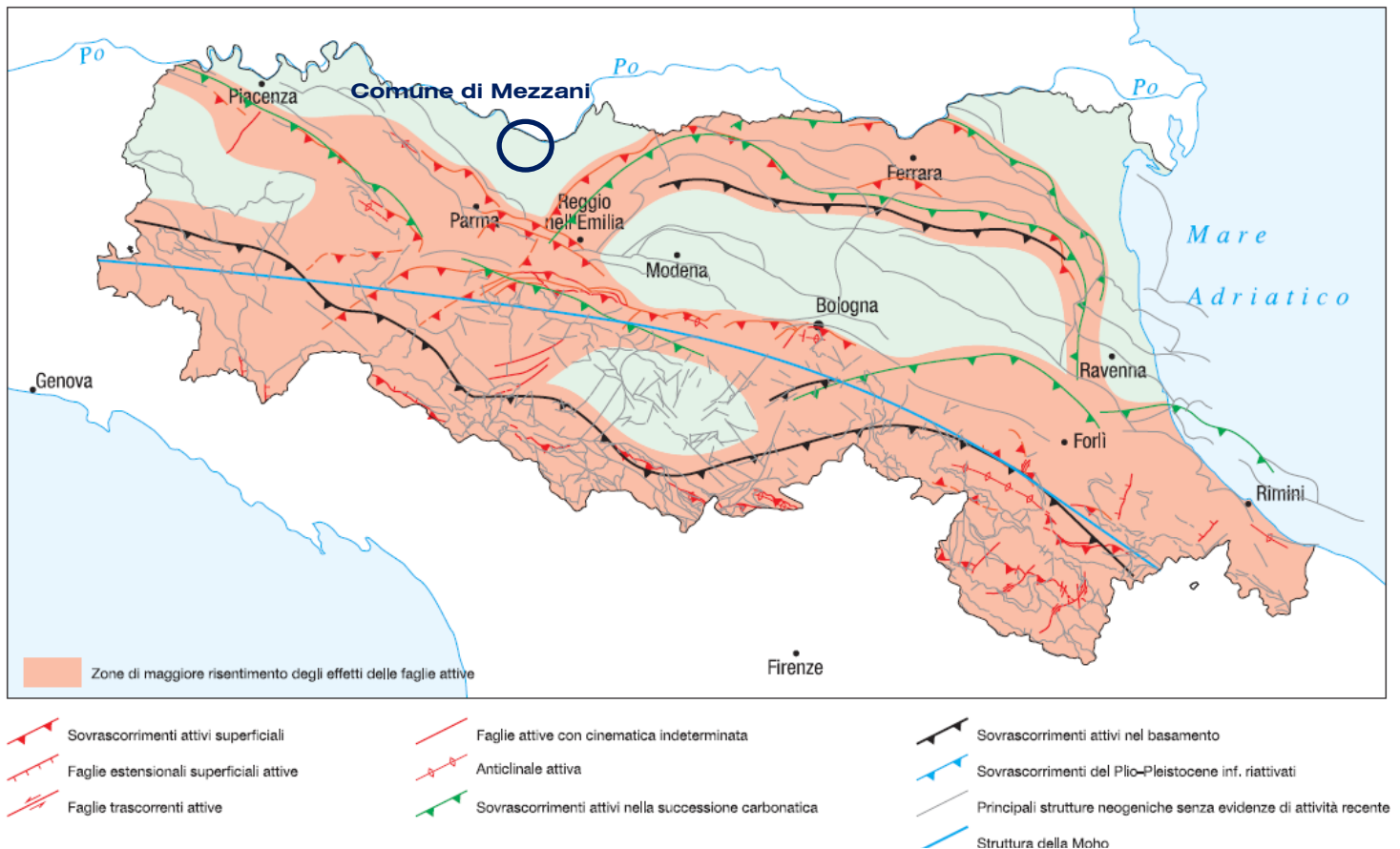


Fig. 3 - Zonazione delle aree che maggiormente risentono delle faglie attive

Lo stralcio della Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna comprendente il Comune di Mezzani è riportato in Fig. 4.

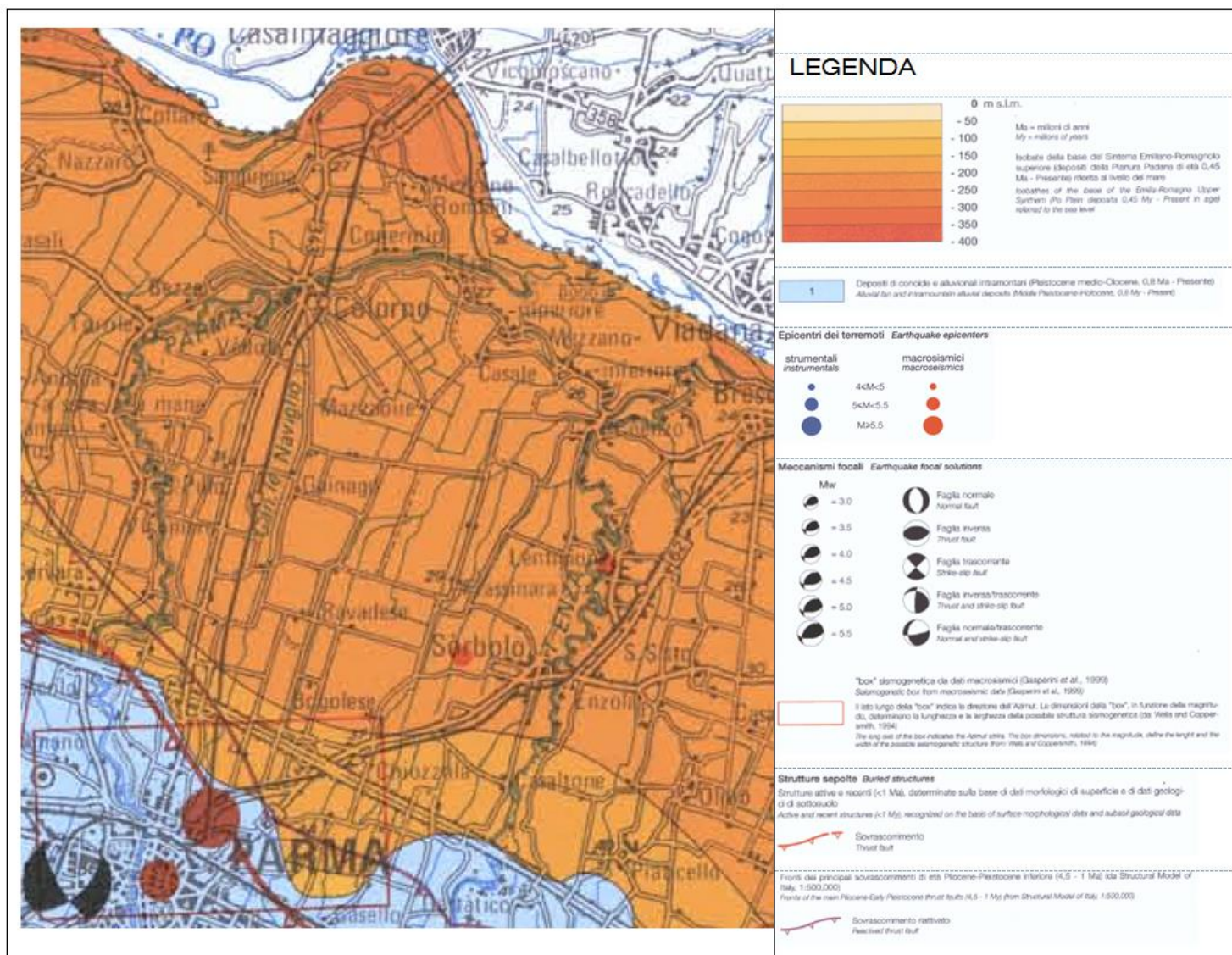


Fig. 4 - Stralcio della Carta sismotettonica della Regione comprendente il Comune di Mezzani

Un elenco delle sorgenti sismogenetiche e delle faglie potenzialmente attive e capaci è contenuto nel DISS 3.2, il database delle sorgenti sismogenetiche italiane, potenzialmente in grado di generare sismi con magnitudo superiore a M 5.5 nell'area Italiana¹.

Con riferimento all'immagine di Fig. 5, le sorgenti sismogenetiche più significative al contorno dell'area in studio sono:

¹ 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, doi:10.1016/j.tecto.2007.04.014

- ITCS009 – Busseto-Cavriago, con magnitudo massima attesa Mw=5.6;
- ITCS049 – Campegine-Correggio, con una magnitudo massima attesa Mw=5.5;
- ITCS112 – Piacenza, con una magnitudo massima attesa Mw=5.5.

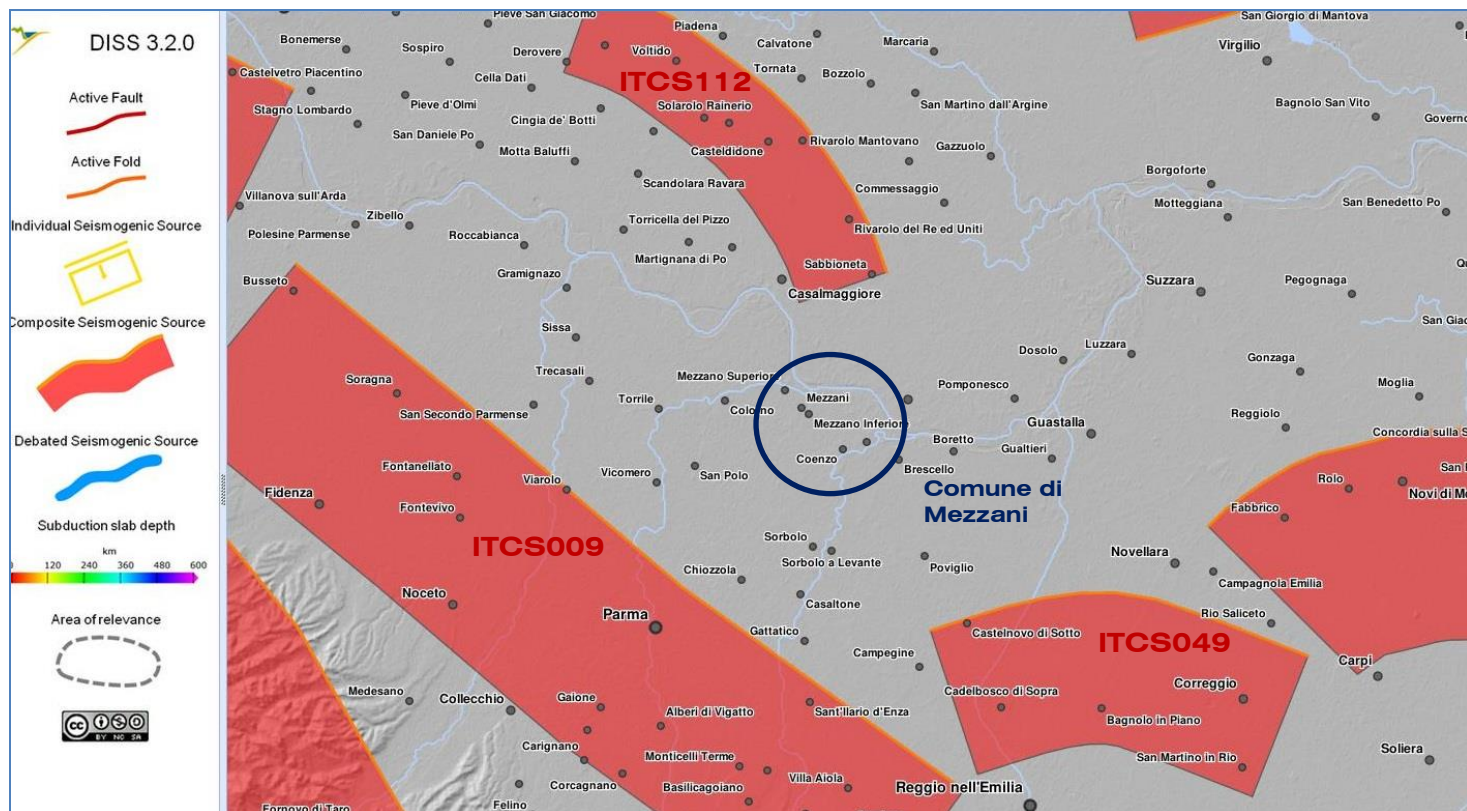


Fig. 5 - Ubicazione delle sorgenti sismogenetiche del DISS 3.2

Allo scopo di associare la sismicità dell'area con i meccanismi responsabili dell'innescio dei terremoti, si è fatto riferimento alla Zonazione Sismogenetica ZS9 (a cura del gruppo di lavoro coordinato da C. Meletti e G. Valensise, 2004).

Tale lavoro, che sostituisce la precedente zonazione ZS4, suddivide il territorio nazionale in fasce contraddistinte da caratteristiche sismotettoniche omogenee (Cfr. Fig. 6). Esso risulta estremamente importante per gli studi pianificazione territoriale e, in particolare, nelle valutazioni di pericolosità sismica.

A corredo degli studi di zonizzazione sono stati raccolti ed analizzati quasi 2.500 terremoti, degli ultimi 1.000 anni, con intensità epicentrale maggiore o uguale al V – VI grado MCS la cui magnitudo è maggiore o uguale a 4.

Come evidenziato in Fig. 6, il Comune di Mezzani ricade una decina di chilometri a nord della zona 913.

La zona 913 è contraddistinta da eventi sismici di bassa magnitudo, a cinematica prevalentemente compressiva, anche se si possono avere fenomeni di trascorrenza nelle zone di svincolo che dissecano la continuità laterale delle strutture. Generalmente, le sorgenti sismiche si distribuiscono a profondità comprese tra i 12 e i 20 Km.

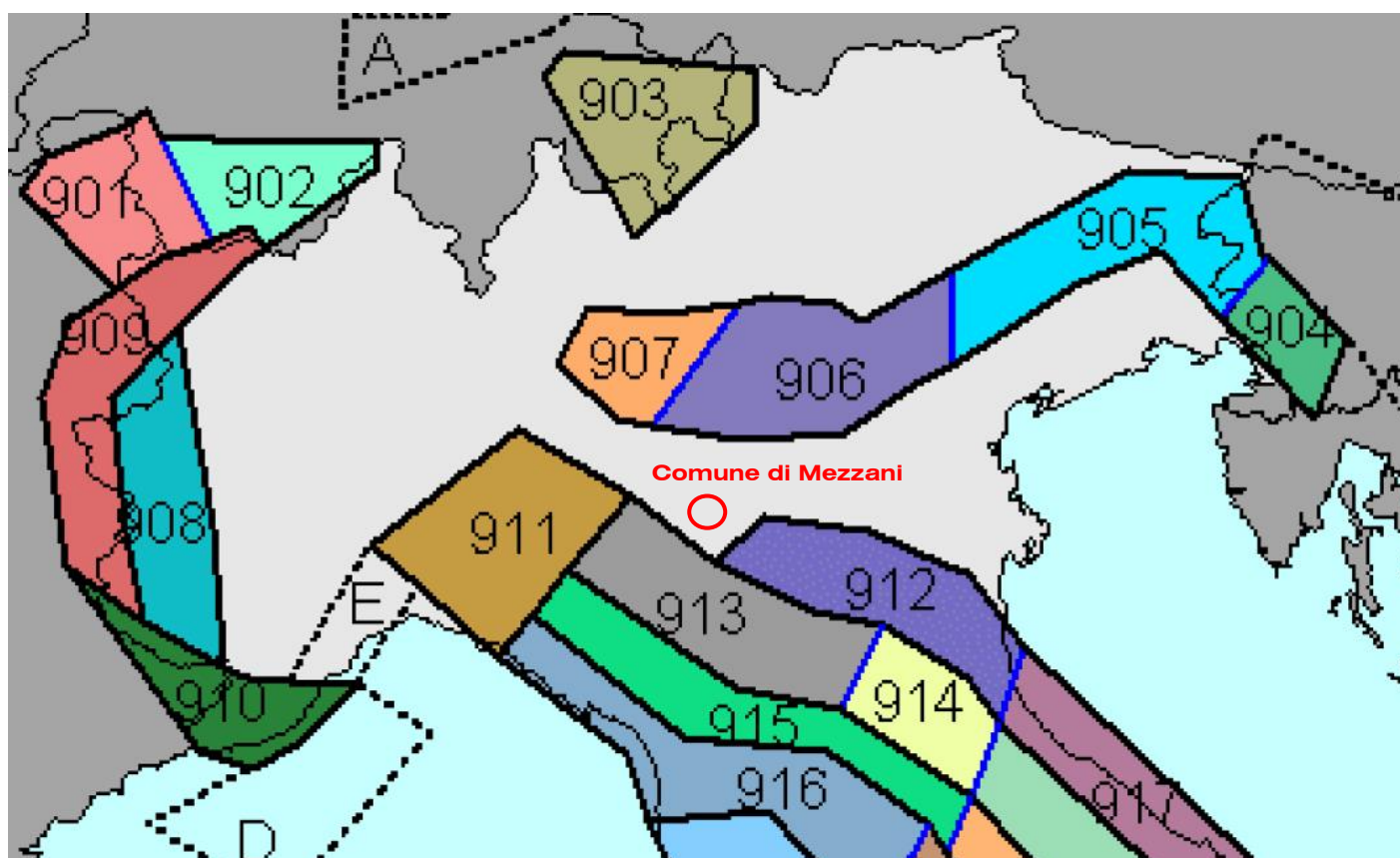


Fig. 6 - Stralcio della Zonazione sismogenetica ZS9 (2004)

2.3 Sismicità del territorio

Nella valutazione della pericolosità sismica di una determinata area occorre, in primo luogo, definire la pericolosità di base attraverso una corretta analisi della sismicità evidenziando, sia la distribuzione spazio-temporale degli eventi, sia le caratteristiche di intensità degli stessi, seguita da una valutazione della pericolosità locale determinata dagli aspetti geologico-morfologici del territorio.

La storia sismica comunale è stata dedotta dal database DBMI15 utilizzato per la compilazione del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15)² aggiornato al 2014, nel quale sono riportate le osservazioni macrosismiche relative all'abitato di Mezzano Inferiore. Essa è riassunta nella Tab. 1, dove sono stati elencati gli eventi di maggior intensità al sito (Int.), indicando, per ciascuno di essi, oltre alla stessa intensità: l'anno, il mese (Me), il giorno (Gi), l'ora (Ho), il minuto (Mi) ed, eventualmente, il secondo (Se), in cui si è verificato, la denominazione dell'area epicentrale, il relativo numero di dati di intensità macrosismica (NMDP), l'intensità massima epicentrale in scala MCS (Io) e la magnitudo momento (Mw).

² Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E. (2016). DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
6	1886	10	15	02	20		Collecchio	44	6	4.70
4-5	1961	08	13	22	34	1	Parmense	22	5-6	4.37
4-5	1961	08	14	01	03	0	Parmense	14	5-6	4.47
6-7	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04

Tab. 1 - Massimi eventi sismici verificatisi in corrispondenza dell'abitato di Mezzano inf.

Dalla lettura di Tab. 1 si evidenzia che il massimo evento sismico censito a Mezzano Inferiore si è verificato 9 novembre 1983, con un'intensità al sito del VI-VII grado della scala MCS.

Fatto salvo quanto sopra, si propone di tenere in considerazione anche quanto indicato nel lavoro elaborato per il Dipartimento dalla Protezione Civile, a cura di D. Molin, M. Stucchi e G. Valensise, "Massime intensità macrosismiche osservate nei comuni italiani", determinate a partire dalla banca dati macrosismici del GNDT e dai dati del Catalogo dei Forti Terremoti in Italia di ING/SGA.

Secondo tale studio, basato in misura prevalente su valori realmente osservati, ma che contiene delle correzioni, per quelle località ove queste si siano rese necessarie, il territorio di Mezzani è stato soggetto a terremoti di intensità massima pari all'VII grado della scala MCS.

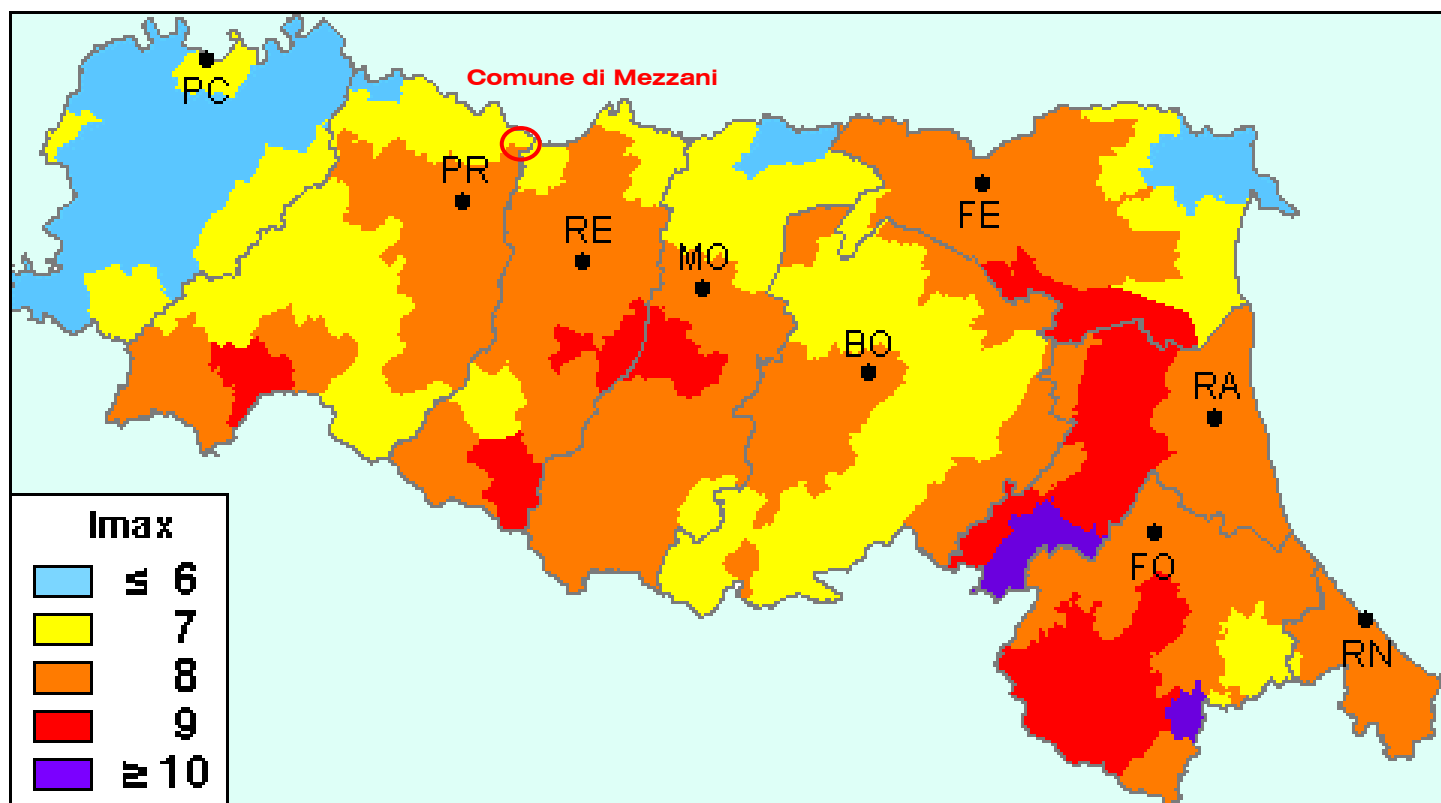


Fig. 7 - Carta della massima intensità macrosismica in Emilia Romagna

2.4 Classificazione sismica comunale

La classificazione sismica dei comuni su tutto il territorio nazionale è stata stabilita dall'Allegato 1, punto 3 dell'Ordinanza n. 3274 del 20 marzo 2003, utilizzando e aggiornando la precedente proposta nel 1998.

La suddivisione è articolata in 4 zone: le prime 3 corrispondono alle zone di sismicità alta (S=12), media (S=9) e bassa (S=6), contemplati nella Legge 64/74, mentre la zona 4 è di nuova introduzione. Ciascuna zona è contraddistinta da un diverso valore dell'accelerazione di picco orizzontale del suolo (ag) con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (Cfr. Tab. 2), eliminando di fatto la presenza di aree del territorio classificate come non sismiche: in questo modo, ad ogni area del territorio nazionale viene attribuito un differente livello di pericolosità sismica.

Zona	Valori massimi di ag
1	>0,25
2	0,15 ÷ 0,25
3	0,05 ÷ 0,15
4	<0,05

Tab. 2 - Valori di accelerazione orizzontale associati a ciascuna zona sismica

La classificazione vigente, identifica il Comune di Mezzani in zona 3 (Cfr. Fig. 8), cui corrispondono valori di accelerazione di picco orizzontale del suolo (ag), con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni, compresi tra 0,05*g e 0,15*g (dove g è l'accelerazione di gravità).

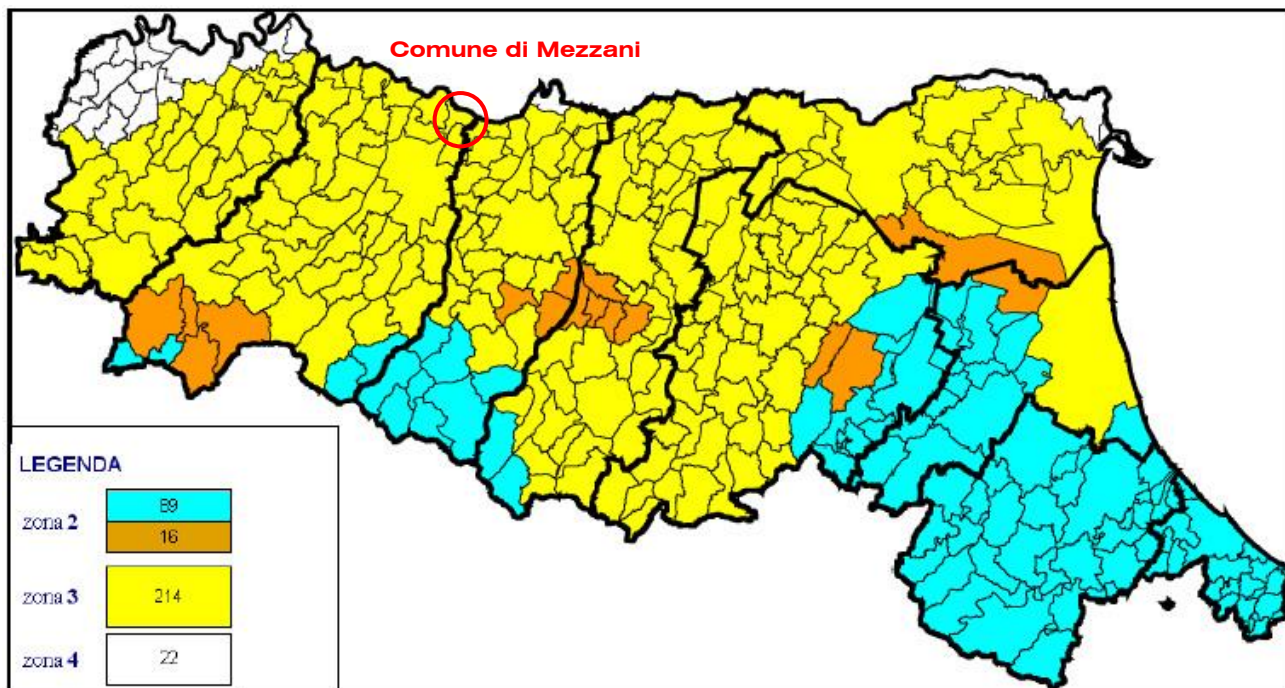


Fig. 8 - Classificazione sismica dei comuni della regione Emilia Romagna

Risulta opportuno evidenziare che, con l'entrata in vigore del decreto ministeriale 14 gennaio 2008 recante "Norme Tecniche per le Costruzioni", la stima della pericolosità sismica, non è più associata alla zona sismica di appartenenza, ma al valore di accelerazione massima orizzontale attesa su base probabilistica su uno specifico sito.

Ciò ha permesso di superare la differenza tra valori di accelerazione previsti dagli studi di pericolosità sismica a scala nazionale e valori previsti dalla normativa antisismica per un suolo di riferimento.

Con l'obiettivo di ridurre il rischio sismico in adempimento agli obblighi della normativa nazionale, la Regione Emilia-Romagna, con Deliberazione dell'Assemblea legislativa n. 112 del 2 maggio 2007, ha approvato l'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della L.R. 20/2000 "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio", in merito a "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica". L'atto di indirizzo è stato recentemente aggiornata con DGR n° 2193/2015.

Scopo di tale documento è quello di fornire i criteri per la per l'individuazione delle aree soggette ad effetti locali e per la microzonazione sismica del territorio in modo da orientare le scelte della pianificazione verso aree caratterizzate da minore pericolosità sismica.

In esso si afferma che la componente pericolosità del rischio sismico dipende sia dalle caratteristiche sismiche dell'area, cioè dalle sorgenti sismiche, dall'energia, dal tipo e dalla frequenza dei terremoti (aspetti comunemente indicati come "pericolosità sismica di base") sia dalle caratteristiche geologiche e morfologiche del territorio, in quanto alcuni depositi e forme del paesaggio possono modificare le caratteristiche del moto sismico in superficie e costituire aspetti predisponenti al verificarsi di effetti locali quali fenomeni di amplificazione o di instabilità dei terreni (aspetti comunemente indicati come "pericolosità sismica locale").

Conseguentemente gli studi della pericolosità sismica hanno come obiettivo:

- l'individuazione delle aree dove in occasione dei terremoti attesi possono verificarsi effetti locali;
- la stima quantitativa della risposta sismica locale dei depositi e delle morfologie presenti nell'area di indagine (Analisi della Risposta Sismica Locale, RSL);
- la suddivisione del territorio in sottozone a diversa pericolosità sismica locale (Microzonazione Sismica, MZ).

Per questi studi sono previsti i 3 diversi livelli di approfondimento indicati nell'introduzione al presente documento

3. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

I dati elaborati in questa sede derivano:

- dalla raccolta ed elaborazione di quanto disponibile presso l'Ufficio Tecnico Comunale;
- da un'apposita campagna d'indagini, attuata allo scopo di completare ed arricchire adeguatamente la conoscenza della specifica situazione locale.

Delle 153 indagini geotecniche e geofisiche acquisite (sondaggi, penetrometrie e prove geofisiche), 104 provengono dall'archivio del Comune di Mezzani, mentre I restanti 48 derivano da prove in sito effettuate nell'ambito della presente indagine.

La ricerca effettuata presso l'archivio dell'Ufficio Tecnico Comunale si è rivelata particolarmente fruttuosa, in quanto è stato possibile esaminare numerose relazioni geologiche, prodotte a corredo di progetti edilizi e di opere pubbliche, e trarre copia, con l'autorizzazione comunale, delle indagini geognostiche eseguite.

Ad integrazione dei dati esistenti è stata progettata ed eseguita una specifica campagna di indagine.

Più in particolare sono state eseguite:

- N° 1 sondaggi a carotaggio continuo,
- N° 4 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)
- N° 3 prove penetrometriche statiche con piezocono e cono sismico (SCPTU)
- N° 1 prova Down-Hole
- N° 40 stazioni di microtremore a stazione singola (HVSR)

L'insieme degli elementi geologici e geofisici così acquisiti, unitamente alle informazioni presenti nella letteratura ed ai risultati dei numerosi sopralluoghi effettuati nel territorio in studio, hanno permesso di ricostruire il modello geologico delle aree interessate dallo studio di microzonazione sismica.

Tutti i dati sono stati inoltre trasformati in formato digitale con modalità georiferita, al fine di consentirne l'elaborazione in ambiente GIS e sono stati organizzati in formato vettoriale (*shapefile*) nel rispetto delle specifiche tecniche di riferimento.

4. MODELLO DEL SOTTOSUOLO

La base per uno studio di microzonazione sismica è la definizione, quanto più accurata possibile, del modello geologico del sottosuolo, cercando di individuare come varia la successione stratigrafica all'interno delle aree in esame e a che profondità si possa trovare il substrato rigido.

A tale scopo, per il Comune di Mezzani, sono stati esaminati e confrontati tra loro tutti i dati geognostici raccolti oltre a differenti cartografie tematiche, con scale di diverso grado di dettaglio.

Rimandando al paragrafo 7.2 la descrizione specifica delle caratteristiche del territorio oggetto del presente studio, di seguito, ci si limita a proporre alcune considerazioni su come il complesso assetto geologico rilevato possa modificare il moto sismico in superficie e quali problematiche comporti per la determinazione degli effetti locali.

Nel complesso la fascia di bassa pianura in cui ricade il Comune di Mezzani, è caratterizzata dalla presenza di una coltre superficiale di depositi prevalentemente fini (limi e argille), di spessore via via crescente spostandosi da nord verso sud, passando da qualche metro nelle zone prossime all'argine maestro ad oltre 20 metri sul limite meridionale del Comune.

Tale coltre ricopre depositi sabbiosi di spessore decametrico attribuibili alla sedimentazione operata dal fiume Po.

A fronte di tale assetto litostratimetrico, le indagini tomografiche effettuate non hanno evidenziato nelle curve H/V picchi di ampiezza elevata, associabili a netti contrasti di impedenza (ovvero, significativi aumenti di V_s nei profili di velocità delle onde di taglio delle indagini eseguite) al passaggio tra argille e primo livello di sabbie.

Viceversa, si notano spesso picchi a frequenze molto alte, corrispondenti al passaggio suolo/sottosuolo e inversioni di velocità coincidenti con la base della copertura sovraconsolidata (va sottolineato che le prove tomografiche sono state effettuate durante un periodo siccitoso) che mascherano superfici d'impedenza più profonde.

Tali caratteristiche hanno, ovviamente, condizionato la definizione del *bedrock* sismico come sarà descritto nel prosieguo della presente relazione.

5. INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

Come già indicato, il presente studio, oltre ad utilizzare una grande quantità di dati progressi, ha previsto l'esecuzione di una nuova campagna d'indagini sismiche.

La caratterizzazione dei terreni è stata effettuata anche tramite la tecnica sismica passiva (tecnica dei rapporti spettrali) o HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*).

A riguardo nel database, per ciascuna prova, è riportato il grafico rapporto spettrale H/V naturale con curva H/V sintetica, in cui si possono osservare picchi caratteristici, in corrispondenza di determinate frequenze (cfr. Fig. 9).

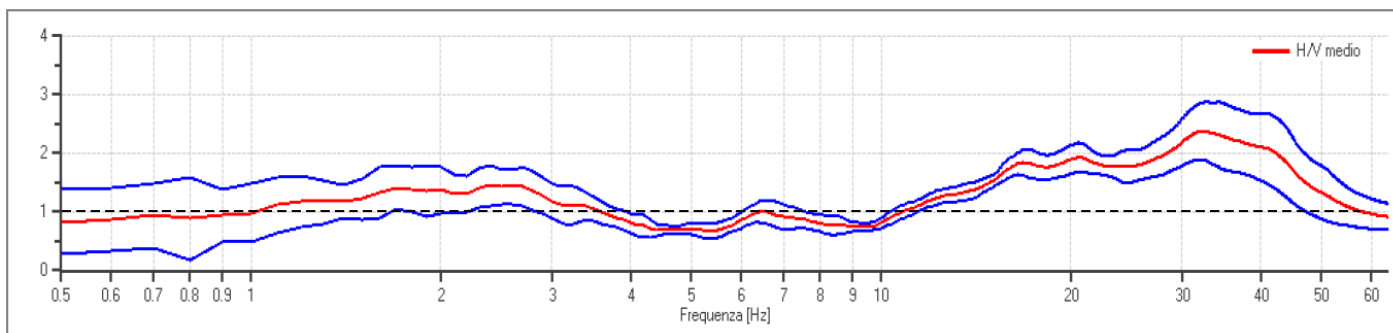


Fig. 9 - Esempio di curva H/V naturale con curva H/V sintetica

Al fine di determinare la qualità delle singole misure HVSR effettuate e la loro relativa affidabilità, si è provveduto alla classificazione delle prove valutando, in accordo con i più recenti studi in materia, le caratteristiche dei fondamentali principi su cui si basa la tecnica di indagine a sismica passiva utilizzata.

Nello specifico si è proceduto all'analisi della durata complessiva delle singole registrazioni, utilizzando esclusivamente quelle capaci di produrre stime "robuste" del campo medio delle vibrazioni ambientali, soddisfacendo in tal senso i primi 3 criteri del progetto SESAME (linee guida 2005), relativi alla robustezza statistica del segnale. Quindi, per ogni singola acquisizione è stato valutato l'andamento complessivo della curva H/V, prestando particolare attenzione, durante la fase di elaborazione, alla plausibilità fisica della curva stessa, verificabile attraverso l'individuazione di massimi caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale.

In fase di elaborazione, sfruttando le possibilità di analisi direzionale e temporale del software utilizzato (*EasyHVSR di Geostru*), è stata valutata la stazionarietà temporale dei rapporti spettrali misurati, prestando inoltre particolare attenzione alle variazioni azimuthali di ampiezza, nel rispetto della condizione di isotropia del segnale.

Quanto ai criteri delle linee guida SESAME 2005 relativi alla "chiarezza" del picco di possibile risonanza, essi risultano spesso non soddisfatti per i motivi già anticipati nel capitolo 4.

6. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Nella prima fase di lavoro, relativamente agli areali da sottoporre allo studio di Microzonazione Sismica, ovvero l'intero territorio urbanizzato ed urbanizzabile, sono stati acquisiti dati bibliografici e di archivio, sono stati condotti rilievi sul territorio ed è stata analizzata la cartografia geologica e geomorfologica disponibile.

Successivamente è stata eseguita una campagna di indagini geofisica, ai fini della definizione delle frequenze fondamentali dei terreni.

Gli elaborati prodotti in questa prima fase sono costituiti da:

- **Carta delle indagini:** in tale cartografia sono riportate le indagini pregresse e quelle di nuova esecuzione; tutte le prove sono state classificate in base alla tipologia;
- **Carta geologico-tecnica:** tale carta è stata derivata dalla revisione a scala dettagliata dei rilievi disponibili. In questa cartografia sono rappresentati gli elementi geologici e morfologici che possono modificare il moto sismico in superficie;
- **Carta delle frequenze naturali dei terreni:** tale carta riporta i punti di misura e i risultati di indagini di sismica passiva (misure HVSR); in particolare, sono stati indicati il valore F_0 del picco significativo, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale (frequenza principale) e, quando presente, di un secondo picco significativo (frequenza secondaria), meno evidente del primo (F_1). In entrambi i casi sono stati presi in considerazione solo i picchi ricadenti nell'intervallo di frequenza $0,1 \div 20$ Hz;
- **Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica:** in questa cartografia sono indicate le aree in cui si ritiene necessario effettuare indagini e analisi di microzonazione sismica e i livelli di approfondimento ritenuti necessari, distinguendo tra zone suscettibili di instabilità e zone suscettibili di amplificazioni locali, all'interno delle quali sono state operate ulteriori distinzioni, identificando delle microzone omogenee, sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche.

Successivamente e in diretta continuità con la prima, è stata svolta la seconda fase di lavoro, nel corso della quale è stato redatto un solo elaborato:

- **Carta delle velocità delle onde di taglio S:** carta in cui sono ubicati tutti i punti di misura di V_s con indicazione, per ogni punto misura, del valore di V_{s30} .

Infine, è stata effettuata l'analisi con approfondimenti di terzo livello che ha consentito di definire, sulla base di analisi di risposta sismica locale, degli spettri elastici di

risposta in superficie (*output*), rappresentativi delle singole zone, di valutare il grado di pericolosità delle aree instabili e potenzialmente tali e di effettuare una zonazione più affidabile delle amplificazioni locali.

In questa fase sono stati prodotti i seguenti elaborati cartografici:

- Carta di microzonazione sismica FA_{PGA} (scala 1:10.000);
- Carta di microzonazione sismica $FA_{IS\ 0,1 - 0,5\ s}$ (scala 1:10.000);
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{IS\ 0,5 - 1,0\ s}$ (scala 1:10.000).
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{IS\ 0,5 - 1,5\ s}$ (scala 1:10.000).

7. ELABORATI CARTOGRAFICI DI PRIMO E SECONDO LIVELLO

7.1 Carta delle indagini

Nella Carta delle indagini, alla scala 1:10.000, sono state riportate le ubicazioni delle prove di nuova esecuzione e dei dati pregressi, relativi a indagini geognostiche e/o sismiche a corredo di pratiche edilizie depositate presso l'Ufficio Tecnico Comunale, oltre a quelle contenute nel database fornito dal Servizio Geologico Regionale.

Esse sono state distinte in base alla tipologia in:

- sondaggio a carotaggio continuo
- sondaggio da cui sono stati prelevati dei campioni
- prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)
- prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU)
- prova penetrometrica statica con piezocono e cono sismico (SCPTU)
- prova penetrometrica dinamica media
- MASW
- profilo sismico a rifrazione
- stazione microtremore a stazione singola

come raffigurato nella legenda riportata in Fig. 10.

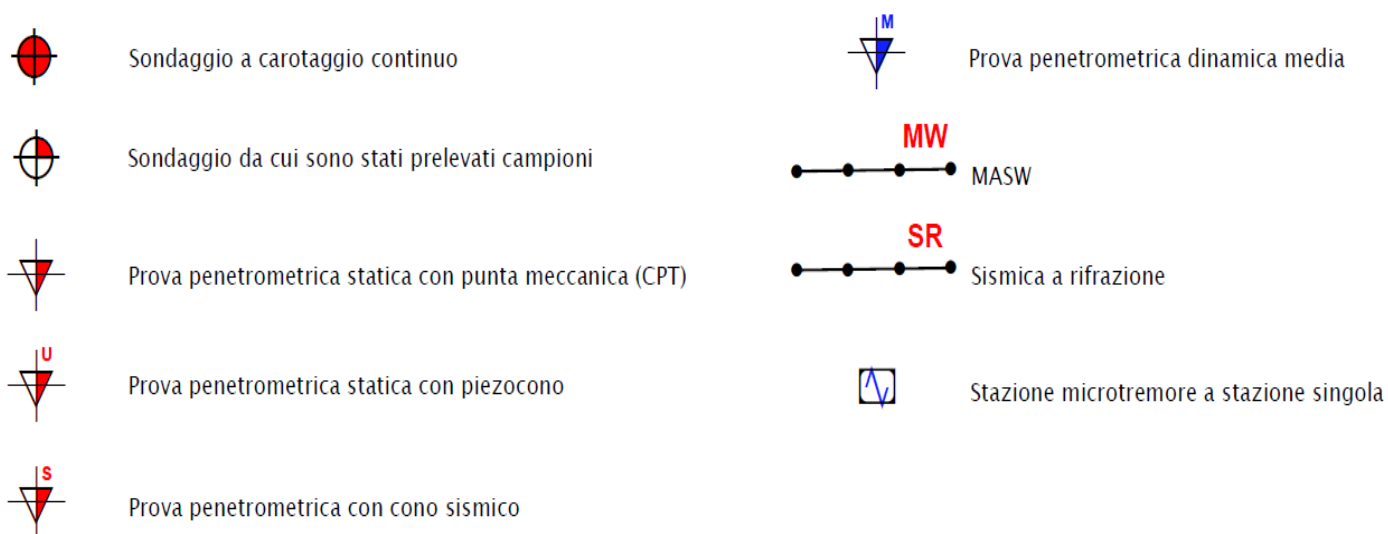


Fig. 10 – Legenda delle Carte delle indagini

Nella carta sono indicate anche alcune indagini esterne ai perimetri del territorio urbanizzato e urbanizzabile, ove sono state concentrate le analisi, ma ugualmente utili a definire le sue caratteristiche litostratigrafiche.

Complessivamente, presso l'Ufficio Tecnico Comunale, sono state acquisite le seguenti indagini:

- N° 2 sondaggi a carotaggio continuo
- N° 1 sondaggi da cui sono stati prelevati dei campioni
- N° 69 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)
- N° 4 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)
- N° 6 prove penetrometriche dinamiche medie
- N° 9 MASW
- N° 1 profili sismici a rifrazione

Ad integrazione di tali dati, è stata progettata ed eseguita una specifica campagna di indagine costituita da:

- N° 1 sondaggi a carotaggio continuo,
- N° 4 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)
- N° 3 prove penetrometriche statiche con piezocono e cono sismico (SCPTU)
- N° 1 prova Down-Hole
- N° 40 stazioni di microtremore a stazione singola (HVSr)

7.2 Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica

Nella Carta geologico-tecnica sono state riportate le informazioni di base (geologia, geomorfologia, caratteristiche litotecniche, geotecniche e idrogeologiche) derivate da elaborati esistenti e da indagini geognostiche pregresse.

Questi dati hanno consentito di definire il modello di sottosuolo e sono risultate funzionali alla realizzazione delle Carte delle microzone omogenee in prospettiva sismica (Livello 1), che saranno descritte nel successivo paragrafo 7.4.

Nel presente studio, per la stesura della Carta geologico tecnica, si è fatto riferimento, in particolare, alla seguente documentazione, opportunamente verificata mediante sopralluoghi di campagna:

- elaborati del Quadro Conoscitivo del Piano strutturale Comunale Vigente;
- "Carta Geologica d'Italia" alla scala 1: 50.000, Foglio 182 "Guastalla" realizzato secondo le normative del Progetto CARG;
- Carta Geologica di Pianura dell'Emilia-Romagna, alla scala 1:250.000, realizzata dalla Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli Regione della Emilia-Romagna;

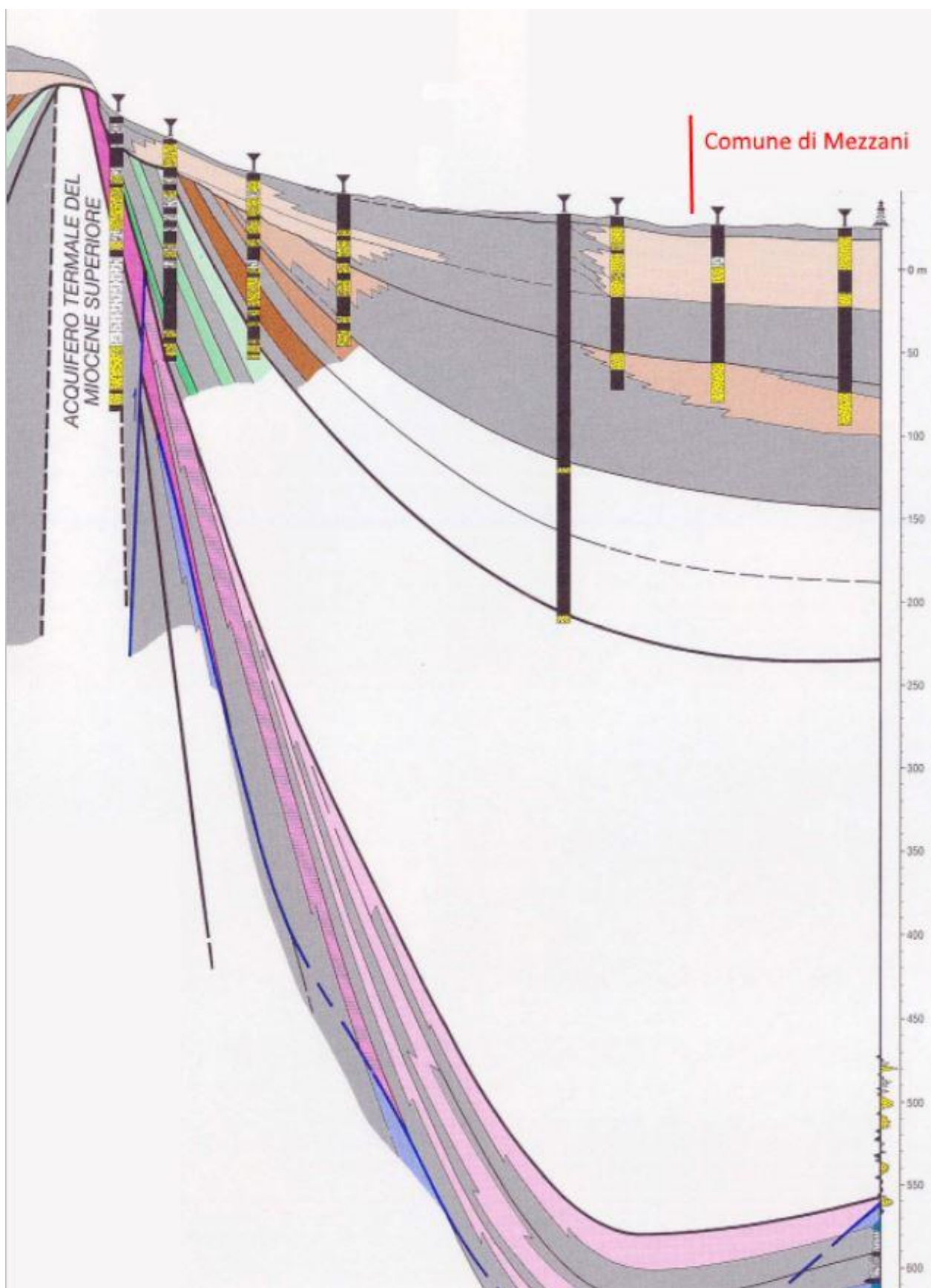


Fig. 12 - Stralcio della Sezione n. 25 tratta da sito del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna

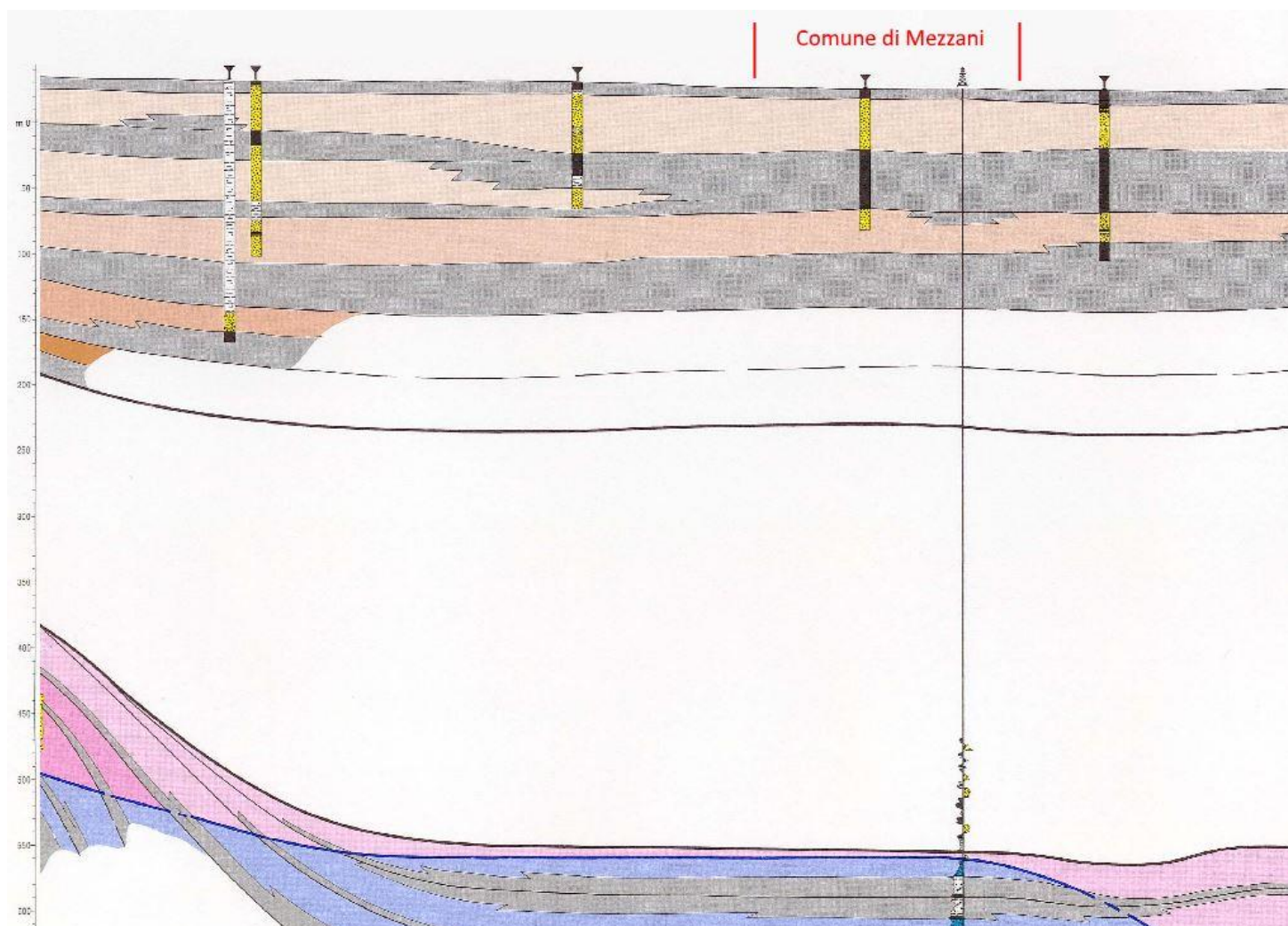


Fig. 13 - Stralcio della Sezione n. 32 tratta da sito del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna

Dall'esame di tali sezioni e delle altre informazioni raccolte, si osserva che il sottosuolo del territorio indagato, in estrema sintesi, presenta le seguenti caratteristiche:

- il Sintema Emiliano-Romagnolo Sup. è costituito dalla sovrapposizione di cicli deposizionali di spessore pluridecamentrico, composti da una porzione fine (limi, argille e localmente sabbie) ed una grossolana costituita da sabbie prevalenti. Questa ciclicità riflette una variazione dell'energia deposizionale fluviale, che aumenta con la sedimentazione grossolana e diminuisce con la fine.
- La disattivazione dei sistemi fluviali avviene bruscamente proprio al tetto dei depositi sabbiosi più continui arealmente e, spesso, si manifesta con la presenza di argille ricche di sostanza organica, che costituiscono la base del ciclo con trend trasgressivo-regressivo. Al di sopra di esse seguono depositi fini di tracimazione fluviale, in cui le sabbie di canale sono presenti come corpi lenticolari. Superiormente

la sedimentazione sabbiosa aumenta e la parte terminale del ciclo è data dalla massima espansione della sedimentazione sabbiosa.

- La base del primo ciclo sedimentario (Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore - AES), caratterizzato dall'alternanza di livelli fini e livelli sabbiosi, quest'ultimi aventi potenza generalmente di 20÷30 metri, si colloca alla profondità di circa 250 m dal p.c.. I sedimenti sabbiosi, riconducibili alla deposizione operata dal fiume Po, sono quasi affioranti nel settore più settentrionale del territorio comunale, mentre, spostandosi verso sud, si rinvengono sotto una coltre superficiale di sedimenti fini (limi e argille), di spessore via via crescente fino ad oltre 20 metri sul limite meridionale del Comune.
- La base del secondo ciclo sedimentario (Sistema Emiliano-Romagnolo Inferiore - AEI) raggiunge profondità di oltre 500 m di dal p.c.
- Al di sotto del potente pacco di depositi alluvionali, il substrato marino plio-pleistocenico è costituito da depositi sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi di ambiente costiero, che ricopre a sua volta la formazione delle Argille Azzurre.
- Le sezioni evidenziano che, nella zona in esame, l'azione deformativa esercitata dalle strutture sepolte, sui depositi marini e continentali sovrastanti, è stata estremamente limitata.

Nelle Carta geologico tecnica sono rappresentate le caratteristiche litologiche dei terreni presenti nei primi 5 metri di profondità dal p.c., classificati sulla base della tessitura prevalente. Dovendo attenersi agli standard di rappresentazione dettati dagli SRAI, sono state distinte, sulla base delle caratteristiche tessiturali, le seguenti unità di terreni di copertura:

- **SM** - *Sabbie limose, miscela di sabbie e limo*: sono state cartografate nel settore settentrionale del territorio comunale, all'interno degli abitati di Mezzano, Mezzano Superiore e Mezzano Inferiore.
- **ML** - *Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità*: si rinvengono, oltre che in corrispondenza degli abitati sopraccitati, anche a Bocca d'Enza e nel settore settentrionale dell'abitato di Casale.
- **CL** - *Argille inorganiche di media-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre*: caratterizzano il settore meridionale del territorio comunale, interessando gran parte dell'abitato di Casale.

Sono stati altresì indicati gli ambienti genetico - deposizionali dei terreni di copertura secondo le seguenti classi:

- **pi** - piana inondabile;
- **es** - argini, barre, canali.

Infine nella Carta geologico-tecnica sono stati indicati i pozzi e i sondaggi profondi (che, comunque, non hanno mai intercettato il substrato geologico), indicandone la

profondità raggiunta e sono stati riportati i valori di soggiacenza della falda freatica, necessari alla successiva definizione delle zone potenzialmente instabili per fenomeni liquefazione.

7.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni

Sulla base di tutti i dati tomografici disponibili, sia pregressi, sia di nuova acquisizione, è stata redatta la Carta delle frequenze naturali dei terreni, sempre a scala 1:10.000.

In questa carta sono stati riportati tutti i punti di misura (40), con associati i risultati delle singole prove. In particolare, sono stati indicati il valore F_0 del picco significativo, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale (frequenza principale) e, quando presente, di un secondo picco significativo (frequenza secondaria), meno evidente del primo (F_1).

Sono stati tralasciati i picchi con frequenze superiori ai 20 Hz, in quanto di scarso significato ai fini del presente studio.

Gli indirizzi tecnici a cui si è fatto riferimento prescrivono, per rendere graficamente più evidenti le variazioni in relazione alla posizione, di utilizzare colorazioni differenti per distinguere le prove a seconda della frequenza principale ottenuta, definendo le seguenti classi:

- $F_0 \leq 0,6$ Hz
- $0,6 \text{ Hz} < F_0 \leq 1$ Hz
- $1 \text{ Hz} < F_0 \leq 2$ Hz
- $2 \text{ Hz} < F_0 \leq 8$ Hz
- $F_0 > 8$ Hz

Inoltre, sono state utilizzate simbologie diverse a seconda che la prova sia caratterizzata, in corrispondenza della frequenza principale, da un contrasto di impedenza elevato (ampiezza picco $HVSR \geq 3$), moderato (ampiezza picco $2 \leq HVSR < 3$), basso (ampiezza picco $1,5 \leq HVSR < 2$) o non significativo (ampiezza picco $H/V \leq 1,5$).

Dalla lettura della Carta delle frequenze naturali dei terreni, si osserva che, in Comune di Mezzani, predominando le prove appartenenti alla classe $F_0 > 8$ Hz, conseguenza del fatto che, come già anticipato nel capitolo 4, spesso registrano netti aumenti nel profilo delle Vs al passaggio suolo/sottosuolo, oltre a inversioni di velocità coincidenti con la base della copertura sovraconsolidata, in grado di mascherare superfici d'impedenza più profonde.

Ciononostante non è possibile effettuare una zonazione del territorio in classi di frequenza, in quanto, sono presenti anche numerose prove, che non hanno "disturbi" superficiali, con picchi a frequenze più basse.

7.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica

La Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS), rappresenta il documento fondamentale del primo livello di approfondimento.

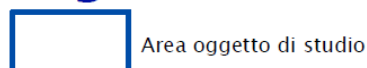
In questa cartografia il territorio in esame viene distinto a seconda dell'appartenenza a una delle seguenti 3 categorie:

- 1. zone stabili.** Si tratta di zone con affioramento di un substrato rigido e morfologia pianeggiante o poco acclive, nelle quali non si ipotizzano effetti locali di alcuna natura e in cui non sono richiesti ulteriori approfondimenti.
- 2. zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.** Si tratta di aree in cui sono attese amplificazioni del moto sismico, causate dall'assetto litostratigrafico e/o morfologico locale.
- 3. zone di attenzione per instabilità.** Si tratta di zone nelle quali effetti sismici attesi e predominanti, oltre i fenomeni di amplificazione, sono riconducibili a deformazioni permanenti del territorio, quali liquefazioni e densificazione.

Dalla lettura delle Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica si osserva che, in corrispondenza delle aree esaminate in Comune di Mezzani, non sono mai presenti né la categoria 1 – zone stabili, né la categoria 2 – zone stabili suscettibili di amplificazioni locali. Invece, come si può osservare nella legenda riportata in Fig. 14, sono state individuate:

- n° 2 tipologie di Zone di attenzione per instabilità
 - ZALQ – Zona di attenzione per liquefazioni – Zona 1, cartografata in corrispondenza degli abitati di Bocca d'Enza, Mezzano, Mezzano Superiore, Mezzano Inferiore, Mezzano Rondani e della porzione settentrionale dell'abitato di Casale; è caratterizzata da una successione stratigrafica costituita da alternanze di depositi limo-sabbiosi e limo-argillosi presenti sino a quote variabili da -2,00 a -5,00 m da p.c., che ricoprono un livello sabbioso e sabbioso-ghiaioso, dello spessore di circa 30 metri.
 - ZALQ – Zona di attenzione per liquefazioni – Zona 2, è la zona che caratterizza gran parte dell'abitato Casale, con eccezione del settore più settentrionale; è caratterizzata da una successione stratigrafica costituita da depositi argilloso-limosi, presenti sino alla quota di circa -10,00÷-12,00 m da p.c., che ricoprono un livello sabbioso dello spessore di circa 30 metri con locali intercalazioni lenticolari di sedimenti limo-argillosi.

Legenda

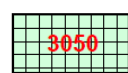


Area oggetto di studio



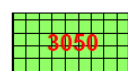
Confine comunale

Zone di attenzione per l'instabilità



ZALQ: zona di attenzione per liquefazioni – Zona 1

successione stratigrafica costituita da alternanze di depositi limo-sabbiosi e limo-argillosi presenti sino a quote variabili da -2,00 a -5,00 m da p.c., che ricoprono un livello sabbioso e sabbioso-ghiaioso, dello spessore di circa 30 metri.



ZALQ: zona di attenzione per liquefazioni – Zona 2

successione stratigrafica costituita da depositi argilloso-limosi, presenti sino alla quota di circa -10,00÷-12,00 m da p.c., che ricoprono un livello sabbioso dello spessore di circa 30 metri con locali intercalazioni lenticolari di sedimenti limo-argillosi.

Fig. 14 – Legenda della Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica

In Fig. 15 sono rappresentati i profili stratigrafici caratteristici delle 2 microzone sopradescritte.

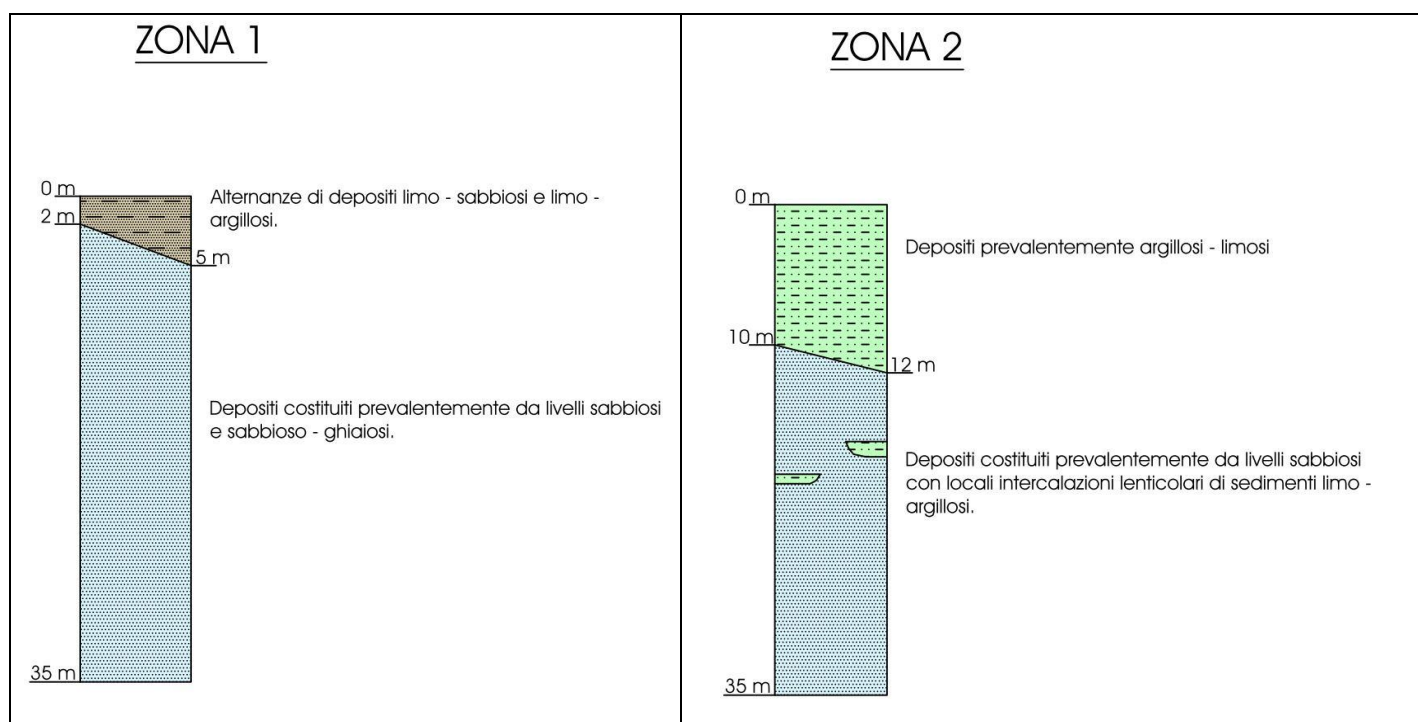


Fig. 15 – Colonne litostratigrafiche sintetiche, rappresentative della microzone

7.5 Carte delle velocità delle onde di taglio S

In ottemperanza ai riferimenti tecnici citati nelle premesse, è stata redatta per le aree oggetto di studio la Carta delle velocità delle onde di taglio S (V_s).

In tale elaborato sono ubicati tutti i punti di misura, distinguendoli a seconda della tipologia di prova effettuata (prova Down-Hole, cono sismico MASW) e indicando il corrispondente valore di V_{s30} (in m/s), dove:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{V_{s_i}}}$$

h_i = spessore (in metri) dello strato i-esimo (fino alla profondità di 30 m);
 V_{s_i} = velocità (in m/s) dello strato i-esimo (fino alla profondità di 30 m).

Non sono stati indicati valori di V_{sH} in quanto si è ipotizzato che il substrato rigido sia localizzato a profondità maggiori di 50 metri, in considerazione del fatto che nelle misure HVSR non sono stati riscontrati picchi H/V significativi alle medie frequenze.

Legenda



Area oggetto di studio



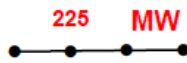
Confine comunale



Prova sismica in foro down hole con indicato il valore di V_{s30}



Prova penetrometrica con cono sismico con indicato il valore di V_{s30}



MASW con indicato il valore di V_{s30}

Fig. 16 – Legenda della Carta delle velocità delle onde di taglio S (V_s)

Per la stesura di questa carta sono state utilizzate le indagini reperite nell'archivio comunale, allegate a pratiche edilizie e le prove geofisiche di nuova esecuzione realizzate a supporto del presente studio di microzonazione sismica.

Facendo riferimento, in particolare, ai risultati delle indagini di nuova esecuzione, dalle cartografie è possibile osservare valori di V_{s30} che risultano ricompresi nel *range* 198 ÷ 341 m/s

8. APPROFONDIMENTI DI TERZO LIVELLO

8.1 Area considerata

Gli approfondimenti di terzo livello sono stati eseguiti su tutte le aree indagate per quanto riguarda il rischio di liquefazione, mentre le valutazioni di risposta sismica locale sono state effettuate esclusivamente in corrispondenza del sondaggio, laddove, cioè, era disponibile un'adeguata conoscenza di tutti i parametri necessari a definire il modello geofisico del sottosuolo.

8.2 Risposta sismica locale

Di seguito vengono fornite alcune informazioni di carattere generale sulle procedure di valutazione di risposta sismica locale. Nei successivi paragrafi, saranno, poi, illustrati i risultati di dettaglio della RSL.

8.2.1 Pericolosità sismica di base

Nel caso della valutazione della risposta sismica locale di 3° livello nell'ambito della microzonazione sismica i parametri di riferimento (PGA su suolo di categoria A, spettri di risposta rappresentativi e segnali di riferimento) sono definiti dall'Allegato A4 della DGR 2193/2015 della Regione Emilia Romagna.

In particolare l'Allegato A4 contiene:

- la forma dello spettro di risposta normalizzato rappresentativo del moto sismico atteso per un periodo di ritorno di 475 anni (con smorzamento pari al 5%) in Emilia-Romagna;
- l'indicazione per la definizione dei valori di a_{refg} (10% di probabilità di superamento in 50 anni);
- le indicazioni per il reperimento e l'utilizzo dei segnali di riferimento selezionati.

Per il punto di indagine considerato (Sondaggio 1 presso il centro abitato di Mezzano Inferiore) il parametro a_{refg} , ricavato per interpolazione dai valori dei nodi più vicini, risulta 0.089.

Di conseguenza, lo spettro elastico di risposta in accelerazione (cfr. Fig. 17) di riferimento per la valutazione della risposta sismica locale, ed il conseguente spettro di risposta in velocità, per il calcolo dell'intensità di *Housner*, (cfr. Fig. 18), sono i seguenti:

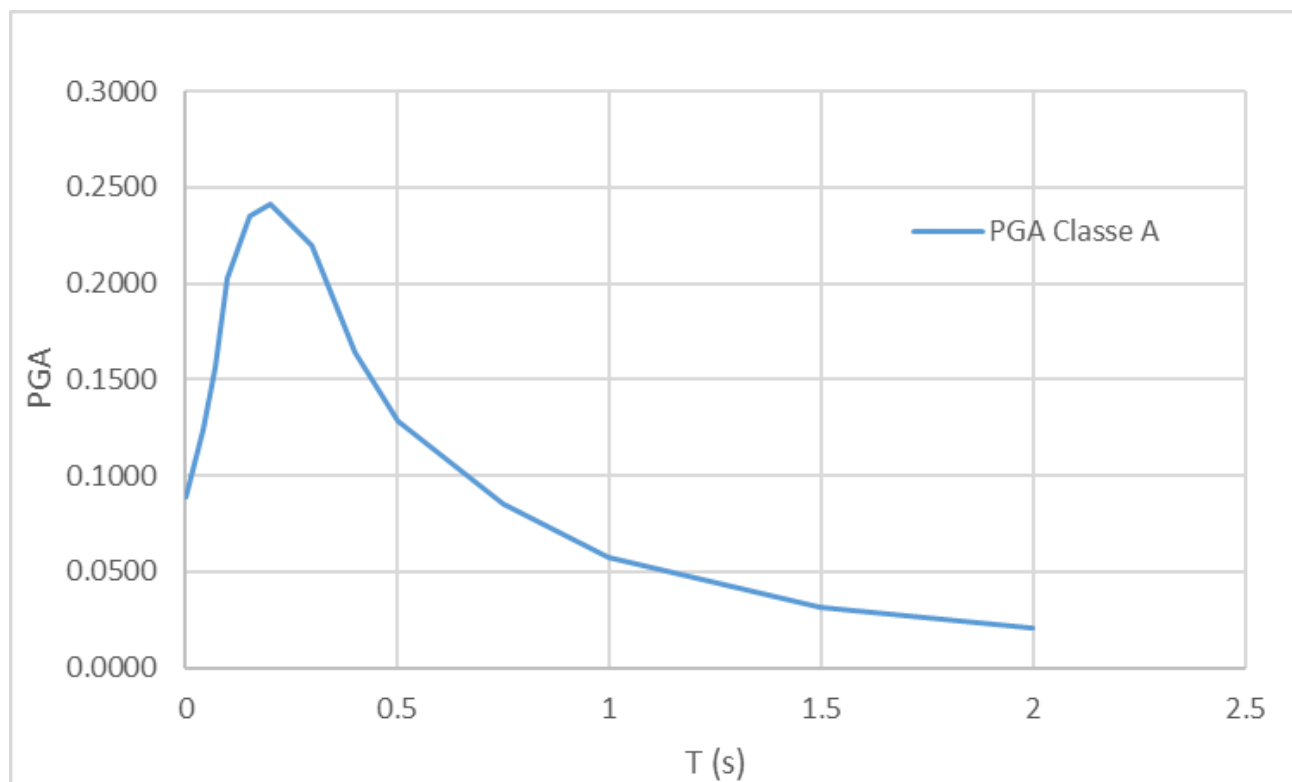


Fig. 17 - Spettro di risposta elastico in accelerazione su suolo A (475Y)

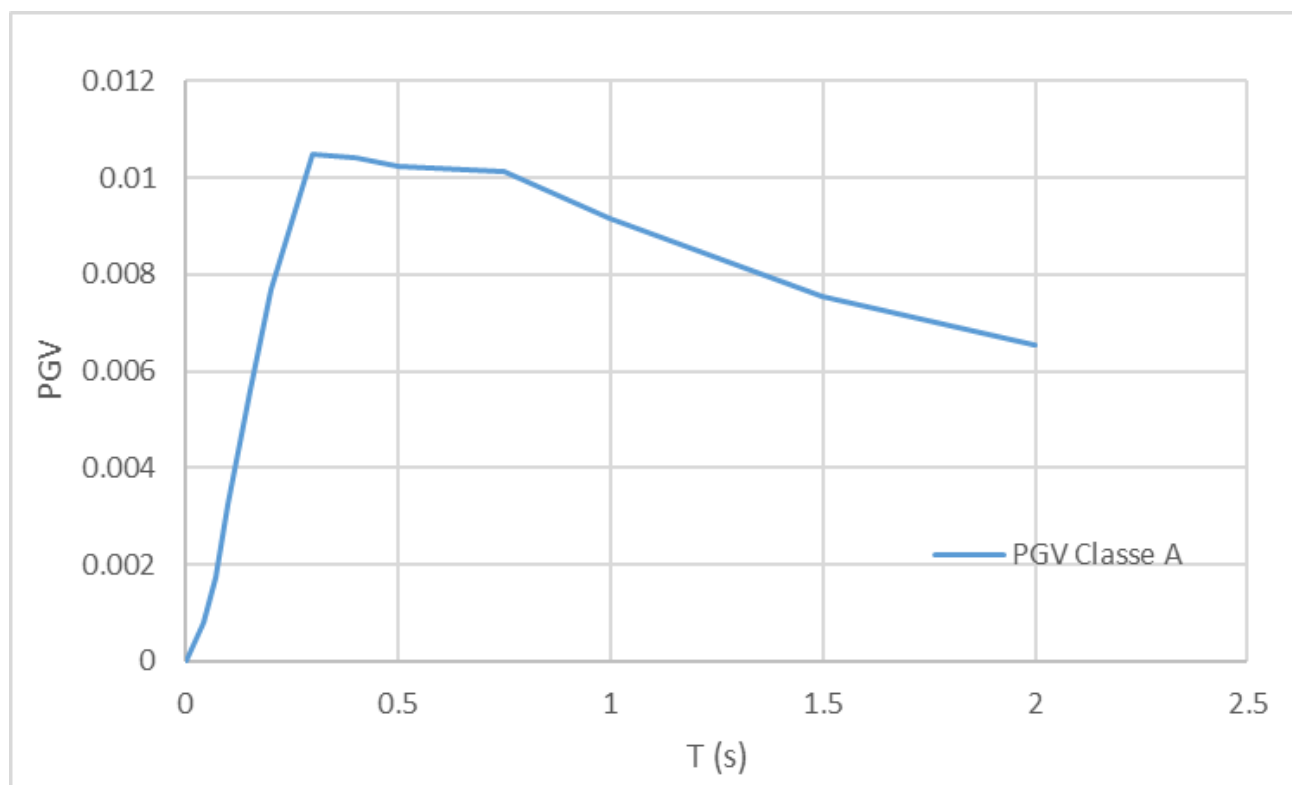


Fig. 18 - Spettro di risposta elastico in velocità su suolo rigido (475Y)

8.2.2 Segnali in input

Quali dati di input sismico sono stati utilizzati, oltre a quelli forniti dalla Regione Emilia Romagna secondo le indicazioni della DGR 2193/2015³, anche quelli forniti dal software SEISM-HOME⁴ di Eucentre.

Tutti i segnali sono stati selezionati attraverso una procedura che valuta la similarità tra le forme spettrali di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nelle banche dati.

Nel caso dei sismogrammi RER, il confronto è avvenuto con la forma dello spettro di risposta isoprobabile, con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni, così come rappresentato in Fig. 17, mentre, nel caso di SEISM_HOME, il confronto viene effettuato con lo spettro di risposta indicato dalla NTC 2008, sempre con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni.

Il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli regionale fornisce 3 segnali per ciascun comune; SEISM-HOME, invece, fornisce 7 accelerogrammi per ciascun nodo del reticolo di riferimento della pericolosità sismica locale dell'Allegato A delle NTC 2008.

Nel complesso, quindi sono stati utilizzati 10 diversi accelerogrammi per le verifiche di risposta sismica locale. Ovviamente, tutti i sismi sono stati scalati in accelerazione per ottenere un valore massimo di input compatibile con quello previsto dalla RER e indicato in Fig. 17.

<i>Segnali RER</i>	<i>Segnali Seism-Home</i>
000046xa.xy 000126xa.xy 000354xa.xy	TR475_ID14719_1 - 7 - tratti dai segnali: 000764xa.cor 000182xa.cor 000234ya.cor 0788x.cor 1033y.txt 1091x.txt SAG0010503201053.NS 20090406_013239ITDPC_MTR__NSC.DAT

Tab. 3 - Segnali in input utilizzati nelle analisi di RSL

³ disponibili nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli regionale www.regione.emilia-romagna.it/geologia/sismica

⁴ Rota M., Zuccolo E., Taverna L., Corigliano M., Lai C.G., Penna A. [2012] "Mesozonation of the Italian territory for the definition of real spectrum-compatible accelerograms", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 10, No. 5, pp. 1357-1375.

8.2.3 Modello geofisico del sottosuolo

La valutazione della risposta sismica locale richiede un'accurata modellazione delle caratteristiche geofisiche del sottosuolo, principalmente basata sui seguenti parametri:

- litologia;
- velocità delle onde sismiche di taglio (V_s);
- curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidità (G/G_0) in funzione della deformazione e densità in situ,

Tale modellazione andrebbe spinta in profondità fino a raggiungere il *bedrock* sismico, che teoricamente dovrebbe essere uno strato con velocità $V_s > 800$ m/s, difficilmente raggiungibile nelle zone in questione⁵.

8.2.3.1 Litologia

Per la determinazione delle caratteristiche litologiche sono stati utilizzati, principalmente, i dati della stratigrafia del sondaggio. L'integrazione della stratigrafia fino al *bedrock* sismico (il sondaggio raggiunge la profondità di 30 m) è stata effettuata mediante l'utilizzo di dati al contorno, tipicamente stratigrafie di pozzi.

8.2.3.2 Determinazione della V_s e del *bedrock* sismico

La determinazione della V_s in funzione della profondità è stata effettuata mediante una prova Down-Hole in foro di sondaggio fino a 30 m e mediante prove con sismocono.

Nel complesso sono state analizzate 4 verticali (1 DH e 3 SCPTU). Tutte le prove hanno fornito valori di V_s uniformemente crescenti con la profondità e poco correlati con la litologia. I valori di V_{s30} calcolati sono sempre compresi tra 140 e 300 m/s, identificando i terreni nella categoria C (da 180 a 360 m/s secondo le NTC 2008).

⁵ A tale proposito vedi paragrafo 8.2.3.2.1

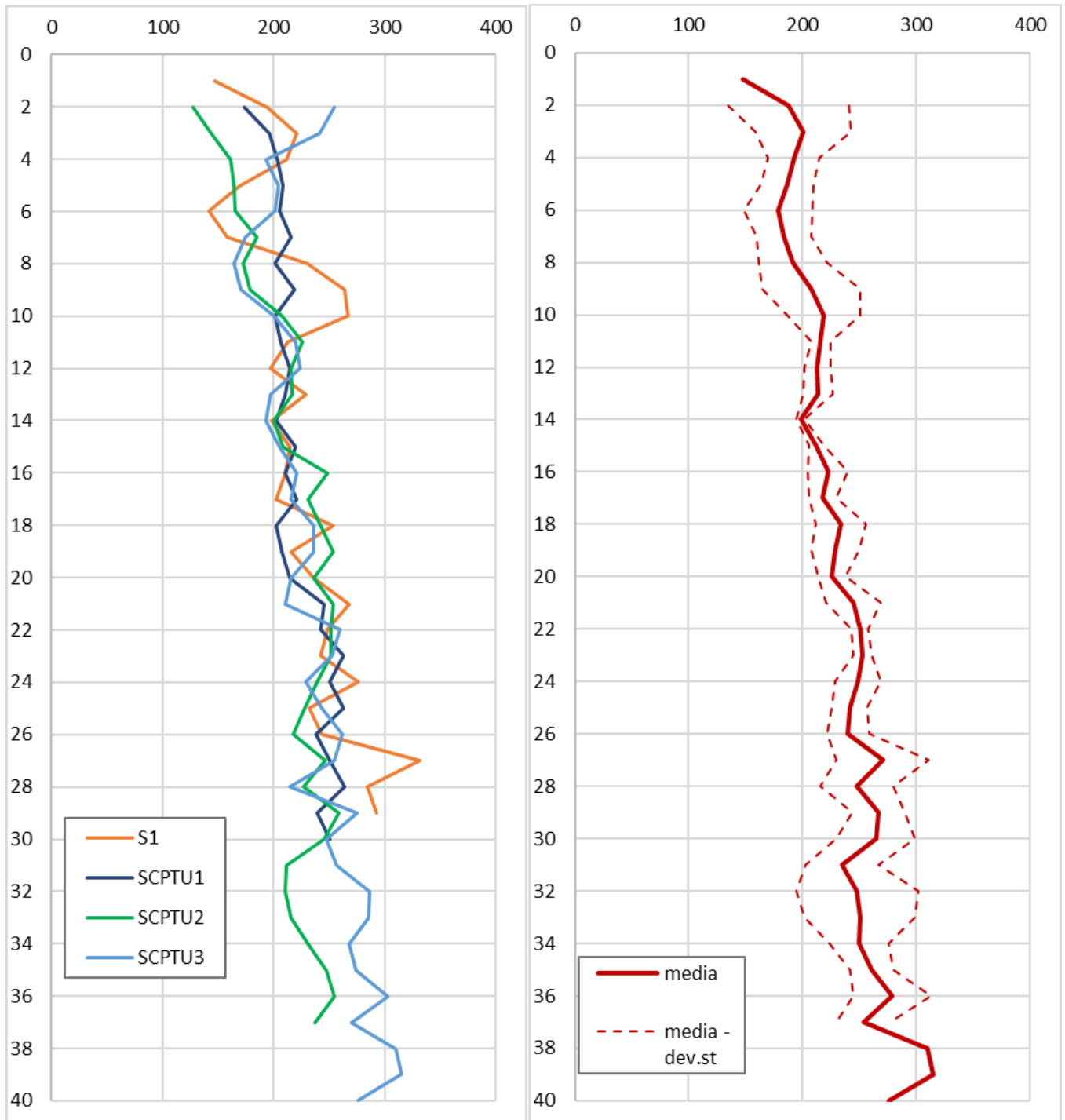


Fig. 19 - Valori di Vs misurati nelle prove DH e SCPTU (a sx tutti i valori, a dx media e deviazione standard)

Per poter valutare la velocità Vs tra la massima profondità raggiunta dalle indagini ed il *bedrock* sismico, è stata utilizzata una interpolazione del tratto misurato, mediante una funzione potenza del tipo $y=ax^b$. Sulla base della funzione ricavata per il tratto misurato si sono poi calcolati i valori di Vs fino alle profondità richieste.

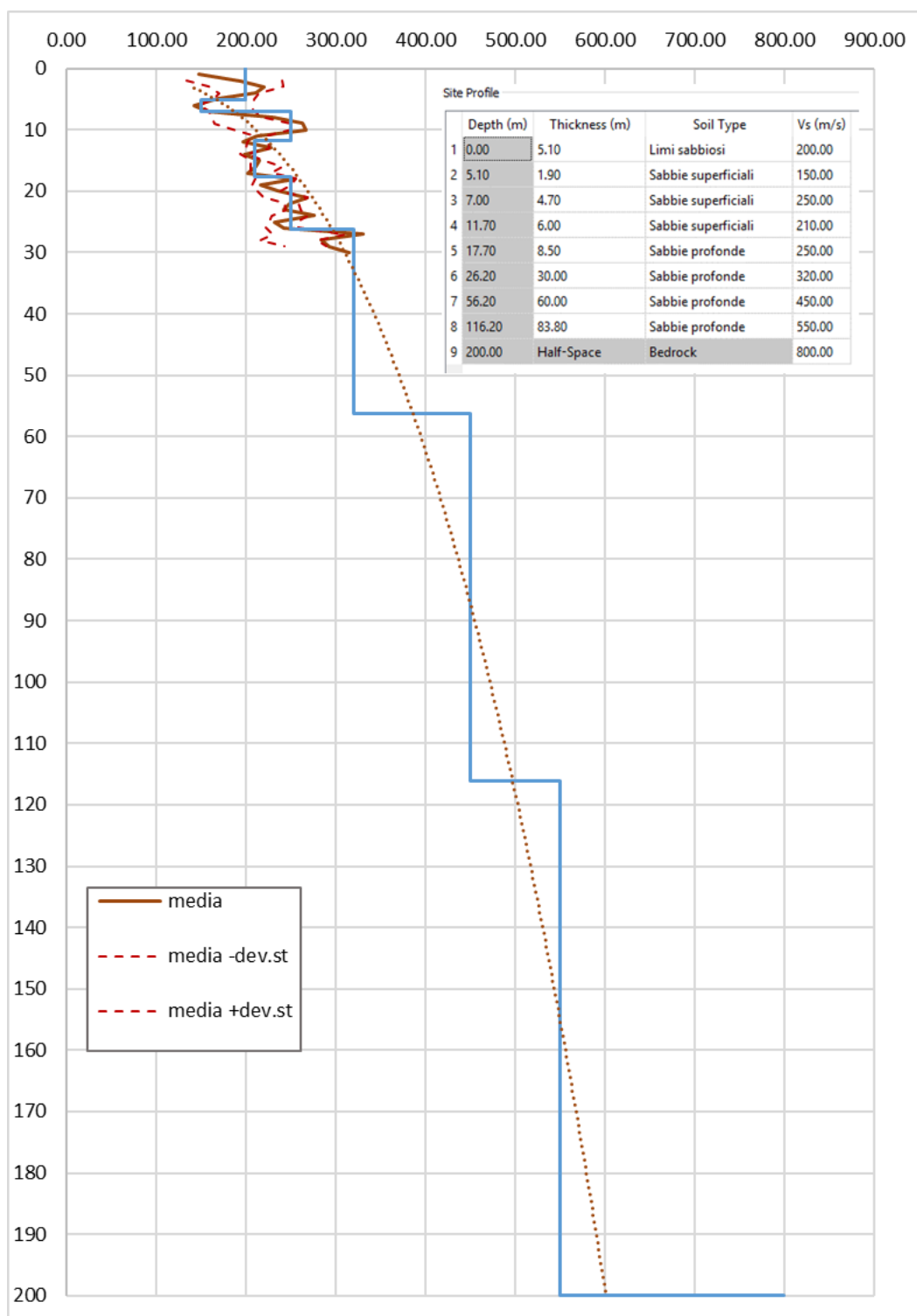


Fig. 20 - Discretizzazione della Vs

8.2.3.2.1 Considerazioni sul bedrock sismico

La definizione del *bedrock* sismico, cioè del sismostrato che presenta velocità delle onde di taglio $V_s \geq 800$ m/s, costituisce un elemento di notevole importanza nell'ambito delle valutazioni di risposta sismica locale.

In realtà oggi si tende ad individuare il *bedrock* sismico, soprattutto in pianura, in corrispondenza di un elevato contrasto di impedenza sismica, cioè laddove il rapporto tra le velocità dello strato superficiale e quello più profondo supera il valore di 2÷2.5.

Purtroppo nel corso del presente studio le prove HVSR hanno evidenziato contrasti di impedenza significativi soltanto riferibili a discontinuità molto superficiali.

Per questo motivo si è preferito fare riferimento a profondità dalla superficie di discontinuità già valutata per un Comune limitrofo (Colorno), per il quale l'analisi di risposta sismica locale ha consentito di individuare il *bedrock* alla profondità di circa 200 m da p.c.

Tale profondità coincide con discontinuità stratigrafiche note.

Infatti, in letteratura (Martelli et alii⁶, 2013 e Martelli et alii⁷, 2014) è indicato che “*il maggiore contrasto di impedenza si ha in genere tra la base del sistema emiliano-romagnolo superiore (AES), datata tra 350.000 e 450.000 anni, e la base del subsistema AES6, datata circa 230.000-250.000 anni (RER e ENI-Agip, 1998)*” e, nella zona in esame, come evidenziato nello studio “*Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*”⁸, tali discontinuità si rinvengono intorno ai 200 m da p.c.

8.2.3.3 Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G₀) in funzione della deformazione

Per la valutazione delle curve di variazione del rapporto di smorzamento (D) e del decadimento del modulo di taglio normalizzato (rigidezza, G/G₀) in funzione della deformazione di taglio γ , sono state realizzate 2 prove di laboratorio sui campioni prelevati nel corso del sondaggio.

In particolare sono state realizzate n° 2 prove in colonna risonante (RC). Tali prove hanno fornito dati sperimentali (Fig. 21) che hanno consentito di definire le leggi di variazione dei parametri D e G/G₀ mediante il modello iperbolico di *Yokota* (1981).

⁶ L. Martelli, L. Calabrese, G. Ercolessi, P. Severi, G. Tarabusi, D. Pileggi, S. Rosselli, L. Minarelli, F. Pergalani, M. Compagnoni, G. Vannucchi, C. Madiari, J. Facciorusso, V. Fioravante, D. Giretti, M. Mucciarelli, E. Priolo, G. Laurenzano – (2014) Cartografia speditiva dell'amplificazione e del rischio di liquefazione nelle aree epicentrali del terremoto dell'Emilia 2012 (ML=5.9). Atti del 32 convegno GNGTS 2013

⁷ L. Martelli, P. Severi, G. Biavati, S. Rosselli, R. Camassi, E. Ercolani, A. Marcellini, A. Tento, D. Gerosa, D. Albarello, F. Guerrini, E. Lunedei, D. Pileggi, F. Pergalani, M. Compagnoni, V. Fioravante e D. Giretti (2014) *Analysis of the local seismic hazard for the stability tests of the main bank of the Po River (northern Italy)*, Boll. Geof. Teor. Appl., 55, 119-134

⁸ “Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna” RER – ENI, Agip 1998 (a cura di G. Di Dio)

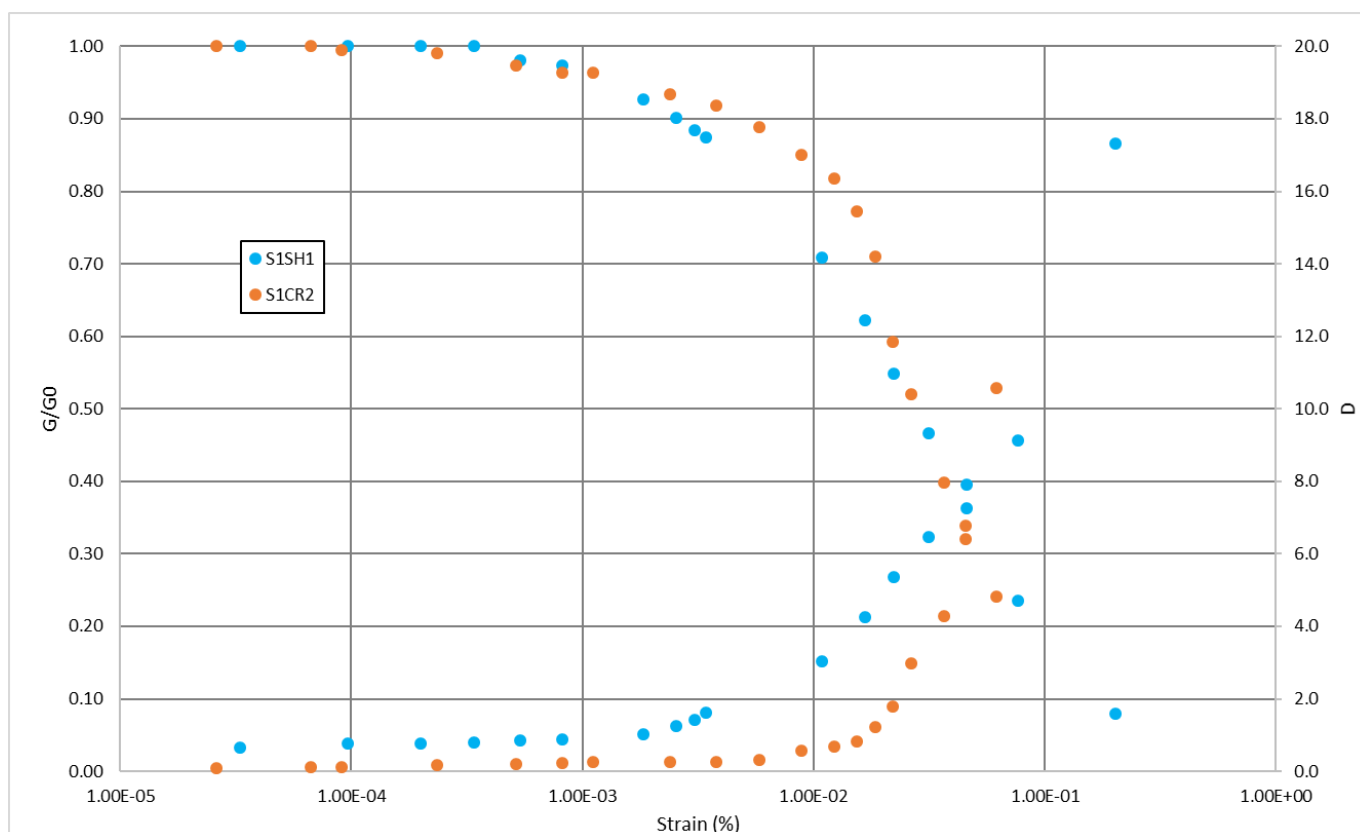


Fig. 21 - Dati sperimentali delle prove RC

Le leggi di variazione proposte da Yokota sono le seguenti:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha\gamma^\beta}$$

$$D = \eta e^{\left[-\lambda \frac{G}{G_0}\right]}$$

dove:

G/G_0 = modulo di taglio normalizzato

D = rapporto di smorzamento

γ = deformazione di taglio

$\alpha, \beta, \eta, \lambda$ = parametri sperimentali del modello

Il fit dei dati sperimentali alle funzioni sopra descritte è stato effettuato con il metodo dei minimi quadrati (X^2).

In Fig. 22 è riportato un grafico esemplificativo della procedura di normalizzazione utilizzata per il campione S1SH1.

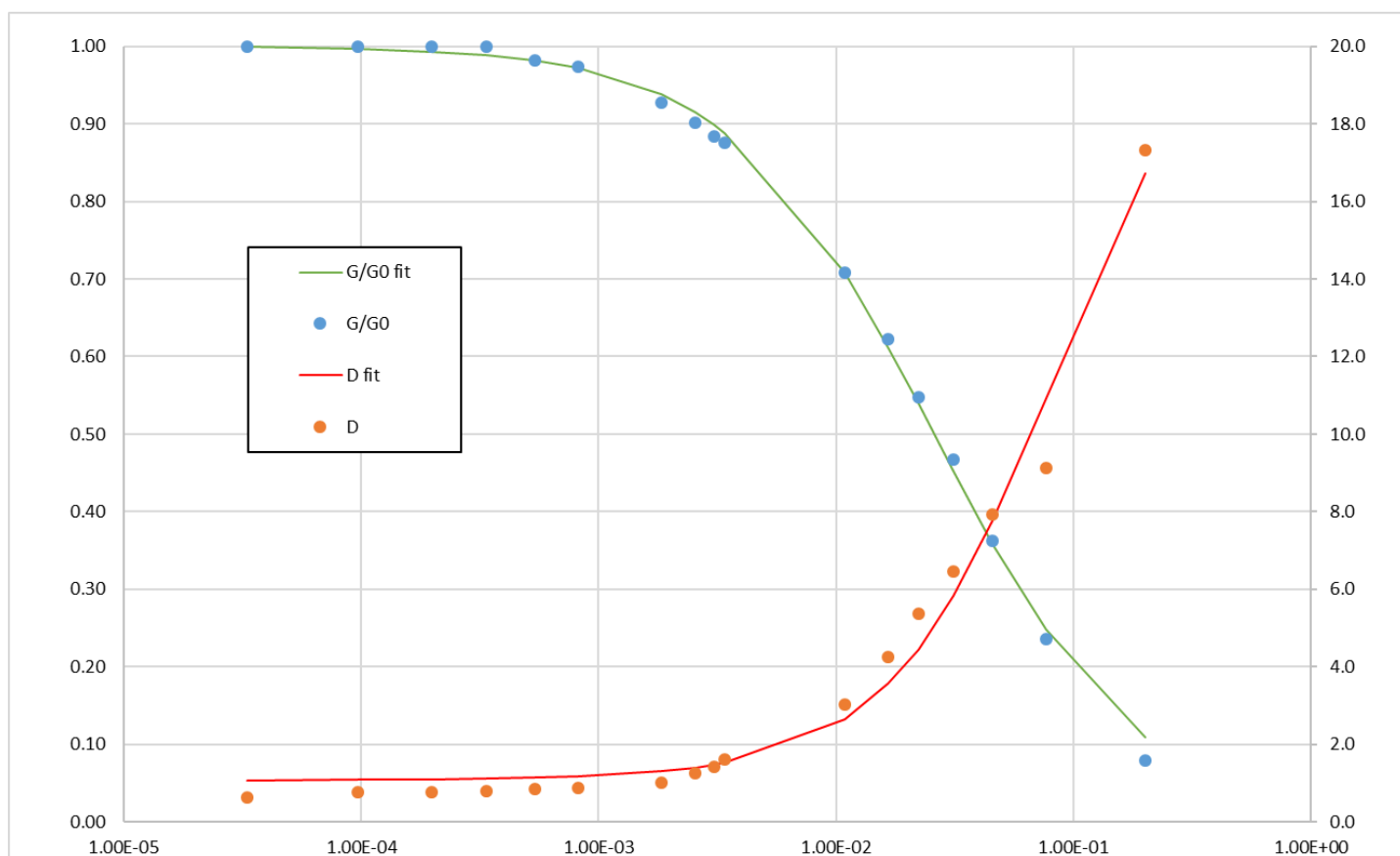


Fig. 22 - Grafico dei dati sperimentali e delle curve di interpolazione per il campione S1SH1

Per i depositi limoso sabbiosi presenti in superficie sono stati utilizzati i parametri di terreni analoghi analizzati dagli scriventi.

Il riepilogo dei risultati delle analisi effettuate, è riportato in Tab. 4, mentre in Tab. 5 sono riportati i valori delle proprietà indice dei terreni analizzati. I campioni indicati con asterisco (*), a granulometria sabbiosa, non campionabili con i normali metodi di campagna, sono stati ricostituiti in laboratorio.

In Fig. 23 sono riportati i grafici delle curve sintetiche relative a tutti i tipi di depositi utilizzati nel modello geofisico.

Camp.	Prof. (m)	litologia (AGI)	Parametri curve G/G0 e D					
			prova	G_0 (MPa)	α	β	η	λ
S1SH1	3.00-3.60	Sabbie medio fini	RC	48.33	41.93	1.02	23.42	3.08
S1CR2*	27.00-28.00	Sabbia	RC	114.66	246.37	1.56	33.69	4.86

Tab. 4 - Riepilogo dei risultati della ricostruzione delle curve sperimentali

Camp.	Prof.	Litologia (AGI)	Valori indice						Granulometria (AGI)			
			W	γ_{nat}	γ_{sec}	LL	LP	IP	Ghiaia	Sabbia	Limo	Argilla
			%	Mg/m ³	Mg/m ³	%	%	%	%	%	%	%
S1SH1	3.00-3.60	Sabbie medio fini	20.2	1.95	1.62	ND	NP	ND	0.0	66.9	28.2	4.9
S1CR2	27.00-28.00	Sabbia	23.9	1.68	1.36	ND	NP	ND	0.0	98.2		1.8

Tab. 5 - Riepilogo delle proprietà indice dei terreni analizzati

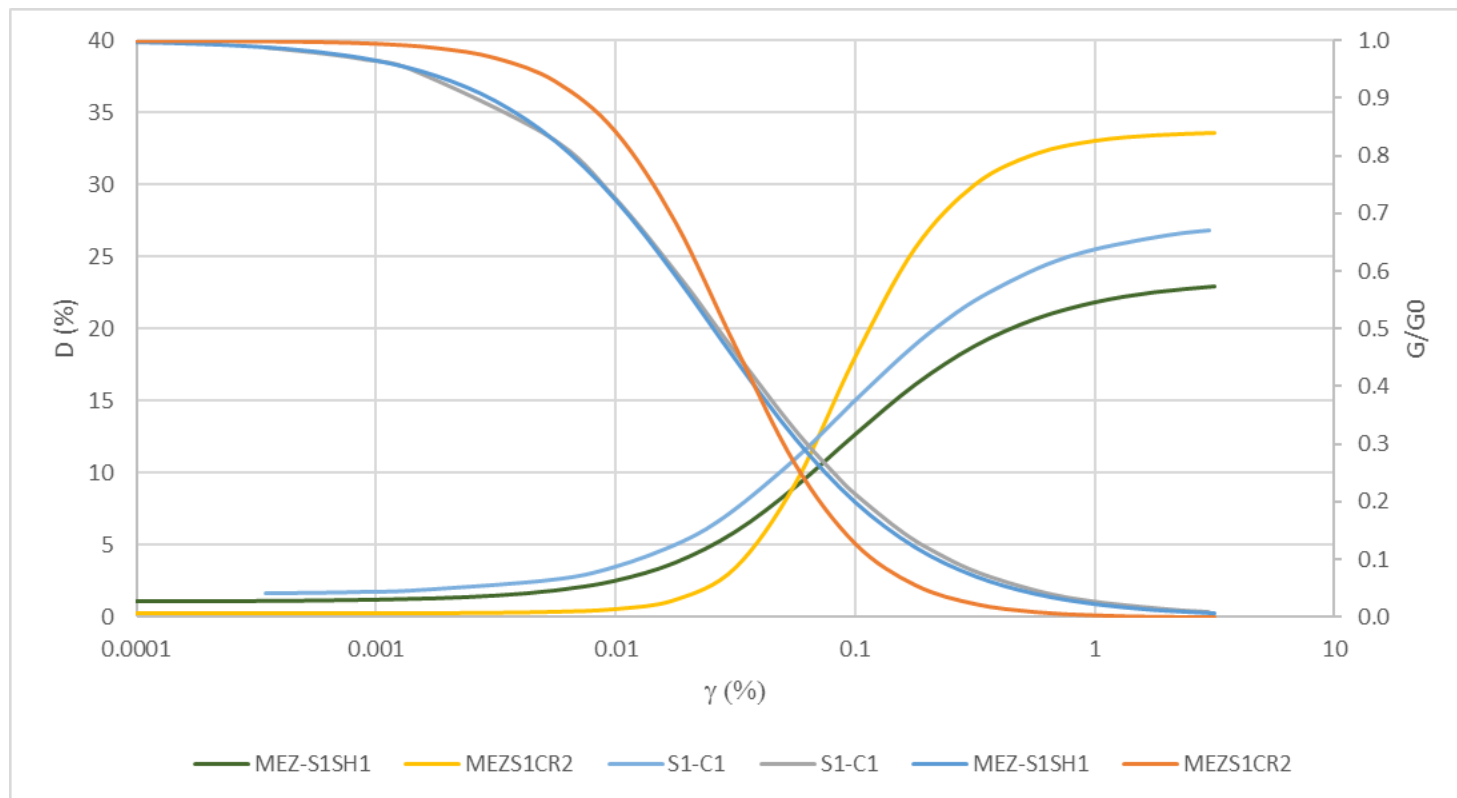


Fig. 23 - Grafico delle curve di interpolazione G/G_0 e D per tutti i tipi di terreno del modello geofisico utilizzato

8.2.4 Codice di calcolo per la valutazione della RSL

Per la valutazione della risposta sismica locale è stato utilizzato il codice di calcolo Strata⁹ sviluppato da A. Kottke e E. Rathje¹⁰. Validazioni indipendenti di Strata sono riportate in letteratura (Graizer¹¹, 2001), con esito soddisfacente.

Strata calcola la risposta dinamica monodimensionale (1D) di una colonna di terreno utilizzando un modello di propagazione lineare delle onde, con proprietà dinamiche del terreno (proprietà elastiche e smorzamento) variabili in funzione del livello deformativo.

Il programma adotta le seguenti convenzioni:

- La risposta del deposito è causata da onde di taglio polarizzate orizzontalmente che si propagano verticalmente nel *bedrock* verso la superficie lungo una colonna verticale monodimensionale di terreno;
- Le superfici di stratificazione sono orizzontali;

⁹ Ellen M. Rathje; Albert Kottke (2010), "Strata," <https://nees.org/resources/strata>.

¹⁰ Kottke, Albert R., and Rathje, Ellen M. (2008) Technical Manual for Strata. PEER Report 2008/10. University of California, Berkeley, California

¹¹ Treasure island geotechnical array - case study for site response analysis. 4th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion August 23-26, 2011 · University of California Santa Barbara

- Le superfici del *bedrock* e delle stratificazioni si estendono lateralmente all'infinito;
- La stratificazione è lateralmente omogenea;
- La superficie topografica è priva di irregolarità.

La valutazione della RSL è stata effettuata utilizzando il modello "lineare equivalente" (EQL), che considera la variazione dei parametri di rigidità e smorzamento dei terreni in funzione della deformazione indotta dal sisma.

8.2.5 Risultati della modellazione numerica

I risultati della analisi condotte con il codice STRATA, elaborati nel dominio del tempo e delle frequenze, hanno consentito di definire:

- la funzione di trasferimento del segnale sismico dal *bedrock* alla superficie;
- lo spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione (PSA), da cui è stato derivato, mediante la formula $PSV(T_i) = T_i \cdot PSA(T_i) / 2\pi$, lo spettro di risposta elastico in pseudovelocità (PSV); gli spettri rappresentati sono ottenuti come mediana dei valori degli spettri di tutti i segnali sismici in output;
- il fattore di amplificazione in termini di picco di accelerazione (FAPGA), definito come il rapporto tra l'accelerazione massima in superficie ed il valore di riferimento per il sito su suolo rigido;
- il fattore di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in pseudovelocità (FAIS) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido (cfr. Fig. 18). In sostanza viene calcolato il rapporto degli indici di Housner negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.5-1.0 s e 0.5-1.5 s per i due spettri indicati (superficie e suolo rigido). I rapporti risultano pertanto:

$$FA_{IS\ 0.1-0.5} = \frac{\int_{0.1}^{0.5} PSV_{superficie}(T) dt}{\int_{0.1}^{0.5} PSV_{suolo\ rigido}(T) dt}$$

$$FA_{IS\ 0.5-1.0} = \frac{\int_{0.5}^{1.0} PSV_{superficie}(T) dt}{\int_{0.5}^{1.0} PSV_{suolo\ rigido}(T) dt}$$

$$FA_{IS\ 0.5-1.5} = \frac{\int_{0.5}^{1.5} PSV_{superficie}(T) dt}{\int_{0.5}^{1.5} PSV_{suolo\ rigido}(T) dt}$$

- Lo sforzo ciclico di taglio (CSR) in funzione della profondità da utilizzare per le verifiche a liquefazione

8.2.5.1 Ciclic stress ratio

Il programma Strata fornisce un ulteriore elemento di notevole interesse per le verifiche sismiche, ed in particolare per le verifiche a liquefazione e cioè lo sforzo ciclico di taglio (*cyclic stress ratio* CSR).

Lo sforzo ciclico di taglio viene utilizzato nei programmi di verifica a liquefazione ed in genere, in assenza della RSL, viene valutato mediante l'espressione semplificata:

$$CSR = 0,65 \frac{a_g}{g} S \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_v} \frac{r_d}{MSF}$$

dove:

- S è il coefficiente di profilo stratigrafico, definito in Tab. 6,
- MSF è il fattore correttivo per la magnitudo definito in Tab. 7.
- r_d è il fattore correttivo per la profondità calcolato con la formula $r_d = 1 - 0,015z$.

Categoria suolo	Spettri di Tipo 1 S (M > 5,5)	Spettri di Tipo 2 S (M ≤ 5,5)
A	1,00	1,00
B	1,20	1,35
C	1,15	1,50
D	1,35	1,80
E	1,40	1,60

Tab. 6 - Coefficiente del profilo stratigrafico

Magnitudo	Seed H. B. & Idriss I. M. (1982)
5.2	1.75
5.5	1.43
6.0	1.32
6.5	1.19
7.0	1.08
7.5	1.00
8.0	0.94
8.5	0.89

Tab. 7 - Fattore correttivo MSF

Il programma Strata fornisce invece direttamente il valore di CSR in funzione della profondità. Come verrà illustrato nel Cap. 8.3, il valore di CSR da RSL fornisce una valutazione del rischio di liquefazione sicuramente più cautelativo e affidabile, per i siti in analisi.

Dalla Fig. 24 risulta, infatti, evidente come il valore di CSR, soprattutto nei primi metri, differisca decisamente da quello calcolato in automatico.

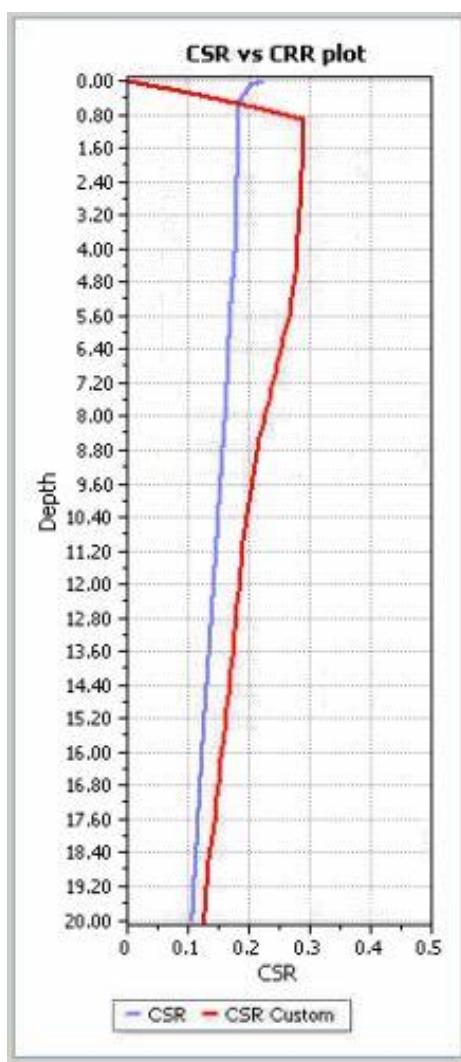


Fig. 24 - Confronto tra il valore di CSR calcolato in automatico (Cliq) e quello calcolato mediante RSL

8.2.6 RSL per il sito del sondaggio S1

I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Soil Types

	Name	Unit Weight (kN/m ³)	G/G_max Model	Damping Model
1	Limi sabbiosi	18.00	Limo da deb. argilloso a sabbioso Moglia 3 m	Limo da deb. argilloso a sabbioso Moglia 3 m
2	Sabbie superficiali	19.00	(M)sabbia medio fine limosa (3.0-3.6 m)	(M)sabbia medio fine limosa (3.0-3.6 m)
3	Sabbie profonde	20.00	(M)sabbia (27.0-28.0 m)	(M)sabbia (27.0-28.0 m)

Fig. 25 - Tipi di suolo del modello geofisico

Site Profile

	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	5.10	Limi sabbiosi	200.00
2	5.10	1.90	Sabbie superficiali	150.00
3	7.00	4.70	Sabbie superficiali	250.00
4	11.70	6.00	Sabbie superficiali	210.00
5	17.70	8.50	Sabbie profonde	250.00
6	26.20	30.00	Sabbie profonde	320.00
7	56.20	60.00	Sabbie profonde	450.00
8	116.20	83.80	Sabbie profonde	550.00
9	200.00	Half-Space	Bedrock	800.00

Fig. 26 – Modello geofisico

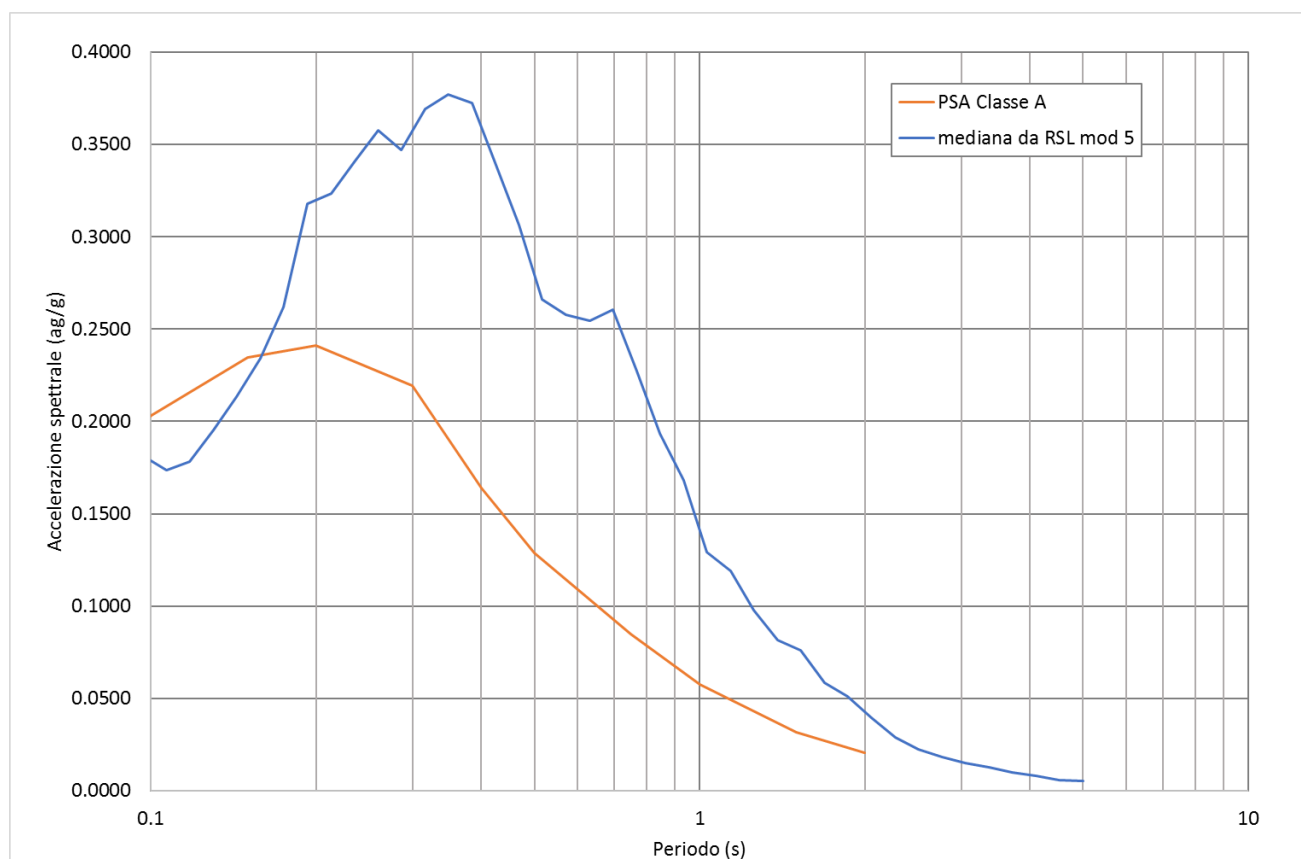


Fig. 27 – Confronto tra gli spettri elastici in accelerazione

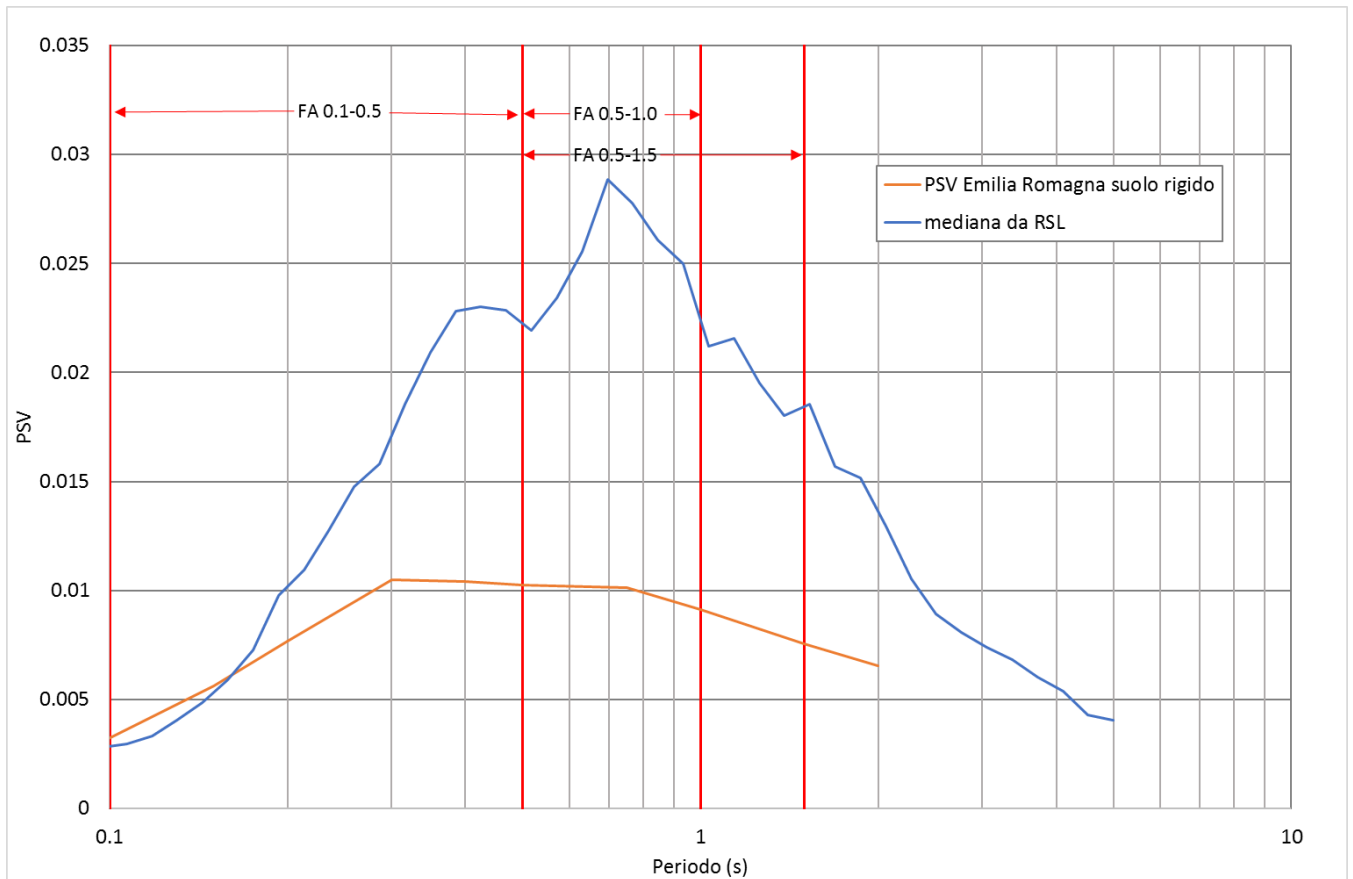


Fig. 28 - Confronto tra gli spettri elastici in velocità

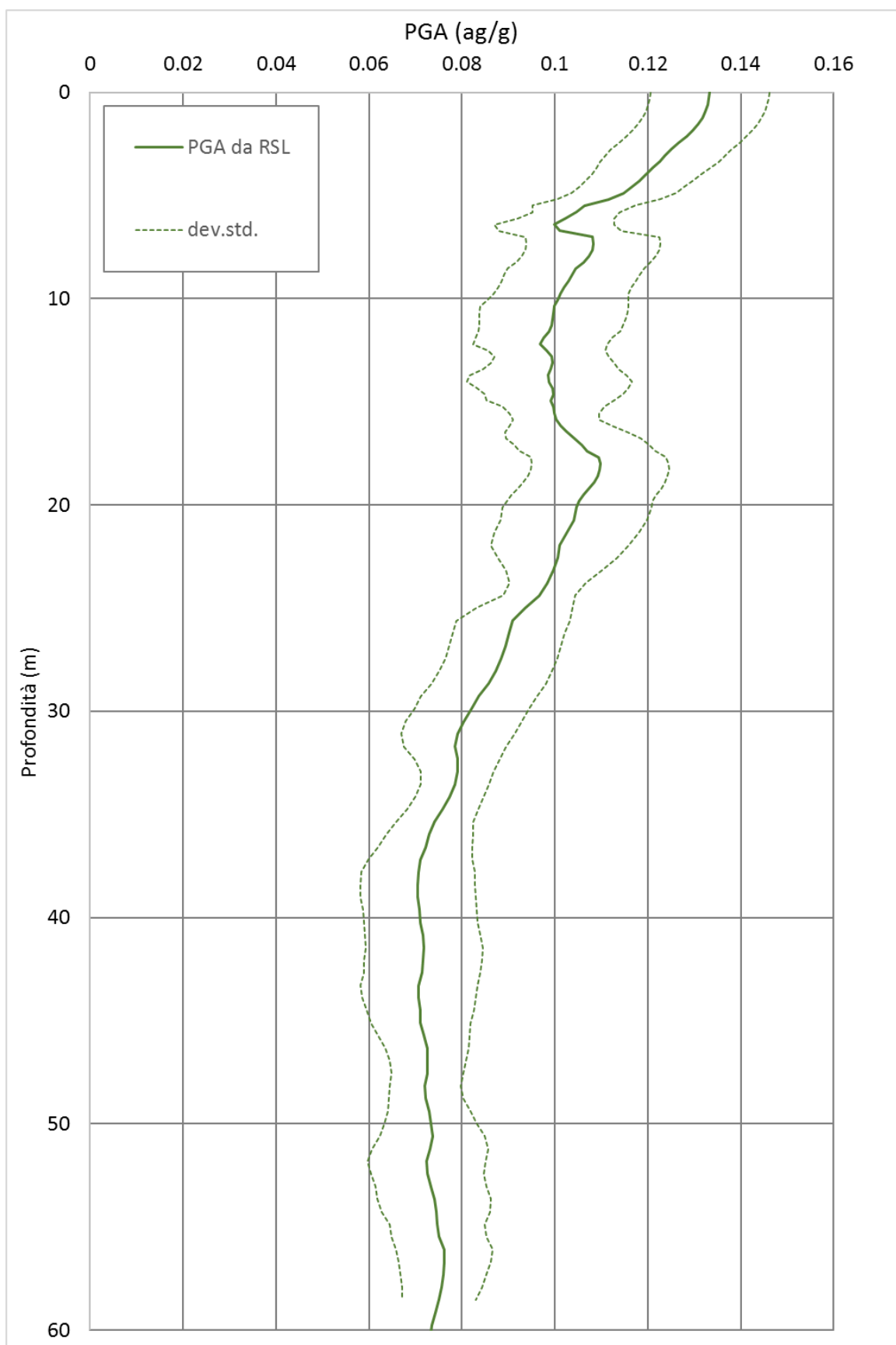


Fig. 29 - Variazione dell'accelerazione con la profondità

	RSL
FA_{PGA}	1.42
$FA_{IS\ 0.1-0.5\ s}$	1.68
$FA_{IS\ 0.5-1.0\ s}$	2.55
$FA_{IS\ 0.5-1.5\ s}$	2.46

Tab. 8 – Fattori di amplificazione

8.3 Verifica del rischio di liquefazione

Il rischio di liquefazione è stato valutato prendendo in considerazione le nove verticali indagate mediante prove CPTU e SCPTU.

Per liquefazione s'intende un processo d'incremento della pressione del fluido interstiziale che causa, in un terreno non coesivo saturo (sabbia, limo non plastico), la diminuzione della resistenza a taglio a seguito dello scuotimento sismico, dando luogo a deformazioni permanenti significative.

La liquefazione consiste quindi in una diminuzione della resistenza del terreno, a seguito del raggiungimento della condizione di fluidità. La perdita totale della resistenza viene raggiunta quando la pressione dell'acqua che riempie gli interstizi arriva a uguagliare la pressione di confinamento, rendendo nulle le tensioni efficaci trasmesse attraverso le particelle solide. Una volta che il terremoto ha innescato il processo di liquefazione, la massa del suolo resta in movimento fino a che non raggiunge una nuova condizione di stabilità.

Il rischio di liquefazione può essere stimato con metodi semplificati da prove CPT mediante il calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione LPI di *Iwasaki et al.* (1982). Le prove CPTU sono preferibili per la migliore ripetibilità delle misure e per la continuità dei profili penetrometrici. L'indice LPI è un parametro di sintesi che, mediante un valore numerico compreso tra 0 e 100, quantifica i possibili effetti della liquefazione in superficie, tenendo conto di severità dell'azione sismica, e di profondità, spessore e valore del fattore di sicurezza degli strati liquefacibili.

Per poter valutare la severità degli effetti *Iwasaki* ha proposto la scala riportata in Tab. 9.

<i>Valori di LLI</i>	<i>Rischio di liquefazione</i>
$I_L = 0$	Molto basso
$0 < I_L \leq 5$	Basso
$5 < I_L \leq 15$	Alto
$15 < I_L$	Molto alto

Tab. 9 – Valutazione del rischio di liquefazione secondo *Iwasaki*

Valutazioni più recenti riportate da *Sonmez* (2003), basate su sismi di magnitudo inferiore a quelli utilizzati da *Iwasaki* consigliano tuttavia di rimodulare le classi di pericolosità come riportato in Tab. 10:

LPI
LPI = 0.00 - Liquefaction risk nul
LPI between 0.00 and 2.00 - Liquefaction risk low
LPI between 2.00 and 5.00 - Liquefaction risk moderate
LPI between 5.00 and 15.00 - Liquefaction risk high
LPI > 15.00 - Liquefaction risk very high

Tab. 10 - Valutazione del rischio di liquefazione secondo *Sonmez*

L'indice LPI è calcolato con riferimento ad una verticale di prova. Gli effetti bi- e tri-dimensionali sono trascurati. Tale semplificazione può condurre talora a stime errate. In particolare se la liquefazione in un sito è limitata a lenti isolate, la liquefazione in superficie può non manifestarsi anche per valori significativi di LPI. Viceversa uno strato liquefatto sottile, profondo, molto diffuso ed esteso può determinare rottura del terreno e "*lateral spreading*" anche per bassi valori di LPI. La variabilità ed eterogeneità naturale delle condizioni stratigrafiche e geotecniche può spiegare la non sempre buona correlazione tra i valori dell'indice LPI e le evidenze di liquefazione.

L'indice LPI è definito nel modo seguente:

$$LPI = \int_0^{20} F W(LPIz) dz$$

dove:

- $F(z)$ è una variabile con valori compresi tra 0 e 1, definita ad ogni profondità $0 \leq z \leq 20$ in funzione del valore che, a quella profondità, assume il fattore di sicurezza alla liquefazione FSL
- $w(z)$ è un fattore di peso della profondità.

In sostanza il rischio di liquefazione tiene conto del fattore di sicurezza calcolato strato per strato, ma ne valuta la significatività su tutto lo spessore del deposito.

Il fattore di sicurezza alla liquefazione è definito nel modo seguente:

$$FSL = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \cdot MSF \cdot k_s$$

dove:

$CRR_{7.5}$ = Rapporto di resistenza ciclica per $M=7.5$ (*Cyclic Resistance Ratio*)

MSF = fattore di scala della magnitudo (*Magnitude Scale Factor*)

K_σ = Fattore di correzione per la pressione di confinamento

$$CSR = \text{rapporto di tensione ciclica (Cyclic Stress Ratio)} = CSR = 0.65 \left(\frac{\sigma_{max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \cdot r_d$$

Nelle verifiche effettuate nel presente studio, per il calcolo del CRR è stato utilizzato il metodo NCEER (modificato da *Robertson 2010*) implementato dal programma CLIQ della *Geologimiki*. In Fig. 30 viene presentata, in forma di *flow-chart*, la procedura di calcolo di CRR utilizzata dal programma.

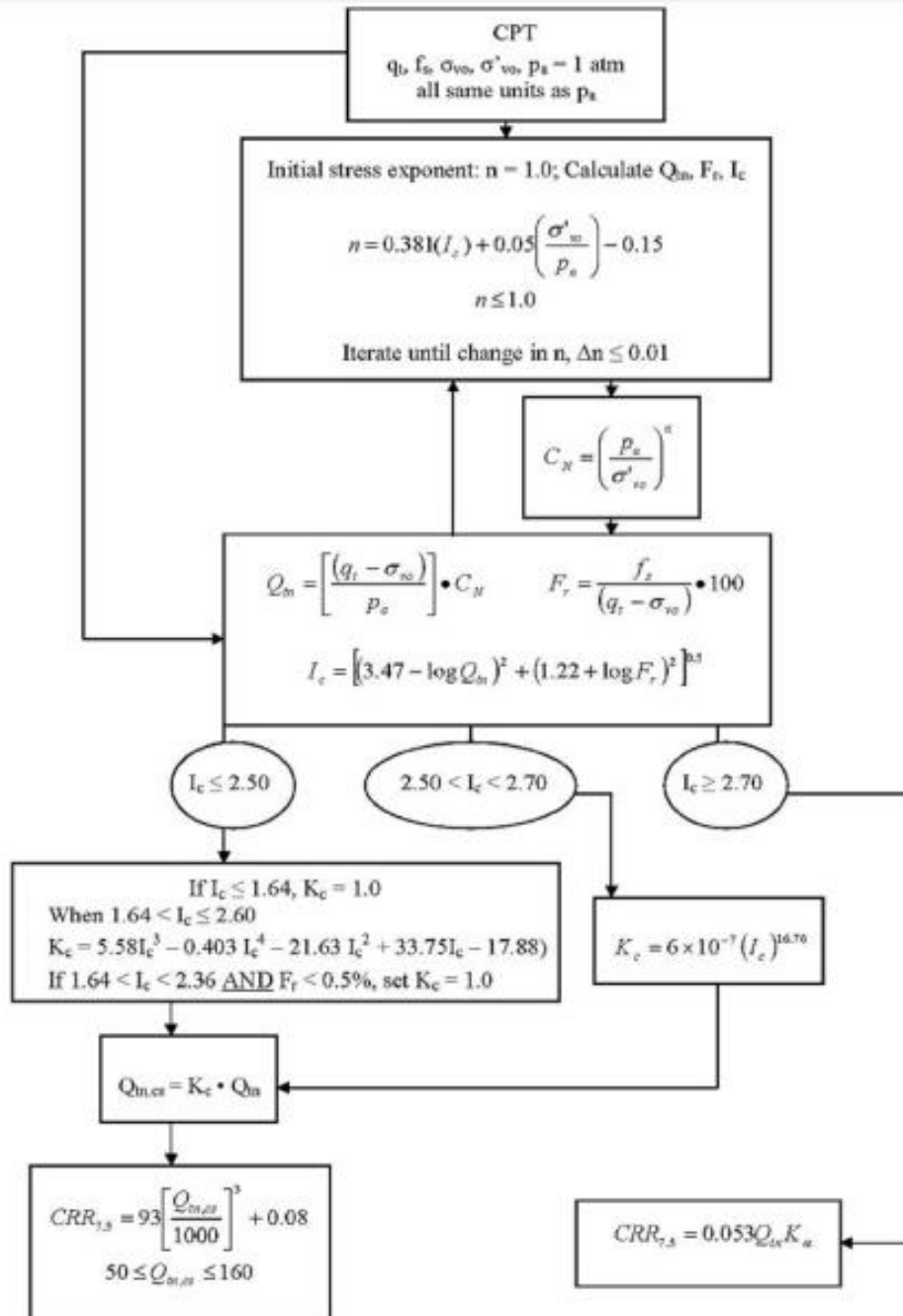


Fig. 30 - Flow chart della procedura di verifica NCEER modificata da *Robertson (2010)*

In tali verifiche, come valori di CSR, sono stati utilizzati quelli calcolati mediante la RSL, come descritto nel paragrafo 8.2.5.1.

8.3.1 Magnitudo di riferimento

Per la valutazione del rischio di liquefazione è necessario valutare anche la magnitudo attesa, sempre in relazione a un periodo di ritorno di 475 anni (10% di probabilità di superamento in 50 anni).

A tale scopo, l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) fornisce i valori disaggregati magnitudo-distanza con riferimento ai nodi del reticolo, individuato dall'Allegato A delle NTC 2008.

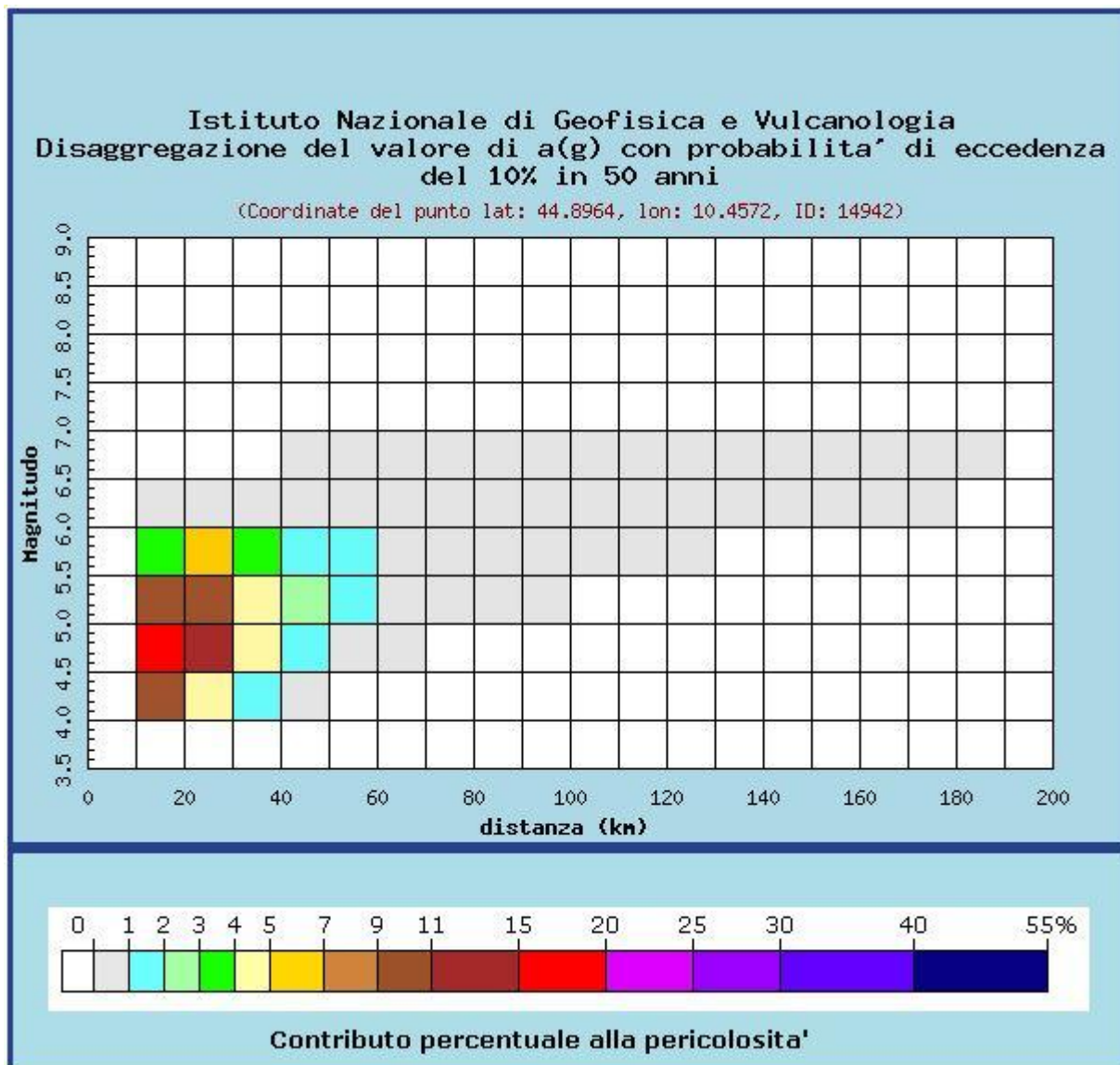


Fig. 31 - Disaggregazione magnitudo-distanza per il nodo 14942

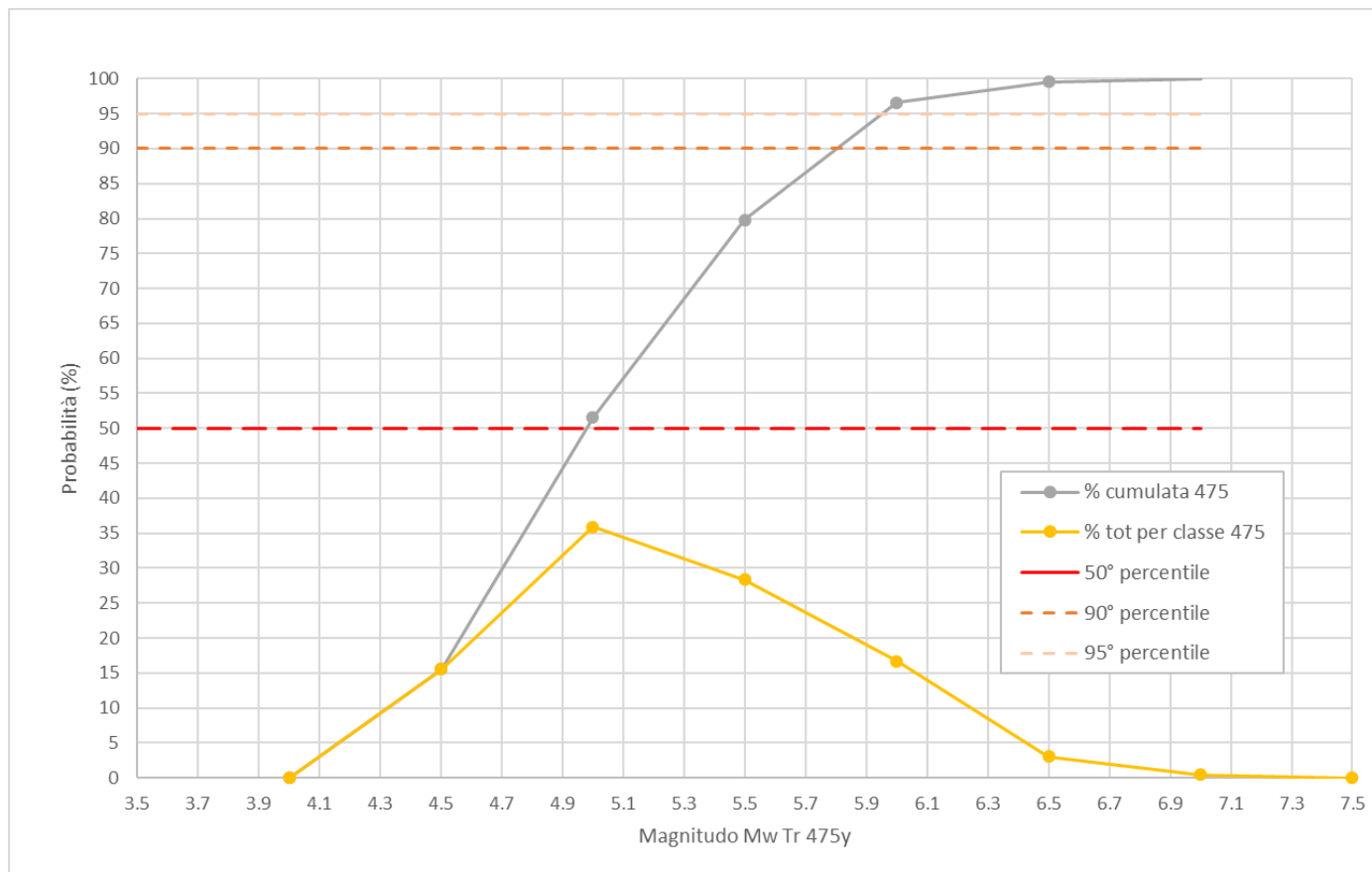
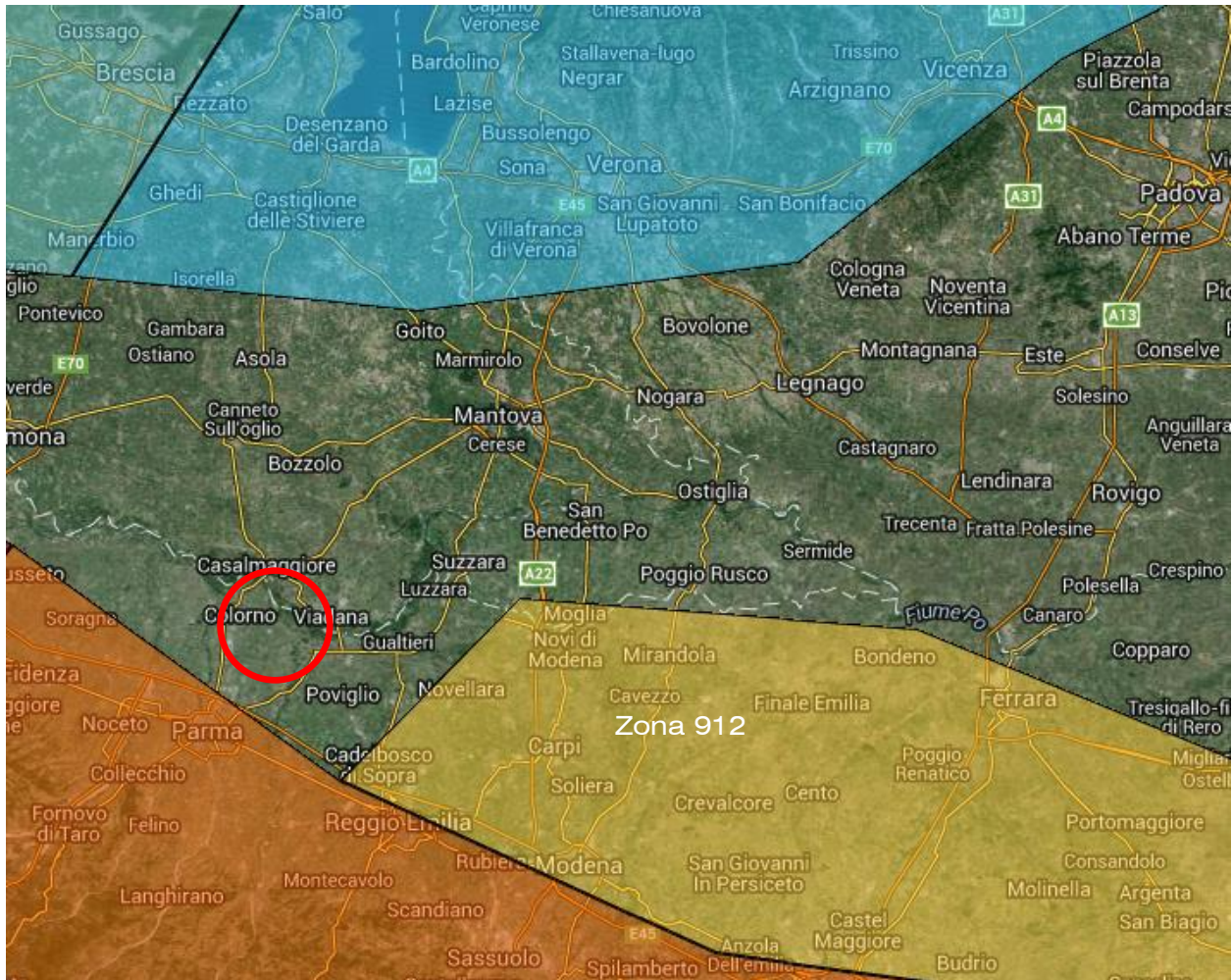


Fig. 32 - Calcolo della magnitudo di riferimento sulla base dei dati di Fig. 31

Per il nodo più prossimo all'intervento in progetto, mediante la costruzione della curva cumulata della disaggregazione magnitudo-distanza, si ricava la magnitudo $M_w = 5.95$, corrispondente al 95% percentile della curva.

Tale valore risulta inferiore al valore massimo della zona di riferimento (Zona 912 - Fig. 33) della classificazione ZS9 dell'IMCS, che è pari a $M_w=6,14$.

Il comune di Mezzani, tuttavia risulta esterno alla zona stessa, pertanto si ritiene giustificato l'adozione di tale valore.

**Fig. 33 - Classificazione ZS9**

8.3.2 Analisi dei risultati

Per ciascuna prova è stato prodotto un report che contiene sia i grafici interpretativi della prova stessa (resistenze penetrometriche, litologia, ecc.), sia i grafici relativi alla liquefazione ed in particolare (Fig. 34):

- Il confronto tra CSR e CCR
- La variazione del fattore di sicurezza
- La cumulata del valore di LPI
- La cumulata del valore del cedimento atteso

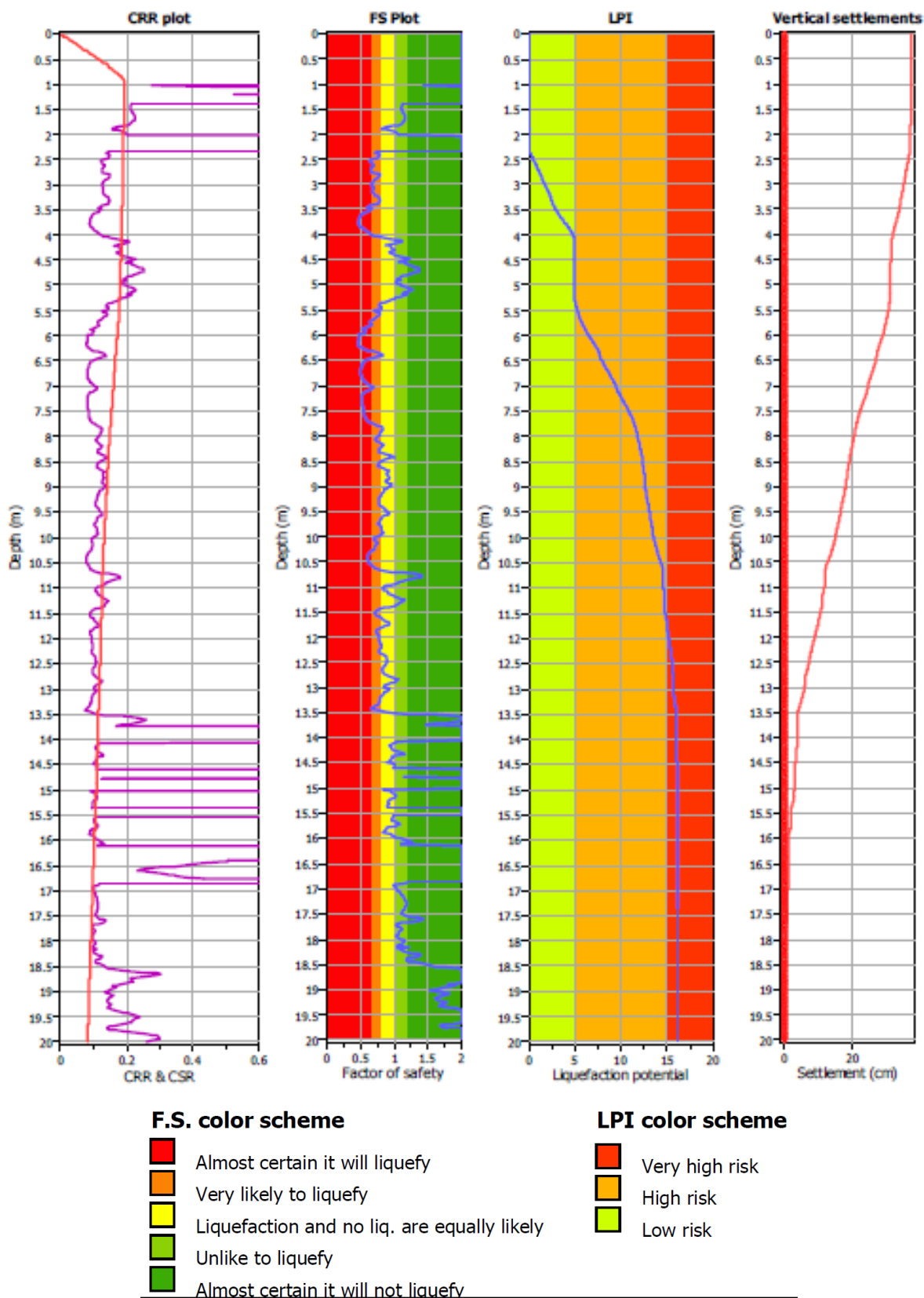


Fig. 34 – Grafici di CSR-CRR, dei fattori di sicurezza FS, dell’indice di liquefazione (LPI), e del cedimento valutati per la prova CPTU_1

Nel complesso, come era da attendersi, viste le caratteristiche litostratigrafiche del territorio, il rischio di liquefazione risulta sempre molto alto in prossimità dei depositi più recenti del F. Po; soltanto laddove i depositi argillosi di copertura prevalgono il valore di LPI scende significativamente.

In Fig. 35 vengono rappresentati i valori di LPI calcolati in tutte le prove, mentre in Fig. 36 sono rappresentati i cedimenti attesi.

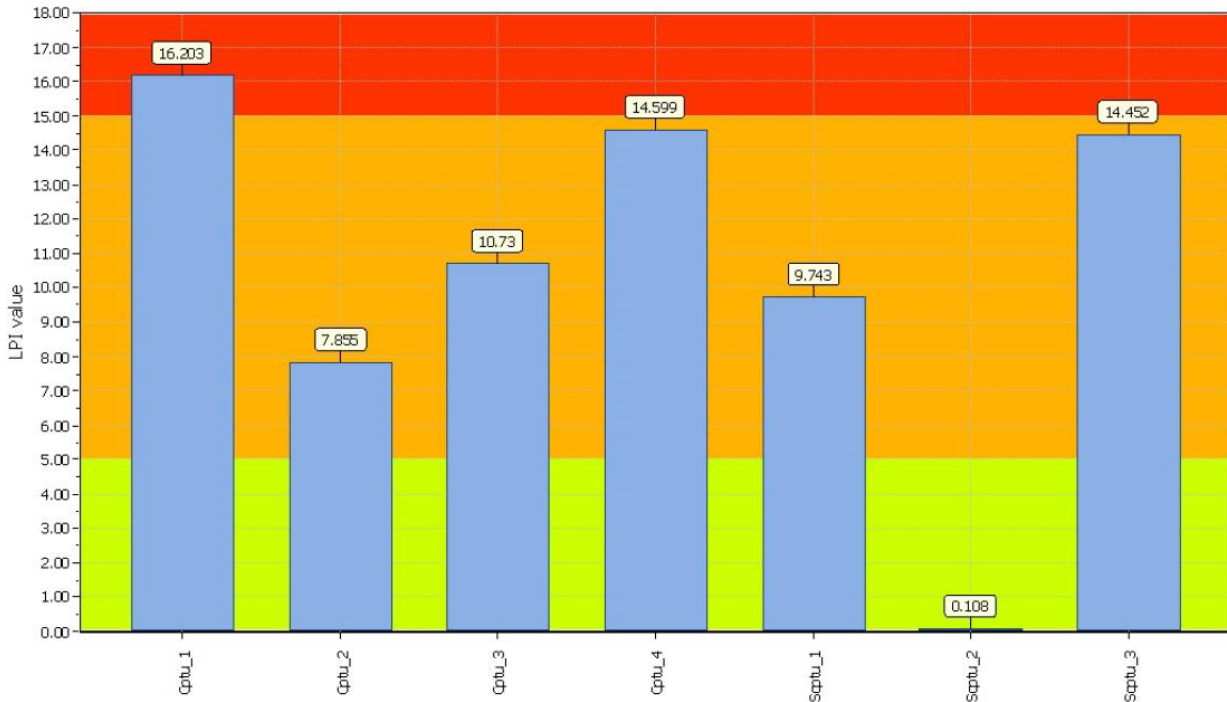


Fig. 35 - Riepilogo dei lavori di LPI per tutte le prove

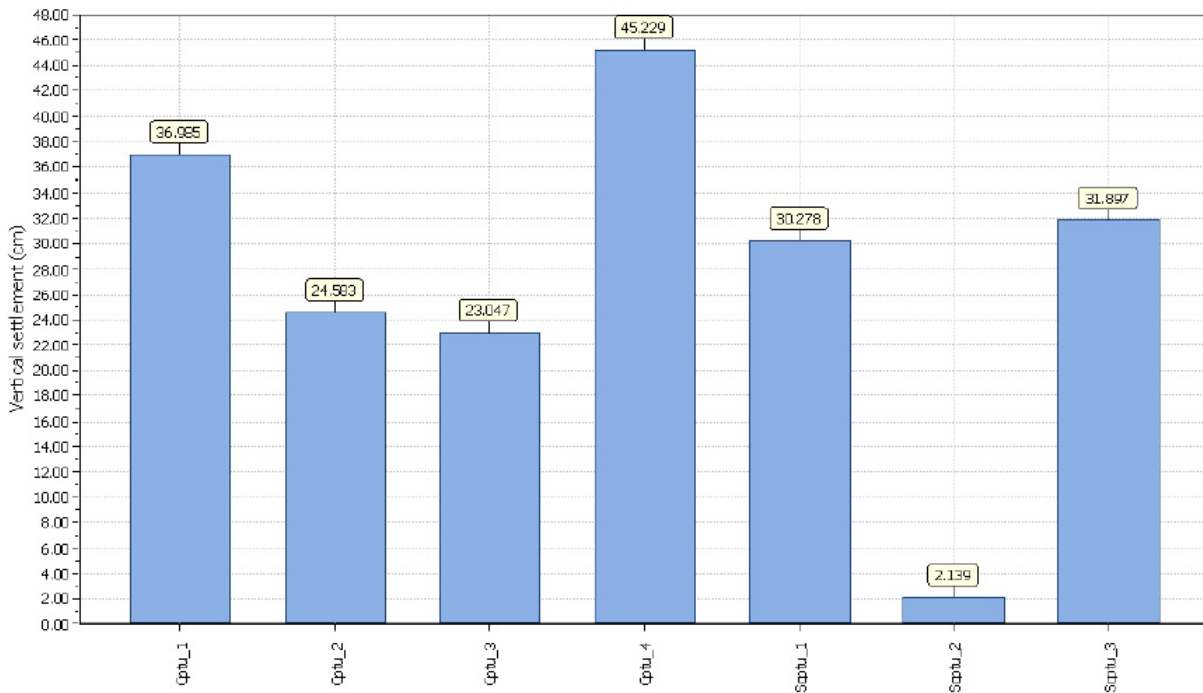


Fig. 36 - Riepilogo dei cedimenti attesi per tutte le prove

8.4 Carte di microzonazione sismica

Gli ultimi elaborati grafici del presente studio sono le Carte di microzonazione sismica, anch'esse redatte alla scala 1:10.000, in cui sono raffigurate le amplificazioni stimate e le zone suscettibili di instabilità, per i settori di territorio in esame.

L'amplificazione è stata calcolata in termini di rapporto di accelerazione massima orizzontale (PGA/PGA_0) sia di rapporto di Intensità di *Housner* (SI/SI_0) per prefissati intervalli di periodi.

Più precisamente, la cartografia, in merito alla Microzonazione sismica di Livello 3, risulta costituita dai seguenti elaborati:

- Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA_{PGA} (scala 1:10.000);
- Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{IS\ 0,1 - 0,5\ s}$ (scala 1:10.000);
- Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{IS\ 0,5 - 1,0\ s}$ (scala 1:10.000).
- Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{IS\ 0,5 - 1,5\ s}$ (scala 1:10.000).

Va chiarito che, a tutte le aree in esame, sono stati attribuiti i fattori desunti con l'analisi approfondita di terzo livello, descritta nel paragrafo 8.2, inserendo all'interno del database il relativo spettro rappresentativo, in accelerazione e in velocità.

Conseguentemente, le zone oggetto di studio sono state rappresentate appartenenti alle seguenti classi:

	classe
FA_{PGA}	1.3-1.4
$FA_{IS\ 0,1-0,5\ s}$	1.7-1.8
$FA_{IS\ 0,5-1,0\ s}$	2.5-3.0
$FA_{IS\ 0,5-1,5\ s}$	2.5-3.0

Nelle carte sono state raffigurate anche le zone suscettibili di instabilità, ovvero quelle suscettibili per liquefazione.

A riguardo si osserva che i valori dell'indice di liquefazione (anch'essi rappresentati sulle tavole, in corrispondenza delle singole verticali esaminate), sono sempre maggiori di 5, tranne che per la prova eseguita all'interno della microzona che caratterizza il settore meridionale dell'abitato di Casale, dove IL è pari a 0,11.

Conseguentemente, in ottemperanza agli indirizzi normativi, tale area inizialmente (Livello 1 e 2) indicata come "Zona di attenzione per liquefazioni", a seguito dell'approfondimento di Livello 3 è risultata non soggetta a tale tipo di instabilità e, pertanto, è stata classificata come "Zona stabile suscettibile di amplificazioni locali".

Differentemente le altre zone sono state indicate come:

- “ZSLQ - Zona di suscettibilità per liquefazione: $5 < IL \leq 15$ ” classe dominante nel territorio urbanizzato in esame
- “ZSLQ - Zona di suscettibilità per liquefazione: $15 \leq IL$ ” presente solo nel settore orientale dell’abitato di Mezzano Rondani

9. BIBLIOGRAFIA

- Albarello D., Castellaro S. (2011). TECNICHE SISMICHE PASSIVE: INDAGINI A STAZIONE SINGOLA, Ingegneria Sismica Anno XXVIII - n. 2 – 2011, Appendice I e II, pp 50-62
- Baldi M., Baldini U., Bevivino R., Castagnetti S., Daminelli R., Gianferrari C., Marcellini A., Martelli L. e Tinto A. (201). UNIONE TERRE DI CASTELLI: VALIDAZIONE DELLA MICROZONAZIONE SISMICA DI II LIVELLO (2010) - 29° Convegno Nazionale Gruppo Nazionale Geofisica della Terra Solida, Prato.
- 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, doi:10.1016/j.tecto.2007.04.014
- Bernini M., Papani G. (1987) - Alcune considerazioni sulla struttura del margine appenninico emiliano tra lo Stirone e l'Enza (e sue relazioni con il sistema del Taro). L'Ateneo Parmense - Acta Naturalia, 24, 219-240.
- Ellen M. Rathje; Albert Kottke (2010), "Strata," <https://nees.org/resources/strata>.
- 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.
http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir_pk=395&cms_pk=15833
- Kottke, Albert R., and Rathje, Ellen M. (2008) Technical Manual for Strata. PEER Report 2008/10. University of California, Berkeley, California
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E. (2016). DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>
- Madiati C., Facciorusso J. Vannucchi G. Martelli L. (2012) – in Microzonazione sismica, uno strumento consolidato per la riduzione del rischio. L'esperienza della Regione Emilia Romagna . RER 2012.
- Marcellini A., Martelli L, Tinto A., Daminelli R. - L'AMPLIFICAZIONE SISMICA NEGLI "INDIRIZZI PER GLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA IN EMILIA-ROMAGNA PER LA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE E URBANISTICA" (2009)
- Martelli L., Calabrese L., Ercolessi G., Severi P., Tarabusi G., Pileggi D., Rosselli S., Minarelli L., Pergalani F., Compagnoni M., Vannucchi G., Madiati C., Facciorusso J., Fioravante V., Giretti D., Mucciarelli M., Priolo E., Laurenzano G.- (2014) Cartografia speditiva dell'amplificazione e del rischio di liquefazione nelle aree epicentrali del terremoto dell'Emilia 2012 (ML=5.9). Atti del 32 convegno GNGTS 2013

- Martelli L., Severi P., Biavati G., Rosselli S., Camassi R., Ercolani E., Marcellini A., Tenta A., Gerosa D., Albarello D., Guerrini F., Lunedei E., Pileggi D., Pergalani F., Compagnoni M., Fioravante V. e Giretti D. (2014) Analysis of the local seismic hazard for the stability tests of the main bank of the Po River (northern Italy), *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 55, 119-134
- Meletti C. e Valensise G. (2004). ZONAZIONE SIMOGENETICA ZS9-APP. 2 AL RAPPORTO CONCLUSIVO. In: "Gruppo di Lavoro MPS (2004).Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCm 3274 del 20 marzo 2003 ". Rapporto per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici.
- Molin D., Stucchi M. e Valensise G. (1996). MASSIME INTENSITÀ MACROSISMICHE OSSERVATE NEI COMUNI ITALIANI. elaborato per il Dipartimento della Protezione Civile
- RER – ENI, Agip "Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna" (1998) a cura di G. Di Dio
- Rota M., Zuccolo E., Taverna L., Corigliano M., Lai C.G., Penna A. [2012] "Mesozonation of the Italian territory for the definition of real spectrum-compatible accelerograms", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 10, No. 5, pp. 1357-1375
- CARTA GEOLOGICA DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA. FOGLIO 182 "GUASTALLA", alla scala 1:50.000, Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna
- CARTA SIMOTETTONICA DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA – Scala 1:250.000 (2004) - Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli - CNR - Istituto di Geoscienze e Georisorse, Sezione di Firenze
- GUIDELINES FOR DETERMINATING DESIGN BASIS GROUND MOTIONSTR-102293s-V1-V5 EPRI (1993) –
- GUIDELINES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE H/V SPECTRAL RATIO TECHNIQUE ON AMBIENT VIBRATIONS MEASUREMENTS, PROCESSING AND INTERPRETATION - SESAME European research project, dicembre 2004
- MICROZONAZIONE SISMICA, UNO STRUMENTO CONSOLIDATO PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO. L'esperienza della Regione Emilia-Romagna (2012) – Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli
- TREASURE ISLAND GEOTECHNICAL ARRAY – CASE STUDY FOR SITE RESPONSE ANALYSIS. 4th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion August 23–26, 2011 · University of California Santa Barbara

10. ALLEGATI

Nel corso dello studio sono stati redatti i seguenti elaborati grafici:

Elaborato 1	Carta delle indagini	scala 1:10.000
Elaborato 2	Carta geologico tecnica	scala 1:10.000
Elaborato 3	Carta delle frequenze naturali dei terreni	scala 1:10.000
Elaborato 4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica	scala 1:10.000
Elaborato 5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (V_s)	scala 1:10.000
Elaborato 6.a	Carta di microzonazione sismica - FA_{PGA}	scala 1:10.000
Elaborato 6.b	Carta di microzonazione sismica - $FA_{IS\ 0,1-0,5\ s}$	scala 1:10.000
Elaborato 6.c	Carta di microzonazione sismica - $FA_{IS\ 0,5-1,0\ s}$	scala 1:10.000
Elaborato 6.d	Carta di microzonazione sismica - $FA_{IS\ 0,5-1,5\ s}$	scala 1:10.000

Inoltre, alla presente relazione, sono allegati:

Elaborato 7	Verifiche del rischio di liquefazione
-------------	---------------------------------------