



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

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione illustrativa

Regione Emilia-Romagna

Comune di Fontanellato



Regione Emilia-Romagna	Soggetto realizzatore  Dott. Geol. Stefano Castagnetti Collaboratori: Dott. Geol. Marco Baldi Dott. Geol. Marco Carretta	Data Gennaio 2023
--------------------------------------	---	---------------------------------

INDICE

1.	INTRODUZIONE	1
2.	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO	3
2.1	INQUADRAMENTO	3
2.2	STORIA SISMICA.....	12
2.3	CLASSIFICAZIONE SISMICA.....	14
3.	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI	15
3.1	ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI	15
4.	MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	16
5.	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI	17
6.	ELABORATI CARTOGRAFICI.....	19
6.1	Carta delle indagini	19
6.2	Carta geologico-tecnica per microzonazione sismica.....	20
6.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni.....	24
6.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica.....	25
6.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S.....	28
7.	ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE.....	29
7.1	Modello geofisico del sottosuolo.....	30
7.1.1	Litologia	31
7.1.2	Determinazione della Vs e del bedrock sismico.....	31
7.1.3	Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G0) in funzione della deformazione.....	31
7.1.4	Descrizione dei modelli	33
7.1.5	Azioni sismiche in ingresso	36
7.2	Procedura di analisi RSL.....	37
7.2.1	Metodo lineare equivalente	37
7.2.2	Soluzione alla singola iterazione mediante FEM	39
7.2.2.1	Smorzamento.....	41
7.2.3	Procedimento iterativo	41
7.2.4	Interpretazione dei risultati	42
7.3	Analisi dei risultati.....	42
8.	VERIFICA DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE	50
8.1	Premesse	50
8.2	Analisi dei risultati	54
9.	CARTE DI MICROZONAZIONE SISMICA	57
10.	ELENCO ELABORATI.....	62

Allegato n° 1 – Indagini integrative

Allegato n° 2 – Verifiche liquefazione

1. INTRODUZIONE

Nella presente Relazione illustrativa vengono descritte le attività svolte e i risultati ottenuti nel corso dello Studio di microzonazione sismica di Livello 3 del Comune di Fontanellato (Provincia di Parma), effettuato su incarico di cui alla Determinazione Dirigenziale n° 664 del 07/12/2021 (CUP: H62C19000170004 – CIG: Z7C343A59F) e finanziato con contributi derivanti dall'OCDPC n° 780/2021 "Attuazione dell'articolo 11 del decreto-legge 28 aprile 2009, n. 39, convertito, con modificazioni, dalla legge 24 giugno 2009, n. 77, rifinanziato dalla legge 30 dicembre 2018, n. 145" e dalla DGR n° 1885/2021.

Il Comune di Fontanellato è dotato di uno studio di Microzonazione Sismica di Livello 2 realizzato nel febbraio 2012 dallo scrivente professionista. Tale studio venne finanziato con i contributi di cui alla OPCM 3907/2010 ed è stato validato dalla riunione della Commissione Tecnica per il monitoraggio degli studi di microzonazione sismica del 06/02/2014.

Il presente studio di Livello 3 è stato condotto a partire dal citato studio di Livello 2, provvedendo ad aggiornare ed integrare gli elaborati precedentemente realizzati, in modo da renderli conformi alle nuove specifiche tecniche.

Si sottolinea il fatto che, grazie all'abbondante quantità di nuovi dati litostratigrafici reperiti nell'archivio comunale e alle indagini di nuova esecuzione, è stata condotta una revisione delle MOPS nell'areale del Capoluogo rispetto a quanto definito nel Livello 2.

Le attività di ricerca, acquisizione ed implementazione dati oltre che la predisposizione degli elaborati prodotti nell'ambito del presente studio, sono stati condotti in ottemperanza delle direttive e agli atti tecnici sotto elencati:

- D.G.R. n° 476 del 12.04.2021 aggiornamento Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017);
- D.G.R. n° 564 del 26.04.2021 "Integrazione della propria Deliberazione n. 476 del 12 aprile 2021 mediante approvazione dell'allegato A, "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)";
- "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica" - Versione 4.2, Roma, dicembre 2020 - Elaborato e approvato nell'ambito dei lavori della Commissione tecnica per la microzonazione sismica, nominata con DPCM 21 aprile 2011 (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 (ICMS).

Di concerto con l'Amministrazione Comunale l'approfondimento di Livello 3 è stato condotto sul settore ovest del Capoluogo, dove sono presenti strutture di rilievo strategico ai fini della Protezione Civile.

Le strutture di cui sopra sono inserite nel Piano Comunale di Protezione Civile e rappresentano le principali risorse da mettere in campo per la gestione delle emergenze, il ricovero per la popolazione e per l'ammassamento dei soccorsi.

L'ulteriore motivazione che ha portato a tale scelta è l'assenza di aree instabili con interessamento di ambiti urbanizzati e/o urbanizzabili.

Gli elaborati redatti sono stati predisposti in versione cartacea e in versione digitale (PDF con risoluzione di 300 dpi). I dati cartografici sono stati allestiti anche in formato vettoriale (*shapefile*).

Per l'archiviazione dei dati e l'editing dei documenti sono stati seguiti gli SRAI (Standard di rappresentazione e archiviazione informatica) versione 4.2.

Per l'inserimento dei dati alfanumerici dei siti, delle indagini e dei parametri è stato utilizzato l'apposito software: “MS - SoftMS”, versione 4.2.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	2 di 62

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

2.1 INQUADRAMENTO

Il Comune di Fontanellato appartiene alla Regione Emilia-Romagna e ricade nella fascia di passaggio tra la media e la bassa pianura parmense (Fig. 1).



Fig. 1 - Ubicazione del Comune di Fontanellato

La pianura emiliano-romagnola è il risultato del riempimento del Bacino Perisuturale Padano, vasta depressione delimitata a cintura dai rilievi appenninici ed alpini, avvenuto attraverso un potente accumulo di depositi marini ed alluvionali di età pliocenica e quaternaria.

L'attuale strutturazione del bacino trae origine dalle spinte deformative che, a partire dal Miocene superiore, hanno coinvolto l'Appennino Settentrionale e l'antistante substrato padano, provocandone la deformazione secondo un modello generale a falde sovrapposte ed embrici NE vergenti (PIERI & GROPPPI, 1982).

In particolare nel settore di pianura sono presenti due archi di accavallamenti (Fig. 2), in gran parte sepolti, sviluppati con orientamento NO-SE. Si tratta di gruppi di strutture



anticlinaliche, associate a piani di scollamento ed accavallamento (*thrust*) immergenti generalmente verso SO con inclinazioni comprese tra 20° e 30°, separati da ampie zone sinclinaliche fortemente subsidenti.

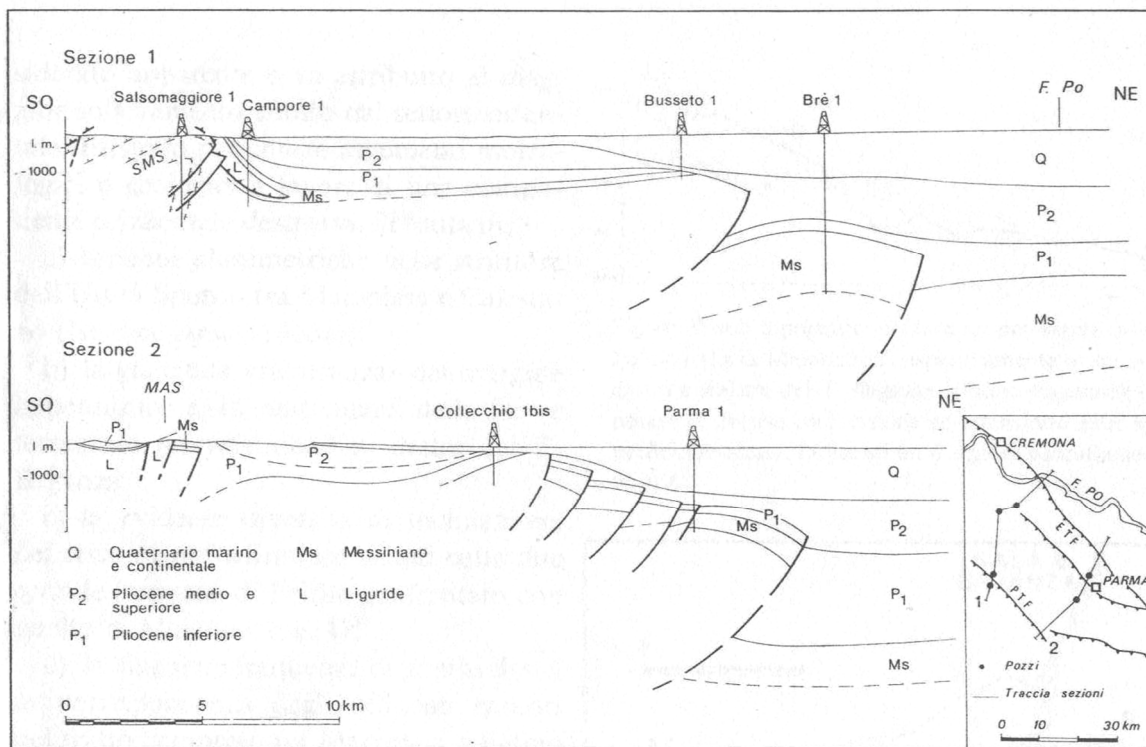


Fig. 2 – Sezioni geologiche (da Pieri e Groppi, 1981). SMS = Struttura di Salsomaggiore; MAS = Struttura di M. Ardone

Il primo arco è impostato in corrispondenza dell'attuale margine morfologico dell'Appennino, il secondo, più a settentrione, si estende dall'Appennino vogherese fino a Reggio Emilia sull'allineamento Cremona – Parma. L'arco di accavallamenti più meridionale è conosciuto nella letteratura geologica (PIERI & GROPPi, 1982; BERNINI & PAPANI, 1987) con il nome di "Fronte di Sovrascorrimento Pedeappenninico" (*Pedeappenninic Thrust Front*, PTF); il secondo, più settentrionale, è conosciuto con il nome di "Fronte di Sovrascorrimento Esterno" (*External Thrust Front*, ETF) e costituisce l'arco di accavallamenti sepolti attualmente attivi nel Bacino Padano, come dimostrano i recenti terremoti.

Il riempimento del bacino è costituito da una successione di depositi a carattere regressivo, con alla base sabbie e peliti torbiditiche seguite da un prisma sedimentario fluvio-deltizio progradante, ricoperto al tetto da depositi continentali. Tale riempimento non è avvenuto in maniera progressiva e continua, ma è il risultato di eventi tettonico-



Elaborato	Data	Agg.	Pag.
RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	4 di 62

sedimentari “parossistici”, separati nel tempo da periodi di marcata subsidenza bacinale e movimenti ridotti delle strutture compressive.

L’interpretazione dei profili sismici eseguiti nel corso degli anni dall’AGIP (Di Dio, 1997) ha permesso di riconoscere due direzioni di progradazione: la prima, assiale, est-vergente, connessa al paleodelta del Po; la seconda, trasversale, nord-vergente, originata dai sistemi deltizi ad alimentazione appenninica.

Sulla base dei moderni concetti di stratigrafia sequenziale, ossia del metodo stratigrafico che utilizza le discontinuità e le superfici di continuità ad esse correlabili per suddividere la successione sedimentaria in sequenze deposizionali, nell’ambito dei depositi quaternari del margine appenninico padano e dell’antistante pianura sono state riconosciute due sequenze principali, in risposta ad altrettanti eventi tettonici di sollevamento regionale, così denominate:

- **Supersistema del Quaternario Marino** (affiorante nella fascia collinare)
- **Supersistema Emiliano-Romagnolo**

L’organizzazione verticale delle facies di questi sistemi deposizionali è costituita dall’alternanza ciclica di corpi sedimentari a granulometria fine, con corpi sedimentari a granulometria prevalentemente grossolana, indotta dalle disattivazioni e dalle successive riattivazioni dei sistemi deposizionali.

All’interno delle sequenze deposizionali principali (Supersistemi) sono state distinte sequenze di rango inferiore, denominate Sintemi, delimitate da superfici di discontinuità indotte da eventi tettonici minori a carattere locale e/o da oscillazioni climatico-eustatiche; a loro volta i Sintemi vengono suddivisi in unità minori (Subsistemi e Unità).

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo, è composto da due unità principali: una unità inferiore, detta “Sistema Emiliano-Romagnolo Inferiore” ed un’unità superiore detta “Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore”, separate da una superficie di discontinuità stratigrafica, individuata in affioramento e seguita nel sottosuolo tramite l’interpretazione dei profili sismici.

Il contesto geodinamico locale in cui si sviluppa il Supersistema Emiliano- Romagnolo è quello di un bacino di *piggyback* adiacente all’avanfossa padana, allungato in senso SE – NO e limitato a tergo (SO) e sul fronte (NE) dai due archi di strutture compressive

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	5 di 62

(rispettivamente PTF e ETF) fortemente attive. Fino a quando il sollevamento del margine appenninico determinato dal PTF risulta tale da continuare a produrre una forte subsidenza relativa del bacino di *piggyback* posto ai suoi piedi, in quest'ultimo persistono le condizioni per avere prevalente aggradazione sedimentaria. A questa fase corrisponde la deposizione dei sedimenti di piana e conoide alluvionale distale appartenenti al Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore.

Nel momento in cui diminuisce la subsidenza relativa del bacino di *piggyback*, come conseguenza del forte sollevamento regionale prodotto in corrispondenza dell'ETF, si determinano significativi spostamenti verso Nord del margine appenninico e quindi si assiste, allo sviluppo di depositi di conoide alluvionale, terrazzati. Quest'ultimi, nel loro insieme, costituiscono il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore.

Il Supersintema Emiliano-Romagnolo giace in discordanza sul Supersintema Quaternario Marino, di età Pliocene superiore (?) - Pleistocene inferiore, il quale risulta costituito da terreni parali e marini, che si sono depositi al di sopra di una estesa superficie di discontinuità al termine di un evento di sollevamento tettonico di importanza regionale.

A sua volta il Supersintema Quaternario Marino giace al di sopra della formazione delle Argille di Lugagnano (o Argille Azzurre), affioranti nella fascia collinare, deposte in un bacino profondo a sedimentazione torbiditica, compreso tra l'ambiente neritico inferiore e la piana batiale (Iaccarino & Papani, 1982), probabilmente corrispondente al settore interno dell'avanfossa pliocenica del fronte appenninico.

Più in particolare le unità affioranti nel territorio comunale sono state distinte con riferimento alla "Carta Geologica della Regione Emilia-Romagna – Progetto CARG" che utilizza una suddivisione geologica delle unità basata su un metodo stratigrafico che utilizza le discontinuità e le superfici di continuità ad esse correlabili, per suddividere la successione sedimentaria in sequenze deposizionali.

Depositi quaternari continentali

Depositi alluvionali in evoluzione

I depositi alluvionali in evoluzione e recenti occupano l'alveo attuale dei corsi d'acqua e tratti temporaneamente abbandonati, ma che sono potenzialmente interessati dalle dinamiche fluviali in regime di piena ordinaria e sono quindi depositi soggetti ancora a rimobilizzazione.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	6 di 62

Risultano costituiti da ghiaie, talora embriciate, sabbie e subordinati limi argillosi di origine fluviale. Nel territorio del Comune di Fontanellato sono localizzati in corrispondenza dell'alveo del Fiume Taro e delle adiacenti fasce golenali.

Successione neogenica-quadernaria del margine appenninico padano

Si tratta di depositi appartenenti alla successione post-evaporitica, sedimentatasi successivamente alla crisi di salinità che ha interessato il bacino del Mediterraneo nel corso del Messiniano.

Nell'ambito dei depositi quaternari del margine appenninico padano e dell'antistante pianura, sono state riconosciute due sequenze principali (stratigrafia sequenziale), in risposta ad altrettanti eventi tettonici di sollevamento regionale, così denominate:

- Supersistema del Quaternario Marino (non affiorante sul territorio comunale)
- Supersistema Emiliano-Romagnolo

L'organizzazione verticale delle facies di questi sistemi deposizionali è costituita dall'alternanza ciclica di corpi sedimentari a granulometria fine, con corpi sedimentari a granulometria prevalentemente grossolana, indotta dalle disattivazioni e dalle successive riattivazioni dei sistemi deposizionali.

All'interno delle sequenze deposizionali principali (Supersistemi) sono state distinte sequenze di rango inferiore, denominate Sintemi, delimitate da superfici di discontinuità indotte da eventi tettonici minori a carattere locale e/o da oscillazioni climatico-eustatiche; a loro volta i Sintemi vengono suddivisi in unità minori (Subsistemi e Unità).

Supersistema Emiliano-Romagnolo

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo, depositosi a partire da circa 650.000 anni b.p. sino all'Olocene, è costituito da una successione sedimentaria di ambiente continentale, articolata in due sintemi:

- Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (**AES**);
- Sintema Emiliano Romagnolo Inferiore (**AEI**).

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (Pleistocene medio – Olocene) è un'unità alluvionale prevalentemente grossolana.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	7 di 62

Le unità di rango inferiore del AES affioranti nella zona sono:

- Subsistema di Ravenna (AES8) (Pleistocene sup. – Olocene; post circa 20.000 anni b.p.): ghiaie sabbiose, sabbie e limi con copertura di limi argillosi di spessore variabile. Localmente sono presenti limi e limi sabbiosi prevalenti: depositi di interconoide e del reticolo idrografico minore. Il profilo di alterazione varia da qualche decina di cm fino ad 1 m ed i suoli presentano gli orizzonti superficiali decarbonatati o parzialmente decarbonatati. Il tetto dell'unità è rappresentato dalla superficie deposizionale, per gran parte relitta, corrispondente al piano topografico, mentre il contatto di base è discordante sulle unità più antiche. Lo spessore massimo dell'unità è inferiore a 20 m.
- Unità di Modena (AES8a) (Olocene; post IV-VII sec. d.C.): sabbie prevalenti con livelli e lenti di ghiaie, ricoperte da una coltre limoso argillosa discontinua. Il profilo di alterazione è di esiguo spessore (poche decine di cm). Lo spessore massimo dell'unità è di alcuni metri.

I depositi riferibili al Subsistema di Ravenna affiorano esclusivamente nel settore meridionale del territorio comunale e si spingono verso nord sino circa all'altezza di Casalbarbato.

La restante porzione del territorio comunale è interessata dall'affioramento dei depositi riferibili all'Unità di Modena.

Per quanto concerne le caratteristiche sismotettoniche, l'inquadramento generale delle principali strutture attive sismogenetiche è rappresentato nella Mappa di sintesi realizzata dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli dell'Emilia-Romagna (Fig. 3).

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	8 di 62

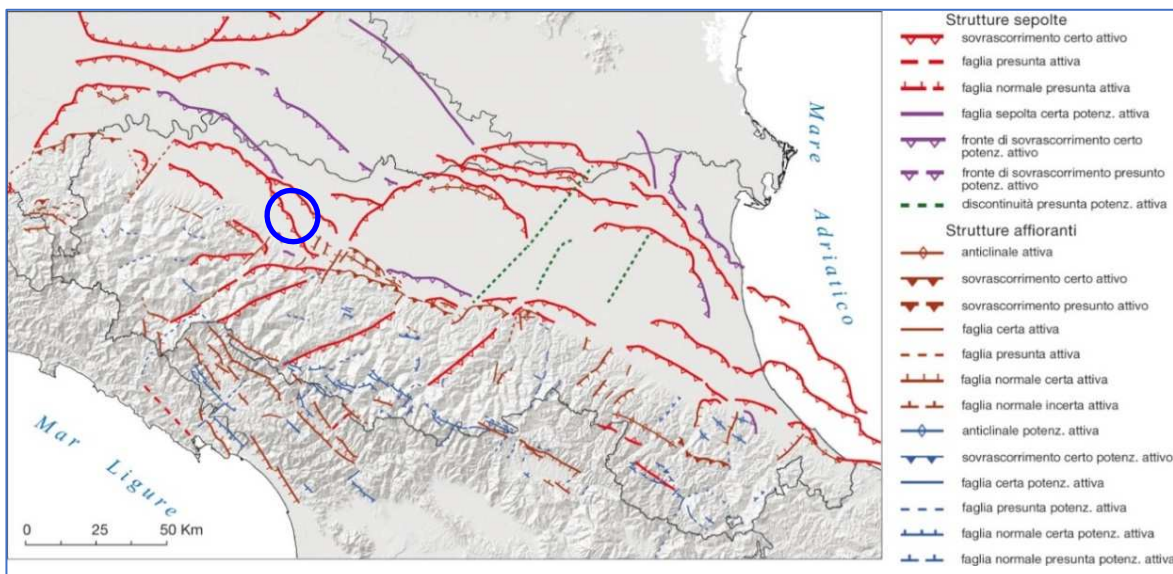


Fig. 3 - Mappa di sintesi delle strutture tettoniche attive e potenzialmente attive riconosciute in Emilia-Romagna (da: “Note illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe” - Servizio Geologico Sismico e dei Suoli - Regione Emilia-Romagna, 2017)

Le sorgenti sismogenetiche e le faglie potenzialmente attive e capaci, interessanti il territorio comunale di Fontanellato, sono state ricavate dal *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS) dell’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Version 3.3.0 <https://doi.org/10.13127/diss3.3.0>. che costituisce 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. 4, le sorgenti sismogenetiche prossime all’area in studio sono:

- **ITCS009 – Busseto-Cavriago** (sorgente composita) con una magnitudo massima attesa $M_w = 6,8$
- **ITCS045 – San Giorgio Piacentino-Fornovo di Taro** (sorgente composita) con magnitudo massima attesa $M_w = 7,2$

¹ Gruppo di lavoro DISS (2021). Database delle singole sorgenti sismogeniche (DISS), versione 3.3.0: una raccolta di potenziali sorgenti per terremoti superiori a M 5.5 in Italia e nelle aree circostanti. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/diss3.3.0>.

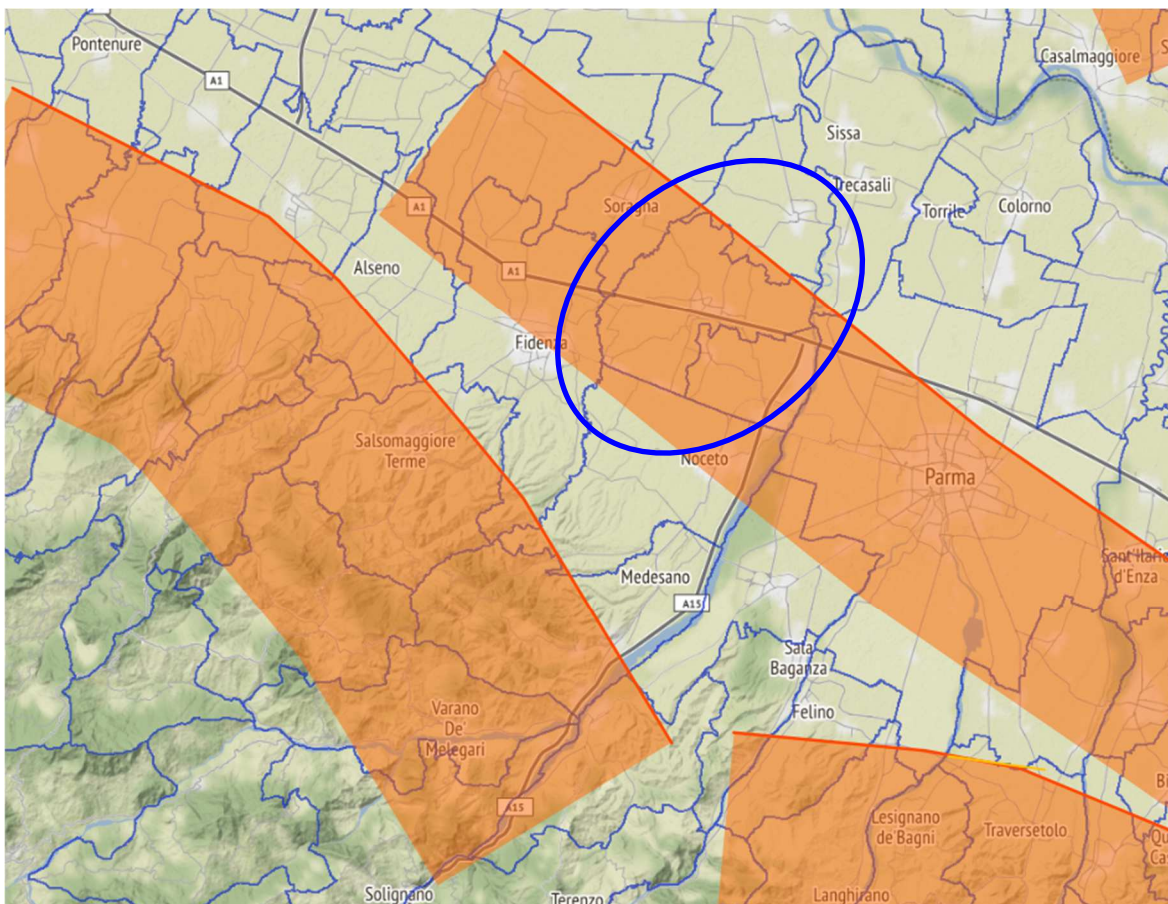


Fig. 4 - Ubicazione delle sorgenti sismogenetiche da DISS 3.3.0. Il cerchio blu individua approssimativamente il territorio del Comune di Fontanellato

Con riferimento alla Zonazione sismogenetica ZS9 dell'INGV, il territorio comunale di Fontanellato ricade nella zona all'interno della zona sismogenetica 913 (Fig. 5), che è caratterizzata da terremoti di magnitudo medio-bassa, originati da movimenti prevalentemente compressivi NW con meccanismi trascorrenti nelle zone di svicolo, che dissecano la continuità longitudinale delle strutture sepolte attive.

Il maggior numero di terremoti che si verificano in questa zona, presenta il proprio ipocentro a profondità comprese tra 12 e 20 km e i valori di magnitudo massima previsti, sulla base dei meccanismi focali, sono pari a $M_{wmax} = 6,14$.



Elaborato	Data	Agg.	Pag.
RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	10 di 62

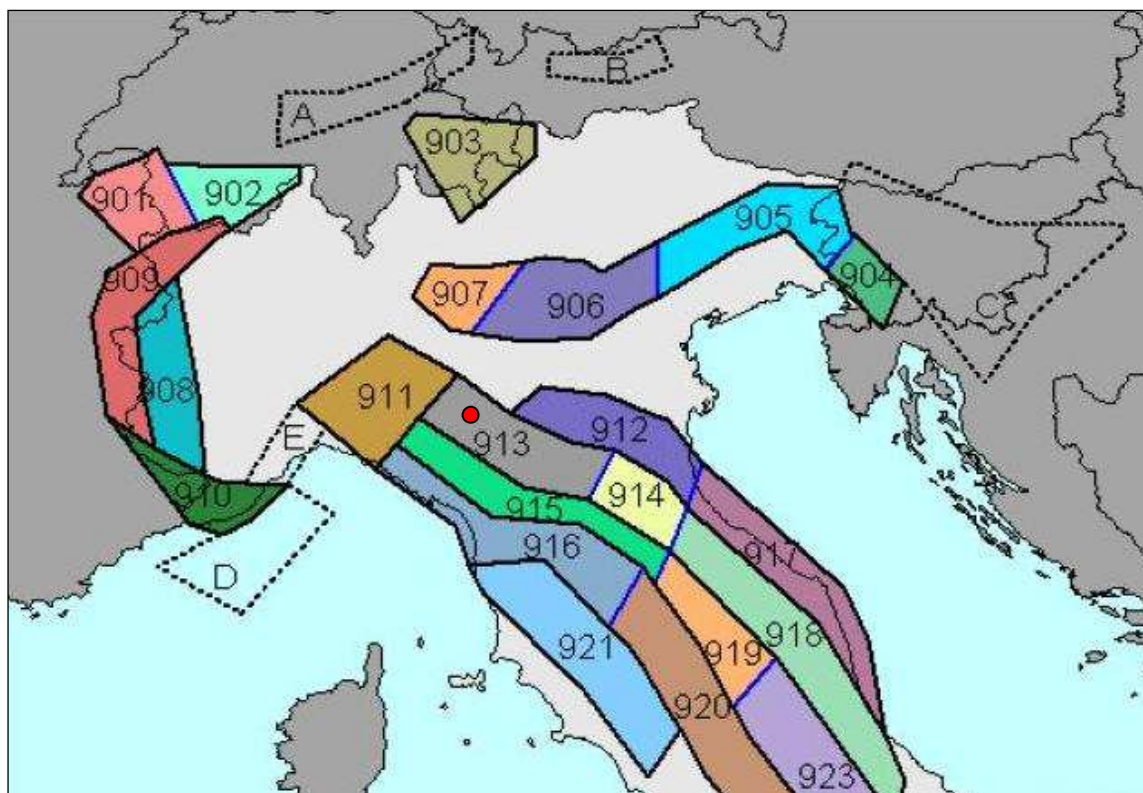


Fig. 5 – Zonazione sismogenetica ZS9 (Tratta da: “Redazione della Mappa di Pericolosità Sismica – Rapporto conclusivo – bozza aprile 2004” - INGV). Il punto rosso segna approssimativamente il Comune di Fontanelato.

Nella mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale, redatta a cura dell’INGV la pericolosità di ciascuna zona è espressa in termini di accelerazione massima al suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi contraddistinti da $V_s > 800$ m/s.

Il territorio in esame ricade in un’area caratterizzata da un’accelerazione sismica orizzontale massima a_g pari a 0,125-0,150 g (Fig. 6).

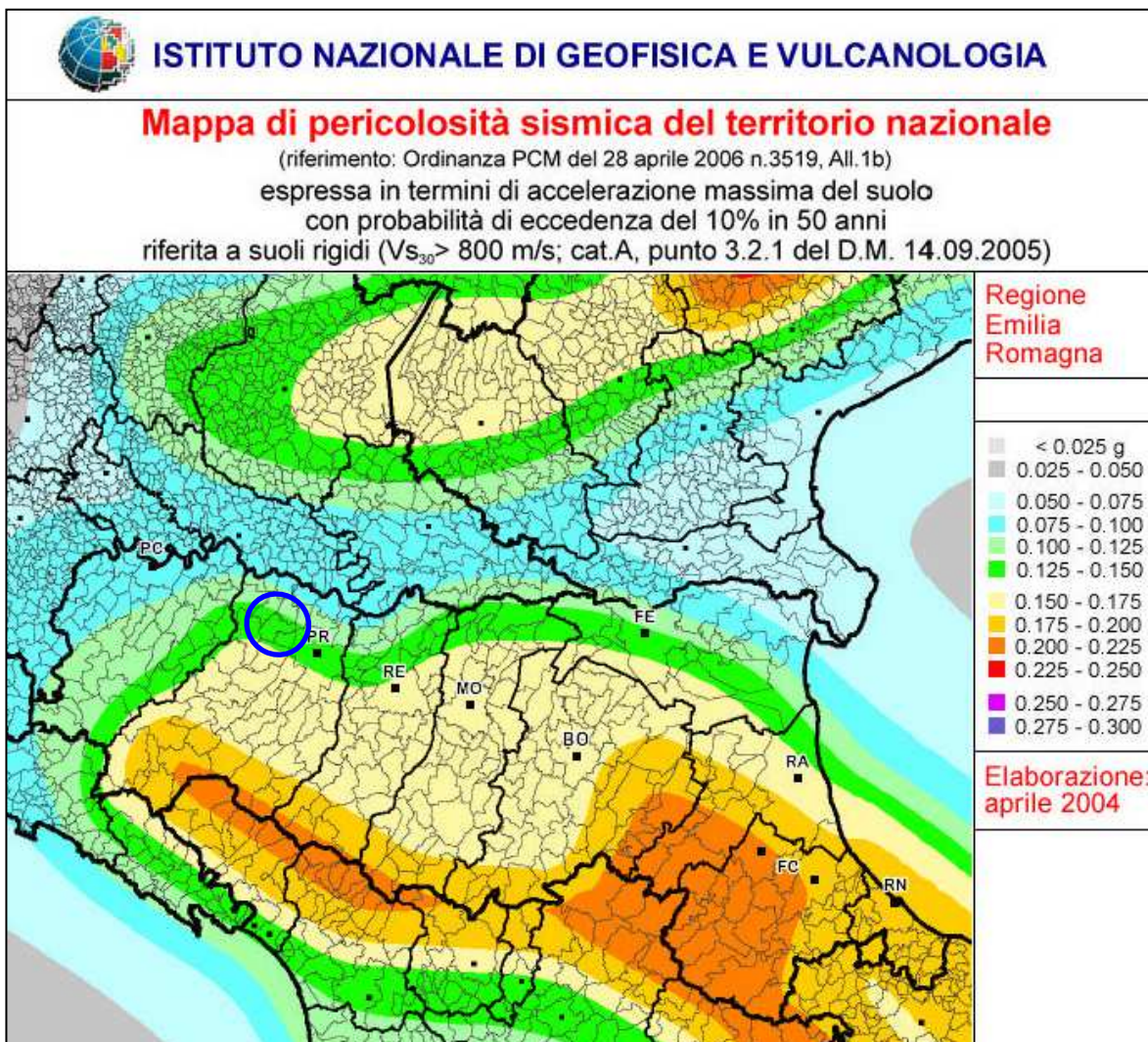


Fig. 6 - Estratto della Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale. Il cerchio di colore blu individua il Comune di Fontanellato

2.2 STORIA SISMICA

La storia sismica del Comune di Fontanellato è stata desunta dal Database Macrosismico Italiano, versione DBMI15 v4.0, che contiene informazioni relative a 123.981 osservazioni macrosismiche dall'anno 1000 al 2020 relative a 3229 terremoti.

Secondo quanto riportato in DBMI15 v4.0, la storia sismica di Fontanellato è riassunta graficamente nel diagramma riportato in Fig. 7, mentre in Tab. 1 sono elencati gli eventi di maggiore intensità, indicando per ciascuno di essi, oltre agli effetti provocati al sito, espressi come I(MCS), la data e l'ora in cui si è verificato, il numero di località in cui è stato registrato l'evento (N_p), l'intensità massima epicentrale in scala MCS (I_0) e la magnitudo momento (M_w).

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	12 di 62

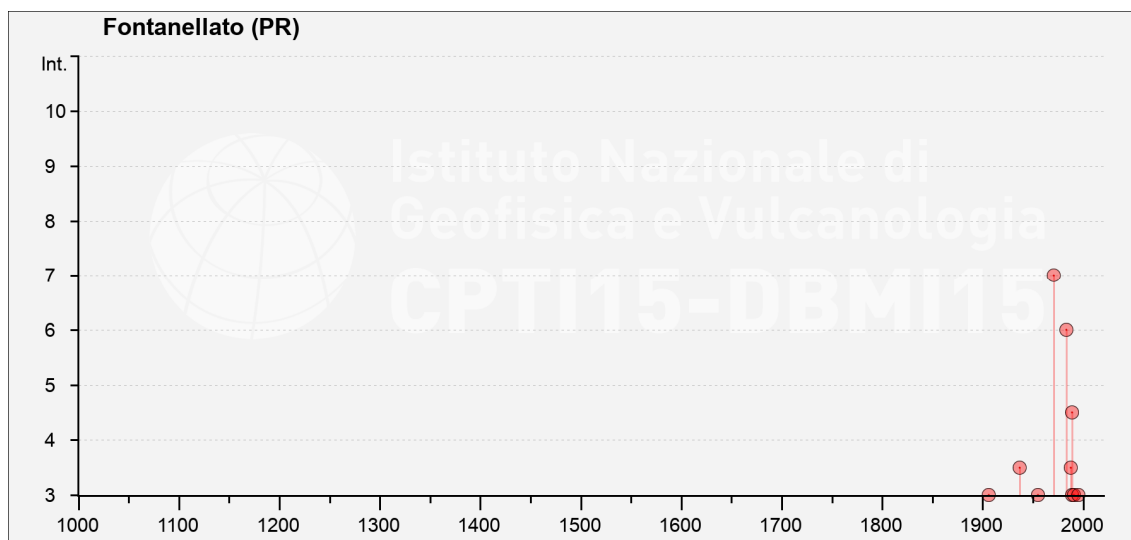


Fig. 7 – Eventi sismici di maggior intensità registrati nel Comune di Fontanellato. Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D’Amico S., Antonucci A. (2022). Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 4.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.4>

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
7	1971	07	15	01	33	2	Parmense	228	8	5.51
6	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04
4-5	1989	09	13	21	54	0	Prealpi Vicentine	779	6-7	4.85
3-4	1937	09	17	12	19	0	Parmense	34	7	4.77
3-4	1988	03	15	12	03	1	Reggiano	160	6	4.57
3	1906	08	25	03	11		Parmense	31	5	4.25
3	1955	03	12	06	57	0	Parmense	15	5	4.15
3	1989	10	03	09	41	3	Appennino parmense	91	4	4.04
3	1991	10	31	09	31	1	Emilia occidentale	134	5	4.33
3	1995	10	10	06	54	2	Lunigiana	341	7	4.82
NF	1904	02	25	18	47	5	Reggiano	62	6	4.81
NF	1984	04	29	05	02	5	Umbria settentrionale	709	7	5.62
NF	1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
NF	1996	12	16	09	09	5	Pianura emiliana	115	5-6	4.06
NF	2000	06	18	07	42	0	Pianura emiliana	304	5-6	4.40

I [MCS]	Intensità macrosismica espressa in scala MCS. Alcuni effetti non sono esprimibili con la scala MCS per cui vengono utilizzati dei codici alternativi (si veda la relativa tabella)
Data	Data del terremoto
Ax	Area epicentrale, area geografica in cui sono stati riscontrati gli effetti maggiori del terremoto
NMDP	Numero di punti, numero di osservazioni macrosismiche disponibili per il terremoto
Io	Intensità macrosismica epicentrale, da CPTI15, espressa in scala MCS, Mercalli-Cancani-Sieberg [dettagli]
Mw	Magnitudo momento, da CPTI15

Tab. 1 - Elenco dei terremoti più forti risentiti nell'area di Fontanellato il 1000 e il 2020. 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> - parzialmente modificato

2.3 CLASSIFICAZIONE SISMICA

A seguito dell'emanazione dell'OPCM n° 3274/2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" e s.m.i., il Comune di Fontanellato è stato classificato sismico in ZONA 3. In precedenza, sotto il profilo della normativa sismica, risultava non classificato.

Con la DGR n° 1164/2018 "Aggiornamento della classificazione sismica di prima applicazione dei comuni dell'Emilia-Romagna", il Comune di Fontanellato è stato confermato sismico in ZONA 3 (Fig. 8).

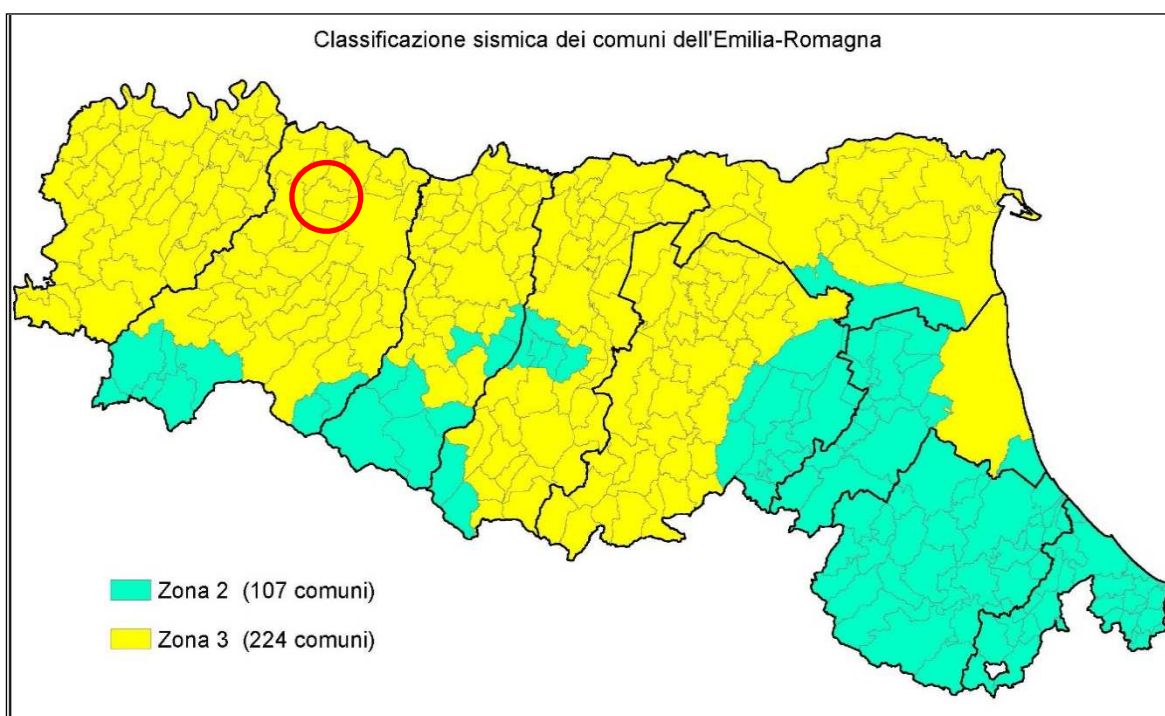


Fig. 8 - Classificazione sismica dell'Emilia-Romagna di cui alla DGR 1164 del 23.07.2018. Regione Emilia-Romagna. Il cerchio rosso individua il Comune di Fontanellato



Elaborato	Data	Agg.	Pag.
RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	14 di 62

3. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

3.1 ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI

La ricerca effettuata presso l'archivio dell'Ufficio Tecnico Comunale ha consentito di esaminare numerose relazioni geologiche, prodotte a corredo di varianti agli strumenti urbanistici, di progetti edilizi, di PUA e di opere pubbliche e di acquisire copia delle indagini geognostiche eseguite.

I dati acquisiti sono andati ad integrare il database geognostico inizialmente messo a disposizione dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

Una volta completato il quadro dei dati disponibili, è stata pianificata e condotta una specifica campagna di indagini integrative (cfr. Tab. 2).

Tutte le indagini sono state trasformate in formato digitale con modalità georiferita, al fine di consentirne l'elaborazione in ambiente GIS. A tal proposito sia i dati di base, che i dati elaborati sono stati organizzati in formato vettoriale (*shapefile*).

In Tab. 2 è rappresentato il quadro d'insieme delle prove acquisite ricadenti nel territorio comunale o appositamente realizzate nelle aree interessate dal secondo e dal terzo livello d'approfondimento.

Prove in sito	RER	prove MS2	Archivio UTC	prove MS3
Sondaggi a carotaggio continuo	28	-	8	-
Prove penetrometriche dinamiche leggere (DL)	4	-	-	-
Prove penetrometriche dinamiche medie (DN)	-	-	4	-
Prove penetrometriche dinamiche super-pesanti (DS)	-	-	11	-
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)	12	-	115	-
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTE)	10	-	-	-
Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)	6	-	1	3
Prove penetrometriche statiche con cono sismico (SCPTU)	-	-	-	2
MASW	-	12	11	3
Stazione microtremore a stazione singola (HVSR)	-	39	1	4
Pozzi per acqua	44	-	-	-
Pozzi per idrocarburi	8	-	-	-
Profilo sismico a rifrazione	-	-	1	-
Prova REfraction Microtremors	-	-	1	-
Down Hole (DH)	-	-	1	-

Tab. 2 – Prove in sito disponibili per il Comune di Fontanellato

L'ubicazione dei dati stratigrafici e geofisici acquisiti è riportata nella Carta delle indagini in scala 1:10.000.

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, con particolare riferimento all'individuazione della profondità del substrato geologico.

Per quanto concerne il modello generale del sottosuolo del Comune di Fontanellato, in questa sede si è fatto riferimento a quanto già definito e descritto nello studio di Microzonazione sismica di secondo livello, al quale si rimanda per particolari ed approfondimenti.

 <i>Studio di geologia</i> <i>dott. Stefano Castagnetti</i>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	16 di 62

5. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Nella prima fase di lavoro, come descritto in precedenza, sono stati acquisiti tutti i dati bibliografici e di archivio disponibili, sono stati condotti puntuali rilievi sul territorio ed è stata analizzata la cartografia geologica e geomorfologica fruibile. In seguito, tenendo conto dell'insieme degli elementi acquisiti, è stata predisposta ed eseguita una campagna di rilievi integrativi e di controllo. A conclusione di questa fase sono stati predisposti i seguenti elaborati:

- **Carta delle indagini (scala 1:4.000)** - In questa carta è riportata l'ubicazione, delle indagini in sito acquisite o realizzate in questa sede, distinte in base alla specifica tipologia (sondaggi, penetrometrie, prove geofisiche, ecc.). In considerazione dell'estensione del territorio indagato, la carta è stata suddivisa in tre tavole: una relativa al Capoluogo e le altre due relative alle frazioni.
- **Carta geologico-tecnica (scala 1:10.000)** - Tale carta prende in esame i terreni di copertura, il substrato geologico, le instabilità dei versanti, gli elementi geologici, morfologici e idrogeologici e gli ambienti genetico-deposizionali dei terreni di copertura. In questa carta sono inoltre riportate le tracce delle sezioni geologiche pubblicate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.
- **Carta delle frequenze naturali dei terreni (scala 1:10.000)** - In questa carta sono riportate le ubicazioni dei punti ove sono state eseguite le indagini sismiche HVSR, con simbolicamente rappresentato il valore F_0 del picco significativo, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale (*frequenza principale*). A fianco di ciascun simbolo è riportata la frequenza relativa al primo picco significativo e, qualora presente, è indicata anche la frequenza di un secondo picco (*frequenza secondaria*). Le misure inoltre sono state suddivise in classi sulla base delle frequenze e dell'ampiezza del picco.
- **Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (scala 1:10.000)** - In questa carta sono state individuate n° 7 zone stabili suscettibili di amplificazioni locali e i punti di misura di rumore ambientale.

Successivamente è stato predisposto il seguente elaborato:

- **Carta delle velocità delle onde di taglio S (scala 1:10.000)** - In questa carta è stata riportata l'ubicazione delle prove geofisiche e a fianco di ciascuna prova è stato riportato il rispettivo valore di V_{S30} e/o V_{SH} in m/s.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	17 di 62

Infine si è proceduto con la terza ed ultima fase di lavoro, in cui è stata riproposta un'analisi semplificata nelle aree sottoposte a microzonazione sismica di Livello 2 ed un'analisi approfondita per gli areali sottoposti a microzonazione sismica di Livello 3. L'analisi approfondita è stata svolta per un'area del Capoluogo, ricompresa in due MOPS, di particolare interesse ai fini di Protezione Civile, ed ha portato alla determinazione dello spettro di risposta in superficie e dei fattori di amplificazione.

Gli elaborati prodotti in questa fase sono i seguenti:

- **Carte di microzonazione sismica (scala 1:10.000)** - In queste carte, basate su quanto predisposto nell'indagine di secondo livello, sono stati riportati gli approfondimenti realizzati nell'ambito del presente studio. Più in particolare sono stati predisposti i seguenti elaborati cartografici:

- Carta di microzonazione sismica – FPGA
- Carta di microzonazione sismica – FA_{0,1 - 0,5 s}
- Carta di microzonazione sismica – FA_{0,4 - 0,8 s}
- Carta di microzonazione sismica – FA_{0,7 - 1,1 s}
- Carta di microzonazione sismica – FA_{0,5 - 1,5 s}
- Carta di microzonazione sismica – FH_{0,1 - 0,5 s}
- Carta di microzonazione sismica – FH_{0,5 - 1,0 s}
- Carta di microzonazione sismica – FH_{0,5 - 1,5 s}
- Carta di microzonazione sismica – H_{SM}
- Carta di microzonazione sismica – H_{0,4 - 0,8 s}
- Carta di microzonazione sismica – H_{0,7 - 1,1 s}

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	18 di 62

6. ELABORATI CARTOGRAFICI

6.1 Carta delle indagini

Nell'aggiornamento della Carta delle indagini sono state riportate le ubicazioni delle prove di nuova esecuzione, unitamente ai dati pregressi, relativi a indagini geognostiche e/o geofisiche a corredo di pratiche edilizie depositate presso l'Ufficio Tecnico Comunale e a stratigrafie di pozzi reperite nel DataBase geognostico della Regione Emilia-Romagna.

Esse sono state distinte in base alla tipologia (Fig. 9).










	Sondaggio a carotaggio continuo
	Prova sismica in foro tipo Downhole
	Prova penetrometrica statica con punta meccanica
	Prova penetrometrica statica con piezocono
	Prova penetrometrica statica con punta elettrica
	Prova penetrometrica con cono sismico
	Prova penetrometrica dinamica superpesante
	Prova penetrometrica dinamica media
	Prova penetrometrica dinamica leggera
	Pozzo per acqua
	Pozzo per idrocarburi
	Stazione microtremore a stazione singola (HVSr)
	Stratigrafia zona MS (teorica)
	MASW
	Profilo sismico a rifrazione
	Prova REfractionMicrotremors

Fig. 9 – Legenda della Carta delle indagini

Nelle carte sono indicate anche alcune indagini esterne ai perimetri dell'area oggetto di microzonazione sismica, ove sono state indirizzate le analisi, ma ugualmente utili a definire le caratteristiche litostratigrafiche e/o geofisiche dei terreni.



6.2 Carta geologico-tecnica per microzonazione sismica

Nella Carta geologico-tecnica, prodotta in scala 1:10.000, sono state riportate le informazioni di base (geologia, geomorfologia, caratteristiche litotecniche, geotecniche e idrogeologiche) derivate da elaborati esistenti e da indagini geognostiche pregresse.

L'assetto giaciturale e strutturale delle formazioni geologiche è rappresentato dalle sezioni litostratigrafiche profonde elaborate dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. Più in particolare si tratta delle sezioni n° 39, n° 87 e n° 162 nei tratti di attraversamento del territorio comunale di Fontanellato (Figg. 10, 11 e 12).

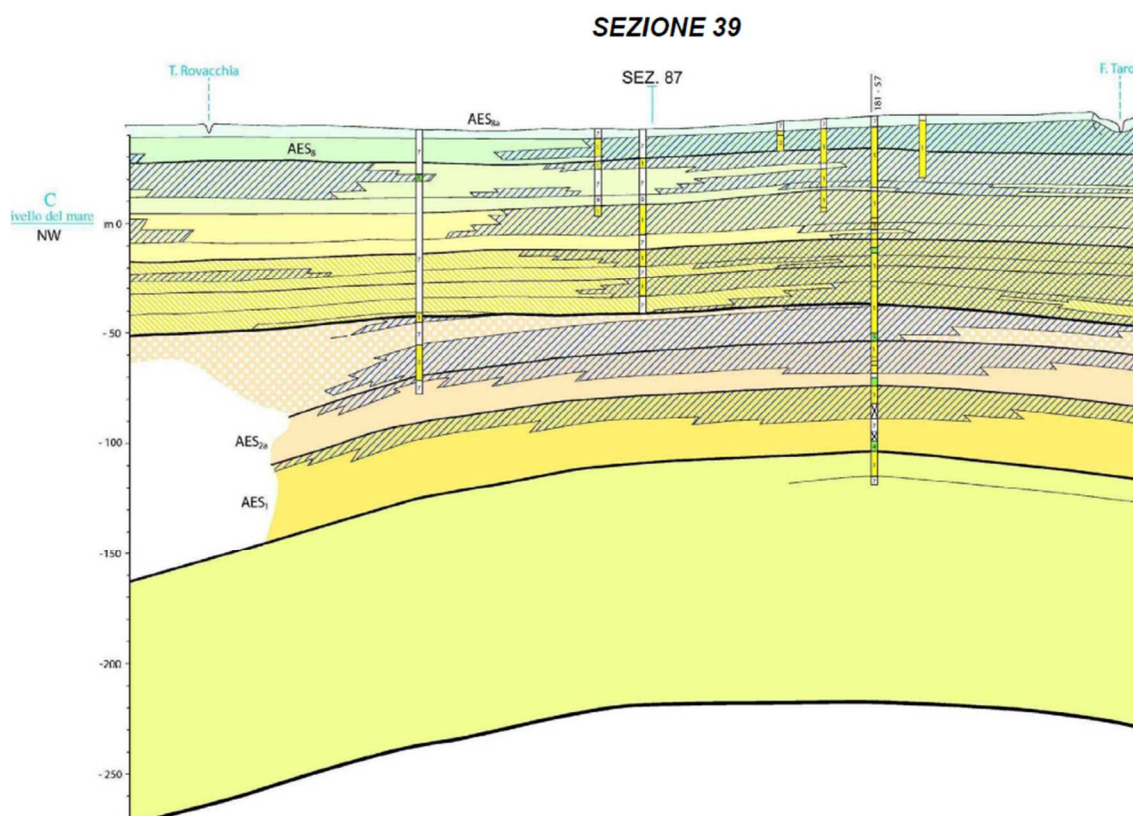


Fig. 10 – Sezione geologica n° 39 (fonte: Servizio Geologico Sismico e dei Suoli - Regione Emilia-Romagna)

	Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
		RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	20 di 62

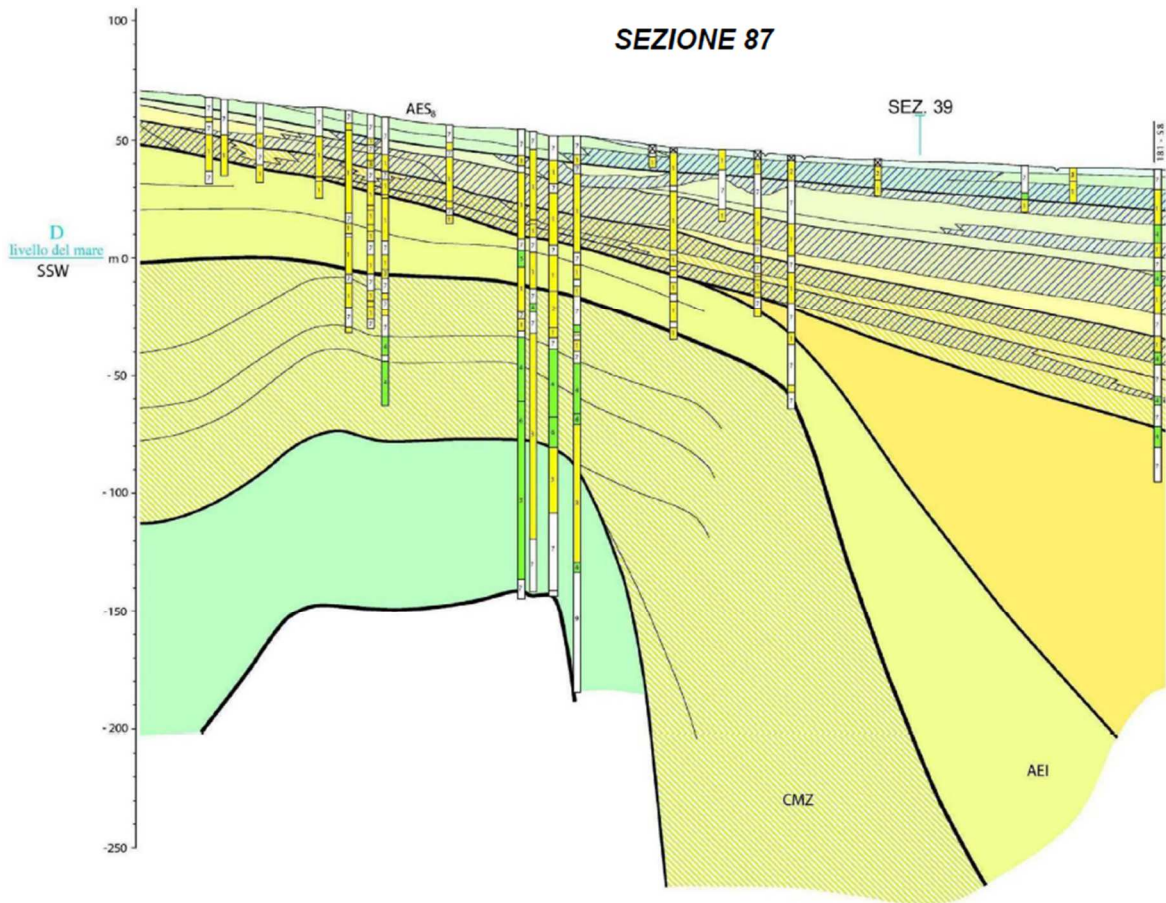


Fig. 11 – Sezione geologica n° 87 (fonte: Servizio Geologico Sismico e dei Suoli - Regione Emilia-Romagna)

	Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
		RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	21 di 62

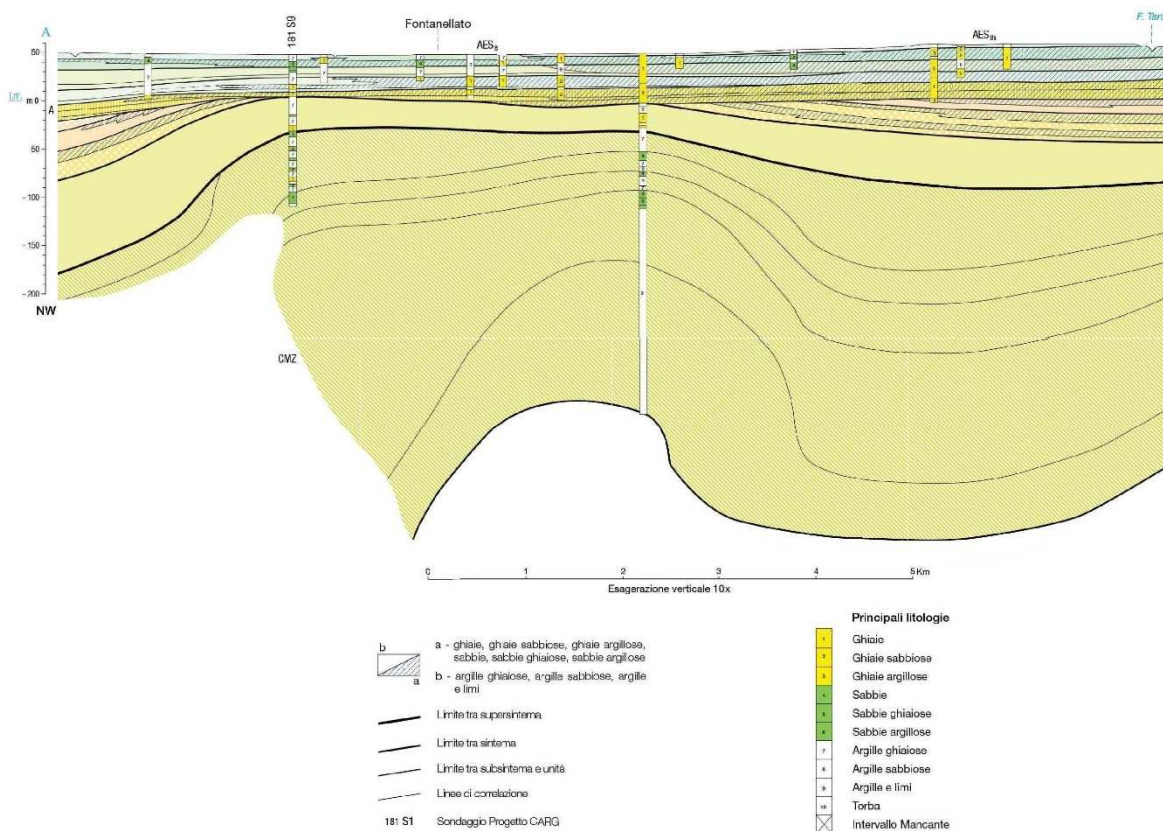


Fig. 12 – Sezione geologica n° 162 (fonte: Servizio Geologico Sismico e dei Suoli - Regione Emilia-Romagna)

In particolare nella sezione 87 emerge con evidenza la struttura anticlinale presente nel sottosuolo e riconducibile al Fronte di accavallamento esterno di cui al capitolo precedente.

Viceversa nella sezione 39 e 162 sono riconoscibili i due principali sistemi appenninici, che si sviluppano nel sottosuolo del territorio comunale: nel settore orientale prevalgono i sedimenti grossolani della conoide maggiore del F. Taro, mentre in quello occidentale si osserva una minore estensione dei lobi ghiaiosi connessi alla conoide minore del T. Parola – T. Rovacchia.

Va evidenziata una zona intermedia tra le ghiaie appartenenti rispettivamente al sistema del F. Taro e a quelle dei sistemi alluvionali minori, caratterizzata da prevalenza di sedimenti fini, che può essere interpretata come zona di traccimazione interposta tra le due conoidi.

La legenda della carta geologico-tecnica è la seguente (Fig. 13):

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	22 di 62

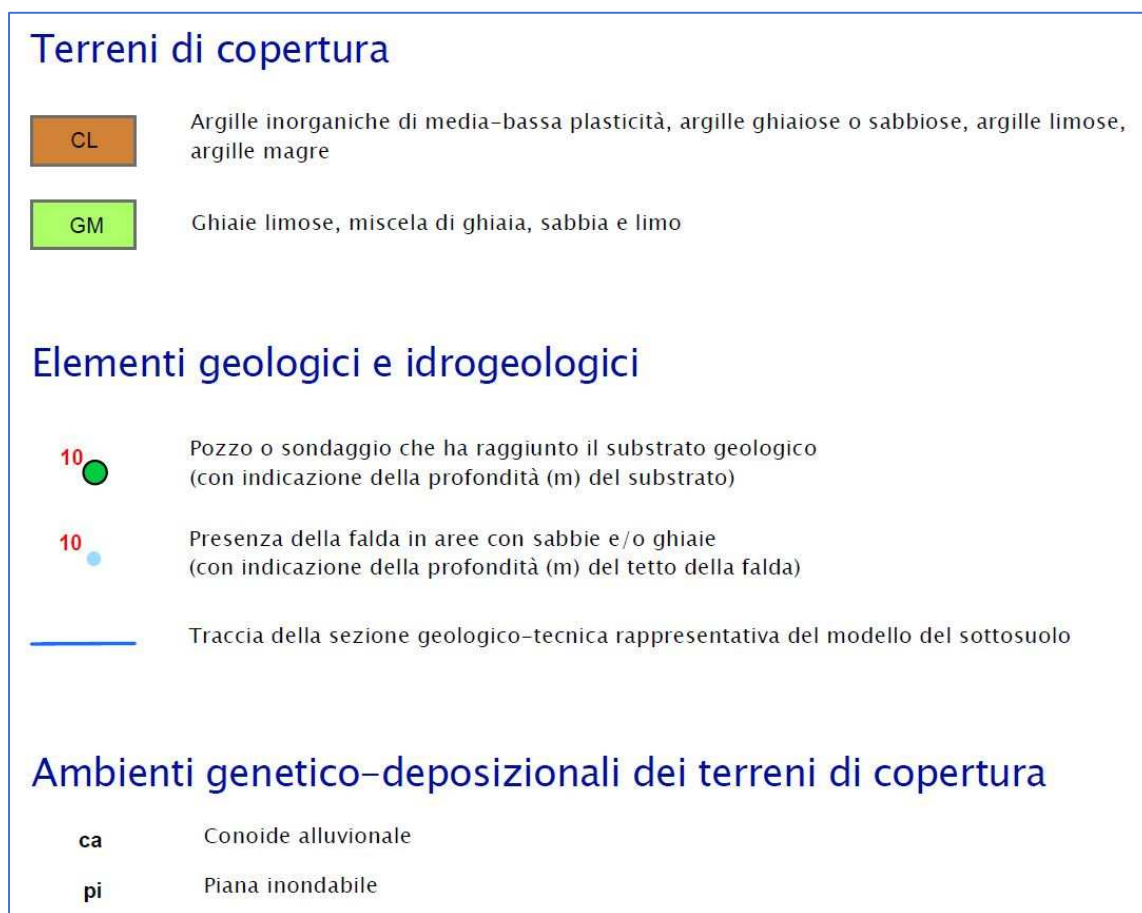


Fig. 13 – Legenda della Carta geologico tecnica

In estrema sintesi il sottosuolo del territorio comunale presenta le seguenti caratteristiche:

- il settore orientale del territorio, su cui sorgono gli abitati di Albareto e Ghiara, è caratterizzato dalla presenza di una coltre di depositi fini di spessore inferiore a 6 metri, che ricopre orizzonti ghiaiosi;
- il restante territorio è caratterizzato da depositi fini di spessore maggiore di 10 metri, che ricoprono alternanze di ghiaie e argille, in cui la componente ghiaiosa tende a diminuire spostandosi verso il limite occidentale del territorio comunale.

Nelle Carta geologico tecnica, dovendo attenersi agli standard di rappresentazione dettati dagli SRAI, sono state distinte, sulla base delle caratteristiche tessiturali, le seguenti unità di terreni di copertura:

- **CL** - Argille inorganiche di media-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre;
- **GM** – Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo: sono cartografate nel settore orientale del territorio comunale.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	23 di 62

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

- **ca** – conoide alluvionale;
- **pi** – piana inondabile.

Nella Carta geologico tecnica sono stati altresì riportati i pozzi e i sondaggi profondi che hanno raggiunto il substrato geologico e la profondità dello stesso e, limitatamente alle aree caratterizzate da sabbie e ghiaie subaffioranti, la profondità della falda.

6.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni

Sulla base di tutti i dati tomografici disponibili integrati con quelli di nuova acquisizione, è stata redatta la Carta delle frequenze naturali dei terreni alla scala 1:10.000.

Tale cartografia costituisce un aggiornamento di quella già redatta per gli studi di microzonazione di 2° livello.

In questa carta sono stati riportati tutti i punti di misura, 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 d'impedenza più o meno alto.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	24 di 62

In Fig. 14 si riporta uno stralcio della legenda di tale elaborato cartografico.

frequenza picco significativo (Hz)	ampiezza picco			spessore atteso (m)
	$1,5 \leq \text{HVSr} < 2$	$2 \leq \text{HVSr} < 3$	$\text{HVSr} \geq 3$	
$F_0 \leq 0,6$				> 200
$0,6 < F_0 \leq 1$				200 - 100
$1 < F_0 \leq 2$				100 - 30
$2 < F_0 \leq 8$				30 - 10
$F_0 > 8$				< 10
Assenza di picchi significativi				

A lato del simbolo sono riportate la frequenze relative al primo picco significativo (in rosso) e al secondo picco (in blu) se presente

Fig. 14 – Legenda della Carta delle frequenze

6.4 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 tale elaborato, le porzioni di territorio comunale microzionate vengono distinte a seconda dell'appartenenza a una delle seguenti 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. Tale categoria non è presente sul territorio comunale;
- 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. All'interno di queste aree si è operata un'ulteriore distinzione sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche, identificando profili stratigrafici tipo ai quali possono essere ricondotti gli areali esaminati. In queste zone sono richiesti approfondimenti di secondo livello;
- 3) **zone suscettibili di 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 instabilità di versante (frane attive e quiescenti),

liquefazioni e densificazione. In queste zone sono richiesti approfondimenti di terzo livello. Questa categoria non è presente sul territorio del Comune di Fontanellato.

L'unica categoria presente è quella delle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, all'interno della quale sono state operate ulteriori distinzioni. Infatti, sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche, sono stati identificate 7 microzone omogenee ognuna con un proprio profilo stratigrafico tipo (cfr. Fig. 15):

- Zona 1 - Successione stratigrafica costituita da una ridotta copertura di depositi fini dello spessore variabile di 3÷6 m, che ricoprono uno spesso orizzonte ghiaioso che si spinge oltre la profondità di -35 m da p.c., al cui interno è intercalato un livello argilloso limoso generalmente localizzato tra le profondità di -17 e -22 m da p.c.. Affiora nel settore orientale del territorio comunale in corrispondenza dell'abitato di Albareto e alla periferia orientale di Ghiara.
- Zona 2 - Successione stratigrafica costituita da una ridotta copertura di depositi fini dello spessore variabile di 3÷7 m, che ricoprono un orizzonte ghiaioso che si spinge sino a profondità variabili da -8 a -10 m da p.c., cui fa seguito un livello argilloso limoso sino alla profondità di -22÷25 m da p.c.. Oltre tale profondità è presente un secondo orizzonte ghiaioso che si spinge oltre la profondità di -35 m da p.c.. Si individua in una fascia di territorio compresa tra l'abitato di Ghiara ad est ed il Capoluogo ad ovest.
- Zona 3 - Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi fini dello spessore di 17÷20 metri, che ricoprono un orizzonte ghiaioso che si spinge sino a profondità variabili da -24 a -32 m da p.c., cui fa seguito un livello argilloso limoso che si spinge oltre la profondità di -35 m da p.c.. Si individua in una porzione di territorio a monte dell'Autostrada del Sole interessando gli abitati di Priorato e di Casalbarato.
- Zona 4 - Successione stratigrafica costituita da una copertura dello spessore di circa 25 metri di depositi fini con locali e subordinate intercalazioni di argille sabbiose, che ricoprono un orizzonte ghiaioso che si spinge oltre la profondità di -30 m da p.c.. Interessa ampie estensioni di territorio coinvolgendo l'areale della via Emilia immediatamente ad est dell'abitato di Parola, la periferia nord-occidentale di Casalbarato, il settore orientale di Cannelolo e il Capoluogo.
- Zona 5 - Successione stratigrafica costituita da una copertura dello spessore di circa 30÷35 metri di depositi fini con locali e subordinate intercalazioni di argille

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	26 di 62

sabbiose, che ricoprono un orizzonte ghiaioso. È stata individuata nel settore settentrionale del territorio comunale, coinvolgendo una ristretta porzione a nord-ovest del Capoluogo, il settore occidentale di Cannelto e l'abitato di Paroletta, per poi ricomparire in corrispondenza dell'abitato di Parola.

- Zona 6 - Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi fini dello spessore medio di 10 metri, sovrastante un orizzonte ghiaioso-argilloso e ghiaioso che si spinge oltre la profondità di -35 m da p.c.. Si individua in corrispondenza dell'abitato di Sanguinaro lungo la via Emilia.
- Zona 7 - Successione stratigrafica costituita da prevalenti depositi fini argilloso-limosi che si spingono oltre la profondità di -50 m da p.c.. Si individua nell'estremo settore occidentale del territorio comunale, in corrispondenza dell'abitato di Toccalmatto.

In Fig. 15 sono rappresentate le colonne stratigrafiche sintetiche che caratterizzano le MOPS delle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.

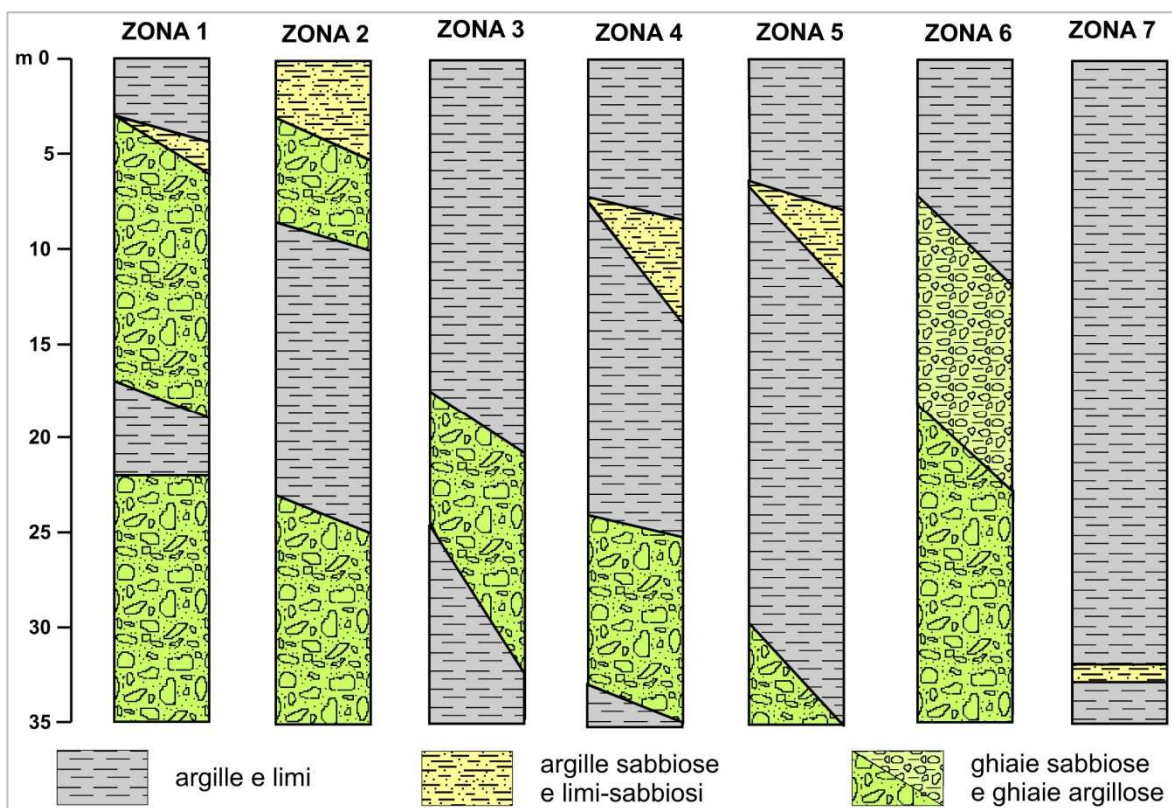


Fig. 15 - Colonne stratigrafiche sintetiche relative alle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

Come ricordato in premessa, grazie all'abbondante quantità di nuovi dati litostratigrafici reperiti nell'archivio comunale e alle indagini di nuova esecuzione, è stata condotta una revisione delle MOPS rispetto a quanto definito nel Livello 2.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	27 di 62

6.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S

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

Tale cartografia costituisce un aggiornamento, anche alla luce delle nuove indagini, di quella già redatta per gli studi di microzonazione di 2° livello. In tali elaborati sono ubicati tutti i punti di misura, distinguendoli a seconda della tipologia di prova effettuata (HVSR, MASW o REMI, SCPTU) e indicando il corrispondente valore di VsH (in m/s), dove:

$$V_{SH} = \frac{H}{\sum \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

H = spessore totale (in metri) dei terreni di copertura o profondità del *bedrock*
h_i = spessore (in metri) dello strato *i*-esimo (fino al *bedrock*)
V_{S_i} = velocità (in m/s) dello strato *i*-esimo (fino al *bedrock*);

o di Vs30 (sempre in m/s), dove:

$$V_{S_{30}} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

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).

In Fig. 16 si riporta uno stralcio della legenda di tale elaborato cartografico:



210	MASW o RE.MI. con indicato il valore di Vsh o Vs30 in m/s
205 	Interpretazione misura microtremori a stazione singola con indicato il valore di Vsh o Vs30 in m/s
205_s 	Prova penetrometrica statica con cono sismico con indicato il valore di Vsh o Vs30 in m/s

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

7. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

La risposta sismica locale è il risultato di interazioni tra le onde sismiche e le condizioni locali, cioè l'insieme delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche di depositi di terreno ed ammassi rocciosi e delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.

In altre parole, le caratteristiche del sito sono le responsabili delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenze, che un moto sismico relativo ad una formazione rocciosa di base (terremoto di riferimento), subisce attraversando gli strati dal bedrock fino alla superficie (Lanzo G. et al.,1999).

Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, la risposta sismica locale consente di definire le modifiche che un segnale sismico subisce, a causa delle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

I passi da seguire nello studio del problema della risposta sismica locale sono:

1. Definizione del modello geofisico del sottosuolo;
2. Stima dell'accelerazione di base;
3. Esecuzione dell'analisi e restituzione grafica in termini di:
 - a. Serie temporali
 - b. Spettri di risposta elastica in superficie

Nel presente studio la procedura di analisi di RSL è stata condotta con metodo monodimensionale su un settore del Capoluogo (Fig. 17), ricompreso in due MOPS (2004 e 2005) e che risulta di rilievo strategico ai fini della Protezione Civile.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	29 di 62

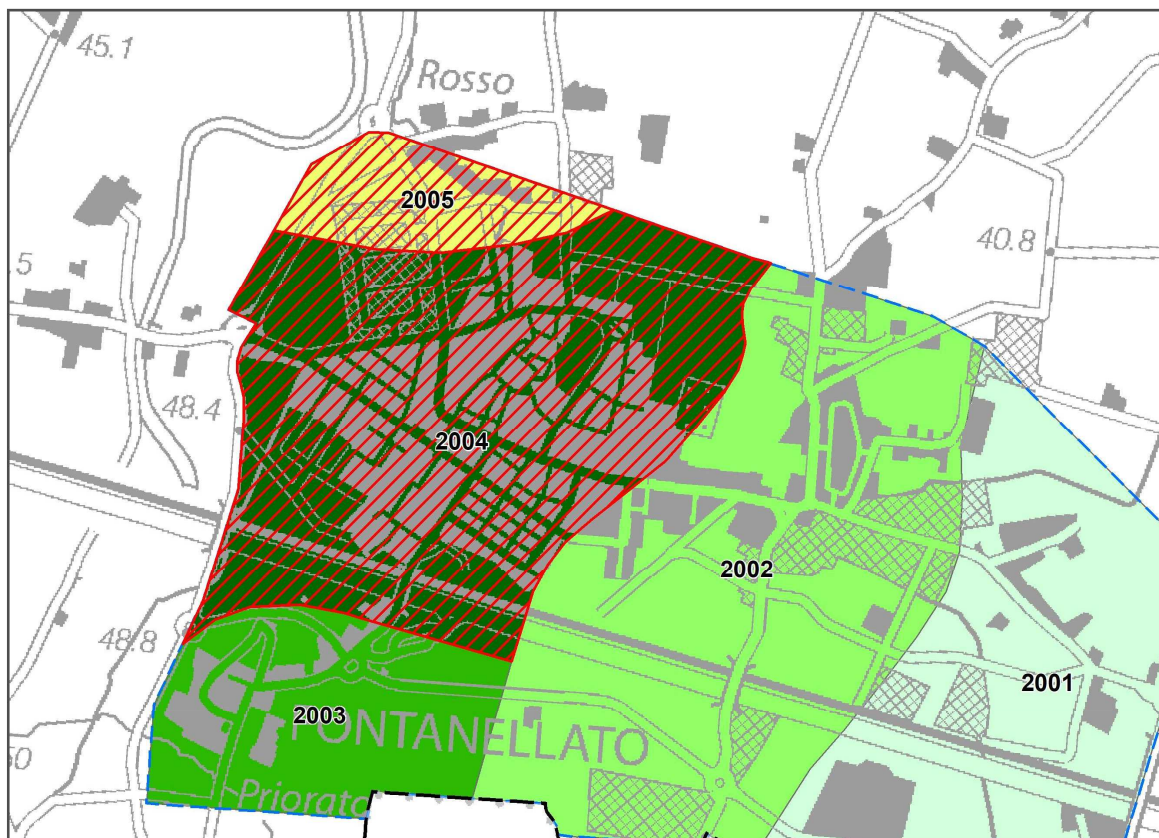


Fig. 17 – Ubicazione MOPS oggetto di analisi di risposta sismica locale (in rigato rosso)

Di seguito verrà illustrato il modello adottato, successivamente verrà descritta la procedura di analisi di RSL e infine i risultati dell'analisi.

7.1 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);
- densità dei litotipi indagati;
- curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G_0) in funzione della deformazione e densità in situ,

Tale modellazione va spinta in profondità fino a raggiungere il *bedrock* sismico, che teoricamente dovrebbe essere uno strato con velocità $V_s > 800$ m/s, oppure un passaggio tra due materiali caratterizzato da elevato contrasto di impedenza sismica.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	30 di 62

7.1.1 Litologia

Per la determinazione delle caratteristiche litologiche sono stati utilizzati i dati di prove penetrometriche e di sondaggi a carotaggio continuo disponibili nell'areale. Per la MOPS 2004 tali indagini hanno evidenziato la presenza di terreni superficiali argilloso-limosi dello spessore medio di 24 metri con locali intercalazioni di sabbie e limi sabbiosi, sovrapposti a depositi ghiaiosi che si spingono oltre 30 metri di profondità.

Per la MOPS 2005 i dati disponibili permettono di ipotizzare un maggior spessore della copertura fine, la cui potenza è stata assunta pari a circa 28 metri.

7.1.2 Determinazione della V_s e del bedrock sismico

La valutazione di risposta sismica locale è stata definita considerando le sismostratigrafie derivanti dall'interpretazione delle indagini pregresse e di quelle appositamente realizzate nel corso di questo studio.

Le verticali analizzate hanno evidenziato la presenza di un netto contrasto di impedenza, localizzato al passaggio tra i terreni fini di copertura ($V_s = 170\div 230$ m/s) e il primo orizzonte ghiaioso ($V_s = 400$ m/s) localizzato tra le profondità variabili da -24 a -28 m da p.c., in corrispondenza rispettivamente delle mops 2004 e 2005 del capoluogo. Nelle misure di microtremori a stazione singola, infatti, tali contrasti di impedenza producono picchi nello spettro H/V a frequenze di 2,0÷2,5 Hz con ampiezze generalmente superiori a 3. All'interno dell'orizzonte ghiaioso, una prova down-hole eseguita ad est del centro storico (034015P262DH263), ha evidenziato un ulteriore aumento di velocità ($V_s = 650$ m/s) a circa -27 m da p.c.. che è stato assunto come bedrock locale, pur non essendo caratterizzato da velocità superiori a 800 m/s.

Va segnalato che in questo caso, si intende come *bedrock* un livello che presenta una velocità con un contrasto di impedenza pari a circa 2 volte rispetto ai terreni fini soprastanti.

7.1.3 Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G_0) in funzione della deformazione

All'aumentare del livello di deformazione angolare raggiunta dal terreno si ha una diminuzione del modulo di taglio G ed un aumento del rapporto di smorzamento D . Tale comportamento può essere descritto, per ogni tipo di materiale presente nella stratigrafia, da due curve di decadimento, una relativa a G ed una D .

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	31 di 62

Per la valutazione delle curve di variazione del rapporto di smorzamento (D) e del decadimento del modulo di taglio normalizzato (rigidezza, G/G_0) in funzione della deformazione di taglio (γ), si è fatto riferimento alle curve di letteratura determinate per differenti litologie di terreni.

In particolare sono state utilizzate le curve di Vucetic & Dobry per terreni argillosi con indice di plasticità pari a 30, quelle di Seed & Idriss (1970) per i terreni sabbiosi e quelle di Rollins per i depositi ghiaiosi (Fig. 18).

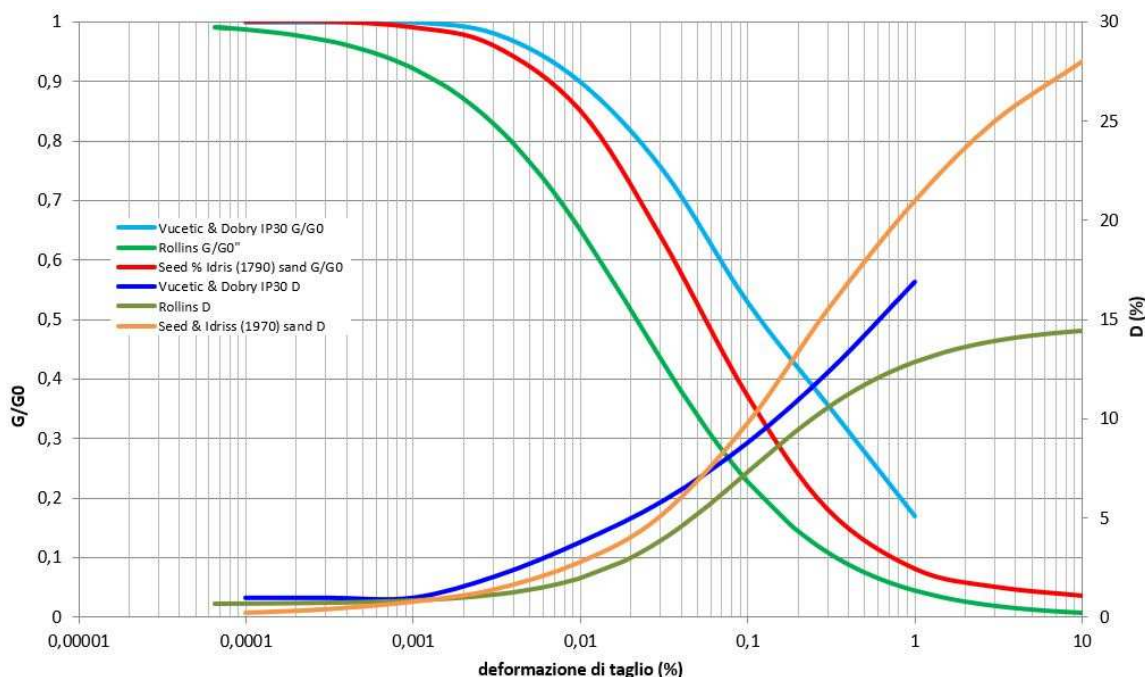


Fig. 18 – Grafico delle curve di Rollins per i terreni ghiaiosi, di Seed & Idriss per depositi sabbiosi e Vucetic & Dobry per depositi argillosi con indice di plasticità pari a 30

In Tab. 3 sono riportati i risultati dei parametri che descrivono le curve utilizzate nella RSL.

Tipo di curva	Litologia	α	β	η	λ
Vucetic & Dobry PI=30	Argilla	5,12	0,81	30,24	3,06
Seed & Idriss (1970) sand	Sabbia	14,11	0,93	27,61	3,22
Rollins	Ghiaia	21,55	0,80	14,74	3,08

Tab. 3 – Parametri curve di variazione del rapporto di smorzamento e del decadimento del modulo di taglio normalizzato

7.1.4 Descrizione dei modelli

MOPS 2004 Capoluogo

L'attribuzione delle velocità delle onde di taglio (V_s) ai singoli sismostrati della MOPS 2004 presente nel capoluogo, è avvenuta basandosi su misure dirette di V_s effettuate attraverso prove penetrometriche con cono sismico SCPTU4 (prova 034015P310SCPT313) e attraverso l'interpretazione della misura HVSUR4 (034015P311HVSUR318). Inoltre si è fatto riferimento alla prova down-hole eseguita ad est del centro abitato (034015P262DH263), per la definizione di ulteriori contrasti di impedenza all'interno dell'orizzonte ghiaioso. In Fig. 19 è riportato il modello di profilo di V_s utilizzato per la MOPS 2004.

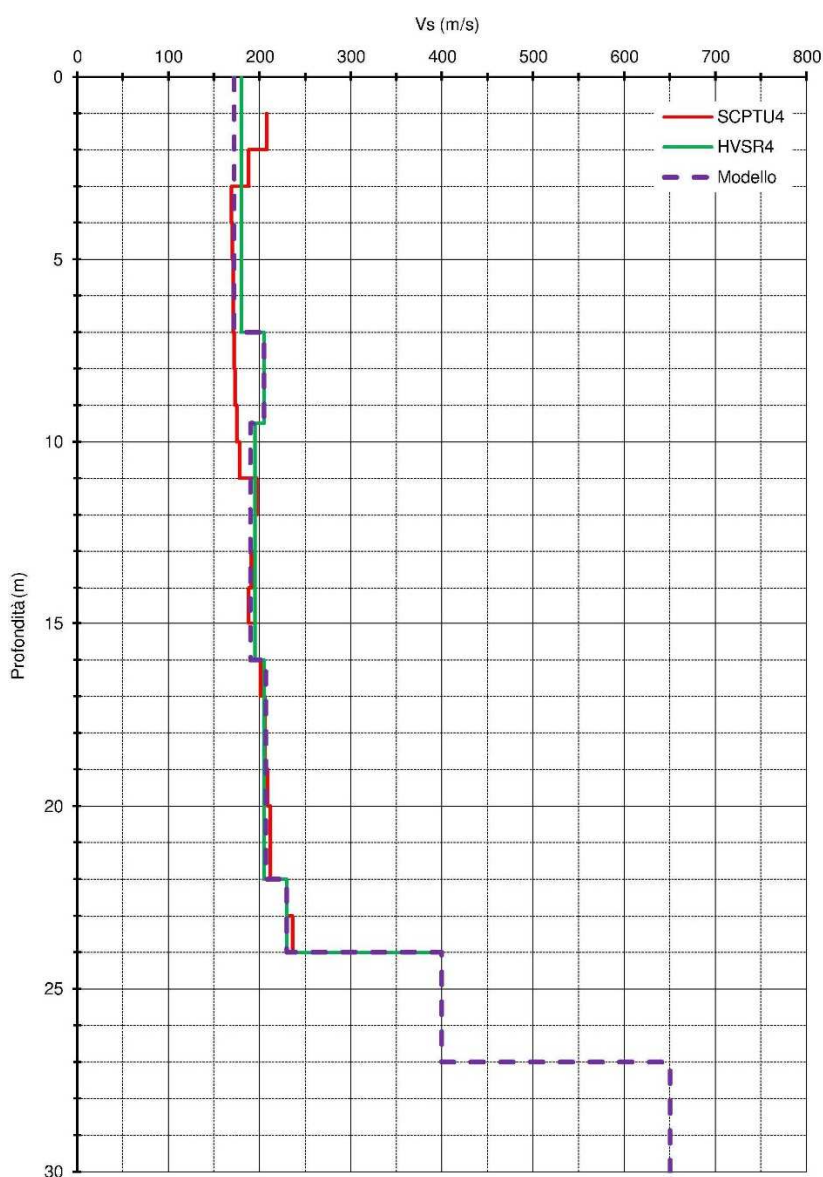


Fig. 19 – Rappresentazione grafica del modello geofisico del sottosuolo della MOPS 2004

Sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche e geofisiche del sottosuolo, è stato costruito il modello riportato in Tab. 4.

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kg/m ³)	V _s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla 1	0,00	-7,00	7,00	1800	172	Vucetic & Dobry, PI=30
Sabbia	-7,00	-9,50	2,50	1850	205	Seed & Idriss (1970) sand
Argilla 2	-9,50	-16,00	6,50	1850	190	Vucetic & Dobry, PI=30
Argilla 3	-16,00	-22,00	6,00	1900	207	Vucetic & Dobry, PI=30
Argilla 4	-22,00	-24,00	2,00	1900	230	Vucetic & Dobry, PI=30
Ghiaia	-24,00	-27,00	3,00	1950	400	Rollins
Bedrock	-24,00	-	-	2100	650	-

Tab. 4 – Modello sismostratigrafico e caratteristiche meccaniche degli strati della MOPS 2004

MOPS 2005 Capoluogo

Per la MOPS 2005, l'attribuzione delle velocità delle onde di taglio (Vs) ai singoli sismostrati è avvenuta basandosi sull'interpretazione della misura HVSR (034015P309HVSR316).

L'interpretazione della misura HVSR è avvenuta facendo riferimento ai dati risultanti dalle prove con cono sismico effettuate all'interno della MOPS 2004, in quanto le due mops si differenziano sostanzialmente solo per un maggior approfondimento del tetto delle ghiaie nella MOPS 2005.

In Fig. 20 è riportato il modello di profilo di Vs utilizzato per la MOPS 2005.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	34 di 62

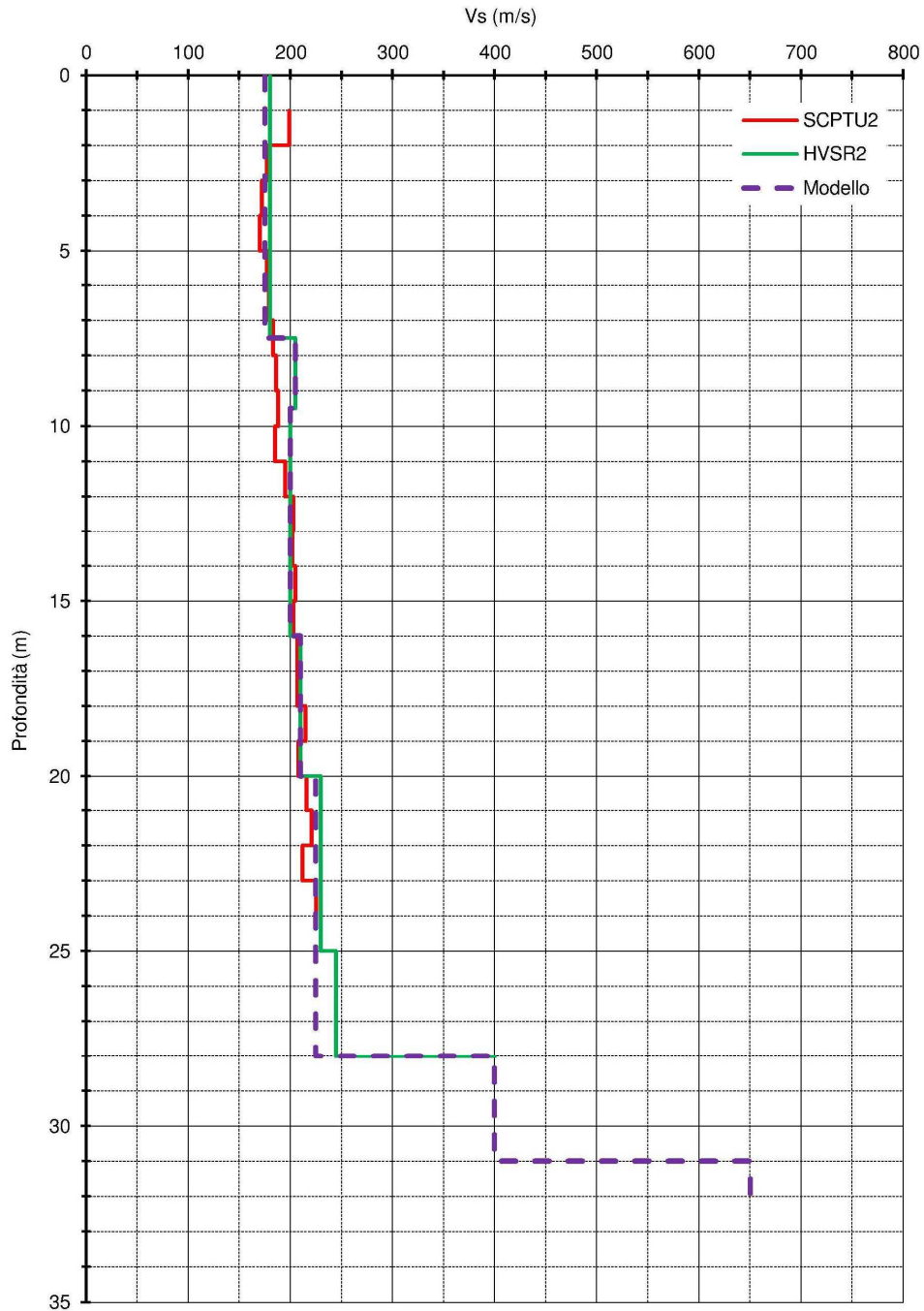



Fig. 20 – Rappresentazione grafica del modello geofisico del sottosuolo della MOPS 2005

Sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche e geofisiche del sottosuolo, è stato costruito il modello riportato in Tab. 5.

		Profondità			
 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.	
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	35 di 62	

Litologia	(m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kg/m ³)	V _s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argilla 1	0,00	-7,50	7,50	1850	175	Vucetic & Dobry, PI=30
Sabbia	-7,50	-9,50	2,00	1850	205	Seed & Idriss, Sand Mean
Argilla 2	-9,50	-16,00	6,50	1850	200	Vucetic & Dobry, PI=30
Argilla 3	-16,00	-20,00	4,00	1900	210	Vucetic & Dobry, PI=30
Argilla 4	-20,00	-28,00	8,00	1900	225	Vucetic & Dobry, PI=30
Ghiaia	-28,00	-31,00	3,00	1950	400	Rollins
Bedrock	-28,00	-	-	2100	650	-

Tab. 5 – Modello sismostratigrafico e caratteristiche meccaniche degli strati della MOPS 2005

7.1.5 Azioni sismiche in ingresso

Quali segnali di input sismico sono stati utilizzati quelli forniti dalla piattaforma WebGIS sviluppata da EUCENTRE per la Regione Emilia-Romagna nell'ambito dell'accordo "Acquisizione del servizio di rilevamento a scala regionale del rischio sismico degli edifici residenziali ordinari e aggiornamento dei segnali di riferimento per la stima della risposta sismica locale negli studi di microzonazione sismica di terzo livello di approfondimento"².

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.

Il servizio fornisce 7 accelerogrammi per ciascun nodo del reticolo di riferimento della pericolosità sismica locale dell'Allegato A delle NTC 2008. Per il sito indagato sono stati utilizzati i sismi riferiti al nodo più vicino: il n° 14938.

Gli accelerogrammi sono stati estratti per tempi di ritorno di 475 anni.

Tutti i sismi sono stati scalati in accelerazione per ottenere un valore massimo di input compatibile con quello previsto per la localizzazione del sito.

² [R.E.R. \(eucentre.it\)](http://R.E.R.(eucentre.it))

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	36 di 62

M _w	Distanza epicentrale	Fattore di scala	File
6,20	29,90	1,78	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
5,74	12,57	1,17	NGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
6,69	38,07	0,90	NGA RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2
5,60	18,00	0,86	IT.LRS..HNE.D.19980909.112800.C.ACC.ASC
6,20	78,79	2,39	NGA RSN2989_CHICHI.05_CHY102N.AT2
6,60	31,00	0,55	KiKnet SMNH100010061330.EW2
6,50	57,74	2,94	NGA RSN8167_SANSIMEO_DCPP247.AT2

Tab. 6 – Sismi con tempo di ritorno di 475 anni

7.2 Procedura di analisi RSL

Per la valutazione della risposta sismica locale è stato utilizzato il codice di calcolo LSR 2D (Local Sismic Response 2D) Ver. 5.0.5 di STACEC.

Il codice di calcolo LSR2D consente di effettuare una modellazione monodimensionale e bidimensionale del problema mediante il metodo degli elementi finiti, nel dominio del tempo, in tensioni totali, utilizzando il metodo lineare equivalente e tenendo conto della deformabilità del substrato.

Qualora la stratigrafia in esame non presenti problematiche di carattere bidimensionale, come nel caso in esame, è comunque possibile studiare il problema monodimensionale grazie ad una discretizzazione di una striscia unitaria di terreno e all'applicazione di un sistema di vincoli sul modello FEM tale da consentire solo deformazioni di taglio.

7.2.1 Metodo lineare equivalente

Il comportamento meccanico dei terreni sotto l'effetto di carichi ciclici ad elevata frequenza è alquanto complesso e caratterizzato da marcata non linearità, accumulo di deformazioni permanenti, dissipazione di energia e degradazione progressiva delle caratteristiche meccaniche per effetto del numero di cicli di carico applicati. In presenza di fluido interstiziale, alle suddette problematiche si aggiunge l'accumulo di sovrappressioni interstiziali in condizioni di drenaggio impedito o parziale, che sono comunque le più frequenti, in considerazione della velocità di applicazione del carico.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	37 di 62

La modellazione di tali fenomeni richiede l'utilizzo di legami costitutivi complessi, che oltretutto difficilmente riescono a riprodurre simultaneamente tutte le specificità del comportamento dei terreni. Per tale ragione spesso si preferisce fare riferimento a modelli costitutivi semplificati che, pur non essendo rigorosi, riescono a riprodurre il comportamento in modo adeguato in riferimento alla specifica applicazione.

In particolare, per quanto riguarda la risposta sismica dei depositi, l'approccio visco-elastico lineare equivalente rappresenta un valido compromesso tra semplificazione delle analisi ed accuratezza dei risultati. La strategia 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.

Tale modello lineare equivalente, studia il comportamento tra tensione e deformazione del terreno basandosi sul modello di Kelvin-Voigt, illustrato in Fig. 21.

La tensione τ dipende dalla deformazione γ e dalla sua derivata $\dot{\gamma}$, secondo la relazione:

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma}$$

dove:

- G = Modulo di taglio
- η = viscosità del mezzo

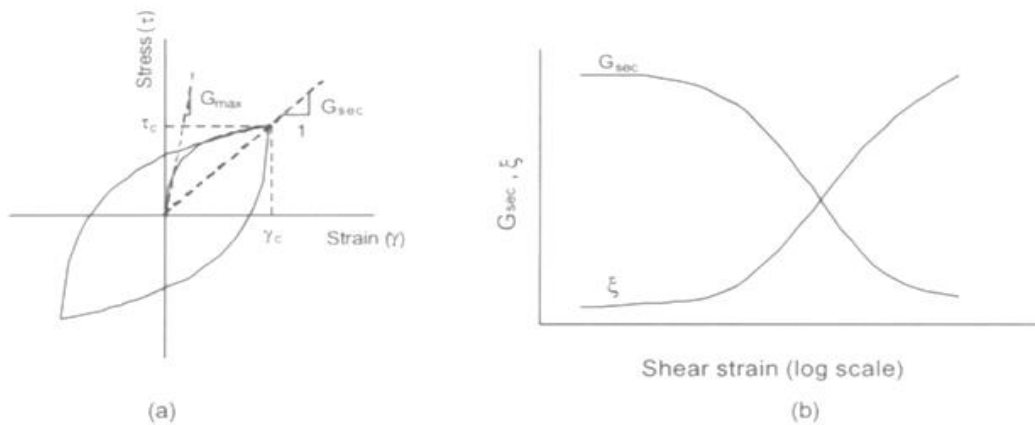


Fig. 21 – Modello lineare equivalente: (a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato in Fig. 21. Il modulo di taglio equivalente, G , è preso considerando il modulo di taglio secante G_s .

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	38 di 62

È possibile notare come alla fine di un ciclo controllato e simmetrico di tensioni si ha:

$$G_s = \frac{\tau_c}{\gamma_c}$$

La curva $G_s - \gamma$ non può avere una forma arbitraria ma deriva dalla curva $\tau - \gamma$ e sussiste la seguente relazione:

$$\frac{dt}{d\gamma} = G_s(\gamma) + \frac{dG_s}{d\gamma} \gamma \geq 0$$

La descrizione del comportamento meccanico dei terreni nei confronti dei carichi ciclici non può peraltro prescindere dalla dissipazione intrinseca di energia che si verifica durante i cicli di carico-scarico. Il parametro di riferimento a tal riguardo è costituito dal coefficiente di smorzamento D , definito come:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W^{dissp}}{W^{max}}$$

dove:

- ΔW^{dissp} = quantità di energia dissipata, per unità di volume, dal terreno durante un ciclo di carico armonico;
- W^{max} = massima energia di deformazione, per unità di volume, immagazzinata dal terreno durante lo stesso ciclo di carico armonico;

In definitiva la risposta non lineare del terreno tramite il modello viscoelastico lineare equivalente viene riassunta mediante delle curve di riduzione del modulo di taglio e di incremento del rapporto di smorzamento (Fig. 21b).

7.2.2 Soluzione alla singola iterazione mediante FEM

L'approccio utilizzato per la soluzione visco-elastica lineare all'interno dell'i-esimo ciclo iterativo utilizza il metodo degli elementi finiti. In particolare, il deposito di terreno viene discretizzato mediante una "mesh" di elementi finiti piani che possono avere forma quadrangolare o rettangolare a seconda dei casi (Fig. 22) e caricato mediante un'accelerazione alla base dello stesso (bedrock), la soluzione dell'equazione del moto viene poi ottenuta nel dominio del tempo utilizzando il metodo di integrazione di Newmark.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -Ma_g$$

dove:

M = matrice di massa del sistema;

C = matrice di smorzamento del sistema;

	Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
		RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	39 di 62

K = matrice di rigidezza del sistema;

\ddot{u}, \dot{u}, u = rispettivamente vettori di accelerazione, velocità e spostamento del sistema;

a_g = vettore di accelerazione alla base;

Tale equazione vale per ogni istante di tempo t_n e descrive l'equilibrio dinamico del sistema. La soluzione in termini di spostamento velocità ed accelerazione per ogni t_n viene ottenuta a partire dalle seguenti relazioni:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_{n-1} + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{u}_{n-1} + \gamma \ddot{u}_n]$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta t \dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - \beta) \ddot{u}_{n-1} + 2\beta \ddot{u}_n]$$

dove:

Δt = incremento temporale tra l'istante di tempo t_n e t_{n-1}

β = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.25

γ = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.50

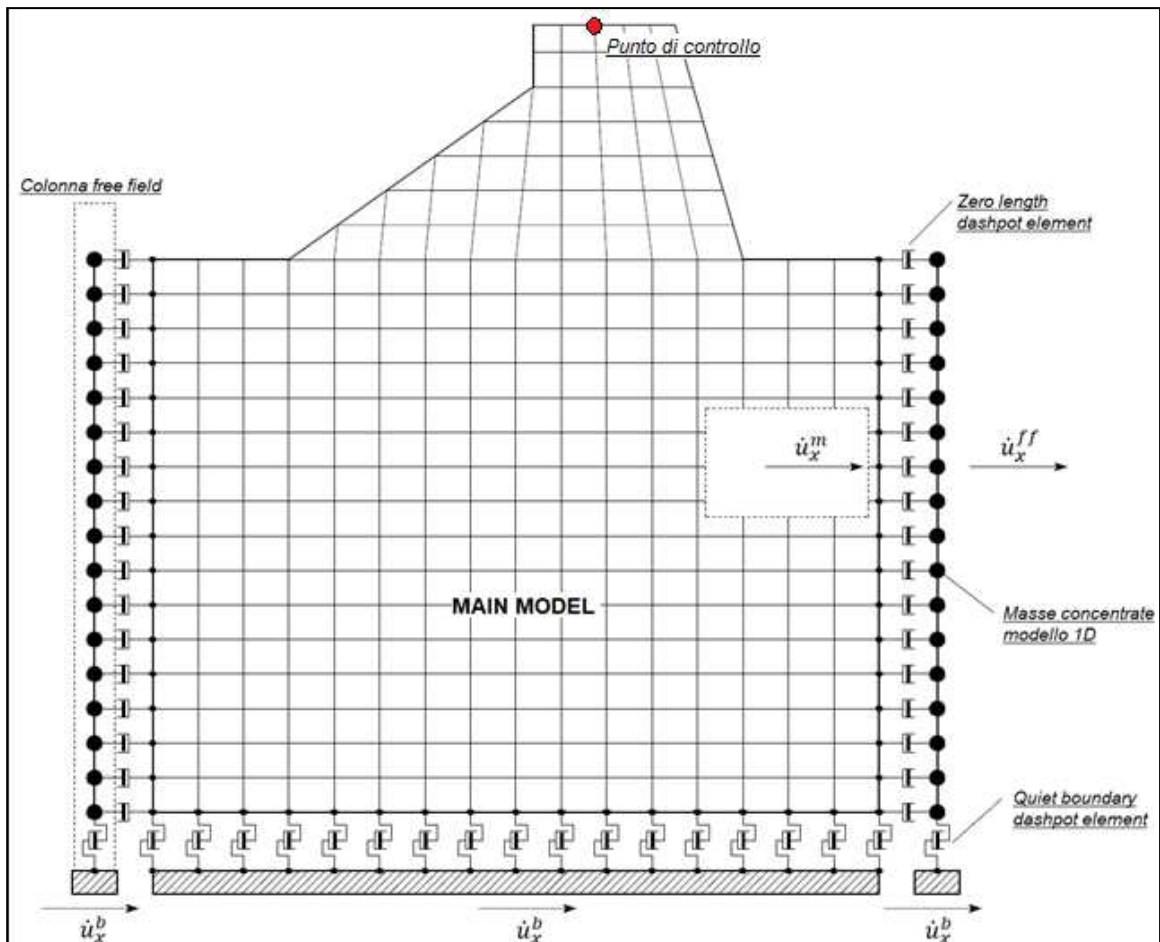


Fig. 22 – Discretizzazione FEM del terreno



Elaborato	Data	Agg.	Pag.
RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	40 di 62

7.2.2.1 Smorzamento

La matrice di smorzamento del sistema viene ottenuta mediante l'assemblaggio delle matrici di smorzamento dei singoli elementi, queste ultime ottenute a loro volta come:

$$C_q = \alpha_q M_q + \beta_q K_q$$

dove:

- α_q e β_q = coefficienti di smorzamento alla Reyleigh

Tali coefficienti vengono ottenuti a partire dal rapporto di smorzamento viscoso del singolo elemento e dalla relazione seguente:

$$\begin{aligned} \dot{u}_n &= \dot{u}_{n-1} + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{u}_{n-1} + \gamma \ddot{u}_n] \\ u_n &= u_{n-1} + \Delta t \dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - \beta) \ddot{u}_{n-1} + 2\beta \ddot{u}_n] \end{aligned}$$

da cui si ottiene (Hudson, 1994):

$$D_q = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_q}{\omega} + \beta_q \omega \right)$$

dove:

- ω_1 = frequenza naturale del primo modo del deposito;
- $\omega_2 = n * \omega_1$ con $n = \omega_i / \omega_1$ (approssimato all'intero pari più grande) e ω_i frequenza di picco dello spettro ottenuto a partire dall'accelerazione di bedrock;

7.2.3 Procedimento iterativo

La procedura iterativa che consente di ottenere la risposta non lineare del sistema consiste nell'eseguire una sequenza di analisi lineari, con aggiornamento iterativo dei parametri di rigidità e smorzamento, fino al raggiungimento di un prefissato criterio di convergenza. Lo schema della procedura iterativa su cui è basato il modello lineare equivalente, da applicare ad ogni strato in cui è stato discretizzato il profilo stratigrafico, è il seguente:

1. definizione di curve $G = G(\gamma)$ e $D = D(\gamma)$ per i diversi strati
2. inizializzazione dei valori del modulo di taglio e del fattore di smorzamento ai livelli di piccole deformazioni (G_0 e D_0)
3. calcolo della risposta dinamica del suolo e valutazione della deformazione massima a taglio in ogni strato (γ_1)
4. aggiornamento dei valori $G_1 = G(\gamma_1)$ e $D_1 = D(\gamma_1)$
5. iterazione dei passi 3 e 4 fino a convergenza ($\gamma_{i-1} \sim \gamma_i$)

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	41 di 62

7.2.4 Interpretazione dei risultati

Il risultato della procedura iterativa sopradescritta non è altro che la storia temporale di accelerazione, velocità e spostamento di ogni grado di libertà del modello FEM.

Tuttavia, dal punto di vista ingegneristico, è interessante monitorare la risposta in termini di accelerazione 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.

7.3 Analisi dei risultati

I risultati della analisi condotte con il codice di calcolo LSR 2D (Local Sismic Response 2D) Ver. 5.0.7 di STACEC, elaborati nel dominio del tempo e delle frequenze, hanno consentito di definire per il sito in esame:

- Gli accelerogrammi di output;
- La curva di variazione dell'accelerazione con la profondità;
- Lo spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione (PSA); 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 (FA_{PGA}), definito come il rapporto tra l'accelerazione massima in superficie ed il valore di riferimento per il sito su suolo rigido;
- I fattori di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in accelerazione (FA) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s, 0.5-1.5 e 0.7-1.1 s;
- I fattori di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in velocità (FH) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.5-1.0 s e 0.5-1.5 s.

Tali fattori di amplificazione in accelerazione e velocità sono ottenuti direttamente dal programma di calcolo confrontando lo spettro medio degli accelerogrammi in input con quello ottenuto dagli accelerogrammi in output.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	42 di 62

In Fig. 23 e 24 è riportato il grafico con gli spettri in output (in tonalità di grigio), e gli spettri medi in input (in verde) e in output (in rosso) per la MOPS 2004 e 2005 del Capoluogo.

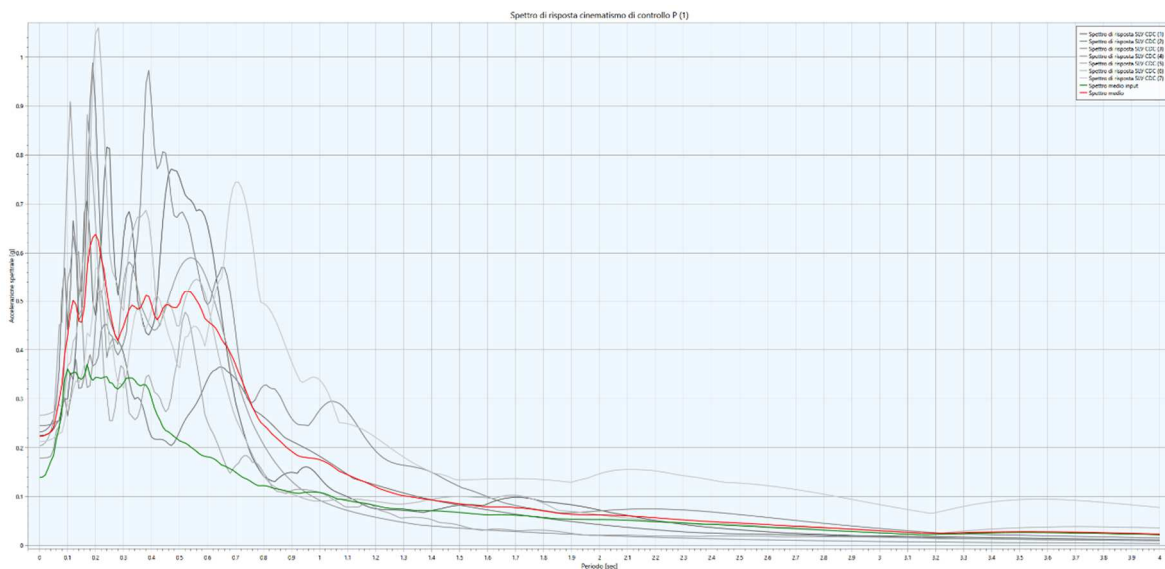


Fig. 23 – Confronto tra gli spettri in accelerazione spettro medio in accelerazione in input e lo spettro medio in accelerazione in output per la MOPS 2004

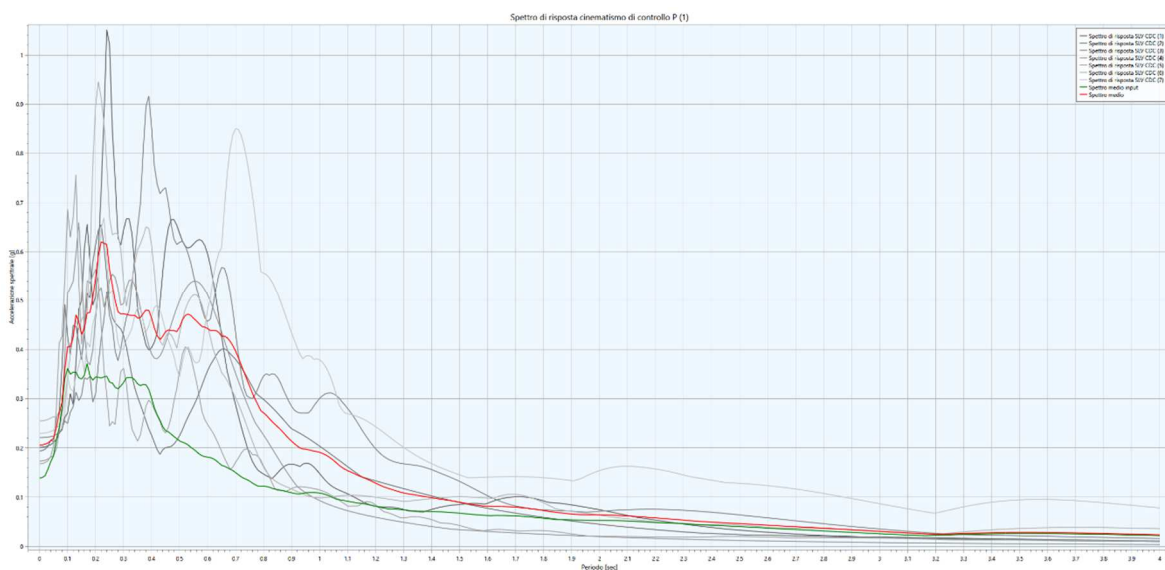


Fig. 24 – Confronto tra gli spettri in accelerazione spettro medio in accelerazione in input e lo spettro medio in accelerazione in output per la MOPS 2005

Nelle tabelle dei fattori di amplificazione, oltre a quelli ottenuti con la procedura di RSL, sono riportati, per confronto, anche i fattori di amplificazione ottenuti applicando gli

abachi proposti dalla Regione Emilia Romagna per la stima semplificata dell'amplificazione e le differenze percentuali tra i valori.

In particolare per le MOPS 2004 e 2005 l'abaco di riferimento può essere considerato quello relativo alla tabella Margine tipo A.

Di seguito vengono sinteticamente riportati i risultati delle analisi di risposta sismica locale per tutti i siti indagati:

- Gli accelerogrammi di output scalati sulla base del sito di indagine;
- La curva di variazione dell'accelerazione con la profondità;
- Il grafico dello spettro elastico in accelerazione da RSL confrontato con quello semplificato derivato dalle NTC per la categoria di sottosuolo C;
- Il grafico di output dei fattori di amplificazione in termini di accelerazione e velocità;
- La tabella con i fattori di amplificazione calcolati, confrontati con quelli da normativa.

MOPS 2004 Capoluogo

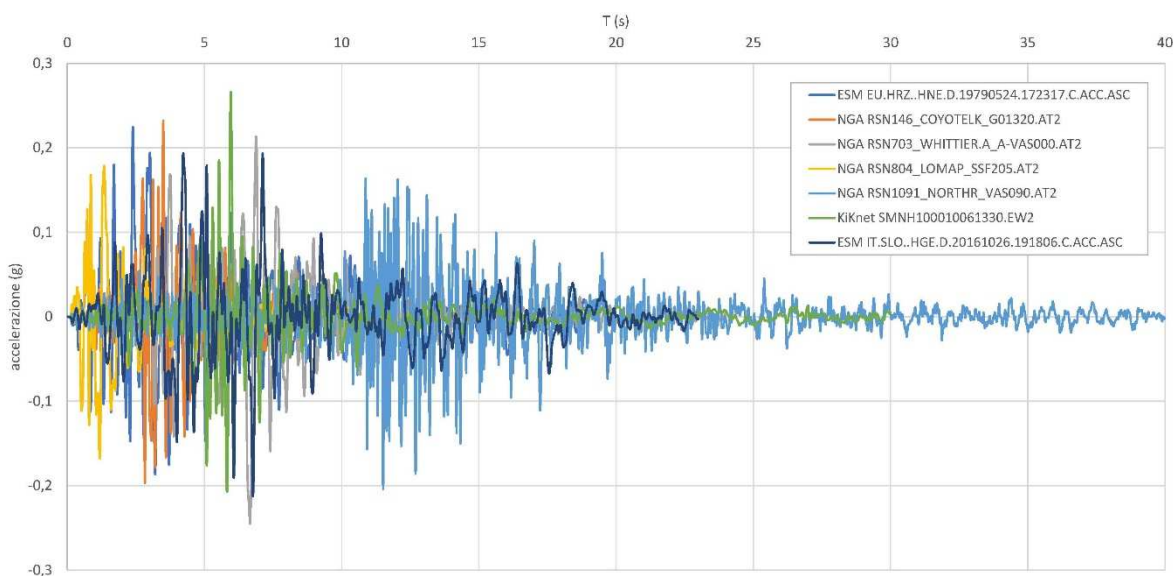


Fig. 25 – Accelerogrammi di output MOPS 2004

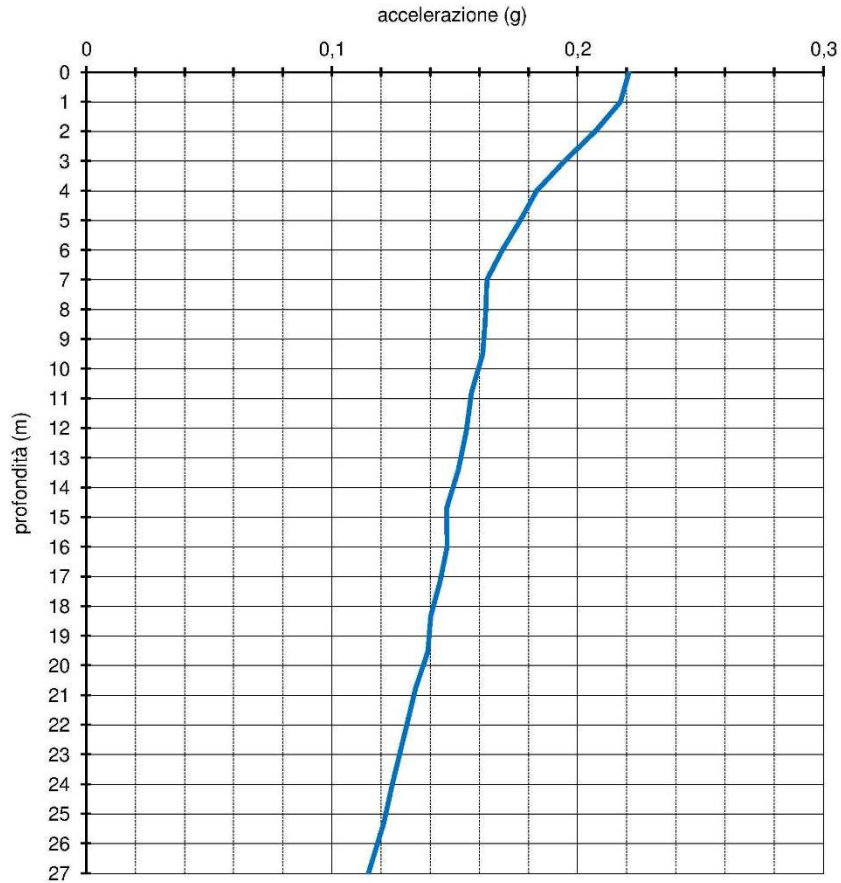


Fig. 26 – Curva di variazione dell’accelerazione con la profondità MOPS 2004 Capoluogo

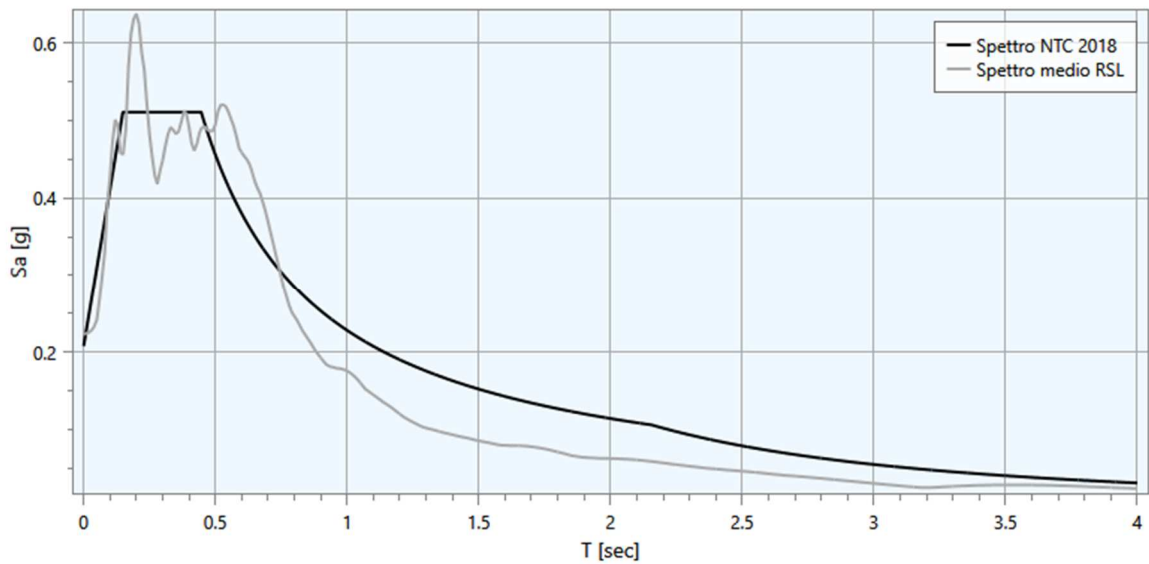


Fig. 27 – Confronto tra lo spettro medio in output in accelerazione e lo spettro di riferimento da normativa per la categoria di sottosuolo C per MOPS 2004 Capoluogo

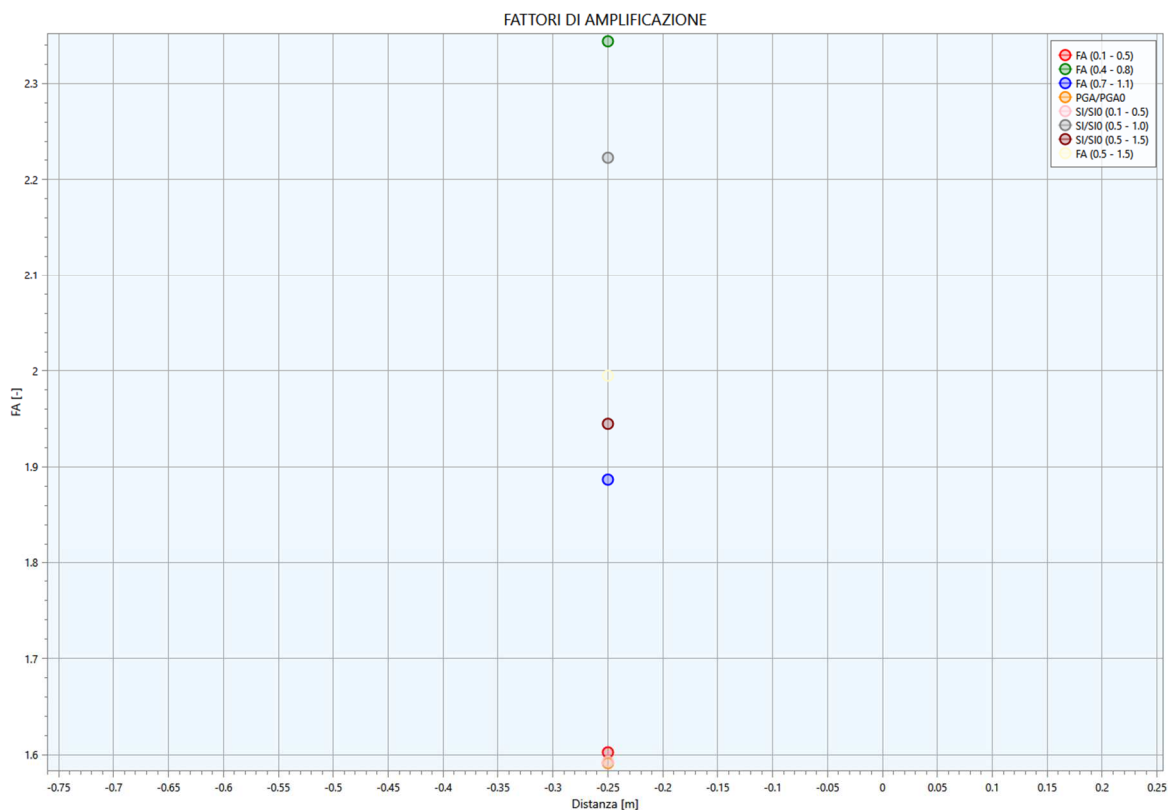


Fig. 28 – Output fattori di amplificazione in termini di accelerazione e velocità per la MOPS 2004 Capoluogo

Fattore di amplificazione	Valore calcolato da RSL	Valore da abachi RER	Differenza (%)
FA PGA	1,59	2	-41,0
FA_{SA} 0.1-0.5	1,60	2,2	-27,3
FA_{SA} 0.4-0.8	2,34	3,2	-26,9
FA_{SA} 0.7-1.1	1,89	3,4	-44,4
FA_{SA} 0.5-1.5	2,0	-	-
FA_{SI} 0.1-0.5	1,59	2,3	-30,9
FA_{SI} 0.5-1.0	2,22	3,4	-34,7
FA_{SI} 0.5-1.5	1,94	-	-

Tab. 7 – Fattori di amplificazione calcolati MOPS 2004 Capoluogo

MOPS 2005 Capoluogo

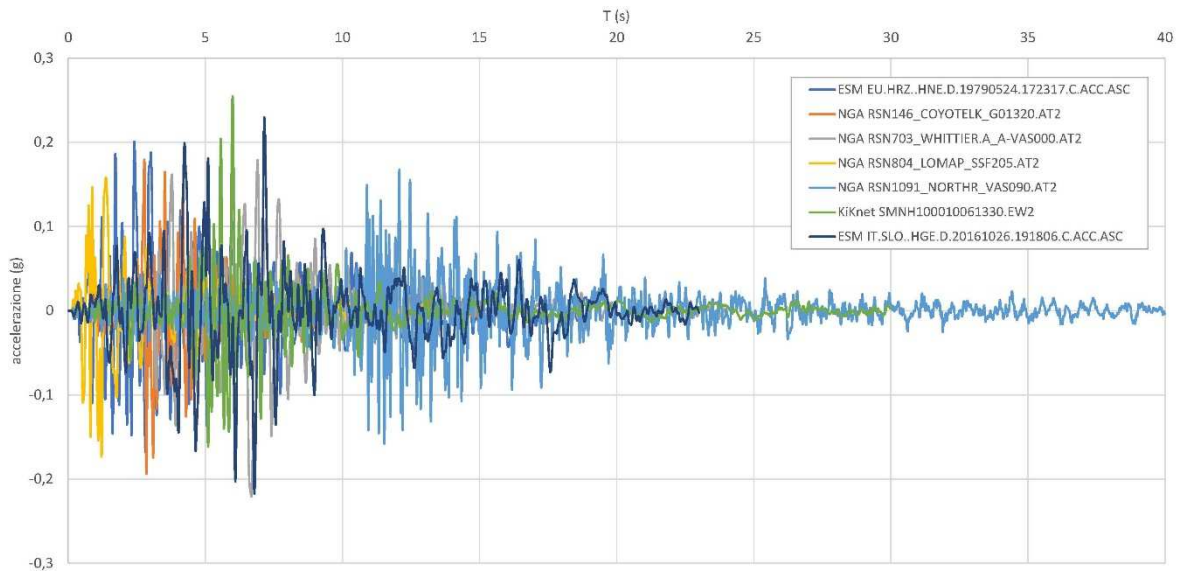


Fig. 29 – Accelerogrammi di output MOPS 2005 Capoluogo

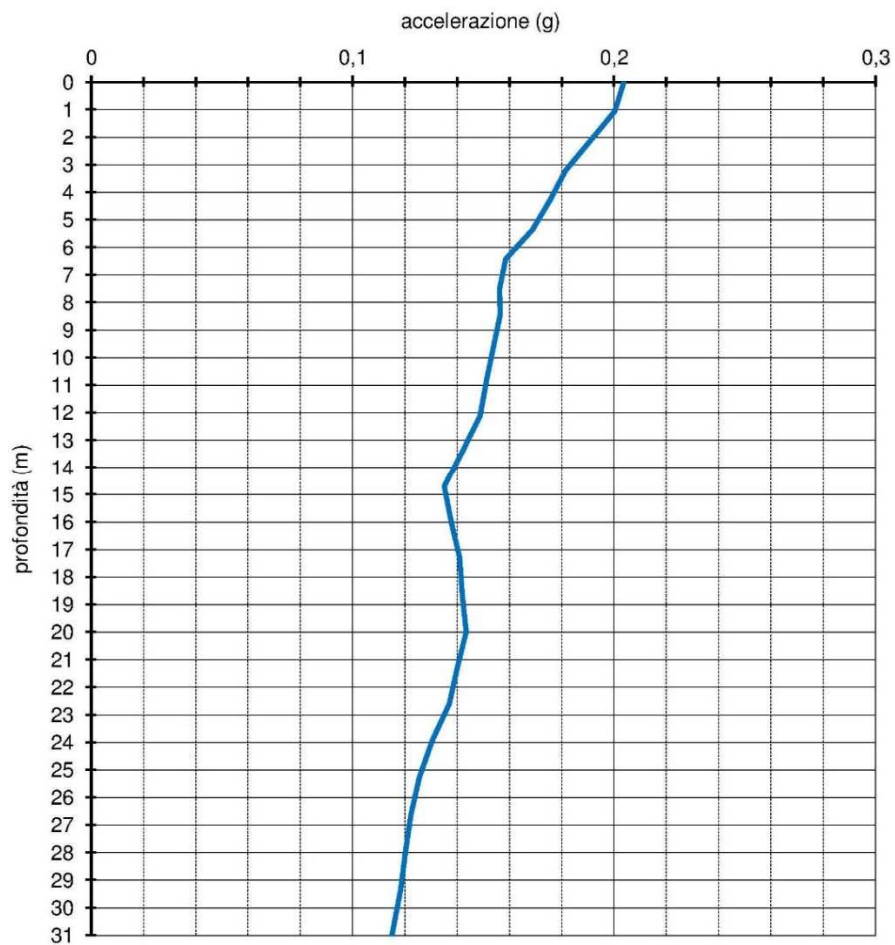


Fig. 30 – Curva di variazione dell'accelerazione con la profondità MOPS 2005 Capoluogo

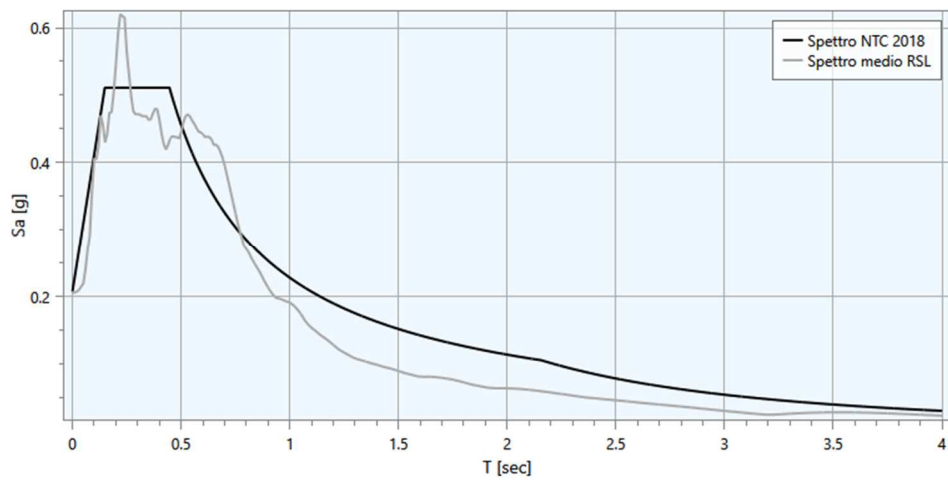


Fig. 31 – Confronto tra lo spettro medio in output in accelerazione e lo spettro di riferimento da normativa per la categoria di sottosuolo C per MOPS 2005 Capoluogo

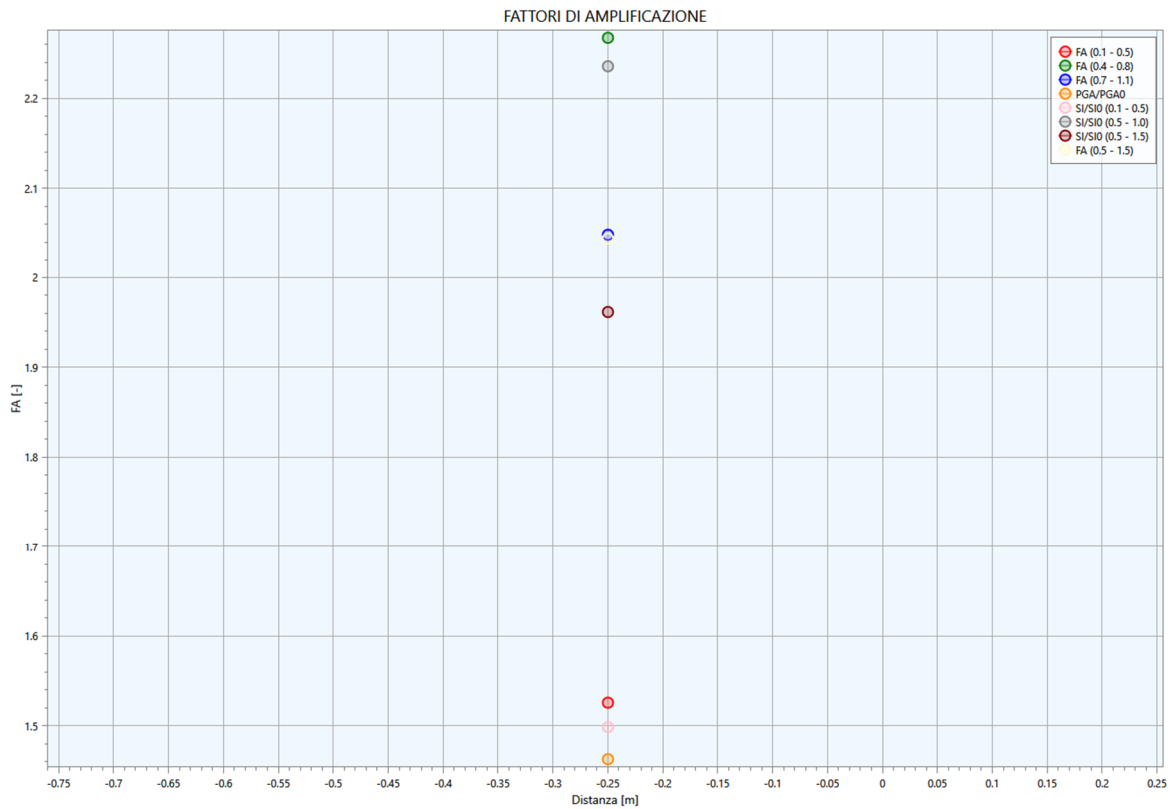


Fig. 32 – Output fattori di amplificazione in termini di accelerazione e velocità per la MOPS 2005 Capoluogo



Elaborato	Data	Agg.	Pag.
RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	48 di 62

<i>Fattore di amplificazione</i>	<i>Valore calcolato da RSL</i>	<i>Valore da abachi RER</i>	<i>Differenza (%)</i>
FA PGA	1,46	1,9	-23,2
FA_{SA} 0.1-0.5	1,53	2,0	-23,5
FA_{SA} 0.4-0.8	2,27	3,1	-26,8
FA_{SA} 0.7-1.1	2,05	3,6	-43,1
FA_{SA} 0.5-1.5	2,04	-	-
FA_{SI} 0.1-0.5	1,50	2,1	-28,6
FA_{SI} 0.5-1.0	2,24	3,5	-36,0
FA_{SI} 0.5-1.5	1.96	-	-

Tab. 8 – Fattori di amplificazione calcolati MOPS 2005 Capoluogo

8. VERIFICA DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE

La presenza di locali lenti sabbiose sotto falda intercalate entro i depositi argillosi di copertura, ha richiesto la verifica del rischio di liquefazione al fine di individuare eventuali aree instabili potenzialmente soggette a tale fenomeno.

Si è quindi valutato tale rischio nell'area del Capoluogo, prendendo in considerazione le 5 verticali indagate mediante le prove CPTU e SCPTU effettuate nel corso della campagna geognostica eseguita a supporto dello studio di microzonazione di terzo livello (Fig. 33).

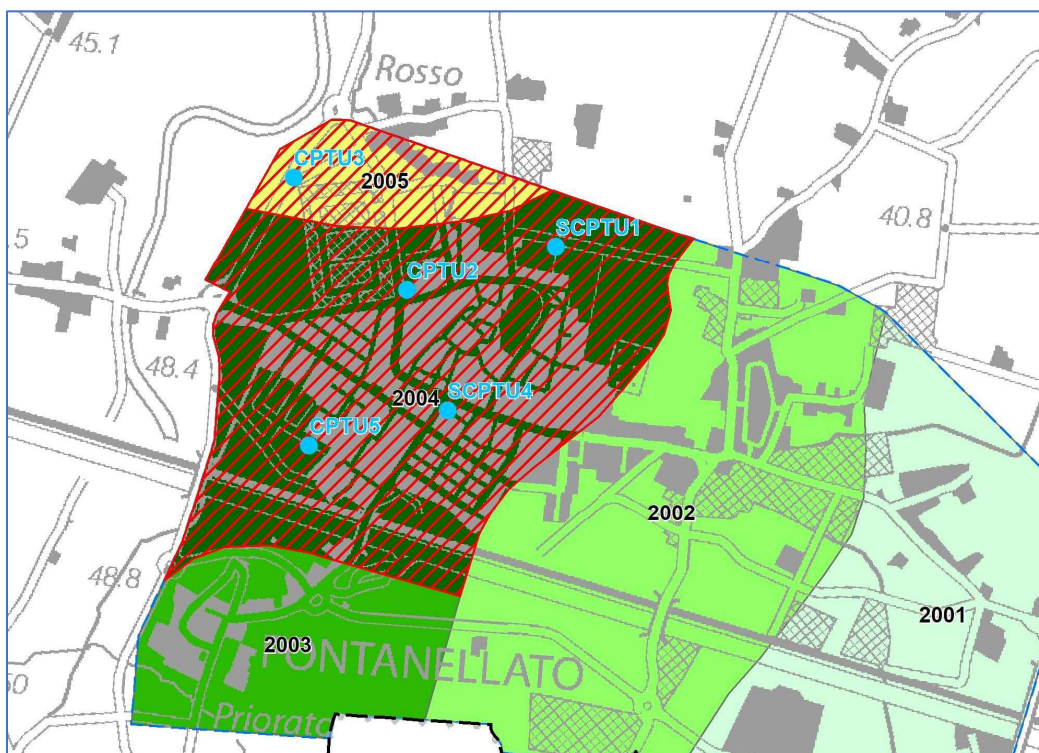


Fig. 33 – Ubicazione delle prove utilizzate per le verifiche del rischio liquefazione (in rigato rosso le aree sottoposte ad analisi di livello 3)

8.1 Premesse

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

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	50 di 62

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 CPTU ed SCPTU 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 LPI³ 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 nella seguente Tab. 9:

Valori di IL	Rischio di liquefazione
IL = 0	Molto basso
0 < IL ≤ 5	Basso
5 < IL ≤ 15	Alto
15 < IL	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 = 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

³ LPI = Liquefaction Potential Index è tradotto con IL = Indice di Liquefazione nella cartografia di MS

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:

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

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:

$$FSL = \frac{CRR_{7,5}}{CSR} \cdot MSF \cdot k_{\sigma}$$

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 = rapporto di tensione ciclica (*Cyclic Stress Ratio*)

Nelle verifiche effettuate nel presente studio, per il calcolo del CRR è stato utilizzato il metodo NCEER (modificato da *Robertson* 2009) implementato dal programma CLIQ della *Geologimiki*.

In Fig. 34 viene presentata, in forma di *flow-chart*, la procedura di calcolo di CRR utilizzata dal programma per la verifica con il metodo NCEER.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	52 di 62

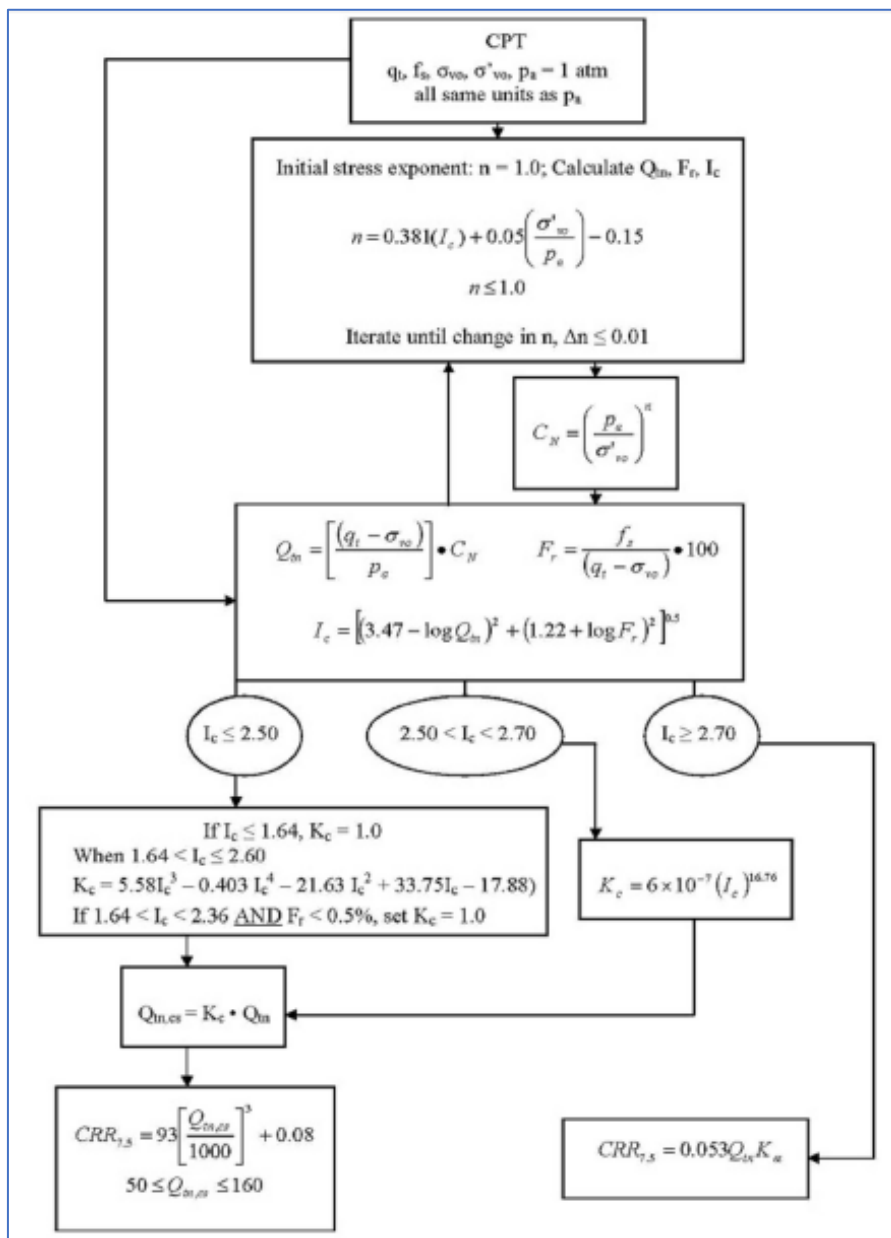


Fig. 34 - Flow chart della procedura di verifica NCEER modificata da Robertson (2009)

In tali verifiche, come valori di CSR, sono stati utilizzati quelli calcolati dal programma CLIQ.

Inoltre, per la verifica, oltre ai dati delle prove CPTU ed SCPTU, è necessario fornire al programma, l'accelerazione (che nel presente caso è ricavata dalle verifiche di RSL illustrate nel capitolo precedente) e la magnitudo attesa al sito.

Per quanto riguarda quest'ultimo parametro si è fatto riferimento al valore massimo atteso indicato dalla Zonazione sismogenetica ZS9⁴. La zona di riferimento per il Comune di Fontanellato è la 913 per la zona in questione, con una magnitudo massima attesa pari a 6,14.

8.2 Analisi dei risultati

Per tutte le analisi effettuate è stato utilizzato il valore di magnitudo $M = 6,14$, calcolato come illustrato nel paragrafo precedente.


Quale valore di PGA è stato utilizzato il massimo ricavato dall'analisi di risposta sismica locale, pari a 0,22 g (mops 2004) e 0,20 (mops 2005).

Considerata la scarsa disponibilità di dati idrogeologici relativi all'oscillazione stagionale della falda, tutte le verifiche sono state tutte effettuate ponendo, prudenzialmente, il livello di falda è stato a -1 m da p.c..

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 (cfr. esempio di Fig. 35):

- Il confronto tra CSR e CRR
- La variazione del fattore di sicurezza
- La cumulata del valore di LPI
- La cumulata del valore dei cedimenti

⁴ Meletti C. e Valensise G. (2014) – Zonazione sismogenetica – App. 2 - Rapporto conclusivo

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	54 di 62

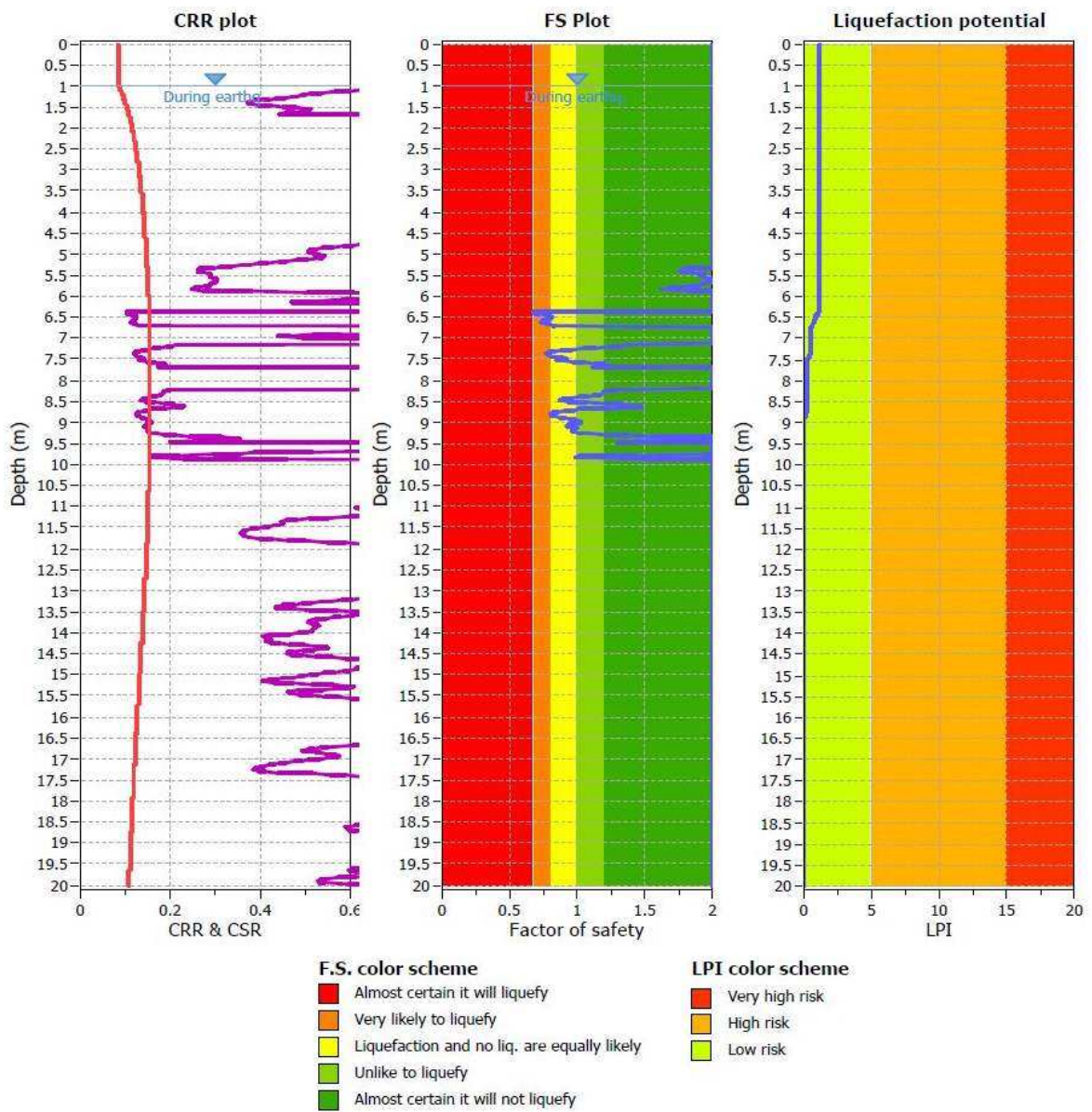


Fig. 35 – Grafici delle verifiche di liquefazione (prova CPTU5)

In Tab. 23 vengono rappresentati rispettivamente i valori di LPI calcolati mediante il metodo di Robertson (2009) per tutte le verticali indagate.

Prova	Codice SoftMS	LPI	Livello di rischio
SCPTU1	034015P307CPTU308	0,00	Nullo
CPTU2	034015P308CPTU310	0,57	Basso
CPTU3	034015P309CPTU311	0,53	Basso
SCPTU4	034015P310CPTU312	0,00	Nullo
CPTU5	034015P311CPTU314	1,12	Basso

Tab. 11 – Valori di LPI

I dati sopra riportati evidenziano come il territorio del capoluogo, in cui sono presenti locali lenti di depositi sabbiosi sotto falda, risulta soggetto ad un rischio di liquefazione nullo o di grado basso e, pertanto, le aree indagate non rientrano nelle zone instabili per potenziale liquefazione.

9. CARTE DI MICROZONAZIONE SISMICA

Le Carte di microzonazione sismica di Livello 3 fanno parte degli elaborati grafici conclusivi del presente studio.

L'amplificazione è stata quantificata in termini di:

- $F_{PGA} = PGA/PGA_0$, dove PGA_0 è l'accelerazione massima orizzontale a periodo $T=0$ al suolo di riferimento e PGA è l'accelerazione massima orizzontale a periodo $T=0$ alla superficie del sito;
- $FA = SA/SA_0$, dove SA_0 è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento e SA è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T : SA1 per $0,1s \leq T \leq 0,5s$, SA2 per $0,4s \leq T \leq 0,8s$, SA3 per $0,7s \leq T \leq 1,1s$, SA4 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$;
- $FH = SI/SI_0$, dove SI_0 è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) al suolo di riferimento e SI è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (o corrispondente grandezza di Intensità di Housner) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T : SI1 per $0,1s \leq T \leq 0,5s$, SI2 per $0,5s \leq T \leq 1,0s$, SI3 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$.

Per le aree sottoposte ad analisi di secondo livello i valori dei fattori di amplificazione (FA) sono stati ricavati dalle tabelle allegate alla DGR 12 aprile 2021, n. 476 della Regione Emilia-Romagna.

La scelta dell'abaco per la stima dei fattori di amplificazione è stata effettuata sulla base delle caratteristiche sismostratigrafiche del sottosuolo.

Per le zone sottoposte ad analisi di Livello 3, i fattori di amplificazione sono stati viceversa determinati attraverso l'analisi di risposta sismica locale descritta nel Cap. 7.

In Fig. 36 sono state rappresentate le zone oggetto di studio, distinte sulla base delle tabelle utilizzate per l'attribuzione dei fattori di amplificazione.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	57 di 62

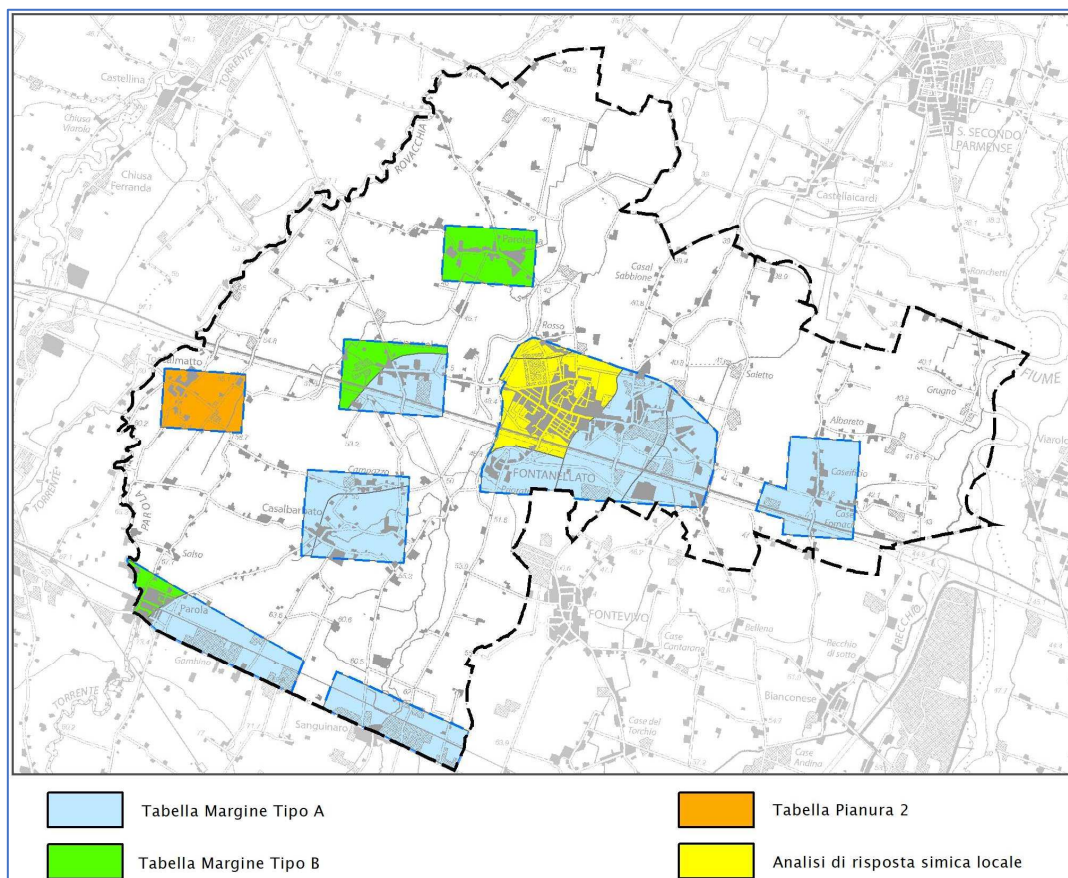


Fig. 36 - Suddivisione delle zone in base alle tabelle allegate alla DGR n. 476/2021 utilizzate per la determinazione dei fattori di amplificazione

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	2,3	2,1	1,8	1,5		
10	2,3	2,2	2,0	1,8		
15	2,1	2,1	2,0	1,8		
20	2,1	2,1	2,0	1,9		
25	2,0	2,0	2,0	1,9		
30	1,9	1,9	1,9	1,9		

Fattore di Amplificazione **PGA**

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	1,9	1,7	1,7	1,6		
10	2,7	2,2	1,9	1,8		
15	3,3	2,9	2,3	2,0		
20	3,4	3,1	2,6	2,2		
25	3,3	3,2	2,8	2,4		
30	3,1	3,1	2,8	2,5		

Fattore di Amplificazione **SA2** (0,4s ≤ T ≤ 0,8s)

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	2,2	1,9	1,7	1,6		
10	2,6	2,4	2,0	1,8		
15	2,6	2,5	2,2	1,9		
20	2,5	2,5	2,3	2,0		
25	2,3	2,3	2,2	2,1		
30	2,1	2,1	2,1	2,0		

Fattore di Amplificazione **SI1** (0,1s ≤ T ≤ 0,5s)

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	2,3	2,0	1,7	1,5		
10	2,5	2,3	2,0	1,8		
15	2,4	2,4	2,1	1,9		
20	2,3	2,3	2,1	2,0		
25	2,2	2,2	2,1	2,0		
30	2,0	2,0	2,0	1,9		

Fattore di Amplificazione **SA1** (0,1s ≤ T ≤ 0,5s)

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	1,6	1,6	1,6	1,6		
10	2,0	1,8	1,7	1,7		
15	2,9	2,3	2,0	1,9		
20	3,4	2,8	2,3	2,0		
25	3,9	3,4	2,7	2,3		
30	3,8	3,6	3,0	2,5		

Fattore di Amplificazione **SA3** (0,7s ≤ T ≤ 1,1s)

V_{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	1,8	1,7	1,6	1,6		
10	2,3	2,0	1,8	1,7		
15	3,2	2,6	2,1	2,0		
20	3,5	3,1	2,5	2,1		
25	3,7	3,4	2,8	2,4		
30	3,6	3,5	3,0	2,6		

Fattore di Amplificazione **SI2** (0,5s ≤ T ≤ 1,0s)

Tab. 12 – Tabella Margine tipo A da utilizzare per la stima di F.A., in termini di PGA, SA e SI (da Allegato 2 degli indirizzi regionali)



Elaborato	Data	Agg.	Pag.
RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	58 di 62

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
PGA	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5

Fattore di Amplificazione **PGA**

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SA1	1,8	1,8	1,8	1,7	1,6	1,5
SA2	2,6	2,5	2,4	2,2	2,0	1,9
SA3	3,2	3,2	3,0	2,7	2,5	2,2
SA4	3,1	3,0	2,7	2,4	2,2	2,0

Fattori di Amplificazione **SA1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SA2** ($0,4s \leq T \leq 0,8s$), **SA3** ($0,7s \leq T \leq 1,1s$), **SA4** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SI1	1,9	1,9	1,9	1,8	1,6	1,5
SI2	3,0	2,9	2,7	2,5	2,3	2,1
SI3	3,4	3,2	2,8	2,5	2,2	2,0

Fattori di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$), **SI3** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

Tab. 13 – Tabella Margine tipo B da utilizzare per la stima di F.A., in termini di PGA, SA e SI (da Allegato 2 degli indirizzi regionali)

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
PGA	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5	1,5

Fattore di Amplificazione **PGA**

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SA1	1,8	1,8	1,8	1,7	1,6	1,5
SA2	2,7	2,7	2,4	2,1	1,9	1,8
SA3	3,3	3,2	2,8	2,5	2,3	2,1
SA4	3,3	3,1	2,7	2,4	2,1	1,9

Fattori di Amplificazione **SA1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SA2** ($0,4s \leq T \leq 0,8s$), **SA3** ($0,7s \leq T \leq 1,1s$), **SA4** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

V _{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SI1	2,0	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6
SI2	3,1	3,0	2,7	2,4	2,1	2,0
SI3	3,6	3,3	2,9	2,5	2,2	2,0

Fattori di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$), **SI3** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

Tab. 14 – Tabella Pianura 2 da utilizzare per la stima di F.A., in termini di PGA, SA e SI (da Allegato 2 degli indirizzi regionali)



La Tab. 15 riporta i Fattori di Amplificazione determinati secondo la DGR 12 aprile 2021, n. 476 e la Risposta Sismica Locale:

MOPS	LIVELLO	ZONA	TABELLA F.A.	VS	FATTORI AMPLIFICAZIONE							
					PGA	SA 0,1-0,5S	SA 0,4-0,8S	SA 0,7-1,1S	SA 0,5-1,5S	SI 0,1-0,5 S	SI 0,5-1,0 S	SI 0,5-1,5 S
STAB	2	2001	Margine tipo A	Vs5 = 200	2,1	2,0	1,7	1,6	-	1,9	1,7	-
		2002	Margine tipo A	Vs20 = 250	2,0	2,1	2,6	2,3	-	2,3	2,5	-
		2002	Margine tipo A	Vs25 = 250	2,0	2,1	2,8	2,7	-	2,2	2,8	-
		2003	Margine tipo A	Vs5 = 200	2,1	2,0	1,7	1,6	-	1,9	1,7	-
		2003	Margine tipo A	Vs15 = 200	2,1	2,4	2,9	2,3	-	2,5	2,6	-
		2004	Margine tipo A	Vs20= 200	2,1	2,3	3,1	2,8	-	2,5	3,1	-
		2004	Margine tipo A	Vs25= 200	2,0	2,2	3,2	3,4	-	2,3	3,4	-
		2005	Margine tipo B	Vs30= 200	1,6	1,8	2,6	2,9	2,9	1,9	2,8	3,1
		2005	Margine tipo B	Vs30= 250	1,6	1,8	2,3	2,7	2,6	1,9	2,5	2,7
		2006	Margine tipo A	Vs10 = 200	2,2	2,3	2,2	1,8	-	2,4	2,0	-
	2007	Pianura 2	Vs30= 200	1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3	
3	2004	RSL	-	1,59	1,60	2,34	1,89	-	1,59	2,22	-	
	2005	RSL	-	1,46	1,53	2,27	2,05	-	1,50	2,24	-	

Tab. 15 – Fattori di Amplificazione determinati attraverso le tabelle della DGR 476/2021 e la RSL

Analizzando le aree sottoposte al secondo livello di approfondimento, si possono trarre le seguenti considerazioni:

- le amplificazioni maggiori della PGA (accelerazione massima del suolo) si riscontrano nel settore del territorio comunale dove sono presenti livelli di ghiaie sepolte entro i primi 30 metri di profondità, che determinano un netto incremento della velocità delle onde di taglio rispetto alla sovrastante copertura di depositi fini. Tale settore ricomprende gli abitati di Sanguinaro e, parzialmente, quello di Parola e si spinge sino all'altezza dell'allineamento Cannetolo-Capoluogo per poi interessare l'estremità orientale del territorio comunale;
- viceversa amplificazioni minori della PGA interessano il settore settentrionale e l'estremità occidentale del territorio comunale, dove prevalgono depositi fini

riconducibili ad una sedimentazione di conoide alluvionale distale del F. Taro o di conoide minore del T. Rovacchia;

- le variazioni di amplificazione in termini di spettro in accelerazione e spettro in velocità per bassi periodi (0,1-0,5 s), evidenziano un andamento simile a quella della PGA, anche se con valori differenti dei fattori di amplificazione;
- l'amplificazione degli spettri in accelerazione e velocità per periodi superiori a 0,5 s, è caratterizzata da un andamento differente rispetto a quella per bassi periodi, con valori più ridotti nel settore orientale (Sanguinaro e Albareto) e valori maggiori nella restante parte del territorio comunale.

Tuttavia gli approfondimenti di terzo livello, limitati ad una parte del Capoluogo, hanno evidenziato una riduzione generalizzata dei fattori di amplificazione rispetto a quelli ricavabili dall'approccio semplificato, in particolare per la PGA e per lo spettro in accelerazione per periodi 0,7÷1,1 s.

Infine sono state prodotte le carte dello scuotimento in accelerazione, che rappresenta lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in g) per gli intervalli di periodo $0,1 \leq T \leq 0,5s$, $0,4 \leq T \leq 0,8s$ e $0,7 \leq T \leq 1,1s$.

Tale scuotimento è espresso attraverso il parametro H, dato dal prodotto dell'Acceleration Spectrum Intensity (ASI), integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per determinati intervallo di periodi, diviso per ΔT e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

$$H = \frac{ASI}{\Delta T} \times FA$$

I valori di ASI sono stati determinati attraverso gli spettri di risposta a pericolosità uniforme in pseudo-accelerazione con T_r pari a 475 anni, riferiti al baricentro di ciascuna MOPS.

I valori di accelerazione per il periodo $0,1 \leq T \leq 0,5s$ sono compresi tra 0,45 e 0,74 g.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	61 di 62

10. ELENCO ELABORATI

- Relazione illustrativa
- Carta delle indagini (scala 1:4.000) – n° 3 Tavole
- Carta geologico-tecnica (scala 1:10.000)
- Carta delle frequenze naturali dei terreni (scala 1:10.000)
- Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (scala 1:10.000)
- Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) (scala 1:10.000)
- Carta di microzonazione sismica - FPGA (scala 1:10.000)
- Carta di microzonazione sismica - FA 0105 (scala 1:10.000)
- Carta di microzonazione sismica - FA 0408 (scala 1:10.000)
- Carta di microzonazione sismica - FA 0711 (scala 1:10.000)
- Carta di microzonazione sismica - FA 0515 (scala 1:10.000)
- Carta di microzonazione sismica – FH 0105 (scala 1:10.000)
- Carta di microzonazione sismica – FH 0510 (scala 1:10.000)
- Carta di microzonazione sismica – FH 0515 (scala 1:10.000)
- Carta di microzonazione sismica - HSM (scala 1:10.000)
- Carta di microzonazione sismica – H0408 (scala 1:10.000)
- Carta di microzonazione sismica – H0711 (scala 1:10.000)

Allegato n° 1 – Indagini integrative

Allegato n° 2 – Verifiche liquefazione

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2023	0	62 di 62