

**Comune di
SAN PIETRO IN CASALE**



PSC

ELABORATO IN FORMA ASSOCIATA

PIANO STRUTTURALE COMUNALE RELAZIONE GEOLOGICA Microzonazione sismica

Studio Viel & Sangiorgi

Elaborazione: Dott. Geol. Viel Giovanni

Dott. Geol. Sangiorgi Samuel

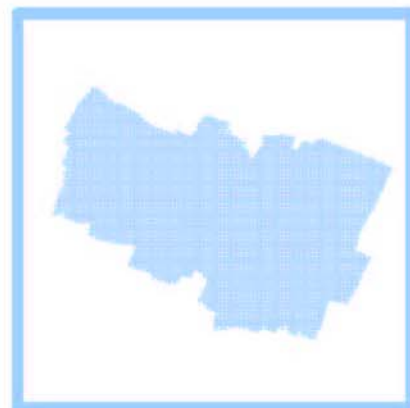
Dott. Geol. Ferrari Venusia

Sindaco
A. Valenti

Segretario comunale
Dott. A. Fanti

Responsabile Ufficio di Piano
Arch. Piero Vignali

adozione dellb. C.C n. del
approvazione dellb. C.C n. del





INDICE

1. INTRODUZIONE	pag	1
2. INDAGINI GEOGNOSTICHE E SISMICHE		3
3. PALEOGEOGRAFIA E LIQUEFAZIONE		7
4. PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE		12
4.1 Il quadro normativo di riferimento		12
4.2 Obbiettivi dell'indagine sismica		16
4.3 Definizione Vs30 e categoria di sottosuolo di fondazione		17
4.4 Verifica mono dimensionale dell'amplificazione locale		18
4.4.1 Elaborazione del modello sismico		18
4.4.2 Elaborazione dell'amplificazione		26
4.5 Verifiche della suscettibilità alla liquefazione		28
5. MICROZONIZZAZIONE E PROPOSTA NORMATIVA		32
5.1 Morfologia		32
5.2 Liquefazione		33
5.3 Amplificazione		33
5.4 Proposta normativa		35

ALLEGATI



1. INTRODUZIONE

La componente geologica del quadro conoscitivo (QC) del Piano Strutturale elaborata per l'Associazione di comuni "Reno Galliera" contiene le analisi per una conoscenza dei parametri geologici del territorio di pianura indagato:

- assetto morfologico generale;
- caratterizzazione geomeccanica preliminare della coltre più superficiale (primi 10 metri) in un intorno significativo dei maggiori centri abitati, ricavato dall'inventario delle prove geognostiche e conoscenze di sottosuolo ricavate dagli Uffici Tecnici dei Comuni, e da quello regionale (Servizio Geologico, sismico e dei suoli), e dall'archivio dello Studio scrivente;
- campo di moto dell'insieme di falde più superficiali, riconoscimento e delimitazione dei bacini di drenaggio sotterranei;
- qualità delle acque del freatico, studiata per la prima volta nel bolognese con l'analisi idrochimica di circa 50 campioni d'acqua;
- discussione sullo stato delle conoscenze relative alle acque profonde, all'approvazione del PTA (Piano di Tutela delle Acque), ed alle conseguenze degli eccessivi emungimenti cui sono state sottoposte le falde profonde in questi decenni (subsidenza);
- individuazione della pericolosità di allagamento basata sulle ricorrenze negli ultimi 50 anni, delimitazioni derivate dall'inventario degli eventi alluvionali della Protezione Civile;
- zonizzazione dei suoli di fondazione secondo la nuova normativa sismica, e preliminare delimitazione dei possibili effetti di sito (liquefazione dei sedimenti saturi), presenza di cave o di altri effetti morfologici;
- quadro normativo relativo ai diversi settori trattati.

La scala d'esecuzione delle analisi citate è diversa per ogni tema trattato, in funzione del grado di accuratezza delle informazioni disponibili: ad esempio, le analisi territoriali sismiche scontano la rarefazione delle conoscenze di sottosuolo in generale, e l'assenza di quelle specifiche per la conoscenza delle onde di taglio (Vs).

Il quadro normativo del PS Associato rimanda infatti alla fase di elaborazione dei PSC ed in particolare dei POC/PUA; inoltre la Regione Emilia-Romagna ha recentemente emesso la delibera applicativa <<Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica>> (Delibera dell'Assemblea legislativa progr. n°112 - oggetto n°3121 del 2 maggio 2007). La nuova normativa regionale chiede che, per l'approvazione degli strumenti di pianificazione urbanistica comunale, vengano affrontati studi di pericolosità e di microzonazione sismica, per livelli di approfondimento differenziati a seconda delle fasi di pianificazione e del contesto di pericolosità locale riscontrato. Nel caso di S. Pietro in Casale, inserito nella "zona 3" di pericolosità sismica (ai sensi della nuova classificazione Opcm 3274/2003),



l'approvazione del PS è subordinata all'elaborazione di cartografie di microzonazione di <<secondo livello>>.

Per quanto detto, la presente relazione, costituisce l'integrazione ed il completamento del lavoro svolto per il PS Associato, relativa al Comune di S. Pietro in Casale, in merito alla caratterizzazione sismica (pericolosità e microzonazione).



2. INDAGINI GEOGNOSTICHE E SISMICHE

Per le finalità dello studio citate in premessa, si sono rese indispensabili nuove indagini geognostiche e sismiche, oltre all'utilizzo delle informazioni ricavate da un vasto repertorio di prove pregresse.

a) Prove eseguite per questo lavoro:

- ❖ quattro prove penetrometriche CPTU/E con puntale “Gouda” di dimensioni standard, dotata di trasduttore di pressione (CPTU) ed anche di setto poroso per la valutazione delle sovrappressioni interstiziali (CPTU). L'acquisizione dei dati avviene ogni 2 cm di avanzamento e le prove sono state spinte fino a 30 metri dal p.c (CPTU1 e 2), o a rifiuto (CPTU3, -25 m). I dati di penetrazione (Q_c , f_s) sono stati elaborati per desumere i principali parametri tessiturali e meccanici dei sedimenti attraversati e la verifica alla liquefazione secondo Robertson 1996 ed Olsen 1996;
- ❖ 2 Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW) per il calcolo della velocità di propagazione delle onde sismiche superficiali (V_s), utile per la classificazione del sottosuolo di fondazione prevista dalla normativa vigente. La masw è una metodologia non invasiva che utilizza le onde di Rayleigh, componente principale delle onde superficiali, e per questo poco soggetta ai rumori ambientali; l'analisi delle onde S viene eseguita mediante la trattazione spettrale del sismogramma. La strumentazione utilizzata è composta dal sismografo a 24 canali << Abem-Ras-24 >>, con convertitore del segnale A/D a 24 bit. Lo stendimento è stato configurato con 24 geofoni da 4,5 Hz, posti alla distanza di 1m. La sorgente di rumore è stata fornita da tre colpi, su una piastra con una mazza battente da 10 Kg, alle seguenti distanze dal primo geofono dell'allineamento: 5m – 12m - 17m. L'acquisizione dei dati è avvenuta con doppia registrazione con tempi di 4 secondi ed un intervallo di campionamento rispettivamente di 1ms e 2ms;
- ❖ 9 indagini con tromografo digitale → misure puntuali speditive ad alta risoluzione, del microtremore sismico, finalizzate all'elaborazione degli spettri di base ed analisi HVSR del sottosuolo. L'acquisizione dei dati è stata effettuata alla frequenza di 128 Hz per verificare la profondità del substrato sismico, e con un tempo di registrazione di 12 minuti;

b) Prove di repertorio:

- ❖ 34 sondaggi a carotaggio o stratigrafie dei pozzi per acqua → repertoriati dalla Banca Dati geognostica della Regione Emilia-Romagna, e dall'archivio dello Studio scrivente, già utilizzati anche per la stesura della carta di primo livello del PSC Associato;
- ❖ 37 prove penetrometriche CPT, CPTU, CPTU → ancora desunte dalla B/D geognostica della R.E.R., dalla banca dati dello Studio scrivente, e dalle informazioni fornite dalle Amministrazioni Comunali, alcune di queste attorno ai 30 metri;

Le figure 1 e 2a, 2b localizzano i punti di controllo considerati per questo lavoro, mentre in appendice al testo si allegano grafici, tabelle e certificati dei risultati delle prove effettuate direttamente dallo Studio scrivente per questo lavoro.

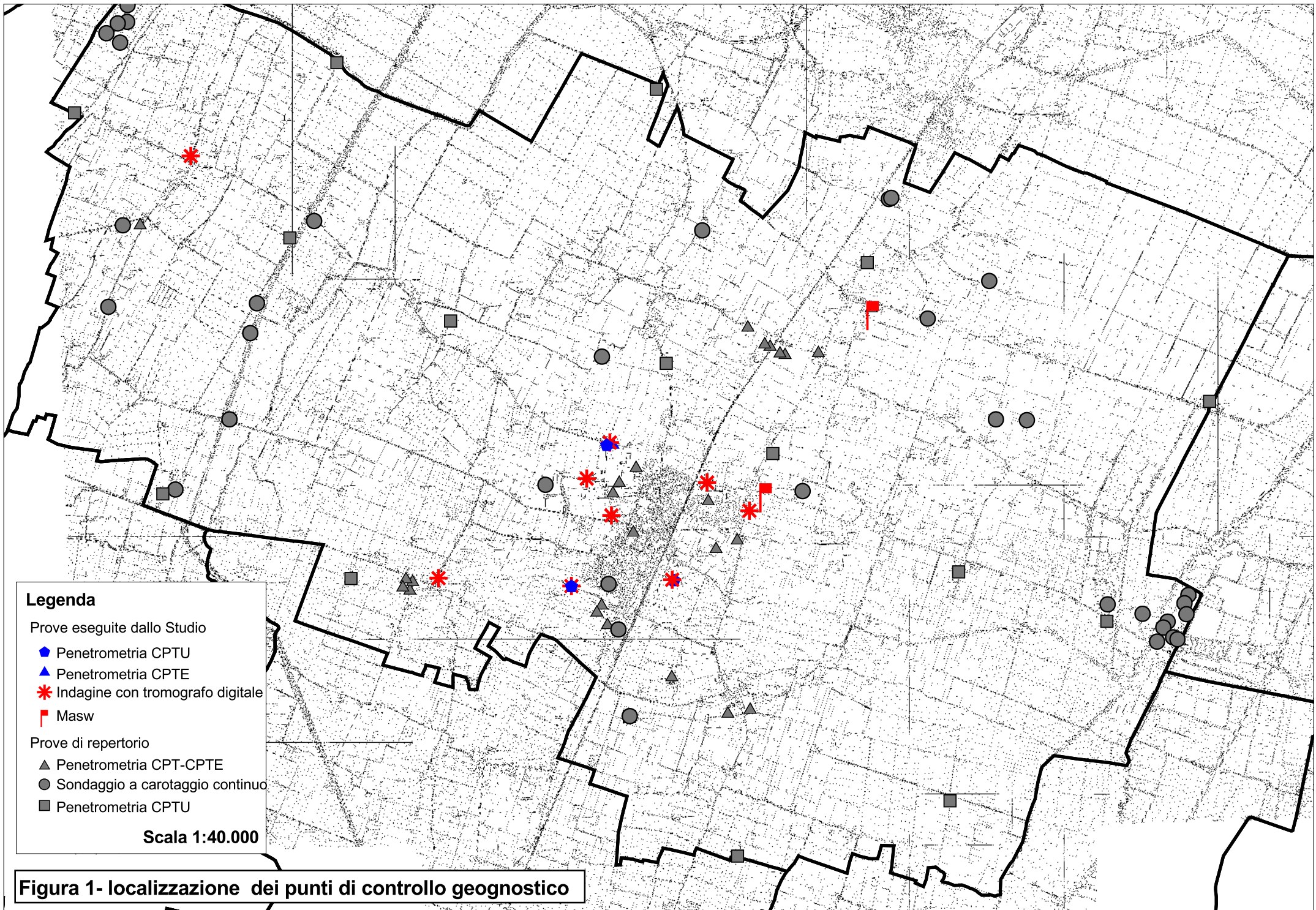


Figura 1- localizzazione dei punti di controllo geognostico

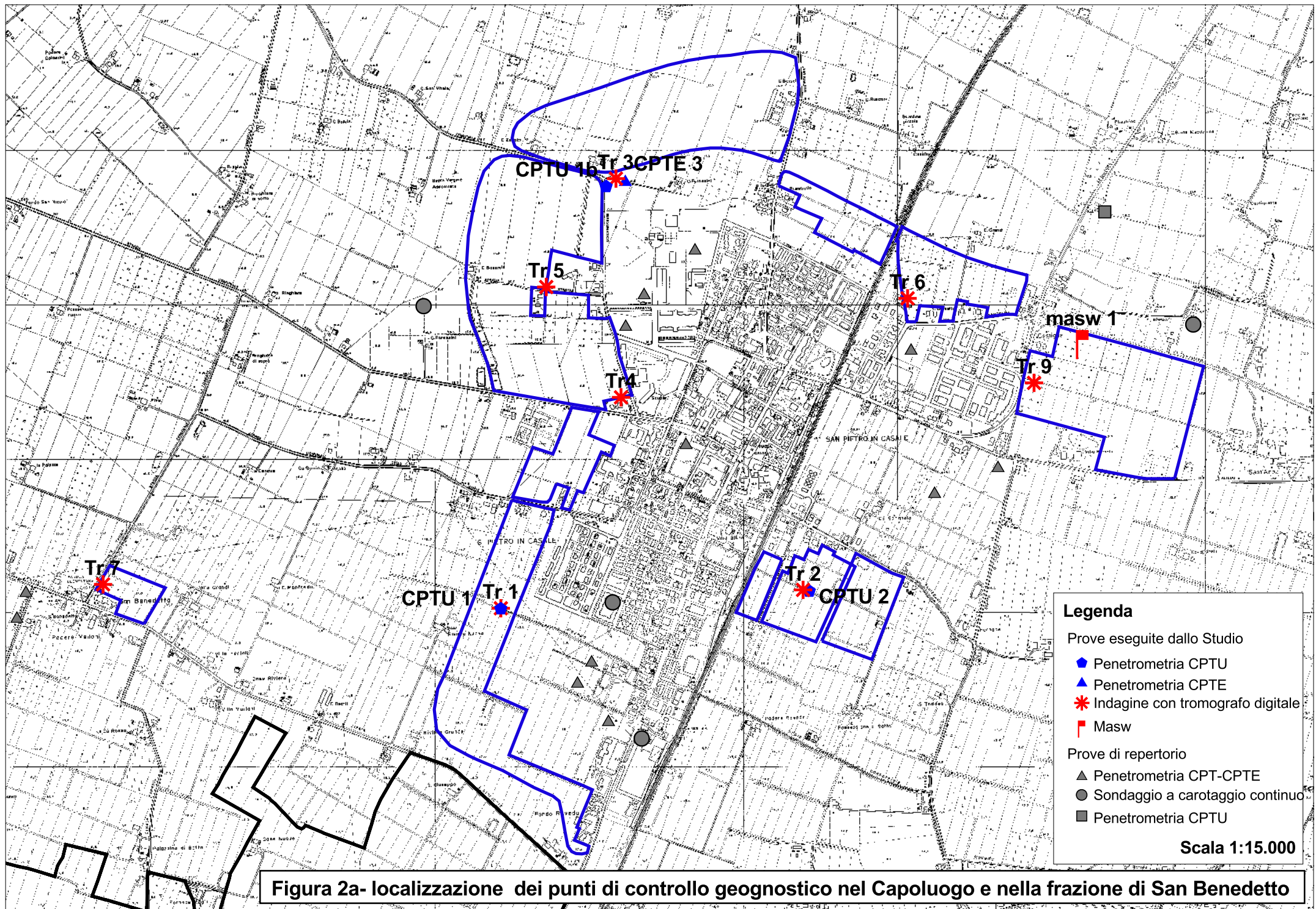
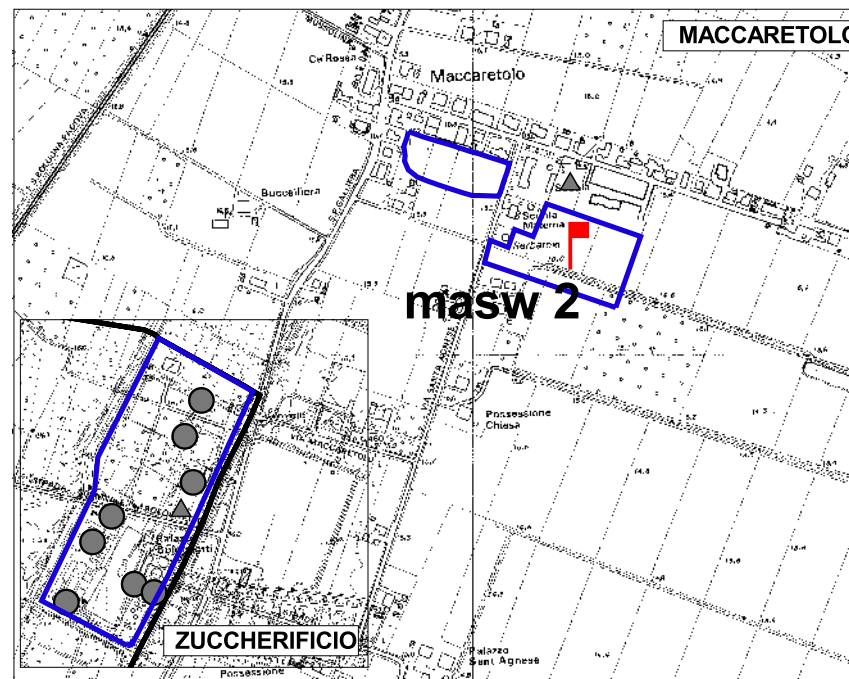
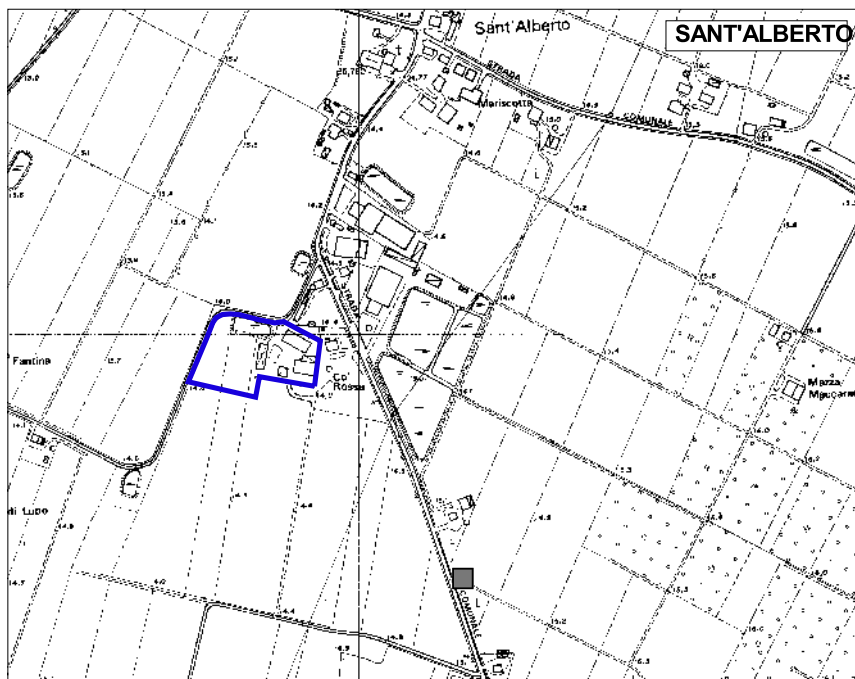
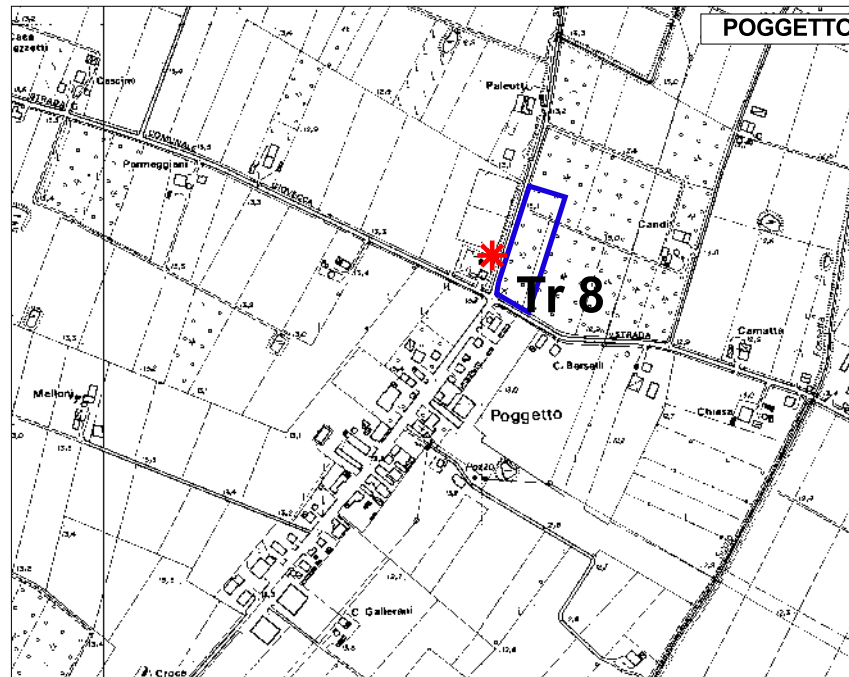
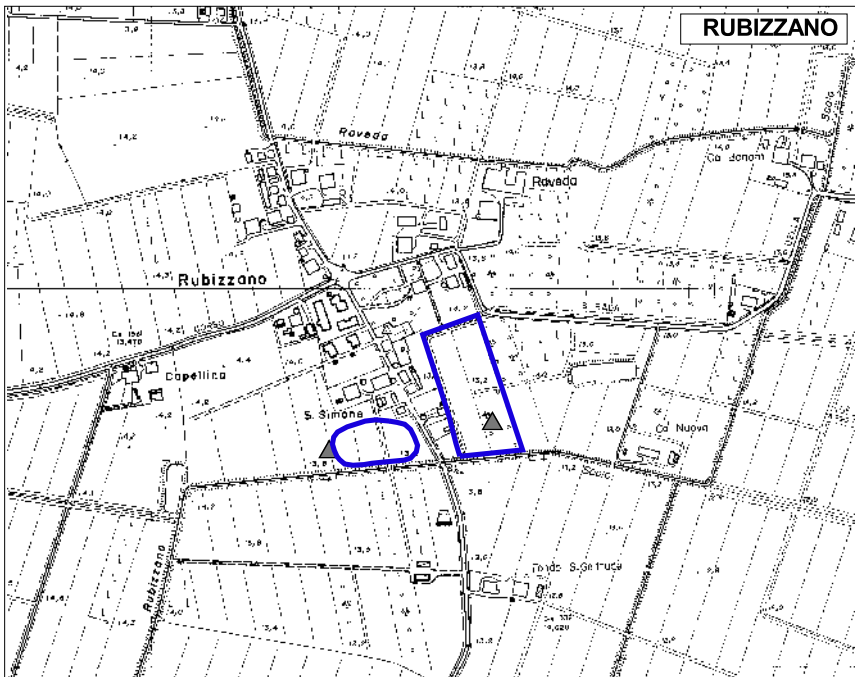


Figura 2a- localizzazione dei punti di controllo geognostico nel Capoluogo e nella frazione di San Benedetto



Legenda

Prove eseguite dallo Studio

- ◆ Penetrometria CPTU
- ▲ Penetrometria CPTE
- * Indagine con tromografo digitale
- ▣ Masw

Prove di repertorio

- ▲ Penetrometria CPT-CPTE
- Sondaggio a carotaggio continuo
- Penetrometria CPTU

Scala 1:10.000

Figura 2b- localizzazione dei punti di controllo geognostico negli ambiti di espansione del Comune

3. PALEOGEOGRAFIA E LIQUEFAZIONE

La ricostruzione paleogeografica di sottosuolo, la cui attendibilità è strettamente correlata alla rarefazione dei punti di controllo, effettuata con il PSC (si veda tavola 3: <Carta Macro-zone Sismiche>) individuava un'ampia superficie classificata con "liquefazione probabile", ma lo scopo principale di quella fase di studio a grande scala era quello di offrire una prima definizione dei suoli di fondazione del territorio comunale.

Nel PRGC della metà degli anni ottanta (G. Viel, 1986 <Relazione geologico-tecnica al PRG del Comune di S. Pietro in Casale>) è proposta per la prima volta l'ipotesi che la morfologia sepolta del territorio comunale attorno al Capoluogo sia quella di un antico delta che si apriva in una complessa area palustre: questa ricostruzione appare confermata dalle nuove prove geognostiche, fino alla profondità di circa 6 -10 metri dal p.c. La zona palustre era probabilmente determinata dalla modesta pendenza dei canali che avevano così la possibilità di divagare ed anche dallo stesso F. Reno, ormai insediato più a ovest ed a nord (circa nella posizione odierna), che con i suoi argini naturali sopraelevati impediva il deflusso delle acque verso nord- nordest, originando così il prolungato ristagno delle acque.

La situazione morfologica dell'intervallo più profondo di 10 metri è meno documentata (numero minore di punti di controllo) ed appare legata allo spostamento verso ovest del F. Reno. L'apporto di sabbie, per l'intervallo di profondità 10 – 20 metri, è abbondante e povero di limi perché la corrente dei canali di Reno doveva essere ancora notevole e la componente limosa ed argillosa non aveva modo di depositarsi; mentre nell'intervallo di profondità fino ai 10 metri circa, i canali rappresentati sono con probabilità o docce secondarie del Reno o altri canali minori che avevano un difficile deflusso verso nord.

La figura 3a ricostruisce l'andamento dell'inviluppo di più alvei variamente sovrapposti e giustapposti, anche a quote tra loro diverse, per offrire una visione d'insieme dell'apparato deposizionale comunque più precisa di quelle presentate con il PRGC (1986), e con il PSC Associato (2006). Nella medesima figura è riportata anche la zona che si suppone essere stata in prevalenza acquitrinosa e palustre, almeno dall'alto medioevo: la cartografia dall'atlante Magini (millecinquecentonovanta), fino alle cartografie di metà milleottocento, riporta zone palustri ad est e a nord del Capoluogo in costante diminuzione. La zona palustre indicata nella figura 3a corrisponde all'estensione documentata nella cartografia di metà millesettecento.

L'area relativa al Capoluogo, dall'indagine diretta (CPTU1), è risultata priva di sedimenti granulari dotati delle caratteristiche di tessitura (sabbie pulite), potenza (maggiore di almeno 1 metro), profondità (minore di 15 metri dal piano campagna) tali da essere considerati nel campo della liquefacibilità. Ma la ricostruzione paleogeografica e le sabbie attraversate con la CPTU3 (nord del Capoluogo), testimoniano la possibile presenza di sabbie tra 7 e 12 metri circa, sabbie con probabilità liquefacibili. La consapevolezza che le prove geognostiche forniscono solamente un dato verticale puntuale, a fronte dell'esigenza di un'interpretazione tridimensionale, costringe a considerare cautelativamente che paleoalvei sabbiosi relativamente superficiali siano la causa del rilievo topografico su cui si insedia il capoluogo.

La suscettibilità alla liquefazione dei sedimenti costituisce il parametro di pericolosità sismica locale più rilevante, in particolare nella pianura alluvionale, anche a piccola scala. La figura 3b propone una selezione degli involucri di paleoalvei sabbiosi riportati nella figura 3a, depurati delle situazioni in cui la presunta profondità delle sabbie è tale da non destare preoccupazioni di risentimenti in caso di liquefazione, almeno per gli edifici dotati di fondazioni superficiali. Per questo motivo la possibile liquefazione dei sedimenti granulari dovrà essere verificata con attenzione in occasione delle analisi geologiche nei POC/PUA.

Molti Autori hanno evidenziato una correlazione positiva tra età e tipo di deposito alluvionale continentale, riguardo la propensione alla liquefazione:

- 1) Youd e Perkins, 1978 – hanno composto una tabella che sintetizza i dati raccolti durante terremoti “strong motion” dell'area di S. Diego (California), da cui risulta che i sedimenti deposti da corsi d'acqua (piana alluvionale di esondazione, canale fluviale, delta fluviali, estuari) dimostrano una probabilità di liquefazione da alta a molto alta se di età minore di 500 anni o Olocenica, gli stessi depositi se di età pleistocenica o pre-pleistocenica hanno invece una “bassa” probabilità di liquefarsi. Cioè l'osservazione dimostra che sono solamente i sedimenti di deposizione recente (olocene) e recentissima (meno di 500 anni) a presentare un'alta pericolosità per la liquefazione.
- 2) Mori et Al, 1978 – dimostrano che la suscettibilità alla liquefazione decresce nei sedimenti di età maggiore di 500 anni, con scarti anche molto alti (maggiori del 50%). Tolno, 1975 dimostra l'incremento di densità secca (stato di addensamento) del sedimento in relazione all'aumento di vetustà (dall'Olocene al terziario)
- 3) Iwasaki et Al, 1982 – dimostra per terremoti giapponesi la correlazione diretta tra probabilità di liquefazione e letti di fiumi recenti e antichi;

- 4) CNR, 1983 – ripropone la correlazione diretta tra sedimenti fluviali e deltizi continentali ed età del deposito (i più recenti sono più suscettibili alla liquefazione)

In conclusione la letteratura geologica, ormai ben consolidata e verificata, indica che le maggiori probabilità di liquefazione si hanno nei sedimenti granulari saturi recenti e recentissimi. Ciò significa che gli alvei abbandonati e sepolti del fiume Idice possono costituire fonte di pericolo di liquefazione anche per sismi di magnitudo modesta come quelli previsti per il territorio bolognese ($M=5,5$). I canali abbandonati dell'Idice di età da romana (2.000 anni) fino ai più recenti depositi del XIII secolo, possono costituire fonte di pericolo di liquefazione anche per sismi di magnitudo modesta ($M = 5,5$).

L'involuppo di paleocanali ipotizzati dovrebbe corrispondere ad alvei di bankfull, i cui limiti laterali sono costituiti da rilievi sabbiosi (argini naturali), la potenza media complessiva di ogni episodio (tra una divagazione e l'altra) dovrebbe essere non superiore ai 2 metri circa. Le barre sabbiose non hanno spessore superiore a 1 – 1,5 metri, i depositi di piena biennale possono avere spessori decimetrici fino a metrici e contenere sporadici ciottoli.

Il territorio comunale esterno ai percorsi ricostruiti degli antichi alvei indicati nella figura 3a appare ad oggi, sulla scorta delle informazioni finora note, privo di sabbie sature in cui possano verificarsi processi reologici e quindi anche di possibile liquefazione locale.

Le prove tromografiche Tr1, Tr2, Tr3 e Tr8 (fig. 2a e 2b), con i picchi di amplificazione nell'intervallo compreso tra 1,7÷1,9 Hz, testimoniano la presenza di un livello dotato di modulo di taglio relativamente elevato (comunque più elevato degli strati circostanti); potrebbe trattarsi delle sabbie con $Dr\%$ medio-alta ($>60\%$) registrate dalle CPTU/E tra i 26 ed oltre 30 metri di profondità. Restano contraddittori i risultati di alcune analisi tromografiche (Tr4, Tr6) che dovrebbero fornire il medesimo segnale: si tratta con probabilità di un diverso comportamento legato alla variazione di quantità di limi presenti, che influisce sulla densità relativa dei sedimenti.

La pericolosità di liquefazione locale dovrà essere definita esattamente con la geognostica, che verrà sviluppata nei POC, e meglio ancora nei PUA. Nella presente fase di pianificazione viene proposta una classificazione di pericolosità ancora generale e preliminare, fondata sulla ricostruzione paleogeografica esposta nelle figure 3a e 3b.

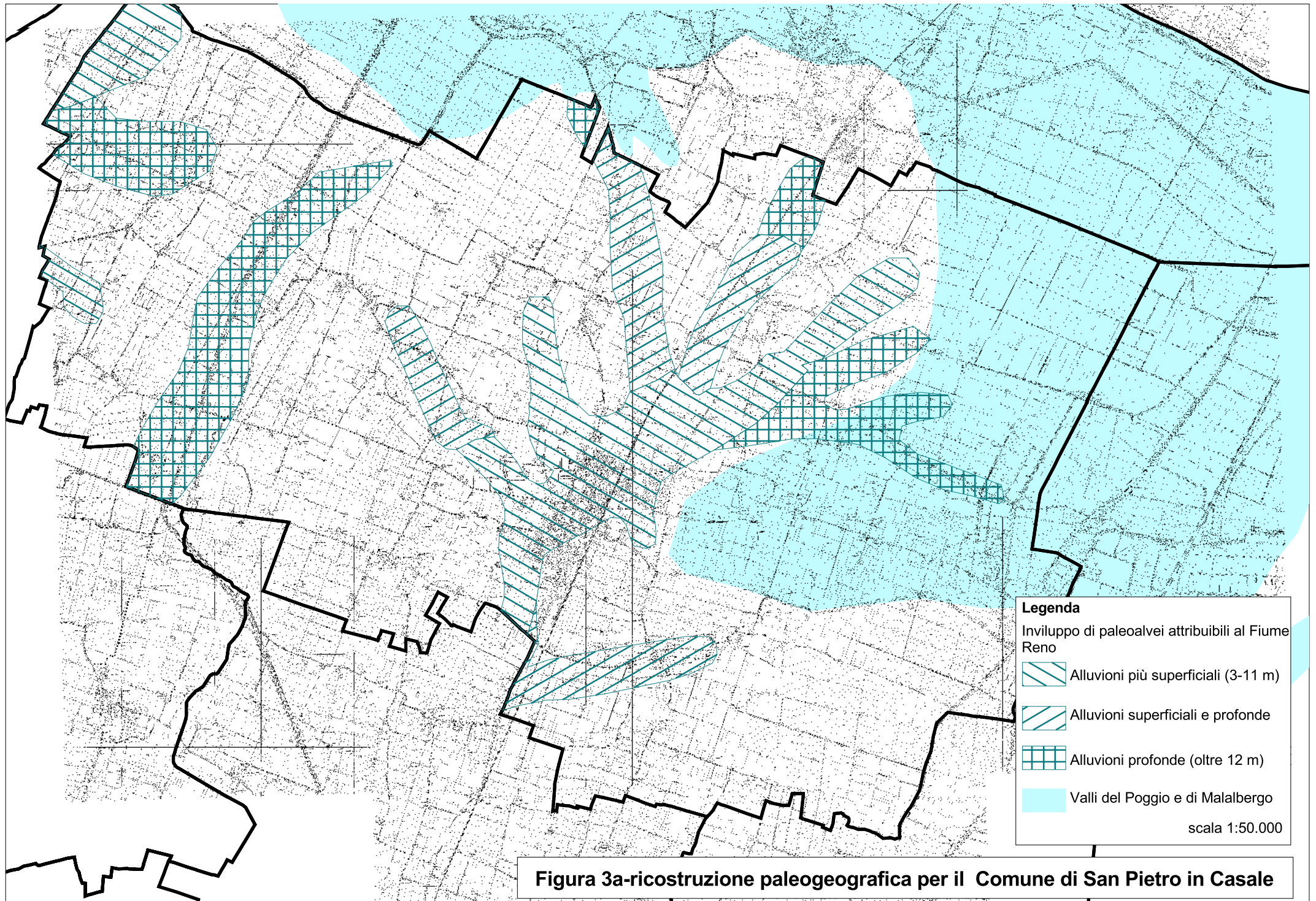


Figura 3a-ricostruzione paleogeografica per il Comune di San Pietro in Casale

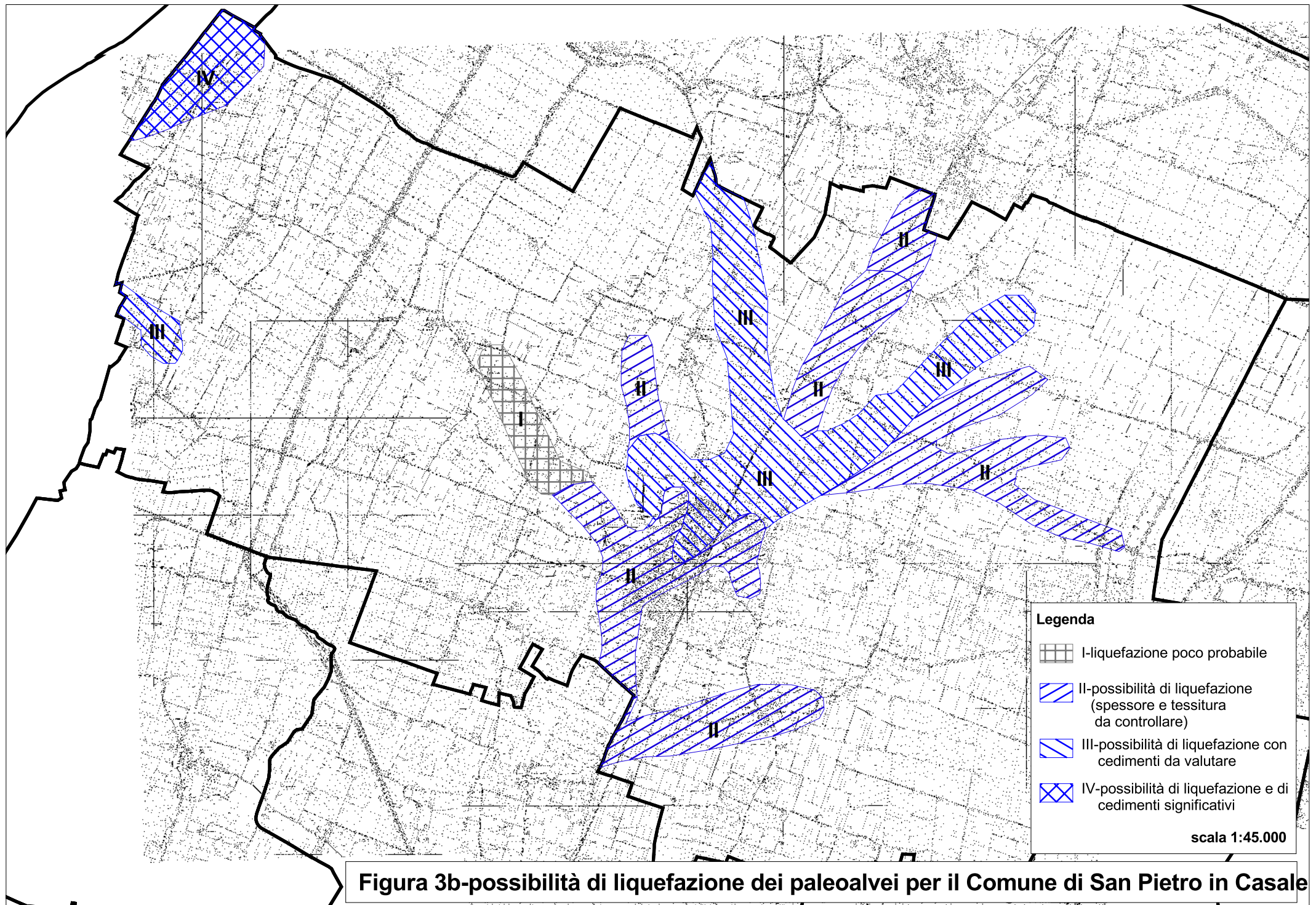


Figura 3b-possibilità di liquefazione dei paleoalvei per il Comune di San Pietro in Casale

4. PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE

4.1 Il quadro normativo di riferimento

Il panorama legislativo in materia sismica, è stato profondamente trasformato dalle recenti normative nazionali (Ordinanza PCM. n. 3274/2003, D.M. 159/2005, Ordinanza PCM. n. 3519/2006, infine le recentissime nuove Norme Tecniche per le costruzioni con D.M. del 14/01/2008). Alla legislazione, si aggiunge il lavoro dell'Associazione Geotecnica Italiana, <<aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica: linee guida>>. L'A.G.I., ha finora elaborato una edizione provvisoria del testo, pubblicata nel 2005.

L'Ordinanza PCM. n. 3274/2003 (Allegato 1), ha disposto nuovi criteri per la valutazione preliminare della risposta sismica del sottosuolo stabilendo in questo senso:

- una nuova classificazione dei Comuni nazionali, secondo quattro diversi gradi di pericolosità sismica espressa in termini di accelerazione massima orizzontale al suolo a_g , con probabilità di superamento del 10% in 50 anni;
- una nuova classificazione del sottosuolo, in “categorie di suolo di fondazione”, basata sulla stima di alcuni parametri fondamentali (V_s , N_{spt} , c_u , profondità del bedrock). Ad ogni categoria, sono stati attribuiti i valori dei parametri dello spettro di risposta per la stima delle azioni sismiche di progetto.

L'OPCM 3274/2003, non è mai entrata in vigore, ma le classificazioni sono state riprese nel D.M. 159/2005 e nell'ultimo D.M. 14/01/2008. La tabella sottostante, riassume la classificazione del sottosuolo, secondo le citate “categorie”:

CATEGORIA SUOLO DI FONDAZIONE	PROFILO STRATIGRAFICO	PARAMETRI		
		V_{s30} (m/s)	N_{spt}	C_u (kPa)
A	Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi	> 800		
B	Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità	< 800 > 360	> 50	> 250
C	Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza	< 360 > 180	< 50 > 15	< 250 > 70
D	Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti	< 180	< 15	< 70
E	Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali, con valori di V_{s30} simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con $V_{s30} > 800$ m/s			
S1	Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 m di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ($PI > 40$) e contenuto di acqua	< 100		< 20 > 10
S2	Depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti			

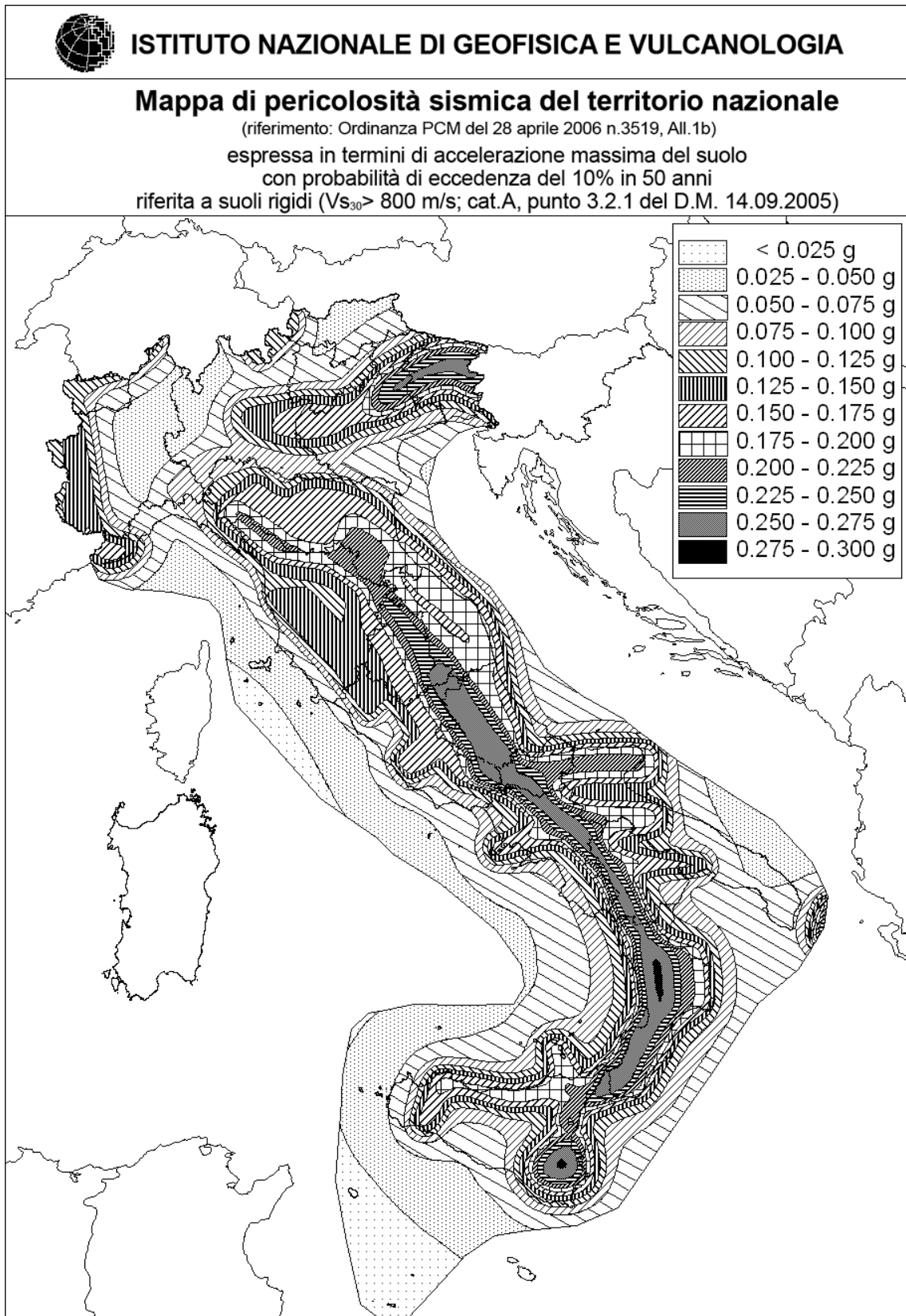


Figura 4.1 – Mapa della pericolosità sismica del territorio nazionale, pubblicata nell'Ordinanza PCM. n. 3519/2006

La classificazione vista sopra, è stata successivamente integrata dall'Ordinanza PCM. n. 3519/2006, con la pubblicazione della mappa della pericolosità sismica di riferimento per tutto il territorio nazionale (figura 4.1) e della seguente tabella che attribuisce i valori di a_g orizzontale massima da utilizzarsi per la costruzione degli spettri di risposta, così come riportato nelle precedenti Norme Tecniche per le Costruzioni del 2005 (D.M. 159/2005).

ZONA	ACCELERAZIONE CON PROBABILITA' DI SUPERAMENTO PARI AL 10% IN 50 ANNI [a_g]	ACCELERAZIONE ORIZZONTALE MASSIMA CONVENZIONALE DI ANCORAGGIO DELLO SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO [a_g]
1	$0,25 < a_g \leq 0,35 \text{ g}$	0,35 g
2	$0,15 < a_g \leq 0,25 \text{ g}$	0,25 g
3	$0,05 < a_g \leq 0,15 \text{ g}$	0,15 g
4	$\leq 0,05 \text{ g}$	0,05 g

In pratica, per effetto del periodo transitorio di applicazione e delle successive proroghe, il D.M. 159/2005 è risultato vigente soltanto per pochi giorni, sostituito dall'entrata in vigore (dal 5 marzo 2008, anch'esso in "regime transitorio") delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008). Queste ultime norme impongono nuovi e precisi criteri prestazionali di verifica dell'azione sismica nella progettazione delle nuove opere ed in quelle esistenti, valutata mediante una analisi della risposta sismica locale. In assenza di queste analisi, la stima preliminare dell'azione sismica può essere effettuata sulla scorta delle "categorie di sottosuolo" sopra citate e della definizione di una <<pericolosità di base>> fondata su un reticolo di punti di riferimento, costruito per l'intero territorio nazionale. Ai punti del reticolo sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del terremoto atteso, i valori di a_g e dei principali "parametri spettrali" riferiti all'accelerazione orizzontale, da utilizzare per il calcolo dell'azione sismica (fattore di amplificazione massima F_0 e periodo di inizio del tratto a velocità costante T^*). Il reticolo di riferimento ed i dati di pericolosità sismica vengono forniti dall'INGV e pubblicati nel sito <http://esse1.mi.ingv.it/>.

In questo contesto nazionale così dinamico ma anche molto incerto, la Regione Emilia-Romagna, ha elaborato ed approvato (con Delibera Regionale n. 112 del maggio 2007) gli <<Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica>>, in coerenza con la L.R. n.20/2000 <<Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio">>.

Gli Indirizzi, sono stati elaborati sulla scorta degli esiti delle indagini sismiche che la Regione Emilia-Romagna ha effettuato nel territorio regionale. In questo

senso, la delibera fornisce tabelle e formule propedeutiche alla valutazione preliminare dell'amplificazione locale, dati che tengono conto delle caratteristiche sismiche riscontrate nel contesto regionale.

Il documento, fornisce anche i dati fondamentali per le valutazioni più accurate della risposta sismica: lo spettro di risposta normalizzato (per $T_r = 475$ anni e smorzamento del 5%) per l'Emilia-Romagna, i valori di a_{gref} di ogni Comune, ed i segnali di riferimento (accelerogrammi), anch'essi già scalati per ogni singolo Comune.

Per quanto riguarda i criteri da seguire per gli studi di pericolosità e di microzonazione sismica, la direttiva regionale, definisce due fasi di analisi, da completarsi con tre diversi livelli di approfondimento:

- 1) la prima fase di studio, che corrisponde al primo livello conoscitivo, deve definire gli scenari di pericolosità sismica, cioè deve consentire l'individuazione delle aree soggette ad effetti locali in caso di sisma (amplificazione dell'impulso sismico, instabilità dei versanti, fenomeni di addensamento/liquesfazione, cedimenti dei terreni, ecc.). Questa prima fase, deve essere elaborata ad una scala territoriale provinciale o comunale. Le sedi adeguate per affrontare queste analisi preliminari sono il quadro conoscitivo del PTCP o quello del PSC (anche in forma associata). Questo primo livello di approfondimento, richiesto per tutti i comuni della nostra Regione, è stato già approntato dallo Studio scrivente prima della pubblicazione della Delibera;
- 2) la seconda fase di studio deve giungere alla valutazione della risposta sismica locale ed alla microzonazione del territorio. È richiesta per l'approvazione degli strumenti di pianificazione urbanistica comunale e lo studio è limitato alle aree già insediate o di previsione urbanistica, solamente se ricadenti nelle aree potenzialmente soggette ad effetti locali (individuate nella prima fase). Sulla scorta degli esiti di pericolosità sismica individuati con il primo livello, si dovrà proseguire con l'ulteriore approfondimento:
 - 2.a nelle <<aree pianeggianti e sub-pianeggianti, incluse le zone di fondovalle appenniniche, con stratificazione orizzontale o sub-orizzontale, e sui versanti stabili con acclività $\leq 15^\circ$ in cui il deposito di spessore costante>> la delibera indica sufficiente concludere lo studio di pericolosità sismica con un'"analisi semplificata", cioè con un secondo livello conoscitivo finalizzato alla elaborazione della cartografia di microzonazione sismica ed alla definizione dei "coefficienti di amplificazione" (ricavati sulla base delle tabelle a formule riportate in appendice nella stessa delibera).
 - 2.b il terzo livello conoscitivo, invece, deve essere affrontato nei casi di <<aree soggette a liquefazione e densificazione, aree instabili e

potenzialmente instabili, aree in cui le coperture hanno spessore fortemente variabile come ad esempio nelle aree pedemontane e di fondovalle a ridosso dei versanti, aree in cui è prevista la realizzazione di opere di rilevante interesse pubblico>>. In questi casi, l'analisi più approfondita deve consentire la valutazione degli spettri di risposta (per Tr di 475 anni con smorzamento del 5%) riferiti alle aree da indagare, e si dovranno elaborare le <<mappe di amplificazione>> in termini di rapporti PGA/PGA_0 e SI/SI_0 .

4.2 Obiettivi dell'indagine sismica

Scopo di questo studio è quello di produrre la microzonizzazione sismica delle aree insediate e di futuro POC del territorio comunale di San Pietro in Casale.

Ad integrazione delle analisi conoscitive per il PSC in forma associata dell'Associazione "Reno Galliera" lo Studio scrivente ha prodotto la cartografia preliminare di zonizzazione della pericolosità sismica <<tavole 3a e 3b - Carta della Zonizzazione sismica>>. Il lavoro e la cartografia del PSC Associato, costituiscono un inquadramento territoriale delle caratteristiche sismiche equiparabile al primo livello richiesto dalla recente Delibera Regionale del 2007.

Lo studio, infatti, ha prodotto una zonizzazione del territorio dell'Associazione Comunale secondo la classificazione in <<categorie di suolo di fondazione>> (DM 159/2005), ed una zonizzazione della pericolosità che tiene conto dei possibili effetti di sito (aree con potenziale propensione alla liquefazione/densificazione).

Sulla scorta della preliminare stima della pericolosità sismica ricavata con la prima fase di studio e tenuto conto che il Comune di San Pietro in Casale ricade in "Zona 3" della nuova classificazione sismica (Opcm 3274/2003), la Delibera Regionale dispone che l'approvazione del Piano Strutturale Comunale, sia subordinata alla formazione di cartografie di secondo livello semplificato.

Nell'analisi di primo livello, sono stati considerati i fusi granulometrici di sabbie del Reno recuperate da:

- a) sondaggi di letteratura, eseguiti nel 1987- 1991 per vari scopi geotecnici nei Comuni di Bologna e Castel Maggiore;
- b) sondaggi eseguiti per il PSC del Comune di Castel Maggiore;
- c) sondaggi eseguiti per il PSC di Argelato;

tutti gli esiti ottenuti (vedi appendice) ricadono costantemente entro l'area della <<elevata possibilità di liquefazione>>. Su due di questi campioni di sabbie per i PSC di Castel Maggiore e di Argelato sono state effettuate anche specifiche prove di laboratorio (triassiali cicliche) che hanno confermato la liquefazione delle sabbie campionate, ma solamente per sismi al limite superiore della magnitudo

attesa ($M=5,5$). E' molto probabile che anche per San Pietro in Casale la possibile liquefazione dei sedimenti granulari sia da attendersi solamente per sismi con magnitudo eguale o superiore a 5,5, cioè per le condizioni estreme attese.

La distanza di San Pietro in Casale da zone epicentrali note come Ferrara e Molinella attorno ai 20 km, è tale da far ragionevolmente ritenere che, anche in presenza di sisma con magnitudo massima tra quelle attese, la possibilità di liquefazione sia scongiurata. In tutti i casi le condizioni reali di liquefacibilità dei sedimenti granulari saturi deve essere però accuratamente verificata prelevando campioni idonei in sede di elaborazione dei POC/PUA, cui si rimanda per le verifiche locali di presenza di eventuali sedimenti liquefacibili.

La microzonizzazione è stata effettuata sulla base della variazione locale di due insiemi di parametri fondamentali: definizione delle V_s e del bedrock sismico, accertamento della liquefacibilità delle sabbie sature entro i primi 15 metri dal p.c.

4.3 Definizione delle V_{s30} e della “categoria di sottosuolo di fondazione”

Per derivare le variazioni di V_{s30} nel territorio comunale e quindi la categoria di sottosuolo nelle diverse zone, sono stati programmati i punti di controllo ed i diversi strumenti di indagine indicati nel § 2. La qualità delle informazioni di sottosuolo acquisite, e la convergenza negli esiti, fornisce il grado di attendibilità della conclusione raggiunta per questo lavoro.

La media delle velocità delle onde di taglio riscontrate con le MASW nei primi 30 metri di sottosuolo (V_{s30}) è risultata mediamente attorno a 217 m/s (figure 4.2 e 4.3), questo valore indica una categoria di suolo di fondazione “C”, sia pure nella parte più vicina al limite con la categoria “D”, come spesso avviene nella pianura media bolognese.

Considerando la traduzione dei dati meccanici di penetrazione in V_s (Andrus, Piratheepan, Juang), risulta un intervallo di risultati compreso tra 192 m/s (CPTU1) e 213 m/s (CPTU di Massumatico), che confermerebbe per l'intero territorio comunale l'appartenenza alla categoria “C”, sia pure prossima al limite con “D”.

Il fatto che il suolo di fondazione venga considerato in categoria “C” oppure “D” dipende quindi da una variazione minima nei parametri meccanici del sottosuolo, variazione che rientra nelle approssimazioni insite negli stessi metodi di acquisizione meccanici (penetrometrie) o geofisici (MASW e Tromografie), e negli algoritmi di calcolo e trasformazione.

A conferma della categoria di suolo “C” bisogna ricordare che, in genere, l'algoritmo di conversione dei dati meccanici ottenuti dalle CPT sottostima le V_s , come dimostrano tutti e sei i con sismici (CPTS) realizzati nella pianura Bolognese tra il 2007 ed il 2008.

Anche il controllo delle CPTU eseguite da altri Autori fornisce un quadro di valori di V_{s30} coerente con l'inserimento nella categoria di suolo "C".

In conclusione tutte le informazioni acquisite conducono ad una stima omogenea delle V_{s30} attorno al limite di categoria tra "C" e "D", con il costante superamento del limite (180 m/s).

L'estrapolabilità di questi dati è stata controllata con 9 prove tromografiche che confermano la sostanziale omogeneità della distribuzione delle V_{s30} e la presenza di un bedrock sismico a profondità superiore ai 100 metri. Tutti gli esiti delle prove effettuate, compresi i diagrammi ottenuti dal tromografo digitale, sono riportati in appendice al testo in forma grafica, ed in forma numerica nel CD allegato.

Questa conclusione concorda con la classificazione del territorio riportata nella tavola 3a di integrazione al PSC Associato Reno Galliera <Carta macro-zone sismiche>, uniche correzioni da apportare sono relative a due zone: Fondo Raveda e Maccaretolo che nelle tavole del PSC Associato erano considerate come categoria di suolo "D", mentre ora sono classificate categoria "C".

4.4 Verifica monodimensionale dell'amplificazione locale

Il modello geologico di sottosuolo e la correlabilità tra gli esiti litologici e meccanici ottenuti dalle prove geognostiche e geofisiche, consentono l'elaborazione di due modellazioni numeriche di risposta sismica. Lo Studio scrivente dispone del software *SHAKE 2000*, software di calcolo realizzato per verifiche monodimensionali, in grado di raggiungere, tramite una sequenza di analisi lineari complete, valori di rigidezza G e di smorzamento D compatibili con le caratteristiche delle colonne litologiche oggetto di studio.

La verifica monodimensionale dell'amplificazione locale, tramite l'utilizzo di Shake si compone di due fasi: elaborazione del modello e simulazione degli effetti indotti dal sisma di progetto.

4.4.1 Elaborazione del modello sismico

La prima fase consiste nel costruire la colonna di sottosuolo di riferimento, rappresentata da strati (*layer*) a differente tessitura e da diversi valori delle onde di taglio S (V_s). La stratigrafia che caratterizza il modello per i primi 30 m deriva dagli esiti delle prove geognostiche eseguite per questo lavoro e di repertorio; la stratigrafia più profonda (da circa -30 m fino al bedrock sismico) è estrapolata dalla Banca Dati Geognostica della R.E.R.

L'insieme delle informazioni geofisiche, geomeccaniche ed anche paleogeografiche conduce ad elaborare due diversi modelli di simulazione sismica:

Modello 1 rappresentativo dei territori interessati anche dalla presenza di sabbie superficiali e più profonde (nei primi 30 metri);

Modello 2 rappresentativo delle situazioni più settentrionali, in cui le sabbie più superficiali si presume siano assenti, ed il bedrock sismico può avere profondità leggermente superiore.

Il modello numerico di risposta sismica locale “Modello 1”, è stato riferito a suoli di fondazione di categoria “C”, impostando 12 differenti litotipi, di cui l’ultimo (circa 115 metri) corrisponderebbe al livello Fossolo della stratigrafia di pianura:

- da 0 a 1 metri, argilla molto plastica con I_p 40÷80;
- da 1 a 4,5 metri, sabbia con valori bassi di densità relativa ($Dr \approx 40\%$);
- da 4,5 a 6,5 argilla molto plastica con I_p 40÷80;
- da 6,5 a 13, sabbia con valori modesti di densità ($DR \approx 50\%$);
- da 13 a 28 argilla e limi con indice di plasticità compreso tra 20÷40;
- da 28 a 35 sabbia con valori di densità relativa ($Dr \approx 70\%$);
- da 35 a 52 argilla e limi I_p 20÷40
- da 52 a 63 sabbia e ghiaia ($Dr \approx 70\%$);
- da 63 a 80 argilla e limi I_p 10÷20;
- da 80 a 90 sabbia ($Dr \approx 70\%$);
- da 90 a 115 argilla e limi I_p 10÷20;
- 115 (Bedrock sismico).

Il secondo modello di risposta sismica locale “Modello 2” è stato riferito a suoli di fondazione “C”, impostando 9 differenti litotipi, di cui l’ultimo (circa 142 metri) corrisponderebbe al livello Fossolo della stratigrafia di pianura:

- da 0 a 6,7 metri, argilla plastica con I_p 20÷40;
- da 6,7 a 8,3 metri, sabbia limosa con valori di densità relativa ($Dr = 30\%$);
- da 8,3 a 20,7 metri, argilla con I_p 20÷40;
- da 20,7 a 26,8 metri, argilla con I_p 10÷20;
- da 26,8 a 30 metri, sabbia con $DR \approx 50\%$;
- da 30 a 66 metri argilla con I_p 10÷20;
- da 66 a 72 metri sabbia con valori di densità relativa ($Dr \approx 70\%$);
- da 72 a 142 metri argilla con I_p 10÷20;
- >142 metri (Bedrock sismico).

Per l'attribuzione della velocità delle onde sismiche di taglio V_s , relativa ai differenti layer della colonna sismica, si è tenuto conto degli esiti di due prove MASW, e delle tomografie effettuate nell'area.

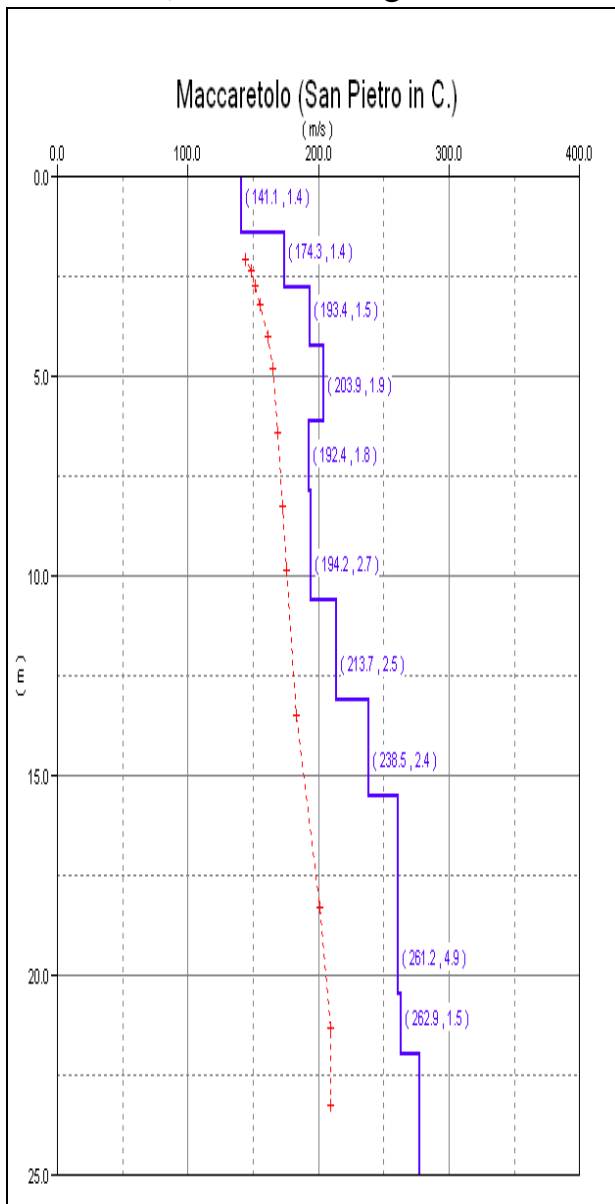


Fig. 4.2 – Distribuzione delle V_s ricavate dalla prova MASW nella Frazione di Maccareto

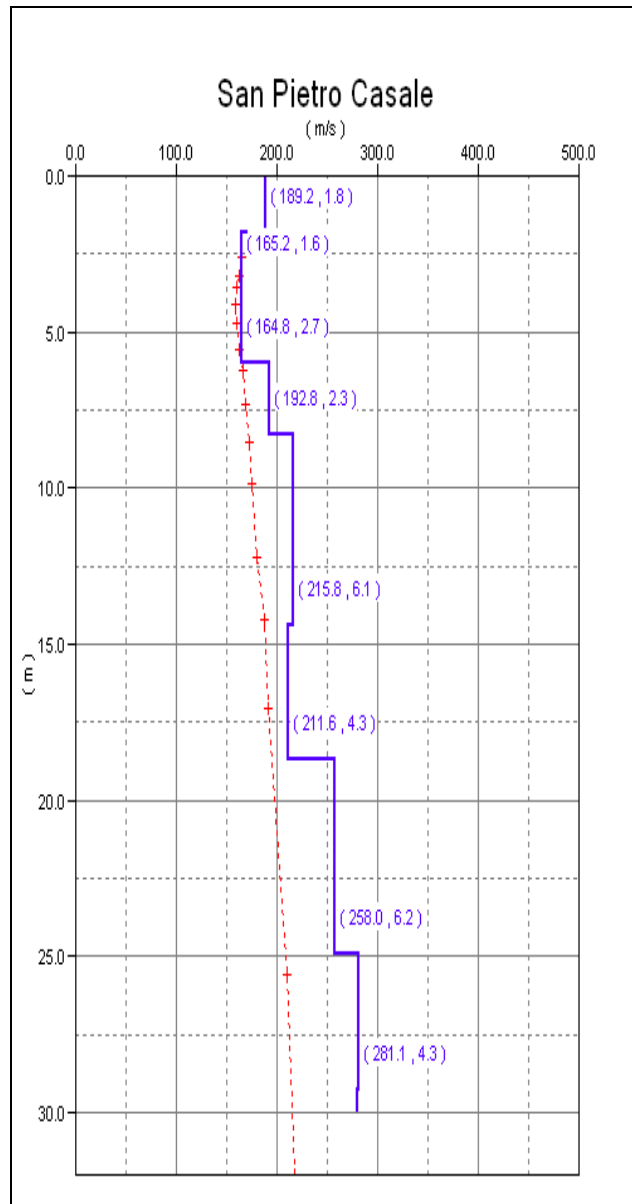


Fig. 4.3 – Distribuzione delle V_s ricavate dalla prova MASW nel Capoluogo San Pietro in Casale

La bontà di acquisizione del segnale sismico ottenuto dalle prove MASW, elaborate sulla scorta della curva di dispersione sperimentale, consente una stima accettabile della V_s rispettivamente fino ad una profondità di circa 30 metri (figure 4.2 e 4.3).

Il bedrock sismico è stato impostato alla profondità di $120 \div 140$ m dal p.c. (figura 4.4a -figura 4.5a), in corrispondenza del “drappo” limoso con intercalazioni sabbiose, forse corrispondente all’interglaciale. Gli esiti di tutte prove tomografiche (eseguite con frequenza di acquisizione di 128 Hz) registrano

infatti un picco di amplificazione anche maggiore di 2, nell'intervallo di frequenza 0,7 – 0,9 Hz. Ciò dimostra la presenza di un importante orizzonte litologico, il medesimo già registrato in tutti i comuni della pianura media e bassa, posto tra i 110 ed i 140 m dalla superficie. Con ogni probabilità si tratta del complesso di strati pelitici e sabbioso-ghiaiosi denominato “drappo” (interglaciale Riss-Würm) nella prima fase di elaborazione della geologia di pianura, e successivamente denominato “Fossolo”. A questo livello si è fatta corrispondere una V_s pari a 650 m/s, sufficiente a definirlo come bedrock sismico assunto come riferimento anche nei modelli sismici di seguito descritti (§ 4).

Per l'elaborazione del modello di simulazione sismica, occorre l'inserimento dei dati (accelerazione, intervalli di tempo), relativi ai segnali di riferimento selezionati dalla banca dati accelerometrica “European Strong Motion database” e forniti dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli regionale. Si tratta di sismi che possono verificarsi nel territorio del comune oggetto di studio. Questi tre segnali, già “scalati” rispetto al comune a cui si riferiscono, sono rappresentati da tre differenti accelerogrammi di progetto:

- impulsivo;
- con ampio contenuto in frequenze;
- con componente predominante alle alte frequenze.

Per il Comune di San Pietro in Casale, i dati fondamentali del sisma forniti dalla Delibera regionale sono: magnitudine 5,5 e accelerazione al substrato $a_g = 0,158g$.

COMUNE DI SAN PIETRO IN CASALE

Modello 1

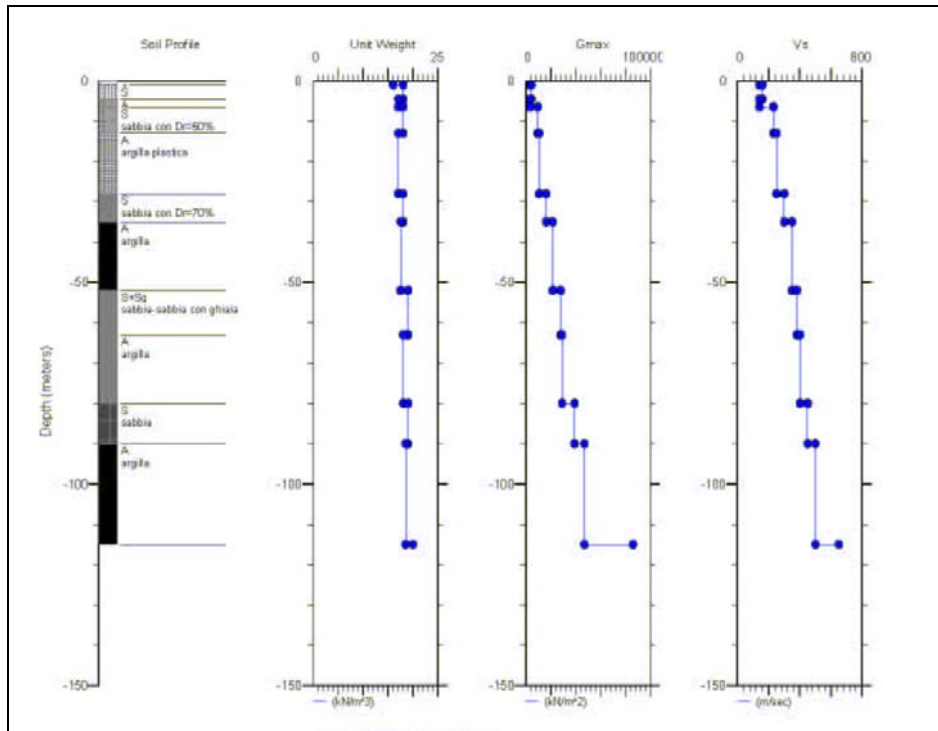


Figura 4.4a stratigrafia di riferimento schematica utilizzata per la modellizzazione sismica

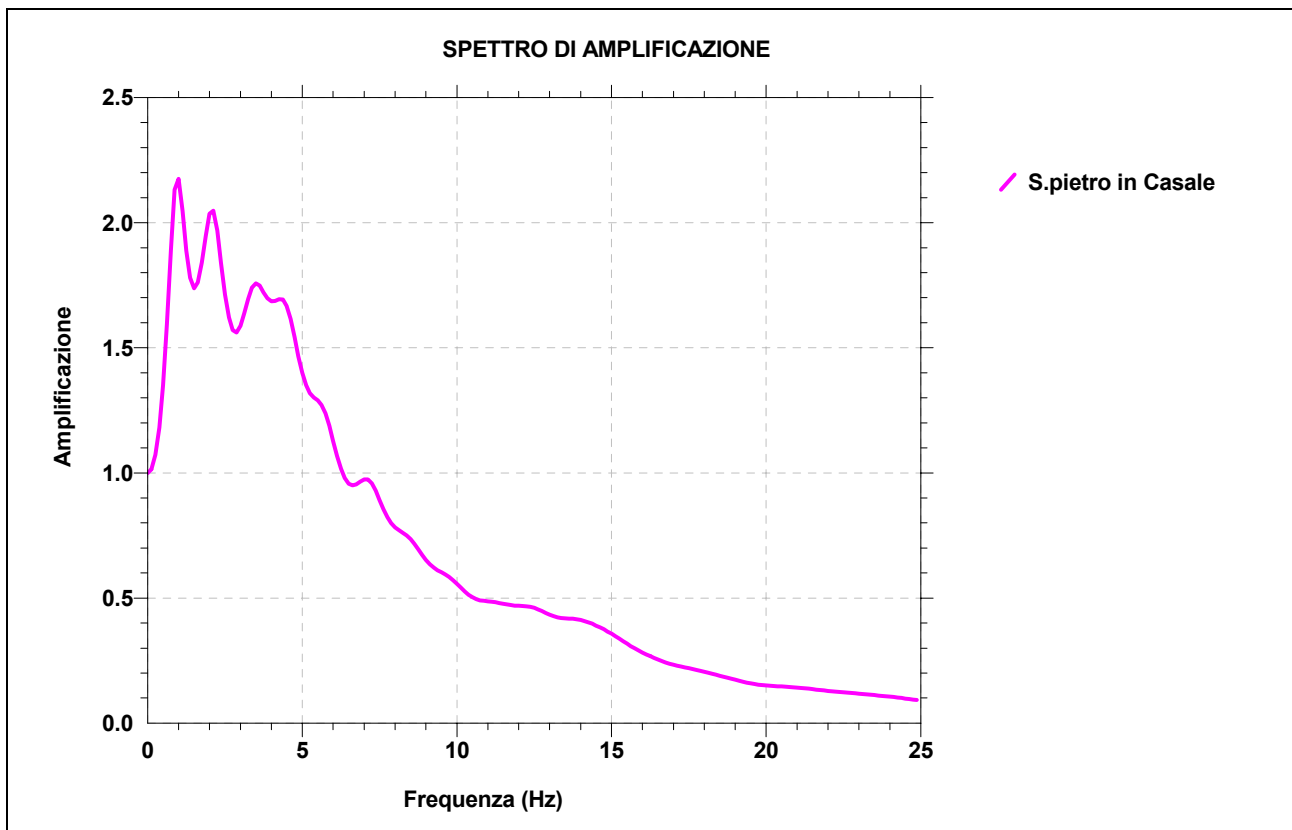


Figura 4.4b Funzione di trasferimento del moto oscillatorio del sisma lungo tutta la colonna litologica tipo

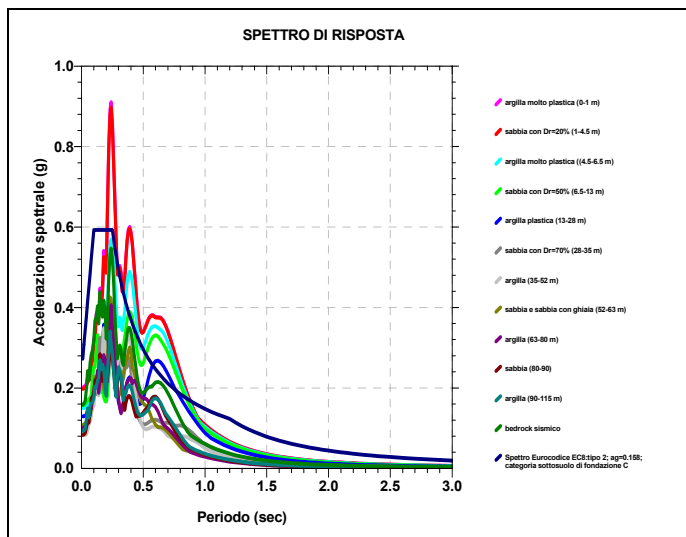


Figura 4.4c Spettro di risposta relativo alla pseudoaccelerazione PSA, confronto con spettro Eurocodice EC-8- INPUT 000046

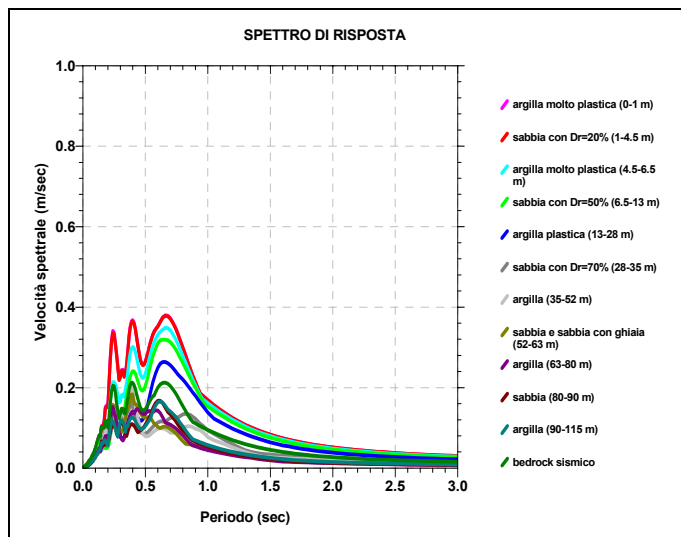


Figura 4.4d Spettro di risposta relativo alla pseudovelocità PSV- INPUT 000046

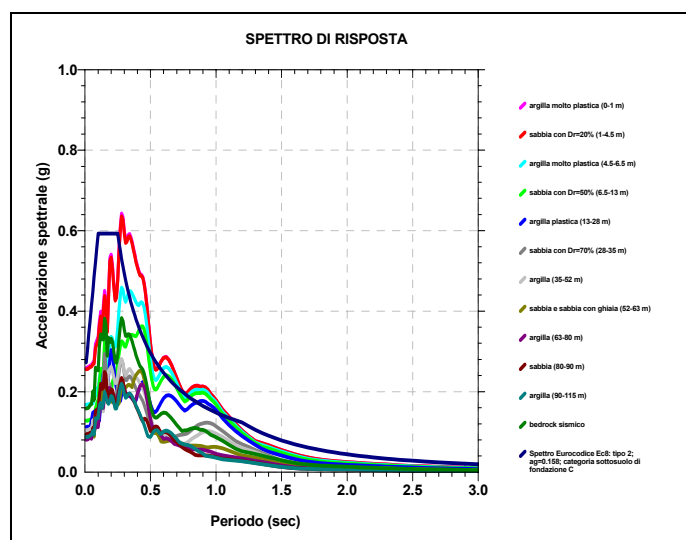


Figura 4.4e Spettro di risposta relativo alla pseudoaccelerazione PSA, confronto con spettro Eurocodice EC-8- INPUT 000126

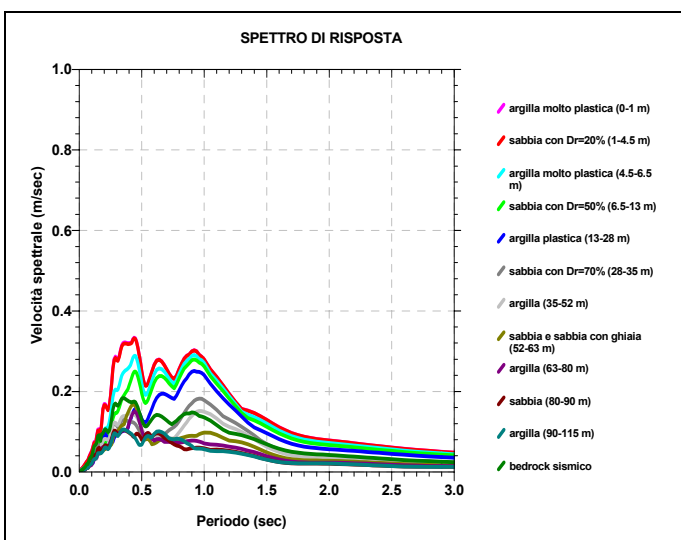


Figura 4.4f Spettro di risposta relativo alla pseudovelocità PSV- INPUT 000126

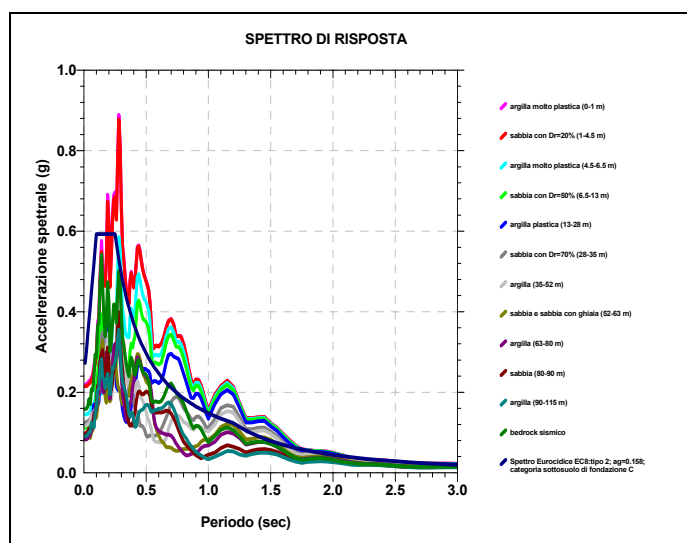


Figura 4.4g Spettro di risposta relativo alla pseudoaccelerazione PSA, confronto con spettro Eurocodice EC-8- INPUT 000354

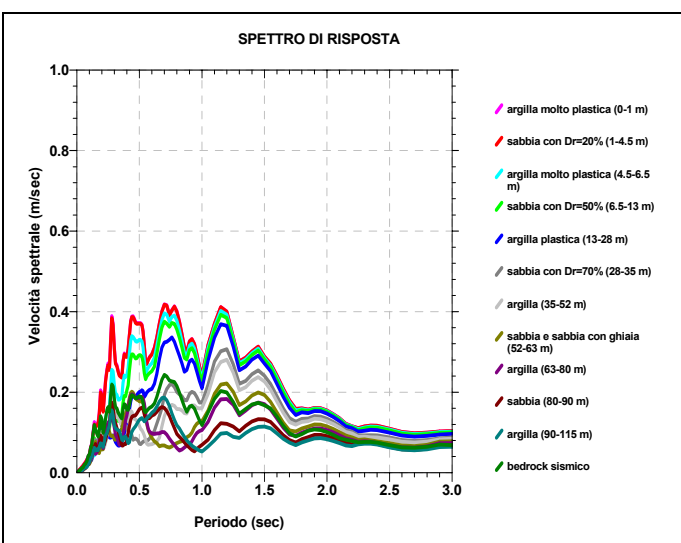


Figura 4.4h Spettro di risposta relativo alla pseudovelocità PSV- INPUT 000354

Modello 2

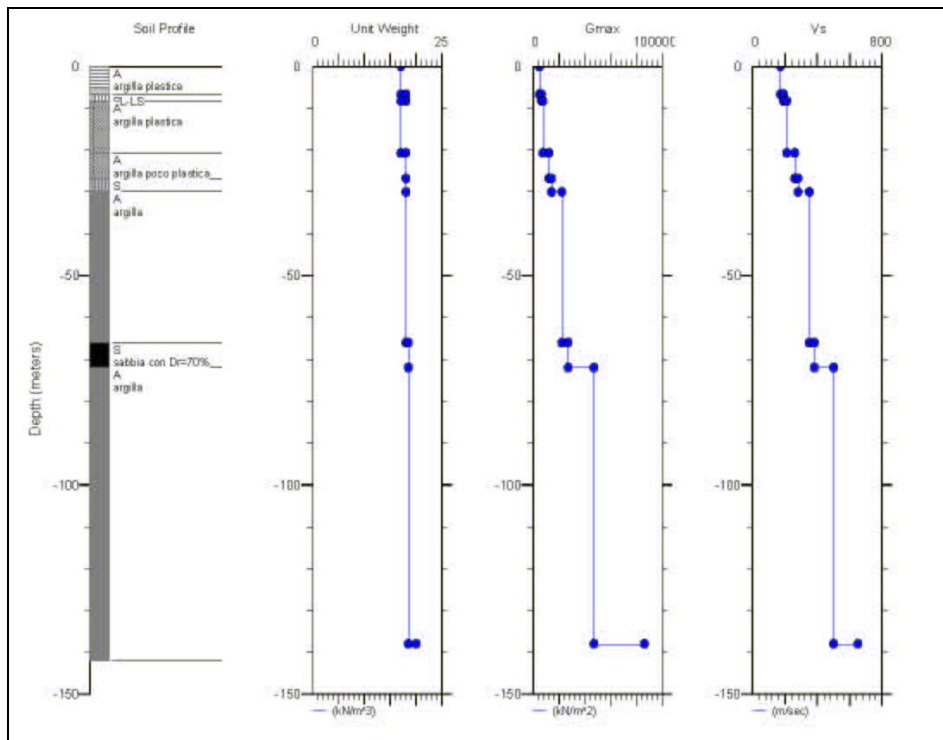


Figura 4.5a stratigrafia di riferimento schematica utilizzata per la modellizzazione sismica

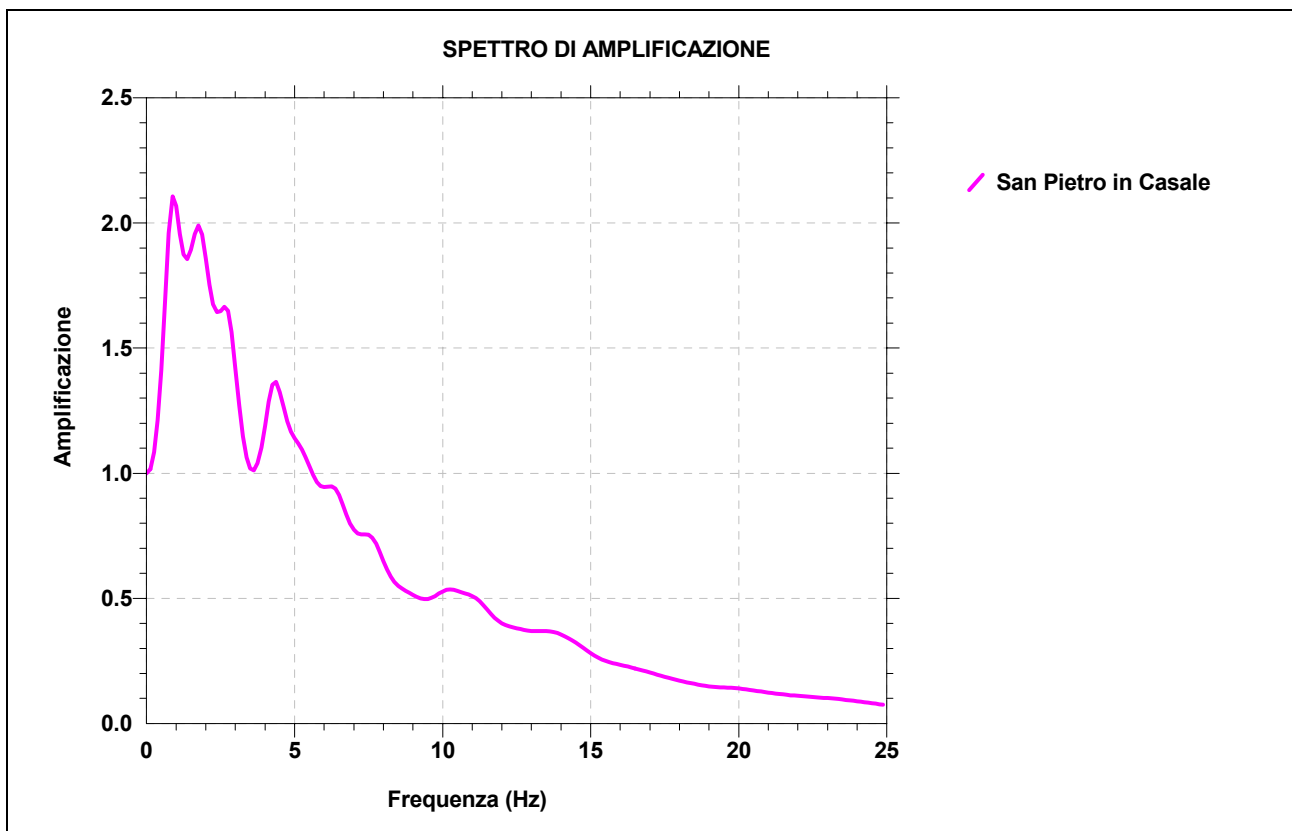


Figura 4.5b Funzione di trasferimento del moto oscillatorio del sisma lungo tutta la colonna litologica tipo

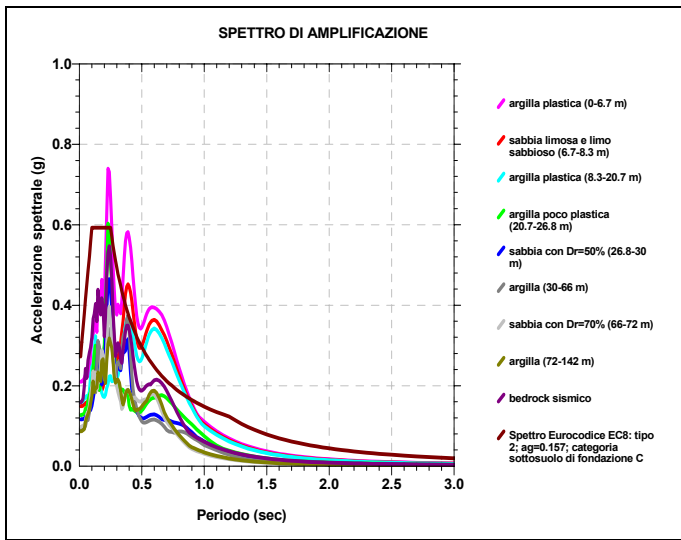


Figura 4.5c Spettro di risposta relativo alla pseudoaccelerazione PSA, confronto con spettro Eurocodice EC-8- INPUT 000046

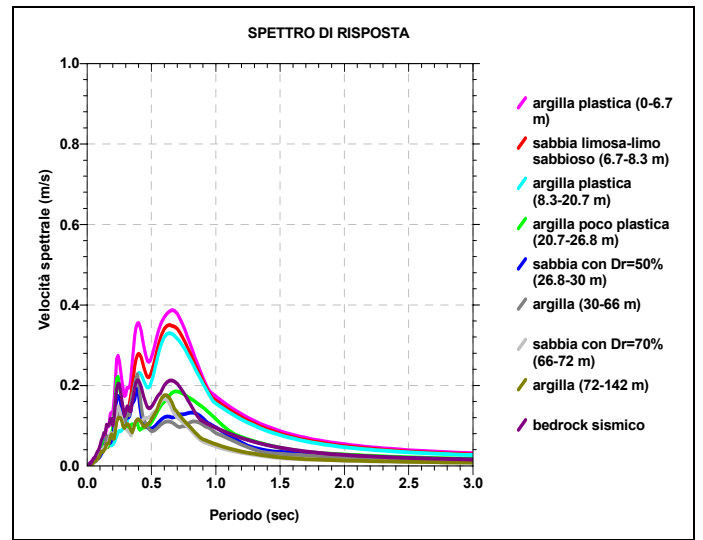


Figura 4.5d Spettro di risposta relativo alla pseudovelocità PSV- INPUT 000046

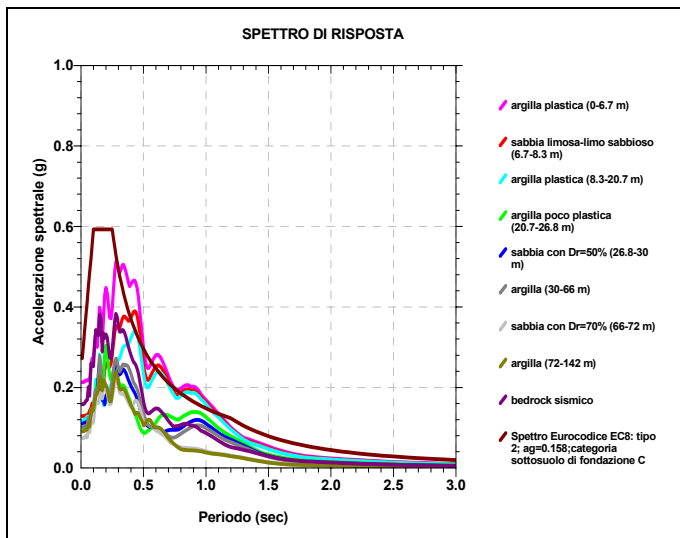


Figura 4.5e Spettro di risposta relativo alla pseudoaccelerazione PSA, confronto con spettro Eurocodice EC-8- INPUT 000126

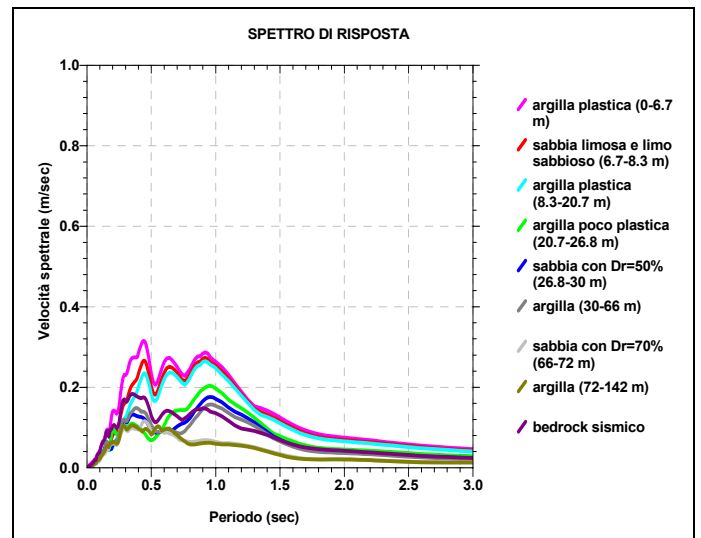


Figura 4.5f Spettro di risposta relativo alla pseudovelocità PSV- INPUT 000126

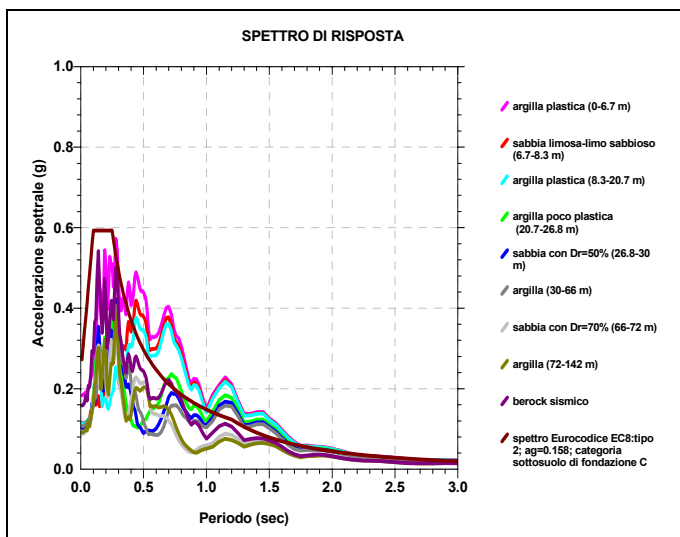


Figura 4.5g Spettro di risposta relativo alla pseudoaccelerazione PSA, confronto con spettro Eurocodice EC-8- INPUT 000354

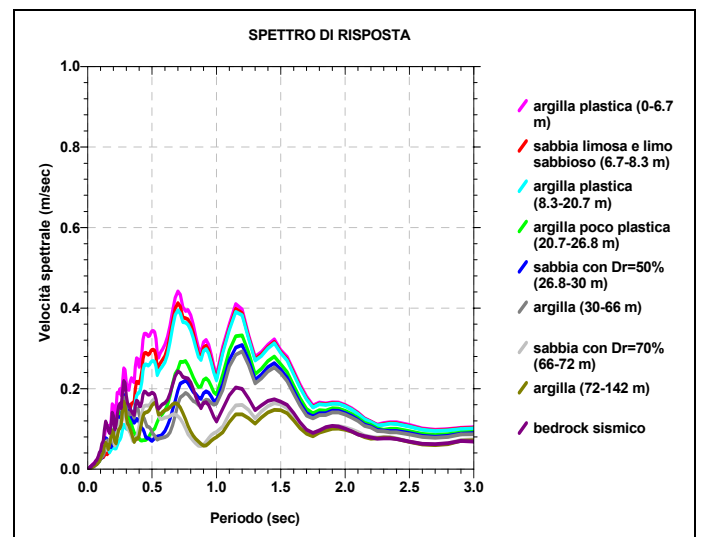


Figura 4.5h Spettro di risposta relativo alla pseudovelocità PSV- INPUT 000354

4.4.2 Elaborazione dell' amplificazione

La seconda fase di elaborazione permette di ottenere tre differenti "spettri di risposta", ognuno dei quali descrive il diverso comportamento relativo ad ogni singolo strato della colonna litologica tipo, rispetto all'input sismico utilizzato. Questi "spettri" vengono ripresi nell'ambito della progettazione per la verifica sismica delle strutture.

Dall'implementazione del modello all'interno del codice di calcolo, si ottengono diverse informazioni relative ad alcuni parametri fondamentali quali: pseudoaccelerazione spettrale (PSA), pseudovelocità spettrale (PSV), fattore di amplificazione (FA).

- Il primo spettro ottenuto riguarda la PSA. Nelle figure 4.4c, 4.4e, 4.4g, 4.5c, 4.5e, 4.5g, viene mostrato il comportamento dell'accelerazione spettrale attraverso i diversi strati che compongono la colonna litologica tipo, utilizzata nella modellizzazione per diversi valori di periodo, da 0 a 3 secondi (valori equiparabili ad edifici di varia altezza da un piano a torri molto alte).

L'andamento dell'accelerazione è stato confrontato con lo spettro di risposta fornito dall'EC-8, scalato per il Comune di San Pietro in Casale, ottenuto implementando la magnitudo ($M=5,5$), e la categoria di suolo di fondazione C, ed $a_g = 0,158g$.

- Il secondo spettro ottenuto riguarda la PSV, ossia la pseudovelocità (figure 4.4d, 4.4f, 4.4h, 4.5d, 4.5f, 4.5h). Questo mostra il comportamento della velocità spettrale, in funzione del periodo compreso tra 0 e 3 secondi, nei diversi layers della colonna litologica, in base all'input sismico applicato.

I risultati di questa analisi sono utilizzabili per il calcolo del fattore SI, *Intensità spettrale di Housner* richiesto nel terzo livello di caratterizzazione (Delibera regionale n 112/2007). L'intensità di Housner-SI è un indicatore della pericolosità sismica ed è definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità in un intervallo prefissato di frequenze. Questa grandezza è direttamente correlabile all'energia che viene dissipata nelle strutture durante un terremoto, e quindi espressione del possibile grado di danneggiamento subito dagli edifici.

- Il terzo spettro ottenuto riguarda l'amplificazione locale (figure 4.4b e 4.5b). Per amplificazione si intende il rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione su affioramento rigido ($a_{max,r}$) e la massima ampiezza dell'accelerazione alla superficie del deposito ($a_{max,s}$) alla frequenza "f".

Il fattore di amplificazione dipende dalla frequenza di eccitazione armonica, dal fattore di smorzamento D e dal rapporto tra l'impedenza sismica, prodotto tra densità-velocità, della roccia base e quella del deposito. La variazione del fattore di amplificazione con la frequenza definisce la funzione di amplificazione $A(f)$ del deposito.

Il moto sismico può essere amplificato in corrispondenza di determinate frequenze, corrispondenti alle frequenze naturali f_n di vibrazione del deposito, e molto importante risulta la prima frequenza naturale di vibrazione f_1 denominata frequenza fondamentale, in corrispondenza della quale la funzione di amplificazione assume un valore massimo.

Dalle funzioni di amplificazione ricavate dalle elaborazioni risulta che la frequenza fondamentale assume un valore locale di 1 Hz.

Le frequenze naturali relative al “Modello 1” individuate sono (figura 4.4b):

Frequenze [Hz]	Periodi [secondi]	Fattori di Amplificazione
1	1	2.15
2	0,5	2,05
3,5	0,28	1.75

Le frequenze naturali relative al “Modello 2” individuate sono (figura 4.5b):

Frequenze [Hz]	Periodi [secondi]	Fattori di Amplificazione
1	1	2.1
2	0,5	2.0
4,5	0,22	1.4

Ovviamente nelle verifiche da realizzare con i POC/PUA occorrerà appurare o verificare in modo più puntuale:

- la reale continuità delle situazioni stratigrafiche di sottosottosuolo considerate con prove dirette, almeno fino a 30 metri di profondità;
- la distribuzione verticale delle Vs e la loro variazione orizzontale, anche modificando di conseguenza la categoria di sottosuolo di fondazione;
- l'eventuale presenza di sabbie di potenza superiore al metro nei primi 15 metri di sottosuolo, la cui curva granulometrica rientri nella zona della liquefazione;
- la profondità del bedrock sismico e l'eventuale sua variazione con indagini dirette o indirette (geofisica).

4.5 Verifiche della suscettibilità alla liquefazione con prove in sito

Questa verifica, assai delicata da compiere alla scala territoriale, richiede la stima: del "fattore scatenante" (evento sismico atteso), dei "fattori predisponenti" (caratteristiche meccaniche dei sedimenti) e dei possibili "effetti" sulle strutture esistenti o di progetto.

Le caratteristiche dell'evento sismico atteso sono: magnitudo (M) = 5,5, accelerazione a_g (0,158g). I fattori predisponenti sono riassumibili nella categoria di sottosuolo di fondazione "C", e nel potenziale di liquefazione dei sedimenti saturi. Le caratteristiche del sottosuolo sono state studiate entro alcune delle aree indicate nel PSC, che costituiranno i futuri POC/PUA.

Le misure di resistenza alla punta normalizzate, ottenute dalle prove penetrometriche CPTU, consentono di ottenere indirettamente una prima stima della possibile liquefazione dei sedimenti saturi sottoposti ad impulsi ciclici. Per questa stima si è ricorsi alle proiezioni logaritmiche di Robertson (1996) e di Olsen, Koester & Hynes (1996): gli esiti ottenuti dalla punta strumentata, durante la penetrazione nel sedimento, sono proiettati nel diagramma che integra i logaritmi dei valori di "Qc", con i logaritmi dei valori della "Fr".

I digrammi delle figure 4.6a, 4.6b, 4.6c, forniscono una prima stima della liquefacibilità, rappresentano l'esito della proiezione ottenuta dai dati meccanici numerici delle penetrometrie che hanno attraversato sabbie sature nei primi 15 metri di sottosuolo (una serie di numeri ogni 2 cm di avanzamento). Le CPTE/U di archivio, purtroppo, sono solamente in formato cartaceo, questi dati non sono dunque utilizzabili per le elaborazioni ed analisi numeriche. La CPTU1 non presenta livelli sabbiosi significativi nell'intervallo saturo interessante (primi 15 metri) ed è stata pertanto esclusa dall'analisi.

Considerando che il vettore di trasporto delle sabbie ha certamente conservato nel tempo il medesimo bacino di drenaggio (almeno negli ultimi 10.000 anni) si è ritenuto di stimare la liquefacibilità delle sabbie rinvenute a varie quote nelle 4 penetrometrie effettuate. I risultati indicano la potenziale liquefacibilità per la porzione nord occidentale del Capoluogo (CPTE3, CPTU1b), mentre nelle altre due penetrometrie non si hanno situazioni che possano richiamare condizioni di particolare pericolosità, per la profondità maggiore di 15 metri o per il modesto spessore delle sabbie (CPTU1 e CPTU2).

Nei diagrammi seguenti (figure 4.6a, 4.6b, 4.6c) il colore dei punti plottati è riferito alla profondità dal p.c., il numero di punti per ogni colore indica lo spessore complessivo dell'insieme di intervalli considerati, l'addensamento o la diffusione dei punti colorati nei vari campi fornisce l'immagine dell'uniformità od eterogeneità di comportamento in relazione ai parametri considerati.

Nelle figure, i punti plottati nel primo riquadro a sinistra (Robertson 1996) ricadono in campi identificati con lettere maiuscole:

campo A = liquefazione ciclica possibile, in dipendenza dall'ampiezza e dal tempo del carico ciclico;

campo B = liquefazione improbabile, I_c (Indice di Comportamento) $> 2,6$;

campo C = liquefazione fluida ciclica possibile, in dipendenza dall'ampiezza e dal tempo del carico ciclico, dalla plasticità e sensitività.

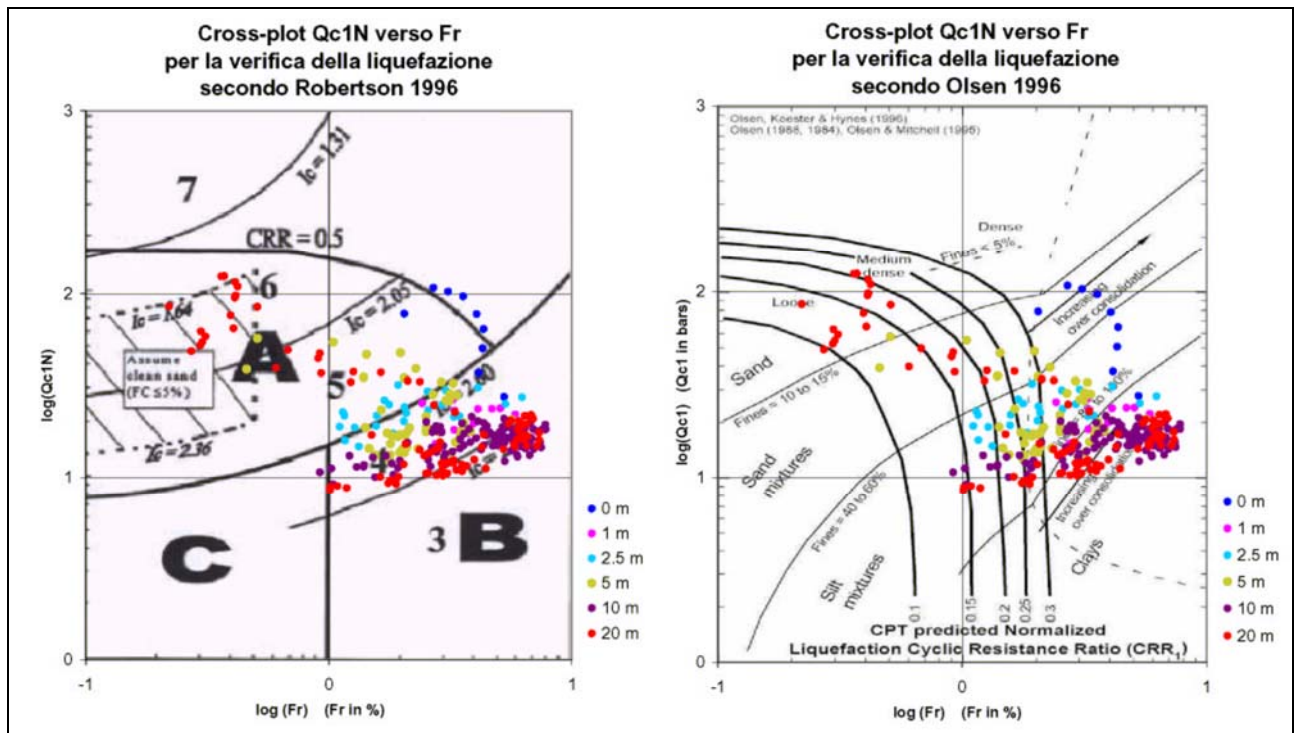


Fig. 4.6a - Proiezione dei dati meccanici relativi alla CPTU2 nei diagrammi di identificazione indiretta della liquefazione e del CRR. I dati rilevati sono riportati in forma numerica nell'allegato CD.

Nel secondo riquadro (Olsen e Mitchell, 1995; Olsen et al, 1996) si possono leggere i valori ricavati per CRR (Cyclic Resistance Ratio), oltre alle tessiture ed al grado di consolidazione dei sedimenti attraversati. L'insieme dei due diagrammi consente di avere una percezione visiva e sintetica delle condizioni di liquefacibilità calcolate per le tre verticali indagate.

Per la CPTU2 si nota che la distribuzione dei punti plottati si concentra nel campo "B" ma che anche il campo "A" contiene numerosi punti rappresentativi di sedimenti posti a profondità maggiori di 20 metri (corrispondenti alle sabbie poste tra 26,80 e 30 m dalla superficie), oppure di sedimenti posti tra 5 e 10 metri (corrispondenti alle sabbie limose tra 6,8 e 8,3 m dalla superficie). In sostanza la CPTU2 contiene alcuni livelli di sabbie liquefacibili che o sono troppo modesti di spessore o sono poste a profondità tali da non destare preoccupazioni per edifici dotati di fondazioni superficiali.

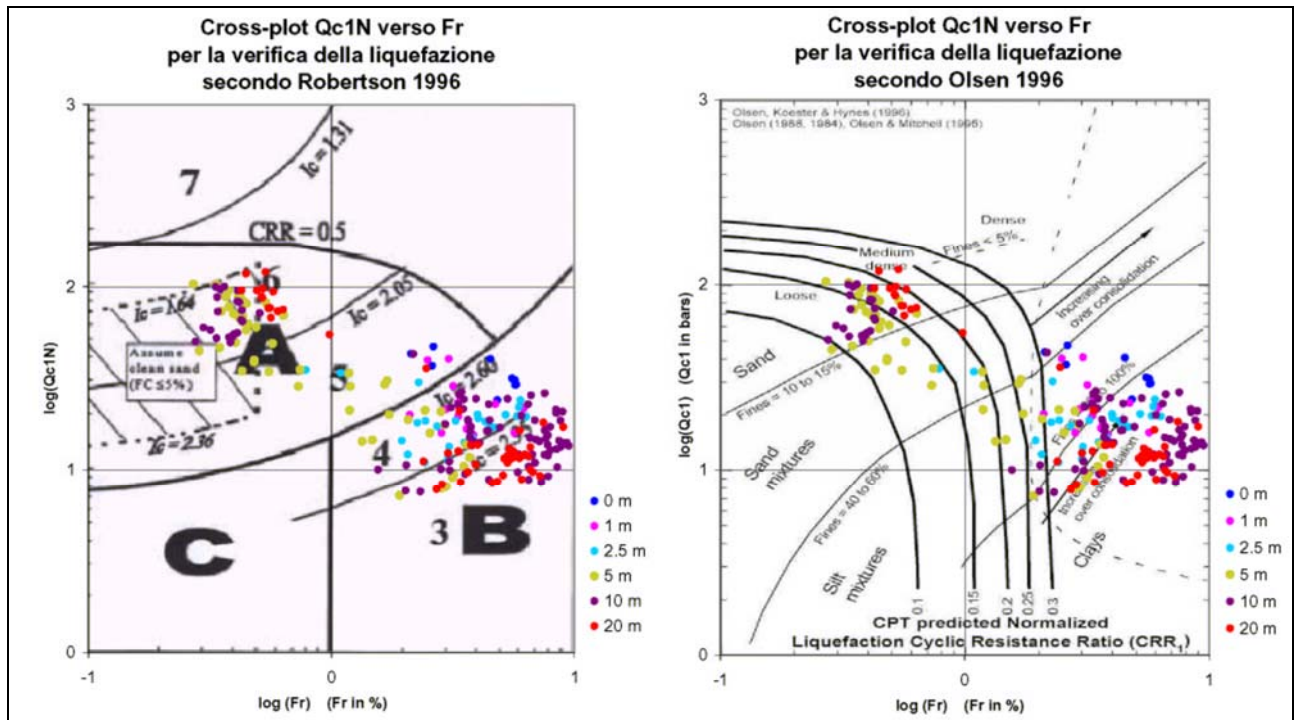


Fig. 4.6b - Proiezione dei dati meccanici relativi alla CPTe3 nei diagrammi di identificazione indiretta della liquefazione e del CRR. I dati rilevati sono riportati in forma numerica nell'allegato CD.

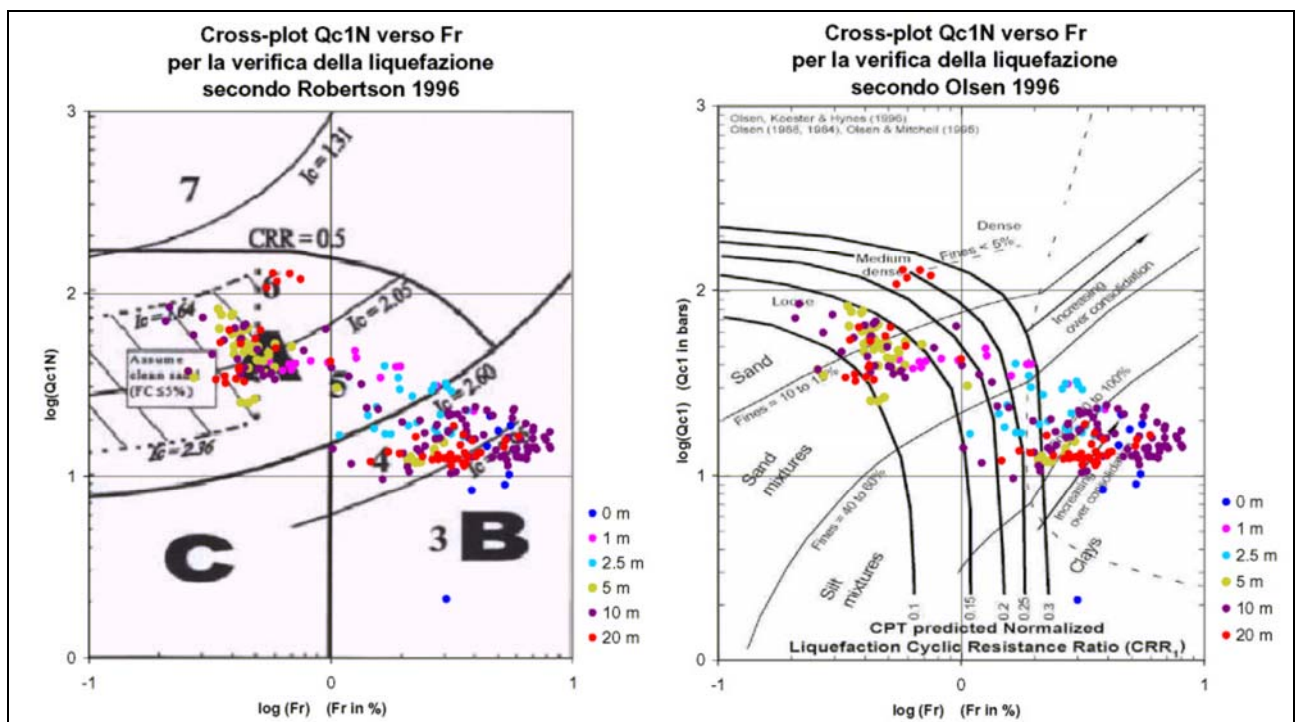


Fig. 4.6c - Proiezione dei dati meccanici relativi alla CPTU1b (Massumatico) nei diagrammi di identificazione indiretta della liquefazione e del CRR. I dati rilevati sono riportati in forma numerica nell'allegato CD.

La figura 4.6b (CPTE3) mostra che i sedimenti liquefacibili sono presenti e distribuiti soprattutto in superficie (corrispondenti alle sabbie tra 7,5 e 12,3 metri di profondità), mentre quelli di quota tra 1 e 4 metri sono in gran parte insaturi. Sono anche plottati alcuni punti rappresentativi di sabbie dense poste attorno alle quote di rifiuto alla penetrazione tra 23 e 25 metri di profondità. Gli effetti di eventuale liquefazione potrebbero risentirsi per strutture con fondazioni di superficie.

Il diagramma di figura 4.6c (CPTU1b) mostra una situazione più chiara della precedente: i sedimenti liquefacibili sono distribuiti soprattutto tra 6,6 e 13,20 metri, e questi strati sono quasi interamente rappresentati nel campo "A". I punti riferiti alle quote maggiori di 20 metri (sabbie tra 23,3 e 25 metri, quota a cui si è avuto il rifiuto alla penetrazione) non destano invece preoccupazioni. Gli effetti di eventuale liquefazione avrebbero effetti da quantificare, su strutture con fondazioni di superficie.

In appendice sono riportati i diagrammi relativi alle prove penetrometriche citate nel testo ed utilizzate per le analisi, nel CD associato al testo sono riportati i valori numerici misurati durante l'esecuzione delle prove ogni 2 centimetri di avanzamento, ed i valori geomeccanici derivati.

In conclusione, l'insieme delle prove e delle analisi effettuate mostra un quadro coerente di risultati, che accerta la complessiva non liquefacibilità dei sedimenti saturi compresi nell'intervallo di 15 metri di profondità dal p.c, sottoposti ad impulsi ciclici sismici per molti degli ambiti proposti. *Solamente gli ambiti a nord ovest del Capoluogo presentano sabbie che potrebbero avere caratteristiche tali da entrare nella zona di liquefacibilità.*

Tutti gli ambiti proposti, in sede di POC e/o di PUA, dovranno comunque essere analizzati anche in riferimento alla presenza di sedimenti granulari liquefacibili, nella consapevolezza che i sismi previsti nella pianura bolognese non dovrebbero superare magnitudo 5,5 e che per queste intensità le prove effettuate su campioni di sabbie, scelti con modalità molto cautelative, hanno mostrato che sismi con magnitudo inferiore a 5,5 non producono effetti di rilievo (vedi PSC di Castel Maggiore e di Argelato).

Infine occorre precisare che anche la distanza dall'epicentro del terremoto costituisce un parametro di stima della liquefacibilità (P. Galli, 2000), e per eventi di magnitudo inferiore a 6 la distanza dalla zona epicentrale per produrre liquefazione deve essere molto modesta, dell'ordine della decina di chilometri.

I sismi attesi nell'area bolognese, con magnitudo massima di 5,5 hanno per lo più epicentro nell'Appennino, nel ferrarese, o nella pianura tra Reggio e Modena. Gli eventi dovuti alla struttura sepolta del ferrarese appaiono già troppo lontani (oltre 12 km) per provocare effetti significativi (in quanto a liquefazione) per il

territorio in esame, la probabilità si verifichino le condizioni di liquefazione delle sabbie sature della pianura bolognese appaiono dunque molto basse.

I dati tuttavia indicano che possono essere presenti alvei del Reno relativamente recenti nel primo sottosottosuolo più francamente sabbiosi. In questi casi, il grado di approssimazione insito sia nei metodi stocastici, che hanno guidato nella classificazione sismica dei Comuni d'Italia, sia nelle prove ed analisi di terreno, è ancora troppo alto per poter garantire ragionevolmente la sicurezza senza procedere ad accertamenti specifici.

5. MICROZONIZZAZIONE E PROPOSTA NORMATIVA

La microzonizzazione, sintesi grafica e geografica delle informazioni raccolte ed elaborate nel presente lavoro, è rappresentata nella Tavola 1 allegata fuori testo. Nelle tavole le zone sono distinte con una sigla alfanumerica che riporta:

- la categoria del sottosuolo di fondazione con una lettera maiuscola,
- la possibilità di liquefazione con numeri romani,
- il fattore di amplificazione locale attribuito con numero arabo.

La categoria di sottosuolo di fondazione riscontrata nel territorio comunale analizzato è "C". Le velocità delle onde di taglio (V_s) derivate dai parametri geomeccanici misurati dalle CPTU-CPTE, quelle derivate dalle analisi geofisiche MASW, e quelle desunte dalle analisi tomografiche, sono molto simili ed uniformi tra loro, ($193 < V_s < 220$ m/s). Tutti gli esiti ottenuti forniscono un quadro di velocità delle onde di taglio omogeneo attorno ai valori che contrassegnano la categoria di suolo "C" in prossimità del limite con la categoria "D".

Questa constatazione supporta la correlabilità delle V_s ai territori circostanti le prove effettuate, e consente di estrapolare anche le conclusioni alle zone densamente urbanizzate del Capoluogo. In appendice sono riportati in forma grafica gli esiti delle analisi.

La zonizzazione si differenzia anche in relazione agli effetti locali legati ai parametri morfologici, ai fattori di amplificazione locale ed infine alla possibilità di liquefazione dei sedimenti saturi.

5.1 Morfologia

Non sono note scarpate di cava entro o in vicinanza delle aree interessate dal PSC, e nelle aree densamente insediate. Il fattore relativo alla morfologia è pertanto pari a 1.

5.2 Liquefazione

La zonizzazione delle aree in cui si sono supposti sedimenti granulari saturi è distinta da apposito retino nella tavola allegata fuori testo, e con numero romano nelle sigle relative alla zonizzazione sismica. Per San Pietro in Casale sono presenti tre categorie di liquefacibilità:

- I – Liquefazione poco probabile*, sono aree in cui la presenza di tessiture granulari è stata verificata, almeno nei primi 10-12 metri. Si tratta di intergalli sabbiosi con abbondante matrice limosa oppure con potenze inferiori al metro.
- II – Possibilità di liquefazione (spessore e tessitura da controllare)*, sono aree in cui la presenza di tessiture granulari è stata verificata, almeno nei primi 10-15 metri. Si tratta di sequenze sabbiose con abbondante matrice limosa ma con potenze comprese tra 1 e 2 metri; e con presenza di strati granulari liquefacibili di modesto spessore. Si dovranno pertanto controllare lo spessore e i fusi granulometrici e la quota piezometrica della falda.
- III – Possibilità di liquefazione con cedimenti da valutare*, a questa categoria corrispondono le aree in cui è rilevata presenza di sabbie sature con potenza compresa tra 2 e 4 metri nei primi 10 – 12 metri dal piano campagna. Oltre a verificare la presenza di sedimenti granulari con spessore superiore a 3 metri, il cui fuso granulometrici dimostri la possibilità di liquefazione, sarà opportuno stimare anche cedimenti differenziali e assoluti, in condizioni cicliche.

In sede di elaborazione dei POC relativi agli ambiti che ricadono nelle varie zone per la liquefazione sarà richiesto di procedere con le analisi fino a determinare le caratteristiche richieste.

In tutte le aree in cui non è codificata la liquefazione (sigle con lettera e numero arabo, senza numero romano) non risultano essere presenti sedimenti liquefacibili per spessori continui superiori al metro, entro i primi 15 metri di profondità. Nella fase di obbligatorio approfondimento per i POC, PUA, o anche nella fase di progettazione di massima, le indagini geognostiche hanno anche il compito di confermare o smentire questo asserto.

5.3 Amplificazione

La più volte citata delibera regionale propone, per la definizione delle amplificazioni locali nei comuni inseriti in terza classe, l'impiego di apposite tabelle riferite a grandi situazioni morfologico - stratigrafiche (secondo livello di analisi). Per l'approccio generale che caratterizza questa fase della pianificazione,

ancora territoriale, si è ritenuto di ricavare le amplificazioni locali dalle V_s utilizzando appunto le tabelle regionali. L'elaborazione dei modelli sismici costituisce solamente una verifica generale utilizzata anche per la formazione della zonizzazione stessa, ma che necessariamente non può avere validità per i singoli ambiti.

La media delle velocità delle onde di taglio S, nei primi trenta metri di sottosuolo, è risultata poco inferiore o poco superiore a 200 m/s in tutte le zone indagate. Stimando il bedrock sismico a quote attorno ai 120 metri si sono assunti i valori relativi alle tabelle <Pianura 2> .

Il "Modello 1" ha fornito:

$$F.A. \text{ di } PGA=2,15$$

a fronte di valori regionali, tratti dalla tabella <Pianura 2> per $V_s = 200$ m/s, pari a:

$$F.A. \text{ di } PGA > 1,5; FA_{0,1s-0,5s} \geq 1,8; FA_{0,5s-1s} \geq 2,5$$

Il "Modello 2" ha fornito:

$$F.A. \text{ di } PGA=2,1$$

a fronte di valori regionali, tratti dalla tabella <Pianura 2> per $V_s = 200$ m/s, pari a:

$$F.A. \text{ di } PGA=1,5; FA_{0,1s-0,5s}=1,8; FA_{0,5s-1s}=2,5$$

Le sigle riportate nella Tavola 1 riflettono la zonizzazione illustrata, e sono:

- **C-1** = sottosuolo di fondazione "C" ($180 < V_{s30} < 360$ m/s), non è nota la presenza di sedimenti liquefacibili sotto impulsi ciclici nei primi 15 metri di sottosuolo; fattori di amplificazione locale $FA \geq 1,8$ per periodi da 0,1 secondi a 0,5 secondi; e $FA \geq 2,5$ per periodi da 0,5 secondi a 1 secondo;
- **C-I-1** = sottosuolo di fondazione "C" ($180 < V_{s30} < 360$ m/s), sono presenti sabbie sature con poca probabilità di provocare fenomeni di liquefazione sotto impulsi ciclici nei primi 15 metri di sottosuolo; fattori di amplificazione locale $FA \geq 1,8$ per periodi da 0,1 secondi a 0,5 secondi; e $FA \geq 2,5$ per periodi da 0,5 secondi a 1 secondo;
- **C-II-2** = sottosuolo di fondazione "C" ($180 < V_{s30} < 360$ m/s) sedimenti in cui è possibile che si verifichi liquefazione sotto impulsi ciclici dotati di magnitudo $\geq 5,5$; fattori di amplificazione locale $F.A. = 1,8$ per periodi da

0.1 secondi a 0.5 secondi; F.A.= 2.5 per periodi da 0.5 secondi a 1 secondo.

- **C-III-1**= sottosuolo di fondazione “C” ($180 < V_{s30} < 360$ m/s), è documentata localmente la presenza di sabbie idonee alla liquefazione sotto impulsi ciclici nei primi 15 metri di sottosottosuolo, è opportuno spingere la verifica fino alla stima di eventuali cedimenti, se verrà verificata la presenza di questi sedimenti; fattori di amplificazione locale F.A.= 1,8 per periodi da 0.1 secondi a 0.5 secondi; F.A.= 2.5 per periodi da 0.5 secondi a 1 secondo.

Si sottolinea che entrambi i modelli forniscono amplificazione PGA più cautelativa di quella ottenuta dalle tabelle regionali, ciò può essere dovuto alla presenza di fattori locali inseriti nei modelli.

5.4 Proposta normativa

Art. 1 – I POC/PUA potranno variare i perimetri ed i parametri delle microzone sismiche riportati nella Tavola 1 del PSC, solamente a seguito di approfondite indagini geognostiche e prospezioni geofisiche, eseguite con adeguata strumentazione.

Art. 2 - I POC ed i PUA dovranno effettuare ricerche di dettaglio finalizzate a definire:

- 1) la profondità del “bedrock sismico” locale, e per un perimetro esterno comprendente le aree già insediate, come stabilito dalle norme del POC. Entro i 60 metri di profondità può costituire “bedrock sismico” lo strato che fornisca un significativo incremento della V_s (maggiore del 40% rispetto allo strato precedente), a partire da 350 m/s. In assenza di un simile strato, il “bedrock sismico” può essere posto alla profondità a cui l’extrapolazione delle V_s note, seguendo il gradiente di incremento, raggiunge i 600 m/s¹;
- 2) le velocità delle onde di taglio V_s almeno per i primi 31 metri dal p.c misurate con strumentazione idonea ad ottenere un grado di definizione elevato;
- 3) la stratigrafia e le tessiture dell’intervallo litologico almeno dei primi 15 m di sottosottosuolo, con verifica dei fusi granulometrici degli strati sabbiosi di potenza superiore al metro. Per l’accurata stima degli effetti

¹ La delibera RER richiede di raggiungere gli 800 m/s, le prove effettuate dimostrano l’impossibilità di ricavare questo esito con profondità credibili (cioè inferiori ai 300 metri).



locali indotti dalla liquefacibilità potrà rivelarsi necessario procedere ad analisi triassiali cicliche a liquefazione;

- 4) le quote piezometriche e le soggiacenze della falda locale.

Art. 3 - La strumentazione di indagine, il numero minimo di prove da effettuare in relazione alla microzonizzazione sismica, e le eventuali maggiori profondità di prospezione, saranno indicate nelle norme di ogni POC o PUA;

Art. 4 - La definizione dei fattori di amplificazione locale (FA) saranno ricavati da apposita modellistica di simulazione sismica secondo le necessità. I criteri di elaborazione ed i dati di ingresso dovranno essere esposti, anche in formato numerico, nella relazione geologica che accompagna ogni comparto di espansione. Pertanto il numero e la qualità delle prove ed indagini geologiche e geofisiche dovranno essere adeguate all'importanza degli interventi, all'ampiezza delle aree di progetto, ed alla possibilità di liquefazione dei sedimenti saturi.