



COMUNE DI CATTOLICA
(Provincia di Rimini)



PIANO OPERATIVO COMUNALE – L.R. 20/2000 e ss.mm.ii. – art. 30

ALLEGATO 5A
RELAZIONE GEOLOGICO - SISMICA

ADOZIONE: Del. C.C. n. 69 del 11/12/2015

APPROVAZIONE: Del. C.C. n..... del

NOVEMBRE 2015



COMUNE DI CATTOLICA
(Provincia di Rimini)

POC 2015

PIANO OPERATIVO COMUNALE – L.R. 20/2000 e ss.mm.ii. – art. 30

ALLEGATO 5A

RELAZIONE GEOLOGICO - SISMICA

ADOZIONE: Del. C.C. n. 69 del 11/12/2015

APPROVAZIONE: Del. C.C. n..... del

Il Sindaco

Piero CECCHINI

L'Assessore all'Urbanistica

Giovanna UBALDUCCI

Il Segretario

Mara MINARDI

Responsabile

Dott. Geol. Samuel Sangiorgi

Comune di Cattolica:

Gilberto FACONDINI (dirigente Urbanistica)

Luca GAMUCCI (Ufficio Pianificazione
Urbanistica)

NOVEMBRE 2015

Indice generale

1	Introduzione.....	2
2	Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento.....	6
2.1	Sorgenti sismogeniche e terremoti di riferimento.....	6
2.2	Ulteriori elementi di pericolosità sismica ai fini della pianificazione territoriale: la DAL regionale n.112/2007.....	13
3	Assetto geologico, geomorfologico e idraulico.....	15
3.1	Caratteristiche litostratigrafiche generali.....	15
3.2	Assetto litologico e strutturale.....	17
3.3	Assetto geomorfologico.....	18
3.4	Assetto idraulico.....	21
4	Dati geotecnici e geofisici.....	23
4.1	Dati pregressi.....	23
4.2	Dati ex novo.....	26
5	Modello di sottosuolo.....	30
6	Interpretazioni e incertezze.....	35
7	Metodologie di elaborazione e risultati.....	37
7.1	Risposta sismica locale di secondo livello	37
7.1.1	I fattori di amplificazione considerati.....	37
7.1.2	Esiti della microzonazione di secondo livello.....	37
7.2	Approfondimenti di terzo livello per l'“Ambito M”: la modellazione numerica di risposta sismica locale.....	42
7.2.1	Aspetti generali.....	42
7.2.2	Il modello numerico “Cattolica 1”.....	46
7.2.3	Il modello numerico “Cattolica 2”.....	51
7.3	Approfondimenti di terzo livello per l'“Ambito M”: le verifiche di liquefazione e dei cedimenti post sisma.....	56
7.3.1	Aspetti generali.....	56
7.3.2	Gli approcci utilizzati per le verifiche di liquefazione e stima dei cedimenti post-sisma.....	58
7.3.3	Esiti delle verifiche di liquefazione e dei cedimenti post-sisma.....	63
8	Elaborati cartografici.....	67
8.1	Carta delle indagini.....	67
8.2	Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica.....	68
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni.....	71
8.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica.....	72
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs).....	77
8.6	Carta di microzonazione sismica livello 2.....	78
8.7	Carta di microzonazione sismica livello 3.....	79
9	Proposta normativa.....	82
10	Bibliografia.....	84

1 Introduzione

Lo Studio scrivente è stato incaricato dell'elaborazione delle analisi geologiche e sismiche per gli interventi inseriti nel POC 2015 del Comune di Cattolica. Tali analisi consistono:

1. nell'illustrazione degli elementi geologici essenziali e utili ai fini delle valutazioni di fattibilità degli interventi;
2. nella redazione di schede di sintesi che riporteranno gli aspetti schematici di caratterizzazione geologica e sismica e in particolare le criticità riscontrate, le prescrizioni in merito agli ulteriori approfondimenti da espletare nelle successive fasi d'attuazione;
3. nella predisposizione di stralci cartografici di caratterizzazione geologico-sismica, di riferimento per gli interventi di POC;
4. nella redazione di una specifica proposta normativa sismica per gli interventi di POC;

A corredo della Relazione, viene fornito un inventario di indagini geognostiche e geofisiche (con grafici dei principali esiti delle prove), che potrà risultare di utilità per i Professionisti incaricati dei successivi studi geologico sismici nelle aree di intervento di POC.

Occorre premettere che il Comune di cattolica (RN) è risultato destinatario dei contributi per gli studi di microzonazione sismica di cui all'OPCM n. 4007/2012 e succ. decreto del 16 marzo 2012 del capo del Dipartimento della Protezione Civile. In tal senso, l'Amministrazione comunale ha affidato allo Studio scrivente l'elaborazione delle analisi di microzonazione sismica di "secondo livello" del territorio urbanizzato e urbanizzabile, con ulteriori approfondimenti di "terzo livello" per quanto riguarda le aree del territorio comunale ricomprese in "Ambito M" della fascia mare e arenile. Allo Studio scrivente è stato inoltre affidato l'incarico di elaborare l'analisi delle Condizioni Limite di Emergenza (da qui in avanti CLE) del territorio comunale.

Il lavoro è stato elaborato secondo i criteri generali dettati nell'OPCM 4007/2012 e secondo i criteri per gli studi di microzonazione sismica riportati negli allegati della deliberazione della Giunta Regionale (Emilia-Romagna) n. 1302 del 10/09/2012. Più nel dettaglio, si evidenzia che l'elaborazione dello studio di microzonazione e la redazione degli elaborati richiesti sono impostati secondo i contenuti tecnici degli <<Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica>> approvati dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle regioni e delle provincie Autonome (di seguito indicate come "ICMS 2008"). Per i depositi e le forme che possono determinare effetti locali si è fatto riferimento agli Allegati della deliberazione dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n. 112 del 2 maggio 2007 (di seguito indicata come "DAL 112/2007").

Occorre rammentare che l'Amministrazione di Cattolica già dispone di una zonizzazione sismica dell'intero territorio comunale, che venne elaborata anche dallo scrivente (Viel & Associati, 2006) a corredo del Quadro Conoscitivo per il Piano Strutturale Comunale (PSC). Tale studio, venne redatto in

un momento in cui erano diffusi solamente documenti preliminari della citata DAL 112/2007 della Regione Emilia-Romagna, pertanto è risultata antecedente e non perfettamente coerente con i contenuti della delibera regionale. Nel Lavoro si è tenuto comunque conto delle analisi espletate nel PSC, aggiornandole sulla base dei contenuti richiesti dalla citata normativa in materia sismica. Sono inoltre disponibili gli ulteriori studi sismici elaborati per il Piano Operativo Comunale (POC) nel 2009 e in particolare questo lavoro ha tenuto conto degli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche allora eseguite. Il Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) della provincia di Rimini ha inoltre elaborato per il suo Quadro Conoscitivo (giugno 2007) uno studio di pericolosità sismica preliminare, individuando alla scala amministrativa di pertinenza le zone suscettibili degli effetti locali. Queste zone sono state cartografate nella Tavola SA.11.1 e SA.11.2 alla scala 1:25.000 consultabili anche on line nel sito della Provincia di Rimini.

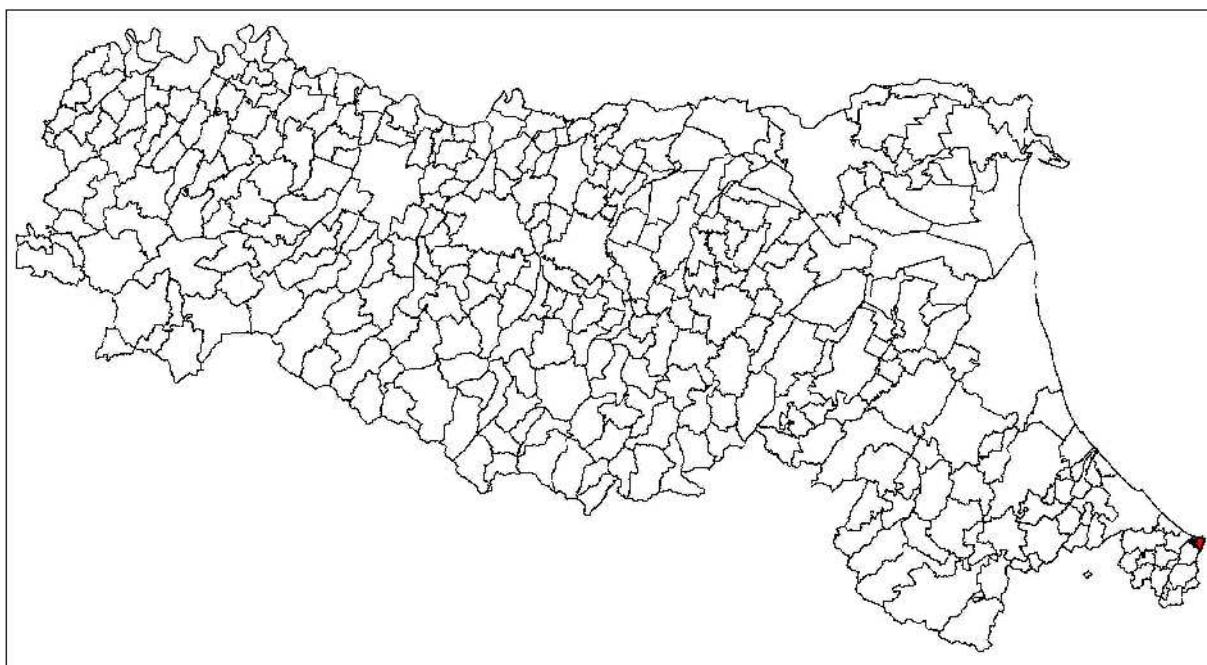


Figura 1.1 – Localizzazione del territorio comunale di Cattolica (evidenziato in rosso) rispetto ai Comuni dell'Emilia-Romagna.

Lo studio di microzonazione si basa infine sugli esiti delle nuove indagini geognostiche e geofisiche espletate per questo lavoro (descritte nei successivi capitoli) e sugli esiti delle indagini pregresse che si sono potute acquisire nel corso del lavoro. In particolare, si è potuto disporre di informazioni geognostiche pregresse recuperate dai seguenti archivi:

- banca dati delle indagini “in situ” predisposta dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (SGSS) della regione Emilia-Romagna e gentilmente messi a disposizione (prove pubblicate relative a penetrometrie, sondaggi, SCPT, Down Hole, sezioni geologiche);
- ufficio Tecnico del Comune di Cattolica (Relazioni Geologiche allegate a istanze di permessi di costruire);
- ufficio di Pianificazione del Comune di Cattolica (Relazioni Geologiche elaborate per la

variante Generale al Piano Regolatore comunale – 1995 - e per ulteriori Varianti specifiche – 1996; 1997 -; Relazioni Geologiche elaborate per il PSC (2006) e per il POC (2009).

La figura 1.1 propone un inquadramento dei limiti comunale di Cattolica rispetto ai Comuni dell'Emilia-Romagna: si tratta di un'Amministrazione rivierasca e di modesta estensione areale (circa 6.080.000 mq), il cui territorio risulta quasi completamente urbanizzato.

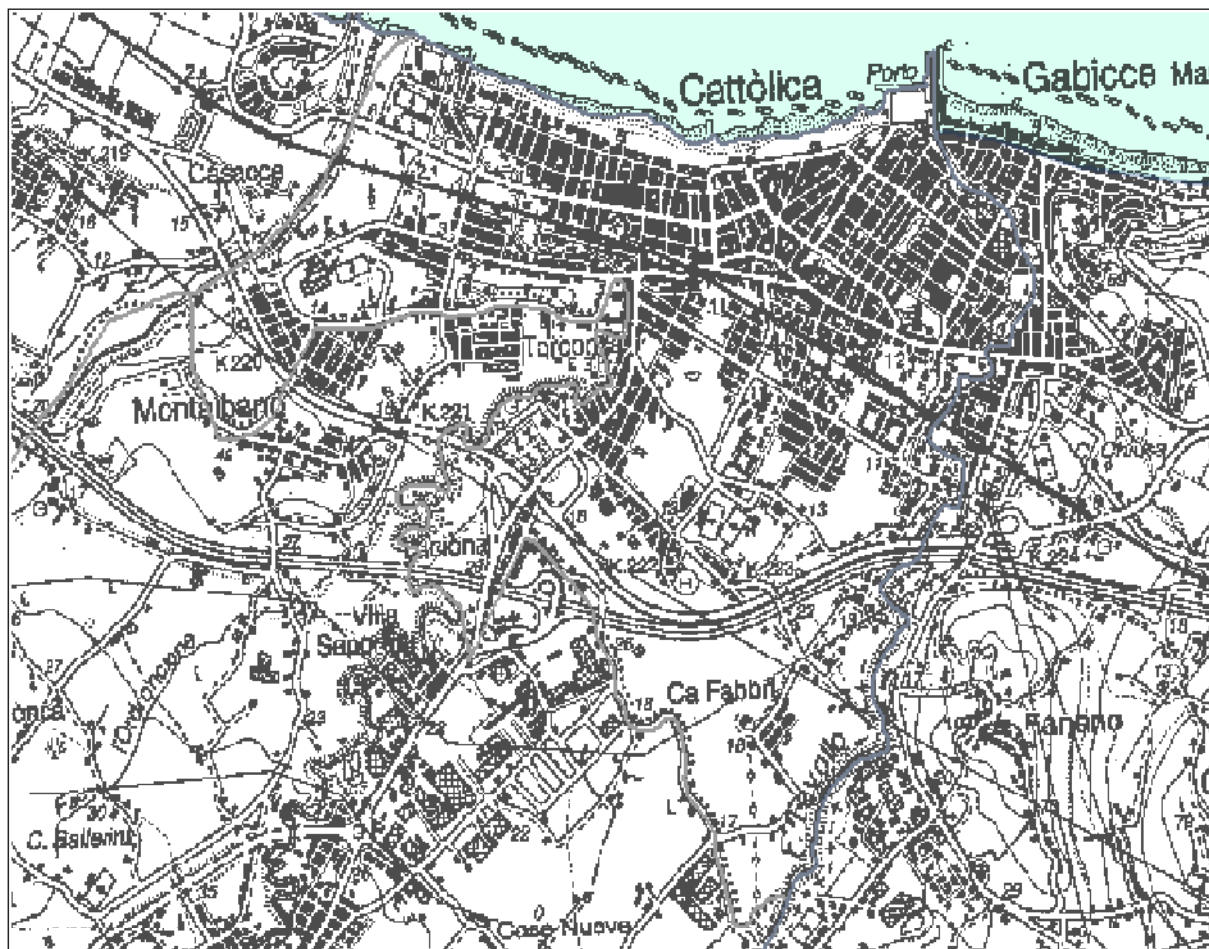


Figura 1.2 – Territorio di Cattolica (stralcio topografia IGM scala 1:50.000). Il limite comunale è riportato in grigio.

Le figure 1.2 e 1.3 propongono invece uno stralcio della cartografia IGM alla scala 1:50.000, sempre relativo al territorio comunale di Cattolica e il perimetro del territorio comunale sovrapposto alle foto aeree (fonte: OrtoAgea, 2011 – Regione Emilia-Romagna).

Per quanto riguarda l'area oggetto degli approfondimenti sismici di "terzo livello" ("Ambito M"), questa è definita nel PSC di Cattolica anche cartograficamente e corrisponde alla <<fascia mare e arenile>>: si tratta di una porzione della zona urbanizzata in ambito costiero e sulla quale insistono numerosi edifici alberghieri.

La figura 1.4 riporta il perimetro dell'"Ambito M" sulla base topografica di riferimento (layer vettoriale comunale). Tale limite, come vedremo, è stato sempre ben riportato nelle cartografie elaborate per lo studio di microzonazione.



Figura 1.3– Territorio di Cattolica (foto aerea: Agea, 2011 – Regione Emilia-Romagna).

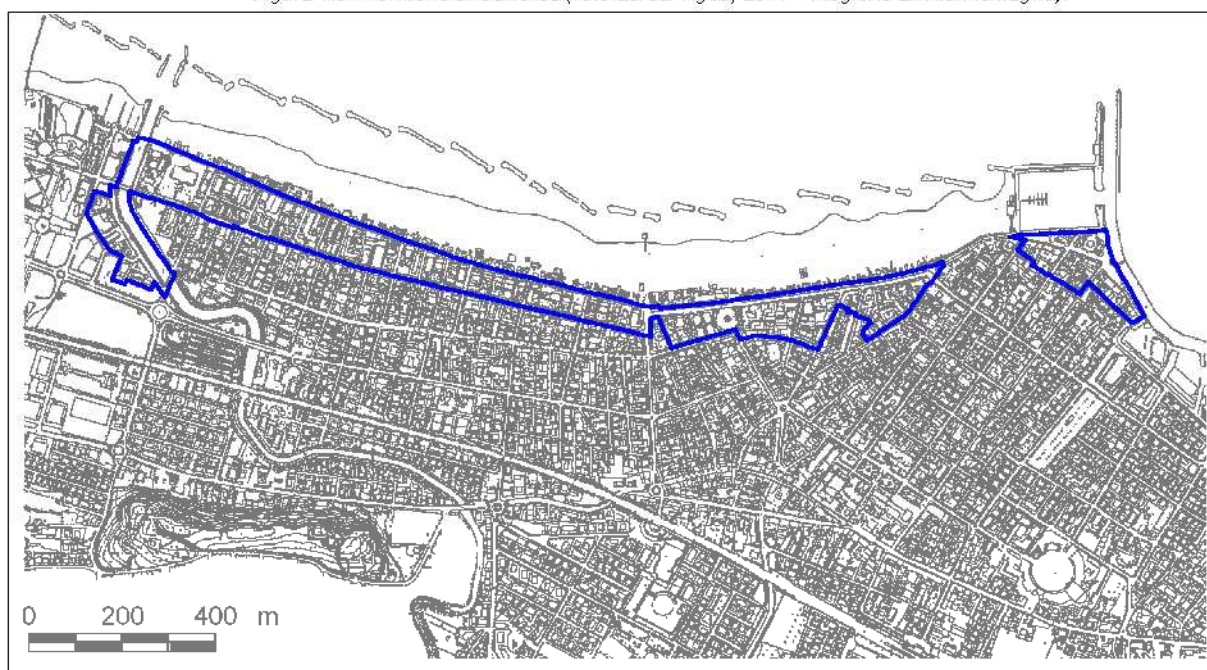


Figura 1.4– Localizzazione dell' "Area Mare" oggetto degli approfondimenti sismici di "terzo livello" (su base cartografica vettoriale elaborata dal Comune).

2 Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento

2.1 Sorgenti sismogeniche e terremoti di riferimento

L'elevata sismicità che caratterizza la penisola italiana è strettamente connessa al suo contesto tettonico-strutturale e quindi alla presenza di strutture geologicamente "attive"¹. Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio vi è dunque l'indispensabile conoscenza della sua storia sismica (cioè di tutte le informazioni sui sismi avvenuti nel passato e della geologia strutturale locale, entrambe strettamente connesse tra loro).

Le evoluzioni scientifiche e tecnologiche susseguitesi in particolare dal 1800 hanno permesso catalogazioni sempre più dettagliate dei terremoti, analisi più raffinate dei meccanismi di innesco e di propagazione dei sismi e una progressiva migliore conoscenza delle zone o delle strutture responsabili della sismicità ("zone" o "sorgenti sismogenetiche") presenti nel territorio italiano.

Recentemente, la Regione Emilia-Romagna, a conclusione di un lungo lavoro iniziato alla fine degli anni '70 del secolo scorso, ha prodotto la <<Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna>>, edita nel 2004 alla scala 1:250.000, che riporta gli epicentri dei terremoti noti con Magnitudo $M > 4$, le strutture attive e quelle potenzialmente sismogenetiche (della catena appenninica, del suo margine e quelle correlate alle strutture del sottosuolo padano-adriatico) ed i relativi meccanismi focali tettonici. La localizzazione degli epicentri si è basata sulla catalogazione nazionale dei terremoti CPTI². La figura 2.1 riporta la sovrapposizione del territorio di Cattolica con la Carta Sismotettonica regionale, mentre la figura 2.2 riporta la cartografia degli epicentri dei terremoti della regione Emilia-Romagna, desunti dal catalogo CPTI e suddivisi per classi di magnitudo.

A livello nazionale si è invece giunti, attraverso varie fasi di studi e revisioni, all'ultima zonazione sismogenica del territorio nazionale, nota con la semplice sigla "ZS9" (2004), prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Questa zonazione rappresenta il più recente riferimento per gli studi di pericolosità sismica del territorio italiano, elaborata riferendosi anche ai più recenti background informativi sui terremoti ed in particolare le ultime banche dati relative alle sorgenti sismogeniche italiane: DISS 2.0³ ed il già citato catalogo CPTI. Il catalogo CPTI, divulgato nel 1999 e frutto del lavoro sinergico di diversi gruppi di ricerca operativi nel settore della sismologia storica e della macrosismica (GNDT, INGV e SSN), rappresenta un catalogo parametrico dei terremoti nel territorio italiano e il primo prodotto comune di riferimento per le stime di "rischio".

¹ La definizione di faglia <<attiva>> è ancora fonte di accese discussioni scientifiche tra i vari Autori, riferendosi alla possibilità di riattivazione in un intervallo temporale che possa interferire con la nostra società: dall'olocenico (circa 12.000 anni, secondo l'U.S. E.P.A., 1981), al "regime tettonico corrente" (Muir Wood & Mallard, 1992)

² <<Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani>> (Gruppo di lavoro CPTI, 1999-2002)

³ <<Database of Potential Sources for Earthquake Larger than $M 5.5$ in Italy>> (Valensise e Pantosti, 2001)

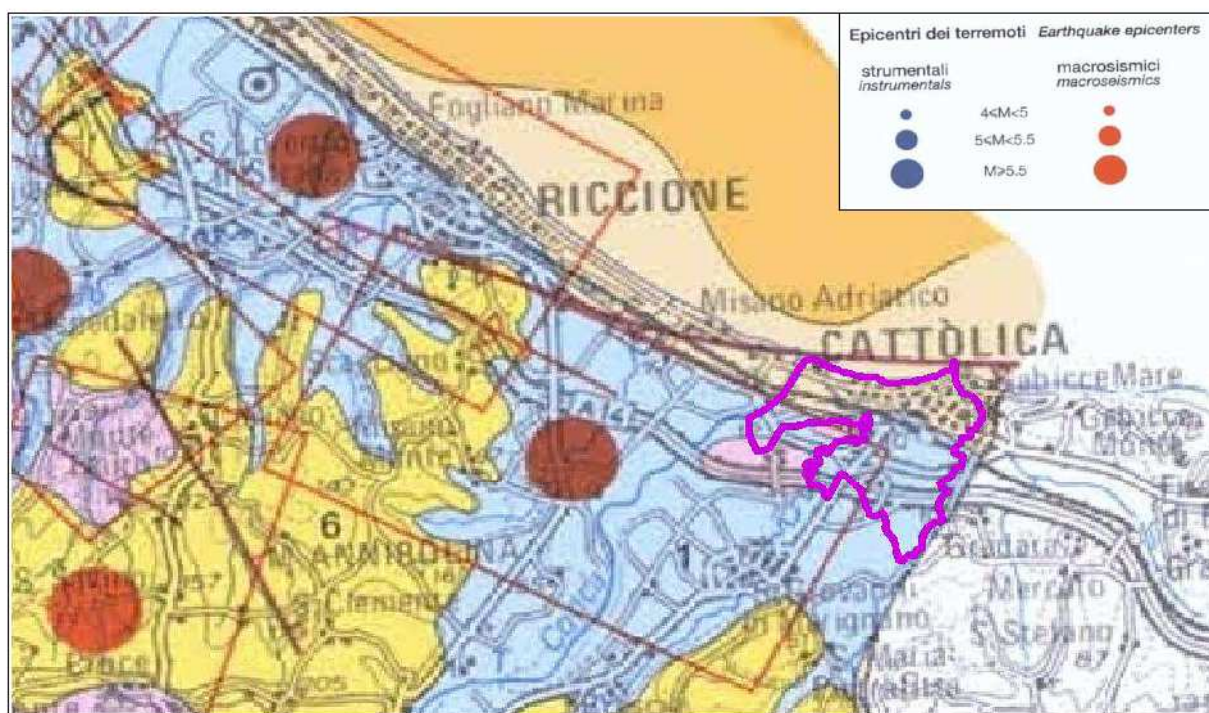


Figura 2.1– Sovrapposizione del territorio comunale di Cattolica con la Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (2004). Si riporta uno stralcio della legenda relativamente alla classificazione degli ipocentri dei terremoti strumentali di $M_w > 4$ e l'epicentro dei più significativi effetti macrosismici. La fonte regionale degli eventi sismici riportati è il catalogo parametrico nazionale dei terremoti storici (CPTI, 1999).

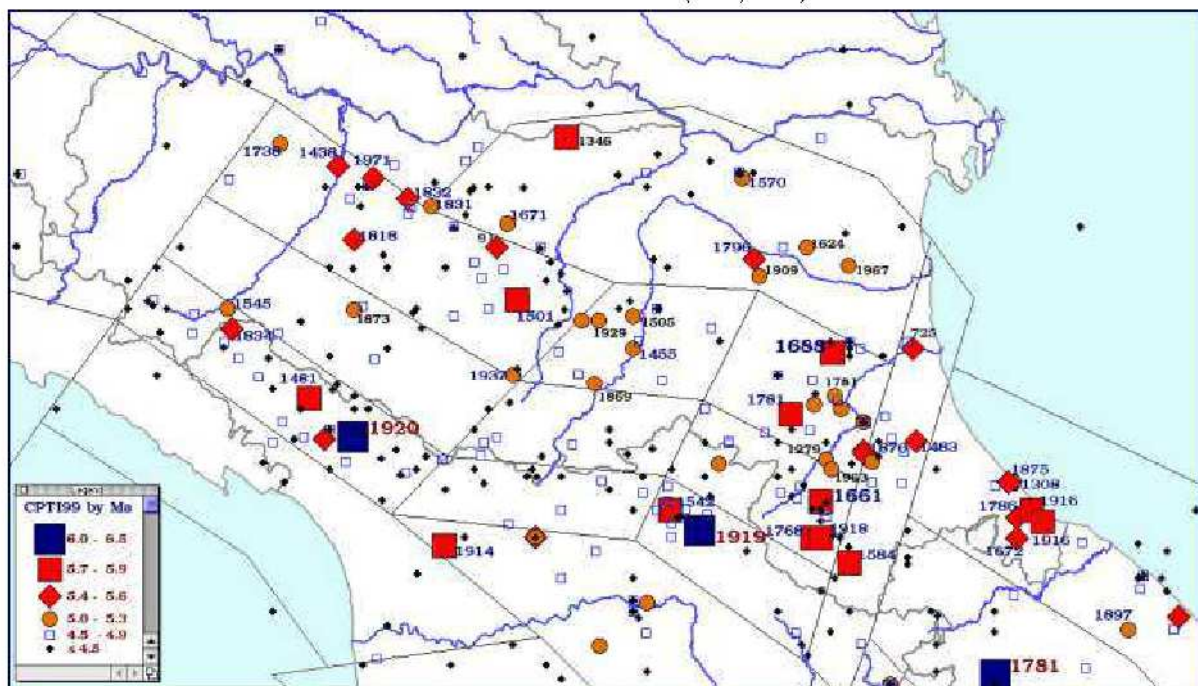


Figura 2.2– Carta degli epicentri dei terremoti (CPTI, 1999) della Regione Emilia-Romagna per classi di magnitudo, estrapolata dal sito del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (SGSS) regionale.

Il catalogo CPTI, pur essendo un prodotto preliminare e in seguito affiancato da una ulteriore versione più aggiornata (2004), costituisce un riferimento fondamentale per le analisi di pericolosità e per le stime di rischio. Il database DISS 3.1 costituisce invece la versione più aggiornata e disponibile di DISS, relativamente alla localizzazione, alla distribuzione e alle informazioni note delle sorgenti

sismogeniche nel contesto italiano nazionale.

La figura 2.3 propone la sovrapposizione del territorio comunale di Cattolica con la zonazione ZS9: l'area di studio ricade nella zona 917, cioè in una delle zone in cui è stato scomposto longitudinalmente l'arco appenninico settentrionale e centrale da Parma fino all'Abruzzo. Questa zona rappresenta (insieme alla zona 912) una porzione più esterna della fascia in compressione dell'arco appenninico settentrionale e include pertanto le sorgenti sismogeniche principali della fascia appenninica esterna, cui è possibile associare la sismicità della costa romagnola e marchigiana (Valensise e Pantosti, 2001), legata al regime tettonico debolmente compressivo in atto, con strutture compressive, prevalentemente "thrust", allineate lungo la costa o a sua breve distanza.

La figura 2.3 offre anche la sovrapposizione con le sorgenti sismogeniche individuate nel database DISS, nella sua versione più aggiornata e disponibile (DISS 3.1). Questo fondamentale database riporta le tre principali sorgenti sismogeniche (contenute nella zona 917 di ZS9) limitrofe all'area di studio:

1. la <<ITCS032 – Pesaro Senigallia>> che attraversa il marchigiano da Ancona a Pesaro e fa parte del contesto tettonico di "thrust onshore" esterno dell'Appennino Umbro-Marchigiano, caratterizzato da un sistema di faglie NE vergente al bordo orientale degli Appennini settentrionali e parallelo alla costa delle Marche. La bibliografia scientifica (Boschi et al., 2000; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al., 2006; Guidoboni et al., 2007) mostra pochi grandi terremoti in questa zona, tra questi gli eventi di Senigallia del 30 ottobre 1930 (Mw 5,9) e del 2 gennaio 1924 (Mw 5,6), e quello del 21 settembre 1897 (Mw 5,5, Adriatico Centrale). L'area inoltre mostra una sismicità intermedia rada ($4,5 < Mw < 5,0$). La magnitudo massima è stata assunta cautelativamente dal sisma di maggiore entità associato alla zona (Mw 6,1). L'attività tettonica in questa zona è dominata da thrust-faults tendenti a NW-SE, immergenti a SW che controllano le pieghe blande e le deformazioni superficiali (in sintesi, vedi Vannoli et al., 2004 ed i riferimenti ivi), divisi da strutture trasversali NE-SW tendenti che possono fungere da segmenti di frontiera fra sorgenti sismogeniche. Sebbene ci sia un certo dibattito nella letteratura riguardo al regime tettonico corrente dell'area, varie prove suggeriscono fortemente che la regione stia subendo una compressione NE-SW tendente, di cui fanno parte i meccanismi focali di terremoti lungo il fronte onshore esterno (Frepoli ed Amato, 1997; Pondrelli et al., 2002). Tra gli altri elementi, lo tsunami causato dall'evento di Senigallia del 1930 (Boschi et al., 1997), insieme alle deformazioni del terrazzo e ai drenaggi anomali che apparentemente abbinano il pattern strutturale delle crescenti anticlinali subsuperficiali (vedi Vannoli et al., 2004), suggeriscono che il crescente sistema di faglie sia molto vicino alla costa.

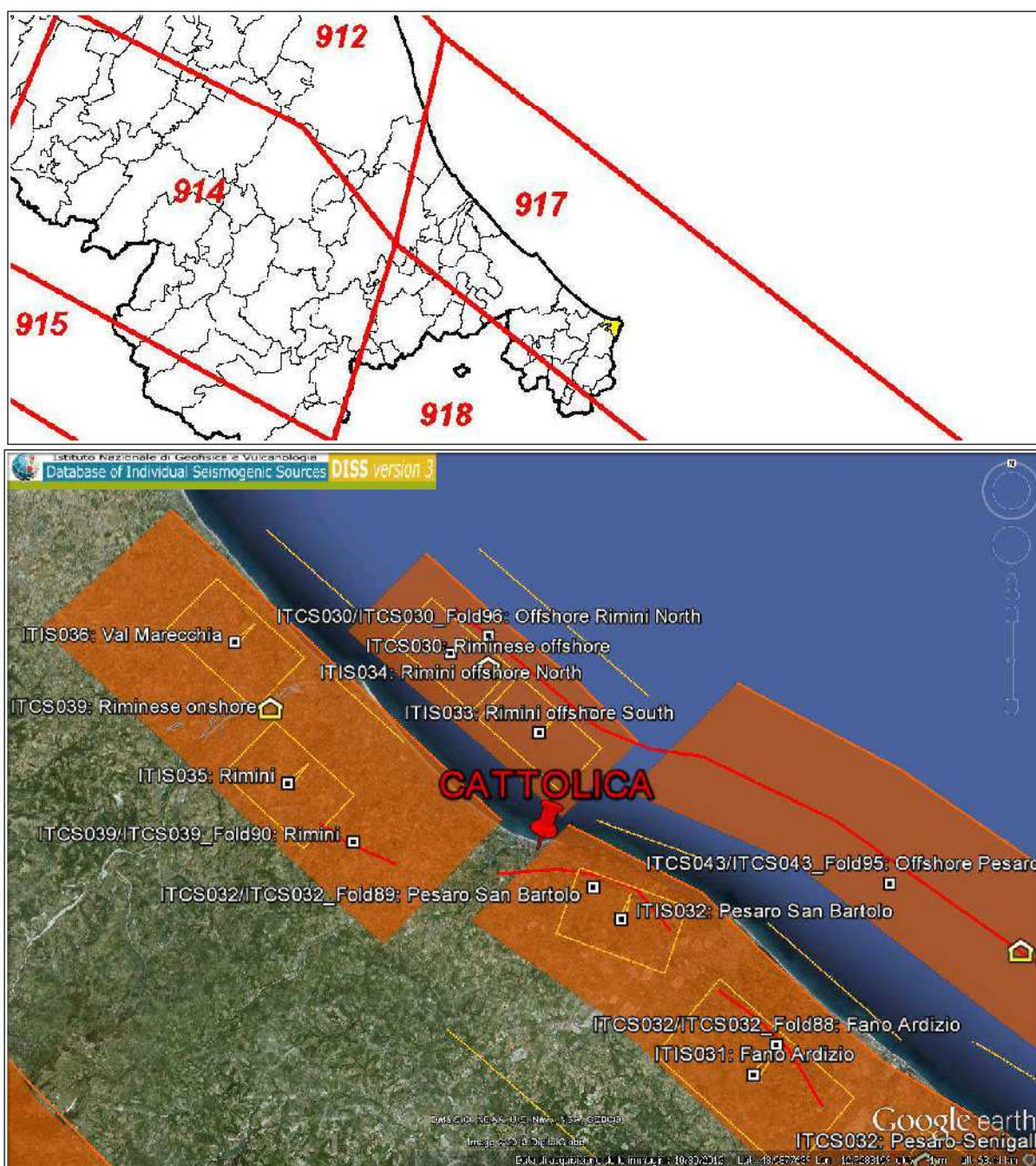


Figura 2.3 - Zonazione sismogenetica ZS9 e distribuzione delle sorgenti sismogenetiche contenute nel database DISS (versione aggiornata 3.1). Foto aerea: Google Earth. Nel database DISS le sigle ITCS corrispondono alle "zone" mentre le sigle ITIS corrispondono alle "sorgenti" sismogenetiche.

La sorgente sismogenetica più prossima al territorio studiato e compresa in questa zona ITCS032 risulta la <<ITIS032 Pesaro – San Bartolo>>. Tale sorgente non ha associati terremoti storici. La sua esistenza e posizione sono suggerite tramite le osservazioni geologiche a scala locale e regionale. L'attività sismogenetica può essere correlata con una "blind thrust-plane" (figura 2.4) che determina la crescita dell'anticlinale costiera dedotta dall'analisi delle caratteristiche geomorfologiche e dalle prospezioni geofisiche. Secondo Vannoli et al. (2004) la sorgente sismogenetica di Pesaro San Bartolo è localizzata tra le valli

dei fiumi Foglia e Conca, pertanto interessa anche il territorio comunale di Cattolica. I terrazzi alluvionali del Foglia e del Conca sembrerebbero leggermente deformati vicino alla costa dove attraversano l'anticlinale costiera. Dato che i terrazzi alluvionali deformati sono geologicamente giovani, essi indicano che i processi di deformazione sono tuttora attivi. La geometria e la larghezza della faglia in profondità si basano sui profili sismici di riflessione forniti da Bally et al. (1986) e da De Donatis et al. (1998). A questa sorgente viene attribuita una magnitudo massima cautelativa pari a $M_w = 5.8$;

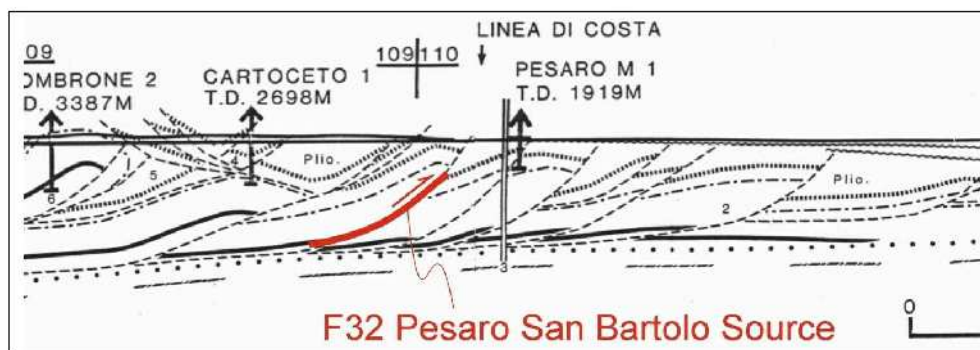


Figura 2.4 – La sorgente "Pesaro San Bartolo" proiettata sulla Sezione Anna-Mte. Amiata (da Bally et al., 1986).

2. la <<ITCS039 Riminese on-shore>> situata fra le Marche e la Romagna, intorno alla città di Rimini. Questa sorgente è costituita da un sistema di faglie NE vergente al bordo orientale degli Appennini settentrionali, parallelo alla costa. La bibliografia scientifica (Boschi et al., 2000; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al., 2006; Guidoboni et al., 2007) mostra numerosi terremoti distruttivi che si sono manifestati nel settore centrale e a sud dell'area. Gli eventi principali sono quelli del 17 maggio ed il doppio terremoto del 16 agosto 1916 (entrambi $M_w 5.9$ nell'Alto Adriatico, i loro epicentri probabilmente si trovano appena al largo questa area), il sisma del 14 aprile 1672 ($M_w 5.6$), gli eventi del 25 dicembre 1786 ($M_w 5.7$) ed i terremoti del 17 marzo 1875 ($M_w 5.7$). L'area inoltre mostra ($4.5 < M_w < 5.0$) una sismicità intermedia rada.

Varie prove suggeriscono che la regione stia subendo una compressione NE-SW, di cui fanno parte i meccanismi focali di terremoto (Frepoli ed Amato, 1997) ed i dati dei pozzi trivellati (Montone et al., 2004) che hanno illustrato un'asse minore di deformazione NW-SE tendente. Sebbene attualmente i dati disponibili siano ancora poco chiari, la fonte sismogenica onshore Riminese può essere pensata come il possibile settore nord del thrust settentrionale delle Marche, per cui la blind thrust-fault è stata riconosciuta come il meccanismo tettonico attivo responsabile della sorgente sismogenica. Due segmenti di questa sorgente sono stati associati ai terremoti del 1786 e del 1875. La magnitudo massima è stata assunta cautelativamente dall'evento sismico di maggiore intensità ($M_w 5.7$).

La sorgente sismogenica più prossima al territorio studiato e compresa in questa zona risulta la <<ITIS035 Rimini>>, correlata con il terremoto riminese del 25 dicembre 1786 (figure 2.5 e 2.6).

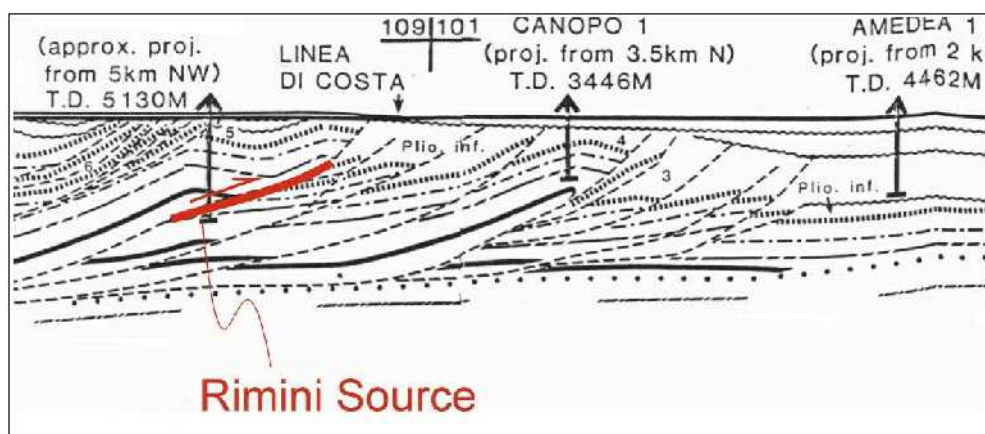
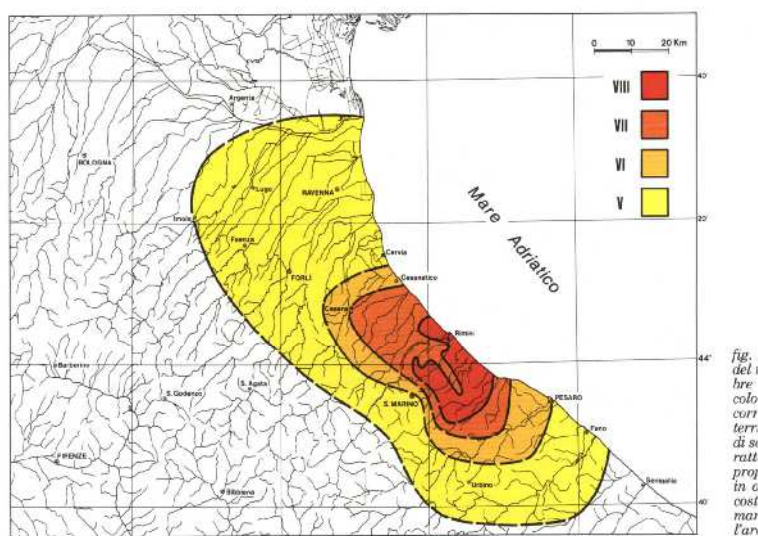


Figura 2.5 – La sorgente “Rimini” proiettata sulla Sezione Amedea-Mte. Amiata (da Bally et al., 1986).

Figura 2.6 – Carta delle isosisme del sisma del 25 dicembre 1786. Si noti la caratteristica propagazione degli effetti in prevalente direzione parallela alla costa (da Ferrari, 1986).



3. la <<ITCS030 Riminese off-shore>> Questa zona attraversa il mare Adriatico subito ad est della città di Rimini ed fa parte del thrust offshore esterno più a sud dell'Appennino Umbro-Marchigiano. Questo fronte è costituito da un sistema di faglie NE vergente al bordo orientale degli Appennini settentrionali, parallelo alla costa delle Marche. La bibliografia (Boschi et al., 2000; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al., 2006; Guidoboni et al., 2007) mostra numerosi terremoti distruttivi sulla terraferma.

L'attività tettonica di questa regione non è ancora documentata adeguatamente: varie analisi suggeriscono che la regione onshore stia subendo una compressione NE-SW tendente, compreso i meccanismi focali di tutti i terremoti lungo il fronte onshore esterno (Frepoli ed Amato, 1997).

I due segmenti principali di questa fonte sono stati associati con i terremoti del 1916 e la magnitudo massima è stata assunta dal sisma di maggiore intensità (Mw 5,7).

La sorgente sismogenica associata a tale zona e più prossima al territorio studiato risulta la <<ITIS033 Rimini offshore south>>, correlata con il terremoto dell'Alto Adriatico del 16 agosto 1916 (Mw = 5,6). Questa sorgente fonte sismogenica è stata correlata con la “blind thrust-

fault” che determina lo sviluppo dell'anticlinale offshore ed è stata individuata da Bally et al. (1986) con le prospezioni geofisiche (figura 2.7).

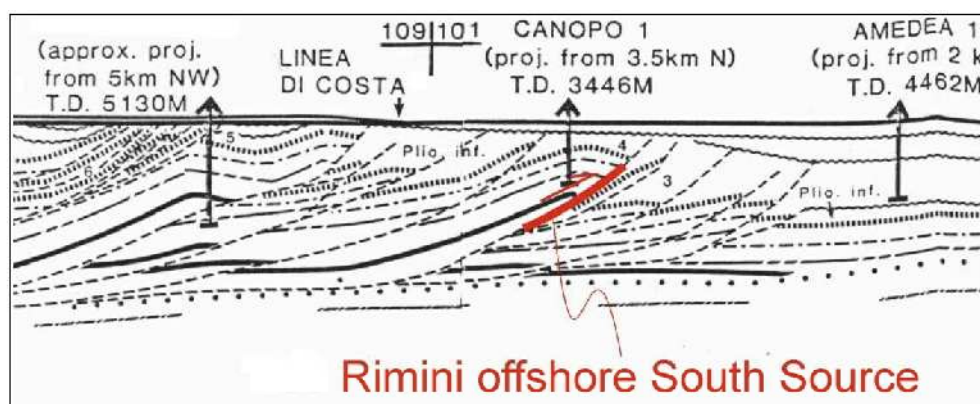


Figura 2.7 – La sorgente “Rimini offshore south” proiettata sulla Sezione Amedea-Mte. Amiata (da Bally et al., 1986).

In conclusione sia gli studi nazionali che quelli regionali attribuiscono al territorio studiato una pericolosità “media”, con terremoti locali moderatamente forti ed epicentri storici che hanno interessato località limitrofe, non direttamente il territorio di Cattolica. In questo senso, la figura 2.8 riporta un grafico della distribuzione temporale dei terremoti più significativi che hanno coinvolto il territorio di Cattolica e la relativa intensità macrosismica stimata sulla base dei danni e degli effetti percepiti nel territorio in questione: le intensità massime stimate raggiungono l'ottavo grado, stimata in particolare per il terremoto già descritto del 1916 (Rimini).

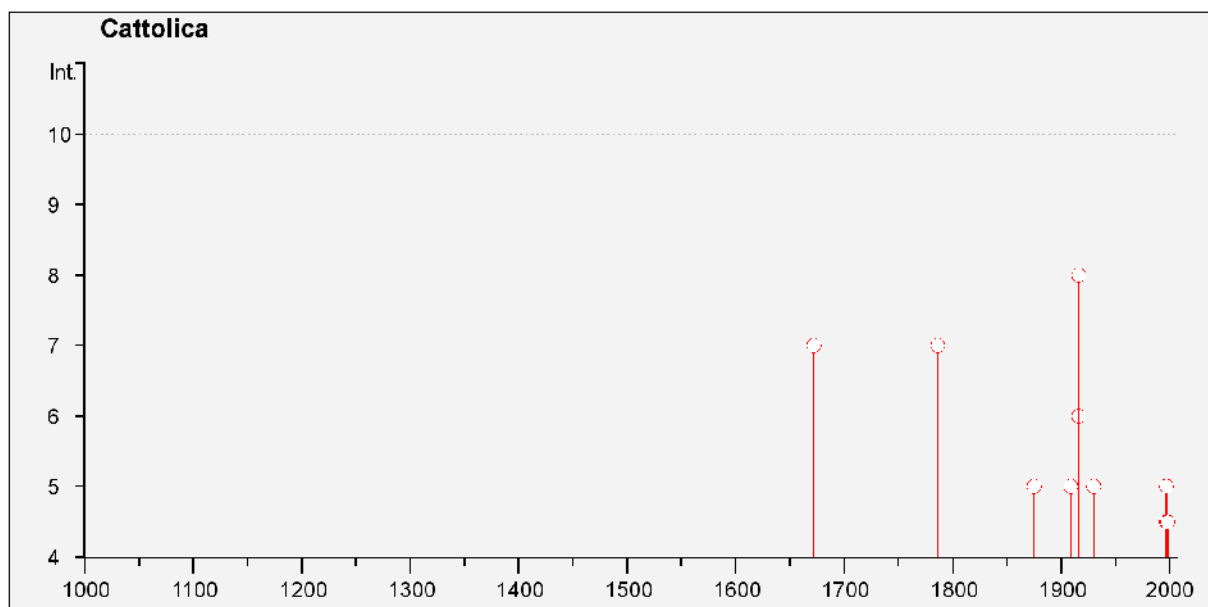


Figura 2.8 – Distribuzione dei terremoti significativi per il Comune di Cattolica e macrointensità stimata (fonte: INGV – Database Macrosismico Italiano 2011).

Tuttavia, considerando che il grado di approssimazione insito nei metodi stocastici che hanno guidato nelle classificazioni sismiche è ancora troppo alto, lo studio di microzonazione sismica ha tenuto conto di un grado di sismicità più cautelativo: per quanto riguarda la stima quantitativa della liquefazione, si è

infatti considerato un terremoto con magnitudo di riferimento pari a $M_w = 6.1$ (equivalente alla magnitudo riferita alla zona sismogenica "ITCS032 Pesaro-Senigallia").

2.2 Ulteriori elementi di pericolosità sismica ai fini della pianificazione territoriale: la DAL regionale n.112/2007

La Regione Emilia-Romagna ha elaborato ed approvato (con Delibera dell'Assemblea Legislativa n.112 del maggio 2007) gli <<Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica>>, in coerenza con la 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 a partire dalla fine degli anni '70 del secolo scorso e assumendo come riferimento, per la pianificazione, la pericolosità di base elaborata da INGV (recepita a livello nazionale dall'OPCM 3519/2006). In questo senso, la delibera fornisce tabelle e formule propedeutiche alla valutazione semplificata (secondo livello) dell'amplificazione locale, dati che tengono conto delle caratteristiche sismiche riscontrate nel contesto regionale.

Il documento fornisce anche i dati fondamentali per valutazioni più accurate della risposta sismica di terzo livello: lo spettro di risposta normalizzato per l'Emilia-Romagna (per $T_r = 475$ anni cioè con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni), riportato in figura 2.9, e i valori di PGA anch'essi normalizzati (riferiti al suolo rigido) per ogni Comune ed i tre accelerogrammi di riferimento, selezionati dalla Banca dati ISESD attraverso una procedura che valuta la similarità tra la forma spettrale di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei segnali.

È così possibile ricavare lo spettro di risposta e gli accelerogrammi di riferimento per ogni Comune riscalandolo lo spettro normalizzato di figura 2.9 con la a_{refg} attribuita allo stesso Comune (figura 2.10). Per il territorio amministrativo di Cattolica, la a_{refg} attribuita dalla Regione Emilia-Romagna risulta pari a 0,183g (vedi Allegato A4 della DAL 112/2007).

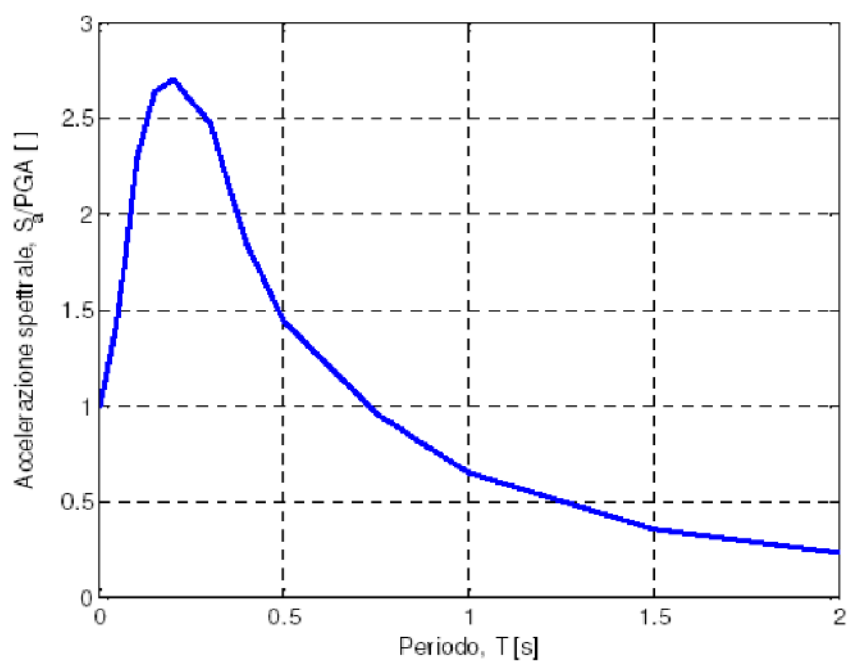


Figura 2.9– Spettro di risposta normalizzato impiegato per la selezione dei segnali di riferimento dalla banca dati accelerometrica ISED.

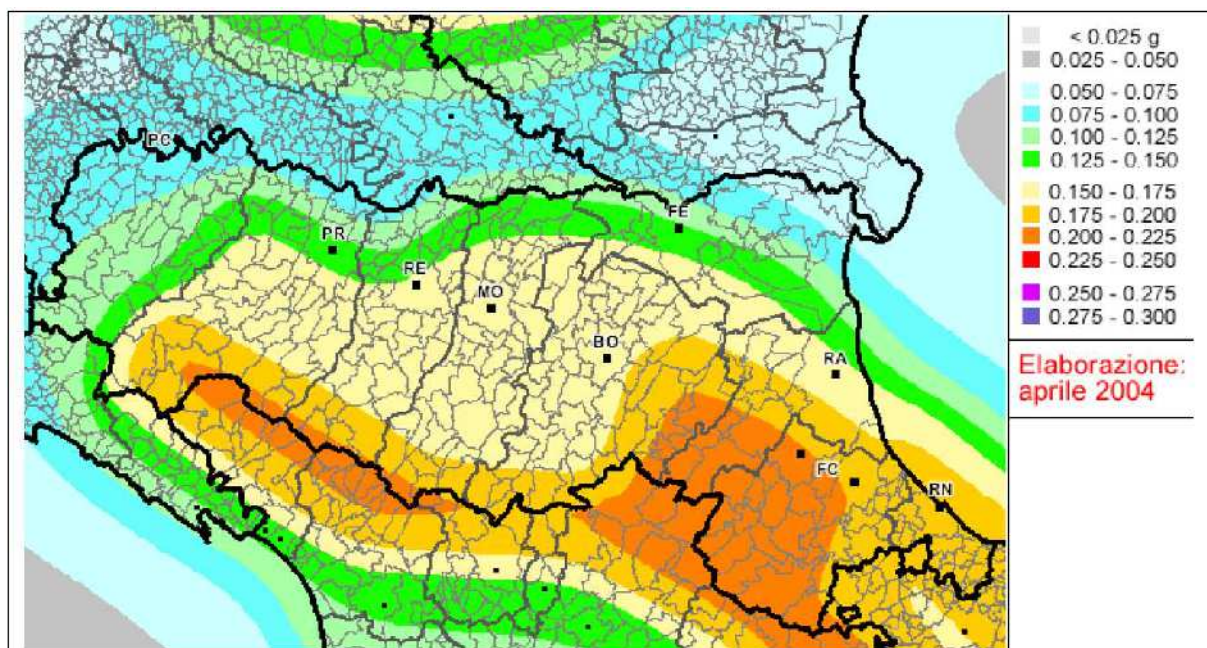


Figura 2.10– Pericolosità sismica di base: valori di PGA al suolo rigido (10% di probabilità di superamento in 50 anni) secondo la OPCM 3519/2006.

3 Assetto geologico, geomorfologico e idraulico

3.1 Caratteristiche litostratigrafiche generali

L'assetto geologico strutturale del territorio del Comune di Cattolica è quello tipico del "margine appenninico", ovvero la zona in cui l'alta pianura degli apparati distributori dei fiumi passa ad un contesto di pianura deposizionale, che in parte del territorio comunale coincide con il mare stesso. Questa zona di passaggio, assai difficile da delimitare e definire oggettivamente, costituisce un importante "tramite" geo-morfologico tra catena e piana costiera: è qui che le valli fluviali ricevono il massimo della portata di deflusso e devono ampliare il loro letto, è al limite estremo di questa zona in cui si formano gli apici dei conoidi (apparati distributori dei sedimenti trasportati dai fiumi), apici che offrono anche il maggior contributo alla ricarica degli acquiferi dell'alta pianura.

La porzione di catena appenninica compresa nel territorio comunale è costituita solamente da due affioramenti ben individuati che emergono appena dai depositi alluvionali e dai sedimenti costieri. Su questi si è impostato parte del lavoro di analisi del sottosuolo e della morfologia che ha costituito la base conoscitiva geologica, a partire dalla Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000. In questo senso, la figura 3.1 riporta uno schema delle unità deposizionali affioranti nel territorio comunale di Cattolica, così come riportate nella citata cartografia geologica regionale.

I sedimenti del substrato marino affioranti, di età compresa tra il Messiniano superiore e il Pleistocene, sono riconducibili a:

1. "Formazione delle Argille Azzurre" (identificata con la sigla "FAA" nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000) → affioranti nella limitata porzione di versante a ridosso di Montalbano (parte SO del Comune, verso l'Autostrada A14, esterna al territorio urbanizzato), si tratta di argille di colore grigio-azzurro con rare intercalazioni di arenarie giallastre in letti da sottili a spessi, e argille marnose e siltose grigie in letti sottili e molto sottili. Sono fossilifere, ricche in foraminiferi e macrofossili, spesso bioturbate, a stratificazione poco marcata. Sono talora diffusi slumps con olistoliti di gesso derivati da unità evaporitiche. Il limite inferiore paraconcordante sulla "Formazione a Colombacci." Depositi di scarpata e base scarpata. Potenza complessiva affiorante di circa 700 m. L'età deposizionale è attribuita al Piacenziano-Gelasiano;
2. Formazione a Colombacci (identificata con la sigla "FCO" nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000) → si tratta di argille, marne e marne argillose, grigie, grigio-scure, verdastre, viola o nere, in strati sottili e medi, con intercalati livelli carbonatici biancastri (colombacci), di spessore variabile, e subordinate siltiti e arenarie grigie medio-fini in sottili strati lenticolari ($A/P < 1/3$), lamine calcaree o calcareo-marnose. Nelle arenarie sono presenti frustoli carboniosi, gusci di Gasteropodi e Lamellibranchi ed evidenze di bioturbazione. Sono state distinte alcune litofacies, sulla base del rapporto arenite/pelite,

intercalate a più livelli all'interno della formazione e che formano dei corpi più o meno lenticolari. È inoltre distinguibile una litofacies prevalentemente arenacea (sigla: FCOa), costituita da alternanze arenaceo-marnose in proporzioni variabili (A/P da 2/1 a 10/1), che costituisce il bedrock affiorante nel rilievo di Monte Vici. Le arenarie, di colore grigio, sono caratterizzate da fitta laminazione piano-parallelata, ondulata e incrociata, in strati medi, più raramente sottili o spessi, di colore grigio alterate in giallo o marrone. Marne e siltiti grigie in strati sottili e molto sottili, raramente medi. Formano corpi lenticolari di 2-40 m distribuiti ad altezze diverse entro FCO. L'età deposizionale è attribuita al Messiniano medio e superiore.

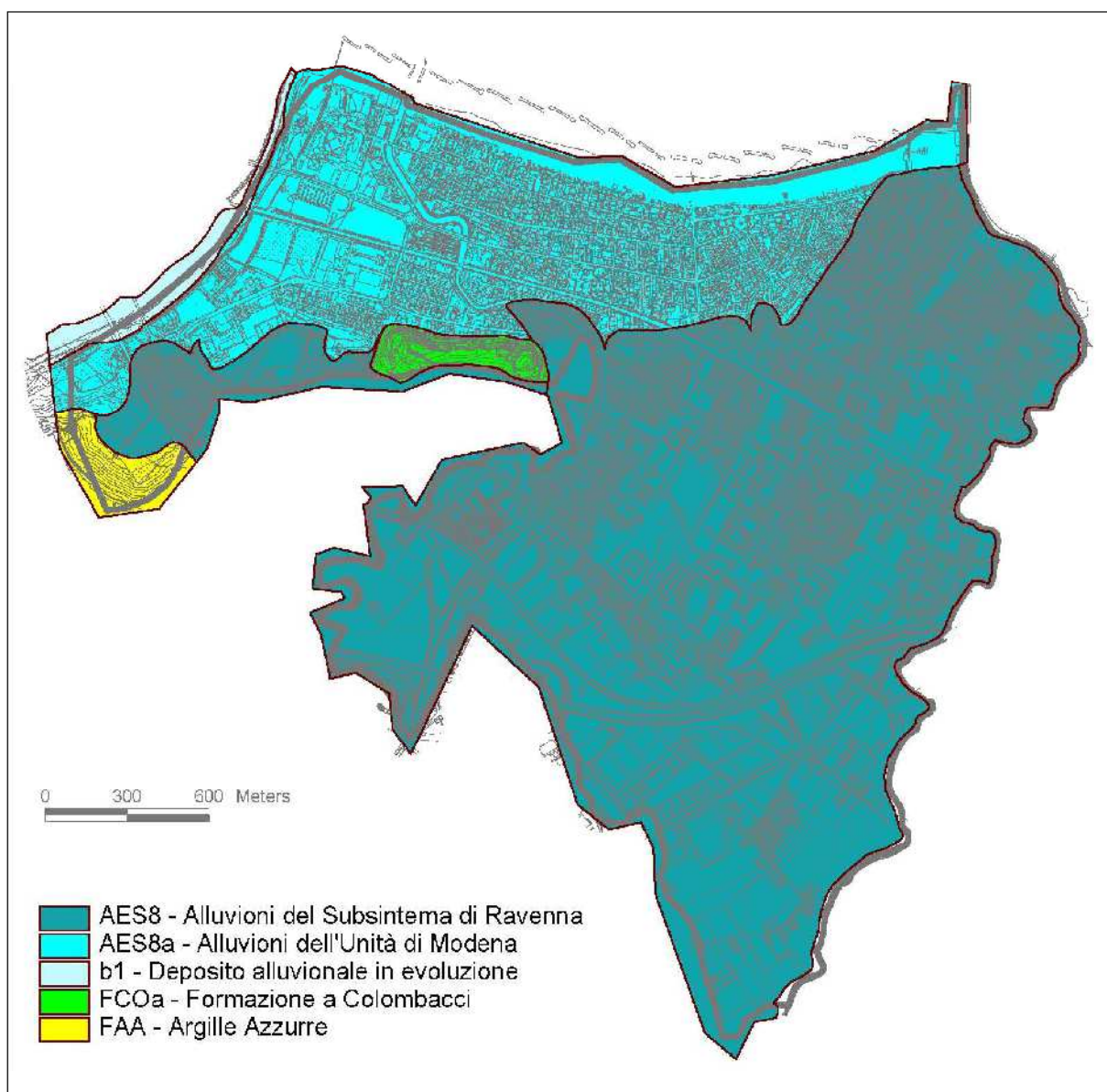


Figura 3.1– Schema dei depositi marini e alluvionali affioranti nel territorio di Cattolica (da: Carta Geologica dell'Emilia-Romagna, scala 1:10.000).

I depositi alluvionali affioranti sono invece riconducibili a:

3. “depositi alluvionali del subsistema di Ravenna” (identificati con la sigla “AES8” nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000) → si tratta di alluvioni eterometriche, costituite da ciottoli, sabbie e limi. Corrisponde nelle aree intravallive ai depositi terrazzati più bassi. Rientrano in questa unità anche le alluvioni attualmente in evoluzione in alveo e quelle del primo terrazzo, talora fissate da arbusti. Limite superiore coincidente con il piano topografico, dato da suoli variabili da non calcarei a calcarei. I suoli non calcarei e scarsamente calcarei hanno, al tetto, colore bruno scuro e bruno scuro giallastro, spessore dell'orizzonte decarbonatato da 0,3 ad 1 m e contengono reperti archeologici di età dal Neolitico al Romano. I suoli calcarei appartengono all'unità AES8a. L'età deposizionale è riconducibile al Pleistocene superiore-Olocene.

La carta geologica regionale alla scala 1:10.000 distingue inoltre la seguente unità del subsistema di Ravenna:

“depositi alluvionali dell'Unità di Modena” (identificati con la sigla “AES8a” nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000) → sono sedimenti alluvionali eterometrici dati da ciottoli, sabbie e limi. Il limite superiore è sempre affiorante e coincidente con il piano topografico, dato da un suolo calcareo di colore bruno olivastro e bruno grigiastro al tetto. Il limite inferiore è generalmente dato da una superficie di erosione fluviale nelle aree intravallive. L'età deposizionale è riconducibile all'Olocene - attuale.

3.2 Assetto litologico e strutturale

Dal punto di vista strutturale, oltre a quanto già riportato nel paragrafo 2.1 come approfondimento per la descrizione delle sorgenti sismogeniche, l'assetto tettonico strutturale che interessa il territorio di Cattolica è ben schematizzato nella figura 3.2, desunta dalla Relazione Geologica del PSC, che riproduce in profilo una ricostruzione molto ipotetica dell'andamento della struttura geologica più profonda come si desume dalla Carta geologico - strutturale dell'Appennino Emiliano-romagnolo (A. Cerrina Ferroni et Al., 2002, RER e CNR), rielaborata da Viel & Associati (2006).

La successione della Formazione a Colombacci/Argille azzurre del Pliocene inferiore⁴, nella fase traslativa del Pliocene inferiore, si impila lungo il margine romagnolo con immersione assiale circa NW, sotto le strutture frontali della catena.

Come si può osservare le strutture tettoniche proseguono sepolte dai sedimenti anche nella zona marina, riproducendo lo stile per pieghe faglie (Adriatic Folds), caratterizzate da comportamenti

⁴ Nella Carta Geologico Strutturale dell'Appennino Emiliano Romagnolo (scala 1:250.000) la Formazione a Colombacci e le marne e argille affioranti nella porzione sud-ovest del territorio comunale, sono attribuite alla più generale “Unità Cervarola/Marnoso-Arenacea del Messiniano medio - pliocene inferiore.

fortemente disarmonici tra le successioni antiche e profonde ed i sedimenti terrigeni mio-pliocenici sovrastanti, come evidenziato da M. Pieri e G. Groppi (1981).

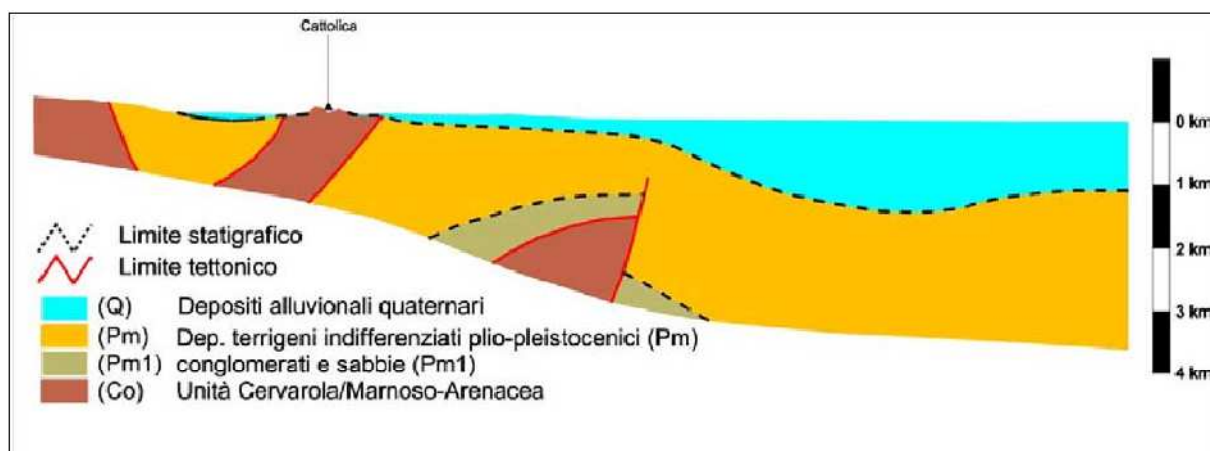


Figura 3.2– Profilo ipotetico tracciato tra l'entroterra del Comune di Cattolica e l'antistante area "offshore".

3.3 Assetto geomorfologico

L'assetto strutturale determina la fisiografia (assetto morfologico e climatico) del Comune di Cattolica. Il paesaggio visivo è profondamente segnato anche dall'andamento geografico, e dall'evoluzione morfologica dei maggiori corsi d'acqua che incidono la pianura alluvionale e costiera. L'andamento dei corsi d'acqua ripropone la storia dei loro rapporti con il mare e la sua capacità di "ricevere" in continuità le acque continentali, nell'immediata vicinanza delle foci, originariamente, erano presenti barre sabbiose sommerse, oggi completamente obliterate dalle difese artificiali della costa stessa.

La ricostruzione di sottosuolo conferma l'assetto morfologico fossilizzato nelle forme superficiali ancora oggi rilevabili (Viel & Associati, 2006), malgrado l'intensa urbanizzazione abbia certamente cancellato molte delle tracce fossili ancora presenti nel Milleottocento:

- la morfologia attuale presenta un significativo "barricamento" (vedi figura 3.3) che consente di dividere nettamente la porzione di "foreshore", di probabile età olocenica, e la porzione attualmente corrispondente alla zona costiera interessata dall'espansione urbana successiva al Millenovecentoventi. Si tratta di una scarpata di diversa altezza (da poco oltre i 6 metri a circa 3 metri) e di pendenza variabile, di difficile ricostruzione a causa delle manomissioni antropiche e comunque di scarso interesse, come vedremo, dal punto di vista dell'analisi di pericolosità sismica. La ripa marina, è stata oggetto di numerosi studi, anche se non esistono valutazioni concordanti sull'epoca di formazione.

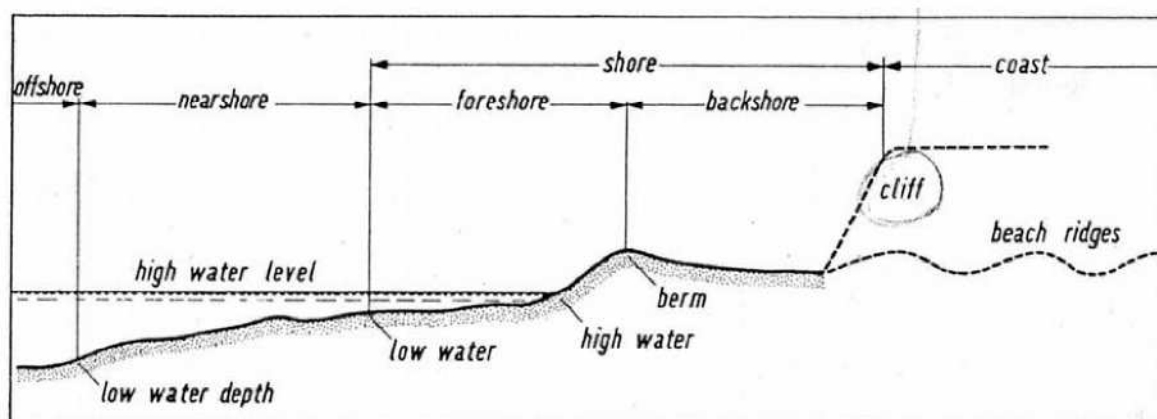


Figura 3.3 – Schema del profilo costiero e terminologia (da "Theoretical Geomorphology", A. E. Scheidegger, 1965).

Due sono le teorie principali sulla genesi: la prima ipotesi spiega che la scarpata si sarebbe formata durante la trasgressione "flandriana" o "versiliana" (circa 6.000 anni fa), cioè quando il mare raggiunse il suo massimo livello nel periodo di ottimo climatico neolitico (Parea, 1986, Veggiani, 1988), la seconda teoria, invece, ne attribuisce il periodo di formazione in età più recente, circa 2.000 anni fa (Coltorti, 1991, Elmi et alii, 1994).

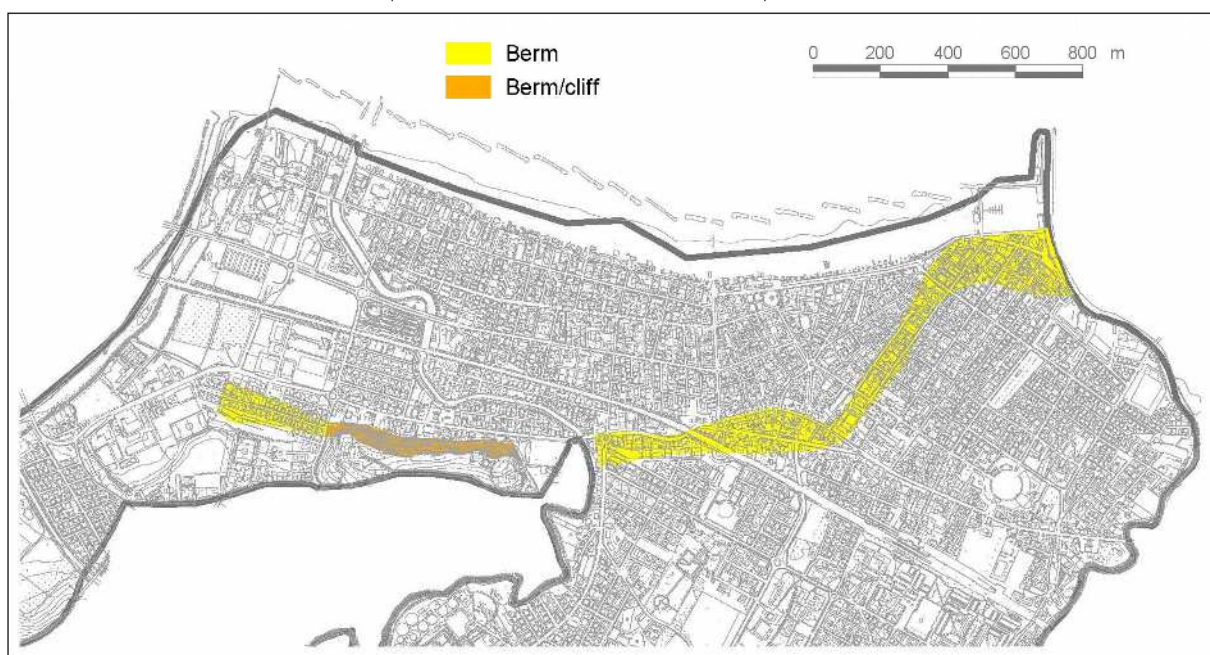


Figura 3.4– Rilievo della scarpata di "berm" e di "cliff" (Viel & Sangiorgi, 2006, rielaborata da Sangiorgi, 2013).

La figura 3.4 propone una ricostruzione delle scarpate di berm ancora riconoscibili, sulla base del rilievo già pubblicato nella Relazione Geologica del PSC di Cattolica (Viel & Associati, 2006) e ulteriormente rielaborata per questo lavoro;

- il rilievo di Monte Vici ("Torre Conca"), appare come residuale di una demolizione del substrato marino operata dall'azione combinata del Ventena, del Conca, e del moto ondoso costiero, questa struttura morfologica costituisce un vero e proprio rilievo isolato di altezza assoluta massima pari a

circa 35 metri slm. Si tratta di un residuo dell'antico "cliff" che localmente coincideva con il "berm" e che doveva avere sviluppo SSE-NNO (figura 3.4);

- il corso del Ventena appare caratterizzato da meandri "ereditati": il confronto con l'andamento delle porzioni terminali degli alvei del Conca e del Tavollo, dimostra che questo tratto di pianura costiera presentava, e presenta tutt'ora, le acclività sufficienti ad un normale sbocco a mare dei corsi d'acqua: i tratti terminali degli alvei (Conca e Tavollo) sono in sostanza rettilinei, o presentano angoli di curvatura delle anse relativamente ridotti. Il Ventena, invece, presenta un alveo fortemente meandriforme, nel lungo tratto compreso tra S. Giovanni in Marignano ed il rilievo isolato di Torre Conca. La presenza di anse con curvature tanto accentuate in un canale così incassato entro un substrato argilloso, debolmente ghiaioso, non trova motivazioni fisiche. La formazione dei meandri risale con probabilità ad un'epoca in cui l'acclività di questo tratto di pianura era fortemente condizionata dalla presenza di una soglia, di un gradino più resistente all'erosione, che impediva l'ingresso diretto nel mare del Ventena. L'alveo del fiume ha dunque cercato verso il Tavollo il suo sbocco ed ha allungato il proprio corso con meandri per compensare le portate provenienti da monte. Nel tempo, l'azione combinata del moto ondoso, della demolizione torrentizia e dell'aggradazione del conoide, operata dai due corsi d'acqua, ha determinato la situazione attuale. I meandri che attualmente contraddistinguono il corso del Ventena possono essere dunque "ereditati" da un passato morfologico di età indefinibile, ma certamente pre-wurmiana;

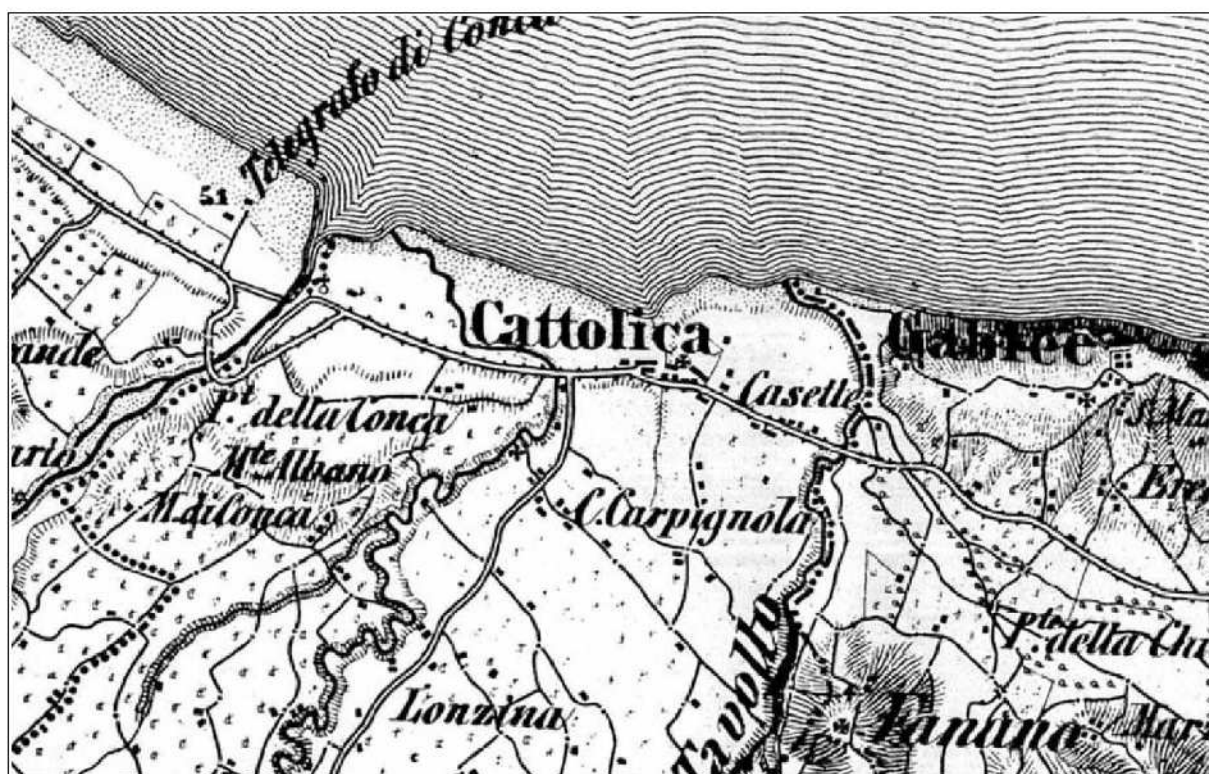


Figura 3.5– Stralcio della Carta Storica Regionale, F° 268, scala 1:50.000 (R.E.R., ed. 1999).

- una modesta incisione valliva di un corso d'acqua ormai tombato da molti decenni, evidente soprattutto da SE della Zona Artigianale Nord verso costa, fino a ridosso del “berrn” nei pressi dell'incrocio di via Mazzini con via Indipendenza, forse eredità di un paleoalveo (riportato in tavola 5) del Ventena o del Tavollo. La traccia di questo piccolo rio, è ben riconoscibile nella figura 3.5, un estratto della Carta Storica Regionale (scala 1.50.000) pubblicata dalla R.E.R., ricomposta sulla base di fonti cartografiche precedenti l'unificazione d'Italia (nel nostro caso, cartografia dello Stato Vaticano, del 1851);
- la scarpata (altezza pari a circa 10 m) su cui è insediata Montalbano, che costituisce una parte del confine amministrativo di Cattolica, appare come il frutto dell'azione del Conca in un'epoca in cui anche questo fiume risentiva della presenza di una soglia morfologica relativamente rilevata, che impediva un immediato e semplice ingresso in mare.

3.4 Assetto idraulico

Dal punto di vista idraulico, la figura 3.6 propone una sintesi degli aspetti di pericolosità idraulica riferiti al Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (P.G.R.A), e al Piano di Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) del bacino Marecchia-Conca. La cartografia riporta anche elementi di criticità nel reticolo di deflusso urbano ricavati dalle segnalazioni pervenute all'Ufficio Tecnico del Comune di Cattolica da parte della popolazione.

Si tratta di un inquadramento preliminare delle criticità idrauliche a supporto degli eventuali ulteriori approfondimenti idraulici da espletare in sede di progettazione.

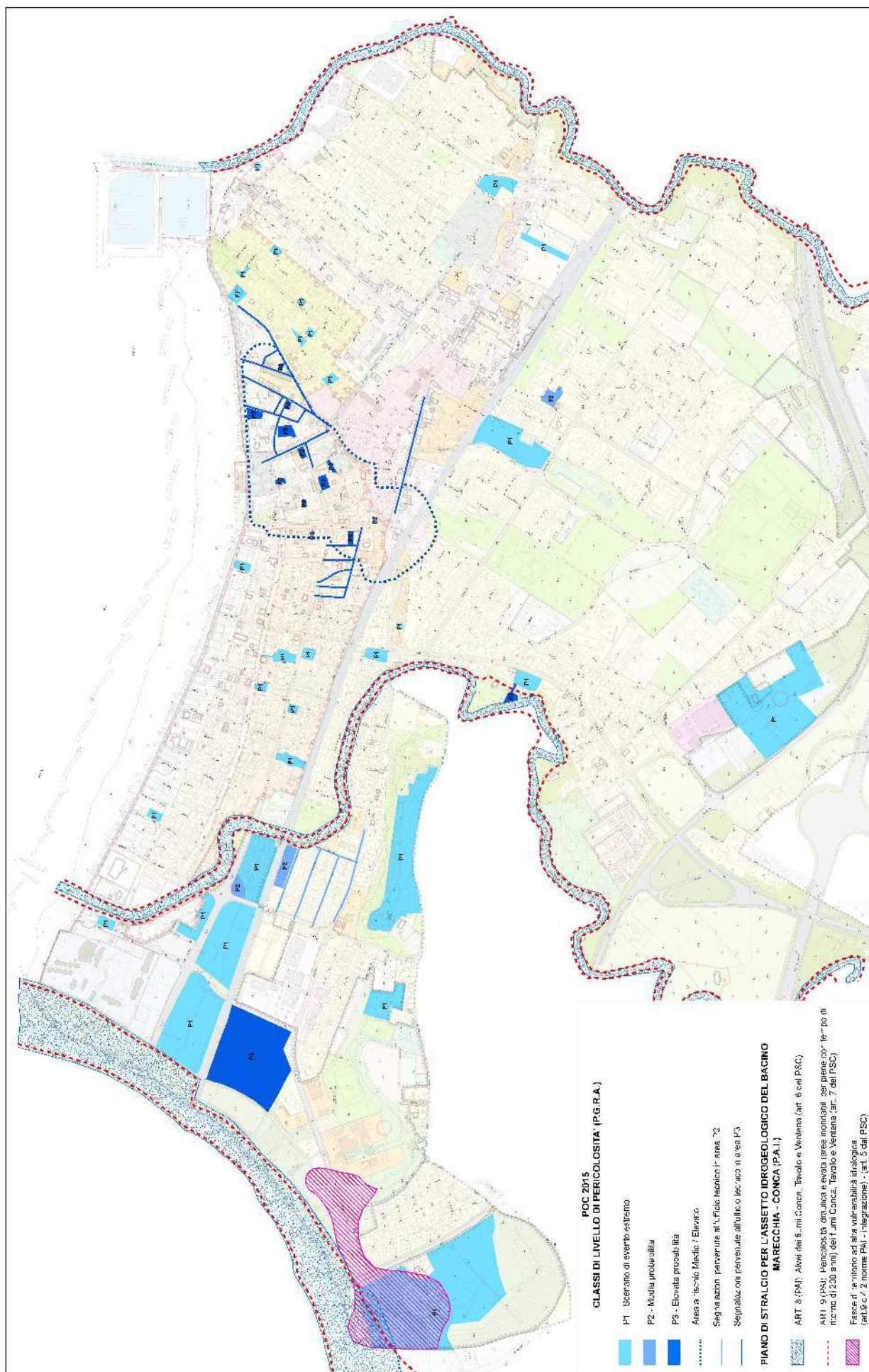


Figura 3.5- Stralcio della Carta Storica Regionale, F° 268, scala 1:50.000 (R.E.R., ed. 1999).

4 Dati geotecnici e geofisici

4.1 Dati pregressi

Il sottosuolo del territorio comunale è stato indagato per svariati scopi (ricerche d'acqua, caratterizzazione geotecnica, ricerca di materiali granulari da cavare, ecc.) nei decenni precedenti. Tutto questo materiale conoscitivo è stato raccolto ed archiviato dalla Regione Emilia-Romagna e dal Comune di Cattolica. Lo Studio scrivente ha riordinato, selezionato ed elaborato le conoscenze pregresse, ricostruendo un modello di sottosuolo già elaborato dallo scrivente in occasione delle analisi geologiche per il PSC di Cattolica (Viel & Associati, 2006).

La selezione delle prove di repertorio ha considerato che molte prove risultano eseguite con attrezzature fuori standard (fornendo quindi esiti inutilizzabili o non interpretabili), oppure altre sono risultate troppo superficiali per poter essere pienamente usate per gli scopi del presente lavoro. In conclusione, i dati utilizzati sono quelli delle stratigrafie dei pozzi e dei sondaggi che hanno anche raggiunto, in pochi casi, anche il substrato marino, le CPT di maggior profondità (generalmente spinte oltre 10 metri, oppure giunte a "rifiuto" strumentale), le penetrometrie dinamiche standard (pesanti; leggere).

Tra le conoscenze pregresse, particolare importanza rivestono le prove geofisiche e geognostiche effettuate dalla Regione Emilia-Romagna, finalizzate ad una preliminare caratterizzazione sismica del territorio regionale. In particolare, per l'elaborazione della microzonazione di Cattolica sono stati utilizzati gli esiti delle seguenti indagini regionali:

- una "down hole" (DH), nel foro del sondaggio "268010P503"⁵ realizzato fino a 48 metri di profondità sulla sponda destra del Conca, in corrispondenza dell'apparato di foce. I risultati geofisici ottenuti sono piuttosto problematici: nell'intervallo tra le quote 36 e 46 le velocità delle onde di taglio (Vs) sono attorno ai 150 m/s con minimo di 125 m/s. La stratigrafia del sondaggio indica sedimenti argilloso-limosi probabilmente alluvionali: può trattarsi di un paleoalveo del Conca, che in epoca Wurmiana si è approfondito nel substrato durante la regressione, e riempito di depositi argillosi e ricchi di sostanza organica all'inizio della successiva trasgressione; oppure si può trattare di difetti nella cementazione che salda i sedimenti al tubo del pozzo di perforazione, o ancora di errate interpretazioni dei dati originari. Di tutte queste ipotesi la prima appare come la più verosimile, ed è quella accettata nel lavoro; in allegato, si fornisce il diagramma delle distribuzioni delle Vs fornitoci dalla Regione;
- due coni sismici (SCPT), eseguiti con puntale strumentato con due geofoni distanziati di 1 metro, inserito nei fori di prove penetrometriche standard elettriche (CPTE), realizzati rispettivamente in

⁵ Sigla identificativa della B/D regionale, il sondaggio è stato rinominato "P75584" nel database predisposto per questo lavoro di microzonazione

vicinanza alla citata DH (SCPT3⁶, spinto fino a 25 m), e sulla spiaggia immediatamente ad ovest del porto di Cattolica (SCPT1⁷, fino a 14 m); le SCPT forniscono per l'intervallo indagato la distribuzione delle Velocità delle onde sismiche (V_s e V_p) e la stima del modulo di taglio, parametri fondamentali per la modellazione sismica numerica del sottosuolo, espletata come approfondimento di terzo livello e descritta nei successivi capitoli (§ paragrafo 7.2). In allegato, si riportano i diagrammi parametrici delle due prove.

- si sono considerati anche gli esiti di due altri SCPT realizzati, sempre dalla RER, a Misano Adriatico, il primo ancora nella zona "Le Navi" (immediatamente fuori del confine di Cattolica (sigla SCPT4, spinta fino a 18 m), l'altra vicino a Piazzale Roma a Misano (SCPT5, fino a 26 m), sebbene non riportati in cartografia e nell'archivio geognostico.

Queste prove sismiche costituiscono un riferimento, come vedremo, per la stima delle velocità delle onde di taglio nei sedimenti meno profondi costieri (sabbie marine di cordone e depositi alluvionali di piana deltizia). Inoltre, il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli ci ha gentilmente fornito anche gli esiti di una ulteriore prova sismica regionale eseguita a ridosso dell'autostrada, ma anch'essa fuori dei confini di Cattolica, che ha fornito velocità delle onde di taglio per il substrato pliocenico, sotto i trenta metri, di poco superiori a 400 m/s.

Tra i dati pregressi, molto utili per la modellazione geotecnica e sismica dell'“Ambito M” sono risultati gli esiti dell'indagine geologica espletata per la riqualificazione dell'area “ex hotel Linda”⁸, in particolare, oltre a prove DPSH spinte fino a circa 16 m di profondità, venne eseguito un sondaggio a carotaggio continuo⁹, profondo 20 metri, con prelievo di tre campioni indisturbati (“Shelby”) nei sedimenti argillosi sottostanti i depositi di piana costiera e determinazione dei rispettivi limiti di Atterberg. Gli esiti di laboratorio evidenziavano che tali sedimenti, sottostanti i depositi di piana deltizia, sono caratterizzati da un grado di plasticità da media ad elevata: $IP = 30,3$ (campione prelevato a 9,0÷9,5 m); $IP = 25,1$ (campione a 14,5÷15,0 m); $IP = 36,8$ (campione a 19,5÷20,0 m).

Tra i dati pregressi, sono stati considerati anche gli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche espletate per il Piano Operativo Comunale (POC) di Cattolica, lavoro a cura dei dr. geol. G. Viel e S. Sangiorgi (2009). Per tale studio, vennero eseguite le seguenti prove:

- sei penetrometrie statiche con puntale elettrico e con piezocono (CPTE/CPTU¹⁰), realizzate con un penetrometro dotato di spinta da 300 kN sulla punta (tipo “Gouda”), montato su semovente (peso

⁶ Sigla identificativa della B/D regionale, la prova geofisica è stata rinominata “P75SCPT86” nel database predisposto per la microzonazione

⁷ Prova geofisica rinominata “P157SCPT191”

⁸ Relazione Geologica a cura dello Studio Methodo s.r.l., 2002

⁹ Sondaggio rinominato “P47550”

¹⁰ Le prove penetrometriche eseguite (CPTU1; CPTU2; CPTE3; CPTE4; CPTU5; CPTU6) sono state rinominate rispettivamente: “P29CPTU32”; “P30CPTU33”; “P31CPTE34”; “P32CPTE35”; “P33CPTU36”; “P34CPTU37” nel database predisposto per questo lavoro di microzonazione

550 kg) con ancoraggi laterali per incrementare il contrasto durante la penetrazione profonda. Le prove hanno consentito una migliore definizione tessiturale rispetto alle tradizionali prove di repertorio (CPT e, soprattutto, penetrometrie dinamiche); sono state eseguite prevalentemente nella piana alluvionale a monte del “berm” (§ paragrafo 3.3), cioè nella piana deltizia alluvionale del Conca (CPTU4; CPTU5) e del Tavollo-Ventena (CPTU1; CPTU2; CPTU3), ovvero dove si concentravano le principali aree di previsione edificatoria; la prova CPTU6 è stata comunque effettuata nella zona di piana costiera olocenica (cioè a valle del “berm”). Gli esiti delle prove CPTU/CPTU hanno inoltre consentito la verifica della propensione alla liquefazione, riscontrata solamente nella prova CPTU6 (zona di piana costiera);

- due sondaggi a percussione tipo “GeoProbe”¹¹ che, sebbene utilizzati prevalentemente nel campo ambientale, hanno permesso il recupero di campioni per analisi granulometriche (determinazione del fuso granulometrico per la liquefacibilità) e determinazione dei limiti di Atterberg. Le terebrazioni consentono, infatti, il recupero del sedimento attraversato all'interno di fustelle in PVC trasparente. Le prove sono state eseguite rispettivamente in zona di piana costiera, tra il Conca e il Ventena (sondaggio SP1) e nella piana alluvionale retrostante, del Tavollo (sondaggio SP2).
- Tre stendimenti sismici¹² in acquisizione sia passiva (Re.Mi.), sia attiva (MASW). La strumentazione utilizzata, in dotazione allo Studio scrivente, è composta da 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 2 metri secondo la profondità di indagine voluta, e la definizione desiderata. La sorgente di rumore per la prova MASW 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. I risultati ottenuti, hanno consentito di tarare le velocità delle onde di taglio da inserire nei modelli sismici dopo il confronto con quelle delle SCPT e DH regionali. Tutti i risultati convergevano nell'indicare Vs tra i 400 ed i 450 m/s a profondità superiori a 40 metri dal p.c. (pseudo-bedrock sismico);
- registrazioni del rumore sismico con tecnica HVSr, che indicavano un evidente picco di amplificazione nello spettro H/V nell'intervallo di frequenza 1,3-1,5 Hz, interpretato come contrasto d'impedenza significativo posto alla medesima quota (attorno ai 45-55 metri), dovuto ad una netta variazione nelle caratteristiche sismiche dei sedimenti attraversati. Questo picco è stato assunto nel POC come riferimento per la collocazione del pseudo-bedrock sismico nei modelli di simulazione sismica locale.
- prove di laboratorio, effettuate su campioni rimaneggiati dei due sondaggi “GeoProbe”. Occorre premettere che il campionamento con tale sistema di terebrazione consente di prelevare il

¹¹ I due sondaggi per campionamento SP1 e SP2 sono stati rinominati rispettivamente “P445C47” e “P455C48”

¹² I tre stendimenti sismici, archiviati per questo lavoro come prove Re.Mi., sono stati rispettivamente rinominati “L1 REMI1”, “L2 REMI2”, “L3 REMI3”

campione a profondità piuttosto precise rispetto ad altre metodologie e a “secco”. In particolare, nel sondaggio SP1, approfondito fino a circa 8 m ed eseguito nei sedimenti della piana costiera (limitrofo all'area di approfondimento “Ambito M”) tra il Conca e il Ventena, sono stati raccolti 3 campioni, uno in argille (prelevato a 5,0÷5,3 m) per definire i limiti di Atterberg (che ha evidenziato l'elevata plasticità degli intervalli argillosi, con IP = 40) e due (prelevati rispettivamente a 6,45÷6,55 m e 7,30÷7,60 m) per la determinazione delle granulometrie in intervalli significativi di sabbie sature: gli esiti avevano evidenziato per entrambi i campioni un fuso granulometrico predisponente la liquefazione in caso di sisma, ed elevate percentuali di sabbie fini e medie (figura 4.1).

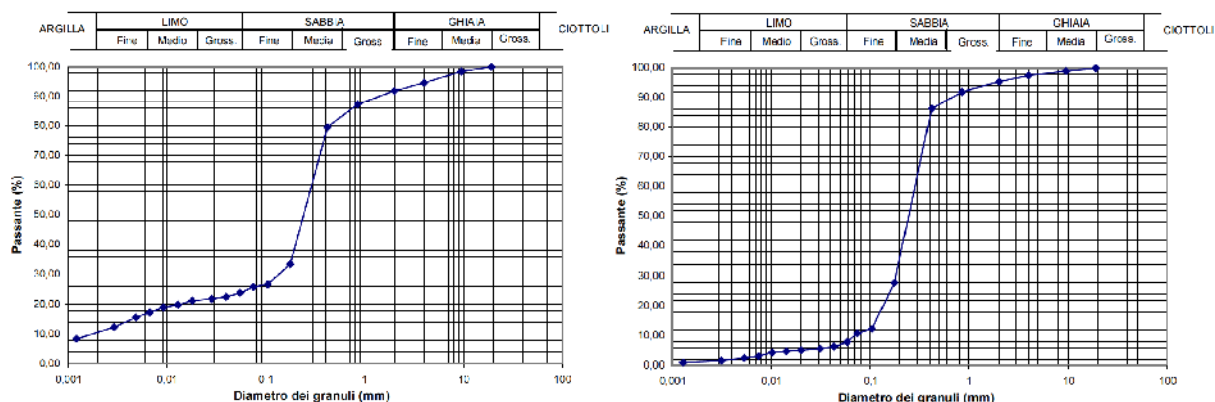


Figura 4.1 – Esiti granulometrici (campioni 2 e 3 prelevati dal sondaggio S1 eseguito per il POC 2009).

Le prove geognostiche e geofisiche sono state implementate nella cartografia <<Carte delle Indagini>> e il database di archiviazione contiene le informazioni relative ad ogni singola prova.

4.2 Dati ex novo

Per espletare questo ulteriore approfondimento della pericolosità sismica e di microzonazione, si è reso indispensabile effettuare ulteriori indagini in sito, sia di tipo geofisico, sia di tipo geognostico. Sulla base degli obiettivi dell'incarico avuto dall'Amministrazione comunale, si è cercato di concentrare le indagini geognostiche nella zona di massimo approfondimento (“Ambito M”), che ricade in buona parte nell'area costiera già definita di potenziale liquefacibilità. Si è pertanto deciso di eseguire prove penetrometriche di tipo elettrico, anche con piezocono (CPTE/CPTU), nella zona mare più prossima alla costa. In tale zona mancano, infatti, dati da prove CPTE/CPTU che (come meglio approfondiremo nei successivi capitoli), consentono una buona caratterizzazione tessiturale e meccanica dei sedimenti attraversati e, inoltre, di stimare con un buon grado di attendibilità gli effetti di liquefacibilità dei sedimenti e la possibilità di cedimenti post-sisma.

Sul resto del territorio urbanizzato e urbanizzabile, sono state eseguite ulteriori indagini geofisiche, in particolare registrazioni del rumore sismico passivo con tecnica HVSr. La scelta di tale tipologia di prova è stata dettata e, se vogliamo, anche imposta dal contesto di intensa urbanizzazione che caratterizza l'area studiata e che ostacola altre soluzioni d'indagine; gli esiti delle prove HVSr sono

stati comunque confrontati e "tarati" con i dati geofisici di riferimento pregressi già descritti.

Più in dettaglio, per questo lavoro sono stati effettuate le seguenti prove in sito:

- cinque prove penetrometriche¹³ elettriche (CPTE) di cui due con puntale piezometrico (CPTU) realizzate con strumento penetrometrico di max contrasto pari a 200 kN, montato su semovente cingolato "Pagani" dotato di ancoraggi supplementari per migliorare l'ancoraggio al suolo e consentire il massimo approfondimento delle prove. Le penetrometrie sono state spinte fino a "rifiuto" strumentale, considerando la difficoltà all'ancoraggio per la presenza di sedimenti sabbiosi e/o riporti superficiali. È stato comunque possibile investigare tutto lo spessore di depositi di piana costiera e approfondirsi nei sedimenti argillosi alluvionali sottostanti. Le profondità investigate risultano comprese tra 15 metri e 20 m.

Come già detto, le penetrometrie CPTE/CPTU eseguite per lo studio di microzonazione consentono un ulteriore approfondimento delle caratteristiche tessiturali e qui di seguito si riportano le correlazioni¹⁴ utilizzate per la stima delle proprietà meccaniche dei sedimenti indagati:

Unit Weight, γ (kN/m³) ::

$$\gamma = \gamma_w \cdot \left(0.27 \cdot \log(R_f) + 0.35 \cdot \log\left(\frac{Q_{tn}}{p_a}\right) + 1.236 \right)$$

where γ_w = water unit weight

Permeability, k (m/s) ::

$$I_c < 3.27 \text{ and } I_c > 1.00 \text{ then } k = 10^{0.952 - 3.044 I_c}$$

$$I_c \leq 4.00 \text{ and } I_c > 3.27 \text{ then } k = 10^{-4.52 - 1.37 I_c}$$

N_{60} (blows per 30 cm) ::

$$N_{60} = \left(\frac{Q_{tn}}{P_a} \right) \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 I_c}}$$

$$N_{60} = Q_{tn} \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 I_c}}$$

Young's Modulus, E_s (MPa) ::

$$(q_t - \sigma_v) \cdot 0.015 \cdot 10^{0.55 I_c + 1.68}$$

(applicable only to $I_c < I_{c_cutoff}$)

Relative Density, D_r (%) ::

$$100 \cdot \sqrt{\frac{Q_{tn}}{k_{DR}}} \quad (\text{applicable only to SBT}_n: 5, 6, 7 \text{ and } 8 \text{ or } I_c < I_{c_cutoff})$$

State Parameter, ψ ::

$$\psi = 0.56 - 0.33 \cdot \log(Q_{tn,cc})$$

Peak drained friction angle, ϕ (°) ::

$$\phi = 17.60 + 11 \cdot \log(Q_{tn})$$

(applicable only to SBT_n: 5, 6, 7 and 8)

:: 1-D constrained modulus, M (MPa) ::

If $I_c > 2.20$

$$\alpha = 14 \text{ for } Q_{tn} > 14$$

$$\alpha = Q_{tn} \text{ for } Q_{tn} \leq 14$$

$$M_{CPT} = \alpha \cdot (q_t - \sigma_v)$$

If $I_c \leq 2.20$

$$M_{CPT} = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 I_c + 1.68}$$

:: Small strain shear Modulus, G_0 (MPa) ::

$$G_0 = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 I_c + 1.68}$$

:: Shear Wave Velocity, V_s (m/s) ::

$$V_s = \left(\frac{G_0}{\rho} \right)^{0.50}$$

:: Undrained peak shear strength, S_u (kPa) ::

$$N_{kt} = 10.50 + 7 \cdot \log(F_r) \text{ or user defined}$$

$$S_u = \frac{(q_t - \sigma_v)}{N_{kt}}$$

(applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)

:: Remolded undrained shear strength, $S_u(rem)$ (kPa)

$$S_{u(rem)} = f_s \quad (\text{applicable only to SBT}_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9 \text{ or } I_c > I_{c_cutoff})$$

:: Overconsolidation Ratio, OCR ::

$$k_{OCR} = \left[\frac{Q_{tn}^{0.20}}{0.25 \cdot (10.50 + 7 \cdot \log(F_r))} \right]^{1.25} \text{ or user defined}$$

$$OCR = k_{OCR} \cdot Q_{tn}$$

(applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)

- Una prova penetrometrica statica con maglio "superpesante" (nominata P17DP31) → spinta

¹³ Nominated per lo studio di microzonazione rispettivamente: "P1CPTE1"; "P2CPTE2"; "P3CPTE3"; "P4CPTU4"; "P5CPTU5"

¹⁴ Robertson, P.K., Cabal K.L., Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc., 4th Edition, July 2010

Robertson, P.K., Interpretation of Cone Penetration Tests – a unified approach., Can. Geotech. J. 46(11): 1337-1355 (2009)

fino alla profondità di 10,6 m; Tale prova, è stata realizzata in sostituzione di una prova CPTU (impossibile da eseguirsi per le già citate difficoltà di ancoraggio) e ha comunque fornito esiti tessiturali utili per la correlabilità del modello di sottosuolo elaborato come ulteriore approfondimento.

- registrazioni del rumore sismico con tecnica HVSr (ulteriori 24 prove), che hanno confermato un evidente picco di amplificazione nello spettro H/V nell'intervallo di frequenza 1,2 Hz (ritenuta frequenza fondamentale) fino a circa 2 Hz. Sulla base degli esiti geognostici e geofisici delle prove ex novo, sono state rielaborate con il software in dotazione dello studio anche due delle tre acquisizioni Re.Mi. espletate per il POC di Cattolica (REMI1 e REMI3).

Per quanto riguarda le prove CPTE/CPTU eseguite per la microzonazione, gli esiti di tali indagini penetrometriche hanno ulteriormente supportato la modellazione geotecnica descritta nel successivo capitolo 5 e nel capitolo 8, e fornito ulteriori dati per la modellazione sismica numerica dell'“Ambito M”, oggetto degli approfondimenti di terzo livello descritti nel successivo capitolo 7.

A tal proposito, di particolare rilevanza per la modellazione numerica di risposta sismica locale, risultano gli esiti della distribuzione del modulo di taglio G_0 stimato sulla base degli esiti delle prove penetrometriche (CPTE/CPTU) nella zona costiera. La figura 4.2 propone tale distribuzione nel sottosuolo investigato del modulo G_0 ricavato dalle prove P1CPTE1, P2CPTE2 e P5CPTU5.

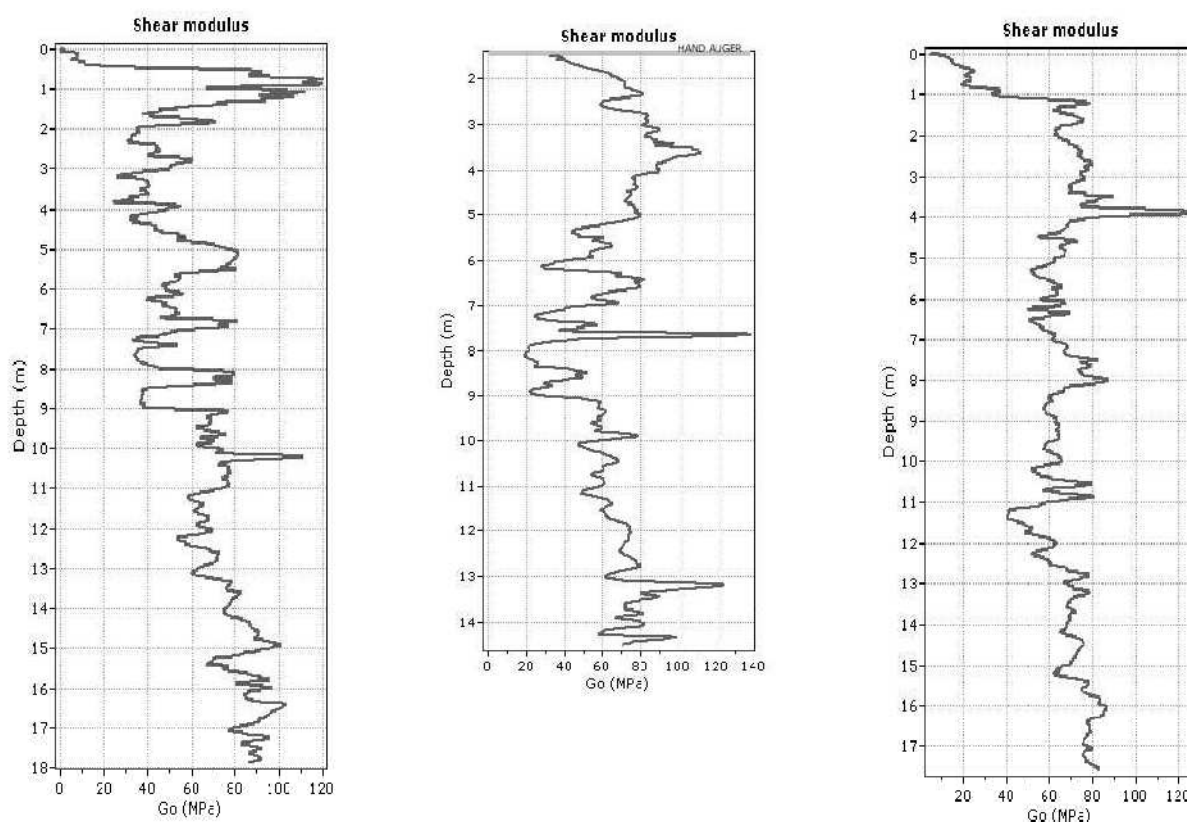


Figura 4.2 – Distribuzione dei valori di modulo di taglio G_0 nei sedimenti costieri attraversati dalle prove P1CPTE1, P5CPTU5 e P2CPTE2 (rispettivamente, diagrammi da sinistra verso destra)

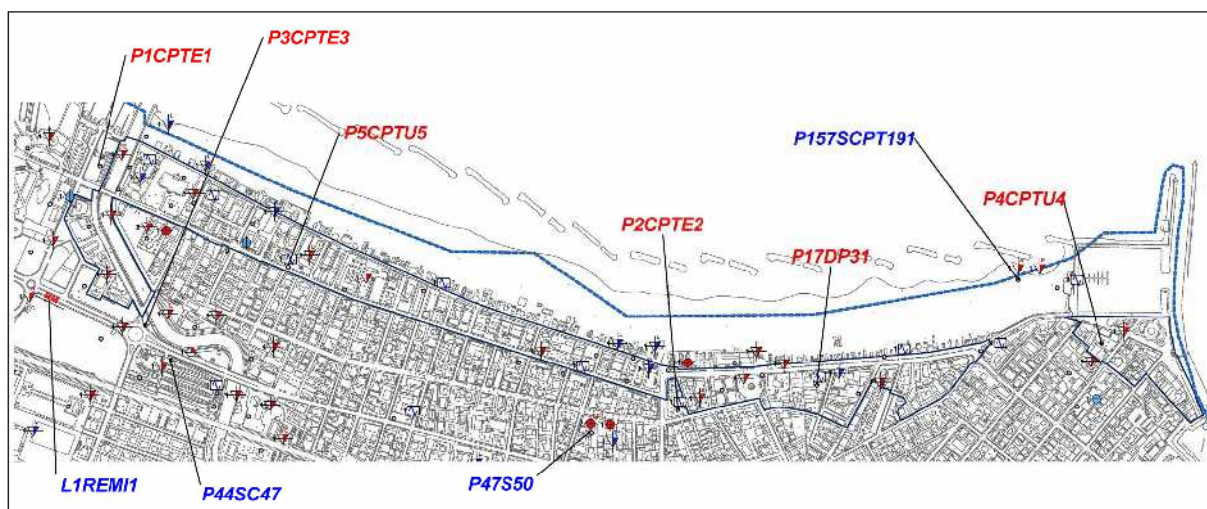


Figura 4.3 – Stralcio della <<carta delle indagini>>: prove di repertorio (etichette in blu) ed eseguite ex novo per lo studio di microzonazione (etichette in rosso), di riferimento per la caratterizzazione geotecnica e la successiva modellazione sismica dell' "Ambito M" (area degli approfondimenti di terzo livello). Le sigle corrispondono a quelle d'archivio per questo studio.

Le prove geognostiche e geofisiche ex novo sono state implementate nella cartografia <<Carte delle Indagini>> e il database di archiviazione contiene le informazioni relative ad ogni singola prova. La figura 4.3, è invece uno stralcio della <<carta delle indagini>>, in particolare delle prove espletate nell'intorno dell' "Ambito M": sono evidenziate (con la sigla di archiviazione) le indagini geognostiche e geofisiche eseguite per questo lavoro e di repertorio, che risultano di riferimento per gli approfondimenti sismici di terzo livello elaborati per tale area.

In allegato, si riportano la modellazione geotecnica di sintesi ottenuta per ogni verticale CPTE/CPTU e la distribuzione dei principali parametri meccanici (Modulo di Young; DR; angolo di attrito efficace; Modulo di deformazione; Modulo di Taglio G_0 ; coesione non drenata; OCR).

5 Modello di sottosuolo

Per quanto riguarda il modello di sottosuolo, la figura 5.1 riporta le parti di interesse delle due sezioni geologiche (sez. n.127 e sez. n.128) elaborate e pubblicate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli. Le due tracce sono state riportate anche nella cartografia elaborata per lo studio di microzonazione (rispettivamente rinominate 1-1' e 2-2'). Le due sezioni evidenziano un'ipotesi di profondità del bedrock marino che risulterebbe a circa 35 metri dal p.c., a ridosso della linea di costa, mentre verso sud (entroterra) la profondità rispetto al piano campagna giunge fino a circa 50 metri.

Gli apparati distributori del Conca, del Tavollo e del Ventena hanno diversa importanza ed evoluzione. Le conoidi del Conca e del Tavollo presentano una profondità media dei suoi sedimenti alluvionali che appaiono raggiungere, come già evidenziato, potenze anche di circa 50 metri nella porzione più meridionale del territorio amministrativo (come dimostra il sondaggio siglato P167PA184), mentre gli altri corsi d'acqua (es. Ventena) hanno foci che immettono quasi immediatamente in mare, contribuendo soltanto alla sedimentazione sottomarina.

Il carico sedimentario del Conca e del Tavollo, possiede attualmente un contenuto in sabbie molto modesto, se non addirittura assente, come risulta dagli esiti delle terebrazioni (sondaggi e prove penetrometriche) e, pertanto, non contribuiscono al rifornimento della componente granulare della spiaggia, la cui costante erosione da parte delle correnti marine è contrastata solamente dalle difese artificiali realizzate offshore.

Occorre inoltre precisare che le due sezioni geotecniche descritte evidenziano intervalli granulari (sabbie ghiaiose) di potenza metrica, intercalati ai sedimenti fini prevalentemente argillosi: questi intervalli, non raggiunti dalle prove penetrometriche, appaiono inoltre di scarso significato dal punto di vista della risposta sismica locale. Le indagini HVSR ben evidenziano soltanto i picchi di amplificazione riconducibili al tetto del substrato pliocenico nel range di frequenze comprese tra 1,2 Hz e circa 2,0 Hz.

Ulteriori informazioni sulle caratteristiche di sottosuolo sono contenuti nei capitoli 3 e 4, mentre nel capitolo 8 e in particolare nelle note descrittive della <<carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica>> (MOPS) si riportano le colonne litostratigrafiche sintetiche, rappresentative della microzona alla quale fanno riferimento.

Per quanto riguarda l'“Ambito M”, ovvero l'area in cui si sono espletati gli approfondimenti sismici di terzo livello, le ulteriori penetrometrie CPTe/CPTU eseguite per lo studio di microzonazione hanno consentito di elaborare un'ulteriore sezione, principalmente geotecnica, riportata nella cartografia di microzonazione con la sigla 3-3'. La figura 5.2 propone lo schema di sottosuolo della sezione 3-3'.

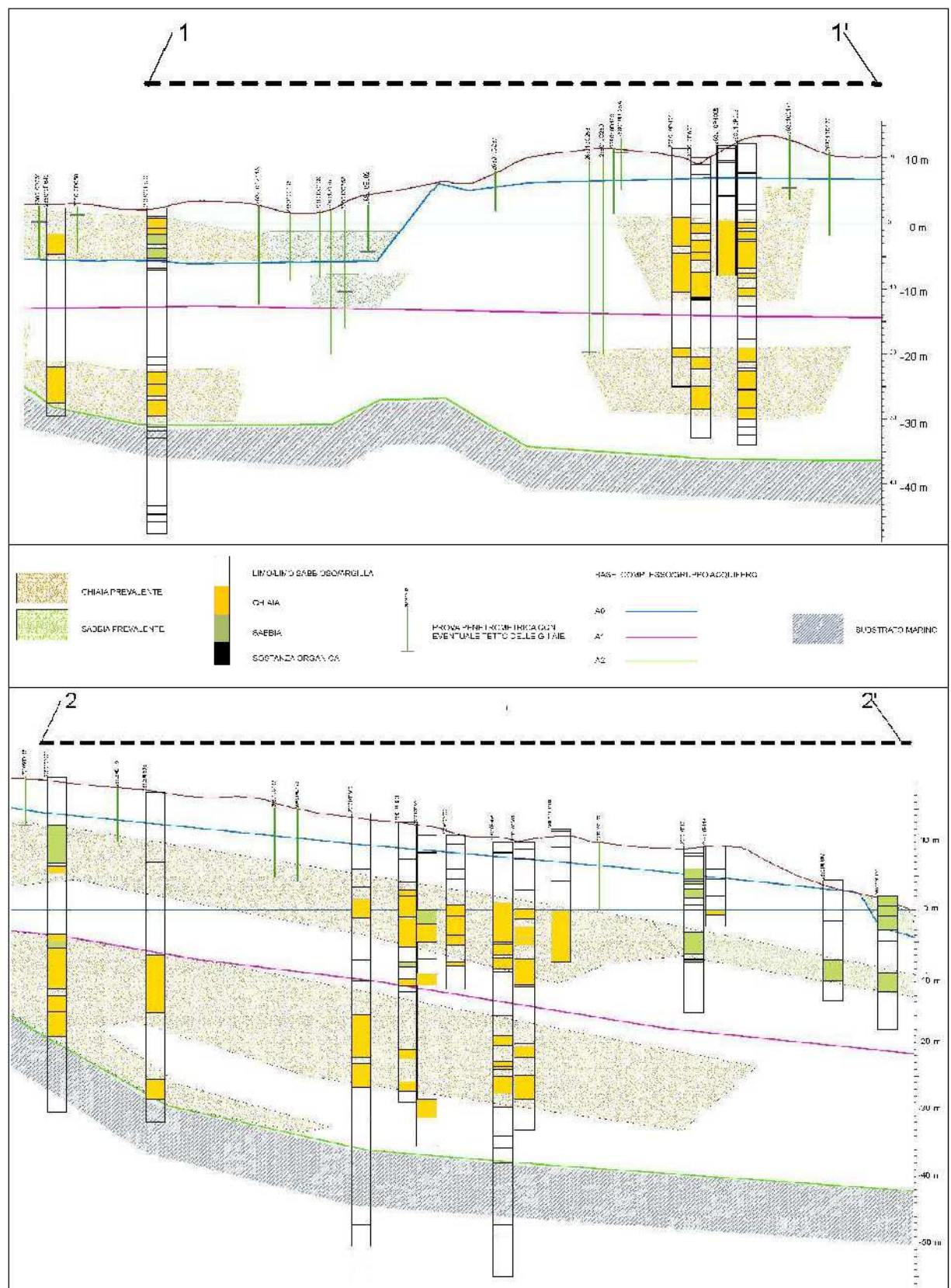


Figura 5.1- Sezioni geologiche interessanti l'area di studio e riportate sulla cartografia di microzonazione. La traccia 1-1' corrisponde alla sez. n. 128, mentre la traccia 2-2' corrisponde alla sez. n. 127, entrambe pubblicate dal SGSS Regione Emilia-Romagna.

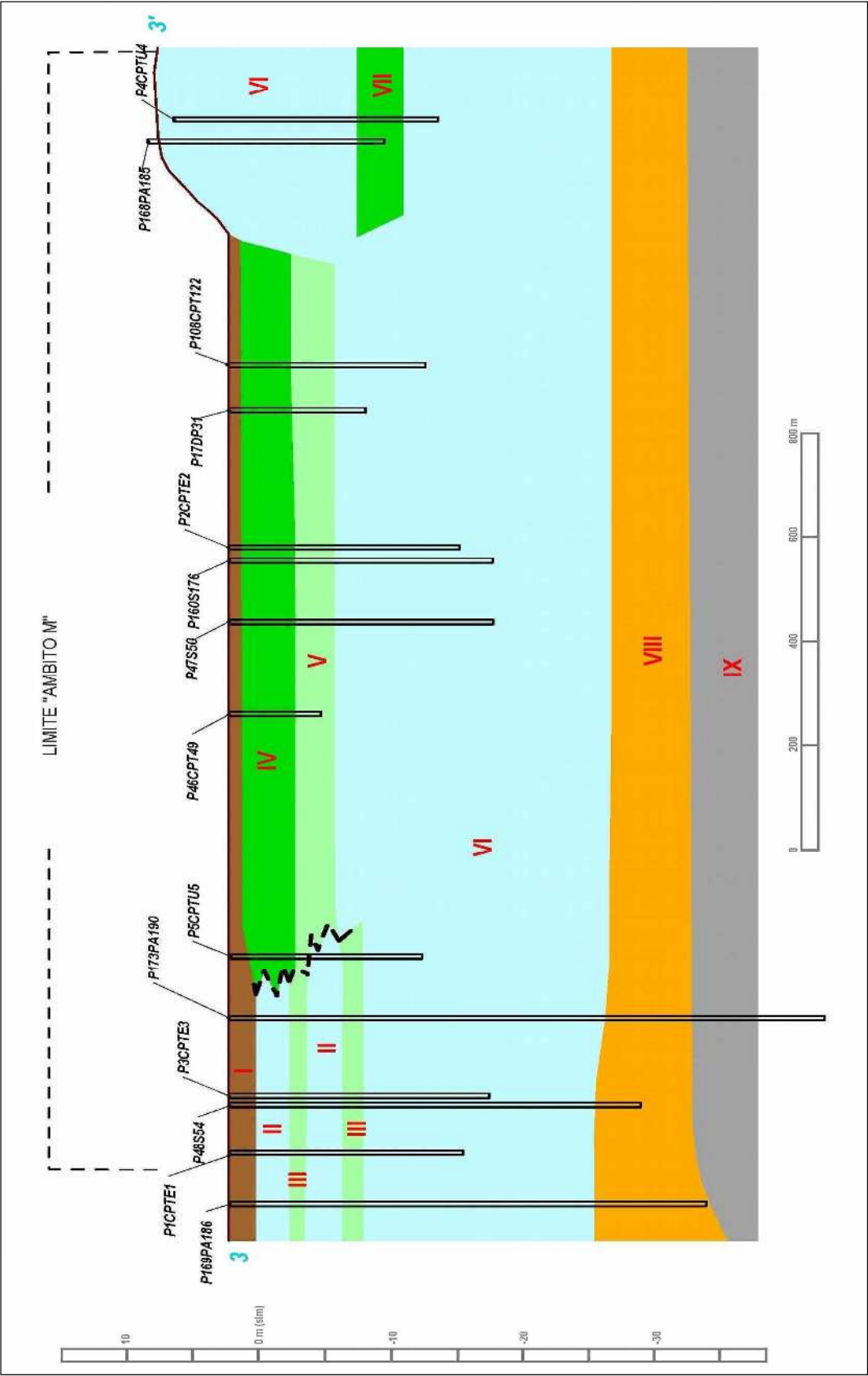


Figura 5.2- Sezione geotecnica elaborata per l'area oggetto di approfondimenti di terzo livello ("Ambito M").

Nella sezione 3-3' sono riportati (con numerazione romana) le unità litotecniche in cui è possibile scomporre il sottosuolo fino al bedrock pliocenico. Queste unità rappresenteranno, come vedremo, il riferimento anche per la modellazione numerica di risposta sismica locale elaborata per l'“Ambito M”, discussa nel successivo capitolo 7 (paragrafo 7.2). In sintesi, nella sezione 3-3', sulla base dei dati geognostici e geofisici delle prove archiviate è così possibile distinguere:

✓ UNITA' I \equiv corrisponde all'intervallo più superficiale e costituita da argille e argille ghiaiose di potenza variabile 1+2 metri; si tratta di un intervallo fortemente rimaneggiato dalle attività antropiche (suolo) che risulta generalmente asciutto (sopra la falda freatica). In questo senso, le indagini geognostiche riscontrano resistenze alla penetrazione anche elevate ($>1,5$ Mpa), spiegabili per lo stato di essiccamento dell'intervallo considerato. Questo primo intervallo risulta comunque di scarsa importanza dal punto di vista sismico, per la sua modesta profondità (spesso inferiore alla quota di incastro delle fondazioni anche superficiali degli edifici presenti);

✓ UNITA' II \equiv è costituita da argille generalmente di plasticità medio-alta ($IP >20$) e di scarsa consistenza ($<0,8$ MPa). Sono sedimenti attribuibili, dal punto di vista deposizionale ai sovralluvionamenti recenti (ultimi 2.000+6.000 anni?) di delta del Torrente Conca. Si intercalano alle sabbie di rideposizione marina (unità III) di spiaggia in funzione del contesto deposizionale predominante.

✓ UNITA' III \equiv rappresentata da intervalli a prevalente tessitura granulare (sabbie medie e fini; sabbie limose), di facies deposizionale di spiaggia, intercalate ai sedimenti argillosi che costituiscono l'unità II. Le sabbie dell'unità III sono generalmente caratterizzate da un moderato grado di addensamento ($DR >45\%$, con valori anche maggiori) e con resistenze alla punta che possono superare anche i 6+8 MPa. Lo spessore è metrico: la ricostruzione di sottosuolo nella sezione 3-3' evidenzia due intervalli principali sabbiosi attribuibili all'unità III.

✓ UNITA' IV \equiv corrisponde a un intervallo caratterizzato da sabbie medie/fini di tipica facies di cordone marino. Il suo spessore è di circa 4 metri, come risulta dalle terebrazioni in zona costiera. I depositi sono caratterizzati da densità medio-alta ($DR >60\%$), con resistenze alla punta frequentemente superiore a 10 Mpa.

✓ UNITA' V \equiv corrisponde all'intervallo più profondo (fino a 8+10 metri) dei depositi litorali costieri della trasgressione marina flandriana (6.000 anni?), generalmente costituita da sabbie più fini e con intervalli ancora limoso-argillosi. Risultano generalmente di moderato addensamento ($DR >45\%$), con resistenze alla punta che possono comunque superare anche i 6+8 Mpa.

✓ UNITA' VI \equiv comprende depositi alluvionali prevalentemente argillosi e plastici attribuibili alla piana di conoide alluvionale (precedenti alla trasgressione flandriana) e risultano caratterizzati da un grado di consistenza che aumenta progressivamente con la profondità (stato da normalconsolidazione a modesta sovraconsolidazione). Le resistenze alla punta ricavate dalle prove CPTe/CPTU (eseguite per lo studio di microzonazione) misurano una resistenza media alla penetrazione per lo spessore

attraversato di circa 2 Mpa. Le terebrazioni più profonde indicano uno spessore complessivo di questa unità di circa 20 metri;

✓ UNITA' VII \equiv comprende livelli sabbiosi alluvionali (con probabili ghiaie fini) risultate penetrabili dalla prova P4CPTU4, sebbene con valori di resistenza alla punta che superano i 20 MPa. Queste sabbie appaiono attribuibili all'apparato distributore del Tavollo, (paleo argine?), e risultano di scarso interesse dal punto di vista sismico (non offrono contrasti d'impedenza significativi) come dimostrato dalle registrazioni HVSR eseguite nella zona limitrofa.

✓ UNITA' VIII \equiv rappresenta lo spessore prevalentemente ghiaioso rilevato dalle terebrazioni più profonde al letto del materasso alluvionale, caratterizzato da abbondante matrice argillosa. Lo spessore medio risulterebbe di circa 7+10 metri, sebbene non si abbiano informazioni sufficienti sulla continuità o meno di questo intervallo ghiaioso verso est (fiume Tavollo); i sondaggi a monte del "berm", più a SE e le ricostruzioni geologiche delle sezioni 1-1' e 2-2' confermerebbero, comunque, la continuità laterale verso est.

✓ UNITA' IX \equiv costituisce il bedrock sismico marino pliocenico, costituito da argille e marne stratificate e sovraconsolidate. Nell'area di interesse ("Ambito M") appare raggiunto dalla terebrazione denominata P173PA190

In conclusione, la sezione geo-litologica (o se vogliamo litotecnica) "3-3'" evidenzia un contesto deposizionale più profondo (dal bedrock fino alla profondità di circa 8+10 m) sostanzialmente omogeneo, confermato dagli esiti geofisici (registrazioni HVSR), mentre nello spessore sovrastante si denota una netta demarcazione di facies deposizionale, che da tipico contesto di ambiente di cordone/spiaggia litorale, diviene verso ovest (poco oltre la prova P5CPTU5), passa a un contesto attribuibile al fronte deltizio del Torrente Conca.

6 Interpretazioni e incertezze

Lo studio di microzonazione sismica ha considerato che molte prove di repertorio risultano eseguite con attrezzature fuori standard (fornendo quindi esiti inutilizzabili o non interpretabili), oppure altre sono risultate troppo superficiali per poter essere pienamente usate per gli scopi del presente lavoro. Per questo motivo, i dati utilizzati sono quelli delle stratigrafie dei pozzi e dei sondaggi che hanno anche raggiunto, in pochi casi, il substrato marino, le CPT di maggior profondità (generalmente spinte oltre 10 metri, oppure giunte a “rifiuto” strumentale), le penetrometrie dinamiche standard (pesanti; leggere).

Tra le conoscenze pregresse, particolare importanza rivestono le prove geofisiche e geognostiche effettuate dalla Regione Emilia-Romagna, sebbene la descritta “down hole” (DH), eseguita nel foro del sondaggio “268010P503”¹⁵, non ha probabilmente raggiunto il bedrock per la presenza di un paleoalveo del Conca (posizione comunque marginale rispetto all'area di studio). Tra i dati pregressi, alcuni studi geologici più recenti hanno permesso la migliore caratterizzazione del sottosuolo dell’“Ambito M” (oggetto degli approfondimenti di terzo livello), in particolare l'indagine geologica espletata per la riqualificazione dell'area “ex hotel Linda”¹⁶ (con sondaggio a carotaggio continuo¹⁷ e prelievo di campioni indisturbati nei sedimenti argillosi sottostanti i depositi di piana costiera). Infine, i dati geognostici (prove CPTE/CPTU) e geofisici ricavati dalle indagini espletate per il Piano Operativo Comunale di Cattolica hanno consentito di raffinare la caratterizzazione soprattutto geofisica (distribuzione delle Vs nelle coperture della piana alluvionale; Vs del sottostante bedrock ottenute mediante prove Re.Mi.) e litotecnica (esiti delle prove penetrometriche CPTE/CPTU; prove di laboratorio su campioni prelevati da sondaggi), come già descritto nel capitolo 4.

Per quanto detto, risultano carenti soprattutto dati relativi alla zona costiera, in particolare mancano prove penetrometriche di tipo elettrico, in grado di caratterizzare con maggiore raffinatezza sia dal punto di vista tessiturale, sia dal punto di vista geotecnico, i sedimenti attraversati (come descritto nel paragrafo 4.2 e come meglio approfondiremo nei successivi capitoli). Le indagini penetrometriche elettriche eseguite per questo studio di microzonazione, sono state pertanto concentrate nella zona di massimo approfondimento (“Ambito M”), che ricade in buona parte nell'area costiera già definita di potenziale liquefacibilità.

Sul resto del territorio urbanizzato e urbanizzabile, sono state eseguite ulteriori indagini geofisiche, in particolare registrazioni del rumore sismico passivo con tecnica HVSR. La scelta di tale tipologia di prova è stata soprattutto imposta dal contesto di intensa urbanizzazione che caratterizza l'area

¹⁵ Sigla identificativa della B/D regionale, il sondaggio è stato rinominato “P75584” nel database predisposto per questo lavoro di microzonazione

¹⁶ Relazione Geologica a cura dello Studio Methodo s.r.l., 2002

¹⁷ Sondaggio rinominato “P47550”

studiata (in particolare la zona costiera) e che ostacola altre soluzioni d'indagine; gli esiti delle prove HVSR sono stati comunque confrontati e "tarati" con i dati geofisici di riferimento pregressi già descritti.

In conclusione, le indagini pregresse e quelle realizzate ex novo per lo studio di microzonazione hanno consentito una modellazione del sottosuolo esaustiva per le zone oggetto degli studi di risposta sismica locale semplificata (secondo livello e terzo livello espletato nell'"Ambito M"), come già spiegato nel capitolo 5, sebbene non si abbiano a disposizione molti dati diretti sulla profondità del bedrock sismico. Occorre precisare che le due sezioni geotecniche di riferimento (1-1', 2-2' e 3-3') evidenziano intervalli granulari (sabbie ghiaiose) di potenza metrica, intercalati ai sedimenti fini prevalentemente argillosi: questi spessori, non raggiunti dalle prove penetrometriche appaiono di scarso significato dal punto di vista della risposta sismica locale; le indagini HVSR ben evidenziano soltanto i picchi di amplificazione riconducibili al tetto del substrato pliocenico nel range di frequenze comprese tra 1,2 Hz e circa 2,0 Hz. A tal proposito, risulta particolarmente interessante la distribuzione di tali "picchi" di amplificazione¹⁸: nella porzione centrale del territorio di Cattolica le registrazioni HVSR hanno evidenziato amplificazioni del segnale sismico a frequenze lievemente più basse (1,2 Hz) e tale esito può essere così interpretato:

- ad un modesto approfondimento del bedrock marino, eroso da un paleoalveo del Conca o del tavolo;
- ad una zona priva dello spessore ghiaioso sovrastante il bedrock, che in parte "nasconde" il tetto del substrato roccioso marino pliocenico e che tenderebbe a "shiftare" a frequenze leggermente più elevate (fino a 2 Hz?) gli esiti delle registrazioni HVSR. Tali ghiaie, evidenziate anche nelle sezioni geologiche 1-1', 2-2' e nella sezione 3-3' (capitolo 5) sono ovviamente riconducibili ai due principali apparati distributori e cioè il Conca e il Tavollo.

Ad ogni modo, come spiegato nel successivo capitolo 7, gli esiti delle indagini consentono una corretta classificazione semplificata (secondo livello) anche per questa porzione di territorio comunale, sebbene manchino dati diretti (sondaggi profondi fino a raggiungere il bedrock).

Per ulteriori considerazioni sui dati geotecnici e geofisici, sulle interpretazioni derivate, si rimanda ai capitoli 4 e 5 e alle successive considerazioni riportate nei capitoli seguenti.

¹⁸ Gli esiti sono riportati nella <<Carta delle frequenze naturali dei terreni>> elaborata per questo studio.

7 Metodologie di elaborazione e risultati

7.1 Risposta sismica locale di secondo livello

7.1.1 I fattori di amplificazione considerati

Per i depositi e le forme che possono determinare effetti locali si è fatto riferimento agli Allegati della deliberazione dell'Assemblea Legislativa della regione Emilia-Romagna n.112 del 2 maggio 2007 (DAL 112/2007). La delibera regionale propone la definizione semiquantitativa degli effetti di amplificazione locale semplificata (secondo livello di approfondimento) per le aree urbane e urbanizzabili comprese <<nelle aree pianeggianti o sub-pianeggianti, incluse le zone di fondovalle appenniniche, con stratificazione orizzontale e sub-orizzontale, e sui versanti con acclività $\leq 15^\circ$, in cui il deposito ha spessore costante>>.

Per le aree stabili suscettibili di amplificazione, l'amplificazione è stata quantificata secondo i seguenti parametri FA riferiti alla superficie:

- FA_{PGA} → 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;
- FA_{SI} - Intensità spettrale di Housner → indicatore della pericolosità sismica, è definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità, nel nostro caso si sono determinati i fattori di amplificazione per i due intervalli di frequenze, rispettivamente da $0.1 < T_0 < 0.5$ s e da $0.5 < T_0 < 1$ s ($FA_{0,1-0,5s}$ e $FA_{0,5-1s}$)

I fattori di amplificazione sopra descritti, sono desunti dagli abachi riportati nella DAL 112/2007 (Allegato A2), riferiti a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche che tengono conto delle caratteristiche litologiche e morfologiche e della profondità del bedrock sismico.

Le variabili fondamentali, da inserire nelle tabelle per la stima dell'amplificazione locale sono state, pertanto, la velocità equivalente delle onde di taglio nel sottosuolo e gli spessori dei sedimenti superficiali che possono amplificare il moto sismico e/o la profondità del bedrock sismico. La scelta del macro contesto morfologico-stratigrafico è stata inoltre giustificata, come vedremo, dagli esiti delle indagini geofisiche di registrazione dei microtremiti sismici con tecnica HVSR espletati nel territorio comunale.

7.1.2 Esiti della microzonazione di secondo livello

Il contesto geologico, già descritto nel capitolo 3 e basato sui dati forniti dalla regione Emilia-Romagna

(stratigrafie di sondaggi e sezioni litostratigrafiche), evidenza come la successione della Formazione a Colombacci/Argille azzurre del Pliocene inferiore, nella fase traslativa del Pliocene inferiore, si impila lungo il margine romagnolo con immersione assiale circa NW, sotto le strutture frontali della catena, mentre il contesto litostratigrafico meno profondo, rappresentato nelle sezioni 1-1' e 2-2' (§ figura 5.1), indica una profondità del bedrock marino che risulterebbe pari a circa 35 metri dal p.c. a ridosso della linea di costa, mentre verso sud (cioè nell'entroterra) la profondità rispetto al piano campagna si spinge fino a circa 50 m.

Le coperture sovrastanti il bedrock sono costituite dai depositi alluvionali di conoide degli apparati distributori Conca, Tavollo e in minor misura anche Ventena. Si tratta di depositi per lo più fini (argille e limi) con intervalli sabbioso ghiaiosi di modesta potenza (alcuni metri). Nella zona di costa, ben delimitata dalla scarpata di "berm" olocenica (§ paragrafo 3.3), l'assetto morfologico induce un minore approfondimento relativo del bedrock che viene collocato a circa -35 m. Occorre segnalare che in prossimità dell'attuale foce del Conca le terebrazioni più profonde (es. sondaggio "268010P503" della Regione Emilia-Romagna) spinto fino a 48 metri di profondità non ha raggiunto il bedrock, probabilmente per un locale approfondimento indotto dalla presenza di un paleoalveo del Conca; tale zona rimane comunque al limite dell'area di studio.

Nell'area di studio, il bedrock risulta affiorante nel rilievo isolato di Monte Vici ("Torre Conca"), che appare come residuale di una demolizione del substrato marino operata dall'azione combinata del Ventena, del Conca e del moto costiero.

Sulla base di questo ulteriore inquadramento, rispetto a quanto già descritto nel capitolo 3, gli esiti delle indagini geofisiche hanno permesso di discriminare il territorio studiato in zone omogenee dal punto di vista della risposta sismica locale, rappresentate cartograficamente nella <<Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica>> (in breve: carta delle MOPS) elaborata per questo studio. Tralasciando la zona costiera a valle del "Berm" olocenico, che per le sue caratteristiche di "instabilità sismica" legata alla possibilità di liquefazione è stata oggetto di ulteriori approfondimenti di terzo livello, il territorio studiato è stato oggetto di una microzonazione semplificata (secondo livello) così giustificata:

1. Il Monte Vici, è costituito da bedrock pliocenico affiorante di modesta rigidità, come dimostrano le indagini geofisiche messe a disposizione dalla Regione Emilia-Romagna a ridosso dell'Autostrada ma fuori dei confini di Cattolica (hanno fornito velocità di taglio delle onde sismiche – Vs - nei primi 30 m di poco superiori a 400 m/s) e come dimostrano le indagini geofisiche del POC di Cattolica (L1REMI1; L3REMI3), stimano la Vs del bedrock di poco superiore a 450 m/s (figura 7.1).

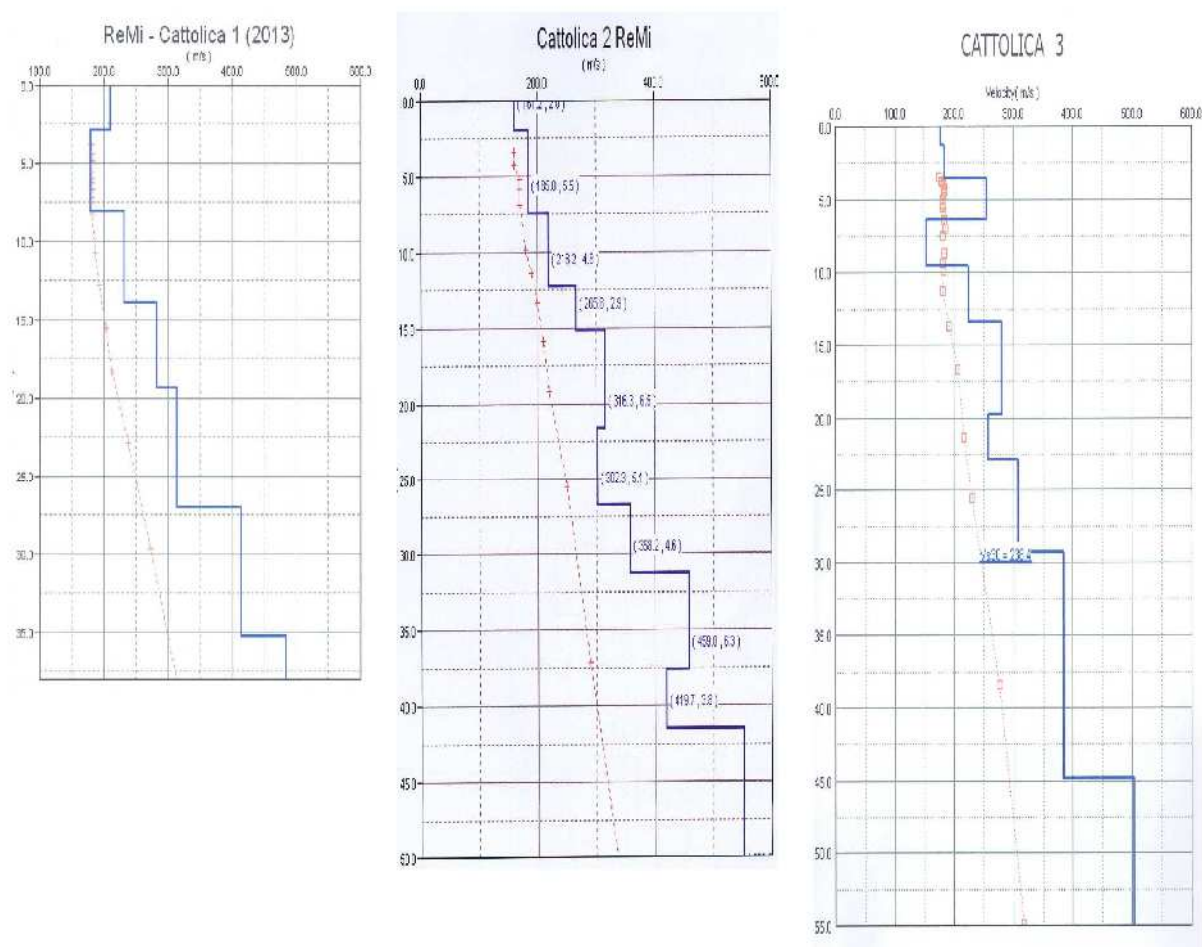


Figura 7.1– Distribuzione delle Velocità delle onde di taglio V_s ricavate dagli stendimenti geofisici eseguiti nella porzione di territorio di "piana alluvionale" (da sinistra a destra: L1REMI2, L2REMI2, L3REMI3).

Sul bedrock affiorante è stata eseguita una registrazione dei microtremori sismici HVSR (figura 7.2), che ha evidenziato una traccia dello spettro H/V relativamente piatta, sebbene con rapporto che si mantiene superiore a 1 a dimostrazione della blanda amplificazione di tale substrato.

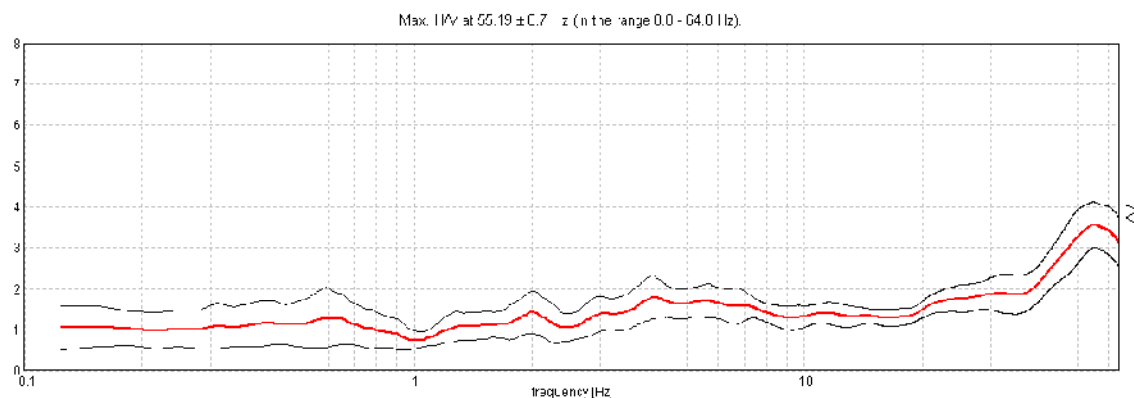


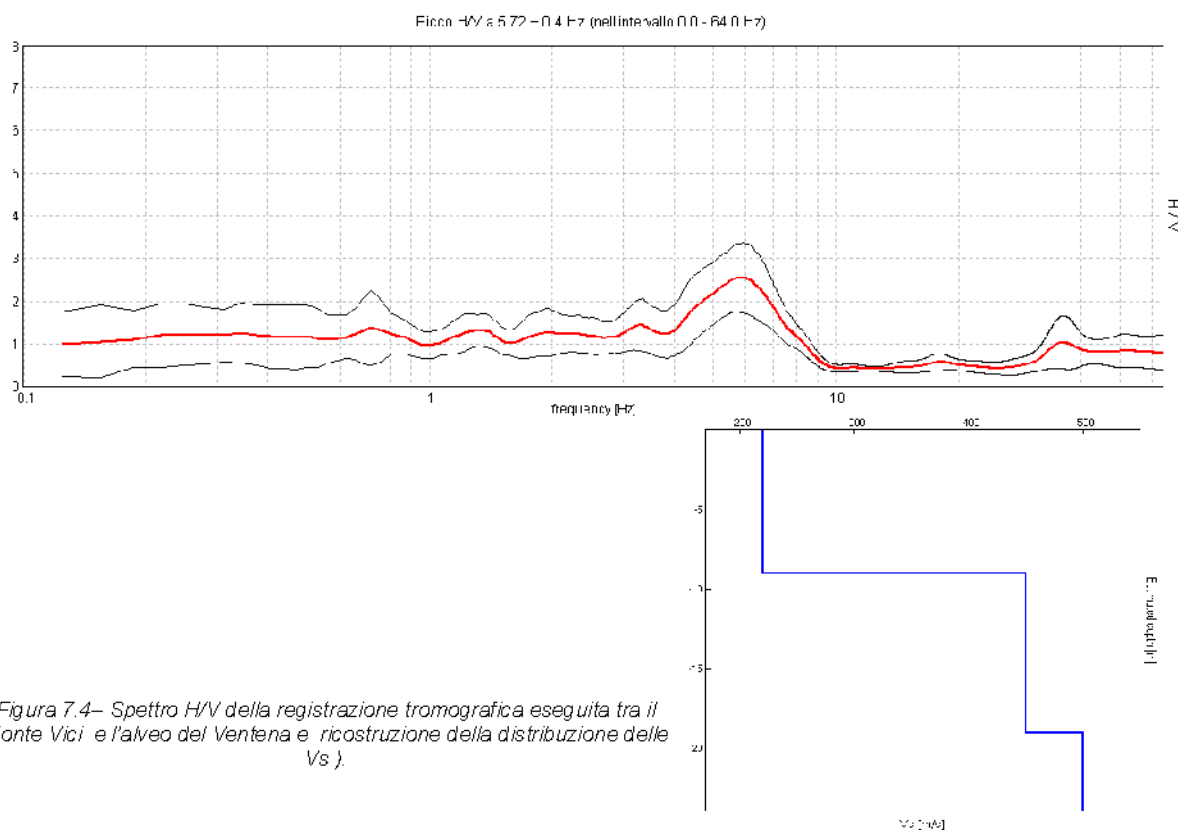
Figura 7.2– Spettro H/V della registrazione tromografica eseguita sul Monte Vici (bedrock marino affiorante – "Formazione a Colombacci").

In conclusione, le piccole porzioni di aree urbanizzate di Cattolica ("Zona 5" e "Zona 6" della carta delle MOPS), situate in contesto di bedrock affiorante sono state così caratterizzate dal punto di vista della risposta sismica locale semplificata (DAL RER 112/2007 – Allegato 2):

Vs30	Contesto morfologico	F.A. PGA	F.A. S.I. (0,1s<T ₀ <0,5s)	F.A. S.I. (0,5s<T ₀ <1s)
450	Substrato marino caratterizzato da Vs <800 m/s affiorante	1,4	1,4	1,5

Per le aree in oggetto, non si sono riscontrate particolari condizioni di amplificazione indotte da effetti della topografia.

- Nella piccola area urbanizzata¹⁹ situata tra Monte Vici e l'aveo attuale del Ventena, le indagini geognostiche di repertorio (due prove DPSH) e una registrazione dei microtremori HVSR indicano la presenza di un forte contrasto di impedenza a circa 5,7 Hz (figura 7.3), dovuto probabilmente al bedrock sepolto da coperture alluvionali di modesta potenza. Lo spessore delle coperture, sulla base dei dati penetrometrici e degli esiti della tomografia è stimata pari a circa 9 metri. La figura 7.4 riporta la ricostruzione della distribuzione delle Vs sulla base della prova HVSR.



In conclusione, questa piccola porzione di superficie urbanizzata ("Zona 4" della carta delle

¹⁹ Si tratta di un piazzale a parcheggio e di alcune case sparse.

MOPS) è stata così caratterizzata dal punto di vista della risposta sismica locale semplificata (DAL RER 112/2007 – Allegato 2):

H	VsH	Contesto morfologico	F.A. PGA	F.A. S.I. (0,1s<To<0,5s)	F.A. S.I. (0,5s<To<1s)
10	200	Margine Appenninico-Padano con substrato marino caratterizzato da Vs <800 m/s	2,3	2,2	1,6

Per quest'area, non si sono riscontrate particolari condizioni di amplificazione indotte da effetti della topografia.

- La restante porzione di piana di conoide ("Zona 2" e "Zona 3" della carta delle MOPS) è caratterizzata da coperture alluvionali sovrastanti il bedrock sismico di potenza variabile da 40 a 50 metri. Oltre ai dati diretti forniti dai sondaggi che hanno raggiunto il bedrock, il contesto litostratigrafico così definito è desunto anche dalle numerose registrazioni dei microtrempi con tecnica HVSR eseguite. Tutte le tromografie evidenziano picchi di amplificazione a frequenze comprese tra 1,2 Hz e 2,0 Hz (figura 7.5), riconducibili al tetto del bedrock marino pliocenico (riflettore sismico più significativo).

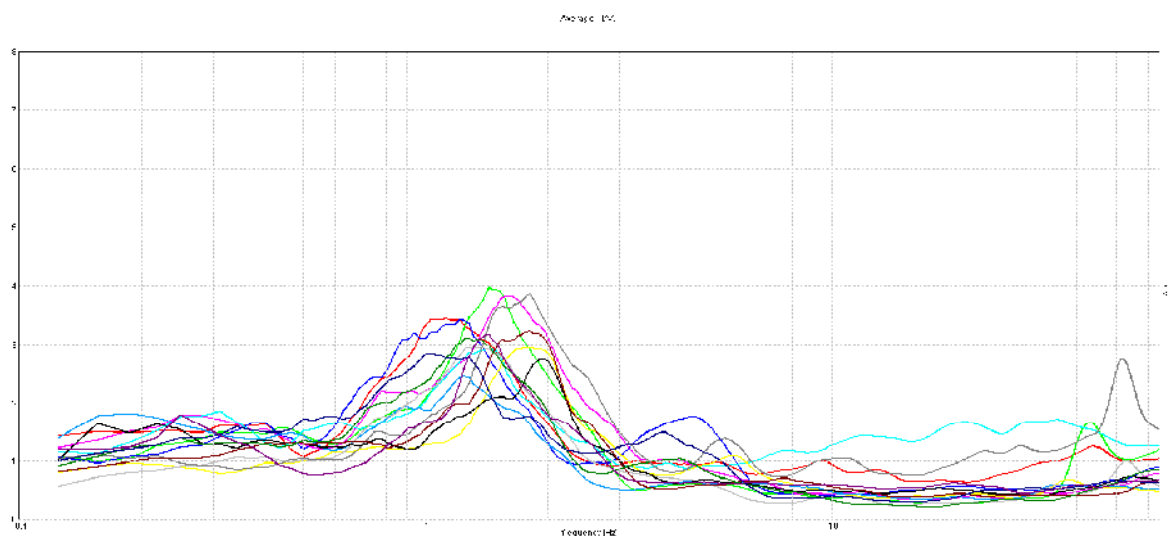


Figura 7.5– Sovrapposizione degli spettri H/V ricavati dalle registrazioni tromografiche eseguite nel contesto di piana alluvionale di Cattolica (a monte del "berm" olocenico)

A tal proposito risulta particolarmente interessante anche la distribuzione di tali "picchi" di amplificazione²⁰: nella porzione centrale del territorio di Cattolica le registrazioni HVSR hanno evidenziato amplificazioni del segnale sismico a frequenze lievemente più basse (1,2 Hz) e tale esito può essere così interpretato:

- ad un modesto approfondimento del bedrock marino, eroso da un paleoalveo del Conca o

²⁰ Gli esiti sono riportati nella <<Carta delle frequenze naturali dei terreni>> elaborata per questo studio.

del tavolo;

- ad una zona priva dello spessore ghiaioso sovrastante il bedrock, che in parte “nasconde” il tetto del substrato roccioso marino pliocenico e che tenderebbe a “shiftare” a frequenze leggermente più elevate (fino a 2 Hz?) gli esiti delle registrazioni HVSR. Tali ghiaie, evidenziate anche nelle sezioni geologiche 1-1', 2-2' e nella sezione 3-3' (capitolo 5) sono ovviamente riconducibili ai due principali apparati distributori, e cioè il Conca e il Tavollo.

Ad ogni modo, gli esiti delle indagini tomografiche, in particolare lo spettro H/V, indicano una marcata amplificazione (alto contrasto di impedenza) a tali frequenze, con ampiezze del segnale HVSR ≥ 3 . Pertanto, si può attribuire queste zone al contesto di “Margine Appenninico-Padano” con spessore delle coperture $H = 40$ m: questa classificazione appare la più rappresentativa e cautelativa per le zone in questione. La distribuzione equivalente delle velocità delle onde sismiche di taglio, è stimata sulla base delle indagini geofisiche (Re.Mi.) eseguite per il POC di Cattolica (figura 7.1). In conclusione, la “zona 2” e la “zona 3” della piana di conoide di Cattolica (vedi carta delle MOPS) sono state così caratterizzate dal punto di vista della risposta sismica locale semplificata (DAL RER 112/2007 – Allegato 2):

H	VsH	Contesto morfologico	F.A. PGA	F.A. S.I. (0,1s<To<0,5s)	F.A. S.I. (0,5s<To<1s)
40	300	Margine Appenninico-Padano con substrato marino caratterizzato da Vs < 800 m/s	2,0	2,3	2,8

Anche per queste zone, non si sono riscontrate particolari condizioni di amplificazione indotte da effetti della topografia.

7.2 Approfondimenti di terzo livello per l'“Ambito M”: la modellazione numerica di risposta sismica locale

7.2.1 Aspetti generali

Il contesto di pericolosità sismica della piana costiera di Cattolica, legata alla propensione alla liquefazione dei sedimenti, impone approfondimenti sismici che consentano anche la valutazione più accurata della risposta sismica locale (RSL) finalizzata a quantificare anche gli effetti di amplificazione indotti da sisma. In accordo con l'Amministrazione comunale, si è pertanto deciso di espletare delle analisi di modellazione numerica della RSL dell'“Ambito M”, che comprende parte della zona urbanizzata più prossima alla costa, in gran parte occupata da strutture alberghiere. In particolare, sulla base degli esiti del modello geologico dell'“Ambito M” già descritto nel capitolo 5 (vedi sezione 3-3'), sono stati elaborati due specifici modelli numerici di risposta sismica locale, i cui esiti verranno di seguito esposti e che sono stati rispettivamente distinti con la sigla “Cattolica 1” e “Cattolica 2”. La figura 7.6 ripropone la sezione 3-3': il modello “Cattolica 1” è rappresentativo del contesto di

sottosuolo che caratterizza la porzione ovest dell'“Ambito M” ove i sedimenti meno profondi (fino a circa 10 metri) sono attribuibili a facies deposizionale di delta del torrente Conca; il modello “Cattolica 2” è invece rappresentativo della porzione costiera centrale dell'“Ambito M” ove i sedimenti meno profondi (8 metri circa) sono attribuibili a facies deposizionale di cordone marino e spiaggia.

Si rammenta che per la porzione più orientale dell'Ambito, ricadente in un contesto di <<zona stabile suscettibile di amplificazione>>, si è ritenuto sufficiente elaborare una stima dei parametri di amplificazione semplificata (§ 7.1).

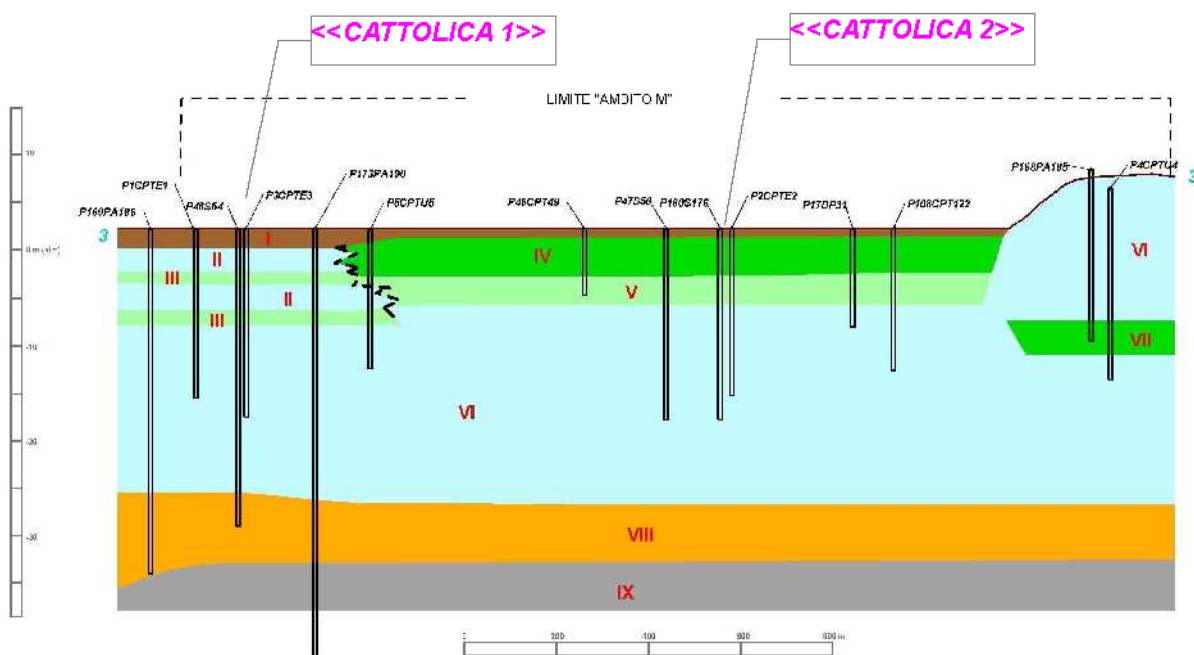


Figura 7.6– Sezione 3-3' ed estrapolabilità della modellazione numerica di risposta sismica locale di terzo livello per l'area oggetto di approfondimenti sismici ("Ambito M")

Per la modellazione numerica ci si è basati sul noto codice di calcolo "SHAKE 2000", un programma 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.

Le elaborazioni numeriche sono state impostate sui tre accelerogrammi di riferimento, forniti dalla regione Emilia-Romagna, selezionati dalla Banca Dati accelerometrica ISED attraverso una procedura che valuta la similarità tra la forma spettrale di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei segnali. La Regione Emilia-Romagna fornisce anche lo spettro di risposta normalizzato (10% di probabilità di superamento in 50 anni, sulla base di dati INGV) e la PGA anch'essa normalizzata per ogni Comune.

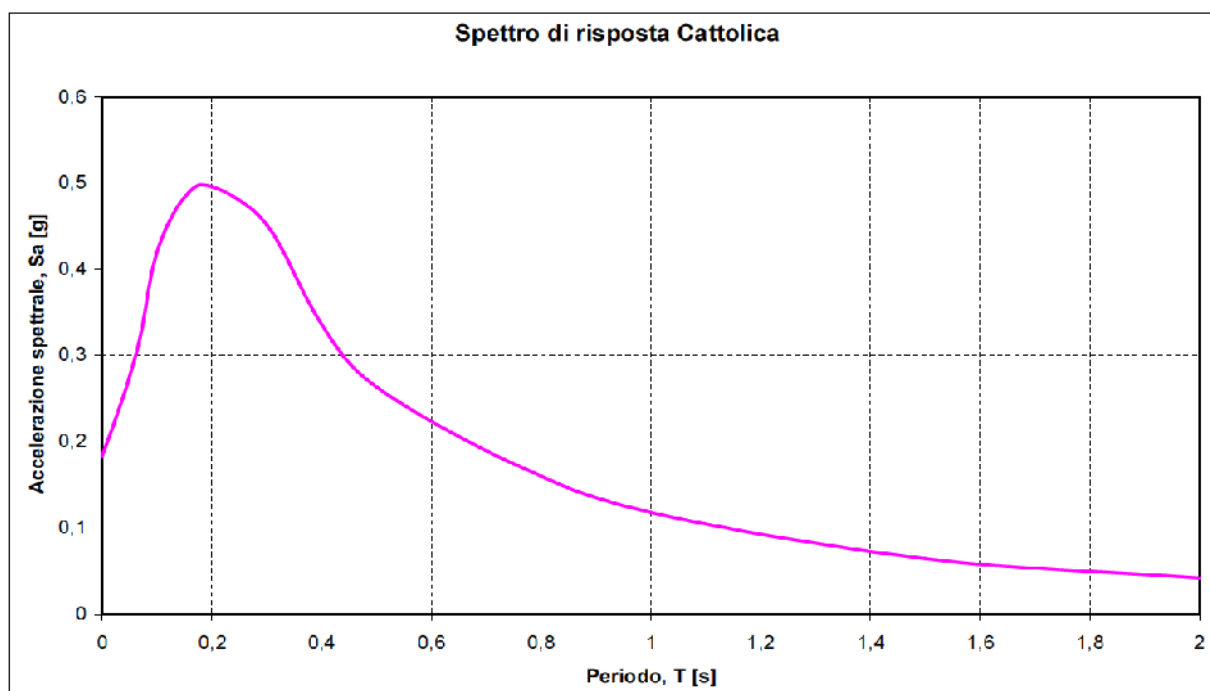


Figura 7.7 – Spettro di risposta normalizzato per il comune di Cattolica fornito dalla Regione Emilia-Romagna e riferito a suolo rigido (10% di probabilità di superamento in 50 anni)

È così possibile ricavare lo spettro di risposta (figura 7.7) e gli accelerogrammi di riferimento, ossia scalati per ogni Comune. Si tratta di tre tipologie di segnali, già “scalati” per il territorio comunale a cui si riferiscono e sono rappresentati dai tre differenti accelerogrammi di progetto riprodotti della figura 7.8 ovvero:

- 1) impulsivo
- 2) con ampio contenuto in frequenze
- 3) con componente predominante alle alte frequenze.

La verifica monodimensionale dell’amplificazione locale tramite l'utilizzo del software SHAKE 2000 consente di determinare i parametri di amplificazione richiesti dalla DAL regionale 112/2007 ovvero FA (PGA), FA $Sl_{0,1-0,5s}$ e FA $Sl_{0,5-1s}$ (già descritti precedente paragrafo 7.1.1). Il programma consente inoltre l'elaborazione di 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” sono utilizzati nell'ambito della progettazione per la verifica sismica delle strutture.

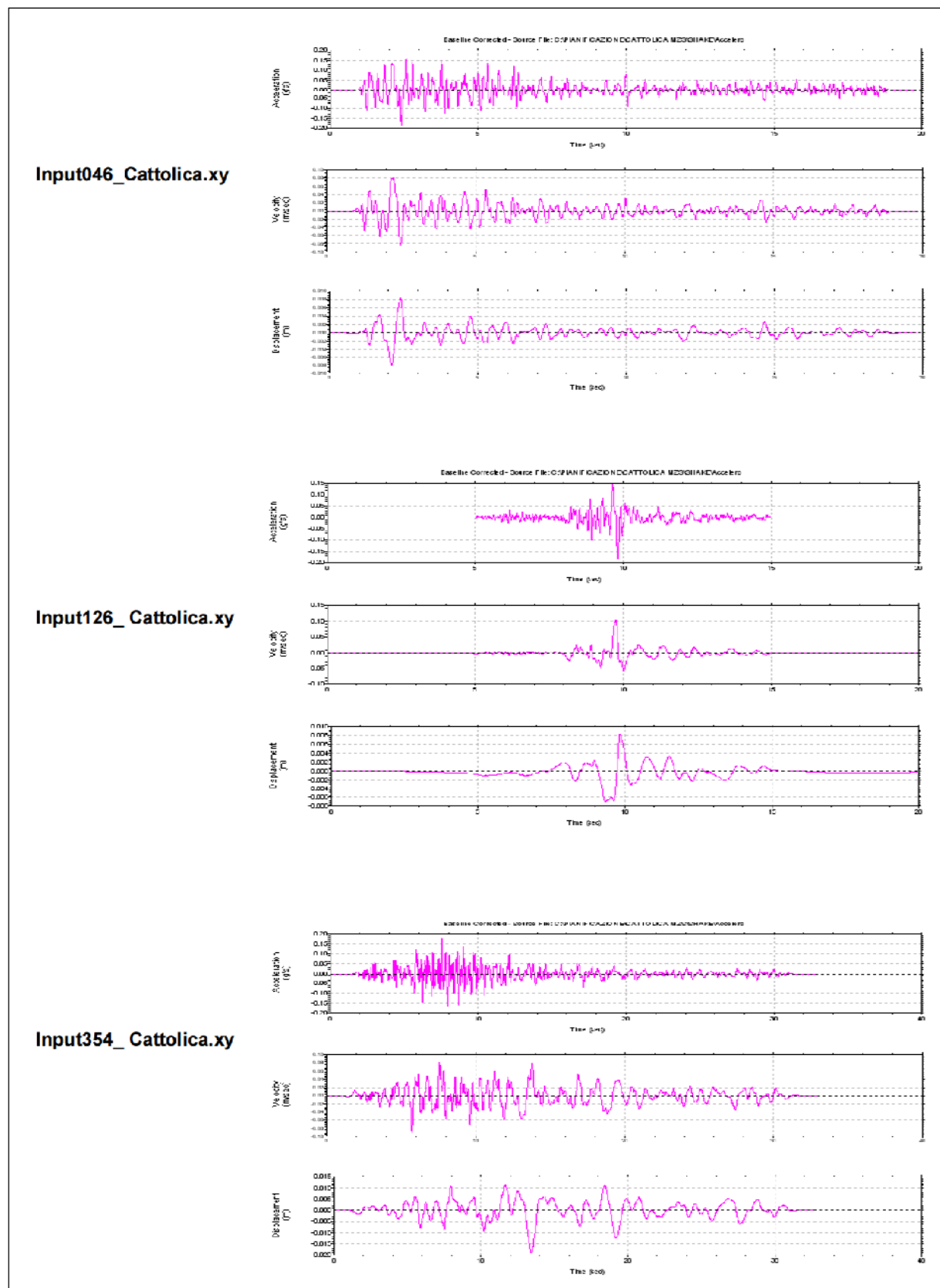


Figura 7.8- Accelerogrammi di riferimento per il Comune di Cattolica e utilizzati per la modellazione numerica espletata con SHAKE 2000

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), e spostamento spettrale (SD).

- Il primo spettro ottenuto riguarda la PSA. Nel grafico viene mostrato il comportamento dell'accelerazione spettrale attraverso i diversi strati che compongono la colonna litologica tipo, utilizzata nella modellazione per diversi valori di periodo, da 0 a 4 secondi (valori equiparabili ad edifici di altezza variabile da un piano fino a torri molto alte).
- Il secondo spettro ottenuto riguarda la PSV, ossia la pseudovelocità. Questo grafico mostra il comportamento della velocità spettrale, in funzione del periodo compreso tra 0 e 4 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. 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 è relativo al parametro SD. Nelle figure si evidenzia il comportamento dello spostamento spettrale in funzione del periodo compreso fino a 10 secondi. Lo spostamento spettrale SD è un parametro utilizzato per la valutazione del danno strutturale a cui è soggetta una costruzione dopo il sisma.

7.2.2 Il modello numerico "Cattolica 1"

Il modello "Cattolica 1" elaborato sulla base della modellazione geologica già descritta e implementando i sismostrati riportati nella figura 7.9. Il bedrock sismico è stato impostato a 35 m di profondità dal p.c., al tetto del substrato marino pliocenico, sebbene come già evidenziato, le Velocità delle onde di taglio sottostanti tale quota risultino certamente inferiori a 800 m/s.

La modellazione ha consentito la valutazione dell'amplificazione locale intesa come rapporto PGA/PGA_0 ossia come rapporto dell' ag_{max} al suolo (calcolata con SHAKE 2000) rispetto all' ag_{refg} al suolo rigido FA (PGA). Si rammenta che per il Comune di Cattolica la DAL 112/2007 (allegato A4) attribuisce una ag_{refg} al suolo rigido pari a 0,183g.

Gli esiti dimostrano, ovviamente, discrepanze fra le risposte del modello di sottosuolo in relazione ai diversi input sismici assegnati: il rapporto PGA/PGA_0 più cautelativo al suolo è ottenuto con l'input 354: la ag di picco ricavata al suolo risulta infatti pari a 0,31g (figura 7.10) con un $FA(PGA) = 1,7$.

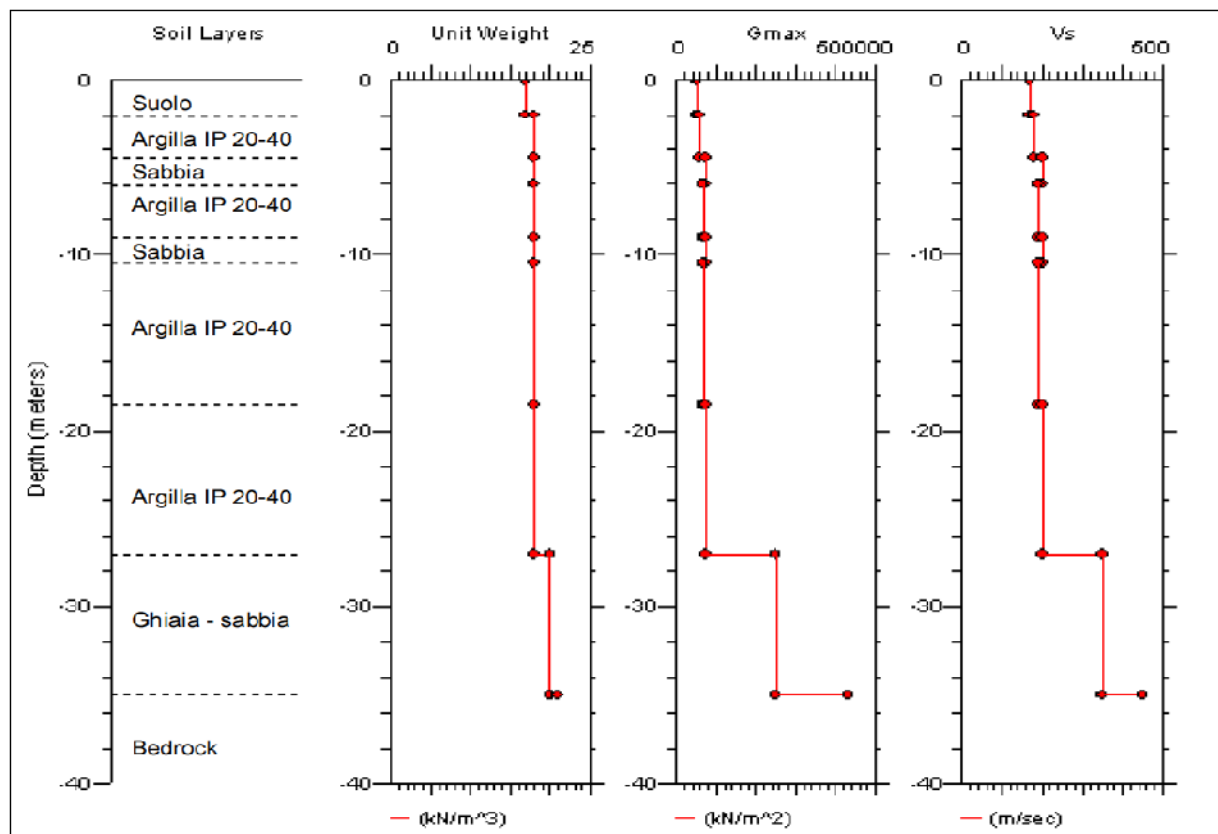


Figura 7.9 – Modellazione stratigrafica di riferimento utilizzata per la modellazione sismica con SHAKE2000 "Cattolica 1".

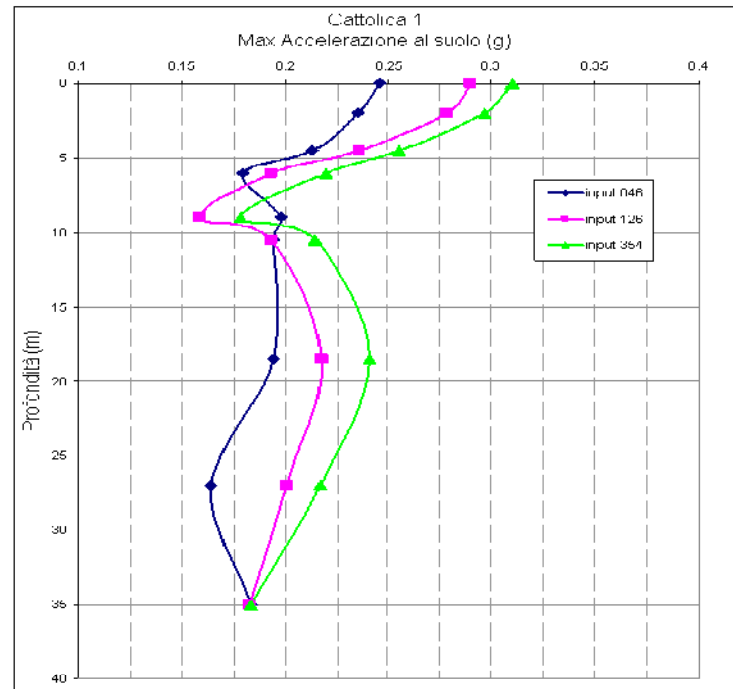


Figura 7.10 – Distribuzione delle accelerazioni orizzontali di picco per i tre input sismici di riferimento (modello "Cattolica 1").

Per quanto riguarda la stima dell'intensità spettrale di Housner (SI), intesa come rapporto fra gli spettri PSV al suolo e PSV al bedrock, la modellazione espletata con SHAKE 2000 ha permesso di ricavare i

seguenti parametri di amplificazione nei due intervalli temporali considerati, rispettivamente di 0,1s + 0,5s e 0,5s + 1,0s (figura 7.11):

INPUT_046_Cattolica.xy

F.A. SI/SI0 [0.1s-0.5s] = 1,5

F.A. SI/SI0 [0.5s-1.0s] = 3,2

INPUT_126_Cattolica.xy

F.A. SI/SI0 [0.1s-0.5s] = 1,5

F.A. SI/SI0 [0.5s-1.0s] = 4,1

INPUT_354_Cattolica.xy

F.A. SI/SI0 [0.1s-0.5s] = 1,4

F.A. SI/SI0 [0.5s-1.0s] = 3,1

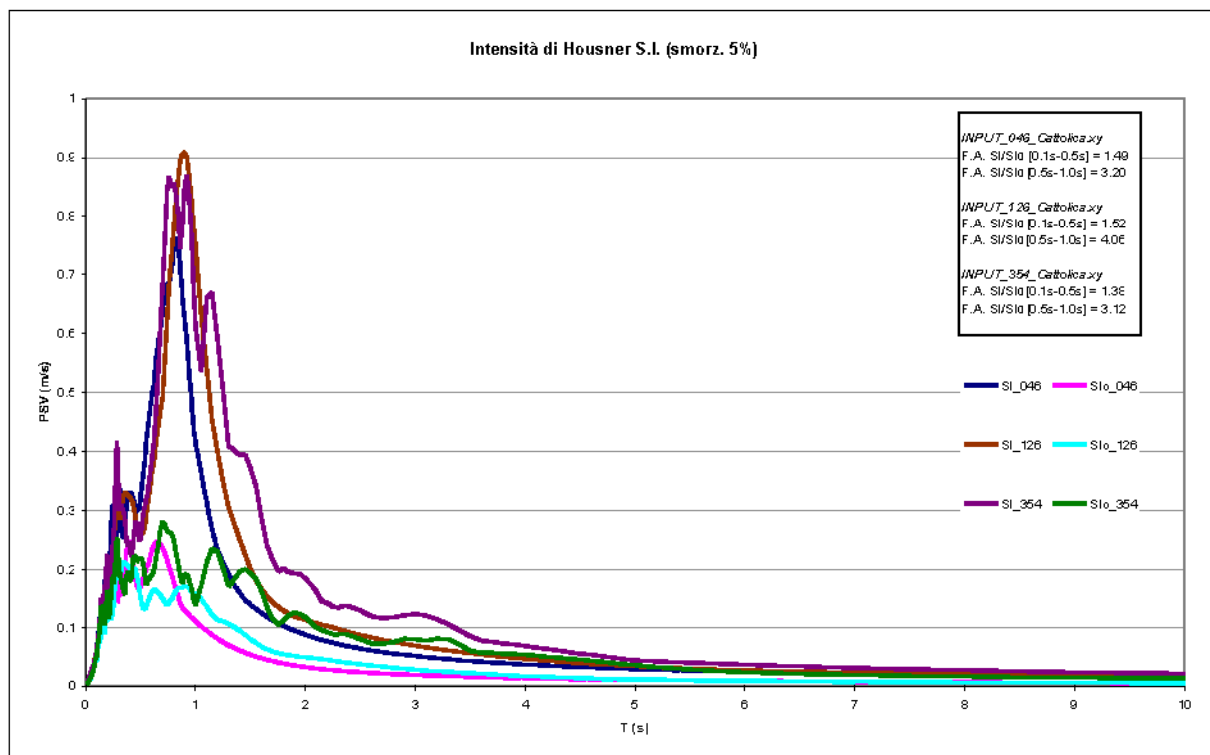


Figura 7.11 – Intensità di Housner SI riferite al bedrock e al suolo per i tre input sismici di riferimento (modello "Cattolica 1").

Il software SHAKE 2000 consente la valutazione della risposta sismica locale anche in funzione delle amplificazioni del moto di vibrazione (frequenze dell'impulso sismico), considerando i fattori di smorzamento D e i rapporti tra le impedenze sismiche dei sismostrati. La variazione del fattore di amplificazione con la frequenza definisce la funzione di amplificazione $A(f)$ della colonna sismostratigrafica. Il moto sismico può dunque essere amplificato in corrispondenza di determinate frequenze, corrispondenti alle frequenze naturali f_n di vibrazione della colonna stratigrafica (figura 7.12). In questo senso, molto importante risulta la prima frequenza naturale di vibrazione f_1 (indicata

anche come f_0), denominata frequenza fondamentale, in corrispondenza della quale la funzione di amplificazione assume un valore massimo.

Dalle funzioni di amplificazione ricavate dalle elaborazioni sui tre input, risulta che la frequenza fondamentale assume un valore locale pari a circa 1,1÷1,15 Hz. Un'ulteriore possibile risonanza si ottiene a 3,2÷3,4 Hz, sebbene tale amplificazione risulti poco significativa:

$F_0 = 1,10\div1,15 \text{ Hz} \rightarrow \text{amplificazione} = 2,4$

$F_1 = 3,2\div3,4 \text{ Hz} \rightarrow \text{amplificazione} = 1,2$

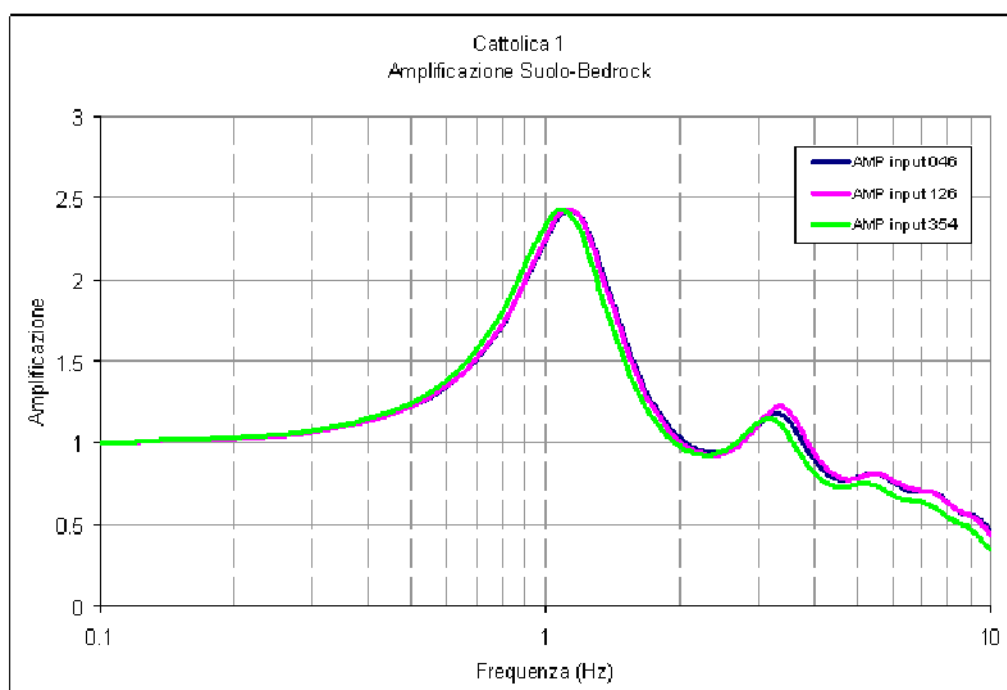


Figura 7.12 – Funzione di trasferimento del moto oscillatorio del sisma lungo tutta la colonna litologica tipo per ogni input sismico di riferimento (modello "Cattolica 1")

Si precisa che la modellazione numerica elaborata dal software SHAKE 2000 è stata limitata alla stima dell'amplificazione entro i 10 Hz, limite più utile ai fini ingegneristici per le analisi delle interazioni sottosuolo/strutture.

La figura 7.13a e 7.13b riportano, infine, gli spettri di risposta sismica locale in termini di PSA, PSV e SD (§ paragrafo 7.2.1) ancora ottenuti rispetto ai tre input sismici di riferimento.

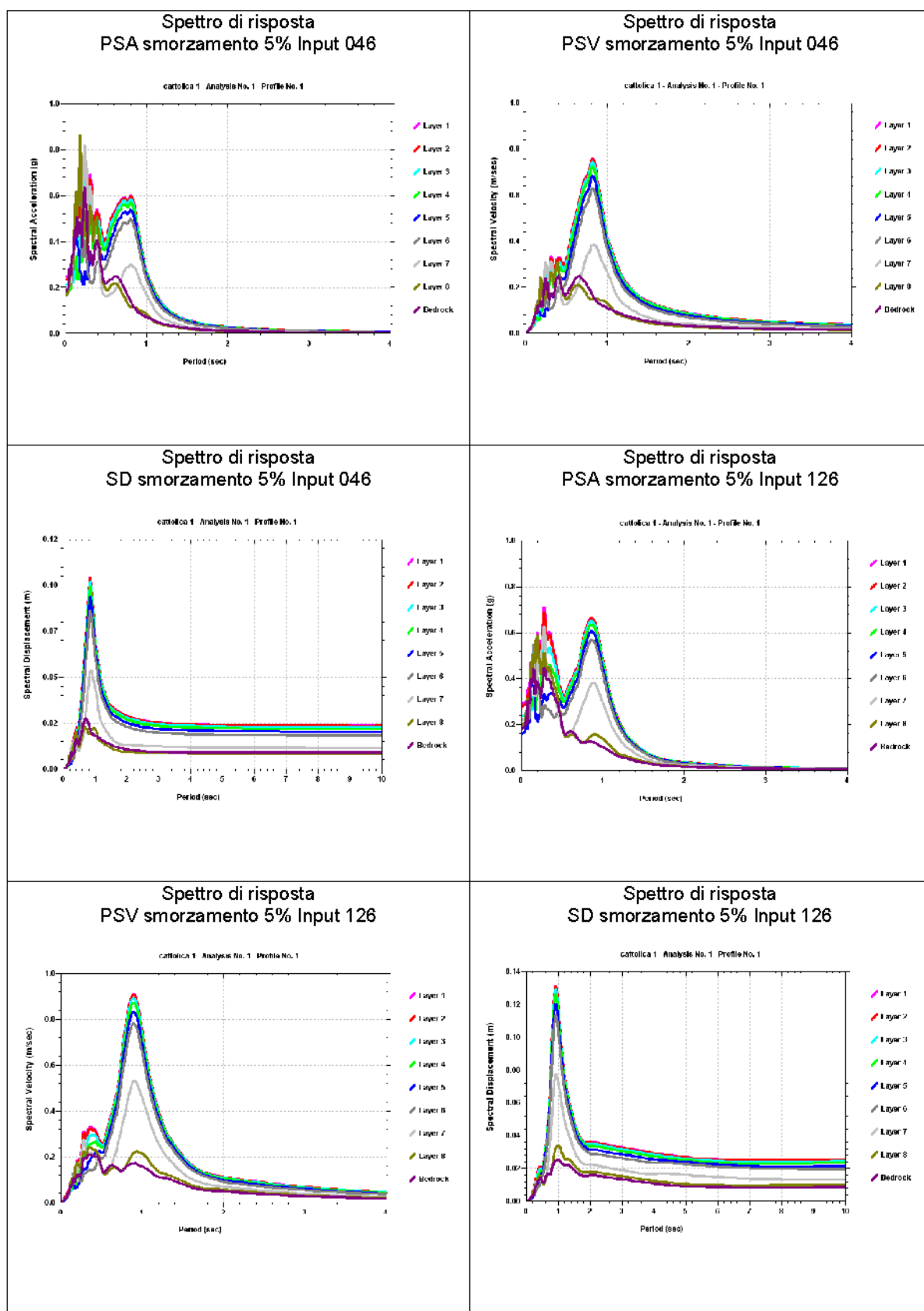


Figura 7.13a – Spettri di risposta sismica locale (modello "Cattolica 1")

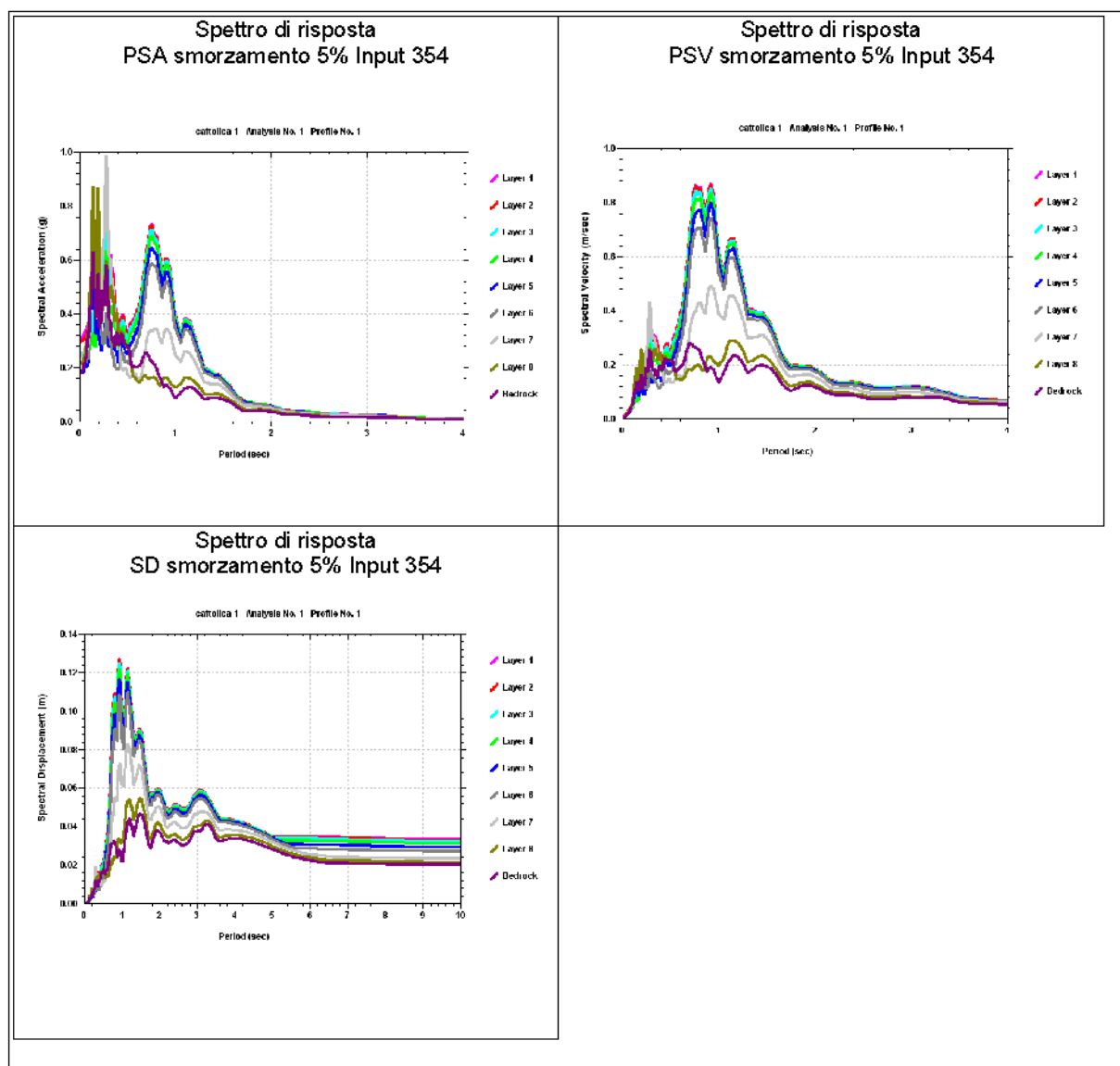


Figura 7.13b – Spettri di risposta sismica locale (modello “Cattolica 1”)

7.2.3 Il modello numerico “Cattolica 2”

Il modello “Cattolica 2” elaborato sulla base della modellazione geologica già descritta e implementando i sismostrati riportati nella figura 7.14. Anche in questo caso, il bedrock sismico è stato impostato a 35 m di profondità dal p.c., al tetto del substrato marino pliocenico. Per questo secondo modello, la valutazione dell'amplificazione locale intesa come rapporto PGA/PGA_0 ossia come rapporto dell' ag_{max} al suolo (calcolata con SHAKE 2000) rispetto all' ag_{refg} al suolo rigido FA (PGA), evidenzia le solite discrepanze fra le risposte del modello di sottosuolo in relazione ai diversi input sismici assegnati: il rapporto PGA/PGA_0 più cautelativo al suolo è ottenuto in questo caso dall'input 126, sebbene per poche frazioni: la ag di picco al suolo risulta pari a 0,30g (figura 7.15) con FA (PGA) =1,6.

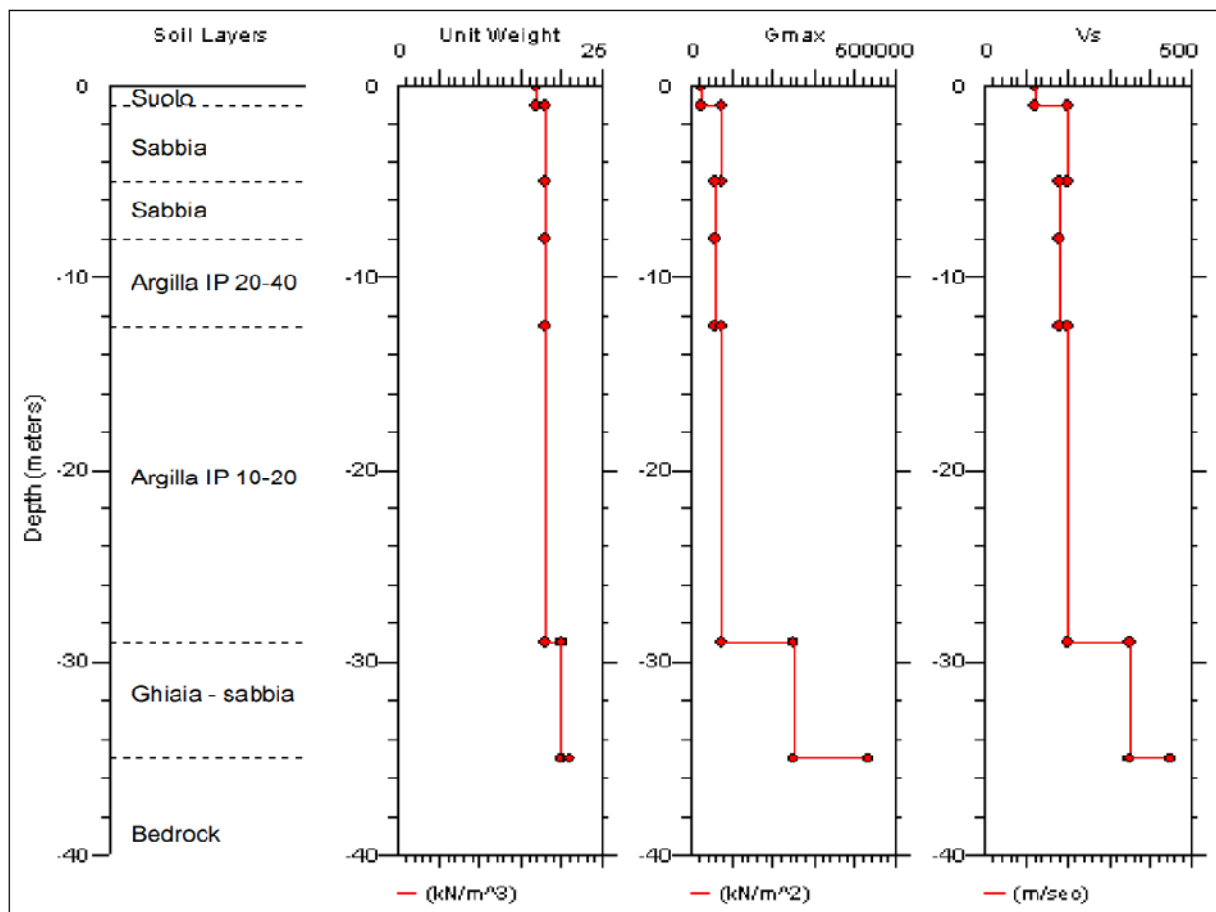


Figura 7.15– Modellazione stratigrafica di riferimento utilizzata per la modellazione sismica con SHAKE2000 "Cattolica 2".

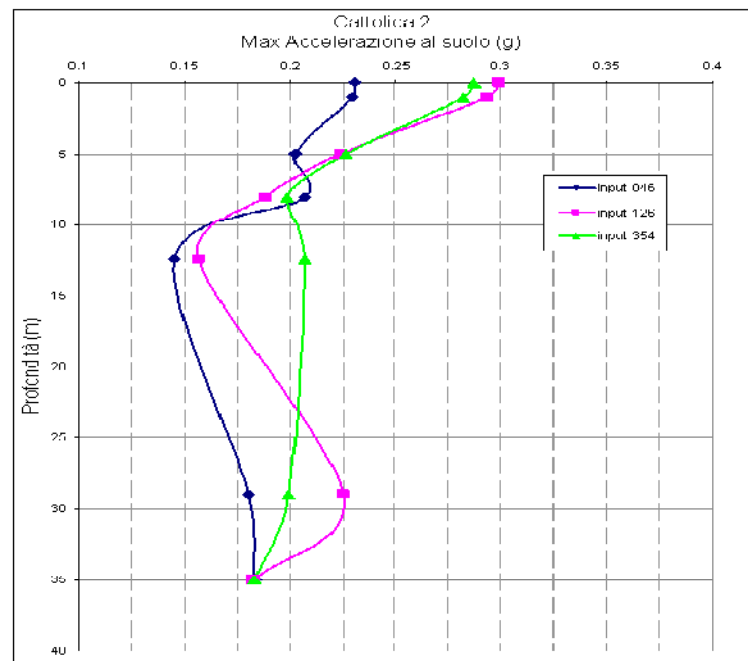


Figura 7.16 – Distribuzione delle accelerazioni orizzontali di picco per i tre input sismici di riferimento (modello "Cattolica 2").

Per quanto riguarda la stima dell'intensità spettrale di Housner (SI), intesa come rapporto fra gli spettri

PSV al suolo e PSV al bedrock, la modellazione espletata con SHAKE 2000 ha permesso di ricavare i seguenti parametri di amplificazione nei due intervalli temporali considerati, rispettivamente di 0,1s ÷ 0,5s e 0,5s ÷ 1,0s (figura 7.17):

INPUT_046_Cattolica.xy

F.A. SI/SI0 [0.1s-0.5s] = 1,5

F.A. SI/SI0 [0.5s-1.0s] = 3,2

INPUT_126_Cattolica.xy

F.A. SI/SI0 [0.1s-0.5s] = 1,6

F.A. SI/SI0 [0.5s-1.0s] = 4,0

INPUT_354_Cattolica.xy

F.A. SI/SI0 [0.1s-0.5s] = 1,4

F.A. SI/SI0 [0.5s-1.0s] = 3,2

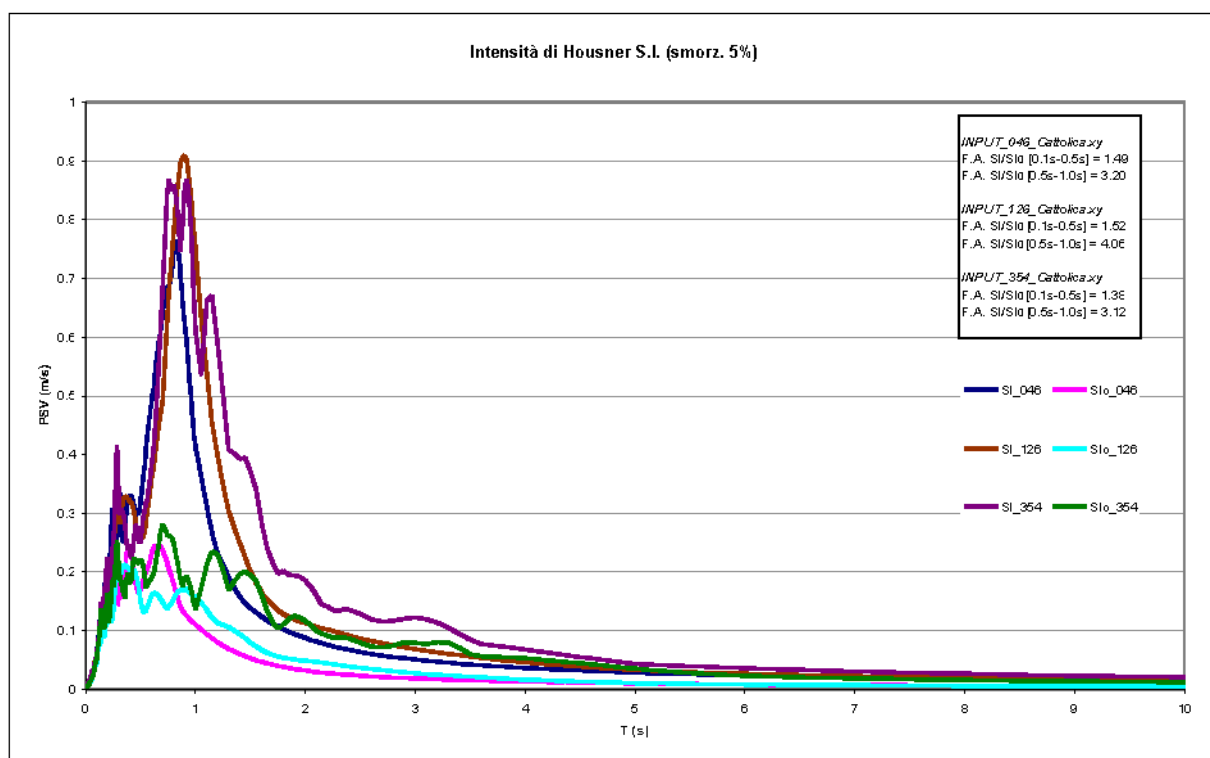


Figura 7.17 – Intensità di Housner SI riferite al bedrock e al suolo per i tre input sismici di riferimento (modello "Cattolica 2").

Il software SHAKE 2000 consente la valutazione della risposta sismica locale anche in funzione delle amplificazioni del moto di vibrazione (frequenze dell'impulso sismico), considerando i fattori di smorzamento D e i rapporti tra le impedenze sismiche dei sismostrati. La variazione del fattore di amplificazione con la frequenza definisce la funzione di amplificazione A(f) della colonna sismo stratigrafica. Il moto sismico può dunque essere amplificato in corrispondenza di determinate frequenze, corrispondenti alle frequenze naturali f_n di vibrazione della colonna strigrafica (figura 7.18).

In questo senso, molto importante risulta la prima frequenza naturale di vibrazione f_1 (indicata anche come f_0), denominata frequenza fondamentale, in corrispondenza della quale la funzione di amplificazione assume un valore massimo.

Dalle funzioni di amplificazione ricavate dalle elaborazioni sui tre input, anche per questo modello risulta che la frequenza fondamentale assume un valore locale pari a circa $1,1 \pm 1,15$ Hz. Un'ulteriore possibile risonanza si ottiene a $3,1 \pm 3,3$ Hz, sebbene tale amplificazione risulti poco significativa:

$F_0 = 1,10 \pm 1,15$ Hz \rightarrow amplificazione = 2,5

$F_1 = 3,2 \pm 3,4$ Hz \rightarrow amplificazione = 1,3

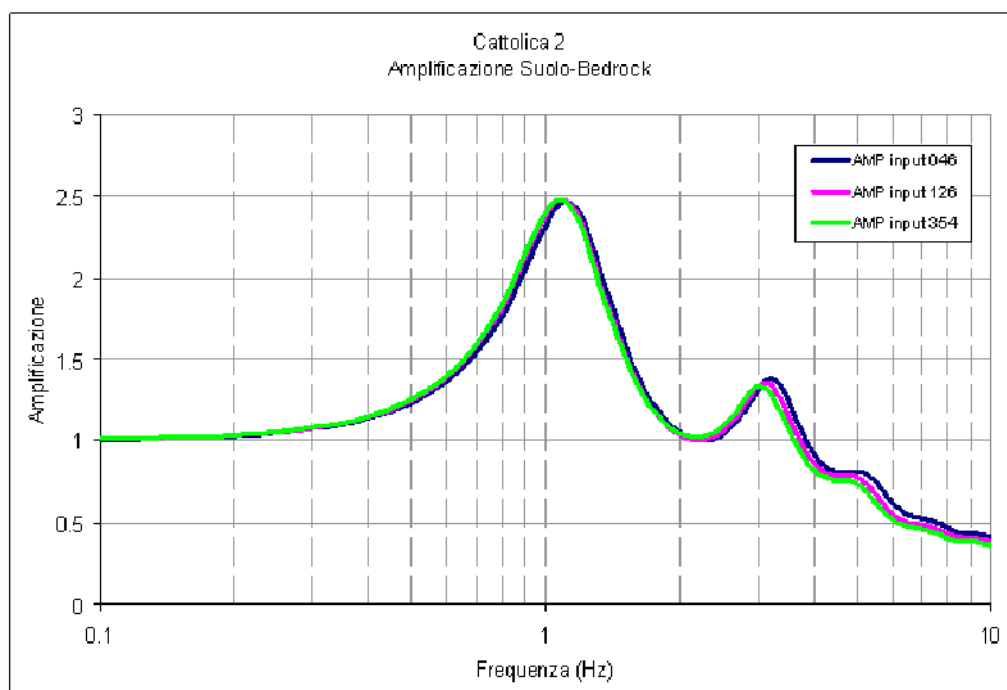


Figura 7.18 – Funzione di trasferimento del moto oscillatorio del sisma lungo tutta la colonna litologica tipo per ogni input sismico di riferimento (modello "Cattolica 2")

Si precisa che la modellazione numerica elaborata dal software SHAKE2000 è stata limitata alla stima dell'amplificazione entro i 10 Hz, limite più utile ai fini ingegneristici per le analisi delle interazioni sottosuolo/strutture.

La figura 7.19a e 7.19b riportano, infine, gli spettri di risposta sismica locale in termini di PSA, PSV e SD (§ paragrafo 7.2.1), ancora ottenuti rispetto ai tre input sismici di riferimento.

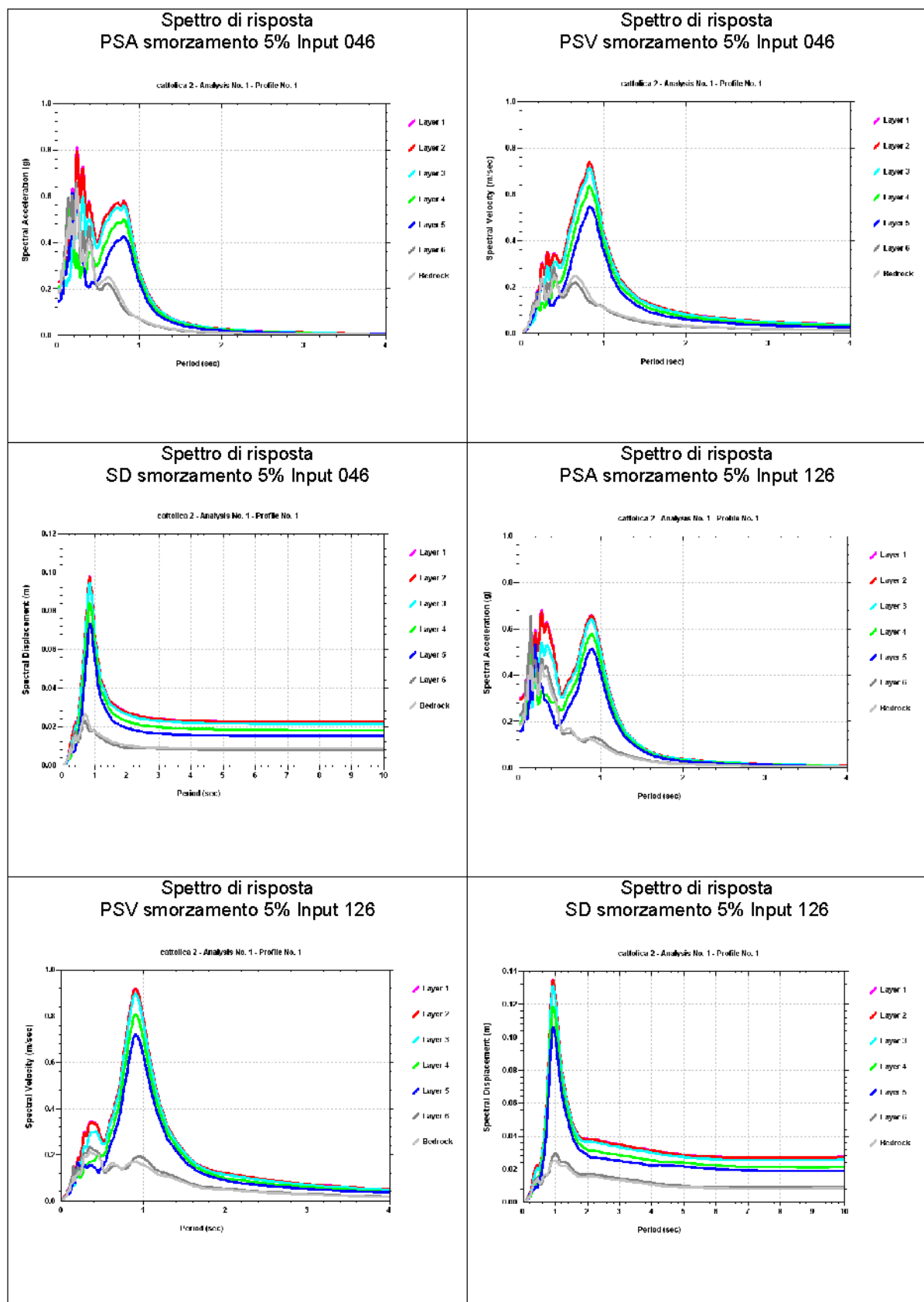


Figura 7.19a – Spettri di risposta sismica locale (modello "Cattolica 2")

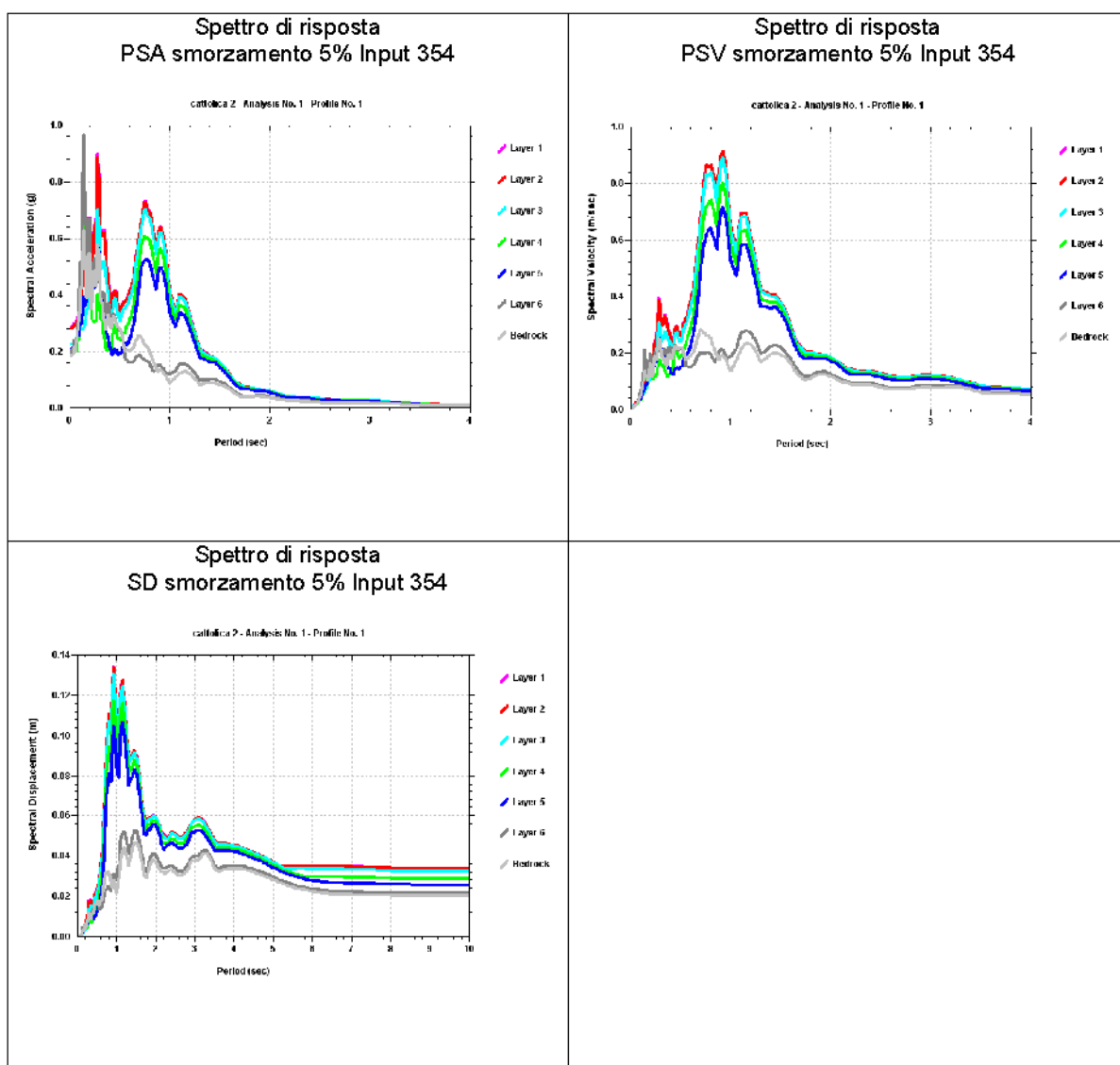


Figura 7.19b – Spettri di risposta sismica locale (modello "Cattolica 2")

7.3 Approfondimenti di terzo livello per l'“Ambito M”: le verifiche di liquefazione e dei cedimenti post sisma

7.3.1 Aspetti generali

Per liquefazione si intende l'annullamento di resistenza al taglio di terreni granulari saturi sotto sollecitazioni di taglio cicliche, in conseguenza delle quali il sedimento raggiunge una condizione di fluidità pari a quella di un liquido viscoso. Il meccanismo di liquefazione è governato da molti fattori e tra questi i principali sono: caratteristiche dell'impulso sismico; (magnitudo $M > 5$); densità relativa ($DR < 50+60\%$); pressioni di confinamento (non sono riportati casi in letteratura di liquefazione in strati granulari profondi oltre 15-20 metri); fuso granulometrico (figura 7.20); falda superficiale.

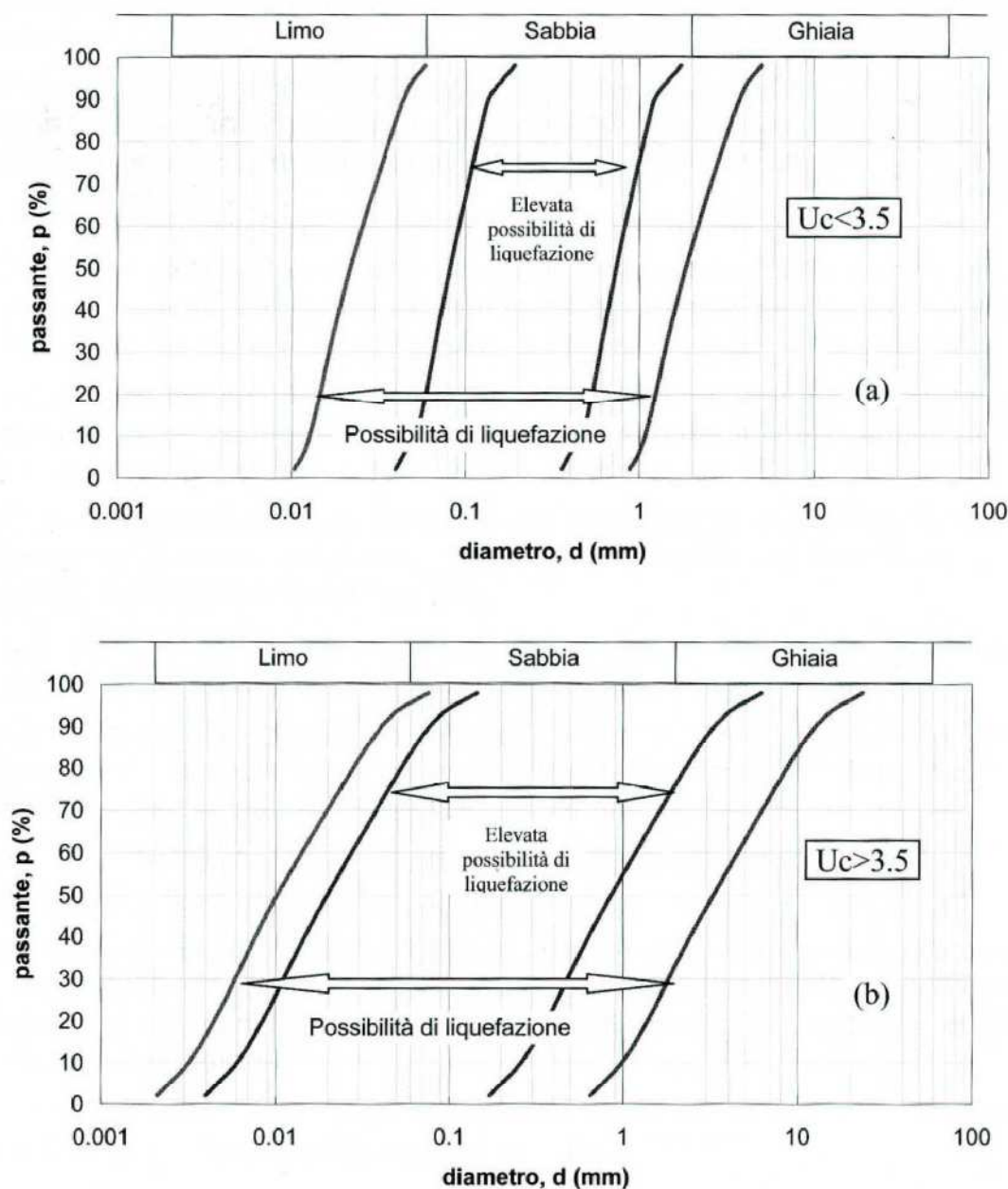


Figura 7.20 – Fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità alla liquefazione: sedimenti a granulometria uniforme (a) o estesa (b) – da AGI, 2005

Occorre anche evidenziare che la liquefazione di sedimenti saturi non sempre produce perdita di funzionalità o collasso delle strutture degli edifici. Riduzioni rilevanti di capacità portante e cedimenti significativi sono generalmente funzione:

- × dell'ampiezza e tempo del carico ciclico del sisma;
- × dello spessore ed estensione dello strato in liquefazione;
- × dello spessore dei sedimenti non soggetti a liquefazione interposti tra fondazioni e strato in densificazione/liquefazione;

x delle condizioni morfologiche al contorno (acclività; presenza di scarpate o di variazioni di pendenza; vuoti di cava; incisioni fluviali; maceri).

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

- 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;
- 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%).
- Iwasaki et Al, 1982 – dimostra per terremoti giapponesi la correlazione diretta tra probabilità di liquefazione e letti di fiumi recenti e antichi;
- 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 condizioni di sisma, vi possono dunque essere effetti di “riordino”, con possibilità di cedimenti anche significativi e che possono coinvolgere sia i depositi granulari poco addensati e recenti (olocenici), sia i sedimenti coesivi poco plastici e poco consistenti. I cedimenti verticali post-sisma possono essere causati da riconsolidazione oppure da deformazioni di taglio associate a spostamenti laterali dei sedimenti, sebbene questi ultimi possano ritenersi improbabili nel territorio comunale di Cattolica in quanto non risultano storicamente documentati fenomeni di dislocazione laterale per contesti morfologici di piana subpianeggiante come quello di studio, in particolare per sismi di magnitudo $M < 6$ (Bartlett e Yuod, 1992).

Per quanto detto, gli studi di pericolosità sismica più recenti hanno iniziato a elaborare procedure di stima delle potenziali deformazioni post-sisma anche nei sedimenti fini (limi e argille a comportamento “non drenato”, poco plastici e poco consistenti), provocate da perdite di resistenza. Quest’ultimo fenomeno è noto con il termine “cyclic softening” ed è stato ben descritto da Idriss & Boulanger (2004; 2007).

7.3.2 Gli approcci utilizzati per le verifiche di liquefazione e stima dei cedimenti post-sisma

Le verifiche di propensione alla liquefazione e dei cedimenti potenziali indotti da sisma possono essere valutati utilizzando correlazioni empiriche basate sui risultati delle prove CPTe/CPTU. Il vantaggio dell’uso delle penetrometrie statiche è da ricercarsi nella maggiore accuratezza e ripetibilità della CPTe/CPTU rispetto ad altre prove, nella loro relativa economicità e, soprattutto, nella possibilità

di avere profili continui con la profondità e che forniscono informazioni dettagliate anche sulla stratigrafia.

Per questo lavoro, la procedura di verifica della liquefacibilità si è basata sull'approccio aggiornato di Robertson & Wride (1998) e inoltre sulla valutazione dell'indice del potenziale di liquefazione LI (Iwasaki et al, 1978).

Il metodo di Robertson & Wride (1998), è stato recentemente aggiornato dallo stesso Robertson (2009; 2010)²¹ per la valutazione della liquefazione e delle condizioni di "cyclic softening" dei sedimenti poco coesivi, sulla base dei concetti descritti da Boulanger e Idriss (2004-2007), verificati da casi storici recenti (terremoti di Loma Prieta, Chi-Chi, Kocaeli). L'Approccio originale di Robertson & Wride (1998) è stato dunque aggiornato utilizzando una nuova procedura di normalizzazione delle tensioni ed evita la necessità di correzione K_c . Il metodo è stato esteso per includere anche i terreni argillosi e a comportamento simile a quelli argillosi ("clay-like-soil") sulla base dei concetti descritti da Boulanger e Idriss (2004; 2007). L'estensione della verifica nella zona argillosa evita, inoltre, la necessità di un limite di I_c nella carta SBTn per separare terreni sabbiosi da quelli a comportamento argilloso.

Occorre inoltre precisare che il metodo di Robertson & Wride (1998) e succ. mod. si riferisce a prove penetrometriche elettriche CPTe/CPTU e non a prove meccaniche CPT: per la differente geometria della punta meccanica rispetto a quella elettrica, i valori misurati di resistenza alla punta non si equivalgono perfettamente mentre differiscono sensibilmente le resistenze laterali per l'adesione terreno-manicotto; nelle prove CPT le resistenze laterali risultano sempre maggiori di quelle misurate da prove con punta elettrica e nelle sabbie il valore di f_s può essere anche oltre due volte quello ricavato da prove CPTe!

In appendice alla relazione si allega lo schema a blocchi della procedura di Robertson (2010).

La procedura di verifica della liquefacibilità e la stima dei cedimenti post sisma nei sedimenti sia granulari che fini poco coesivi, si è basata sulla stima della propensione alla liquefazione del sedimento attraverso il calcolo del fattore di sicurezza $FL = (CRR_{(7,5)} / CSR_{(7,5)})^{\lambda} MSF$ con:

1. CSR = sollecitazione tangenziale ciclica (Cyclic Stress Ratio) prodotta da un sisma e stimata sulla base di correlazioni empiriche dalle caratteristiche del terremoto, magnitudo e accelerazione tangenziale del suolo. Il CSR viene calcolato dalla nota equazione semiempirica proposta da Seed e Idriss (1971) per terremoti di $M = 7,5$. La a_{max} di ingresso per la valutazione semplificata del CSR è ricavata utilizzando i dati della modellazione numerica di risposta sismica locale elaborata con SHAKE 2000;
2. MSF = coefficiente correttivo per eventi sismici di magnitudo differente da 7,5 (come nel nostro caso). Fra le equazioni proposte, le raccomandazioni NCEER consigliano di utilizzare per

²¹ P.K. Robertson, 2009. "Performance based earthquake design using the CPT", Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering – from case history to practice, ISTokyo, June 2009.

Robertson, P.K. and Lisheng, S., 2010, "Estimation of seismic compression in dry soils using the CPT" FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING AND SOIL DYNAMICS, Symposium in honor of professor I. M. Idriss, San Diego, CA

terremoti di $M < 7,5$ i valori correttivi di Andrus e Stokoe (1997). Per questo lavoro, a scopo ulteriormente cautelativo si è assunto come riferimento correttivo l'equazione proposta da Idriss (1986), che fornisce i valori di MSF più bassi raccomandati dal NCEER;

3. CRR = resistenza alla liquefazione ciclica (Cyclic Resistance Ratio) dei sedimenti attraversati, ricavata dagli esiti penetrometrici secondo la procedura empirica proposta da Robertson & Wride, 1998 per terremoti di $M = 7,5$. La procedura si fonda su equazioni che determinano i valori di CRR dei sedimenti con diverso contenuto di fini dai dati delle prove CPT, attraverso la normalizzazione a 100 kPa (pressione atmosferica) delle resistenze alla punta penetrometrica e la correzione in funzione delle caratteristiche granulometriche (desunte dalla classificazione dei terreni di Robertson, 1990).

Si è quindi proceduto al calcolo automatico della liquefacibilità e dei cedimenti post sisma con il software "Cliq", sviluppato dalla GeoLogiki Geotechnical Engineers in collaborazione con lo stesso P.K. Roberson, utilizzando i seguenti dati di input di pericolosità sismica:

1. magnitudo del terremoto $M_w = 6,1$
2. a_{max} suolo = calcolata con la modellazione numerica di RSL elaborata con il software SHAKE 2000, cioè 0,31g (per le prove ascrivibili al contesto di risposta sismica locale "Cattolica 1", ovvero: P1CPTE1 e P3CPTE3 e 0,30g (per le prove ascrivibili al contesto di risposta sismica locale "Cattolica 2", ovvero P2CPTE2 e P5CPTU5 per la porzione dell'"Ambito M" più a est e che ricade nel contesto di piana alluvionale, pertanto in zona <<stabile suscettibile di amplificazione>>, la a_{max} suolo è invece ricavata dai parametri sismici della microzonazione di secondo livello, cioè $0,183g \cdot FA(Pga) = 0,37g$
3. come condizioni idrogeologiche pre-sisma si sono considerate le quote d'acqua del freatico, mentre come condizioni in caso di sisma si è imposta, a titolo cautelativo, una soggiacenza della quota piezometrica pari a un metro.

La valutazione della liquefacibilità dei cedimenti post sisma, si è proceduto alla verifica basata sulla classificazione di comportamento di tutti i terreni proposta da Robertson (1990; 2009). La figura 7.21 propone il diagramma (Qtn-F) di classificazione nel quale si distinguono le zone di potenziale liquefazione e/o di "cyclic softening": le zone "A1" e "A2" corrispondono ai sedimenti poco coesivi o a comportamento granulare e suscettibili di liquefazione ciclica, in particolare i sedimenti che ricadono nella zona "A2" risultano più suscettibili a perdite anche significative di resistenza in caso di sisma.

Le zone "B" e "C" corrispondono invece ai terreni coesivi e a comportamento argilloso, per i quali è opportuno utilizzare procedure dirette che consentano di valutare la resistenza al taglio non drenata nei casi limite (es. $c_u < 70$ kPa). I sedimenti ricadenti nelle zone "B" e "C" sono entrambi suscettibili a "cyclic softening", in particolare i sedimenti meno consistenti in zona "C" risultano più sensibili a perdite di resistenza sottoposte a impulsi ciclici e dunque a cedimenti post-sisma. Limi sciolti, non plastici e saturi spesso cadono nella zona C, tuttavia, il loro CRR è fortemente controllato dalla coesione non drenata: in questo caso sarebbe opportuno prelevare campioni per determinare limiti di Atterberg e contenuto d'acqua.

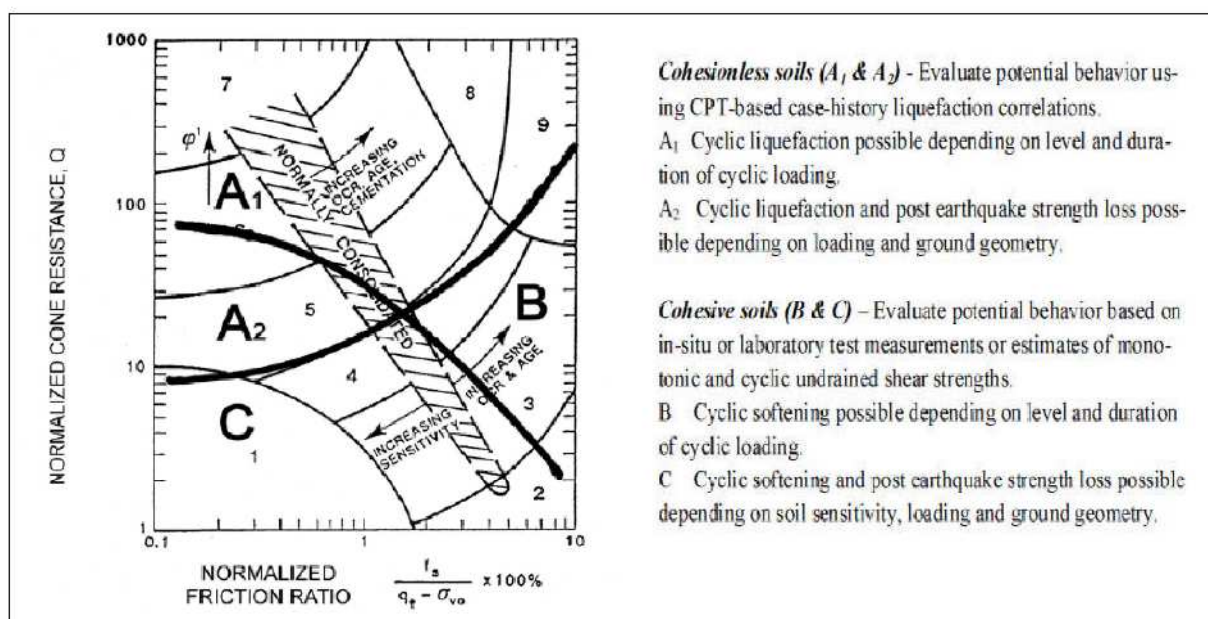


Figura 7.21 - Carta della classificazione di comportamento dei sedimenti da prove CPT (da P.K.Robertson, 2009)

Lo studio di approfondimento sulla liquefacibilità dei sedimenti della zona di piana costiera ha inoltre valutato l'indice di potenziale liquefazione (PLI) definito da Iwasaki (1982). La stima di questo indice viene applicato ai metodi che prevedono il calcolo del fattore di sicurezza FS e consente una valutazione del rischio di liquefazione in funzione della profondità degli intervalli liquefacibili. L'indice PLI è ricavato dalla seguente equazione:

$$LPI = \int_0^{20} (10 - 0,5z) \times F_L \times d_z$$

dove:

$FL = 1 - FS(z)$ quando FS risulta <1

$FL = 0$ quando FS risulta >1

z = profondità espressa in metri

Lo profondità di stima dell'indice di potenziale liquefazione viene convenzionalmente definita pari a 20 metri (oltre a tale quota sono da escludersi fenomeni di liquefazione). Il valore di LPI può dunque variare da 0 (quando nessun livello risulta liquefacibile) a 100 (tutto lo spessore considerato è caratterizzato da $FL < 1$). Sulla base degli esiti ottenuti, Iwasaki ha proposto le seguenti classi di rischio di liquefazione in funzione del valore di LPI:

$LPI = 0$ → rischio di liquefazione molto basso

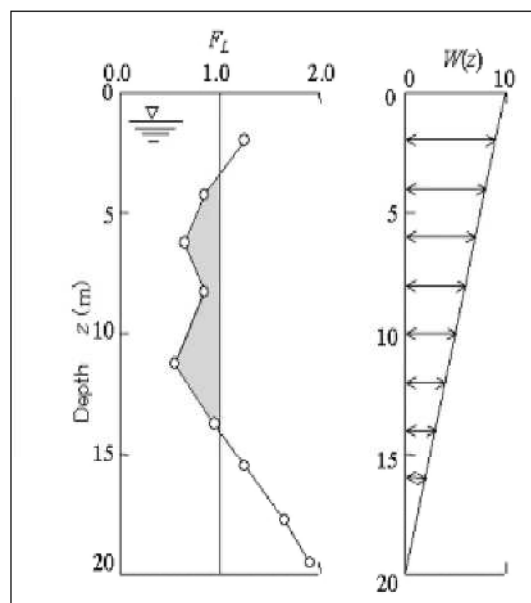
$0 < LPI \leq 5$ → rischio di liquefazione basso

$5 < LPI \leq 15$ → rischio di liquefazione alto

$LPI > 15$ → rischio di liquefazione molto alto

La seguente figura 7.22 propone lo schema grafico della procedura di calcolo di LPI.

Figura 7.22 - Rappresentazione grafica della procedura di calcolo dell'indice di potenziale liquefazione (LPI)



Per quanto riguarda la stima dei cedimenti post-sisma, considerando che la verifica ha tenuto conto di un livello piezometrico molto superficiale in caso di sisma (pari a -1 m dal p.c.), l'analisi è stata impostata sulle tessiture granulari e fini sature.

Nei sedimenti saturi a comportamento granulare, in particolare, si è proceduto alla stima automatica dei cedimenti utilizzando la recente procedura di Robertson (2009) e Zhang et. al. (2007). L'approccio si basa sulla valutazione delle deformazioni volumetriche post-cicliche e calcola i cedimenti sulla base dell'entità del fattore di sicurezza alla liquefazione FL calcolato (se $<1,20$) e sulla base degli esiti di densità relativa DR desunti dalle resistenze di punta (q_{c1N})_{cs} come riportato in figura 7.23.

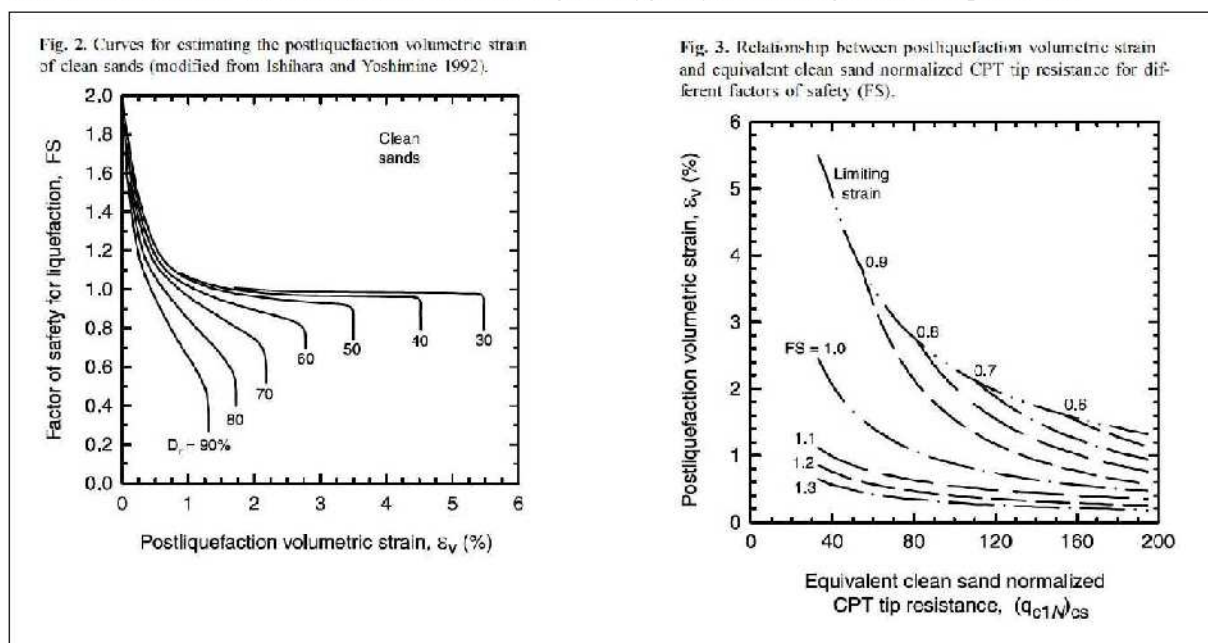


Figura 7.23– Diagrammi di correlazione per la stima dei cedimenti di post-liquefazione nelle sabbie sature da prove CPT (da Zhang et Al, 2007)

Per i sedimenti fini coesivi a comportamento fine (zone “B” e “C” della carta di comportamento di Robertson – 1990; 2009), il cedimento è causato principalmente da fenomeni di riconsolidazione conseguenti alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto e al manifestarsi di deformazioni da taglio indotte dalle sollecitazioni cicliche. Generalmente, le deformazioni di riconsolidazione post-sisma sono ritenute molto più piccole di quelle osservate nei sedimenti granulari ed i cedimenti rilevati in seguito a sismi recenti (Loma Prieta; Chi-Chi; Kocaeli) risultano statisticamente modesti anche per potenti intervalli di depositi di argille compressibili (Boulanger and Idriss, 2007).

Nella letteratura scientifica, si reputa che le deformazioni volumetriche medie di strati a grana fine siano contenute entro l'1%. Le recenti esperienze empiriche hanno dimostrato che le deformazioni per riconsolidamento nelle argille sono controllate principalmente dallo sforzo di taglio massimo, funzione di un fattore di sicurezza $FS_v = 3\% = CRR_M / CSR_M = CRR_{7,5} / CSR_{7,5}$ (Boulanger & Idriss, 2007) e dello stato tensionale dei sedimenti OCR. Il fattore di sicurezza è stato dunque calcolato come $FS_v = 3\% = CRR_{6,1} / CSR_{6,1}$ con fattore di scala della magnitudo per argille (secondo Idriss, pari a 1,1). Le deformazioni volumetriche sono state calcolate secondo il metodo di Robertson (2009), utilizzando le seguenti correlazioni:

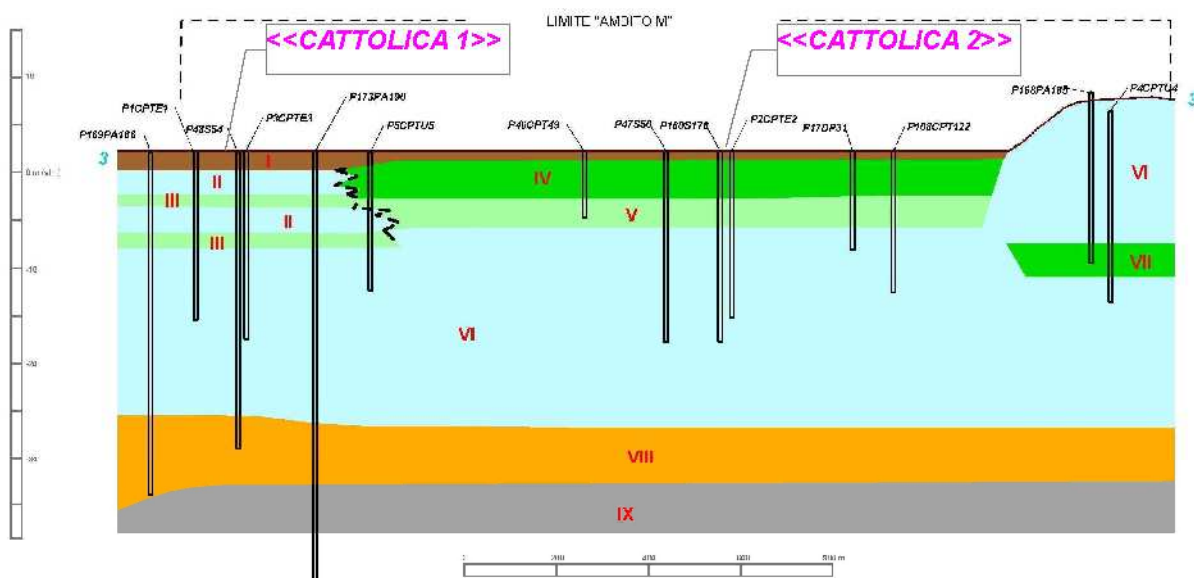
$$\epsilon_{vol} = [0.8 - 2.66 \log(FS)] / [0.33 A (Q_{ln})^3]$$

$$A = 10 - 9 \log(OCR)$$

When $FS < 0.84$ set $r_0 = 1.0$ & limit $\epsilon_{vol} \leq 1\%$

7.3.3 Esiti delle verifiche di liquefazione e dei cedimenti post-sisma

Per una migliore comprensione degli esiti la figura 7.24 ripropone il modello litotecnico elaborato lungo la sezione della costa denominata 3-3'.



Il plottaggio degli esiti penetrometrici CPTE/CPTU sul diagramma Qtn-F di classificazione di P. K. Robertson (2009), offre una prima analisi sulla possibilità di liquefazione e di cedimenti post-sisma dei sedimenti investigati: i depositi a comportamento granulare ricadono chiaramente nel campo “A1”, suscettibili di liquefazione, mentre i terreni poco coesivi e argillosi ricadono in modo preponderante nel campo “B”, con caratteristiche di costipamento che varia da “normalconsolidato” a un certo grado di sovraconsolidazione.

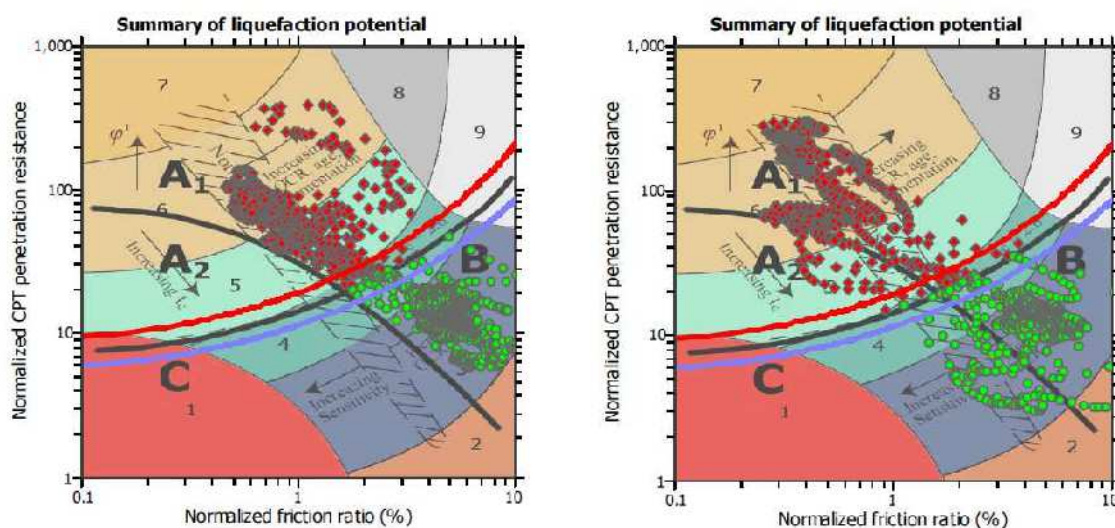


Figura 7.25- Plottaggio degli esiti penetrometrici P1CPTE1 (a sinistra) e P2CPTE2 (a destra) sulla carta della classificazione di P.K. Robertson (2009). Le due prove sono rispettivamente rappresentative del contesto deposizionale meno profondo attribuibile a facies deltizia del Conca e dei depositi marini di cordone/spiaggia

I sedimenti fini, pertanto, sebbene suscettibili di effetti legati a “cyclic softening”, non appaiono predisposti a perdite di resistenza se sottoposti a impulsi ciclici e dunque senza possibilità di cedimenti post-sisma (figura 7.25). Soltanto nelle prove P2CPTE2 e P1CPTE1, effettuate nel contesto di depositi marini di cordone/spiaggia recenti affioranti, alcuni intervalli prevalentemente limosi (nell'unità V, figura 7.24), sottostanti le sabbie pulite e più addensate (unità IV) ricadono nel campo “C”, pertanto con possibilità di cedimenti post-sisma; si tratta, comunque, di pochi punti di misura. La stima della propensione alla liquefazione (figura 7.26), attraverso il calcolo del fattore di sicurezza FL evidenzia per tutte le prove la possibilità di liquefazione ($FS < 1$) fino alla profondità di 8÷10 metri, cioè fino a profondità dei sedimenti che corrispondono alla deposizione sabbiosa della trasgressione marina “flandriana” (unità IV e V) e ai depositi di foce deltizia del Conca (unità II e III). Più in profondità le terebrazioni riscontrano sedimenti argillosi sovraconsolidati (unità VI), plastici e con buone caratteristiche di resistenza alla liquefacibilità e a deformazioni post-sisma (cedimenti). Per gli ulteriori elementi sulle caratteristiche litotecniche dei sedimenti indagati, si rimanda al modello di sottosuolo descritto nel capitolo 5 e in particolare alla sezione 3-3'.

Per quanto riguarda la porzione di costa studiata (“Ambito M”), ricadente nel contesto di cordone marino sub-affiorante, gli esiti evidenziano una maggiore resistenza alla liquefacibilità dei sedimenti più addensati ($DR > 60\%$), attraversati dalle prove nei primi 4÷5 metri di profondità. Ciò si traduce in un

esito di “potenziale di liquefazione” di minore gravità rispetto alla porzione di costa che risulta invece attribuita al contesto deposizionale del torrente Conca (porzione ovest dell’“Ambito M”).

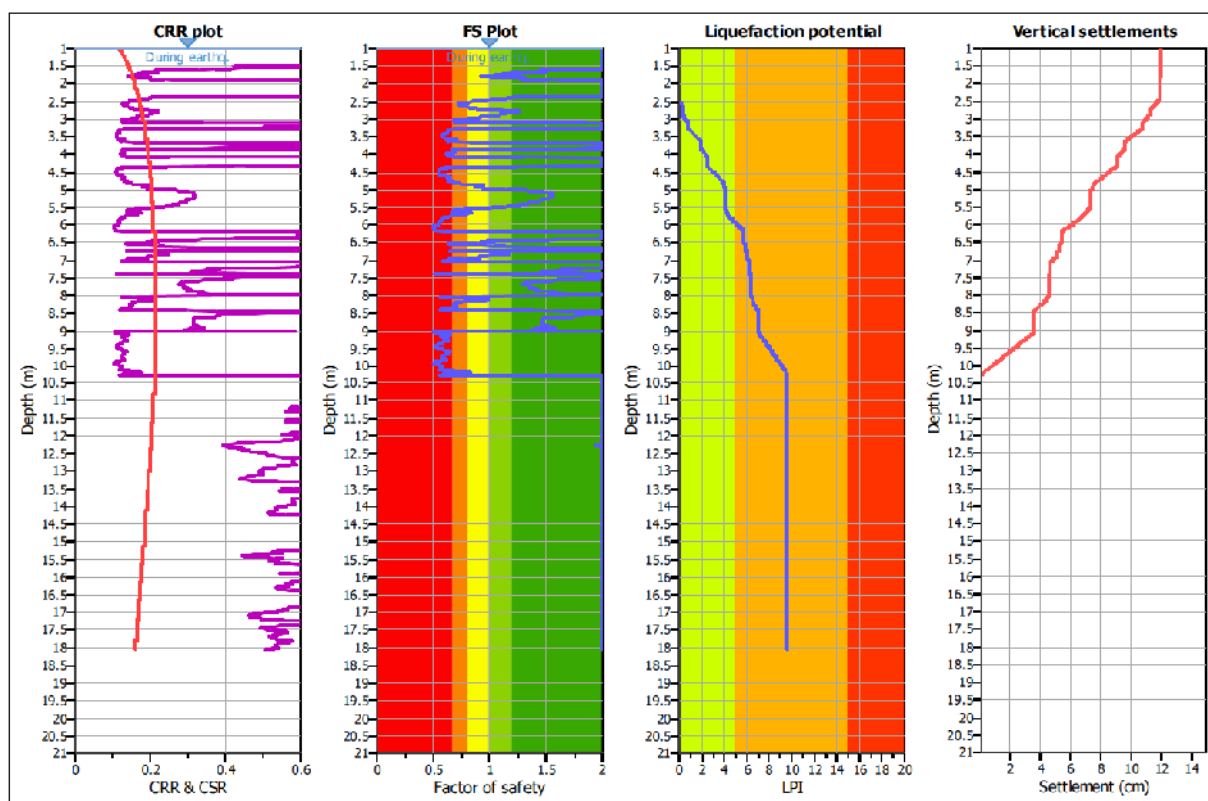


Figura 7.26- Plottaggio delle verifiche di liquefacibilità e cedimenti relativi alla prova penetrometrica P1CPTU1 (i report completi di tutte le prove sono proposti in allegato a questa Relazione)

In ogni caso, per la porzione di costa studiata, il rischio di liquefazione risulta “alto”, con i seguenti indici LPI stimati:

- LPI \equiv 5+10 per la sub-zona ricadente nel contesto di cordone marino sub-affiorante;
- LPI \equiv 10+15 per la sub-zona ricadente nel contesto deposizionale deltizio del Conca.

Si segnala che la prova P4CPTU4, eseguita nei sedimenti a monte del “berm” flandriano (cioè nel contesto di conoide alluvionale attribuibile al fiume Tavollo), la liquefacibilità viene valutata trascurabile (rischio “basso” con LPI <2), come d'altronde atteso per le caratteristiche litotecniche dei sedimenti attraversati.

Per quanto riguarda la stima dei cedimenti, le verifiche quantitative evidenziano esiti di cedimenti molto significativi per gli spessori granulari e fini poco coesivi attraversati fino a circa 8+10 metri, valori compresi tra 5 cm e 13 cm per la zona costiera. Occorre però rammentare che si tratta di una stima del cedimento cumulativo, espletata in campo libero (“free field”) e quindi senza considerare, per gli edifici esistenti, gli effetti positivi delle sovrappressioni scaricate nei sedimenti sottostanti le fondazioni.

Si rammenta nuovamente che la valutazione di liquefacibilità è stata impostata per un sisma di magnitudo 6,1; la stessa verifica espletata con un terremoto di magnitudo pari a M =5,5 (considerando

però la stessa ag di picco al suolo) porta ad esiti ancora di liquefacibilità, ma con indici del potenziale di liquefazione molto più ridotti ($LPI = 5$ per le prove P1CPTE1 e P3CPTE3).

Si evidenzia, inoltre, che il “rischio” è anche funzione del grado di vulnerabilità dei bersagli (edifici) presenti nell'area in questione. In questo senso, la possibilità di liquefazione in strati più profondi è certamente un fattore di maggior sicurezza per edifici con fondazioni molto superficiali, mentre per edifici più impegnativi, presumibilmente con fondazioni ancora superficiali ma incastrate a maggiori profondità ciò può essere un ulteriore fattore di rischio per la maggiore interazione fondazione/sedimenti. In prospettiva di progettazione geotecnica, il contesto di pericolosità legato alla liquefazione impone comunque indagini puntuali (sito specifiche) in funzione delle caratteristiche tecniche e prestazionali degli edifici da prevedere. Per manufatti di maggior impegno costruttivo, appare sin da ora evidente prevedere fondazioni profonde, incastrate nei sedimenti coesivi e moderatamente consistenti sottostanti i depositi granulari e fini flandriani post-flandriani, riscontrati fino alla profondità di 8+10 metri.

Gli esiti dello studio di liquefazione (indice di potenziale liquefazione) sono stati riportati nella cartografia di microzonazione sismica livello 3 (come descritto nel successivo paragrafo 8.7), che riporta anche le delimitazioni delle sub-zone sopra descritte e definite sulla base del modello litotecnico.

In allegato alla Relazione, si riportano invece i report di liquefacibilità espletati per ogni prova penetrometrica.

8 Elaborati cartografici

8.1 Carta delle indagini

Lo studio di microzonazione ha consentito di riordinare e selezionare le conoscenze di sottosuolo pregresse, fondate sugli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche di repertorio ed ex novo realizzate per lo studio di microzonazione. La <<carta delle indagini>>, elaborata alla scala 1:5.000, localizza tutte le indagini di riferimento per lo studio di microzonazione sismica di Cattolica, identificandole la tipologia.

Come già scritto nel capitolo 4, la selezione delle prove di repertorio ha considerato che molte prove risultano eseguite con attrezzature fuori standard (fornendo quindi esiti inutilizzabili o non interpretabili), oppure altre sono risultate troppo superficiali per poter essere pienamente usate per gli scopi del presente lavoro. In conclusione, i dati utilizzati sono quelli delle stratigrafie dei pozzi e dei sondaggi che hanno anche raggiunto il substrato marino, le CPT di profondità (generalmente spinte fino a profondità maggiori di 10 metri oppure giunte a "rifiuto" strumentale), le penetrometrie dinamiche standard (pesanti; leggere).

Tra le conoscenze pregresse, particolare importanza rivestono le prove geofisiche e geognostiche effettuate dalla Regione Emilia-Romagna, le prove geognostiche e geofisiche eseguite per il precedente Piano Regolatore Comunale (1995 e succ. Varianti) e per il più recente Piano Operativo Comunale di Cattolica (2009); infine sono risultati di fondamentale importanza i dati geotecnici desunti da ulteriori indagini geognostiche eseguite per particolari interventi edificatori nelle aree urbane. Nel Capitolo 4 vengono riportati ulteriori elementi sulle indagini pregresse.

In sintesi, il totale delle prove pregresse, considerate per lo studio di microzonazione (e implementate nel database che costituisce l'archivio delle indagini per questo lavoro) risulta pari a 163 prove, così distinte per tipologia:

- n. 8 sondaggi a carotaggio continuo
- n. 2 sondaggi da cui sono stati prelevati campioni (sondaggi tipo "GeoProbe")
- n. 2 prove penetrometriche in foro SPT
- n. 57 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)
- n. 5 prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTE)
- n. 4 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono (CPTU)
- n. 1 prova penetrometrica dinamica pesante (DP)
- n. 57 prove penetrometriche dinamiche leggere (DL)
- n. 12 pozzi per acqua

- n. 1 prova sismica in foro tipo "Down-Hole" (DH)
- n. 3 prove sismiche passive tipo "Refraction Microtremors" (Re.Mi.)
- n. 2 prove penetrometriche con "cono sismico" (SCPT)
- n. 9 misure di microtremori a stazione singola (HVSr)

Per le ulteriori informazioni sulle prove e sui dati ottenuti si rimanda ai capitoli 4 e 5 di questa Relazione.

Le prove realizzate ex novo per lo studio di microzonazione (e anch'esse implementate nel database che costituisce l'archivio delle indagini per questo lavoro) risultano complessivamente 30, così distinte per tipologia:

- n. 3 prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTe)
- n.2 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono (CPTU)
- n. 1 prova penetrometrica dinamica pesante (DP)
- n. 24 misure di microtremori a stazione singola (HVSr)

8.2 Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica

La <<carta geologico-tecnica>> elaborata alla scala 1:5.000, rappresenta cartograficamente tutti gli elementi geologici e morfologici che si ritengono potenzialmente in grado di modificare il moto sismico. In particolare, la cartografia ha permesso di perimetrare le aree caratterizzate da substrato affiorante (in realtà, nell'area di studio, solamente il rilievo di Monte Vici) e le aree interessate da coperture significative dal punto di vista sismico.

La cartografia riporta:

1. i terreni di copertura, discriminati in unità litologiche (figura 8.1) base alle prevalenti caratteristiche tessiturali corrispondenti al suo spessore e in particolare allo spessore meno profondo (nel caso delle coltri di maggiore potenza). I terreni di copertura sono stati suddivisi nelle seguenti unità litologiche:

CL \equiv *Argille limose moderatamente consistenti e argille ghiaiose o sabbiose*

si tratta di sedimenti di facies attribuibili a piana di conoide alluvionale del Conca e del Tavollo, prevalentemente argillosi e di consistenza che aumenta progressivamente con la profondità (stato di normalconsolidazione o modesta sovraconsolidazione); le penetrometrie più profonde (fino a 30 metri) rilevano nello spessore investigato la presenza di intervalli granulari di modesto spessore (alcuni metri) e di tessitura prevalentemente sabbiosa e in alcuni casi di ghiaie immerse in abbondante matrice argillosa. I sondaggi più profondi rilevano ancora la presenza di ghiaie (ancora con abbondante matrice argillosa) alla base

dello spessore alluvionale, sovrastanti il bedrock marino pliocenico collocato a profondità variabili da 50 metri a 40 metri circa. In un solo caso, nell'area di studio il bedrock è stato collocato a circa 10 m di profondità (§ paragrafo 8.3)

RI \equiv *Terreni contenenti resti di attività antropica*

si tratta di ex cave ora tombate di profondità incerta e con caratteristiche di ripristino ignote.

SC \equiv *Sabbie argillose e poco addensate*

si tratta di sedimenti olocenici, di prevalente facies deposizionale di piana deltizia del Conca ai quali si intercalano depositi di facies costiera (cordone litorale). Lo spessore complessivo di questa sequenza è di circa 8+10 metri. Le caratteristiche tessiturali e geotecniche di questo intervallo sono variabili in funzione del contesto deposizionale predominante. Le sabbie di cordone marino (in genere di granulometria prevalentemente media e spessori inferiori a 150+200 cm) sono caratterizzate da moderato grado di addensamento (DR >45%), mentre gli intervalli prevalentemente argillosi (depositi alluvionali) appaiono caratterizzati da un grado di plasticità medio-alta (IP >20). Tra le due situazioni tessiturali descritte, si rilevano intervalli caratterizzati da tessiture e caratteristiche meccaniche intermedie. Seguono in profondità sedimenti prevalentemente argillosi di piana alluvionale, (moderatamente sovraconsolidati) fino al bedrock marino pliocenico, collocato nell'area studiata a una profondità media di circa 35 metri.

SW \equiv *Sabbie pulite e ben assortite moderatamente addensate*

comprendono depositi prevalentemente granulari di facies deposizionale costiera, in particolare di cordone litorale e/o di spiaggia recente, con sabbie medie e fini prevalenti, di densità medio-alta nei primi 4+5 metri di profondità e moderatamente addensate più in profondità (DR >45%). Lo spessore complessivo di questa sequenza è di circa 8+10 metri.

2. le aree con substrato geologico affiorante. Per l'area oggetti di studio si tratta della "Formazione a Colombacci", localmente costituita da alternanze arenaceo-marnose in proporzioni variabili (A/P da 2/1 a 10/1), che costituisce il bedrock affiorante nel rilievo di Monte Vici. Le arenarie, di colore grigio, sono caratterizzate da fitta laminazione piano-parallela, ondulata e incrociata, in strati medi, più raramente sottili o spessi, di colore grigio alterate in giallo o marrone. Marne e siltiti grigie in strati sottili e molto sottili, raramente medi. L'età deposizionale è attribuita al Messiniano medio e superiore. Le caratteristiche geologiche, includono tale bedrock sismico nel <<substrato geologico non rigido stratificato - NRS>>, come confermato dalle indagini geofisiche eseguite per lo studio di microzonazione sismica
3. le forme di superficie, che per l'area di studio sono riconducibili a orli di scarpata di terrazzo fluviale (di altezza compresa tra 10+20 metri) e di scarpata prevalentemente morfologica (solamente la ripa di Monte Vici, con acclività media di circa 35°)



Figura 8.1 – Stralcio della legenda della <<Carta geologico-tecnica>> elaborata per lo studio di microzonazione sismica di Cattolica.

4. le tracce delle sezioni geologiche considerate di riferimento per questo lavoro, ovvero le sezioni RER 1-1' e 2-2' e la sezione geologico-tecnica 3-3', ricostruita per la modellazione geotecnica e sismica dell'area oggetto degli approfondimenti di terzo livello ("Ambito M)
5. la localizzazione delle terebrazioni che hanno raggiunto il bedrock sismico e le terebrazioni che non lo hanno raggiunto
6. la localizzazione dei pozzi freatici rilevati nell'area di piana costiera/piana deltizia e relativa soggiacenza (in metri) della falda misurata

8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni

La <<carta delle frequenze naturali dei terreni>>, elaborata alla scala 1:5.000, localizza tutti i punti di misura dei microtremiti sismici registrati a stazione singola (con tecnica HVSR). Si tratta di 33 misure e ad ogni punto nella cartografia viene indicato il valore stimato di F_0 (valore del "picco" più significativo e a più bassa frequenza, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale), inoltre ulteriori "picchi" a maggiori frequenze, oppure indicazione dell'assenza di picchi).

Nel Paragrafo 7.1.2, a cui si rimanda, sono descritte le interpretazioni di risposta sismica locale semplificata desumibili dagli esiti HVSR. La figura 8.2 riporta uno stralcio della legenda elaborata per la rappresentazione cartografica.

In sintesi, l'area di studio è stata classificata nelle seguenti zone, in termini di frequenze naturali:

1. zone con assenza di fenomeni di risonanza significativi. Riconducibili al bedrock affiorante (nell'area di studio: Monte Vici)
2. zone con fenomeni di risonanza significativi per $1 \text{ Hz} < F_0 < 2 \text{ Hz}$. In particolare, la carta suddivide:
 - le zone caratterizzate da una più chiara frequenza fondamentale misurata a 1,2 Hz
 - le zone caratterizzate da frequenza fondamentale a 1,2 Hz ma con altri alti massimi misurati fino a circa 2 Hz
 - le zone caratterizzate da una più chiara frequenza fondamentale misurata a 1,4 Hz
3. zone con fenomeni di risonanza significativi per $F_0 < 5 \text{ Hz}$. Si tratta della sola zona riscontrata tra il Monte Vici e l'alveo del fiume Ventena, spiegabile per la presenza di bedrock meno profondo (circa 9 metri, sulla base dei dati geognostici disponibili e degli esiti delle prova tomografica, con picco massimo a circa 5,7 Hz)

Gli esiti delle registrazioni HVSR dunque evidenziano una relativa "omogeneità" in termini di frequenze naturali misurate con tecnica HVSR. Le frequenze fondamentali riscontrate sono riconducibili al tetto del bedrock sismico pliocenico. È inoltre da segnalare che le indagini tomografiche evidenziano elevati contrasti di impedenza (ampiezza HVSR ≥ 3), come riportato nella cartografia.

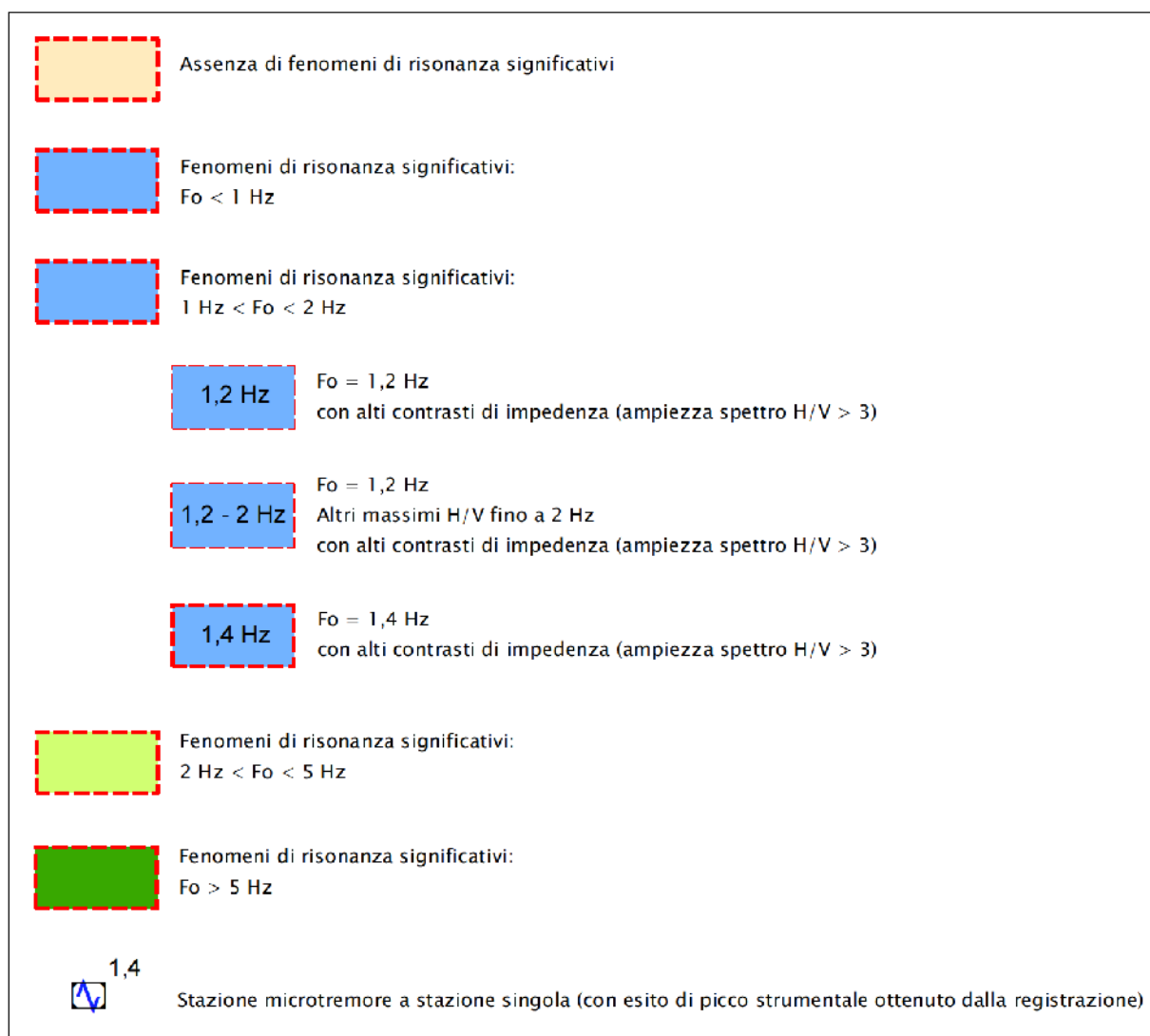


Figura 8.2 – Stralcio della legenda della <<Carta delle frequenze naturali dei terreni>> elaborata per lo studio di microzonazione sismica di Cattolica.

8.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica

La <<carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica>> (MOPS), elaborata alla scala 1:5.000, riporta tutte le aree in cui si ritiene necessario effettuare indagini e analisi di microzonazione sismica e i livelli di approfondimento ritenuti necessari. In questo senso, la cartografia delle MOPS classifica il territorio studiato di Cattolica nelle seguenti zone:

1. zone stabili suscettibili di amplificazioni nelle quali sono attese amplificazioni del moto sismico come effetto dell'assetto litostratigrafico e morfologico locale. In particolare, all'interno di questo gruppo sono state distinte le seguenti microzone:

ZONA 1 \equiv Coperture di conoide alluvionale argilloso-limose e argille ghiaiose o sabbiose

si tratta di sedimenti di facies attribuibili a piana di conoide alluvionale del Conca e del Tavollo,

prevalentemente argillosi e di consistenza che aumenta progressivamente con la profondità (stato di normalconsolidazione o modesta sovraconsolidazione); i sondaggi più profondi hanno riscontrato intervalli granulari di modesto spessore (potenza massima: alcuni metri) e di tessitura prevalentemente sabbiosa e in alcuni casi di ghiaie immerse in abbondante matrice argillosa. I sondaggi più profondi rilevano ancora la presenza di ghiaie (ancora con abbondante matrice argillosa) alla base dello spessore alluvionale, sovrastanti il bedrock marino pliocenico, collocato alla profondità di 50 metri. La figura 8.3 riporta la colonna stratigrafica tipo (con gli spessori in metri degli intervalli più significativi) della zona descritta.

ZONA 2 *≡ Coperture di conoide alluvionale argilloso-limose e argille ghiaiose o sabbiose*

si tratta di sedimenti di facies attribuibili a piana di conoide alluvionale del Conca e del Tavollo, prevalentemente argillosi e di consistenza che aumenta progressivamente con la profondità (stato di normalconsolidazione o modesta sovraconsolidazione); i sondaggi più profondi hanno riscontrato intervalli granulari di modesto spessore (potenza massima: alcuni metri) e di tessitura prevalentemente sabbiosa. I sondaggi più profondi rilevano ancora presenza di ghiaie (ancora con abbondante matrice argillosa) alla base dello spessore alluvionale, sovrastanti il bedrock marino pliocenico, collocato alla profondità di 50+45 metri. La figura 8.3 riporta la colonna stratigrafica tipo (con gli spessori in metri degli intervalli più significativi) della zona descritta.

ZONA 3 *≡ Coperture di conoide alluvionale argilloso-limose e argille ghiaiose o sabbiose*

si tratta di sedimenti di facies attribuibili a piana di conoide alluvionale del Conca , prevalentemente argillosi e di consistenza che aumenta progressivamente con la profondità (stato di normalconsolidazione o modesta sovraconsolidazione); i sondaggi più profondi rilevano la presenza di ghiaie (con abbondante matrice argillosa) alla base dello spessore alluvionale, sovrastanti il bedrock marino pliocenico, collocato alla profondità di 40 metri. La figura 8.3 riporta la colonna stratigrafica tipo (con gli spessori in metri degli intervalli più significativi) della zona descritta.

ZONA 4 *≡ Coperture di conoide alluvionale argilloso-limose e argille ghiaiose o sabbiose*

si tratta di sedimenti di facies attribuibili a piana di conoide alluvionale del Conca/Tavollo (e/o Ventena?), prevalentemente argillosi e di consistenza che aumenta progressivamente con la profondità (stato di normalconsolidazione o modesta sovraconsolidazione). Le penetrometrie e le indagini geofisiche rilevano per questa zona una profondità del bedrock marino pliocenico a circa 9 metri. La figura 8.4 riporta la colonna stratigrafica tipo (con gli spessori in metri degli intervalli più significativi) della zona descritta.

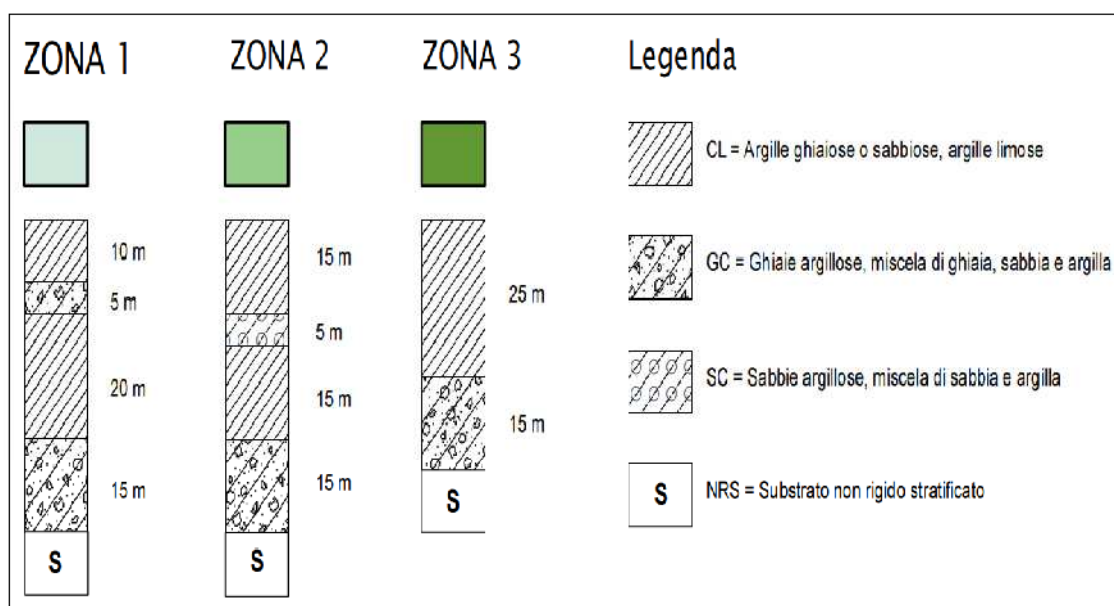


Figura 8.3 – Colonne stratigrafiche tipo della Zona 1, Zona 2, Zona 3.

ZONA 5 \equiv *Substrato roccioso non rigido affiorante (Formazione a Colombacci). Acclività 5°-10°*

si tratta della “Formazione a Colombacci”, localmente costituita da alternanze arenaceo-marnose in proporzioni variabili (A/P da 2/1 a 10/1), che costituisce il bedrock affiorante nel rilievo di Monte Vici. Le arenarie, di colore grigio, sono caratterizzate da fitta laminazione piano-parallela, ondulata e incrociata, in strati medi, più raramente sottili o spessi, di colore grigio alterate in giallo o marrone. Marne e siltiti grigie in strati sottili e molto sottili, raramente medi. L'età deposizionale è attribuita al Messiniano medio e superiore. Le caratteristiche geologiche, includono tale bedrock sismico nel <<substrato geologico non rigido stratificato - NRS>>, come confermato dalle indagini geofisiche eseguite per lo studio di microzonazione sismica ($V_s = 450$ m/s). La figura 8.4 riporta la colonna stratigrafica tipo (con gli spessori in metri degli intervalli più significativi) della zona descritta.

ZONA 6 \equiv *Substrato roccioso non rigido affiorante (Formazione a Colombacci). Acclività 15°-25° (piede del pendio)*

si tratta della “Formazione a Colombacci”, localmente costituita da alternanze arenaceo-marnose in proporzioni variabili (A/P da 2/1 a 10/1), che costituisce il bedrock affiorante nel rilievo di Monte Vici. Le arenarie, di colore grigio, sono caratterizzate da fitta laminazione piano-parallela, ondulata e incrociata, in strati medi, più raramente sottili o spessi, di colore grigio alterate in giallo o marrone. Marne e siltiti grigie in strati sottili e molto sottili, raramente medi. L'età deposizionale è attribuita al Messiniano medio e superiore. Le caratteristiche geologiche, includono tale bedrock sismico nel <<substrato geologico non rigido stratificato - NRS>>, come confermato dalle indagini geofisiche eseguite per lo studio di microzonazione sismica ($V_s = 450$ m/s). La figura 8.4 riporta la colonna stratigrafica tipo (con gli spessori in metri degli intervalli più significativi) della zona descritta.

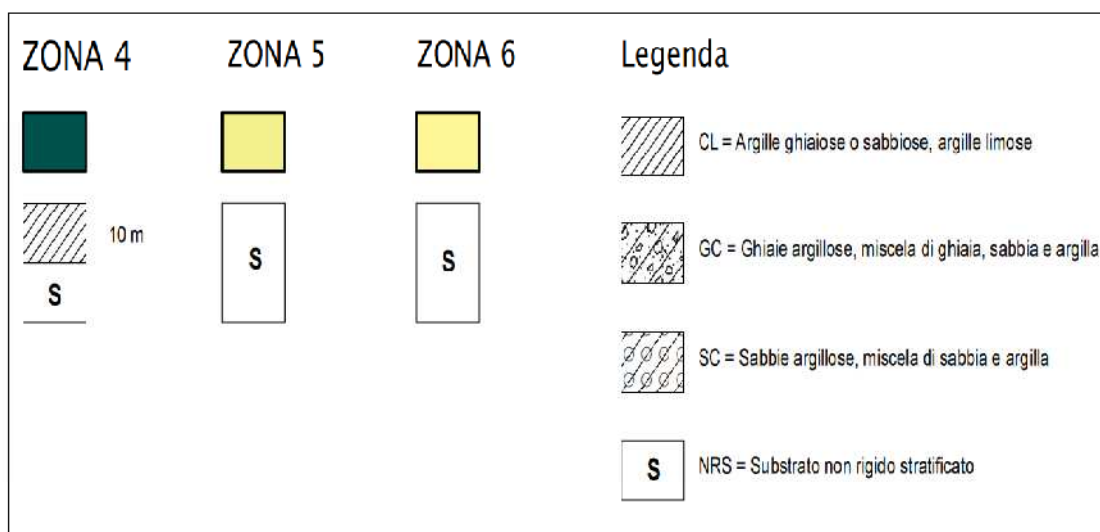


Figura 8.4– Colonne stratigrafiche tipo della Zona 4, Zona 5, Zona 6.

2. zone suscettibili di instabilità nelle quali gli effetti sismici attesi e predominanti, oltre ai fenomeni di amplificazione, sono riconducibili a deformazioni permanenti del territorio. In particolare, per il territorio di Cattolica, le ulteriori indagini geognostiche di repertorio e quelle espletate per lo studio di microzonazione sismica hanno permesso una migliore definizione delle aree potenzialmente suscettibili alla liquefazione. La carta delle MOPS, pertanto, perimetra anche le seguenti aree suscettibili di instabilità, che necessariamente dovranno essere oggetto di ulteriori approfondimenti sismici di terzo livello:

Aree suscettibili di liquefazioni – sabbie pulite e sabbie ghiaiose di spiaggia.

comprendono depositi prevalentemente granulari di spiaggia recente caratterizzate da sabbie medie e fini prevalenti, talvolta con livelli ghiaiosi. Nella carta delle MOPS vengono contraddistinte rispetto alle altre aree suscettibili di instabilità con il numero arabo 1. In tale area, sono indispensabili approfondimenti sismici di terzo livello, relativamente a verifiche quantitative della liquefazione/densificazione, dei cedimenti post-sisma e della risposta sismica locale con modello numerico;

Aree suscettibili di liquefazioni – Sabbie di cordone litoraneo e/o di spiaggia profonde fino a 8÷10 metri

comprendono depositi prevalentemente granulari di facies deposizionale costiera, in particolare di cordone litorale e/o di spiaggia, con sabbie medie e fini prevalenti, di densità medio-alta nei primi 4÷5 metri di profondità e moderatamente addensate più in profondità (DR >45%). Lo spessore complessivo di questa sequenza è di circa 8÷10 metri. Nella carta delle MOPS vengono contraddistinte rispetto alle altre aree suscettibili di instabilità con il numero arabo 2. In tale area sono indispensabili approfondimenti sismici di terzo livello, relativamente a verifiche quantitative della liquefazione/densificazione, dei cedimenti post-sisma e della risposta sismica locale con modello numerico;

Aree suscettibili di liquefazioni – sabbie e sabbie argillose di piana deltizia profonde 8+10 metri

si tratta di sedimenti olocenici, di prevalente facies deposizionale di piana deltizia del Conca ai quali si intercalano depositi di facies costiera (cordone litorale). Lo spessore complessivo di questa sequenza è di circa 8+10 metri. Le caratteristiche tessiturali e geotecniche di questo intervallo sono variabili in funzione del contesto deposizionale predominante. Le sabbie di cordone marino (in genere di granulometria prevalentemente media e spessori inferiori a 150+200 cm) sono caratterizzate da moderato grado di addensamento ($DR > 45\%$), mentre gli intervalli prevalentemente argillosi (depositi alluvionali) appaiono caratterizzati da un grado di plasticità medio-alta ($IP > 20$). Tra le due situazioni tessiturali descritte, si rilevano intervalli caratterizzati da tessiture e caratteristiche meccaniche intermedie. Seguono in profondità sedimenti prevalentemente argillosi di piana alluvionale, (moderatamente sovraconsolidati) fino al bedrock marino pliocenico, collocato nell'area studiata a una profondità media di circa 35 metri. Nella carta delle MOPS vengono contraddistinte rispetto alle altre aree suscettibili di instabilità con il numero arabo 3. In tale area sono indispensabili approfondimenti sismici di terzo livello, relativamente a verifiche quantitative della liquefazione/densificazione, dei cedimenti post-sisma e della risposta sismica locale con modello numerico;

Sovrapposizione di zone suscettibili di instabilità differenti: aree suscettibili di liquefazioni con tombamenti di ex cava

si tratta di ex cave ora tombate di profondità incerta e con caratteristiche di ripristino ignote situate nel contesto di piana deltizia del fiume Conca, già caratterizzata da suscettibilità alla liquefazione/densificazione. In queste aree sono indispensabili approfondimenti sismici di terzo livello, relativamente a verifiche quantitative della liquefazione/densificazione, dei cedimenti post-sisma e della risposta sismica locale con modello numerico, se del caso anche bi-tridimensionale.

La carta delle MOPS riporta anche le forme di superficie, che per l'area di studio della microzonazione sono riconducibili a orli di scarpata di terrazzo fluviale (di altezza compresa tra 10+20 metri) e di scarpata prevalentemente morfologica (solamente la ripa di Monte Vici, con acclività media di circa 35°).

Si riportano, inoltre, le tracce delle sezioni geologiche considerate di riferimento per questo lavoro, ovvero le sezioni RER 1-1' e 2-2' e la sezione geologico-tecnica 3-3', ricostruita per la modellazione geotecnica e sismica dell'area oggetto degli approfondimenti di terzo livello ("Ambito M").

La figura 8.5 riporta uno stralcio della legenda elaborata per la rappresentazione cartografica.



Figura 8.5 – Stralcio della legenda della <<Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica>> elaborata per lo studio di microzonazione sismica di Cattolica.

8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)

La <<carta delle velocità delle onde di taglio>>, elaborata alla scala 1:5.000, localizza tutti i punti di misura di Vs con indicazione, per ogni punto di misura, del valore di VsH (in m/s) e H (spessore delle coperture).

Nel caso di Cattolica, come meglio descritto nel capitolo 4 della Relazione, sono state eseguite

indagini sismiche (Down-Hole; SCPT) che non hanno raggiunto il bedrock sismico: ciò viene comunque evidenziato anche nella cartografia, nell'etichetta creata per ogni singola prova di riferimento, riportando anche il valore di Vs per l'intervallo comunque attraversato.

8.6 Carta di microzonazione sismica livello 2

La <<carta di microzonazione sismica livello 2>>, elaborata alla scala 1:5.000, riporta:

1. le <<zone stabili suscettibili di amplificazione>> (individuate nella carta delle MOPS), con gli esiti dell'amplificazione tramite procedura semplificata (secondo livello). L'amplificazione è stata quantificata riferendosi agli Allegati della deliberazione dell'Assemblea Legislativa della regione Emilia-Romagna n.112 del 2 maggio 2007 (DAL 112/2007). Per tali aree, l'amplificazione è stata quantificata secondo i seguenti parametri FA riferiti alla superficie:
 - FA_{PGA} → 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;
 - FA_{SI} - Intensità spettrale di Housner → indicatore della pericolosità sismica, è definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità, nel nostro caso si sono determinati i fattori di amplificazione per i due intervalli di frequenze, rispettivamente da $0.1 < T_0 < 0.5$ s e da $0.5 < T_0 < 1$ s ($FA_{0,1-0,5s}$ e $FA_{0,1-1s}$)

I fattori di amplificazione sopra descritti, sono desunti dagli abachi riportati nella DAL 112/2007 (Allegato A2), riferiti a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche che tengono conto delle caratteristiche litologiche e morfologiche e della profondità del bedrock sismico.

Il capitolo 7 (paragrafo 7.1) descrive più nel dettaglio i fattori di amplificazione considerati, e gli esiti della microzonazione di secondo livello così ottenuti.

Dal punto di vista cartografico, sono state dunque prodotte tre differenti carte: ognuna di esse riporta, per una migliore comprensione, un solo fattore di amplificazione e cioè FA_{PGA} , FA_{SI} per l'intervallo $0.1 < T_0 < 0.5$ s e FA_{SI} per l'intervallo $0.5 < T_0 < 1$ s. Gli esiti dell'amplificazione, per ogni fattore, sono stati ordinati in classi crescenti secondo quanto richiesto dagli <<standard di rappresentazione e archiviazione informatica>> (v.2.0, giugno 2012) che consentono di evidenziare con dovuta chiarezza quali aree risultano più critiche dal punto di vista della risposta sismica. Occorre precisare che, poiché i fattori di amplificazione di riferimento per la Regione Emilia-Romagna differiscono da quelli riportati dagli ICMS 2010 (§ volume 2, parte terza), per gli shapefile poligonali "Stab" e "Instab", contenuti nel database per l'archiviazione dei dati della microzonazione sismica, si sono effettuate le seguenti modifiche nella struttura delle rispettive tabelle degli attributi:

- nel campo <<F_x>> (già previsto per riportare un altro valore di amplificazione rispetto a quelli indicati dagli ICMS 2010) si è riportato il valore FA_{PGA} valutato per tale poligono/microzona;
 - si è aggiunto il nuovo campo <<F_y>> nel quale è riportato il valore di $FA_{0,1-0,5s}$ valutato per tale poligono/microzona;
 - si è aggiunto il nuovo campo <<F_z>> nel quale è riportato il valore di $FA_{0,5-1s}$ valutato per tale poligono/microzona.
2. Le <<zone suscettibili di instabilità>> (individuate nella carta delle MOPS), sono state perimetrate e distinte, riportando in legenda gli approfondimenti di terzo livello richiesti. In particolare, si distinguono le seguenti zone suscettibili di instabilità:

Aree suscettibili di liquefazioni – sabbie pulite e sabbie ghiaiose di spiaggia.

Contraddistinte con il numero arabo 1. In tale area, sono indispensabili approfondimenti sismici di terzo livello, relativamente a verifiche quantitative della liquefazione/densificazione, dei cedimenti post-sisma e della risposta sismica locale con modello numerico;

Aree suscettibili di liquefazioni – Sabbie di cordone litoraneo e/o di spiaggia profonde fino a 8÷10 metri

Contraddistinte con il numero arabo 2. In tale area sono indispensabili approfondimenti sismici di terzo livello, relativamente a verifiche quantitative della liquefazione/densificazione, dei cedimenti post-sisma e della risposta sismica locale con modello numerico;

Aree suscettibili di liquefazioni – sabbie e sabbie argillose di piana deltizia profonde 8÷10 metri

Contraddistinte con il numero arabo 3. In tale area sono indispensabili approfondimenti sismici di terzo livello, relativamente a verifiche quantitative della liquefazione/densificazione, dei cedimenti post-sisma e della risposta sismica locale con modello numerico;

Sovrapposizione di zone suscettibili di instabilità differenti: aree suscettibili di liquefazioni con tombamenti di ex cava

In queste aree sono indispensabili approfondimenti sismici di terzo livello, relativamente a verifiche quantitative della liquefazione/densificazione, dei cedimenti post-sisma e della risposta sismica locale con modello numerico, se del caso anche bi-tridimensionale.

Per ogni ulteriore descrizione delle zone suscettibili di instabilità si rimanda ai precedenti capitoli e in particolare al paragrafo 8.5.

8.7 Carta di microzonazione sismica livello 3

La <<carta di microzonazione sismica livello 3 >>, elaborata alla scala 1:5.000, riporta:

1. le <<zone stabili suscettibili di amplificazione>> (individuate nella carta delle MOPS), con gli

esiti dell'amplificazione tramite procedura semplificata (secondo livello) già riportati nella <<carta di microzonazione sismica livello 2>>. Si rimanda al precedente paragrafo 8.6 per ogni ulteriore descrizione;

2. le <<zone suscettibili di instabilità>> (individuate nella carta delle MOPS), sono state perimetrate e distinte, indicando in legenda gli approfondimenti di terzo livello richiesti. In particolare, oltre a quanto riportato nella <<carta di microzonazione sismica livello 2>> si propongono gli esiti degli approfondimenti sismici espletati per l'“Ambito M” (§ capitolo 1), situato nella zona urbana costiera di Cattolica, e in particolare nella porzione interessata da propensione alla liquefazione.

Si tratta di approfondimenti quantitativi della propensione alla liquefazione (stima del fattore di sicurezza “FS” e dell'indice del potenziale di liquefazione “LPI” da prove CPTE/CPTU) e di approfondimenti della risposta sismica locale mediante modellazione numerica monodimensionale.

Per quanto riguarda gli esiti numerici di risposta sismica locale, si segnala che l'amplificazione ricavata dalla modellazione numerica è stata quantificata riferendosi ancora agli Allegati della deliberazione dell'Assemblea Legislativa della regione Emilia-Romagna n.112 del 2 maggio 2007 (DAL 112/2007) e cioè stimando i fattori di amplificazione FA_{PGA} e FA_{SI} (per i due intervalli di frequenze, rispettivamente da $0.1 < T_0 < 0.5$ s e da $0.5 < T_0 < 1$ s), così come già espletato per le aree interessate dalla microzonazione sismica di secondo livello (§ paragrafo 8.6).

Per i dettagli sugli approfondimenti sismici espletati si rimanda invece al paragrafo 7.2.

In sintesi, l'area oggetto di approfondimenti sismici (“Ambito M”) è stata suddivisa nelle seguenti due sub-zone, omogenee dal punto di vista della caratterizzazione sismica:

- “sub-zona 2a” → (compresa nelle <<aree suscettibili di liquefazioni – Sabbie di cordone litoraneo e/o di spiaggia profonde fino a 8+10 metri>> individuate nella carta delle MOPS);
- “sub-zona 3a” → (compresa nelle <<aree suscettibili di liquefazioni – Sabbie e sabbie argillose di piana deltizia profonde 8+10 metri>> individuate nella carta delle MOPS).

Per le due sub-zone, si riportano in legenda gli esiti parametrici sopra descritti di liquefacibilità e di risposta sismica locale.

Dal punto di vista cartografico, sono state dunque prodotte tre differenti carte, così come espletato anche per la cartografia di microzonazione di livello 2: ognuna di esse riporta, per una migliore comprensione, un solo fattore di amplificazione e cioè FA_{PGA} , FA_{SI} per l'intervallo $0.1 < T_0 < 0.5$ s e FA_{SI} per l'intervallo $0.5 < T_0 < 1$ s.

Gli esiti dell'amplificazione, per ogni fattore, sono stati ordinati in classi crescenti secondo quanto richiesto dagli <<standard di rappresentazione e archiviazione informatica>> (v.2.0, giugno 2012) che consentono di evidenziare con dovuta chiarezza quali aree risultano più critiche dal punto di vista della risposta sismica.

Occorre precisare che, poiché i fattori di amplificazione di riferimento per la Regione Emilia-Romagna

differiscono da quelli riportati dagli ICMS 2010 (§ volume 2, parte terza), per gli shapefile poligonali “Stab” e “Instab”, contenuti nel database per l'archiviazione dei dati della microzonazione sismica, si sono effettuate le seguenti modifiche nella struttura delle rispettive tabelle degli attributi:

- nel campo <<Fx>> (già previsto per riportare un altro valore di amplificazione rispetto a quelli indicati dagli ICMS 2010) si è riportato il valore FA_{PGA} valutato per tale poligono/microzona;
- si è aggiunto il nuovo campo <<Fy>> nel quale è riportato il valore di $FA_{0,1-0,5s}$ valutato per tale poligono/microzona;
- si è aggiunto il nuovo campo <<Fz>> nel quale è riportato il valore di $FA_{0,5-1s}$ valutato per tale poligono/microzona.

9 Proposta normativa

Per l'attuazione degli interventi di POC si propone la seguente normativa sismica:

Art. ?? Prescrizioni relative alla fattibilità geologica e agli approfondimenti e verifiche da effettuare in fase di progettazione urbanistica attuativa ed esecutiva in relazione al rischio sismico

1. La Relazione Geologica allegata al POC riepiloga e approfondisce gli aspetti conoscitivi di carattere geologico e sismico di interesse per gli interventi inseriti nel POC. Per gli aspetti specifici di rischio sismico, la Relazione Geologica del POC si riferisce agli esiti dello studio di microzonazione sismica di "livello 2" del territorio comunale urbanizzato/urbanizzabile (con ulteriori approfondimenti di "livello 3" espletati per l'"Ambito M" della fascia mare e arenile). Tale studio, aggiornato al 30/05/2013, viene recepito dal PSC e costituisce specifico riferimento tematico per gli strumenti di pianificazione urbanistica alla scala comunale. La relazione Geologica del POC allega gli stralci delle cartografie di microzonazione sismica 2013 comprendenti gli interventi di interesse.
2. Gli interventi inseriti nel POC sono soggetti alle prescrizioni, alle condizioni e ai limiti di fattibilità geologica e sismica contenute nella Relazione Geologica allegata al POC e ulteriormente sintetizzate nelle schede urbanistiche per gli interventi negli ambiti di PSC (4.1 e 4.2).
3. Gli interventi inseriti nel POC e soggetti a successivi Piani Attuativi Urbanistici, sono tenuti a riferirsi alla pericolosità definita nello studio di microzonazione sismica 2013. Gli interventi ricadenti nelle "zone suscettibili di instabilità" (§ stralcio <<Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica>>), in sede di PUA sono tenuti ad espletare gli ulteriori approfondimenti sismici di "livello 3", ai sensi della DAL n.112/2007.
4. Gli interventi inseriti nel POC e attuabili attraverso "permesso di costruire convenzionato" sono tenuti ad espletare gli approfondimenti geologici e sismici ai sensi delle Norme tecniche per le Costruzioni (NTC), in relazione alle effettive caratteristiche prestazionali dei manufatti di progetto (vita nominale; classe d'uso, periodo di riferimento per l'azione sismica, ecc.). Tali interventi sono altresì tenuti a riferirsi alla pericolosità definita nello studio di microzonazione sismica 2013. Gli interventi ricadenti nelle "zone suscettibili di instabilità" (§ stralcio <<Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica>>), devono essere preventivamente inclusi nella categoria aggiuntiva "S2" come previsto dalle NTC vigenti.
5. Gli esiti dello studio di microzonazione sismica 2013 impongono la massima attenzione per quanto riguarda le analisi della liquefacibilità da espletare ove tale fenomeno cosismico è stato potenzialmente riscontrato. In questo senso, nella predisposizione del "piano delle

indagini” per gli interventi di progetto si consiglia la scelta di prove penetrometriche CPTE/CPTU per effettuare le opportune verifiche speditive. Si raccomanda particolare attenzione anche per quanto riguarda le analisi di risposta sismica locale: il bedrock sismico poco profondo riscontrato nel territorio comunale può indurre evidenti effetti di amplificazione e in tal senso si consigliano valutazioni approfondite riguardo ai possibili fenomeni di “risonanza” tra sottosuolo e strutture in elevazione

10 Bibliografia

Basili R., G. (>1 m) Classificazione Inella li, P. Burrato, U. Fracassi, S. Mariano, M.M. Tiberti, E. Boschi (2008) - The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology. Tectonophysics.

Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2004) - *Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes*. Proc., 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., ed Stallion Press, Vol. 1, 32-56.

Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2007) - *Evaluation of cyclic softening in silts and clays*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 133(6): 641-52.

Crespellani, Nardi, Simoncini (1991) - *La liquefazione del terreno in condizioni sismiche*. Zanichelli, Bologna.

Elmi, Zecchi (1982) - *Note sulla sismicità dell'appennino emiliano-romagnolo*. In Guida alla geologia del margine appenninico-padano. Società Geologica Italiana - Guide Geologiche regionali, Bologna.

Facciorusso, J., Madiati C., Vannucchi G., Martelli, L., 2012. *Analisi di dettaglio finalizzata alla valutazione della pericolosità di liquefazione: il caso della costa adriatica romagnola*. In: "La microzonazione sismica per la gestione del territorio. L'esperienza della regione Emilia-Romagna". Regione Emilia-Romagna Eds.

Galli, Meloni, Rossi (1999) - *Historical liquefaction in Italy: relationship between epicentral distance and seismic parameters*. European Geophysical Society XXVIII General Assembly Natural Hazards NH3, The Hague, Netherlands.

Gruppo di lavoro MS (2008) - *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Dvd.

INGV - DISS Working Group (2010) - *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.1.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>.

Locati, R. Camassi e M. Stucchi (a cura di), 2011. *DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano*. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>. DOI: 10.6092/INGV.IT-DBMI11.

Meletti, Valensise (2004) - *Zonazione sismogenetica ZS9 - App.2 al Rapporto conclusivo*. Gruppo di lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (Ordinanza PCM 3274/2003), Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Oikos Ricerche srl - Studio di Geologia Applicata Viel & Associati (2006) - *Piano Strutturale Comunale (PSC) per il Comune di Cattolica; Studi su idrogeologia e geo-morfologia del territorio e studi sulla sismicità*.

Oikos Ricerche srl - Studio Viel & Sangiorgi (2009) - *Piano Operativo Comunale (POC) per il Comune di Cattolica; Studi su Microzonazione Sismica, Geotecnica e Qualità delle Acque*

Sotterranee.

Regione Emilia Romagna - Ufficio Geologico (1999) – Carta Geologica di pianura dell'Emilia-Romagna – scala 1:250.000. Ed. SELCA, Firenze.

Regione Emilia Romagna - Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, CNR - Istituto di Geoscienze e Georisorse (2004) - *Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna – scala 1:250.000. Ed. SELCA, Firenze.*

Regione Emilia Romagna - *Legge Regionale n.20/2000 - “Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio”.*

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

Robertson P.K. (2009). *Performance based earthquake design using the CPT*. Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering - from case history to practice, IS-Tokyo, June 2009.

Robertson P.K., Lisheng S. (2010). Estimation of seismic compression in dry soils using the CPT. *FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING AND SOIL DYNAMICS, Symposium in honor of professor I. M. Idriss, SAN diego, CA.*

Robertson P.K., Cabal K.L. (2010). Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. *Gregg Drilling & Testing, Inc., 4th Edition, July 2010.*

Robertson P.K. (2009). Interpretation of Cone Penetration Tests - a unified approach., *Canadian Geotechnical Journal* 46(11): 1337–1355.

Robertson P.K. (2010). Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength Using the Cone Penetration Test. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 136, 842 (2010).

Robertson P.K. and, Wride CE . (1998). “Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test”. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, Vol. 35, No. 3 : pp. 442-459.

Youd, T.L., and Idriss, I.M. (2001). "Liquefaction Resistance of Soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127(4), 297-313.

Zhang, Robertson, Brachman (2002). Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(5) : 1168-1180, 10.1139/t02-047.