

Via Valsellustra 32  
40060 Dozza - BOLOGNA



**Studio Samuel Sangiorgi**  
*Geologia Applicata*

**Comune:**

**COMUNE DI CATTOLICA (RN)**

**Oggetto:**

**PIANO DELL'ARENILE**  
**RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA**  
*(con aggiornamenti della MS ai sensi della DGR 476/2021)*

**Stesura:**

**dicembre 2022**

**Elaborazione:**

**Dr geol. Samuel Sangiorgi**



**Committente:**

**Comune di Cattolica**

tel/fax 0542 640279

mail [info@studiosamuelsangiorgi.eu](mailto:info@studiosamuelsangiorgi.eu)

[www.studiosamuelsangiorgi.eu](http://www.studiosamuelsangiorgi.eu)



## INDICE GENERALE

1	INTRODUZIONE.....	2
2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	4
2.1	Cenni di geologia regionale.....	4
2.2	Il contesto litostratigrafico.....	5
3	CARATTERIZZAZIONE GEOMORFOLOGICA.....	8
4	CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA.....	11
5	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA PRELIMINARE.....	13
5.1	Le indagini geognostiche/geofisiche disponibili.....	13
5.2	Valutazioni geotecniche preliminari dei terreni.....	15
6	CRITICITÀ IDRAULICHE.....	19
6.1	Definizione del rischio idraulico.....	19
6.2	Il PAI Marecchia Conca e il PGRA (primo ciclo di aggiornamento).....	19
6.3	Il secondo ciclo di aggiornamento del PGRA.....	20
6.4	Pericolosità connessa al reticolo idrografico (RP e RSP).....	22
6.5	Pericolosità connessa alla costa (ACM).....	26
7	RISCHIO SISMICO.....	28
7.1	La pericolosità sismica di base.....	28
7.2	Gli indirizzi regionali per gli studi di MS e mappa MPS04.....	34
7.3	La MS comunale e il rischio sismico di area vasta.....	36
7.4	L'aggiornamento della MS per l'Arenile di Cattolica (DGR 476/2021).....	38
7.4.1	<i>Dati sismostratigrafici del sottosuolo.....</i>	<i>38</i>
7.4.2	<i>Sintesi illustrativa delle microzone omogenee in prospettiva sismica – MOPS.....</i>	<i>42</i>
7.4.3	<i>I fattori di amplificazione considerati per la MS.....</i>	<i>44</i>
7.4.4	<i>Simulazioni numeriche della risposta sismica locale (approfondimenti di livello 3).....</i>	<i>45</i>
7.4.5	<i>Verifiche quantitative della liquefacibilità e dei cedimenti post sisma (approfondimenti di livello 3).....</i>	<i>50</i>
7.4.6	<i>Elaborazione dei valori di “Hazard”.....</i>	<i>54</i>
7.4.7	<i>Sintesi dei risultati.....</i>	<i>54</i>
8	ELABORATI IN APPENDICE ALLA RELAZIONE E ULTERIORI ALLEGATI.....	60
8.1.1	<i>Tavole a corredo della MS dell'Arenile (appendice).....</i>	<i>60</i>
8.1.2	<i>Report verifiche della liquefazione e cedimenti post sisma (appendice).....</i>	<i>60</i>
8.1.3	<i>Archivio delle indagini (allegato).....</i>	<i>60</i>

### APPENDICE:

*Tavole a corredo della MS dell'Arenile (DGR 476/2021)*

*Report verifiche della liquefazione e cedimenti post sisma*

## 1 INTRODUZIONE

Lo Studio scrivente è stato incaricato dall'Amministrazione comunale di redigere lo studio geologico e sismico a supporto del nuovo Piano dell'Arenile comunale. L'arenile, che si sviluppa per circa 2.200 metri viene localizzato nella figura 1.1.



*Figura 1.1 – Limite del territorio pertinente il Piano dell'Arenile, indicato con linea rossa (base topografica 1:25.000 RER)*

Lo studio si è basato sulle indagini geognostiche/geofisiche già disponibili per il territorio comunale. L'Amministrazione, infatti, già dispone di uno studio di microzonazione sismica (MS) con approfondimenti fino al "livello 3", svolti nel 2014 e realizzato con i contributi stanziati dalla Protezione Civile nazionale (OPCM 4007/2012). Per tale studio, furono raccolte numerose indagini di repertorio e realizzate nuove e specifiche indagini geognostiche/geofisiche. È stato inoltre realizzato un importante "archivio delle indagini" disponibile per questo studio.

Il lavoro svolto ha tuttavia necessitato di un'importante revisione dello studio di microzonazione sismica, per consentire l'adeguamento dello studio ai più recenti Indirizzi regionali in materia sismica (DGR 476/2021). Sono state inoltre rielaborate le analisi conoscitive relative al contesto geologico, idrogeologico e idraulico (ai fini di un adeguamento degli elementi conoscitivi rispetto alla Variante PAI 2016 e al PGRA). Più in dettaglio, la Relazione ha

descritto e/o elaborato i seguenti elementi conoscitivi:

- l'inquadramento geologico (con cenni di geologia strutturale e descrizione del contesto litostratigrafico)
- la caratterizzazione geomorfologica e idrogeologica locale
- la caratterizzazione geotecnica preliminare (con la redazione di uno specifico allegato contenente i report delle indagini geognostiche/geofisiche di repertorio)
- l'analisi delle criticità idraulico (con particolare riferimento alla Variante PAI 2016 e al PGRA (primo e secondo ciclo di aggiornamento)
- l'analisi del rischio sismico (con particolare riferimento alla "pericolosità di base" e all'aggiornamento della microzonazione sismica per l'Arenile, ai sensi della DGR 476/2021) e con approfondimenti di livello 3 (relativi alla risposta sismica locale e alle verifiche quantitative della suscettibilità alla liquefazione e dei cedimenti post sisma)

Per quanto riguarda la revisione della microzonazione sismica, in calce alla relazione vengono allegate le specifiche tavole (per il livello 1 e il livello 3) richieste dagli Indirizzi RER per la MS.



## 2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

### 2.1 Cenni di geologia regionale

L'assetto tettonico strutturale del territorio di Cattolica è ben schematizzato nella figura 2.1, 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 e all., 2002, RER e CNR).

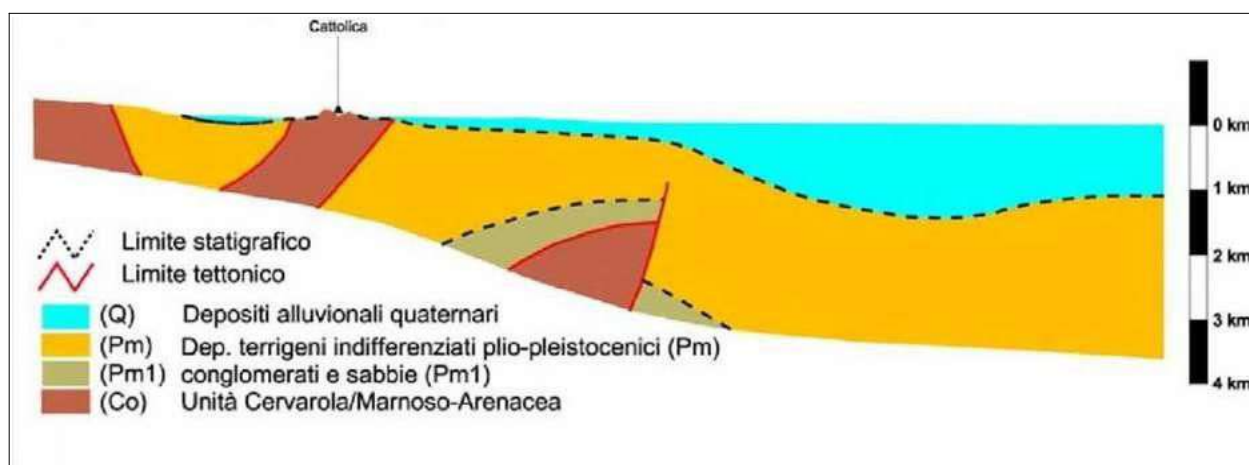


Figura 2.1 – Profilo ipotetico tracciato tra l'entroterra del Comune di Cattolica e l'antistante area "offshore" (da A. Cerrina Ferroni e all., 2002 – RER e CNR, rielaborata da Viel e all., 2006)

Come si può osservare dalla sezione di figura 2.1, il substrato continentale risulta deformato dall'intensa attività tettonica che, a partire dall'Oligocene (circa 30 Mln di anni), ha portato alla strutturazione dell'Appennino settentrionale fino alla formazione di faglie inverse e pieghe "off shore" che danno origine anche alle cosiddette "Pieghe Adriatiche" (Pieri e Groppi, 1981). Il vero fronte della catena appenninica, pertanto, non coincide con il passaggio morfologico collina-pianura, osservabile a sud della fascia costiera, bensì con l'arco più esterno delle Pieghe Adriatiche, che si sviluppano nel sottosuolo del Mar Adriatico, ove i depositi continentali risultano sepolti dai più recenti depositi alluvionali quaternari e costieri.

Nel territorio di Cattolica, queste deformazioni tettoniche sono ben evidenziate dai depositi della "Formazione a Colombacci" (Messiniano medio-superiore), in affioramento come cresta in erosione conseguente all'asse di anticlinale (formatosi nella fase traslativa del Pliocene inferiore), collocato poco a sud della linea di costa. Depositati continentali più recenti, attribuiti alla "Formazione delle Argille Azzurre" (Zancleiano-Pleistocene medio,) risultano invece affiorare presso il limite comunale SO di Cattolica, cioè retrostanti alla citata struttura anticlinalica (vedi figura 2.2).

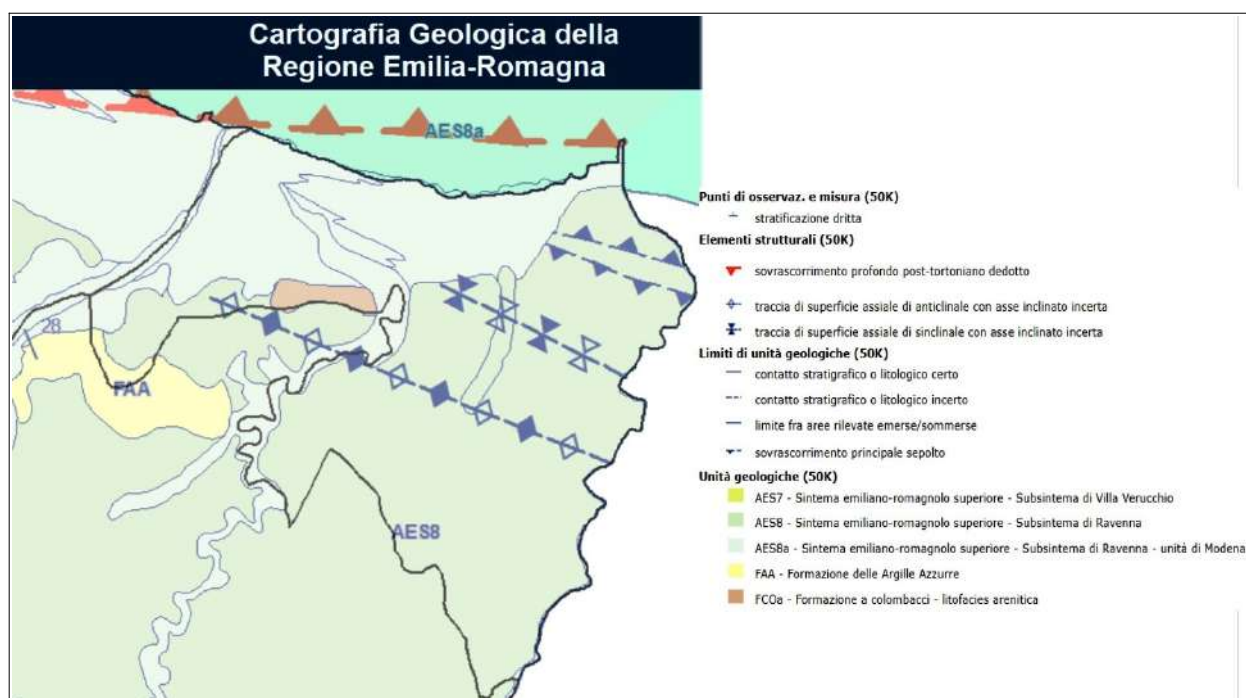


Figura 2.2 – Stralcio della cartografia geologica RER con particolare rappresentazione dei depositi affioranti e dei principali elementi strutturali che interessano il territorio comunale di Cattolica (Fonte: SGSS Regione Emilia-Romagna)

## 2.2 Il contesto litostratigrafico

Come già accennato, l'assetto geologico strutturale ha condizionato l'assetto deposizionale in affioramento. In particolare, i depositi continentali risultano suturati dai depositi alluvionali dei principali corsi d'acqua locali (fiumi Conca e Tavollo; rio Ventena) e dai depositi della fascia costiera. La precedente figura 2.2 rappresenta schematicamente le unità deposizionali affioranti nel territorio di Cattolica, così come riportate nella cartografia geologica RER.

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

- alla “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-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. Formano corpi lenticolari di 2–40 m distribuiti ad altezze diverse entro FCO. L'età deposizionale è attribuita al Messiniano medio e superiore;

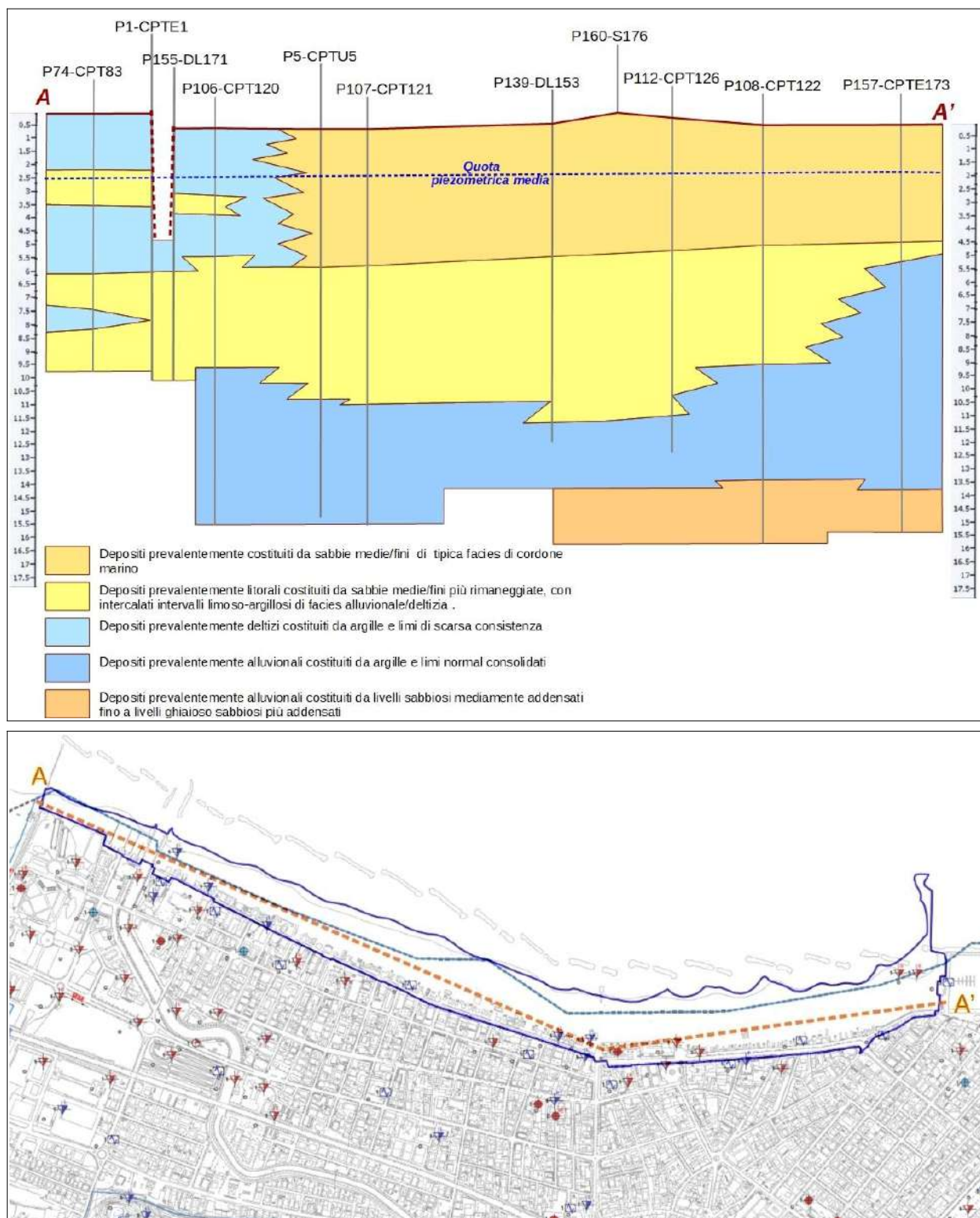
- alla “Formazione delle Argille Azzurre” (identificata con la sigla “FAA” nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000) → affioranti nella limitata porzione di versante a ridosso di Montalbano (parte SO del Comune, verso l'Autostrada A14, esterna al territorio urbanizzato), si tratta 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 Pliocene-Pleistocene inferiore;

I depositi alluvionali affioranti territorio comunale sono invece riconducibili:

- ai “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. L'età deposizionale è riconducibile al Pleistocene superiore-Olocene. La carta geologica regionale alla scala 1:10.000 distingue inoltre i “depositi alluvionali dell'Unità di Modena” (identificati con la sigla “AES8a” nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000). Si tratta di sedimenti alluvionali anch'essi 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.

Nell'Arenile i depositi più superficiali (recenti) sono tuttavia attribuibili ai depositi granulari costieri. Si tratta di sabbie medie e grossolane, correlabili a facies deposizionale di alta energia e con tessiture e stratificazione variabile (da incrociata a orizzontale). I depositi costieri compresi nel settore comunale più occidentale risultano significativamente rimaneggiati dalla deposizione alluvionale deltizia dei corsi d'acqua Conca e Ventena)

La seguente figura 2.3 rappresenta una ricostruzione schematica del modello geologico rappresentativo dell'arenile di Cattolica.



### 3 CARATTERIZZAZIONE GEOMORFOLOGICA

Come già descritto, l'assetto geomorfologico locale è strettamente correlato al contesto tettonico strutturale. Tuttavia la fisiografia dei luoghi è risultata fortemente condizionata anche dal contesto climatico e dall'evoluzione morfologica e deposizionale dei corsi d'acqua che attraversano il territorio di Cattolica fino allo sbocco in mare. In questo senso, la ricostruzione di sottosuolo già svolta<sup>1</sup> per gli studi territoriali ha confermato l'assetto morfologico fossilizzato nelle forme superficiali ancora oggi rilevabili, malgrado l'intensa urbanizzazione abbia cancellato molte delle tracce morfologiche ancora presenti nel Milleottocento. In sintesi, gli aspetti morfologici più significativi dell'intero territorio comunale possono essere così riassunti:

- la morfologia attuale presenta un significativo “berm” (vedi figura 3.1) 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 m fino a circa 3 metri) e di pendenza variabile, di difficile ricostruzione anche a causa delle manomissioni antropiche.

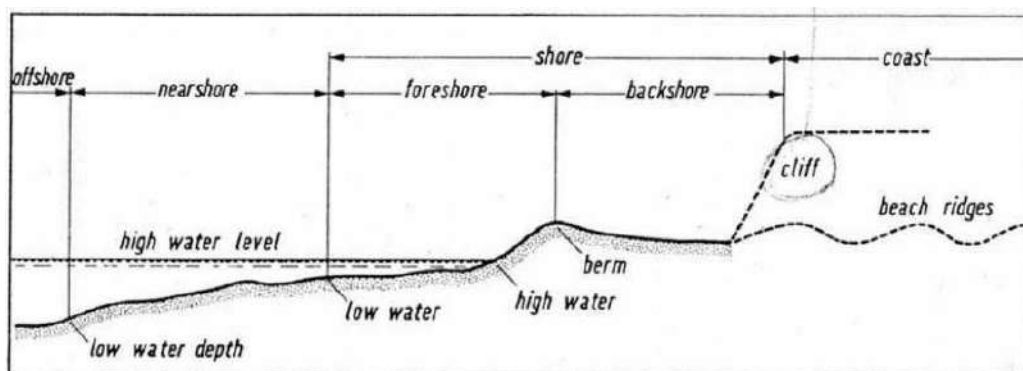


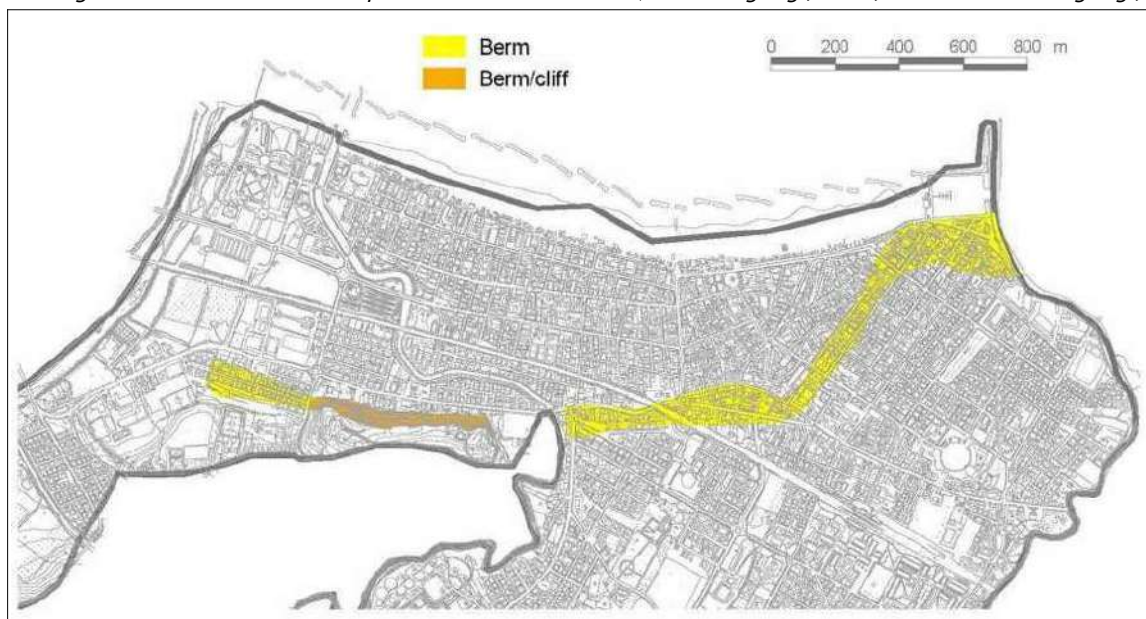
Figura 3.1 - Schema del profilo costiero e terminologia (da “Theoretical Geomorphology”, A. E. Scheidegger, 1965)

La ripa marina, è stata oggetto di numerosi studi, anche se non esistono valutazioni concordanti sull'epoca di formazione. 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). La figura 3.2 propone una ricostruzione della scarpata di “berm” ancora riconoscibile (Viel & Associati, 2006 – S. Sangiorgi, 2013);

<sup>1</sup> Quadro Conoscitivo del PSC di Cattolica (cfr. “Relazione Geologica” – Studio Viel & Associati, 2006)



Figura 3.2 – Rilievo della scarpata di “berm” e di “cliff” (Viel & Sangiorgi, 2006, rielaborata da Sangiorgi,



2013)

- il rilievo di Monte Vici (“Torre Conca”), appare come una struttura residuale derivata dalla demolizione del substrato marino (“Formazione c Colombacci”) operata dall’azione erosiva combinata dei corsi d’acqua Conca, Ventena e Tavollo, nonché 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 3.1);
- il corso del Ventena appare caratterizzato da meandri “ereditati”: il confronto con l’andamento delle porzioni terminali degli alvei dei principali corsi d’acqua Conca e Tavollo, dimostra che questo tratto di pianura costiera presentava, e presenta tutt’ora, acclività sufficienti ad un normale sbocco a mare dei corsi d’acqua. I tratti terminali degli alvei del Conca e del Tavollo, infatti, sono sostanzialmente rettilinei oppure 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 torrente ha dunque cercato verso il Conca 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 sono probabilmente "ereditati" da un passato morfologico di età pre-wurmiana;

- 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 "berm" nei pressi dell'incrocio di via Mazzini con via Indipendenza, forse eredità di un paleoalveo del Ventena o del Tavollo. La traccia di questo piccolo rio, è ben riconoscibile nella figura 3.3 che rappresenta 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;
- la scarpata (circa 10 m) sopra la quale è insediata Montalbano, al 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.



Figura 3.3 – Stralcio della Carta Storica Regionale, F° 268, scala 1:50.000 (R.E.R., ed. 1999)

## 4 CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA

Per il Quadro Conoscitivo del PSC è stata espletata un'analisi idrogeologica con il rilevamento dei pozzi freatici distribuiti nel territorio comunale e la ricostruzione del campo di moto dell'insieme delle falde meno profonde. Seppure tale studio sia stato svolto nel 2006 (i rilievi e le misure sono state eseguite tra il 28 febbraio ed il 4 marzo 2006), si tratta di un dato conoscitivo territoriale tuttora di estrema importanza in quanto ha permesso di individuare pozzi freatici a largo diametro entro la zona urbana storicamente consolidata, cioè a nord dell'asse ferroviario (ben 11 pozzi su 32 complessivi).

I pozzi controllati avevano profondità comprese tra 3 m e 21 metri ed intercettavano la falda freatica ospitata nel materasso alluvionale sovrastante il bedrock argilloso plio-pleistocenico. In alcuni casi (nel territorio sud-occidentale), i pozzi rilevati risultavano più profondi della coltre più alterata dello stesso substrato roccioso per costituire una sorta di "pozzo serbatoio". Il campo di moto della falda freatica è stato rappresentato su una carta idrogeologica, con isopieze di passo pari a 2 metri.

La figura 4.1 riporta uno stralcio (modificato) della Tavola 5 "Carta Idrogeologica" elaborata a corredo del PSC di Cattolica. Nella figura, viene rappresentato anche il limite dell'areale incluso nel Piano dell'Arenile.

In sintesi, la ricostruzione idrogeologica ha evidenziato due probabili fronti di ricarica freatica, in concomitanza dei due principali rilievi del territorio comunale. Il fronte di ravvenamento più rilevante, sembra essere quello a valle dal rilievo isolato di "Torre Conca". Il flusso sotterraneo nelle alluvioni comprese tra il Tavollo ed il Ventena risente, invece, della modesta depressione morfologica (una blanda incisione valliva, già descritta nel precedente capitolo) che, dalla zona dello stadio comunale, si pronuncia verso nord fino al viale Fiume. Il contesto morfologico descritto, consente la formazione di un principale asse di drenaggio verso mare, in concomitanza del paleoalveo sepolto.

L'andamento delle isopieze aiuta la comprensione dei rapporti tra acque sotterranee e acque superficiali: il Ventena risulterebbe drenante nella zona alluvionale (a nord della scarpata marina), mentre verso costa perderebbe ogni rapporto con la falda. Anche il Tavollo, ancora fino al suo tratto canalizzato, si rivela drenante la falda. Per il Conca, invece, si può soltanto supporre un possibile modesto effetto infiltrante verso costa, cioè nella porzione depressa di "foreshore" a nord della via Emilia Romagna.

Nell'areale corrispondente all'Arenile, la falda più superficiale risulta tuttavia condizionata (sia nel deflusso che nelle soggiacenze) dal livello del mare e dalle maree.

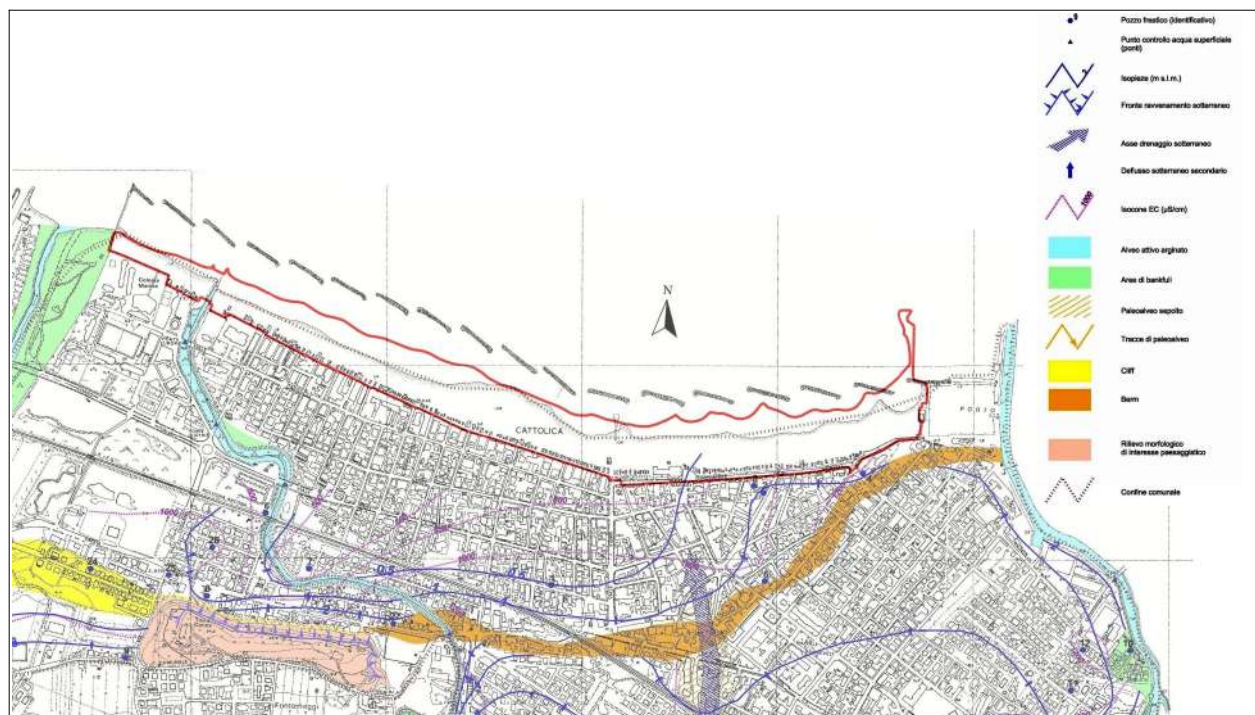


Figura 4.1 - Stralcio della "Tavola 5 - Carta Idrogeologica", scala 1:5.000 prodotta a corredo del PSC

## 5 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA PRELIMINARE

### 5.1 Le indagini geognostiche/geofisiche disponibili

Per il nuovo Piano dell'Arenile si è effettuata una selezione (con riordino) delle indagini già disponibili per Comune di Cattolica (cfr studio di MS OPCM 4007/2012).

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 e in particolare:

- una "down hole" (DH), nel foro del sondaggio (268010P503) realizzato fino a 48 metri di profondità sulla sponda destra del Conca, in corrispondenza dell'apparato di foce;
- due coni sismici (SCPT), realizzati rispettivamente in vicinanza alla citata DH, (spinto fino a 25 m), e sulla spiaggia immediatamente ad ovest del porto di Cattolica (fino a 14 m).

Tra i dati pregressi, per la modellazione geotecnica e sismica dell'Arenile sono risultati molto utili gli esiti dell'indagine geologica espletata per la riqualificazione dell'area "ex hotel Linda", in particolare, oltre a prove DPSH spinte fino a circa 16 m di profondità, venne eseguito un sondaggio a carotaggio continuo, 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  $9,0 \div 9,5$  m);  $IP = 25,1$  (campione a  $14,5 \div 15,0$  m);  $IP = 36,8$  (campione a  $19,5 \div 20,0$  m).

Tra i dati pregressi, sono stati considerati anche gli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche espletate per il primo Piano Operativo Comunale (POC) di Cattolica, ed in particolare sono state considerate le seguenti prove:

- un sondaggio a percussione tipo "GeoProbe" che, sebbene utilizzato prevalentemente nel campo ambientale, ha permesso il recupero di campioni per analisi granulometriche (determinazione del fuso granulometrico per la liquefacibilità) e determinazione dei limiti di Atterberg. La terebrazione consente, infatti, il recupero del sedimento attraversato all'interno di fustelle in PVC trasparente. La prova è stata eseguita in zona di piana costiera, tra il Conca e il Ventena (sondaggio SP1);
- uno stendimento sismico 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;

- 3 registrazioni del rumore sismico a stazione singola, con tecnica HVSR;
- 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 campione a profondità piuttosto precise rispetto ad altre metodologie e a "secco". Nel sondaggio SP1, approfondito fino a circa 8 m ed eseguito nei sedimenti della piana costiera 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;

Per lo studio di MS (OPCM 4007/2012) sono state eseguite ulteriori indagini in sito, sia di tipo geofisico, sia di tipo geognostico. Tali indagini sono state concentrate soprattutto nella zona di massimo approfondimento ("Ambito M"), che ricadeva in buona parte nell'area costiera già definita di potenziale liquefacibilità, e corrispondente in parte al nuovo Piano dell'Arenile. Si era pertanto deciso di eseguire prove penetrometriche di tipo elettrico, anche con piezocono (CPTE/CPTU), nella zona mare più prossima alla costa. In tale zona mancavano, infatti, dati da prove CPTE/CPTU in grado di fornire una buona caratterizzazione tessiturale e meccanica dei sedimenti attraversati e di stimare con un buon grado di attendibilità gli effetti di liquefacibilità dei sedimenti e la possibilità di cedimenti post-sisma. Più in particolare, per il nuovo Piano dell'Arenile sono state prese in considerazione le seguenti prove effettuate nel precedente Studio di MS:

- cinque prove penetrometriche<sup>2</sup> elettriche (CPTE/CPTU) di cui due con puntale piezometrico (CPTU) realizzate con strumento penetrometrico di max contrasto pari a 200 kN. Le profondità investigate risultano comprese tra 15 metri e 20 m;
- una prova penetrometrica statica con maglio "superpesante" (nominata P17DP31) spinta 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);
- ulteriori 7 registrazioni del rumore sismico con tecnica HVSR.

Come vedremo, le indagini di riferimento per l'Arenile vengono localizzate nella "carta delle indagini" (scala 1:5.000) prodotta a supporto della revisione della microzonazione sismica e riportata in appendice alla presente Relazione. In allegato vengono inoltre raccolti i report delle indagini geognostiche/geofisiche.

---

<sup>2</sup> Nominate per lo studio di MS rispettivamente: "P1CPTE1"; "P2CPTE2"; "P3CPTE3"; "P4CPTU4"; "P5CPTU5"



## 5.2 Valutazioni geotecniche preliminari dei terreni

Per il territorio urbano di Cattolica sono già disponibili numerose prove geognostiche utili per la caratterizzazione geotecnica dei sedimenti attraversati. Un ampio numero di indagini sono tuttavia riconducibili a penetrometrie dinamiche (DPL; DPM; DPSH) con una minore capacità di rappresentazione geotecnica dei sedimenti rispetto ad altre tipologie di indagine. In questo senso, vengono rappresentati qui di seguito alcune “colonne litotecniche” derivate da prove penetrometriche statiche elettriche (CPTU/CPTE): si tratta di indagini effettuate per gli approfondimenti di carattere meccanico e per le verifiche di liquefacibilità espletate per il primo POC e per lo studio di MS comunale (OPCM 4007/2012) dei sedimenti investigati.

Le penetrometrie CPTE/CPTU consentono, infatti, una migliore definizione tessiturale e meccanica con letture ogni cm di avanzamento (rispetto ai 20 cm delle prove CPT e DPSH). Si tratta, tuttavia di prove la cui profondità d'indagine può avere maggiori condizionamenti in relazione ad elevate resistenze di punta e/o laterali.

Vengono pertanto presi in considerazione gli esiti delle tre seguenti penetrometrie statiche elettriche “P1CPTE1”, “P2CPTE2”, P5CPTU5” realizzate in aree limitrofe all'Arenile (figura 5.1).

Occorre precisare come le caratteristiche tessiturali dei sedimenti attraversati siano state determinate attraverso la classificazione bilogaritmica dei terreni proposta da P. K. Robertson (1985; 1990). La figura 5.2 riporta, inoltre, le principali correlazioni<sup>3</sup> utilizzate per la stima delle proprietà meccaniche dei sedimenti indagati.

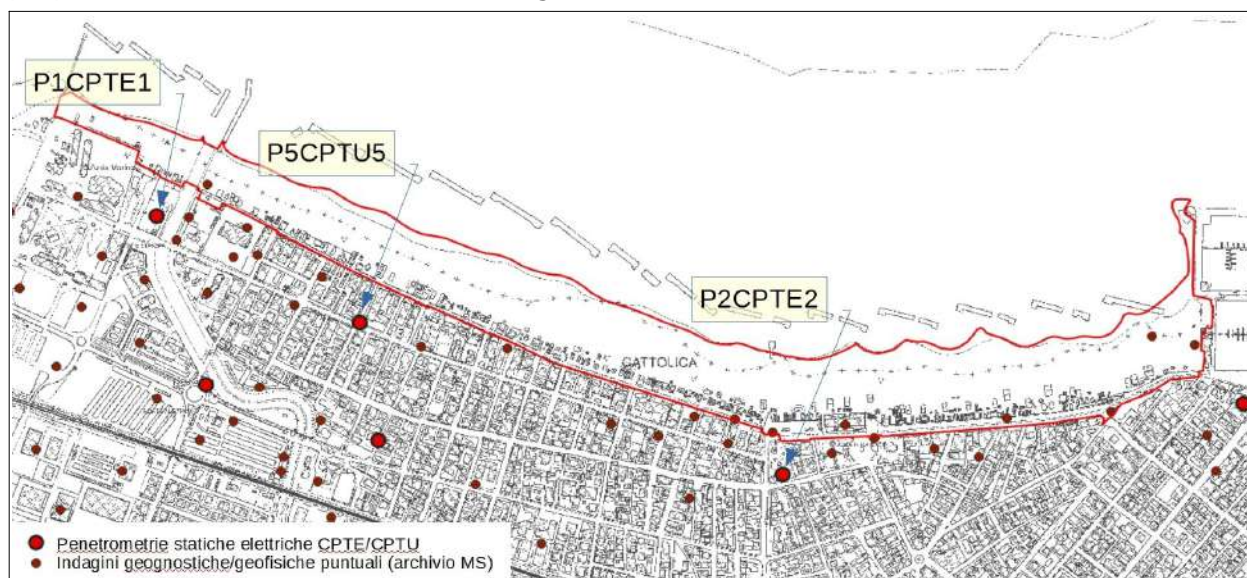


Figura 5.1 - Localizzazione delle prove CPTE/CPTU considerate per la caratterizzazione preliminare dei sedimenti

<sup>3</sup> 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)



<p><b>Unit Weight, <math>g</math> (kN/m<sup>3</sup>) ::</b></p> $g = g_w \cdot \left( 0.27 \cdot \log(R_f) + 0.36 \cdot \log\left(\frac{q_t}{p_a}\right) + 1.236 \right)$ <p>where <math>g_w</math> = water unit weight</p> <p><b>Permeability, <math>k</math> (m/s) ::</b></p> <p><math>I_c &lt; 3.27</math> and <math>I_c &gt; 1.00</math> then <math>k = 10^{0.952 - 3.04 \cdot I_c}</math></p> <p><math>I_c \leq 4.00</math> and <math>I_c &gt; 3.27</math> then <math>k = 10^{-4.52 - 1.37 \cdot I_c}</math></p> <p><b><math>N_{SPT}</math> (blows per 30 cm) ::</b></p> $N_{60} = \left( \frac{q_c}{P_a} \right) \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$ $N_{1(60)} = Q_{tn} \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$ <p><b>Young's Modulus, <math>E_s</math> (MPa) ::</b></p> $(q_t - \sigma_v) \cdot 0.015 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$ <p>(applicable only to <math>I_c &lt; I_{c\_cutoff}</math>)</p> <p><b>Relative Density, <math>Dr</math> (%) ::</b></p> $100 \cdot \sqrt{\frac{Q_{tn}}{k_{DR}}} \quad \text{(applicable only to SBT}_n\text{: 5, 6, 7 and 8 or } I_c < I_{c\_cutoff}\text{)}$ <p><b>State Parameter, <math>\psi</math> ::</b></p> $\psi = 0.56 - 0.33 \cdot \log(Q_{tn,cs})$ <p><b>Peak drained friction angle, <math>\phi</math> (°) ::</b></p> $\phi = 17.60 + 11 \cdot \log(Q_{tn})$ <p>(applicable only to SBT<sub>n</sub>: 5, 6, 7 and 8)</p>	<p><b>:: 1-D constrained modulus, <math>M</math> (MPa) ::</b></p> <p>If <math>I_c &gt; 2.20</math></p> <p><math>a = 14</math> for <math>Q_{tn} &gt; 14</math></p> <p><math>a = Q_{tn}</math> for <math>Q_{tn} \leq 14</math></p> $M_{CPT} = a \cdot (q_t - \sigma_v)$ <p>If <math>I_c \leq 2.20</math></p> $M_{CPT} = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$ <p><b>:: Small strain shear Modulus, <math>G_0</math> (MPa) ::</b></p> $G_0 = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$ <p><b>:: Shear Wave Velocity, <math>V_s</math> (m/s) ::</b></p> $V_s = \left( \frac{G_0}{\rho} \right)^{0.50}$ <p><b>:: Undrained peak shear strength, <math>S_u</math> (kPa) ::</b></p> $N_{kt} = 10.50 + 7 \cdot \log(F_r) \text{ or user defined}$ $S_u = \frac{(q_t - \sigma_v)}{N_{kt}}$ <p>(applicable only to SBT<sub>n</sub>: 1, 2, 3, 4 and 9 or <math>I_c &gt; I_{c\_cutoff}</math>)</p> <p><b>:: Remolded undrained shear strength, <math>S_u(rem)</math> (kPa) ::</b></p> $S_{u(rem)} = f_s \quad \text{(applicable only to SBT}_n\text{: 1, 2, 3, 4 and 9 or } I_c > I_{c\_cutoff}\text{)}$ <p><b>:: Overconsolidation Ratio, OCR ::</b></p> $k_{OCR} = \left[ \frac{Q_{tn}^{0.20}}{0.25 \cdot (10.50 + 7 \cdot \log(F_r))} \right]^{1.25} \text{ or user defined}$ $OCR = k_{OCR} \cdot Q_{tn}$ <p>(applicable only to SBT<sub>n</sub>: 1, 2, 3, 4 and 9 or <math>I_c &gt; I_{c\_cutoff}</math>)</p>
---	--

Figura 5.2 – Correlazioni di riferimento per la stima dei parametri meccanici dei sedimenti

Le seguenti figure 5.3–5.4–5.5 rappresentano le colonne litotecniche derivate dalle tre penetrometrie CPTE/CPTU di riferimento per la caratterizzazione geotecnica preliminare dei sedimenti dell'Arenile.

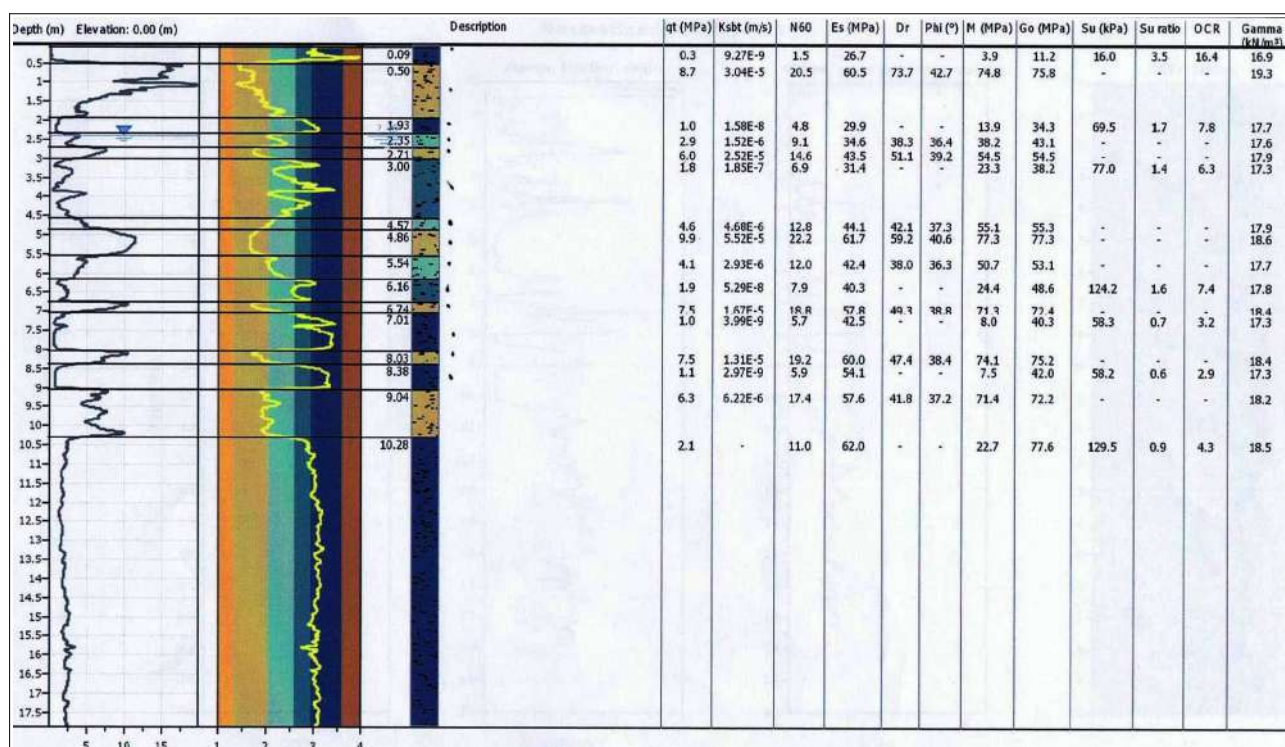


Figura 5.3 – Modello geotecnico desunto dalla prova P1CPT1. Per ogni strato omogeneo si riportano i relativi valori meccanici medi

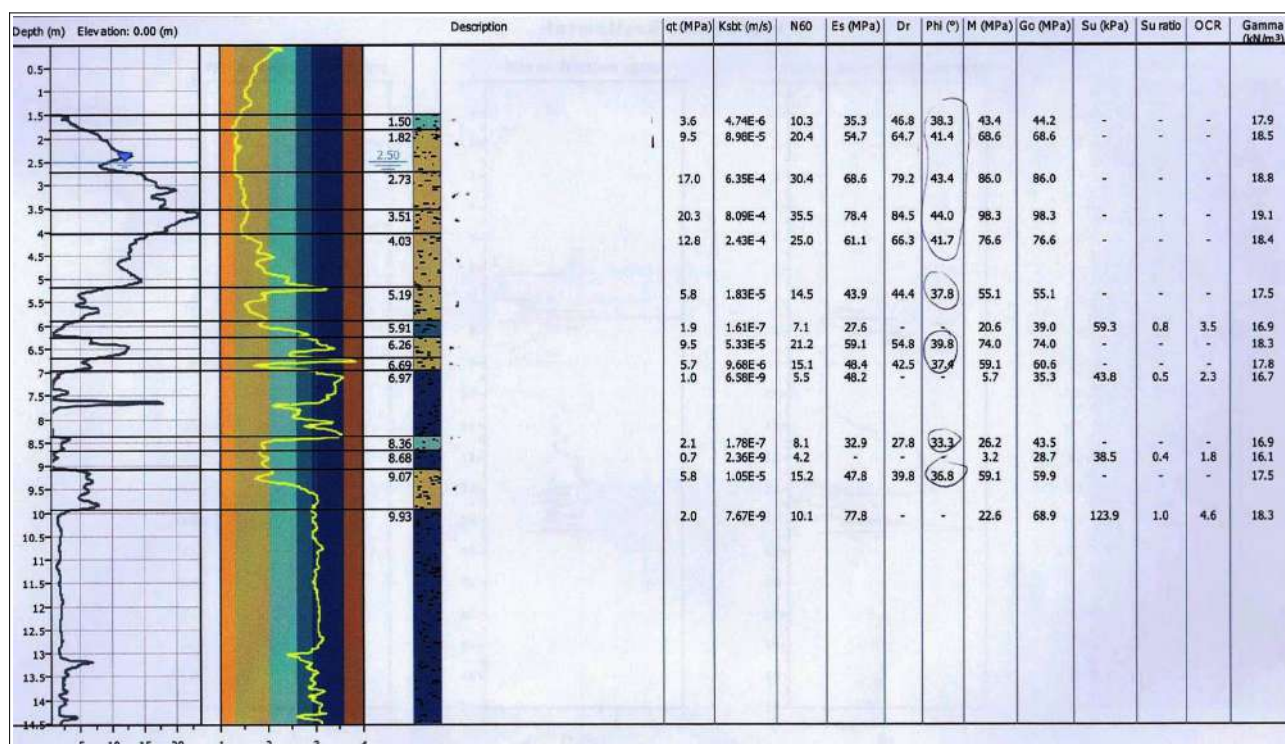


Figura 5.4 – Modello geotecnico desunto dalla prova P5CPTU5. Per ogni strato omogeneo si riportano i relativi valori meccanici medi

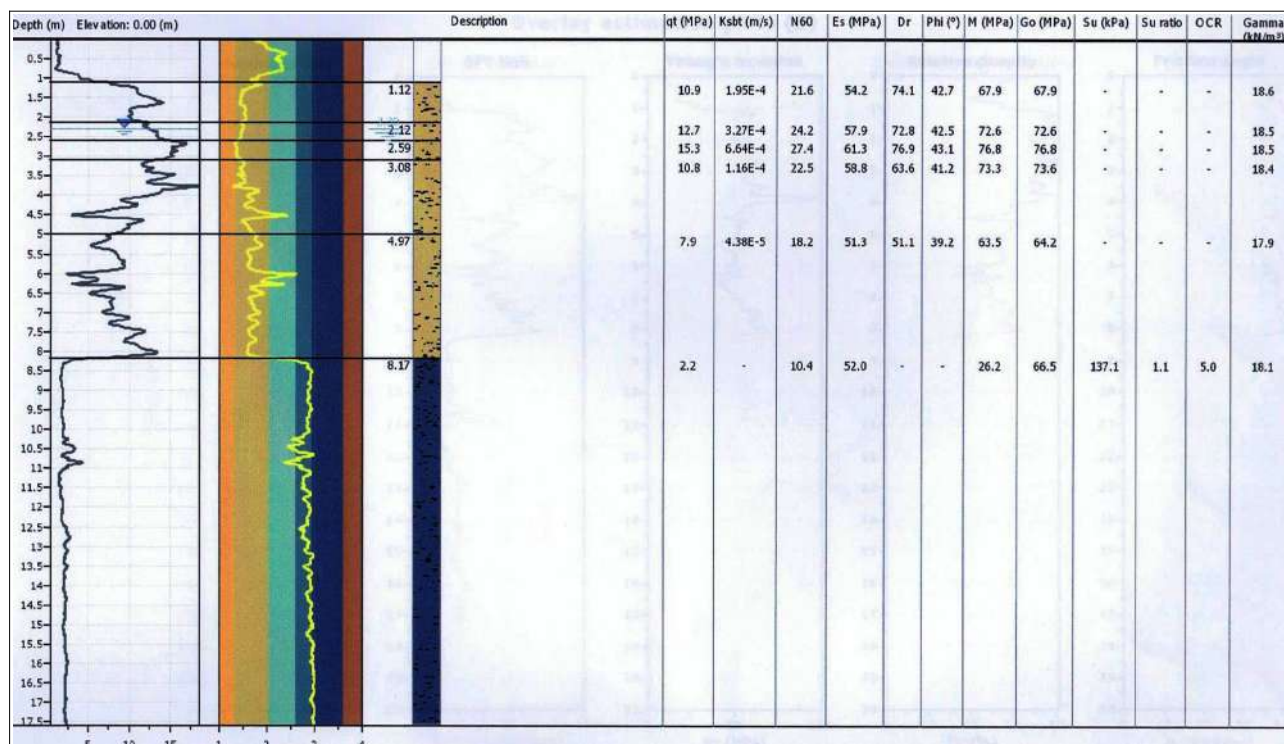


Figura 5.4 – Modello geotecnico desunto dalla prova P2CPTE2. Per ogni strato omogeneo si riportano i relativi valori meccanici medi

Le prove evidenziano sedimenti superficiali sabbiosi di cordone più o meno rimaneggiato con valori di resistenze alla punta qc/qt variabili ma relativamente discrete (>5 MPa). Nel settore più occidentale dell'Arenile (foce del Conca e del Ventena) sono tuttavia intercalati intervalli limoso argillosi con resistenze qc/qt mediocri e compressibili.



## 6 CRITICITÀ IDRAULICHE

### 6.1 Definizione del rischio idraulico

È opportuno introdurre un breve richiamo alla definizione del rischio idraulico, definito dal prodotto di tre principali fattori: pericolosità, esposizione e vulnerabilità.

La seguente figura 6.1 propone uno schema esemplificativo (basato sui concetti già introdotti nella pianificazione di settore e sovraordinata – PAI e PGRA) della valutazione del rischio idraulico attraverso la definizione dei fattori che la quantificano.



Figura 6.1 – Schema della definizione del rischio idraulico

### 6.2 Il PAI Marecchia Conca e il PGRA (primo ciclo di aggiornamento)

Per il Comune di Cattolica, la pianificazione di settore (Piano Assetto Idrogeologico Marecchia Conca), evidenzia una complessa situazione idraulica, con criticità connesse al reticolo naturale (Conca, Ventena, Tavollo) e alla costa.

Si rammenta come la Direttiva 2007/60/CE, e il conseguente D.Lgs 49/2010 di recepimento, abbiano condotto alla redazione dei PGRA (Piano di Gestione del Rischio da Alluvioni), strumenti finalizzati a costruire un quadro omogeneo a livello di Bacino distrettuale e che riguarda tutti gli aspetti legati alla gestione del rischio di alluvioni. Il PGRA è definito come un processo di pianificazione ciclico, con aggiornamenti previsti ogni sei anni. Il primo ciclo di attuazione, si è concluso nel 2016 con l'approvazione dei PGRA relativi al periodo 2015–2021 e ha prodotto un quadro conoscitivo costituito dalle mappe di pericolosità e di rischio alluvioni.

Le mappe della pericolosità redatte per il primo ciclo di aggiornamento del PGRA si sono fondamentalmente basate sugli elementi conoscitivi già disponibili, dagli studi idrologici e

idraulici ai rilievi topografici, dalle analisi morfologiche alle perimetrazioni delle aree storicamente inondabili desunti dalla pianificazione di bacino (AdB Interregionale Marecchia Conca).

Il PGRA ha inoltre definito e rappresentato le aree inondabili riguardanti il reticolo secondario di pianura (elemento di novità), sulla base delle perimetrazioni fornite dai Consorzi di Bonifica. Per Cattolica, i dati sono stati forniti dal Consorzio di Bonifica della Romagna, Ente competente per l'intero territorio in oggetto.

I contenuti del PGRA (mappe di pericolosità relative al reticolo principale naturale; misure/azioni di competenza dell'AdB; ecc.), sono stati recepiti nella pianificazione di Bacino Marecchia Conca (Variante PAI Marecchia-Conca 2016) approvata con DGR 2111/2016.

Occorre tuttavia rammentare che dal 17 febbraio 2017 (con la pubblicazione nella GURI n. 27 del 2 febbraio 2017), per l'entrata in vigore il D.M. 25 ottobre 2016, sono state soppresse su tutto il territorio nazionale le Autorità di bacino nazionali, interregionali e regionali. Il territorio di Cattolica risulta attualmente di competenza dell'Autorità di Bacino Distrettuale Po.

Occorre anche evidenziare che la Variante PAI Marecchia Conca 2016 è stata adottata prima dell'adozione dell'aggiornamento delle aree allagabili del PGRA. Per questo motivo, le tavole riportate nel seguente elenco sono da considerarsi superate.

### 6.3 Il secondo ciclo di aggiornamento del PGRA

La conclusione del primo ciclo di attuazione del PGRA (2016-2021) ha consentito un ulteriore aggiornamento delle mappe di pericolosità e del rischio di alluvione e la predisposizione dei PGRA di seconda generazione, adottati (il 20/12/2021) e pubblicati il 22/12/2021 sui rispettivi siti web (e pubblicati sulla GU Serie Generale n.23 del 29-01-2022).

Come già rammentato, dal 2017 il Comune di Cattolica viene compreso nel territorio di competenza dell'Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po a seguito della soppressione dell'Autorità di bacino dei fiumi Marecchia-Conca (vedi DM 25/10/2016). Il Comune viene inoltre individuato nell'unità territoriale di gestione del rischio (Unit of Management-UoM) definita con la sigla "UoM ITI01319", coincidente con i bacini dei fiumi Conca, Uso e Marecchia e bacini minori afferenti alla costa (figura 6.2). Per questa unità di gestione vengono individuate le seguenti aree a "Rischio Potenziale Significativo di Alluvioni" (APSFR):

- ITI01319\_ITCAREG08\_APSFR\_2019\_RP\_FD0037 Ventena – da Isola di Brescia a foce
- ITN008\_ITBABD\_APSFR\_2019\_ACM\_FD0021<sup>4</sup> (Ambito costiero marino)

Per quanto riguarda il territorio di Cattolica, il PGRA analizza la pericolosità e il rischio per i tre ambiti territoriali così definiti

- il Reticolo Principale RP (comprendente gli alvei fluviali del fiume Conca, del torrente

---

<sup>4</sup> APSFR di rango distrettuale

#### Ventena e del torrente Tavollo)

- il Reticolo Secondario di Pianura RSP (comprendente tutto il territorio a monte del lungomare, percorso da fossi minori e dalle opere di bonifica)
- le Aree Costiere Marine ACM (comprendente la fascia dell'arenile e del porto, a valle del lungomare)

Nei successivi paragrafi vengono illustrati e rappresentati gli elementi di pericolosità pertinenti il reticolo idrografico (RP e RSP) e l'area costiera marina (ACM).

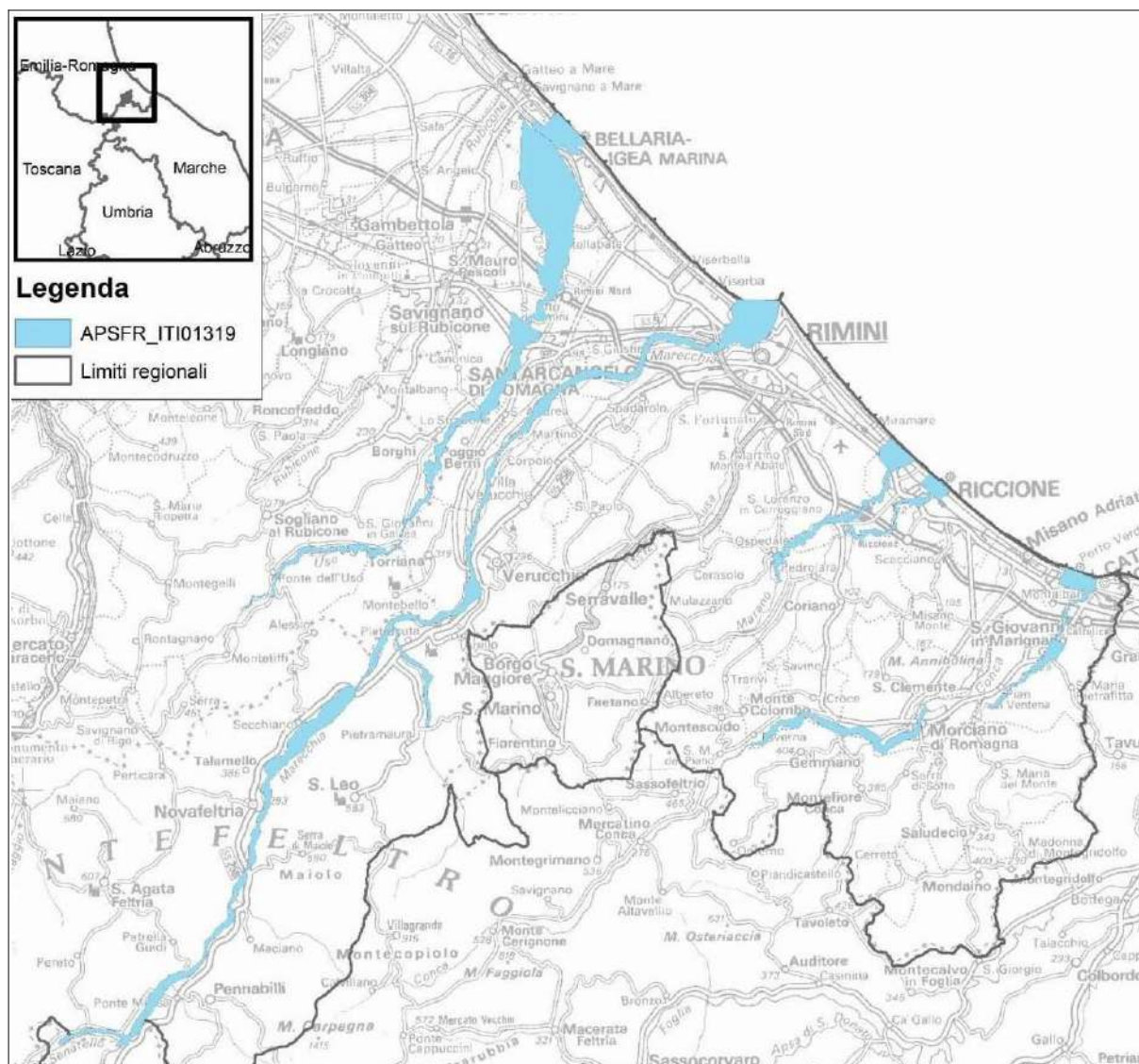


Figura 6.2 – Rappresentazione delle aree APSFR di rango regionale comprese nella Unit of Management “ITI01319 Marecchia/Conca”



## 6.4 Pericolosità connessa al reticolo idrografico (RP e RSP)

Il PGRA ha definito e rappresentato le aree inondabili riferite al reticolo principale (RP) e al reticolo secondario di pianura (RSP) in base a simulazioni che considerano tre differenti scenari:

- H-P3 = alluvioni frequenti con brevi TR compresi tra 20 e 50 anni (elevata probabilità)
- M-P2 = alluvioni meno frequenti con tempo di ritorno TR compresi tra 100 e 200 anni (media probabilità)
- L-P1 = rare alluvioni o scenari di eventi rare (bassa probabilità - TR fino a 500 anni)

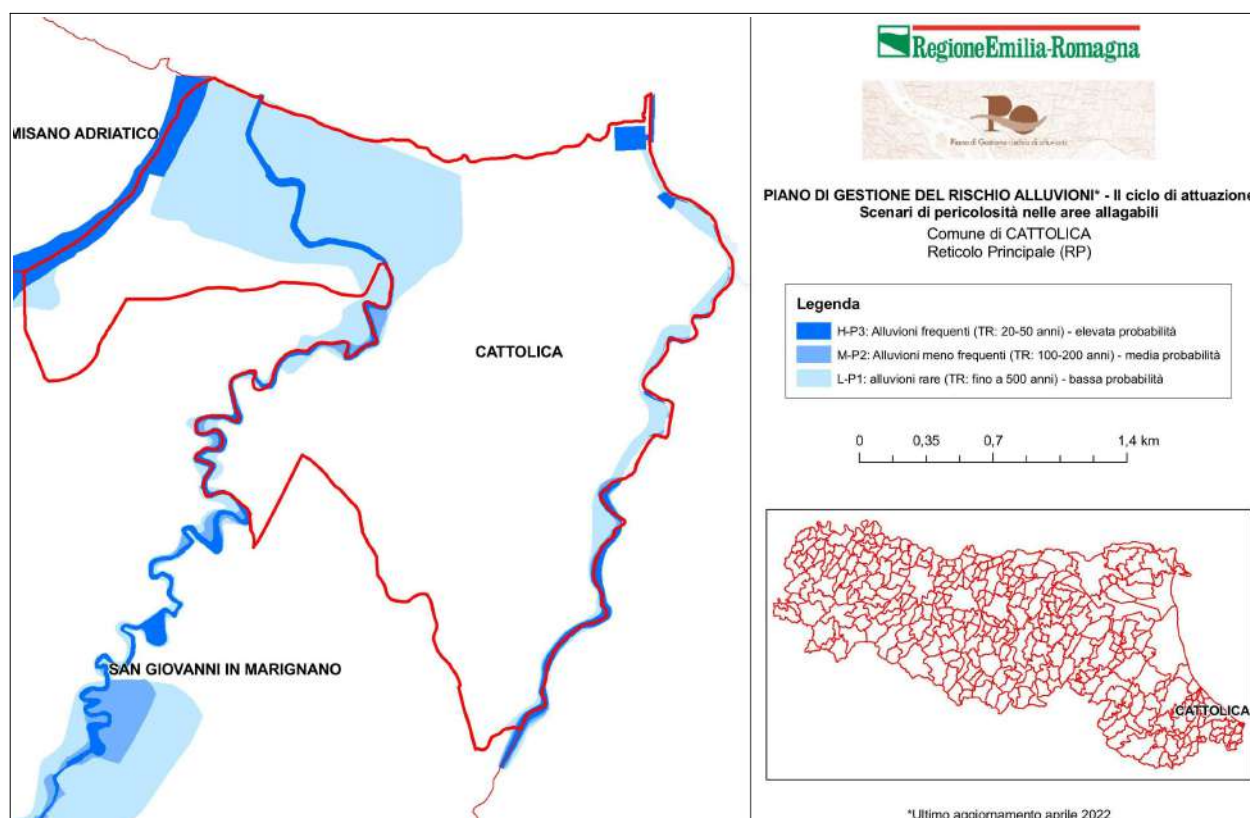


Figura 6.3 – Scheda di sintesi degli scenari di pericolosità relativi al reticolo principale RP per il Comune di Cattolica (PGRA – Secondo ciclo di attuazione)

Occorre rammentare come le mappe della pericolosità riferite al reticolo principale delimitino le aree potenzialmente inondabili in base ai volumi di esondazione (derivate da simulazioni numeriche) e in base alla demarcazione di settori di territorio idraulicamente separati da rilievi e dossi (celle idrauliche). La pericolosità idraulica del reticolo RP è inoltre definita in base a simulazioni che considerano la possibilità di sormonto dell'eventuale arginale.

Il PGRA ha inoltre definito e rappresentato le aree inondabili riguardanti il reticolo secondario di pianura (elemento di novità). Questi areali si basano sulle perimetrazioni delle zone allagate/allagabili sostanzialmente fornite dai Consorzi di Bonifica. Per Cattolica, i dati sono

stati forniti dal Consorzio di Bonifica della Romagna, Ente competente per l'intero territorio in oggetto. Per il reticolo RSP, le aree inondabili individuate nel PGRA sono state principalmente definite sulla base di dati storici disponibili.

Le seguenti figure 6.3 e 6.4 rappresentano stralci delle schede di sintesi della pericolosità P3-P2-P1 definita dal PGRA (secondo ciclo di attuazione), predisposte dalla RER per ogni Comune della Regione. Le successive figure 6.5-6.6-6.7-6.8 rappresentano, invece, il dettaglio relativamente all'Arenile di Cattolica e al suo territorio limitrofo.

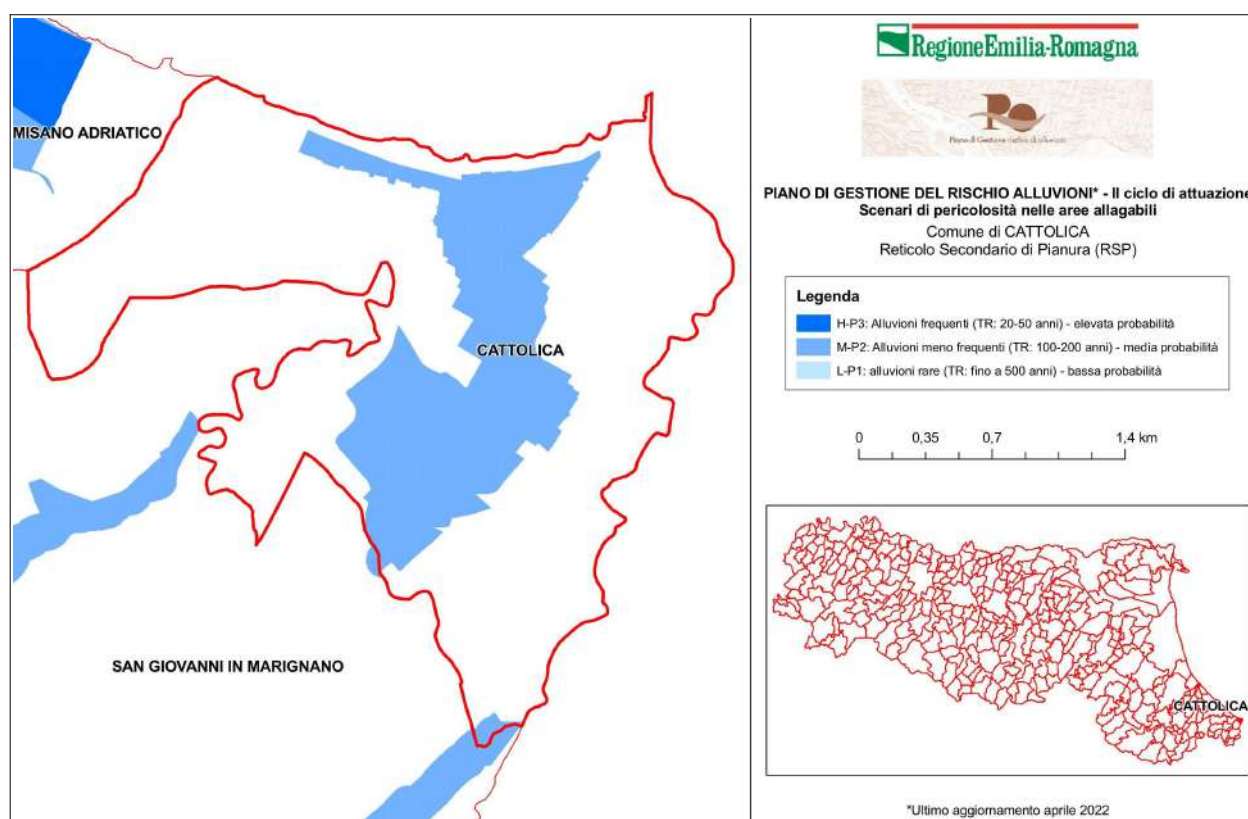


Figura 6.4 - Scheda di sintesi degli scenari di pericolosità relativi al reticolo principale RSP per il Comune di Cattolica (PGRA - Secondo ciclo di attuazione)

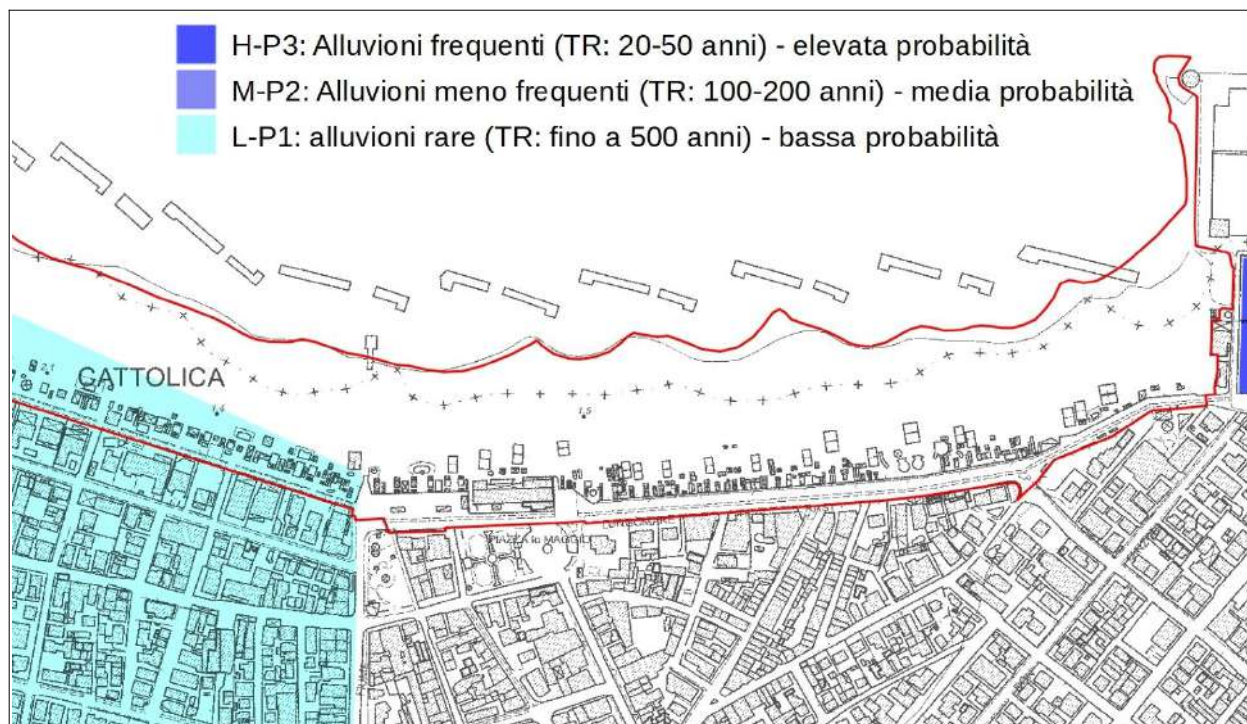


Figura 6.5 - Dettaglio sugli scenari di pericolosità nelle aree allagabili (PGRA - Secondo ciclo di attuazione - reticolo principale RP). Il perimetro rosso delimita l'Arenile di Cattolica (settore Est)

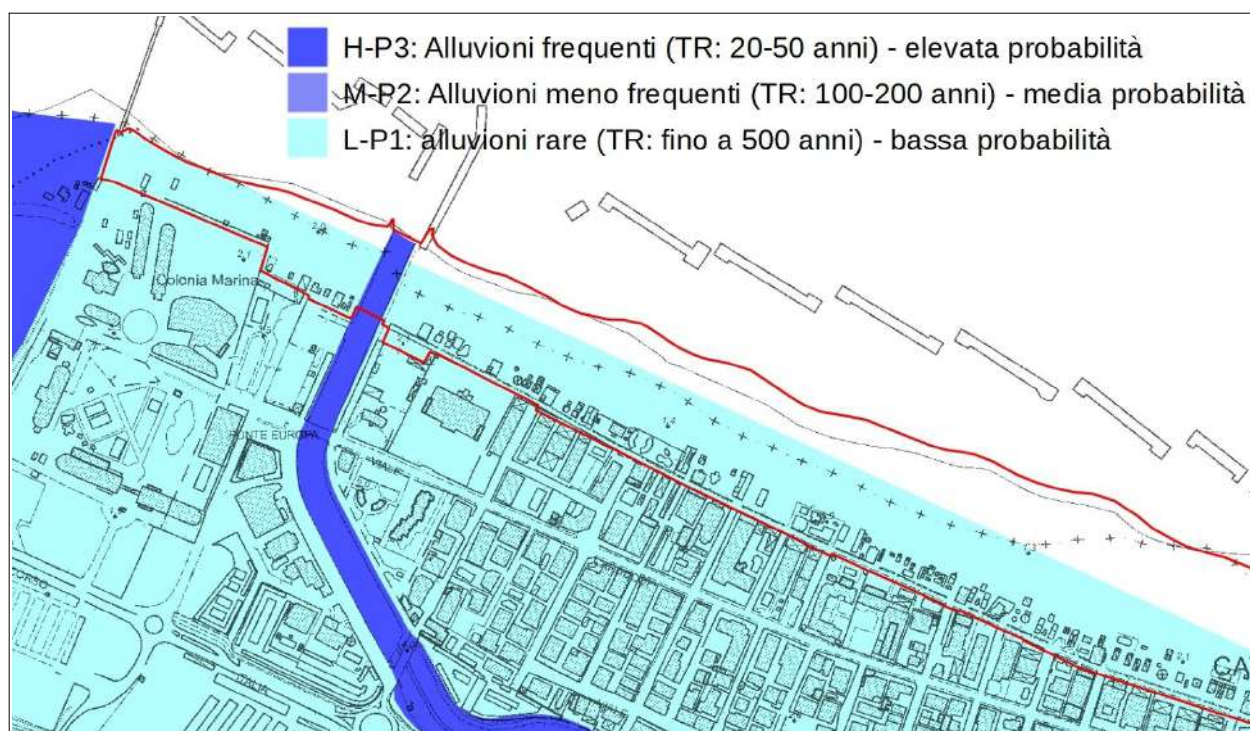


Figura 6.6 - Dettaglio sugli scenari di pericolosità nelle aree allagabili (PGRA - Secondo ciclo di attuazione - reticolo principale RP). Il perimetro rosso delimita l'Arenile di Cattolica (settore Ovest)



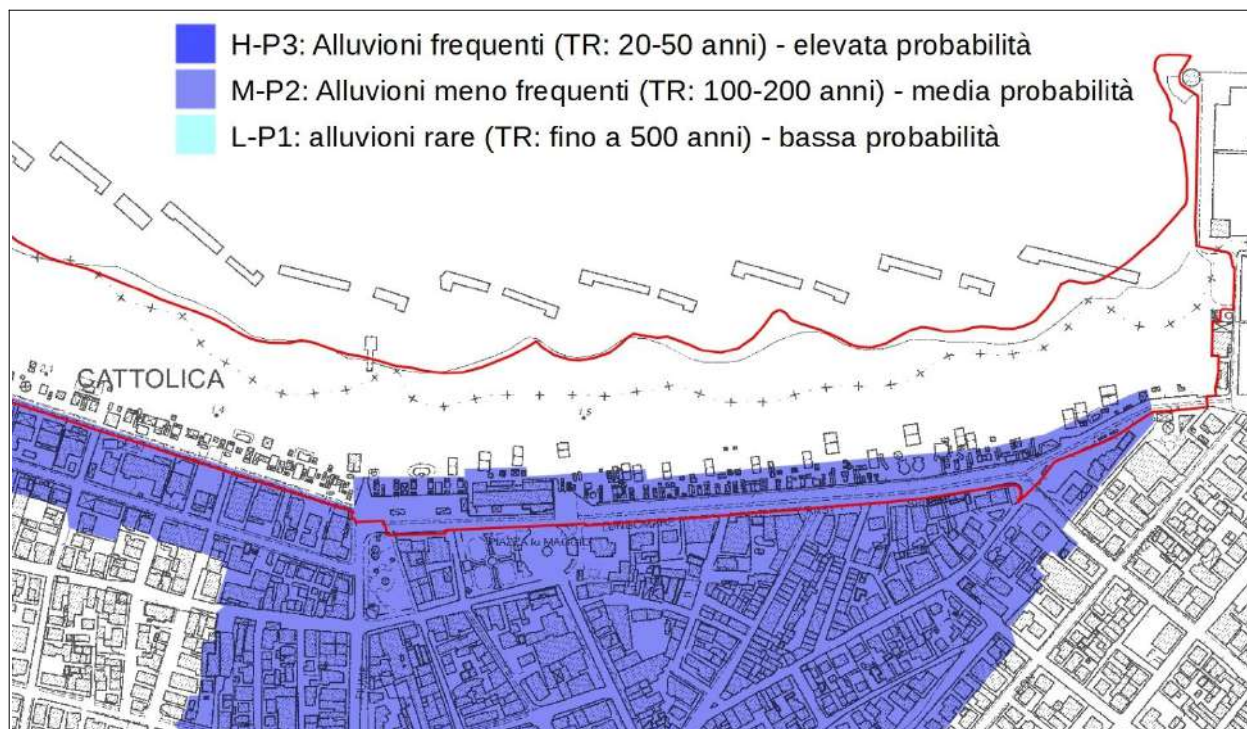


Figura 6.7- Dettaglio sugli scenari di pericolosità nelle aree allagabili (PGRA - Secondo ciclo di attuazione - reticolo secondario di pianura RSP). Il perimetro rosso delimita l'Arenile di Cattolica (settore Est)

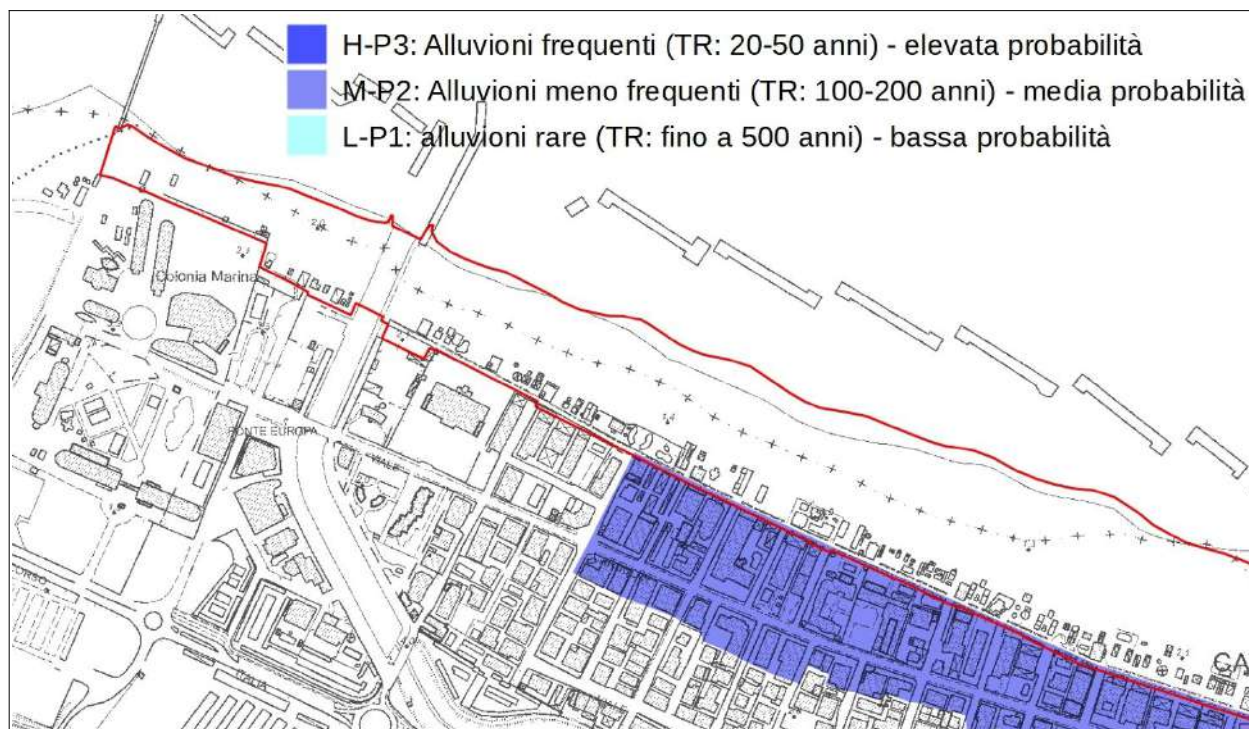


Figura 6.8- Dettaglio sugli scenari di pericolosità nelle aree allagabili (PGRA - Secondo ciclo di attuazione - reticolo secondario di pianura RSP). Il perimetro rosso delimita l'Arenile di Cattolica (settore Ovest)

## 6.5 Pericolosità connessa alla costa (ACM)

Il PGRA ha infine definito e rappresentato le aree inondabili riferite agli Aree Costiere Marine (ACM). Anche in questo caso, la pericolosità viene definita in base a simulazioni che considerano tre differenti scenari:

- H-P3 = alluvioni frequenti con brevi TR fino a 10 anni (elevata probabilità)
- M-P2 = alluvioni meno frequenti con tempo di ritorno TR pari a 100 anni (media probabilità)
- L-P1 = rare alluvioni o scenari di eventi rare (bassa probabilità - TR ultracentennale)

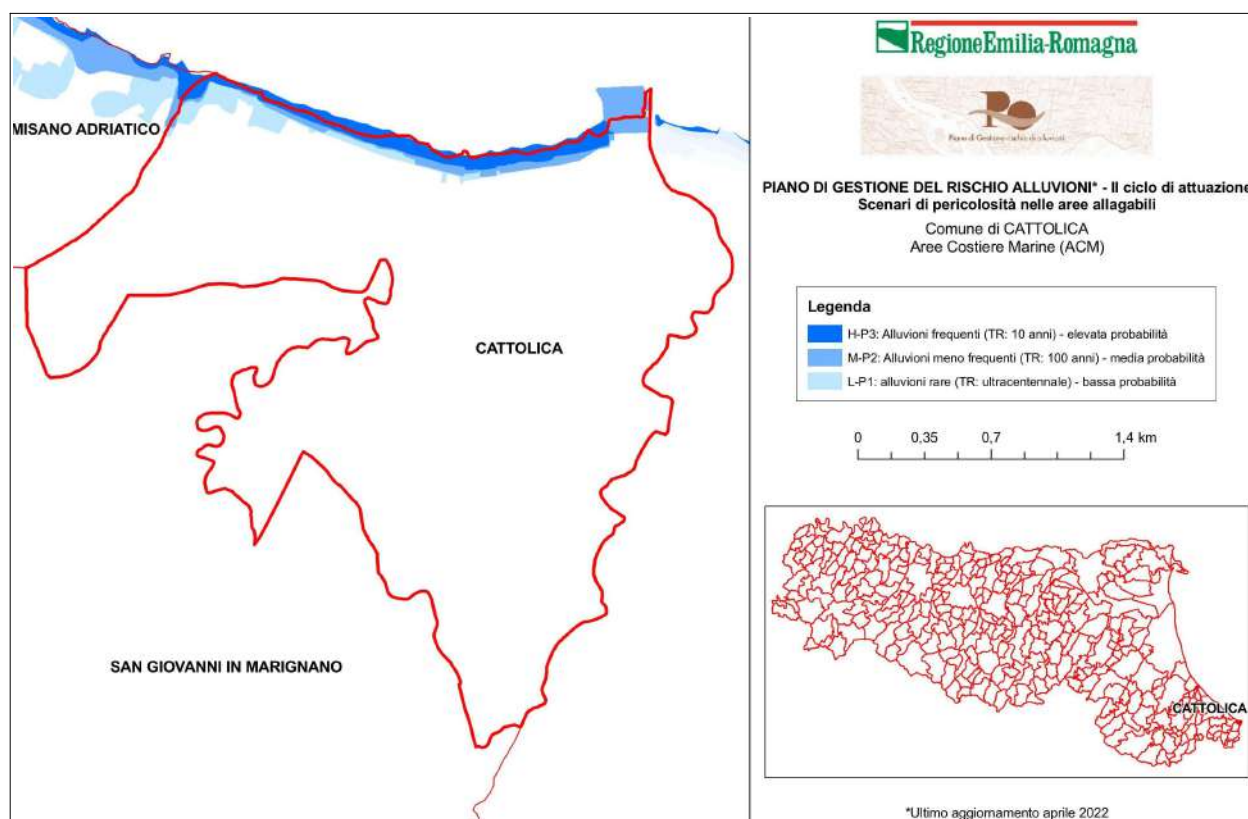


Figura 6.9 - Scheda di sintesi degli scenari di pericolosità relativi alle aree costiere marine ACM per il Comune di Cattolica (PGRA - Secondo ciclo di attuazione)

Le mappe della pericolosità riferite alle aree costiere marine hanno delimitato le aree potenzialmente inondabili sulla base di modelli numerici che simulano la propagazione dell'onda tenendo anche conto degli smormamenti calcolati sulla base della distanza dalla linea di riva, sul controllo di punti critici e sulla raccolta/verifica di dati storici di eventi di mareggiate degli ultimi 60 anni. In Questo senso, per il secondo ciclo di aggiornamento, per il territorio di Cattolica si è tenuto conto, ad esempio, degli eventi del febbraio.marzo 2015.

La figura 6.9 rappresenta uno stralcio della scheda di sintesi della pericolosità P3-P2-P1 per le Aree Costiere Marine definita dal PGRA (secondo ciclo di attuazione), predisposte dalla RER per ogni Comune della Regione. Le successive figure 6.10 e 6.11 rappresentano, invece, il dettaglio relativamente all'Arenile di Cattolica e al suo territorio limitrofo. Dalle mappe PGRAi si vince



come il settore di arenile edificato a ridosso del lungomare orientale risulti prevalentemente incluso nello scenario di pericolosità “media” mentre il lungomare occidentale risulterebbe prevalentemente compreso nello scenario di pericolosità “bassa”.

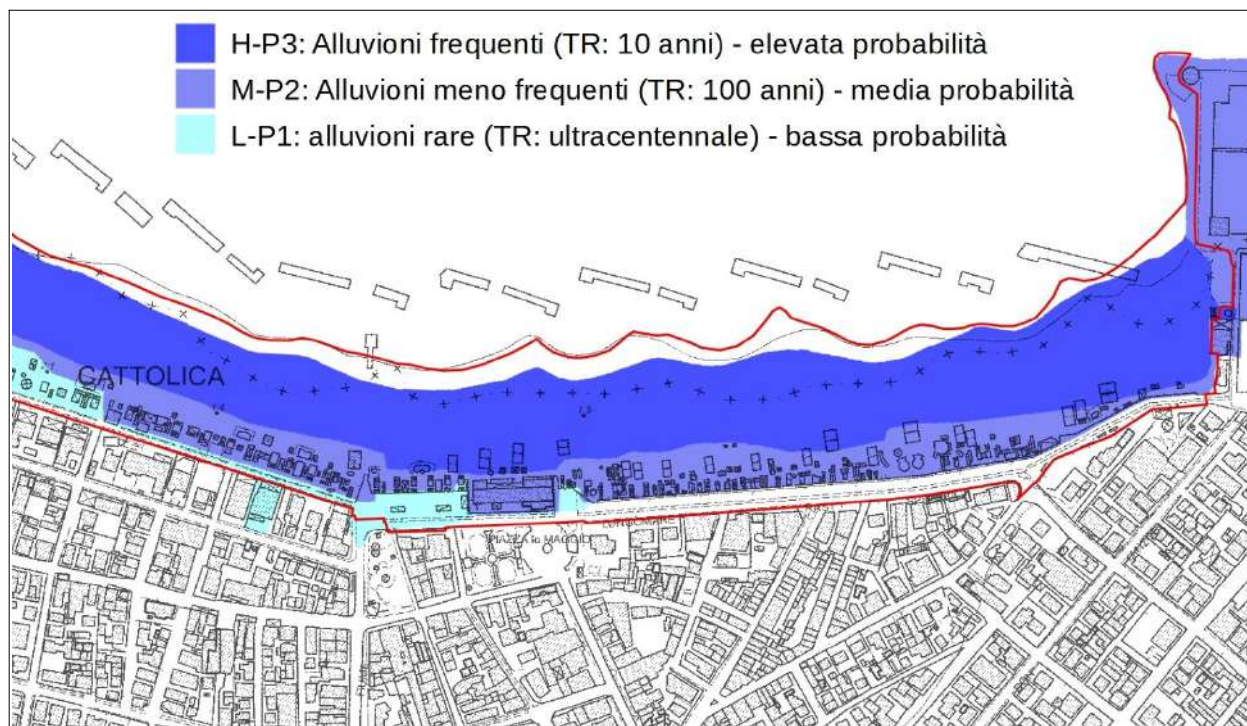


Figura 6.10 - Dettaglio sugli scenari di pericolosità nelle aree allagabili (PGRA - Secondo ciclo di attuazione - ACM). Il perimetro rosso delimita l'Arenile di Cattolica (settore Est)

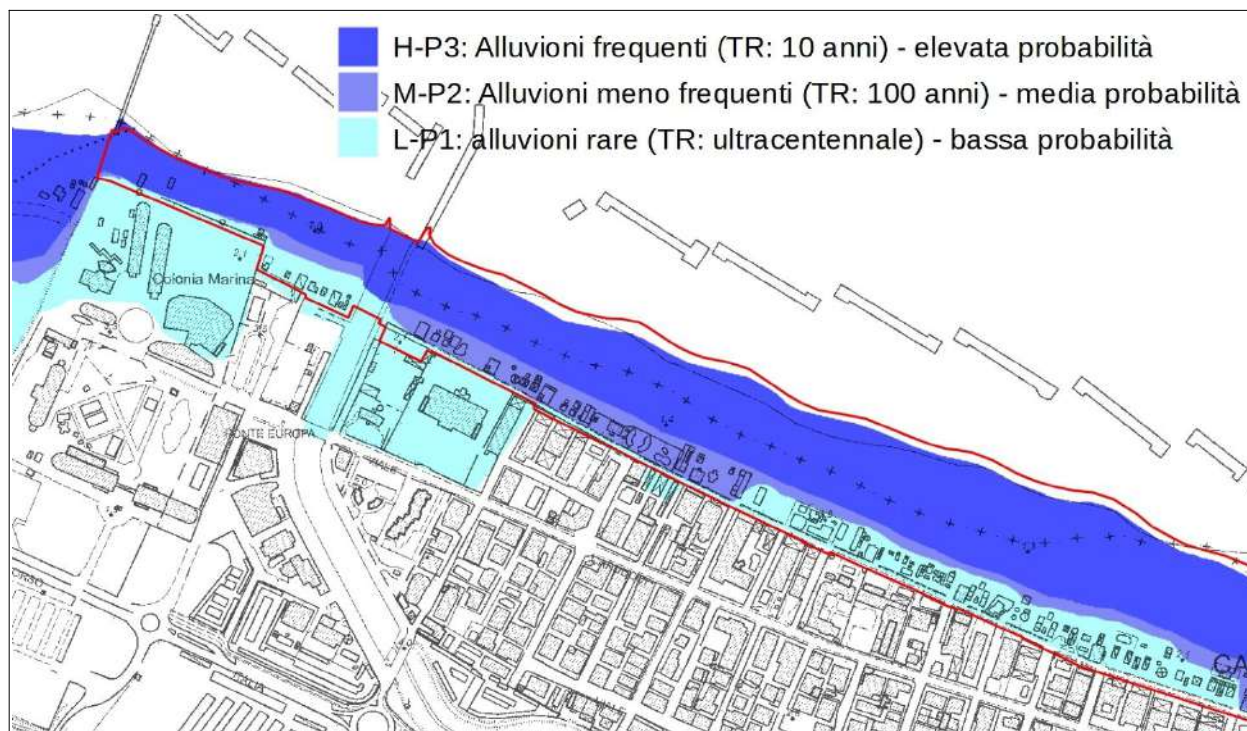


Figura 6.11 - Dettaglio sugli scenari di pericolosità nelle aree allagabili (PGRA - Secondo ciclo di attuazione - ACM). Il perimetro rosso delimita l'Arenile di Cattolica (settore Ovest)



## 7 RISCHIO SISMICO

### 7.1 La pericolosità sismica di base

La sismicità di un territorio è strettamente connessa al suo contesto tettonico-strutturale, dunque alla presenza di strutture geologicamente “attive”. Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio vi è quindi l'indispensabile conoscenza della sua storia sismica (cioè di tutte le informazioni sui terremoti avvenuti nel passato) e della geologia strutturale locale, fattori strettamente connessi tra loro. In questo senso, le evoluzioni scientifiche e tecnologiche susseguitesesi in particolare dal 1800 hanno consentito catalogazioni sempre più dettagliate dei terremoti, analisi più raffinate dei meccanismi di innesco e di propagazione dei sisma e una progressiva migliore conoscenza delle zone o delle strutture responsabili della sismicità (“zone” o “sorgenti sismogenetiche”) presenti nel territorio italiano.

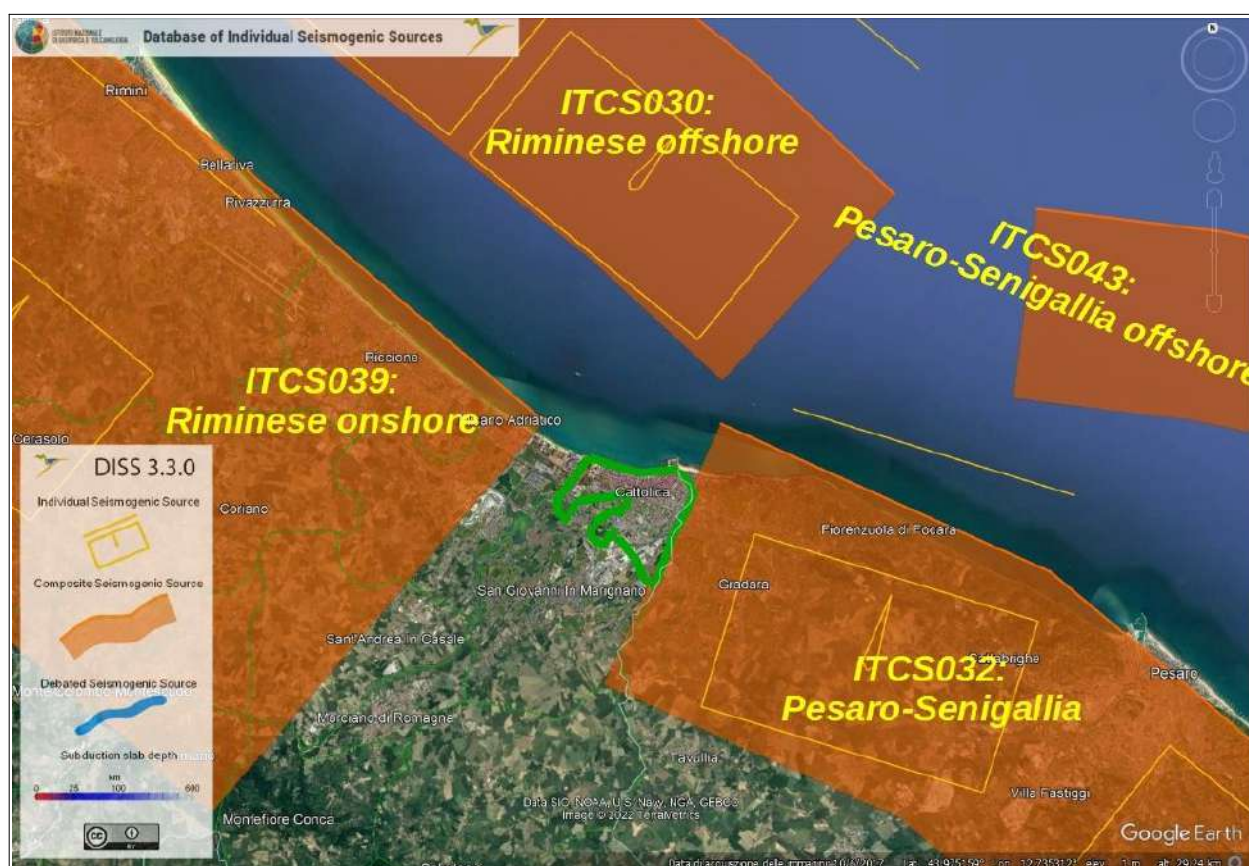


Figura 7.1 – Distribuzione delle sorgenti sismogenetiche contenute in DISS 3.3.0 (foto aerea: Google Earth)

L'ultima zonazione sismogenica del territorio nazionale è 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 e in particolare

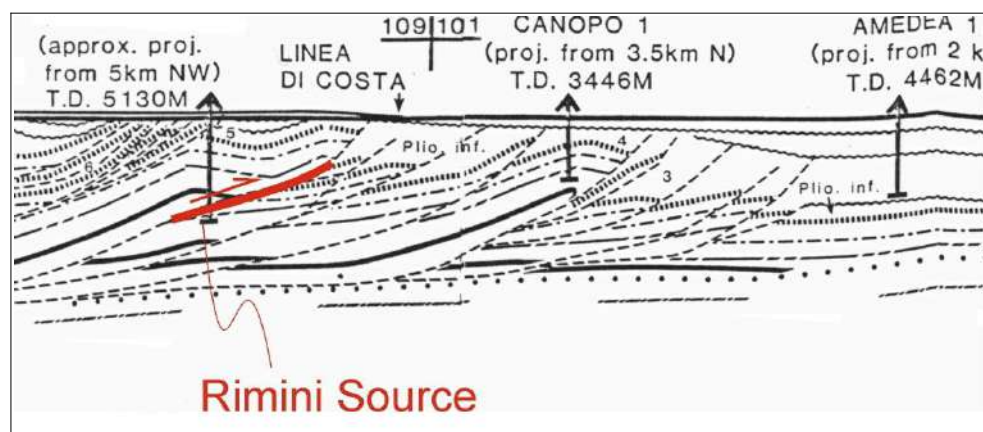
alle ultime banche dati relative alle sorgenti sismogeniche italiane DISS<sup>5</sup> e il catalogo CPTI<sup>6</sup>.

La figura 7.1 rappresenta la sovrapposizione del territorio comunale con le limitrofe sorgenti sismogeniche individuate nel database DISS nella sua versione più aggiornata e disponibile (DISS 3.3.0). Questo fondamentale database riporta le seguenti sorgenti sismogeniche composite:

- 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 Mw 5,9 nell'Alto Adriatico, i loro epicentri probabilmente si trovano appena al largo questa area), il sisma del 14 aprile 1672 (Mw 5,6), gli eventi del 25 dicembre 1786 (Mw 5,7) ed i terremoti del 17 marzo 1875 (Mw 5,7). L'area inoltre mostra ( $4,5 < Mw < 5,0$ ) una sismicità intermedia rada. Varie prove suggeriscono come 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 di riferimento derivata dagli eventi sismici storicamente noti risulta pari a Mw 5,9.

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 7.2 e 7.3).

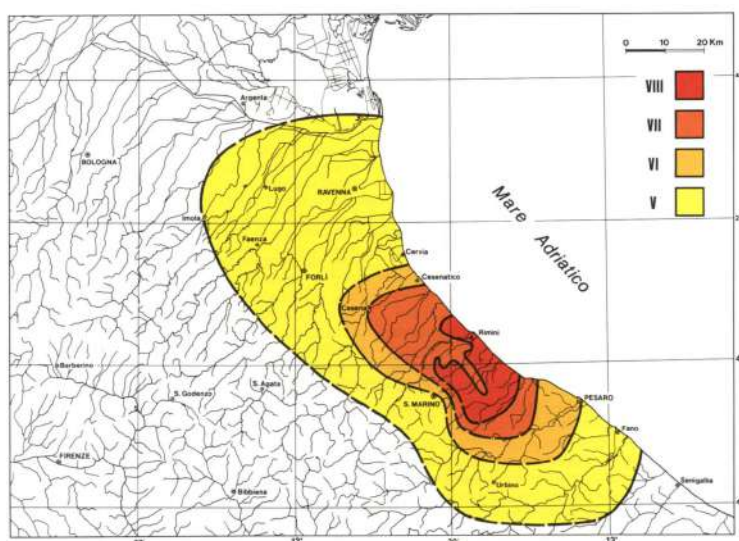
Figura 7.2 – La sorgente “Rimini” proiettata sulla Sezione Amedea-Mte. Amiata (da Bally et al., 1986)



<sup>5</sup> Database of Potential Sources for Earthquake Larger than M 5.5 in Italy>> (Valensise e Pantosti, 2001)

<sup>6</sup> Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani>> (Gruppo di lavoro CPTI, 1999–2002)

*Figura 7.3 – Carta delle isosisme del terremoto del 25 dicembre 1786. Si noti la caratteristica propagazione degli effetti in prevalente direzione parallela alla costa (da Ferrari, 1986).*



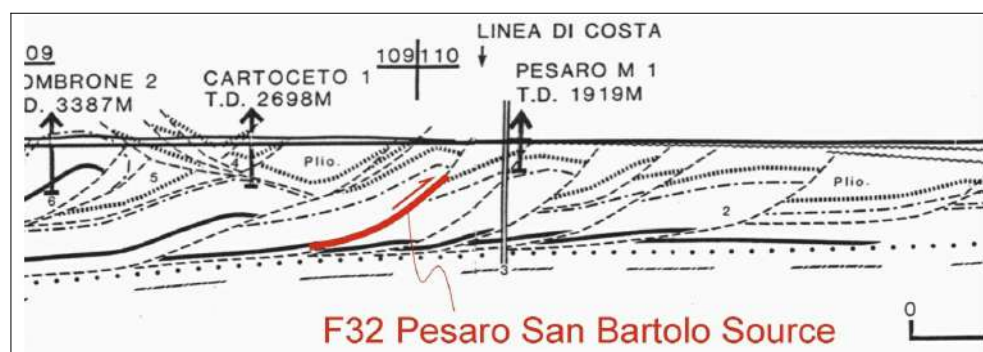
- la <<ITCS032 – Pesaro Senigallia>> che attraversa il marchigiano da Ancona a Pesaro e fa parte del contesto tettonico di “thrust onshore” esterno dell'Appennino Umbro-Marchigiano, caratterizzato da un sistema di faglie NE vergente al bordo orientale degli Appennini settentrionali e parallelo alla costa 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 di riferimento derivata dai terremoti storici è pari a (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 sub superficiali (vedi Vannoli et al., 2004), suggeriscono che il crescente sistema di faglie sia molto vicino alla costa. La magnitudo di riferimento derivata dagli eventi sismici storicamente noti risulta pari a Mw 6.1.

La sorgente sismogenica 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 sismogenica può essere correlata con una



“blind thrust-plane” (figura 7.4) che determina la crescita dell'anticlinale costiera dedotta dall'analisi delle caratteristiche geomorfologiche e dalle prospezioni geofisiche. Secondo Vannoli et al. (2004) la sorgente sismogenica 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).

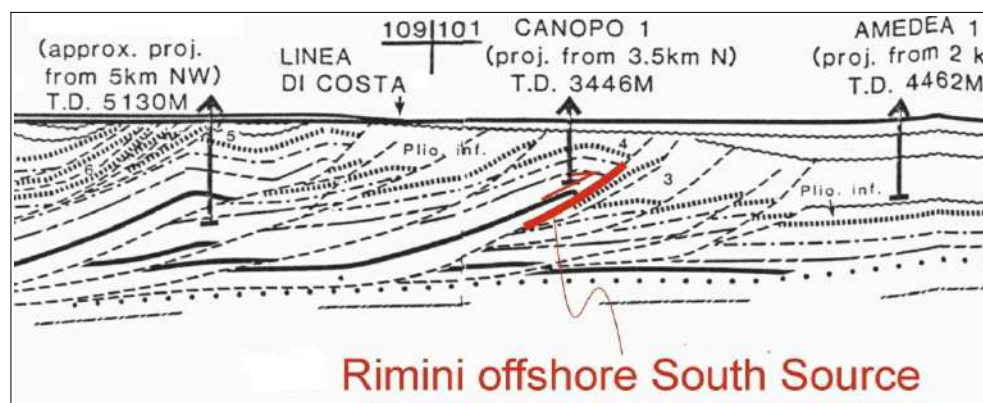
Figura 7.4 - La sorgente “Pesaro San Bartolo” proiettata sulla Sezione Anna-Mte. Amiata (da Bally et al., 1986)



- 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).

Figura 7.5 - La sorgente “Rimini offshore south” proiettata sulla Sezione Amedea-Mte. Amiata (da Bally et al., 1986)



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 7.5). La magnitudo di riferimento derivata dagli eventi sismici storicamente noti risulta pari a Mw 6,1.

- la <<ITCS043 - Pesaro Senigallia offshore>> è infine situata nel mare Adriatico poco a nord della città di Ancona e a NO di Pesaro. Fa parte della compressione esterna offshore dell'Appennino Umbro-Marche. Questo fronte è caratterizzato da un sistema di faglie a bordo NE vergenti al confine orientale della catena dell'Appennino settentrionale, parallelo alla costa marchigiana. Cataloghi storici e strumentali (Boschi et al., 2000; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al., 2006; Guidoboni et al., 2007) mostrano solo una sismicità intermedia sparsa ( $4,5 < Mw < 5,0$ ), mentre la magnitudo di riferimento derivata dai terremoti storici risulta pari a Mw 5,5.

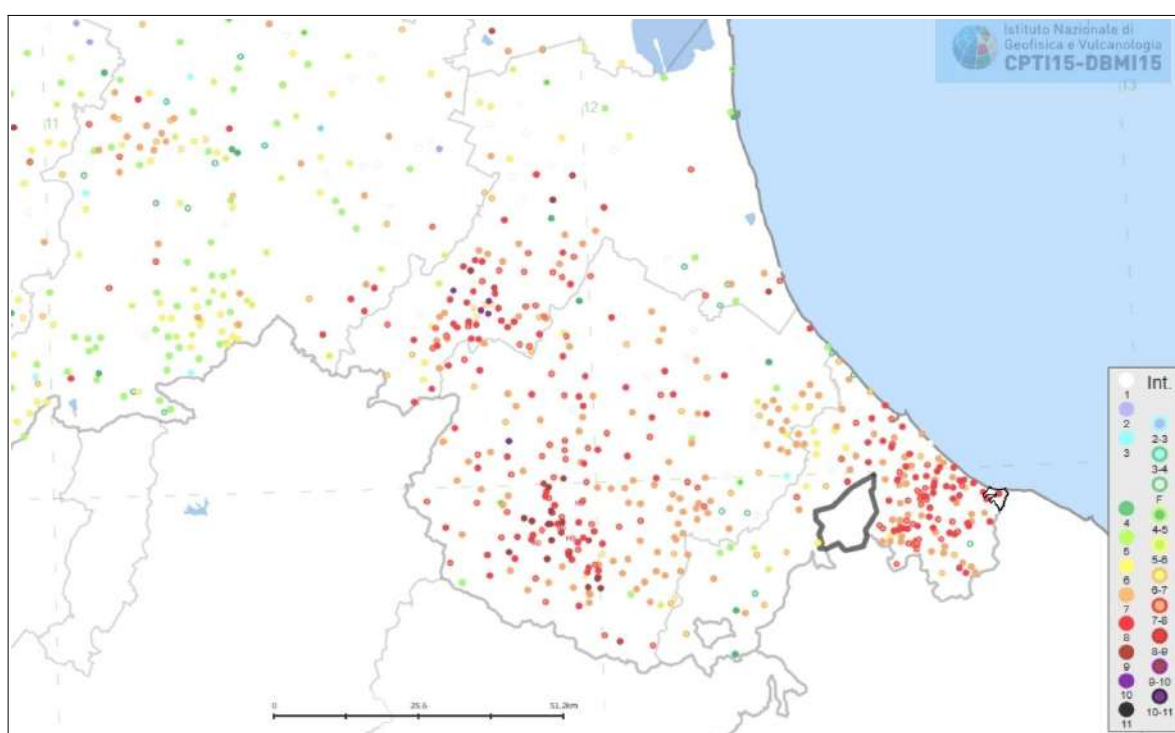


Figura 7.6– Massime intensità macrosismiche registrate nel settore SE della Regione Emilia–Romagna (fonte: INGV – Database Macrosismico Italiano 2015). Viene riportato il limite territoriale del Comune di Cattolica

Il DBMI15 (Locati et al., 2022), riporta per Cattolica 22 eventi sismici, con quattro eventi (Riminese 1672; Riminese 1786; Riminese 1916; Riminese 1916) caratterizzati da effetti macrosismici storicamente più significativi (Int.  $\geq 6$ ). La figura 7.6 rappresenta una sintesi degli effetti macrosismici stimati a seguito di eventi sismici nella Regione Emilia–Romagna.

La figura 7.7 riporta invece l'elenco dei terremoti più significativi che hanno interessato il Capoluogo comunale (fino al 2020) e il grafico della distribuzione temporale degli eventi con massima intensità  $\geq 3$ , stimata sulla base dei danni e degli effetti percepiti nel territorio in questione. La figura 7.8 riporta infine la localizzazione epicentrale dei terremoti più significativi che hanno interessato il territorio studiato (archivio CPTI15).

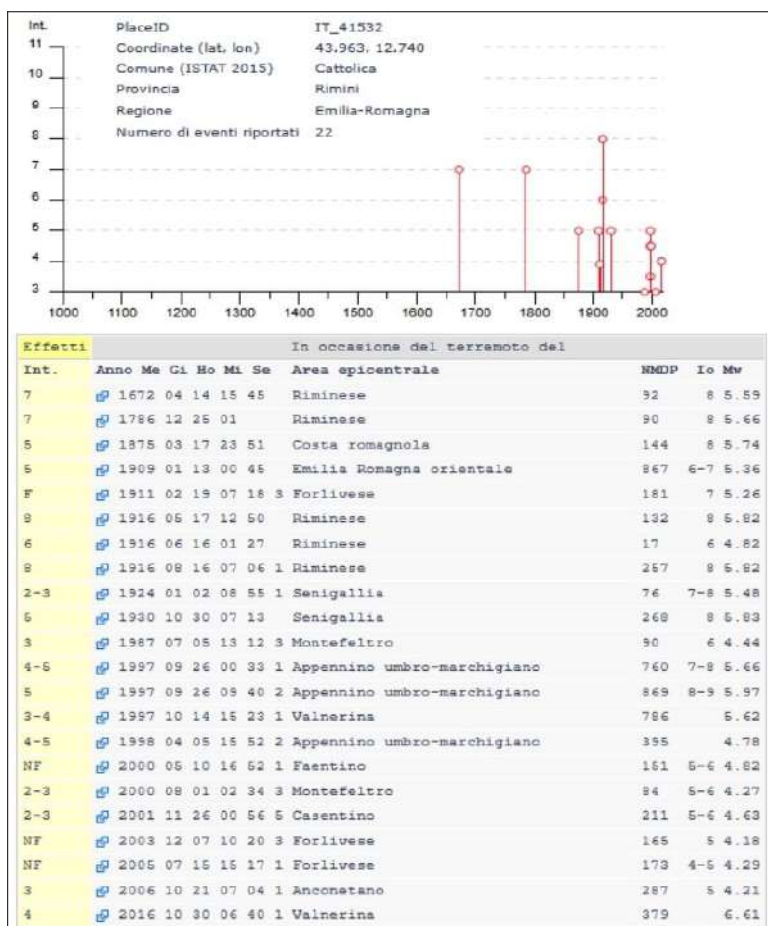


Figura 7.7- Terremoti significativi per il Capoluogo, con macrointensità stimata  $\geq 3$  e plottaggio cronologico degli eventi con macrointensità stimata  $\geq 3$  (fonte: INGV - DBMI15)

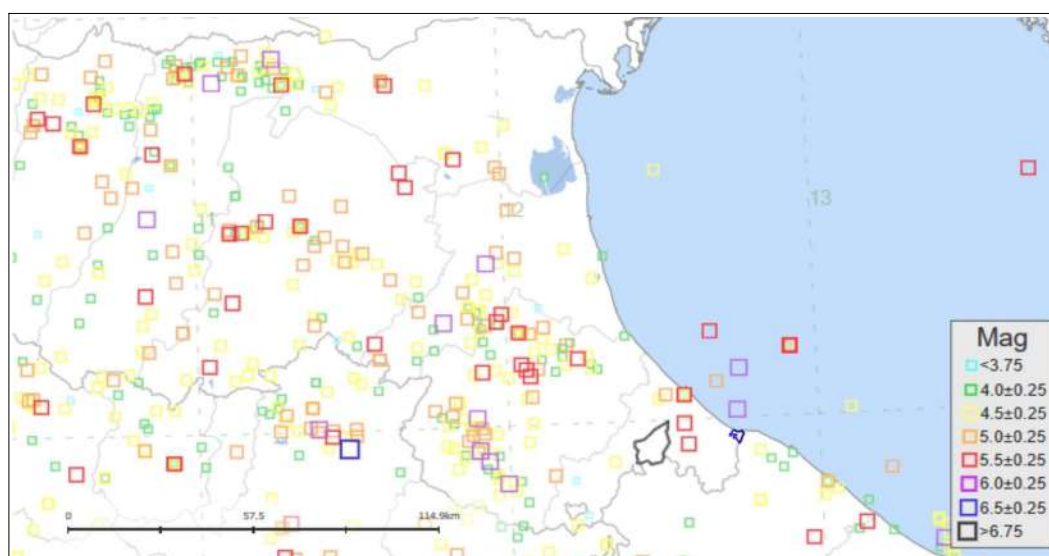


Figura 7.8 - Localizzazione degli epicentri dei terremoti più significativi registrati nel territorio SO della Regione Emilia-Romagna (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano 2015). È rappresentato il territorio di Cattolica

## 7.2 Gli indirizzi regionali per gli studi di MS e mappa MPS04

La Regione Emilia-Romagna ha elaborato e approvato (con Delibera dell'Assemblea Legislativa n.112 del maggio 2007) gli <<Indirizzi per gli studi di Microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica>>, in coerenza con la LR n.20/2000 <<Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio>>. Questi indirizzi regionali per la microzonazione sismica, sono stati redatti sulla scorta degli esiti delle indagini sismiche che la Regione Emilia-Romagna ha effettuato nel territorio regionale negli ultimi 40 anni circa, assumendo come riferimento la “pericolosità di base” elaborata da INGV e recepita a livello nazionale con l'OPCM 3519/2006.

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

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

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

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

Per quanto riguarda la  $a_g$  al sito di riferimento ( $a_{g,ref}$ ), si rammenta che ai fini della pianificazione (DGR476/2021) e della progettazione di costruzioni (NTC 2018) la pericolosità sismica di base viene definita mediante un approccio “sito dipendente” e basata sulla mappa MPS04, che rappresenta una “griglia di riferimento” costruita per tutto il territorio nazionale (densità di 20 punti per grado, circa un punto ogni 5 km). A ogni punto della griglia vengono attribuiti, a seconda del periodo di ritorno atteso per il terremoto, valori di  $a_g$  ed i principali parametri “spettrali” da utilizzare per la quantificazione della risposta sismica locale. La mappa MPS04 è diventata ufficialmente la mappa di riferimento per il territorio nazionale a seguito dell'Ordinanza PCM 3519/2006 (G.U. n.105 dell'11 maggio 2006).

La figura 7.9 riporta per il territorio comunale di Cattolica la griglia INGV (mappa MPS04) di riferimento per la caratterizzazione sismica dell'Arenile. Vengono calcolati i valori della  $a_{refg}$  in funzione dei tempi di ritorno del terremoto di riferimento/progetto. Per le analisi necessarie alla pianificazione, la pericolosità sismica di base si riferisce al valore dell'accelerazione massima attesa su suolo rigido, con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni ( $a_{g,ref} = 0,183g$ ).

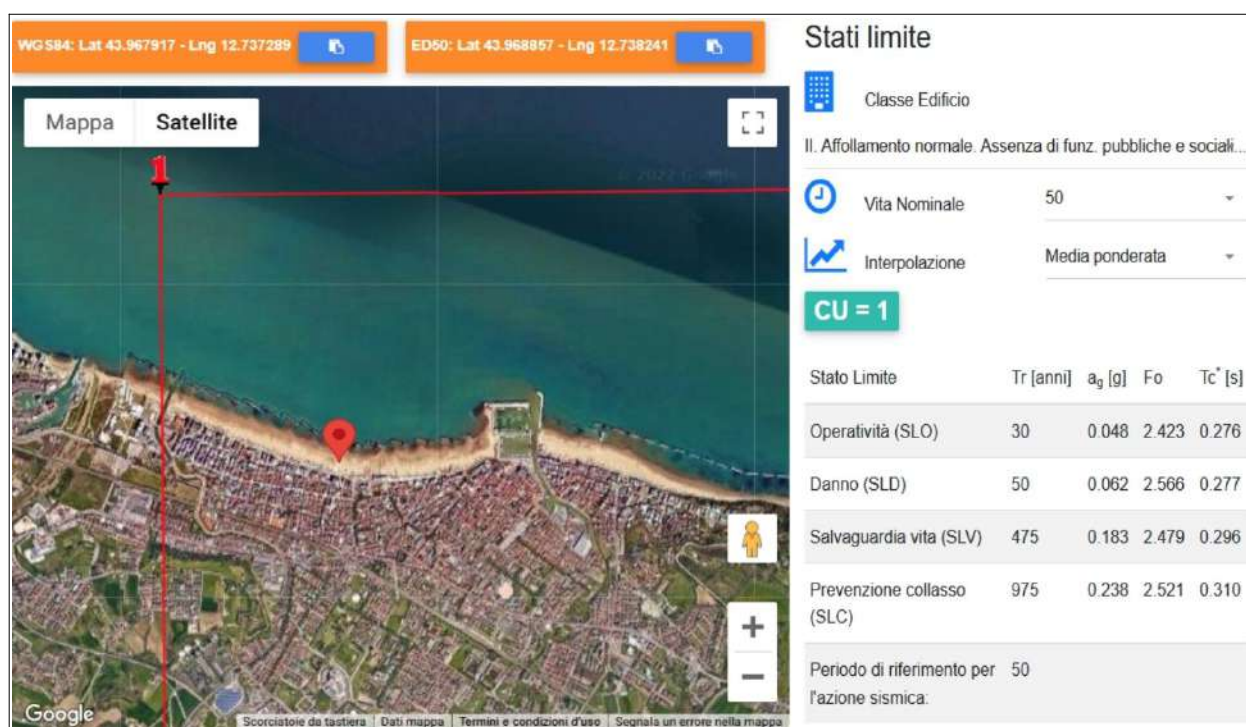


Figura 7.9 – Punti del reticolo INGV di riferimento per la definizione della pericolosità di base e parametri sismici di base associati (NTC 2018) calcolati con “GeoStru Parametri Sismici” (<https://geoapp.eu/parametrisismici2018/>)



### 7.3 La MS comunale e il rischio sismico di area vasta

La componente pericolosità del rischio sismico dipende sia dalla “pericolosità di base”, sia dalla “pericolosità sismica locale”. Quest’ultima, in particolare, deriva dalle <<caratteristiche geologiche e morfologiche del territorio in quanto alcuni depositi e forme del paesaggio possono modificare le caratteristiche del moto sismico in superficie e costituire aspetti predisponenti al verificarsi di effetti locali quali fenomeni di amplificazione o di instabilità dei terreni (cedimenti, frane, fenomeni di liquefazione)<sup>7</sup>>>.

In questo senso, il Comune di Cattolica dispone della microzonazione sismica di “livello 2” con approfondimenti di “livello 3”, elaborata con i fondi stanziati per gli studi di MS di cui all'OPCM n. 4007/2012 e succ. Decreto del 16 marzo 2012 del capo del Dipartimento della Protezione Civile. Lo studio di MS pregresso 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. 1302/2012. Tale studio è stato validato dalla CTMS in data 20/07/2015.

Più nel dettaglio, lo studio di MS comunale pregresso e la rappresentazione degli elaborati richiesti sono risultati conformi ai 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 DAL regionale n. 112/2007.

La figura 7.10 riporta uno stralcio della “Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica” (scala 1:5.000) prodotta per lo studio di MS pregresso: si evince come l’Arenile ricada nell’areale suscettibile di instabilità “1”, caratterizzato da possibilità di liquefazioni dei sedimenti predisponenti (sabbie pulite e sabbie-ghiaiose di spiaggia). Per questo areale sono richiesti ulteriori approfondimenti di “livello 3” (verifiche di liquefazione/densificazione; cedimenti post-sisma; risposta sismica locale). Occorre precisare che per lo studio di MS comunale sono stati espletati approfondimenti relativi alla risposta sismica locale mediante simulazioni numeriche monodimensionali e verifiche quantitative della liquefacibilità e dei cedimenti post sisma da prove penetrometriche elettriche CPTe/CPTU). In particolare, per il settore di costa gli esiti della risposta sismica locale avevano evidenziato alti fattori di amplificazione ( $Fa_{PGA} = 1,6 \div 1,7$ ;  $FASl_{0,1-0,5s} = 1,5 \div 1,6$ ;  $FASl_{0,5-1,0s} = 3,5$ ) e un “rischio” di liquefazione per tutto il settore di costa comunale variabile da “moderato” ( $2,0 \leq LPI < 5,0$ ) a “elevato” ( $5,0 \leq LPI < 15,0$ ), con esiti più critici riscontrati nelle prove effettuate nel settore occidentale (tra il fiume Conca e il Ventena).

---

<sup>7</sup> Cfr. “Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017) – Allegato A”

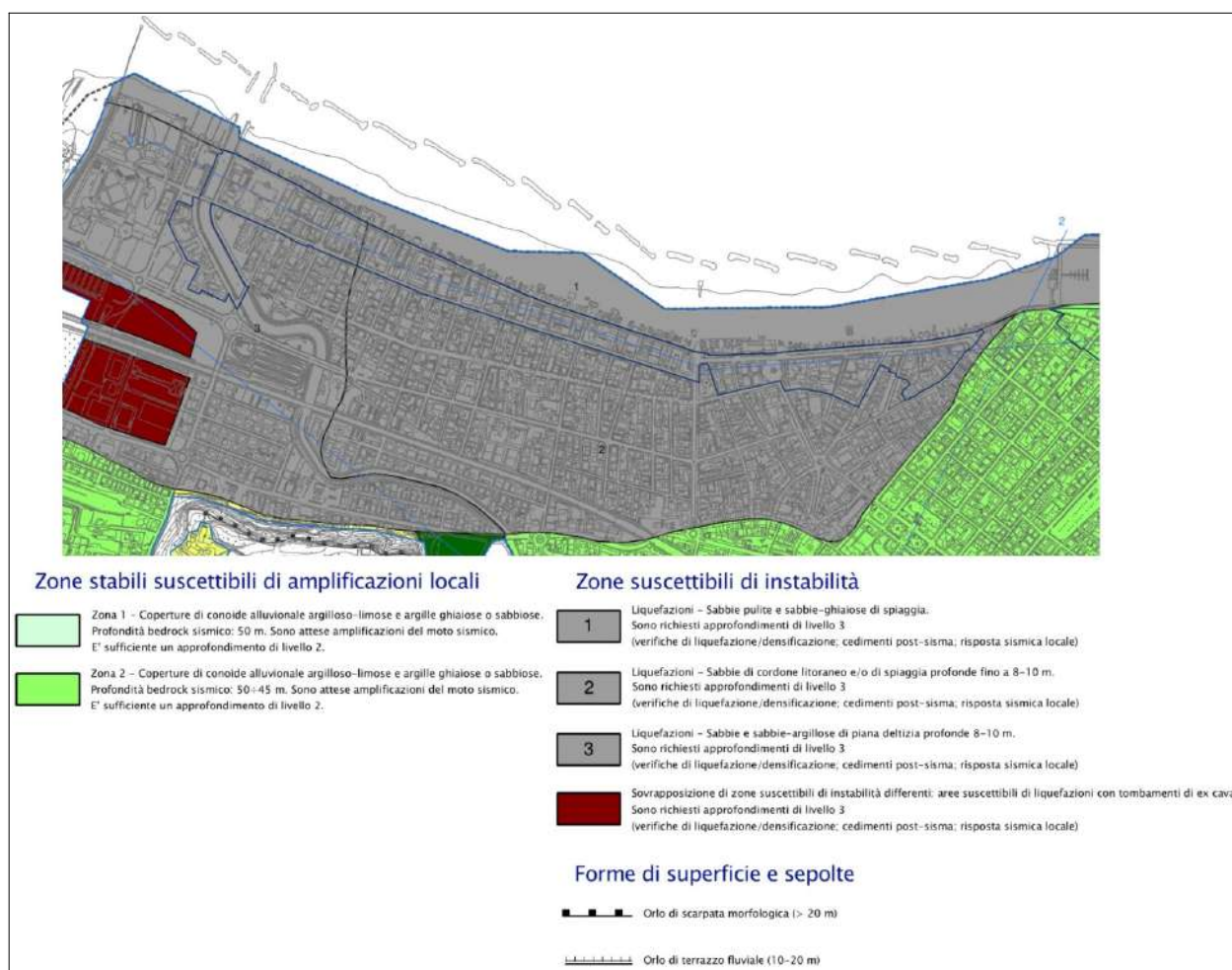


Figura 7.10 – Stralcio della “Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica” (scala 1:5.000) prodotta per lo studio di MS comunale (OPCM 4007/2012)

Gli studi già disponibili risultano tuttavia non più conformi ai criteri di analisi ed elaborazione dettati dai successivi aggiornamenti degli Indirizzi regionali (es. DGR 630/2019 e DGR 476/2021). Per questo Piano, pertanto, si è ritenuto opportuno procedere con un sostanziale aggiornamento delle analisi di “livello 3” per il territorio di interesse.

Occorre anche segnalare che il Comune di Cattolica è risultato destinatario di ulteriori contributi economici (OCDPC 780/2021; DGR 1885/2021) finalizzati all’aggiornamento della MS comunale con ulteriori indagini geognostiche/geofisiche e analisi di “livello 3”.

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.11.1/2 alla scala 1:25.000 consultabili anche on-line nel sito della Provincia di Rimini. L’Arenile di Cattolica viene compreso (figura 7.11):

- ✓ il settore centrale e orientale nella “zona 6 – Aree suscettibili di liquefazione”
- ✓ il settore occidentale (foce del Conca e Ventena) nella “zona 7 – Aree suscettibili di amplificazione per caratteristiche stratigrafiche”.

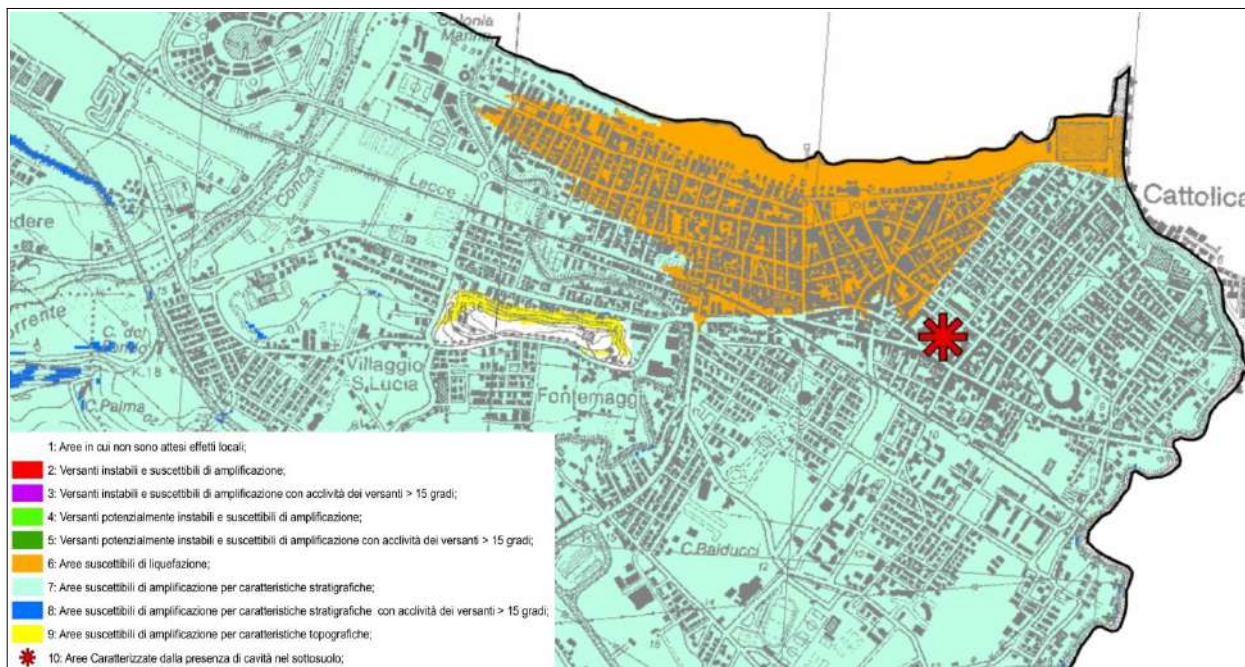


Figura 7.11 – Stralcio della tavola S.A.11.2 “Sistema ambientale – Rischio sismico – Carta provinciale delle zone suscettibili degli effetti locali” alla scala 1:25.00 (PTCP di Rimini)

## 7.4 L'aggiornamento della MS per l'Arenile di Cattolica (DGR 476/2021)

### 7.4.1 Dati sismostratigrafici del sottosuolo

Per quanto riguarda il modello di sottosuolo, la figura 7.12 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 MOPS elaborata per questo aggiornamento (rinominate B–B' e C–C'). Le due sezioni evidenziano un'ipotesi di profondità del bedrock marino che a ridosso della linea di costa risulterebbe approfondito a oltre –35÷40 metri dal p.c.

Occorre anche 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, sembrano condizionare in alcuni settori la RSL (riflettori sismici a circa –25÷30 metri).

Per quanto riguarda l'Arenile, le indagini già disponibili hanno consentito una ricostruzione litostratigrafica di maggiore dettaglio del sottosuolo meno profondo (fino a circa –16÷17 metri), schematizzata nella sezione A–A' (vedi figura 7.13).



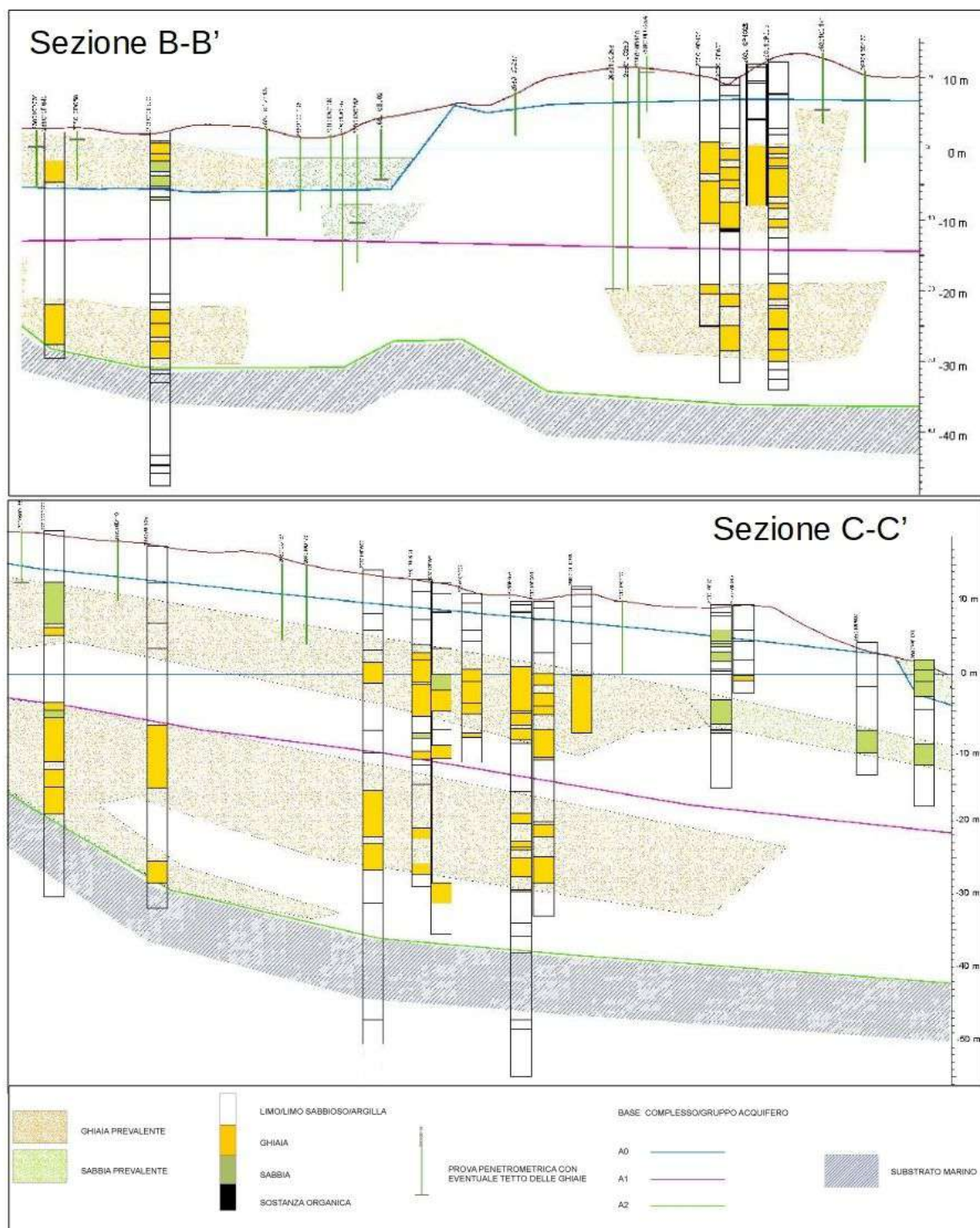


Figura 7.12 - Sezioni geologiche pubblicate dal SGSS Regione Emilia-Romagna intersecanti l'area di studio e riportate nella cartografia di MS (MOPS). La traccia B-B' corrisponde alla sez. n.128, mentre la traccia C-C' corrisponde alla sez. n. 127



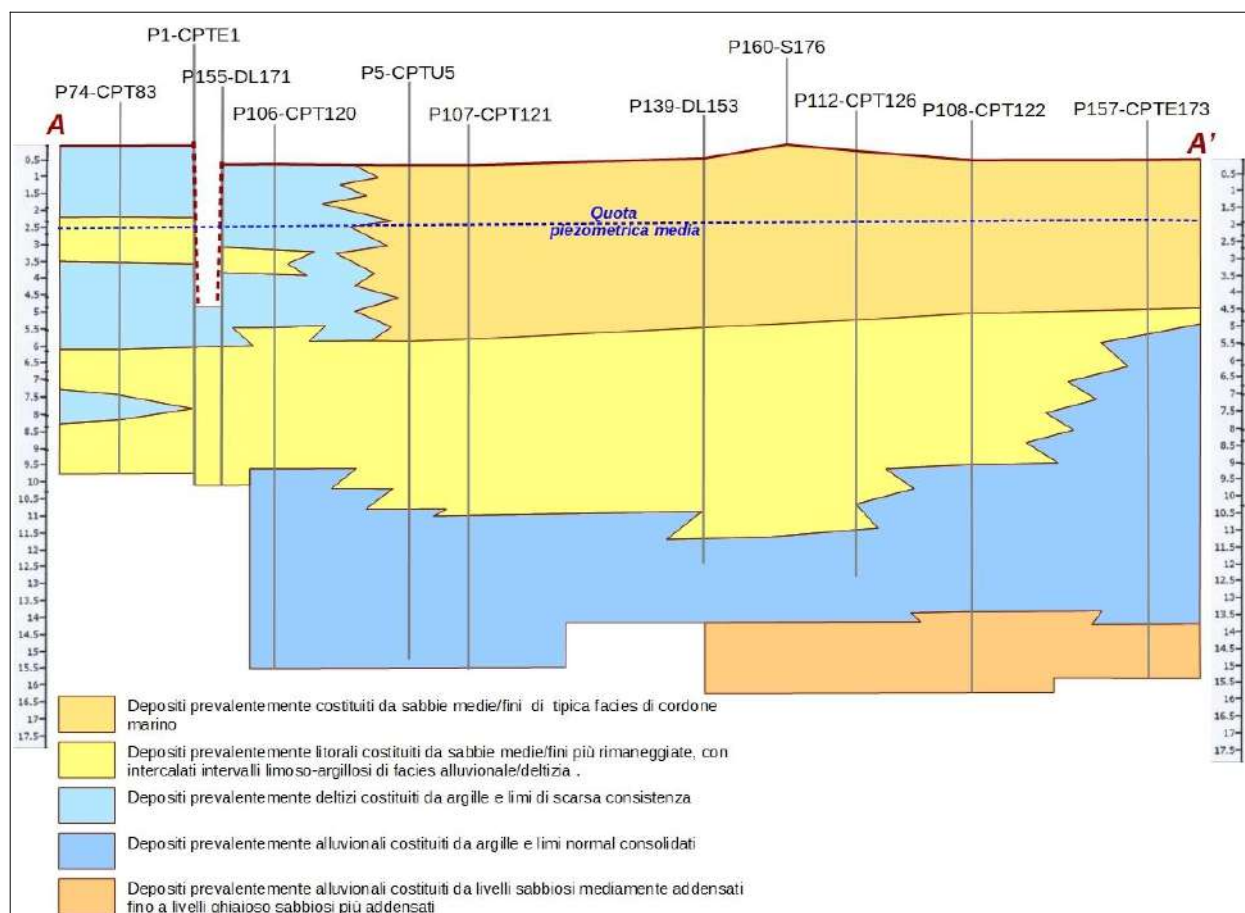


Figura 7.13 - Sezione geologica schematica del sottosuolo dell'Arenile di Cattolica (sezione A-A')

La sezione A-A' e le ulteriori indagini di repertorio evidenziano come nello spessore di sedimenti meno profondo (fino a circa 8÷10 metri) si denota una netta demarcazione di facies deposizionale, che da tipico contesto di ambiente di cordone/spiaggia litorale (verso est, in destra idrografica del Ventena), passa verso ovest (poco oltre la prova P5CPTU5) al contesto deposizionale recente prevalentemente deltizio del Torrente Conca.

Le prove geofisiche e analisi effettuate per lo studio di MS comunale hanno inoltre permesso una caratterizzazione sismostratigrafica più approfondita per il territorio comunale. Per quanto riguarda l'Arenile e gli areali circostanti, la figura 7.14 riporta il modello sismostratigrafico derivato dallo stendimento ReMi (L1REMI1) e dal "Cono Sismico" (P157SCPT191) eseguiti rispettivamente nella zona Acquario di Cattolica (foce del Conca) e Porto.

Le indagini HVSR nell'intorno dell'arenile (figura 7.15) hanno evidenziato picchi di amplificazione riconducibili al tetto del substrato pliocenico e/o alle ghiaie sovrastanti nel range di frequenze comprese tra 1,2÷1,3 Hz (settore orientale) e circa 1,6÷1,7 Hz (settore occidentale). Gli esiti delle registrazioni HVSR, opportunamente confrontati con i dati litostratigrafici già disponibili, consentono di sviluppare modelli sismostratigrafici del sottosuolo che sono stati implementati, come vedremo, nelle modellazioni numeriche della RSL.

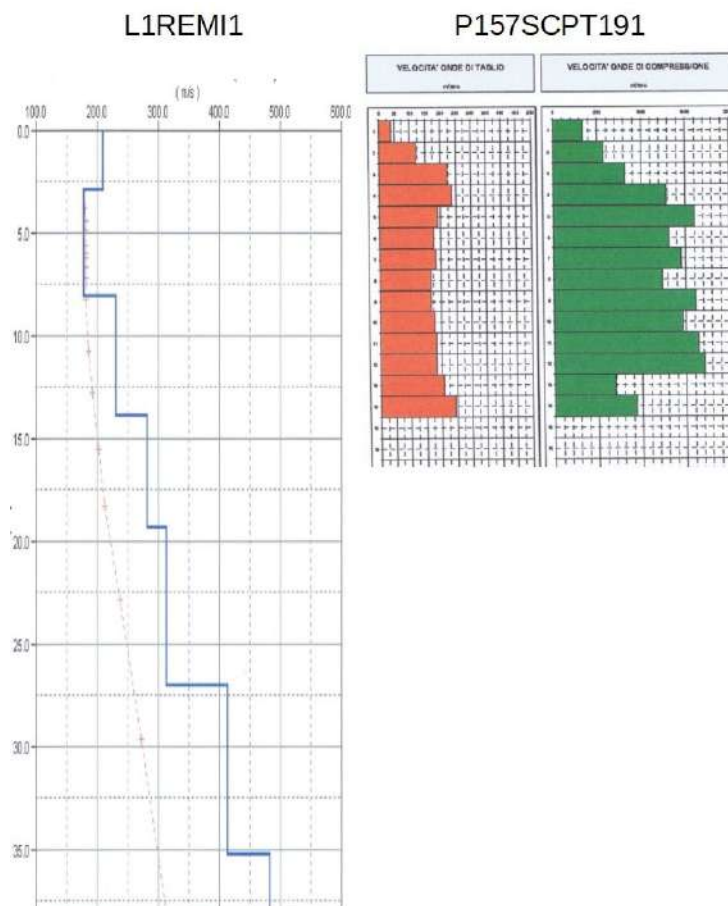


Figura 7.14 - Confronto tra esiti di  $V_s$  ottenuti dallo stendimento ReMi e "Cono Sismico" di riferimento per questo studio

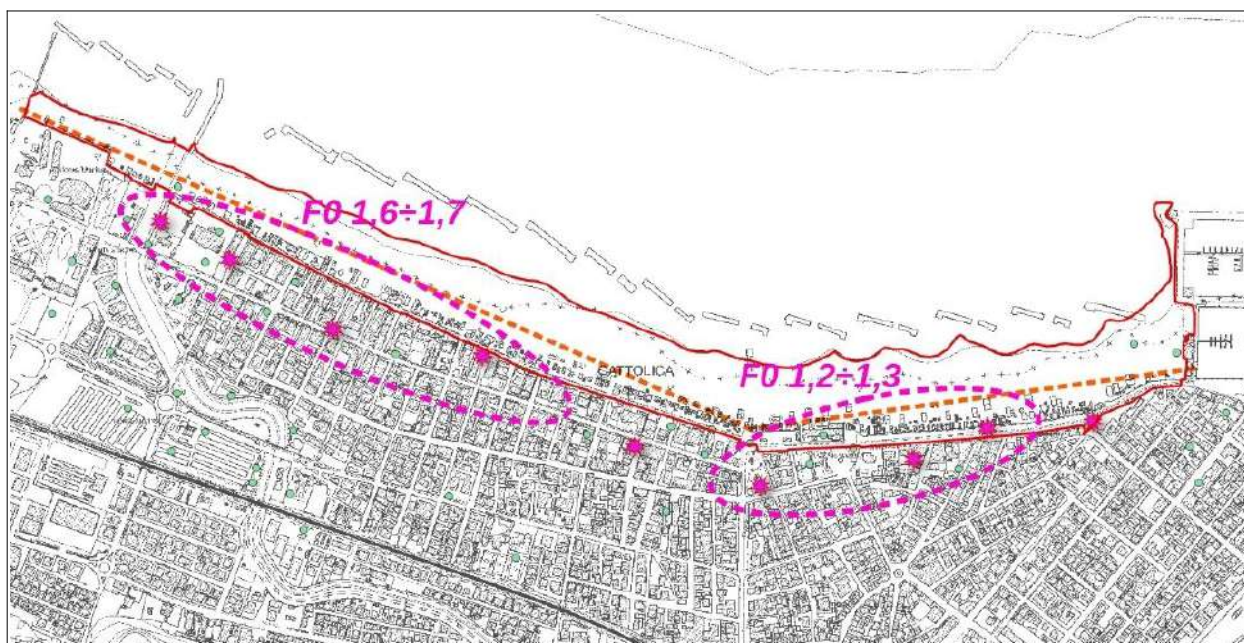


Figura 7.15- Localizzazione delle registrazioni HVSR di riferimento per l'Arenile di Cattolica. Si riportano le frequenze fondamentali ( $f_0$ ) misurate

La seguente figura 7.16 rappresenta i modelli sismostratigrafici derivati rispettivamente dalle registrazioni P06HVSR6, P07HVSR8 e P02HVSR9.

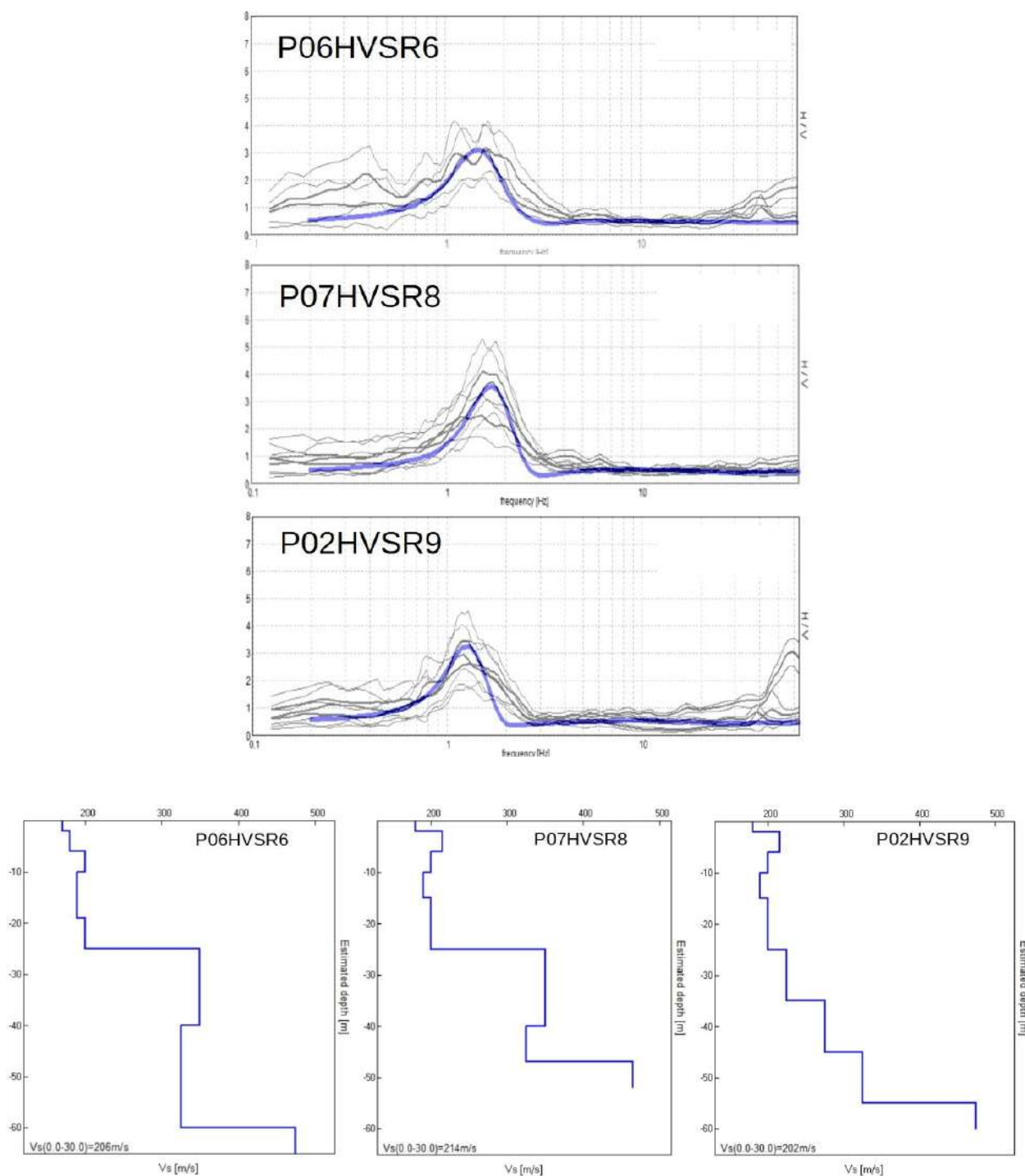


Figura 7.16- Modelli sismostratigrafici derivati da registrazioni HVSR

#### 7.4.2 Sintesi illustrativa delle microzone omogenee in prospettiva sismica – MOPS

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

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

I risultati degli studi sono fondamentalmente riconducibili alla carta delle MOPS (microzone omogenee in prospettiva sismica) e alla cartografia di MS (microzonazione sismica). Occorre rammentare che la carta delle MOPS è riferita unicamente al “livello 1” di approfondimento e perciò le zone individuate hanno approfondimenti esclusivamente di tipo qualitativo. Per questo studio, si è proceduto ad un aggiornamento delle MOPS già definite nella MS comunale pregressa (OPCM 4007/2012).

La revisione delle MOPS ha interessato soltanto l'area Arenile e a un suo intorno e in questo senso si è tenuto conto delle caratteristiche deposizionali e in particolar modo delle caratteristiche sismostratigrafiche, in quanto strettamente connesse alla variabilità della risposta sismica e alla possibilità di innesco di altri fenomeni cosismici (es. amplificazioni e liquefazioni).

Nel Comune di Cattolica non si riscontrano “zone stabili”, tuttavia si è distinta una “zona stabile suscettibile di amplificazioni locali” che comprende, nel caso dell'Arenile, il territorio orientale a monte della scarpata (“berm”) già descritta. Vengono inoltre ridefinite per questo studio quattro “zone di attenzione per instabilità”, riconducibili alla possibilità di fenomeni di liquefazione per la presenza di intervalli granulari saturi nei primi 20 metri. Queste zone di attenzione sono state ulteriormente differenziate anche in relazione ai differenti contesti sismostratigrafici (es. profondità del bedrock sismico). Qui di seguito si riportano le definizioni sintetiche delle MOPS definite per questo studio:

## Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

### Zona 1

Zona 1 – Coperture di conoide alluvionale argilloso-limose e argille ghiaiose o sabbiose. Substrato sismico a profondità >55÷60 m.



## Zone di attenzione per instabilità



ZA\_LQ 2 – Depositi di sabbiosi di cordone marino fino a 4÷6 m poi ancora depositi prevalentemente litorali fino a 8÷10 m, costituiti da sabbie medie/fini più rimaneggiate con intercalati intervalli limoso-argillosi di facies alluvionale/deltizia. Seguono depositi alluvionali prevalentemente argilloso limosi con intervalli sabbioso-ghiaiosi. Substrato sismico a profondità >50÷55 m.



ZA\_LQ 3 – Depositi sabbiosi superficiali di spiaggia fino a 4÷6 m poi ancora depositi prevalentemente litorali fino a 8÷10 m, costituiti da sabbie medie/fini più rimaneggiate con intercalati intervalli limoso-argillosi di facies alluvionale/deltizia. Seguono depositi alluvionali prevalentemente argilloso limosi con intervalli sabbioso-ghiaiosi ben addensati a -25÷30 m. Substrato sismico a profondità >40÷45 m.



ZA\_LQ 4 – Depositi prevalentemente deltizi fino a 8÷10 m, costituiti da argille e limi di scarsa consistenza con intercalati depositi litorali sabbiosi rimaneggiati. Seguono depositi alluvionali prevalentemente argilloso limosi con intervalli sabbioso-ghiaiosi ben addensati a -25÷30 m. Substrato sismico a profondità >55÷60 m.

### 7.4.3 I fattori di amplificazione considerati per la MS

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, sono stati calcolati i fattori di amplificazione per l'Arenile di Cattolica. I fattori di amplificazione indicati nella DGR regionale n. 476/2021 sono calcolati per un tempo di ritorno dell'evento sismico pari a  $T_r = 475$  (con smorzamento  $\zeta = 5\%$ ) e si riferiscono a:

- FA PGA → rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione ricavata alla superficie del deposito e ricavata sull'affioramento "rigido" ( $PGA/PGA_0$ ). Il fattore di amplificazione dipende dalla frequenza di eccitazione armonica, dal fattore di smorzamento D e dal rapporto tra l'impedenza sismica, prodotto tra densità-velocità, della roccia base e quella del deposito;
- FA SA – Rapporto dell'intensità spettrale in accelerazione ricavata alla superficie del deposito e ricavata sull'affioramento "rigido". I fattori di amplificazione calcolati si riferiscono ai quattro seguenti intervalli di integrazione del periodo proprio T:

SA1 → 0,1s–0,5s [FA0105]

SA2 → 0,4s–0,8s [FA0408]

SA3 → 0,7s–1,1s [FA0411]

SA4 → 0,5s–1,5s [FA0515] solo per le aree di pianura/costa

- FA SI – Intensità spettrale di Housner → indicatore della pericolosità sismica, definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità per determinati periodi dello scuotimento. Nel nostro caso, si devono determinare i fattori di amplificazione per i tre seguenti intervalli di integrazione del periodo proprio T:

SI1 → 0,1s-0,5s [FH0105]

SI2 → 0,5s-1,0s [FH0510]

SI3 → 0,5s-1,5s [FH0515] solo per le aree di pianura/costa

#### 7.4.4 Simulazioni numeriche della risposta sismica locale (approfondimenti di livello 3)

Per questo studio, si sono elaborati tre modelli numerici della RSL, rappresentativi delle tre MOPS nelle quali ricade l'Arenile di Cattolica (figura 7.17).

Le modellazioni numeriche di RSL sono state elaborate utilizzando il software di calcolo "LSR" prodotto dalla STACEC Srl in grado di generare modelli 1D secondo l'approccio analitico lineare equivalente, grazie alla discretizzazione di una striscia unitaria di terreno e all'applicazione di un sistema di vincoli sul modello FEM tale da consentire solo deformazioni di taglio.

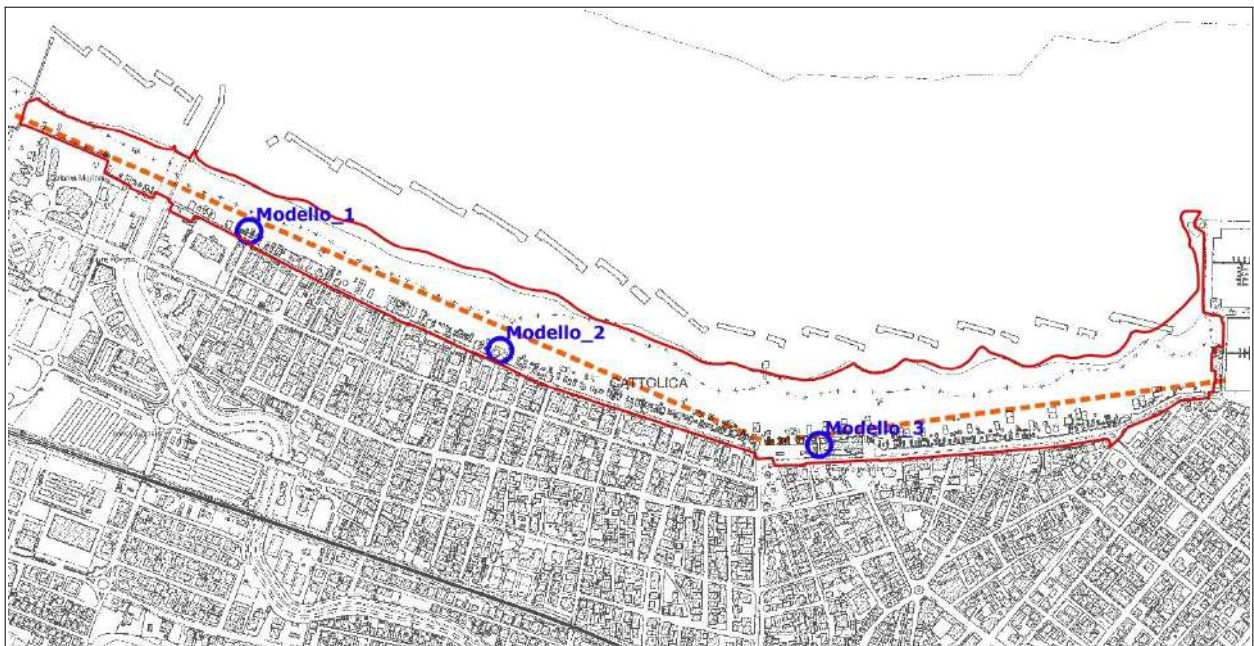


Figura 7.17- Localizzazione dei modelli numerici di RSL elaborati per questo studio

Il software è in grado di eseguire una sequenza di analisi lineari complete, con l'aggiornamento successivo dei parametri di rigidezza e smorzamento in funzione delle caratteristiche della colonna litologica. Il processo di analisi che si è seguito può essere così schematizzato:

- ✓ scelta degli input sismici (accelerogrammi) di riferimento
- ✓ definizione del modello sismostratigrafico locale

- ✓ elaborazione degli accelerogrammi di output, degli spettri di risposta elastici e dei fattori di amplificazione indicati dalla DGR 476/2021.

Per quanto riguarda la scelta degli input sismici, dalla piattaforma WebGIS all'indirizzo <http://egeos-test.eucentre.it/rer/home.html> è possibile scaricare gli accelerogrammi su sito rigido selezionati per ciascun nodo del reticolo di riferimento considerato dalle NTC vigenti, interno al territorio della Regione Emilia-Romagna. La figura 7.18 individua il nodo del reticolo di riferimento, che interessa il territorio di Cattolica.

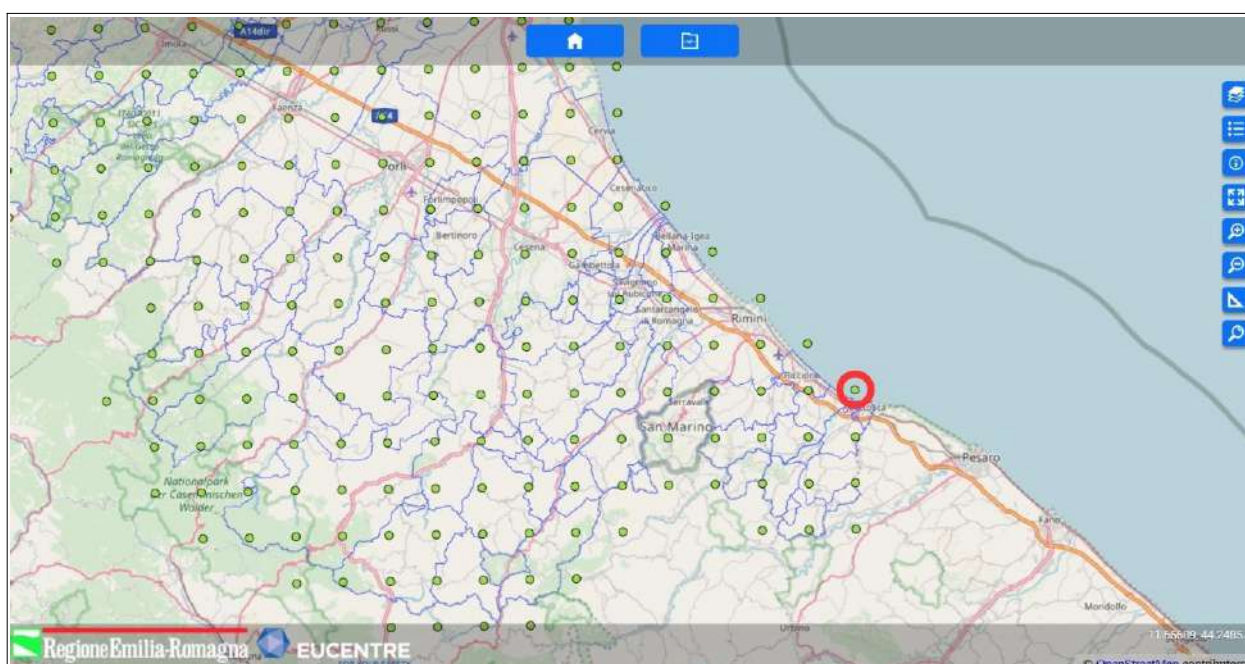


Figura 7.18 - Localizzazione del nodo del reticolo di riferimento per il territorio di Cattolica

Ai sensi della DGR 476/2021, l'input sismico è definito da un gruppo di 7 accelerogrammi reali, registrati su roccia, spettro-compatibili in media agli spettri di normativa definiti nelle NTC vigenti, per periodi di ritorno di 475 anni. La seguente tabella 7.1 contiene le informazioni del set di accelerogrammi e in particolare: magnitudo ( $M_w$ ) dell'evento che ha generato l'accelerogramma; distanza epicentrale (km) alla quale è avvenuta la registrazione; fattore di scala rispetto all'accelerogramma originario, nome della banca-dati alla quale appartiene l'accelerogramma originario; nome dell'accelerogramma all'interno della banca-dati.

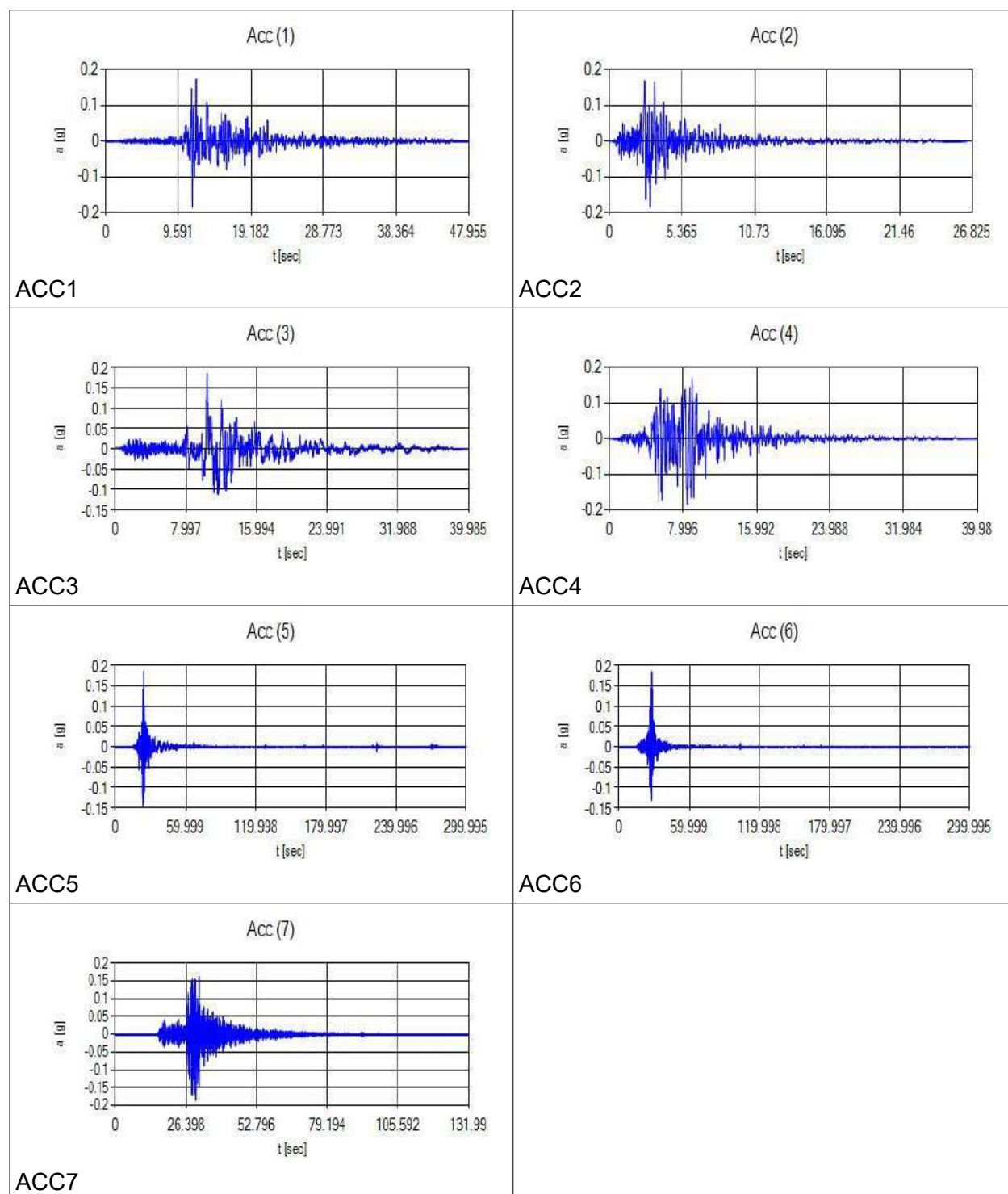
Progr.	Magnitude( $M_w$ )	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.9	62.9	0.72%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790415.061941.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.58%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	6.93	94.31	1.98%	NGA	RSN797_LOMAP_RIN090.AT2
CDC(4)	6.69	38.07	1.22%	NGA	RSN1091_NORTHV_VAS000.AT2
CDC(5)	6.6	31	0.74%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(6)	6.6	62	1.32%	KiKnet	SAGH050503201053.EW2
CDC(7)	6.1	97	1.51%	KiKnet	MYGH041103280724.EW2

Tabella 7.1 - Dati relativi agli accelerogrammi selezionati per le analisi numeriche di RSL (DGR 476/2021)



Per l'area di studio gli input accelerometrici sono scalati considerando le  $a_{g_{ref}}$  che caratterizzano l'area di interesse ( $a_{g_{ref}}=0,183g$ ), come già indicato nel paragrafo 7.2.

La figura 7.19 rappresenta graficamente gli accelerogrammi di input utilizzati per l'analisi numerica.





*Figura 7.19 – Accelerogrammi di input utilizzati per l'analisi numerica di RSL (DGR 476/2021)*

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

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

Il successivo passo è dunque quello di definire il bedrock sismico, la stratigrafia e i relativi principali parametri sismici. Come già scritto, il supporto conoscitivo, per quanto riguarda il sottosuolo è fornito dagli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite nell'area di studio e dalle ulteriori indagini di repertorio.

Per ogni sismostrato, il codice di elaborazione richiede l'inserimento delle fondamentali proprietà dinamiche del suolo, rappresentate dal fattore di smorzamento  $D$  e dal modulo di rigidezza a taglio  $G$ . Mentre i valori di rigidezza iniziale  $G_0$  sono stati determinati sulla base delle indagini geofisiche (stima delle  $V_s$ ), le caratteristiche di deformazione a taglio e smorzamento dei sedimenti sottoposti a sollecitazioni impulsive devono essere necessariamente determinate da prove di laboratorio. In tal senso, sono stati adottati modelli disponibili in letteratura, già implementati nel software di calcolo "LSR" (Vucetic & Dobry (1991), Idriss (1990) clay; Idriss (1990), Sand; Average Rock).

Le seguenti tabelle 7.2–7.3–7.4 riassumono le caratteristiche dei modelli sismostratigrafici implementati nel software di calcolo.

Strato	S [m]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	$V_s$ [m/s]	$\gamma$	Curva decadimento
Strato (1) SUOLO	2.00	1700.00	170.00	0.35	Idriss (1990), Clay
Strato (2) SABBIE LITORALI RIMANEGGiate	1.50	1750.00	180.00	0.35	Vucetic & Dobry, $PI=0$
Strato (3) ARGILLE E LIMI DELTA	2.50	1700.00	180.00	0.35	Idriss (1990), Clay
Strato (4) SABBIE/LIMI/ARGILLE RIMANEGGiate	4.00	1800.00	200.00	0.35	Vucetic & Dobry, $PI=15$
Strato (5) ARGILLE/LIMI PIANA	9.00	1800.00	190.00	0.35	Idriss (1990), Clay
Strato (6) ARGILLE/LIMI PIANA	6.00	1800.00	200.00	0.35	Idriss (1990), Clay
Strato (7) GHIAIE/SUBSTRATO ALTERATO	15.00	2050.00	350.00	0.35	Average Rock
Strato (8) SUBSTRATO NON RIGIDO	20.00	2000.00	325.00	0.35	Average Rock

*Tabella 7.2 – Modello sismostratigrafico 1*

Strato	S [m]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Vs [m/s]	$\gamma$	Curva decadimento
Strato (1) SUOLO/SPIAGGIA	2.00	1750.00	180.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (2) SABBIE CORDONE MARINO	4.00	1850.00	215.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (3) SABBIE RIMANEGGiate/LIMI/ARGILLE	4.00	1800.00	200.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (5) ARGILLE/LIMI PIANA	5.00	1800.00	190.00	0.35	Idriss (1990), Clay
Strato (6) ARGILLE/LIMI PIANA	10.00	1800.00	200.00	0.35	Idriss (1990), Clay
Strato (7) GHIAIE/SUBSTRATO ALTERATO	15.00	2050.00	350.00	0.35	Average Rock
Strato (8) SUBSTRATO NON RIGIDO	7.00	2000.00	325.00	0.35	Average Rock

Tabella 7.3 - Modello sismostratigrafico 2

Strato	S [m]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Vs [m/s]	$\gamma$	Curva decadimento
Strato (1) SUOLO/SPIAGGIA	2.00	1750.00	180.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (2) SABBIE CORDONE MARINO	4.00	1850.00	215.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (3) SABBIE/LIMI/ARGILLE RIMANEGGiate	4.00	1800.00	200.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (4) ARGILLE/LIMI PIANA	5.00	1800.00	190.00	0.35	Idriss (1990), Clay
Strato (5) ARGILLE/LIMI PIANA	10.00	1800.00	200.00	0.35	Idriss (1990), Clay
Strato (6) ARGILLE/LIMI PIANA	10.00	1850.00	225.00	0.35	Idriss (1990), Clay
Strato (7) ARGILLE/LIMI PIANA	10.00	1950.00	275.00	0.35	Idriss (1990), Clay
Strato (8) SUBSTRATO NON RIGIDO	10.00	2000.00	325.00	0.35	Average Rock

Tabella 7.4 - Modello sismostratigrafico 3

dove:

$S$  = spessore del singolo strato

$\rho$  = densità di massa del singolo strato

$V_s$  = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato

$\gamma$  = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato

#### *7.4.5 Verifiche quantitative della liquefacibilità e dei cedimenti post sisma (approfondimenti di livello 3)*

La possibilità di disporre di dati numerici ricavati da penetrometrie CPTE/CPTU ha permesso di definire una stima del rischio di liquefazione per il territorio studiato, procedendo secondo le seguenti fasi analitiche:

- 1) stima del Fattore di Sicurezza nei confronti della Liquefazione (FSL);
- 2) stima dei cedimenti post sisma indotti da densificazione volumetrica;
- 3) analisi della pericolosità e del rischio di liquefazione sito specifica attraverso la stima dei parametri LPI (Liquefaction Potential Index) e LSN (Liquefaction Severity Number).

La stima di LPI offre ulteriori elementi di valutazione e comparazione del rischio di liquefazione anche alla scala territoriale. Gli esiti di LPI, come vedremo, permettono di definire zone a differente suscettibilità alla liquefazione, rappresentate nelle cartografie di microzonazione di “livello 3” e nelle cartografie di “hazard”.

Si è pertanto proceduto alla stima del Fattore di Sicurezza nei confronti della Liquefazione (FSL), definito dalla seguente relazione:

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

con:

$CRR_{7.5}$  = resistenza alla liquefazione ciclica (Cyclic Resistance Ratio) dei sedimenti attraversati, ricavata dagli esiti CPT (a punta elettrica), per terremoti di  $M = 7,5$ . La procedura si fonda su equazioni che determinano i valori di CRR dei sedimenti attraversati utilizzando i valori di resistenza alla punta  $q_t$ , corretti per tenere conto delle tensioni litostatiche di confinamento, della differente classificazione dei sedimenti attraversati (contenuto di fine; plasticità; ecc.);

$CSR$  = rapporto di sollecitazione 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 ( $a_{max}$ ).

Il  $CSR$  viene calcolato dalla nota equazione semiempirica proposta da Seed e Idriss (1971) per terremoti di  $M = 7,5$ :

$$CSR = 0.65 \cdot \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left( \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \cdot r_d$$

$K_{\sigma}$  = Fattore di correzione per la pressione di confinamento (Overburden Correction Factor);

$MSF$  = Fattore di Scala della Magnitudo (Magnitude Scale Factor) da applicare per sismi con magnitudo diverse da 7,5.

Il valore di FSL è stato determinato mediante calcolo automatico con il noto software “Cliq”, sviluppato dalla GeoLogismiki Geotechnical Engineers, che consente di utilizzare differenti

metodi di stima di FSL.

Per questo lavoro, si sono considerati i seguenti metodi di calcolo di FSL, tutti di lunga sperimentazione e di ampia diffusione nel campo ingegneristico:

1. procedura NCEER<sup>8</sup> (1996; 1998; 2001)

(Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J., Liao, S., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R., and Stokoe, K.H. – *Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*

(G. Zhang, P.K. Robertson, and R.W.I. Brachman – *Estimating Liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground, 2001*)

2. procedura di P. K. Robertson (2009)

(P.K. Robertson – *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, 2009*)

3. procedura di Boulanger & Idriss (2014)

(R. W. Boulanger, I. M. Idriss – *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Department of Civil and Environmental engineering, University of California at Davis, 2014*)

Per la descrizione dettagliata dei metodi si rimanda alla letteratura scientifica originaria. Si rammenta che tali approcci differiscono nel calcolo dei parametri di MSF,  $CRR_{7.5}$ ,  $K\sigma$  e  $r_d$  e che i metodi di P.K. Robertson (2009) e di Boulanger & Idriss (2014) sono validi per tutti i tipi di sedimenti, e considerano anche la possibilità di “cyclic softening” nei sedimenti fini poco coesivi. Gli esiti sono inoltre condizionati da altre grandezze: tra queste, il contenuto in fini FC che introduce significative correzioni alla resistenza penetrometrica normalizzata. In questo senso, per il metodo di Boulanger & Idriss (2014), si è considerato un indice di classificazione dei terreni la classificazione calcolato con un parametro di errore  $C_{FC}$  calibrato al 5%.

Per giungere ad un calcolo speditivo di FSL si sono inoltre adottate le seguenti condizioni di input:

- si è considerata una soggiacenza della falda cautelativa e pari a 1 metro;
- si sono utilizzate le  $a_{max}$  ricavate dalla modellazione numerica della RSL;
- si è considerata una magnitudo di input cautelativa pari a  $M_w = 6,14$ . Il coefficiente correttivo MSF utilizzato è quello di riferimento per i metodi di calcolo utilizzati.

Per la stima dei cedimenti post sisma nei sedimenti saturi a comportamento granulare, si è proceduto al calcolo automatico secondo il metodo di Zhang et. Al. (2002; 2004). Questo procedimento si basa sui risultati empirici di Ishihara & Yoshimine (1992), per sabbie e

---

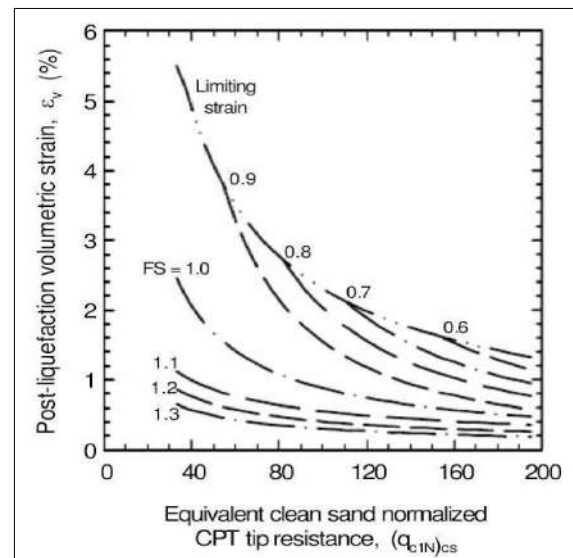
<sup>8</sup> National Center for Earthquake Engineering Research (USA)



sedimenti limosi, e definisce l'entità delle deformazioni volumetriche post-liquefazione sulla base delle resistenze alla punta ( $q_{c1N}_{cs}$ ) e dei corrispondenti esiti di FSL (figura 7.20).

Per i sedimenti a comportamento fine, 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 nei sedimenti fini 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).

Figura 7.20 - Diagrammi di correlazione tra deformazioni volumetriche post-liquefazione e resistenze CPT per differenti fattori di sicurezza (da Zhang et Al., 2002)



Secondo quanto riportato nella letteratura scientifica, si reputa che le deformazioni volumetriche medie di strati a grana fine siano contenute entro l'1%. 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  $FS_{\gamma=3\%} = CRR_M / CSR_M = CRR_{7.5} / CRS_{7.5}$  (Boulanger & Idriss, 2007) e dello stato tensionale dei sedimenti (OCR). Il fattore di sicurezza è stato dunque calcolato come  $FS_{\gamma=3\%} = CRR_{6.14} / CRS_{6.14}$ .

Le deformazioni volumetriche sono state calcolate utilizzando le seguenti relazioni:

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

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

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

L'Indice di Potenziale Liquefazione LPI (Liquefaction Potential Index) di Iwasaki et al. (1982) è stato calcolato per una profondità "critica" fino a -20 metri ed è definito nel seguente modo:

$$LPI = \int_0^{20} F_1 W(z) dz$$

[con:  $W(z)$  fattore di peso della profondità  $= 10^{-0.5z}$ ;  $F_1$  variabile  $= 1 - FSL$  (per  $FSL < 1.0$ ) oppure  $F_1 = 0$  per  $FSL > 1.0$ ;  $z$  = profondità dello strato considerato]

Il calcolo fornisce un valore numerico compreso tra 0 e 100 e quantifica i possibili effetti della liquefazione secondo classi di rischio, tenendo conto della severità dell'azione sismica, della profondità, dello spessore e del valore di FSL degli strati liquefacibili.

Per questo studio, si fornisce un ulteriore indicatore di rischio, ovvero il LSN ("Liquefaction Severity Numbers"), definito nel seguente modo:

$$LSN = \int \frac{\epsilon_v}{z} dz$$



[con:  $\epsilon_v$  = deformazioni volumetriche di densificazione post-liquefazione;  $z$  = profondità dello strato considerato]

Si tratta di una variante del metodo di calcolo del LPI, sperimentato da Tonkin & Taylor (2013) sulla base dei recenti rilievi effettuati a Christchurch e Canterbury, località della Nuova Zelanda, le cui abitazioni hanno subito danni diffusi e di differente intensità a seguito degli eventi sismici accaduti tra il settembre 2010 e il dicembre 2011, per fenomeni di liquefazione ciclica, "lateral spreading" e cedimenti.

Questo metodo, stima l'intensità della liquefazione sulla base degli esiti delle deformazioni volumetriche post liquefazione  $\epsilon_v$  ricavate secondo il metodo di Zhang et All. (2002; 2004), ponderata in funzione della differente profondità degli strati liquefacibili.

Il calcolo fornisce un valore numerico compreso tra 0 e 100 e gli Autori hanno proposto una classificazione di LSN relazionata agli effetti di liquefazione superficiali rilevati nelle zone "free field" e/o alla severità dei danni riscontrati nei manufatti (figura 7.21).

*Figura 7.21-  
Correlabilità  
dell'indice LSN  
con gli effetti di  
liquefazione nei  
sedimenti  
superficiali e con  
l'intensità del  
danno riscontrato  
nei manufatti  
(Tonkin & Taylor,  
2013)*

LSN 0 - 20	Little or no expression of liquefaction, minor sand boils, minor damage to homes.		
LSN 20 - 40	Moderate expression of liquefaction, undulations and cracking of ground surface (there are occasional instances of severe damage).		
LSN 40+	Widespread severe damage, extension expression of liquefaction, severe settlement of buildings and damage to services.		

Secondo gli Autori, l'indice LSN, rispetto alla stima di LPI, risulterebbe “pesare” maggiormente il contributo degli strati superficiali liquefacibili rispetto agli strati critici riscontrabili a profondità maggiori, fornendo esiti più coerenti con gli effetti di liquefazione effettivamente rilevati al piano campagna, inoltre fornirebbe una migliore correlazione anche con l'entità dei danni riscontrati nelle opere di fondazione degli edifici.

#### *7.4.6 Elaborazione dei valori di “Hazard”*

Lo studio ha consentito di calcolare per l'Arenile i valori di H (Naso<sup>9</sup> et al., 2019), parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in cm/s<sup>2</sup>).

Occorre rammentare come gli Indirizzi RER in materia di microzonazione sismica, a partire dalla DGR 630/2019, abbiano introdotto il calcolo di H per il secondo e terzo livello di approfondimento. Per quanto riguarda il “livello 2” gli indirizzi regionali produrre anche una carta della distribuzione sul territorio dei valori di H<sub>SM</sub>, ricavato su un calcolo semplificato ovvero dal prodotto del parametro Acceleration Spectrum Intensity (ASI<sub>UHS</sub>), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per l'intervallo di periodi 0,1s ≤ T ≤ 0,5s, diviso per ΔT (in questo caso pari a 0,4s) e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi.

Pertanto, la formula matematica del calcolo di H<sub>SM</sub> risulta così computata:

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

I valori di ASI<sub>UHS</sub> / ΔT, calcolati per ogni punto della griglia INGV, sono già disponibili nella pagina web dedicata agli indirizzi microzonazione sismica a cura del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli.

Per gli approfondimenti sismici di “livello 3”, gli indirizzi regionali richiedono la stima dell’“hazard” basato sugli esiti delle analisi numeriche della RSL. Più in particolare i valori di H sono stati calcolati mediante il rapporto tra i valori integrali degli spettri in accelerazione (Sa) medi di output ricavati dalla modellazione numerica della RSL per gli intervalli di periodo 0,1s ≤ T ≤ 0,5s (H<sub>SM</sub>), 0,4s ≤ T ≤ 0,8s (H<sub>0408</sub>), 0,7s ≤ T ≤ 1,1s (H<sub>0711</sub>) e 0,5s ≤ T ≤ 1,5s (H<sub>0515</sub>) e i rispettivi ΔT di riferimento e cioè 0,4s (H<sub>SM</sub>), 0,4s (H<sub>0408</sub>), 0,4s (H<sub>0711</sub>), 1,0s (H<sub>0515</sub>). Gli esiti di H vengono sempre calcolati e rappresentati in cm/s<sup>2</sup>.

#### *7.4.7 Sintesi dei risultati*

Le figure 7.22 e 7.23 rappresentano gli spettri di risposta in termini di accelerazione e velocità del moto (spettri singoli, medio e normalizzato al 10%). Gli spettri sono impostati per periodi variabili da 0 secondi a 4s (valori equiparabili ad edifici di altezza variabile da un piano fino a torri molto alte).

---

<sup>9</sup> “Maps for land management: from geology to seismic hazard” – Maso G.; Martelli L.; Baglione M.; Brammerini F.; Castenetto S.; D'Intinosante V.; Ercolelli G. (2019).

La figura 7.24 rappresenta invece i grafici amplificazione-frequenze di output relativi alla funzione di trasferimento. In questo caso, la restituzione è limitata fino a un massimo di 20 Hz, limite più utile ai fini ingegneristici per le analisi delle interazioni sottosuolo/strutture. Dal confronto, emergono massime amplificazioni a frequenze medie di 1,20 Hz (modello 1), 1,35 Hz (modello 2) e 1,10 Hz (modello 3).

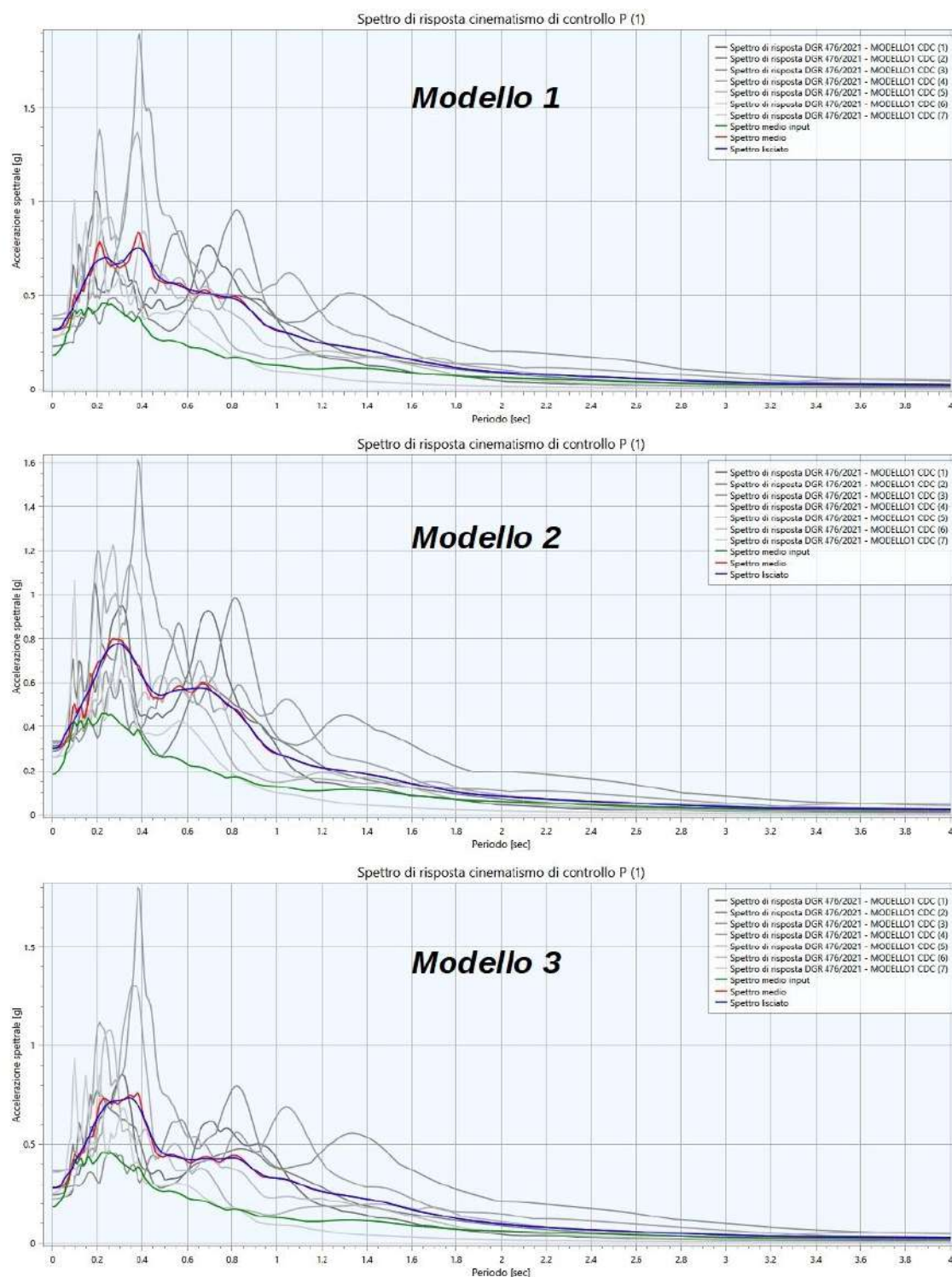


Figura 7.22- Spettri di risposta in accelerazione (smorzamento 5%) derivati dalle analisi numeriche della RSL. La traccia in rosso rappresenta lo spettro di risposta medio della RSL. La traccia in blu rappresenta lo spettro medio liscio



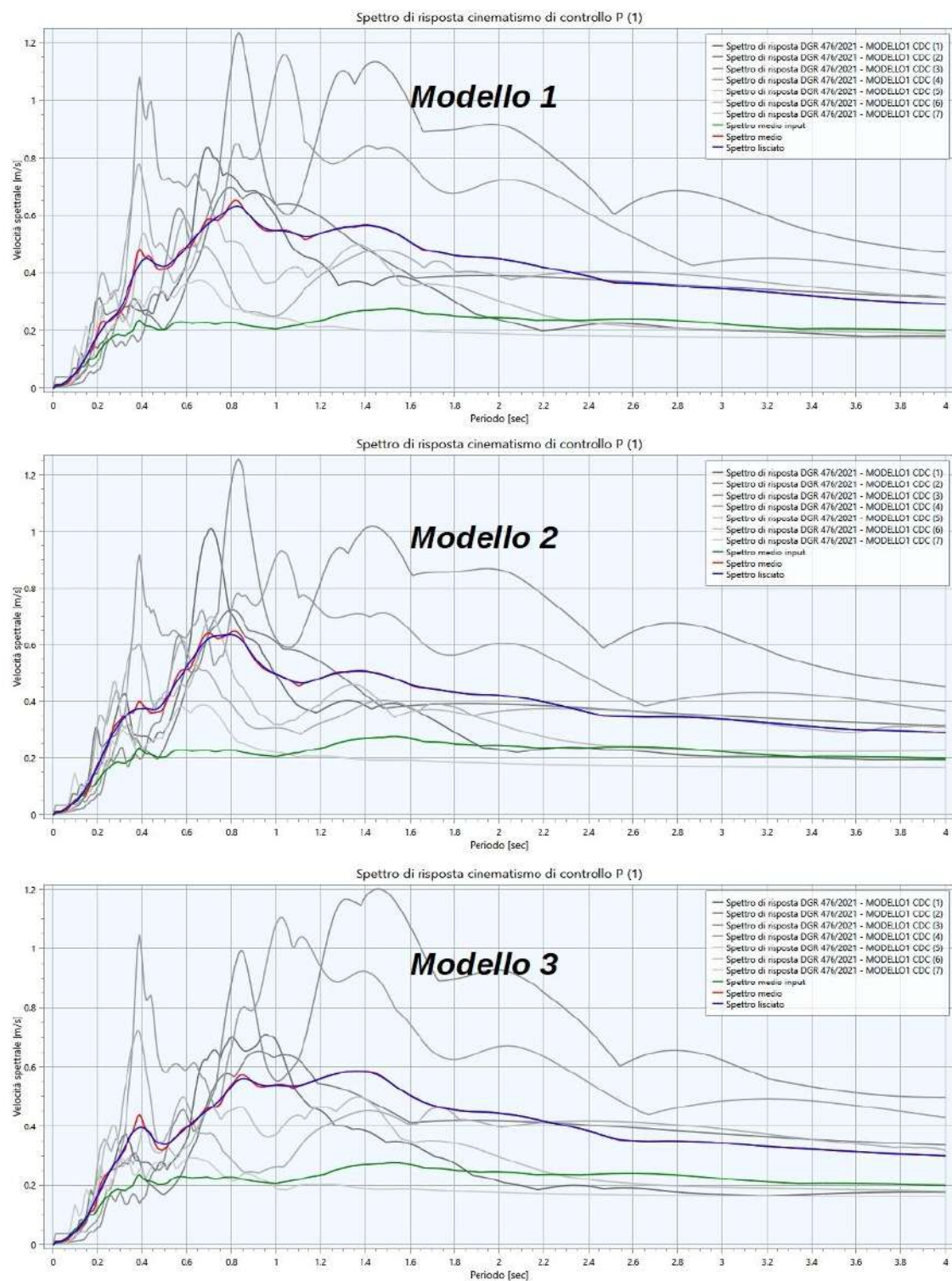


Figura 7.23- Spettri di risposta in velocità (smorzamento 5%) derivati dalle analisi numeriche della RSL. La traccia in rosso rappresenta lo spettro di risposta medio della RSL. La traccia in blu rappresenta lo spettro medio liscio

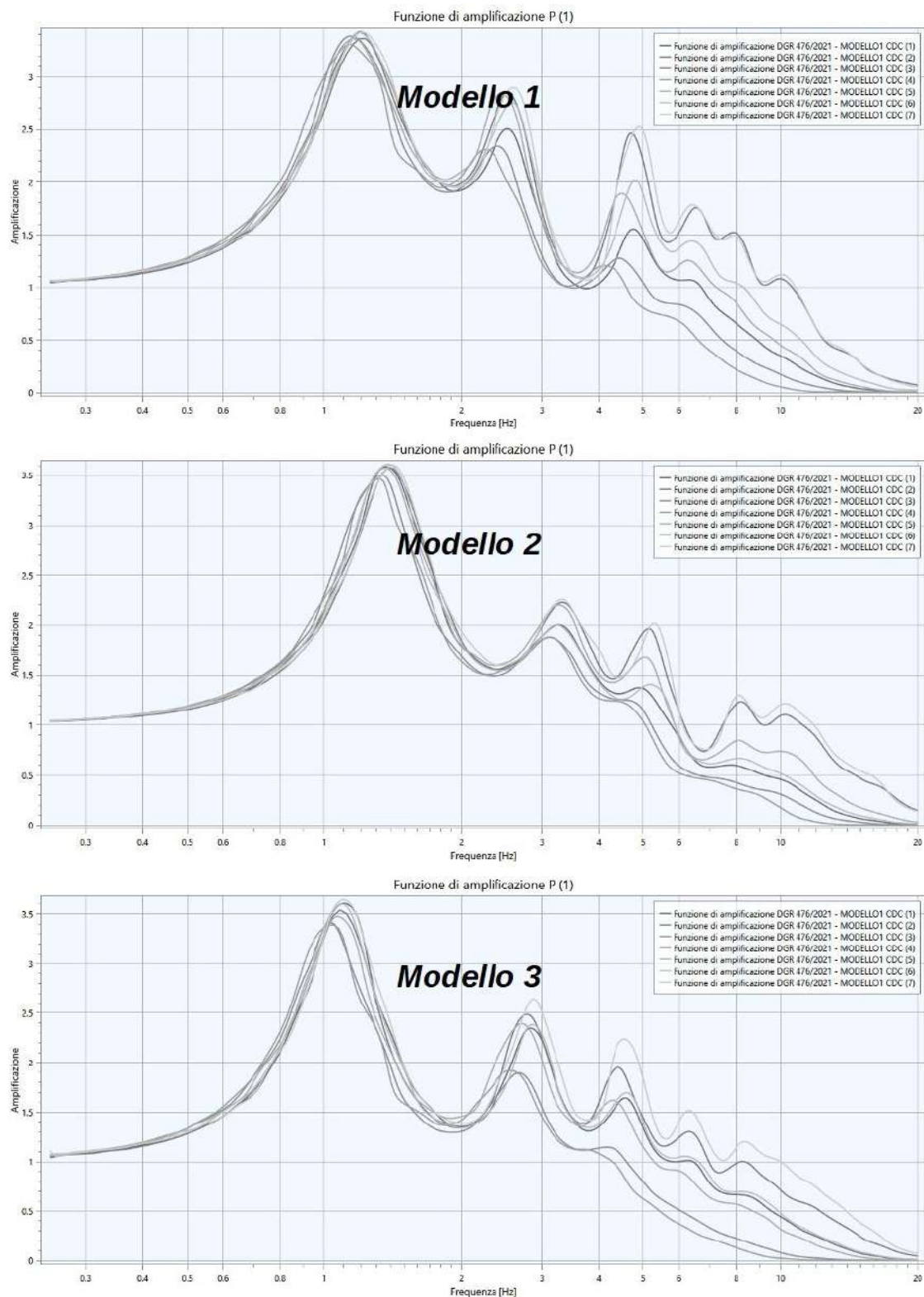


Figura 7.24 – Confronto tra le funzioni di amplificazione ottenute dalle analisi numeriche di RSL

Le funzioni di trasferimento evidenziano, pertanto, picchi spettrali di amplificazione piuttosto elevati per frequenze basse, con possibilità di “doppia risonanza” per edifici di circa 8÷10 piani.

Nella seguente tabella 7.5 vengono riassunti i fattori di amplificazione (FA) ottenuti dalle modellazioni numeriche. I FA sono quelli richiesti dagli Indirizzi regionali (DGR 476/2021), già descritti nel precedente paragrafo 7.4.3.

<b>MOPS</b>	<b>MODELLI RSL NUMERICI RAPPRESENTATIVI</b>	<b>PGA</b>	<b>FA PGA</b>	<b>SA1</b>	<b>SA2</b>	<b>SA3</b>	<b>SA4</b>	<b>SI1</b>	<b>SI2</b>	<b>SI3</b>
ZA_LQ4	MODELLO 1	0,31g	1,7	1,7	2,4	2,6	2,4	1,7	2,5	2,4
ZA_LQ3	MODELLO 2	0,30g	1,6	1,7	2,4	2,6	2,4	1,7	2,6	2,3
ZA_LQ2	MODELLO 3	0,28g	1,5	1,6	1,9	2,5	2,2	1,6	2,1	2,2

Tabella 7.5

Per l'Arenile II confronto dei FA dei risultati evidenzia relativo incremento delle amplificazioni verso Ovest per la presenza di riflettori sismici più superficiali (livelli ghiaiosi e/o tetto del substrato marino).

La tabella 7.6 riporta per ogni singolo modello di RSL i valori di "Hazard" ( $H_{SM}$  e  $H_{VARI}$ ) così calcolati. Per una migliore comprensione, nella tabella viene anche riportato il nome attribuito il nome del file relativo allo spettro medio in accelerazione di output.

MODELLO RSL	SPETTRO SA RIFERIMENTO	SUM AREA SA <sub>0105</sub> (g*s)	SUM AREA SA <sub>0408</sub> (g*s)	SUM AREA SA <sub>0711</sub> (g*s)	SUM AREA SA <sub>0515</sub> (g*s)	$H_{0105}$ (g)	$H_{0408}$ (g)	$H_{0711}$ (g)	$H_{0515}$ (g)
MODELLO1	CattolicaSAO01_m	0.266	0.222	0.159	0.358	0.66	0.55	0.40	0.36
MODELLO2	CattolicaSAO02_m	0.257	0.223	0.153	0.348	0.64	0.56	0.38	0.35
MODELLO3	CattolicaSAO03_m	0.247	0.180	0.149	0.332	0.62	0.45	0.37	0.33

Tabella 7.6 - Sintesi del calcolo dei valori di  $H_{SM}$  e  $H_{VARI}$  (Naso et al., 2019) ricavati dagli spettri Sa medi di output ottenuti dalla modellazione numerica della RSL

Le elaborazioni evidenziano valori relativamente "alti" e "molto alti" (cfr. Naso et al., 2019) per tutto l'Arenile, come facilmente prevedibile dal contesto sismostratigrafico dell'area studiata e dalla pericolosità sismica di base.

Per quanto riguarda le verifiche della suscettibilità alla liquefazione e dei cedimenti post sisma, una sintesi dei risultati è riportata nella tabella 7.7, strutturata per consentire di rappresentare con più facile lettura il confronto degli esiti ottenuti dai tre differenti approcci di verifica considerati per questo studio (NCEER 2001; P.K. Robertson 2009; Boulanger & driss 2014).

Le verifiche evidenziano per tutto l'Arenile esiti di LPI che rientrano nella classe di pericolosità "alta" ( $5 < LPI \leq 15$ ) così come definito da Sonmez (2003). Gli esiti cumulativi dei cedimenti risultano compresi tra 3,7 cm e 7,8 cm. A fronte di questi esiti, i risultati dell'indice LSN risultano invece meno gravosi ( $LSN < 20$ ).

Gli esiti di LPI e LSN vengono rappresentati anche nelle cartografie di microzonazione di livello 3 prodotte per questo studio. In calce alla Relazione vengono inoltre allegati i report delle verifiche quantitative.

PROVA (SIGLA)	H FALDA (m)	ag (g)	Fa PGA	agmax (g)	Prof (m)	Limite FSL	Stima LPI/IL			Stima LSN			Stima cedimenti		
							NCEER 2001	ROBERTSON 2009	B&I 2014	NCEER 2001	ROBERTSON 2009	B&I 2014	NCEER 2001	ROBERTSON 2009	B&I 2014
099002P1CPT1	2.40	0.183	1.7	0.31	20	1.2	10.7	12.6	9.7	12.2	12.4	11.8	6.2	6.4	5.6
099002P2CPT2	2.30	0.183	1.5	0.28	20	1.2	5.7	5.5	1.4	5.9	5.9	1.6	3.7	3.7	1.1
099002P3CPT3	3.30	0.183	1.7	0.31	20	1.2	13.4	13.1	7.4	13.1	13.1	7.5	7.8	7.7	4.8
099002P4CPT4	2.80	0.183	1.9	0.35	20	1.2	0.4	0.7	0.4	0	0	0	0.1	0.2	0.1
099002P5CPT5	2.50	0.183	1.6	0.30	20	1.2	7.6	8.6	4.3	6.5	6.6	4.2	4.4	4.6	2.9
099002P210CPTU210	1.70	0.183	1.6	0.30	20	1.2	9.4	8.9	5.6	12.6	12.5	8.6	5.8	5.7	3.8

*Tabella 7.7 - Confronto tra i risultati delle verifiche LPI, LSN e cedimenti post sisma (in cm). Per ogni punto di controllo vengono evidenziati in giallo gli esiti più severi*



## 8 ELABORATI IN APPENDICE ALLA RELAZIONE E ULTERIORI ALLEGATI

### 8.1.1 *Tavole a corredo della MS dell'Arenile (appendice)*

In calce alla presente Relazione vengono inserite le seguenti tavole a supporto dell'aggiornamento della microzonazione sismica dell'Arenile di Cattolica. Le tavole, restituite alla scala 1:5.000, risultano conformi ai contenuti richiesti dalla DGR 476/2021. Sono state pertanto prodotte le seguenti cartografie:

- Carta delle indagini
- Carta Geologica Tecnica
- Carta delle frequenze
- Carta delle Microzone Omogenee in prospettiva sismica  
(La cartografia MOPS, rappresenta la suddivisione del territorio studiato in "Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali" e in "Zone di attenzione per instabilità" per liquefazioni. Questa cartografia costituisce l'elaborato fondamentale dello studio sismico di livello 1).
- Carta delle velocità delle onde di taglio S
- Carta di microzonazione sismica di livello 3 (FA Pga)
- Carta di microzonazione sismica di livello 3 (FA SA<sub>0,1-0,5s</sub>)
- Carta di microzonazione sismica di livello 3 (FA SA<sub>0,4-0,8s</sub>)
- Carta di microzonazione sismica di livello 3 (FA SA<sub>0,7-1,1s</sub>)
- Carta di microzonazione sismica di livello 3 (FA SA<sub>0,5-1,5s</sub>)
- Carta di microzonazione sismica di livello 3 (FA SI<sub>0,1-0,5s</sub>)
- Carta di microzonazione sismica di livello 3 (FA SI<sub>0,5-1,0s</sub>)
- Carta di microzonazione sismica di livello 3 (FA SI<sub>0,5-1,5s</sub>)
- Carta della distribuzione dei valori di H (H<sub>SM</sub>)
- Carta della distribuzione dei valori di H (H<sub>0,4-0,8s</sub>)
- Carta della distribuzione dei valori di H (H<sub>0,7-1,1s</sub>)
- Carta della distribuzione dei valori di H (H<sub>0,5-1,5s</sub>)

### 8.1.2 *Report verifiche della liquefazione e cedimenti post sisma (appendice)*

Vengono infine riportate i Report delle verifiche quantitative della liquefacibilità e dei cedimenti post sisma.

### 8.1.3 *Archivio delle indagini (allegato)*

Viene infine prodotto un allegato comprendente i Report in formato \*.Pdf delle indagini di riferimento. Le sigle si riferiscono all'archiviazione già prodotta per lo studio di MS (OPCM 4007/2012).

## **APPENDICE:**

Tavole a corredo della MS dell'Arenile (DGR 476/2021)  
Report verifiche della liquefazione e cedimenti post sisma





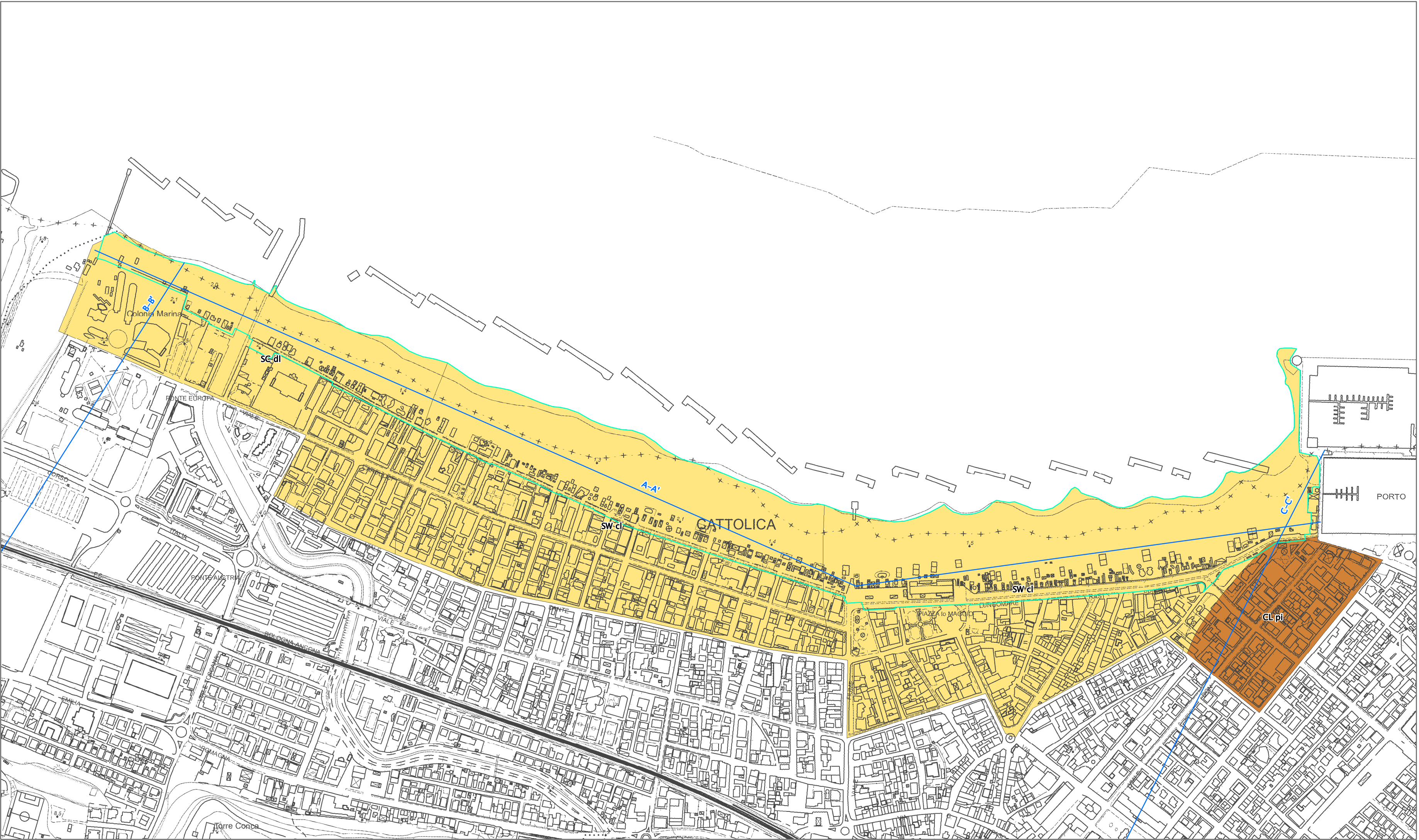


# Legenda

## Terreni di copertura

SW	Sabbie pulite e ben assortite, sabbie ghiaiose – cordone litoraneo (cl)
SC	Sabbie argillose, miscela di sabbia e argilla – piana deltizia (dl)
CL	Argille e argille limose più o meno consistenti – piana inondabile (pi)
Traccia di sezione geologica	
Limite piano dell'Arenile	
0 62.5 125 250 Metri	

Carta geologica-tecnica









# Legenda

## Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali


**Zona 1**      Zona 1 – Coperture di conoide alluvionale argilloso–limose e argille ghiaiose o sabbiose. Substrato sismico a profondità >55÷60 m.

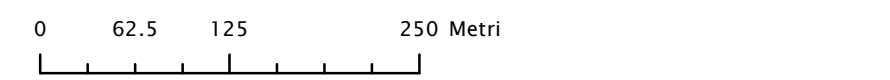
## Zone di attenzione per instabilità

**ZA\_LQ 2**      ZA\_LQ 2 – Depositi di sabbiosi di cordone marino fino a 4÷6 m poi ancora depositi prevalentemente litorali fino a 8÷10 m, costituiti da sabbie medie/fini più rimaneggiate con intercalati intervalli limoso–argillosi di facies alluvionale/deltizia. Seguono depositi alluvionali prevalentemente argilloso limosi con intervalli sabbioso–ghiaiosi. Substrato sismico a profondità >50÷55 m.

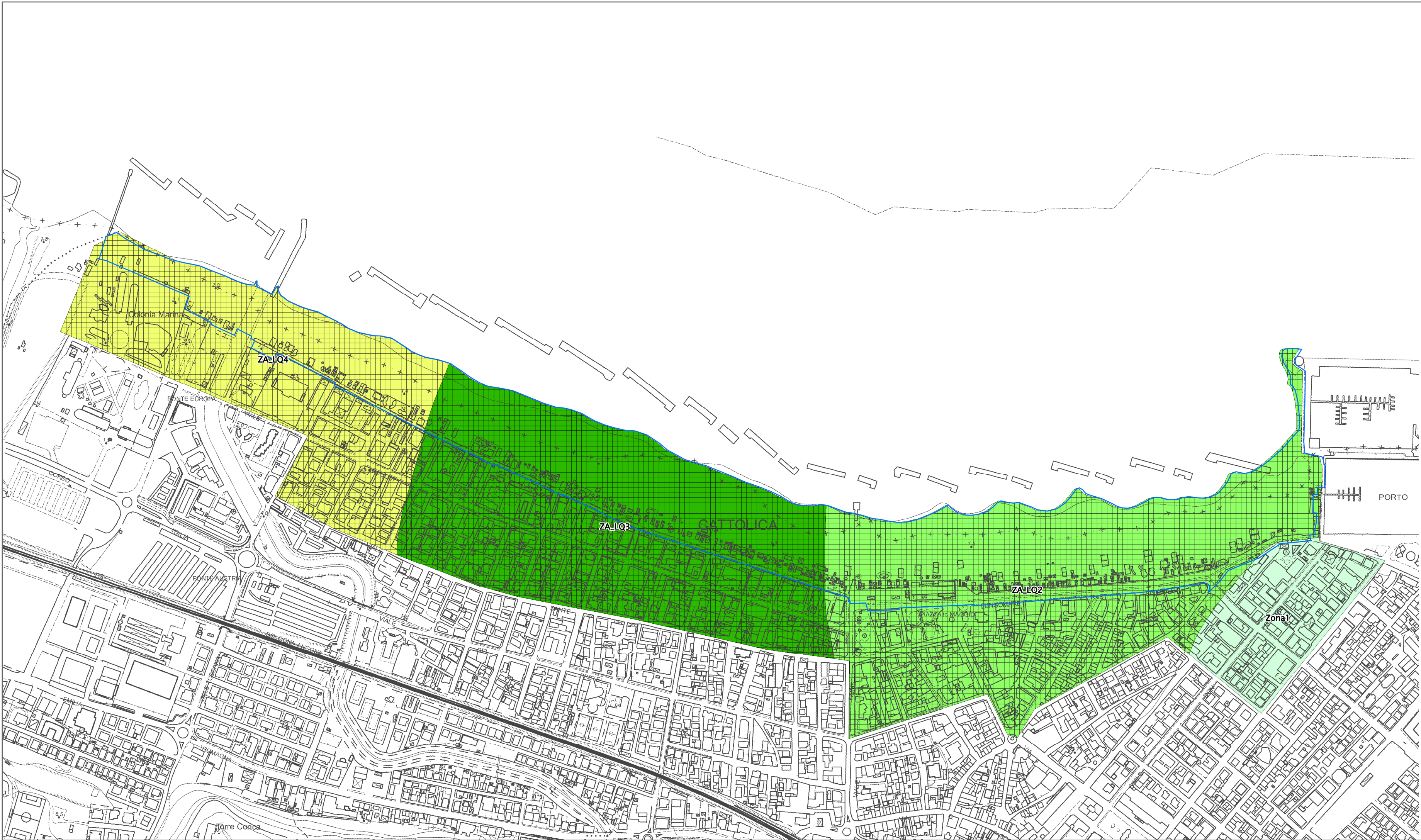
**ZA\_LQ 3**      ZA\_LQ 3 – Depositi sabbiosi superficiali di spiaggia fino a 4÷6 m poi ancora depositi prevalentemente litorali fino a 8÷10 m, costituiti da sabbie medie/fini più rimaneggiate con intercalati intervalli limoso–argillosi di facies alluvionale/deltizia. Seguono depositi alluvionali prevalentemente argilloso limosi con intervalli sabbioso–ghiaiosi ben addensati a ~25÷30 m. Substrato sismico a profondità >40÷45 m.

**ZA\_LQ 4**      ZA\_LQ 4 – Depositi prevalentemente deltizi fino a 8÷10 m, costituiti da argille e limi di scarsa consistenza con intercalati depositi litorali sabbiosi rimaneggiati. Seguono depositi alluvionali prevalentemente argilloso limosi con intervalli sabbioso–ghiaiosi ben addensati a ~25÷30 m. Substrato sismico a profondità >55÷60 m.

 Limite piano dell'Arenile







# Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica





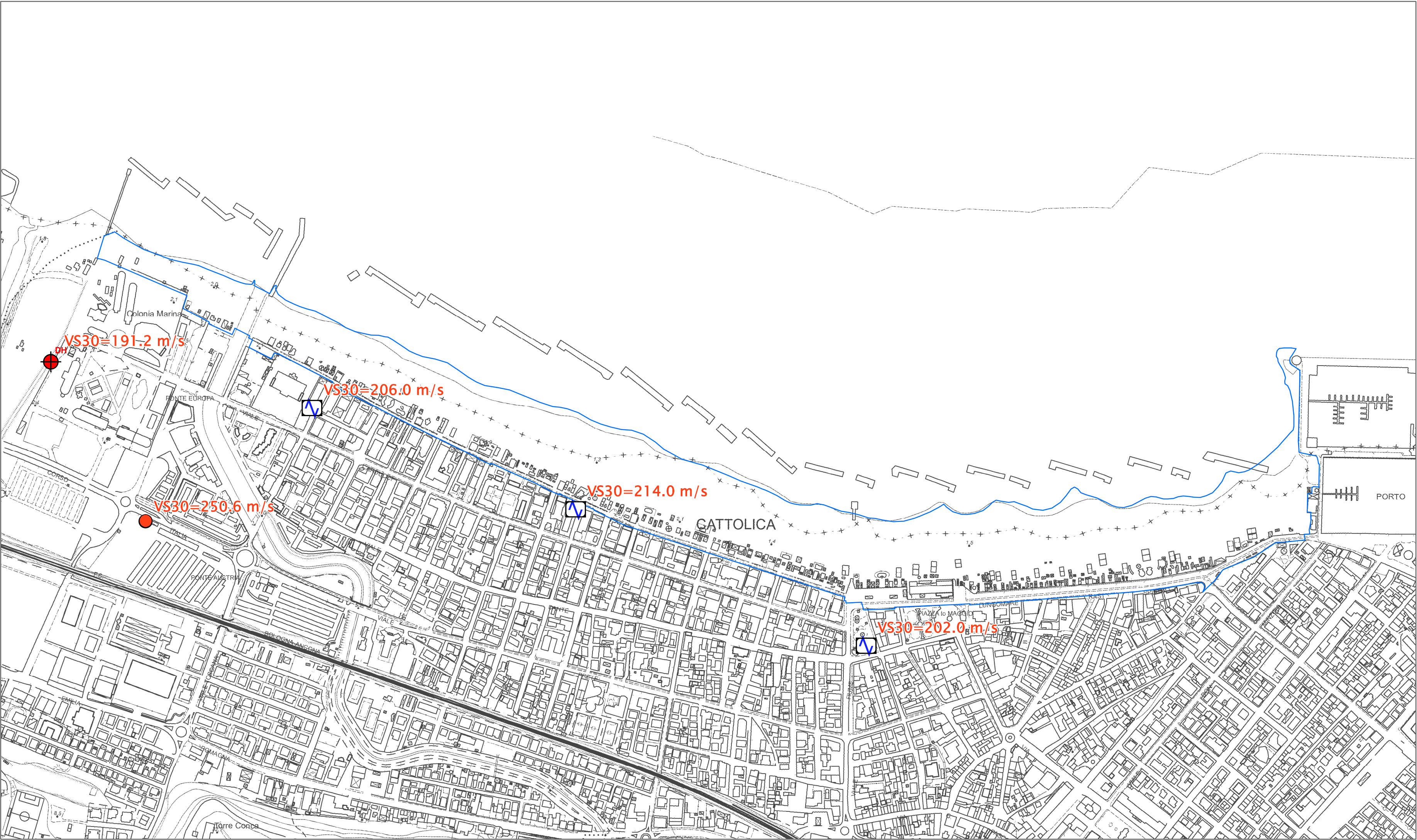
# Legenda

-  Prova sismica in foro tipo Down-Hole
-  Stazione microtremore a stazione singola HVSR
-  MASW/Prova REfractionMicrotremors

 Limite piano dell'Arenile

0 62.5 125 250 Metri

## Carta delle velocità delle onde di taglio S





# Legenda

## Zone suscettibili di instabilità per liquefazioni

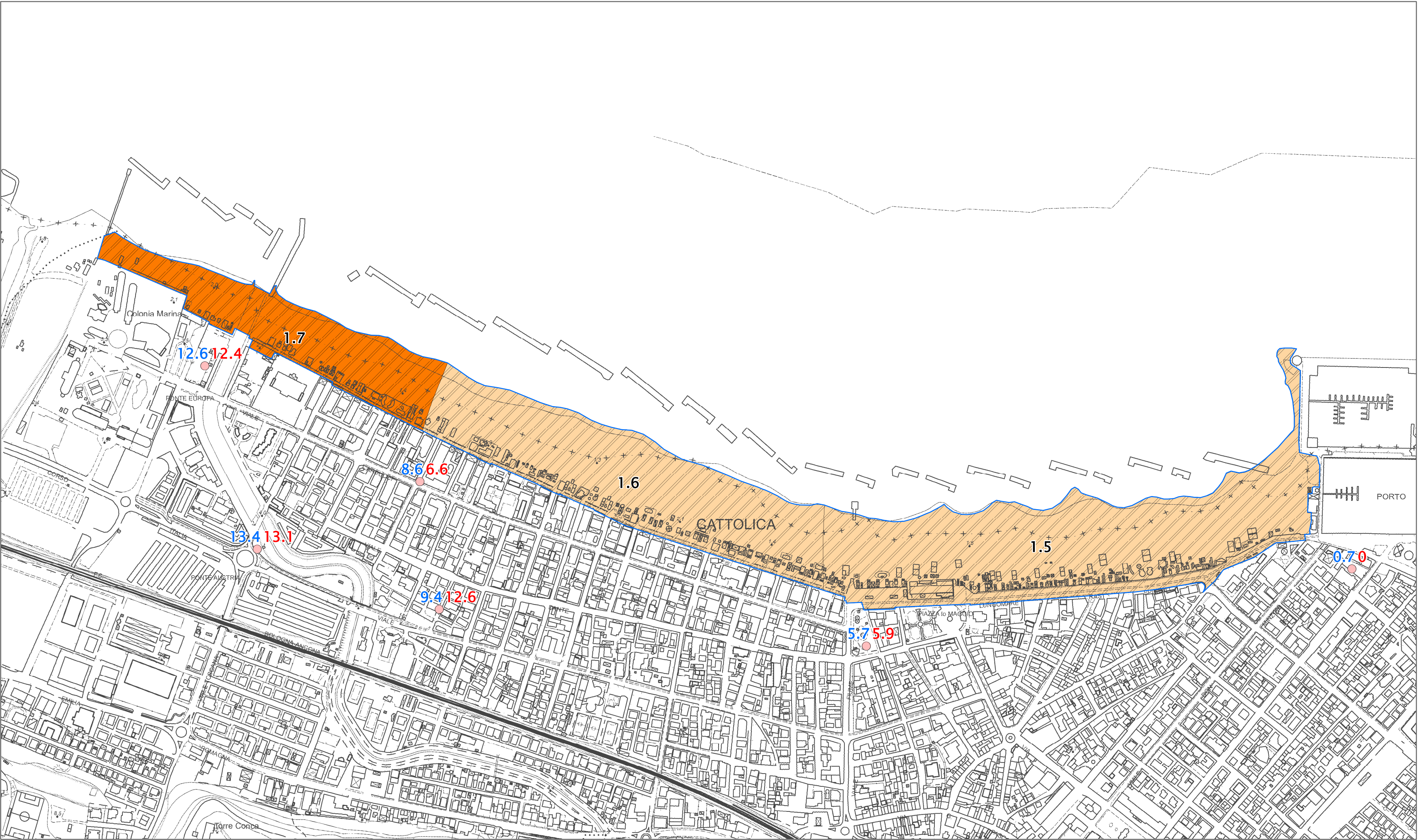
- ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) – Fa (PGA) = 1.5 – 1.6
- ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) – Fa (PGA) = 1.7 – 1.8

1.5  
 1.5    Indice LPI (in blu) e LSN (in rosso)

   Limite piano dell'Arenile



## Carta di microzonazione sismica di livello 3





# Legenda

## Zone suscettibili di instabilità per liquefazioni

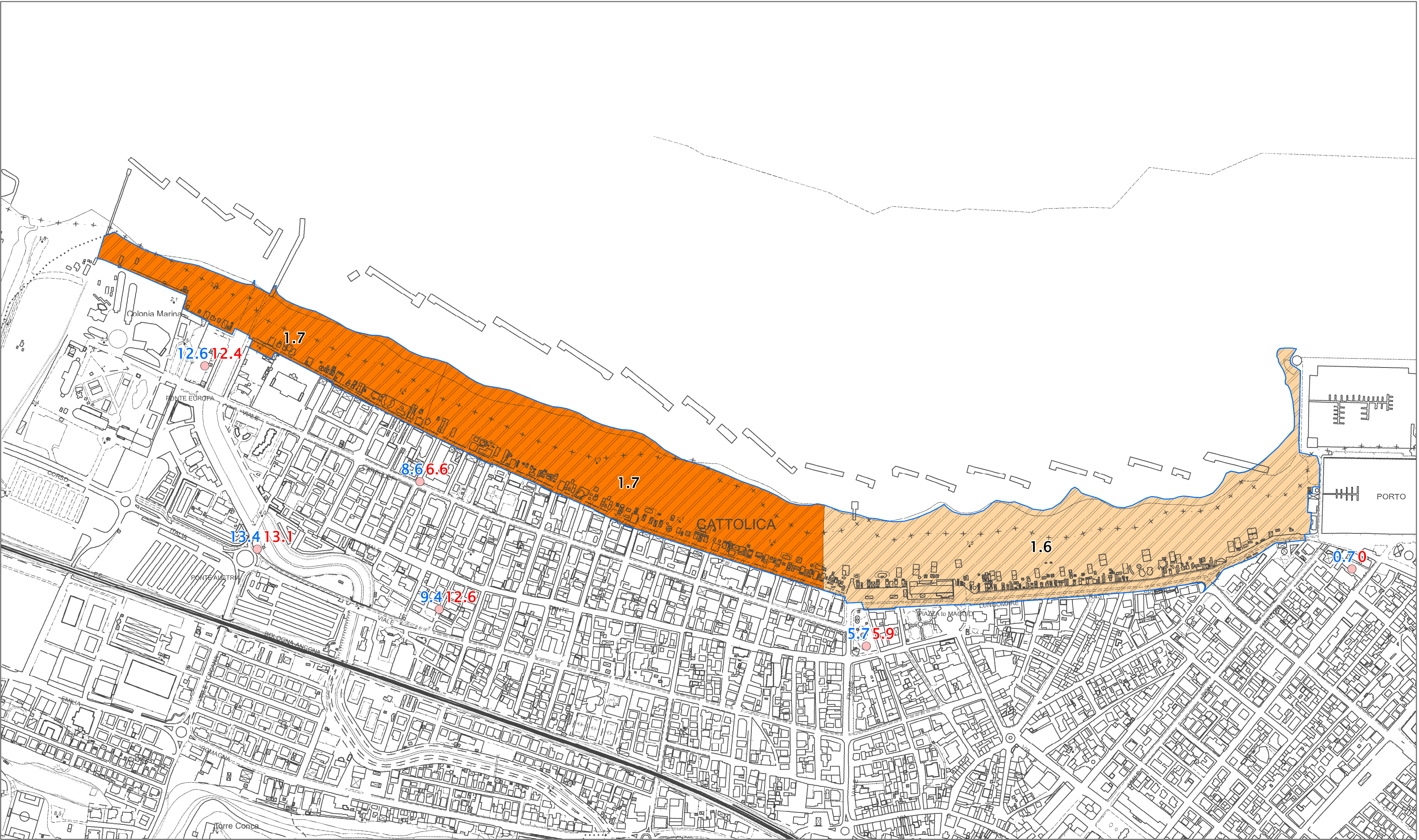
- ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) – Fa ( $SA\ 0.1s < T0 < 0.5s$ ) = 1.5 – 1.6
- ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) – Fa ( $SA\ 0.1s < T0 < 0.5s$ ) = 1.7 – 1.8

- 1.5
- 1.5
- Indice LPI (in blu) e LSN (in rosso)

- Limite piano dell'Arenile



# Carta di microzonazione sismica di livello 3





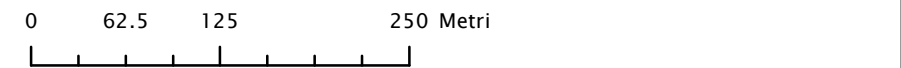
# Legenda

## Zone suscettibili di instabilità per liquefazioni

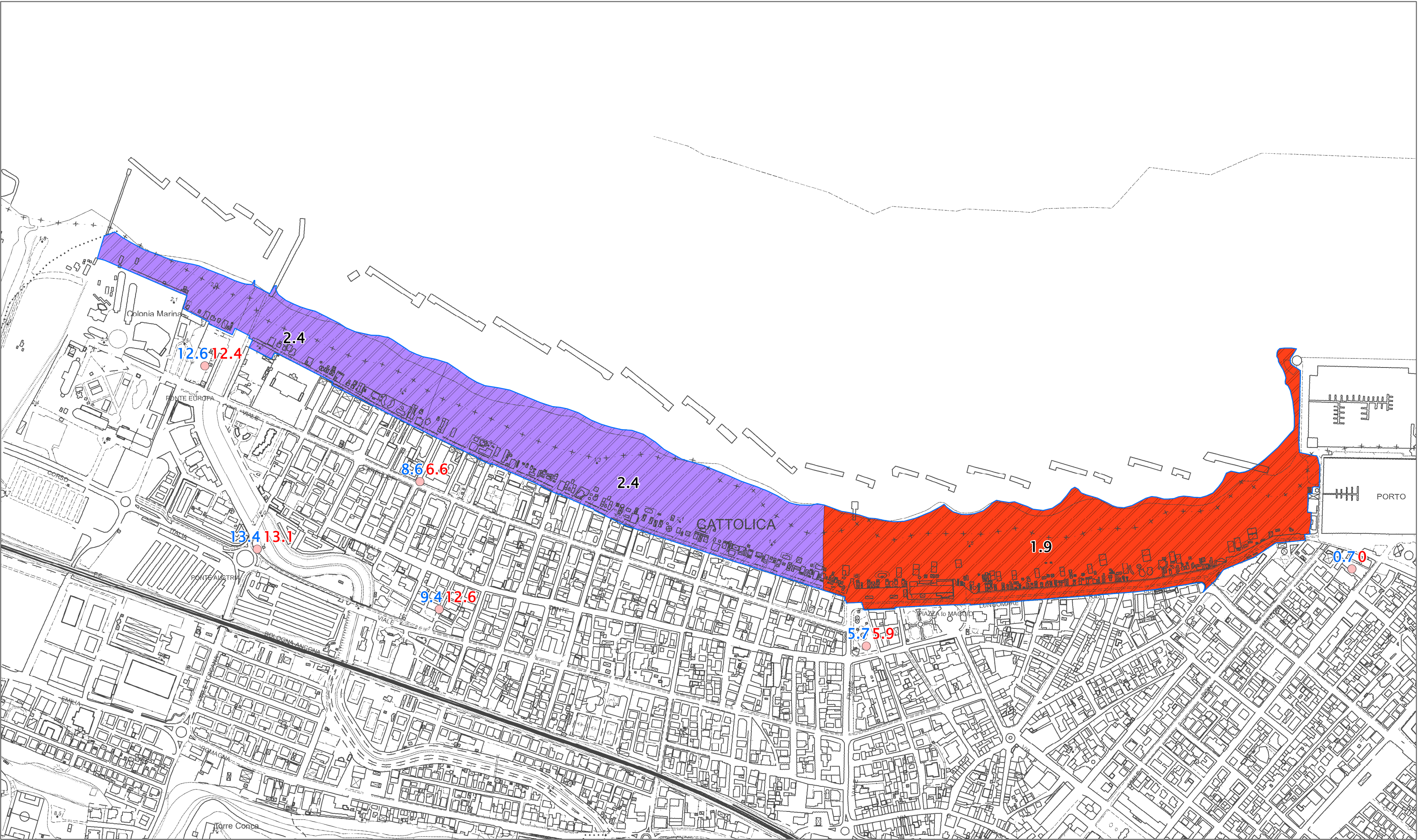
- ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) – Fa ( $SA\ 0.4s < T0 < 0.8s$ ) = 1.9 – 2.0
- ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) – Fa ( $SA\ 0.4s < T0 < 0.8s$ ) = 2.3 – 2.4

- 1.5
- 1.5
- Indice LPI (in blu) e LSN (in rosso)

- Limite piano dell'Arenile



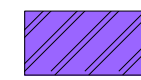
# Carta di microzonazione sismica di livello 3








# Legenda

## Zone suscettibili di instabilità per liquefazioni

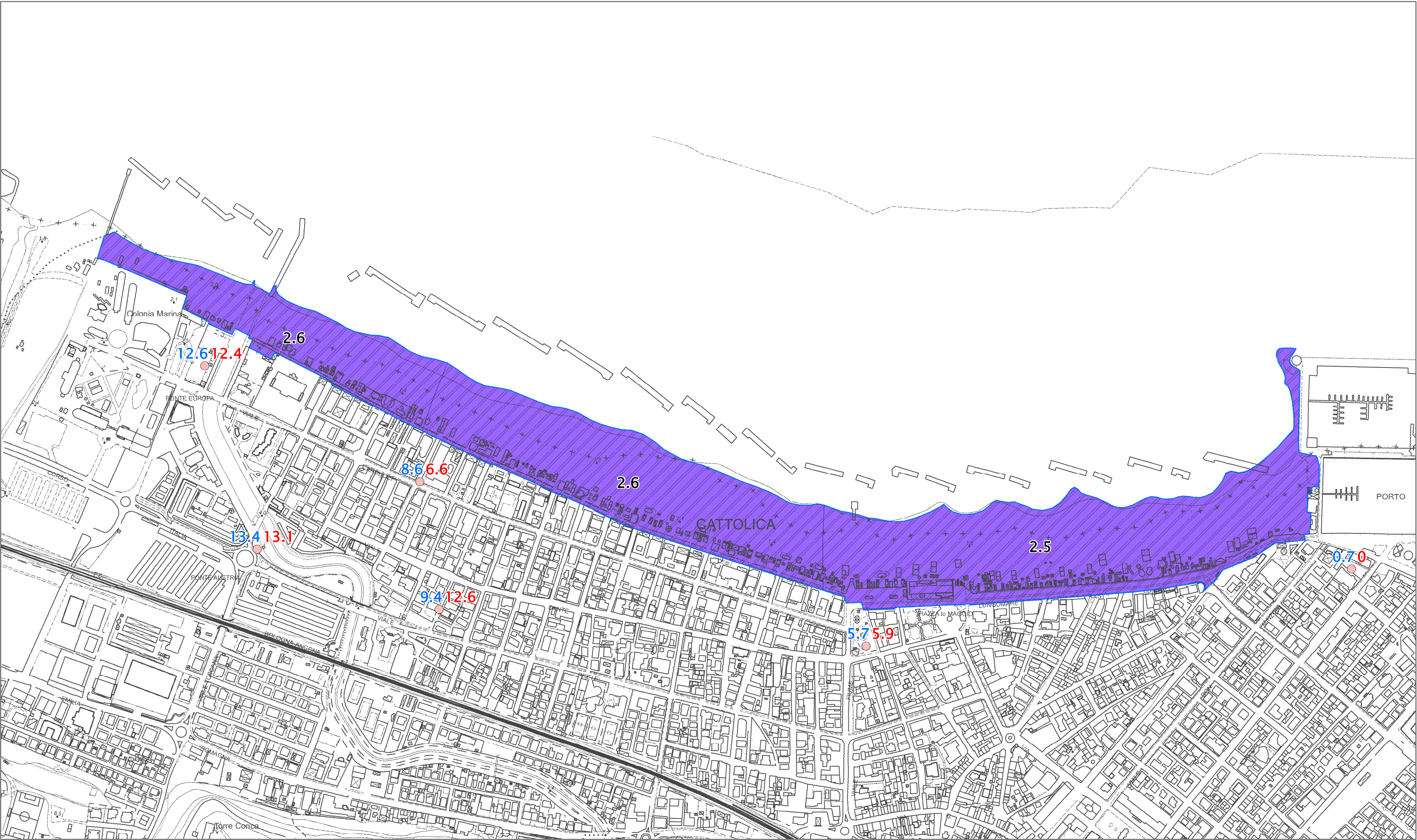
 ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) – Fa ( $SA_{0.7s} < T0 < 1.1s$ ) = 2.5 – 3.0

 1.5 Indice LPI (in blu) e LSN (in rosso)  
 1.5

 Limite piano dell'Arenile

0 62.5 125 250 Metri

## Carta di microzonazione sismica di livello 3





# Legenda

## Zone suscettibili di instabilità per liquefazioni

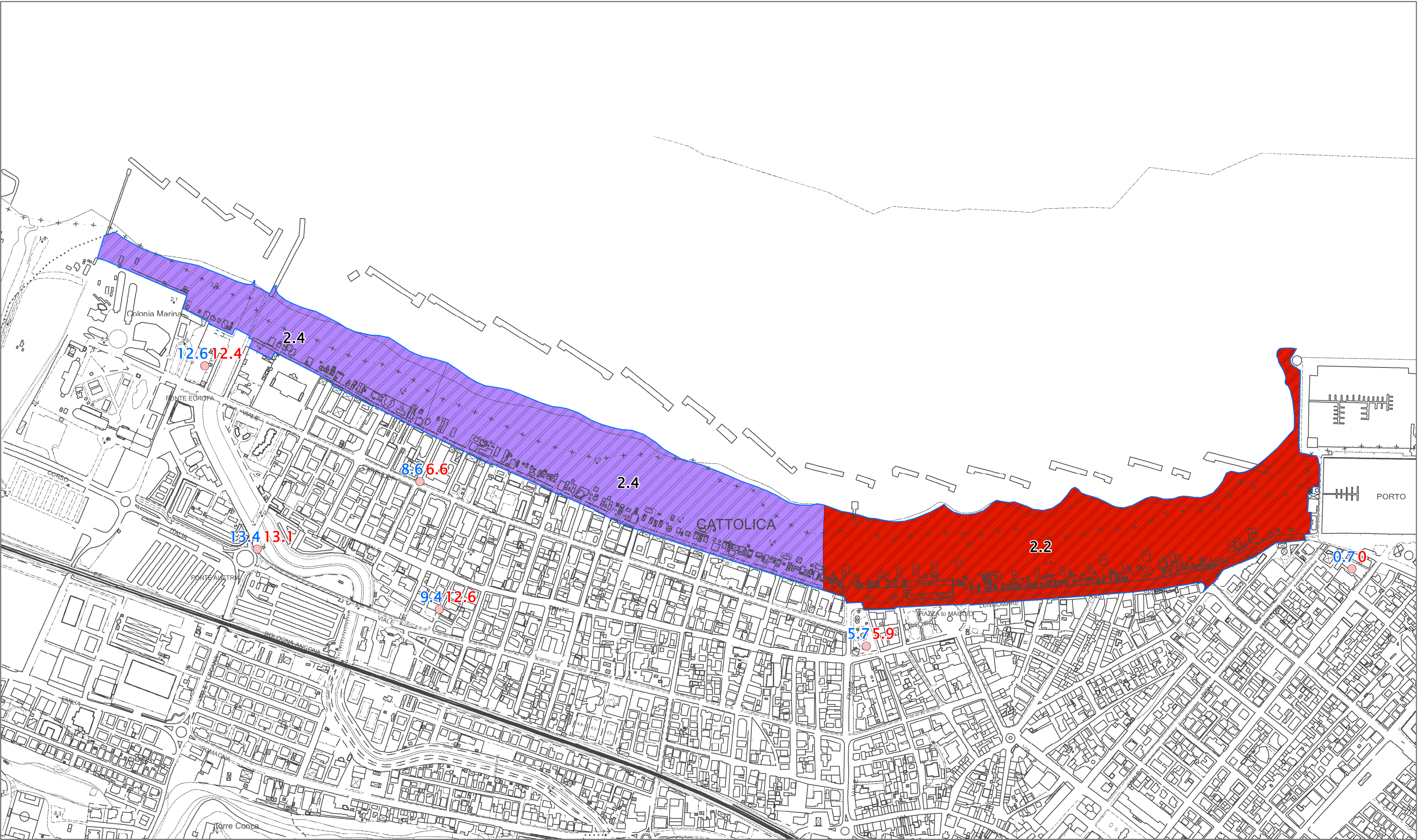
- ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) – Fa ( $SA\ 0.5s < T0 < 1.5s$ ) = 2.1 – 2.2
- ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) – Fa ( $SA\ 0.5s < T0 < 1.5s$ ) = 2.3 – 2.4

- 1.5
- 1.5
- Indice LPI (in blu) e LSN (in rosso)

- Limite piano dell'Arenile



# Carta di microzonazione sismica di livello 3





# Legenda

## Zone suscettibili di instabilità per liquefazioni

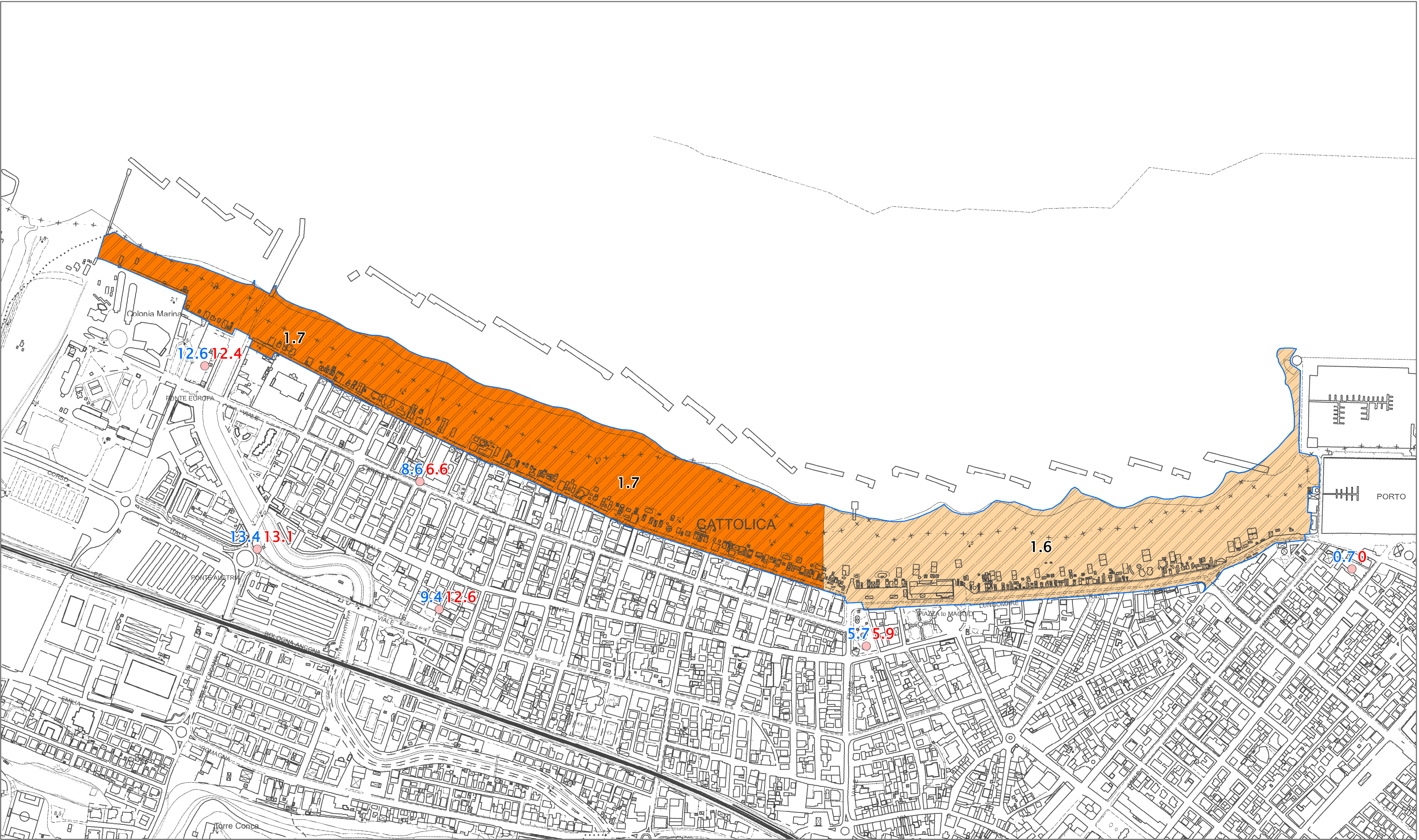
- ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) – Fa ( $SI\ 0.1s < T0 < 0.5s$ ) = 1.5 – 1.6
- ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) – Fa ( $SI\ 0.1s < T0 < 0.5s$ ) = 1.7 – 1.8

- 1.5
- 1.5
- Indice LPI (in blu) e LSN (in rosso)

- Limite piano dell'Arenile



# Carta di microzonazione sismica di livello 3





# Legenda

## Zone suscettibili di instabilità per liquefazioni

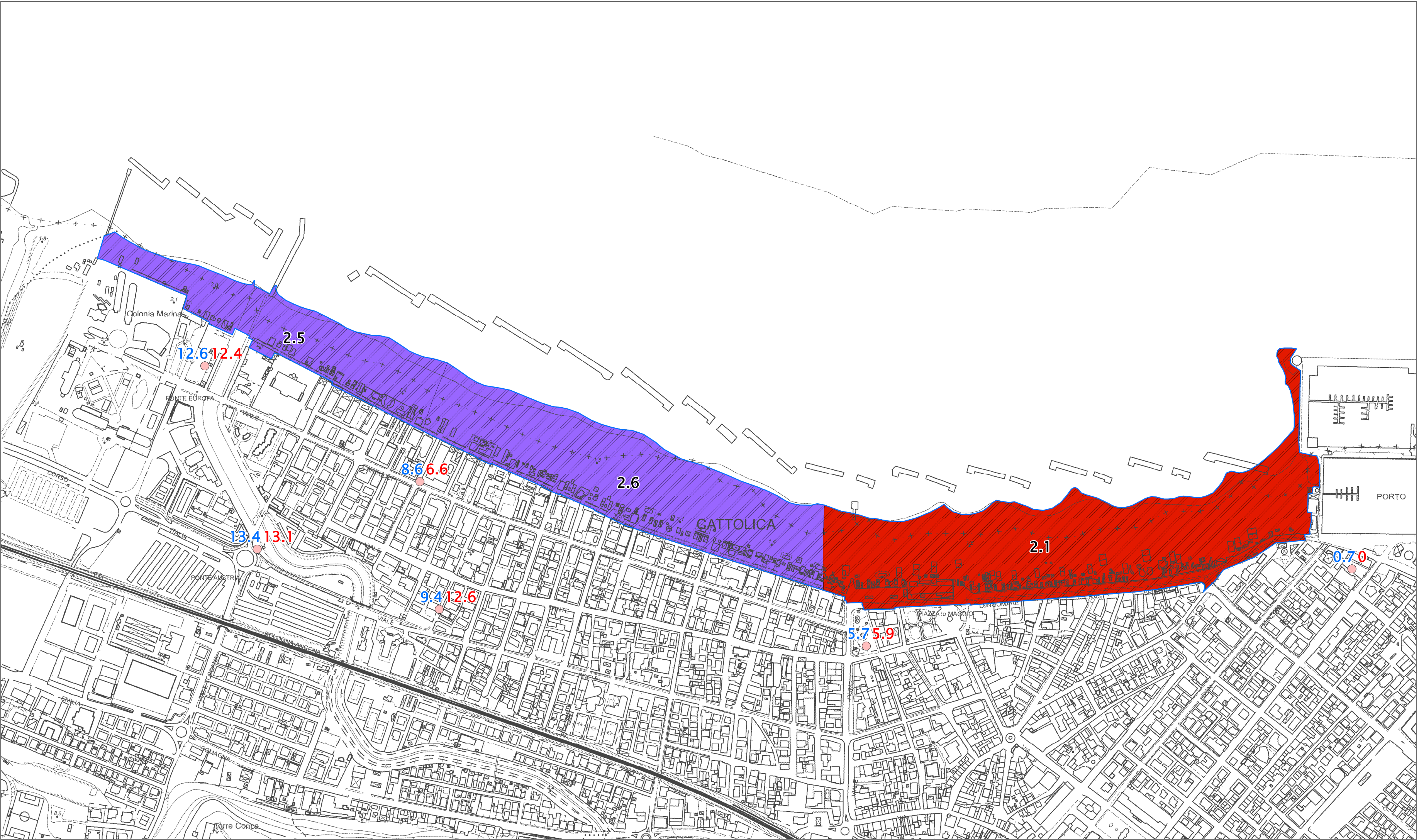
- ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) – Fa ( $SI\ 0.5s < T0 < 1.0s$ ) = 2.1 – 2.2
- ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) – Fa ( $SI\ 0.5s < T0 < 1.0s$ ) = 2.5 – 3.0

- 1.5
- 1.5
- Indice LPI (in blu) e LSN (in rosso)

- Limite piano dell'Arenile



# Carta di microzonazione sismica di livello 3





# Legenda

## Zone suscettibili di instabilità per liquefazioni

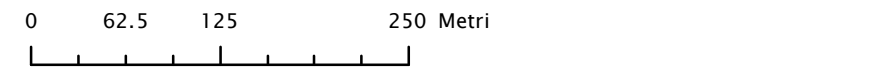
- ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) – Fa ( $SI\ 0.5s < T0 < 1.5s$ ) = 2.1 – 2.2
- ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) – Fa ( $SI\ 0.5s < T0 < 1.5s$ ) = 2.3 – 2.4

1.5

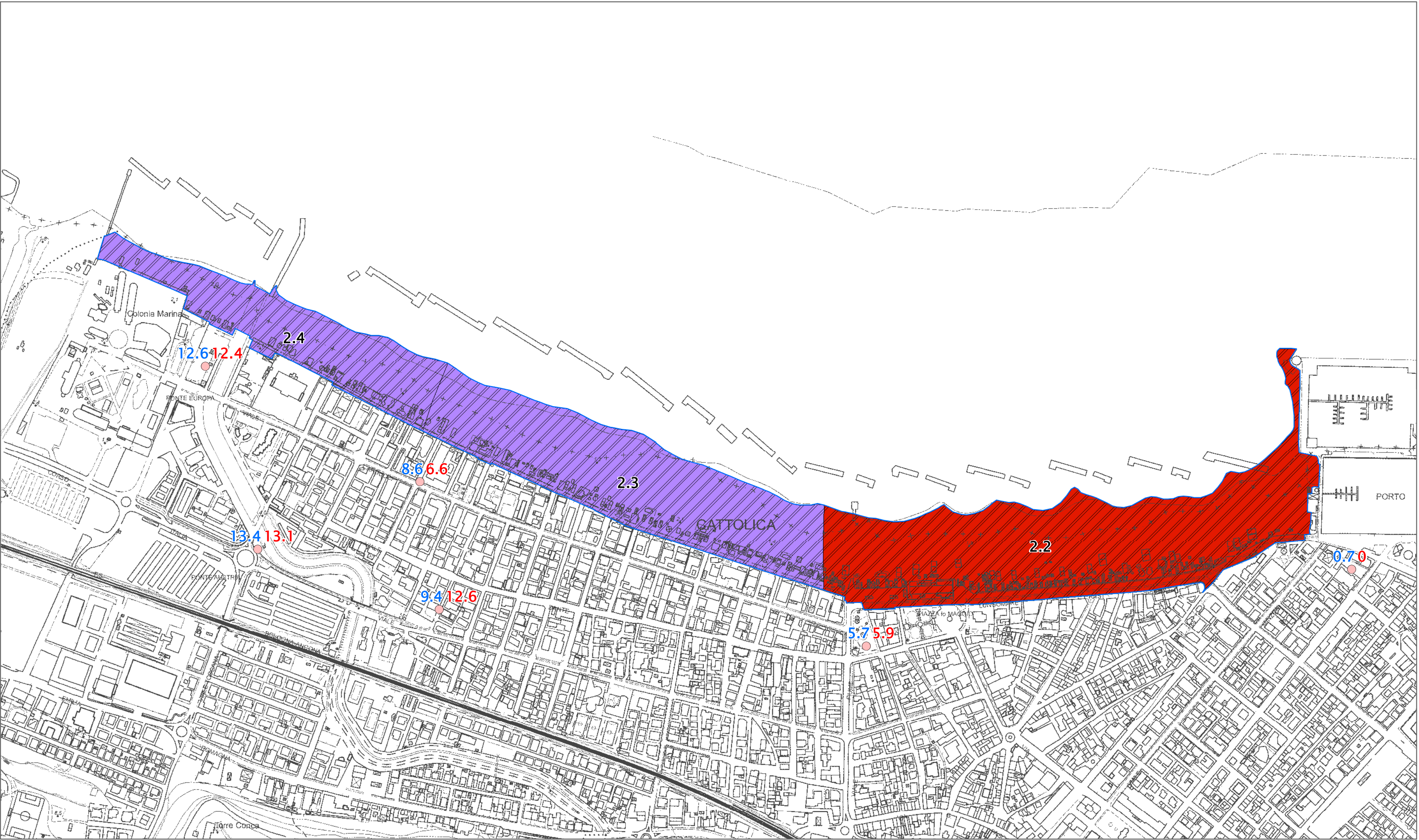
1.5

Indice LPI (in blu) e LSN (in rosso)

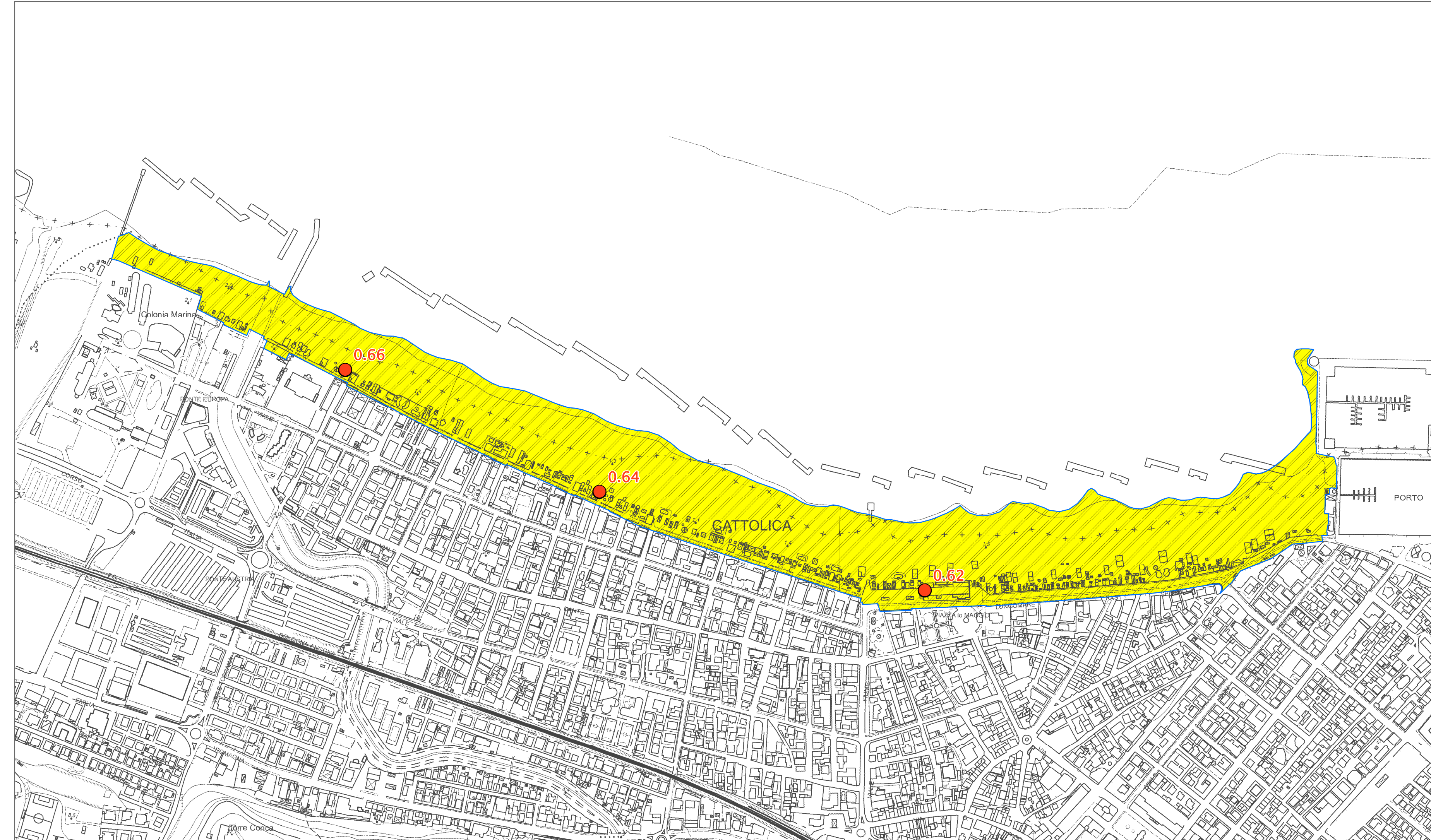
Limite piano dell'Arenile



# Carta di microzonazione sismica di livello 3



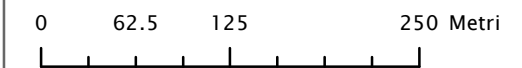
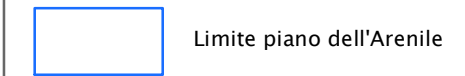
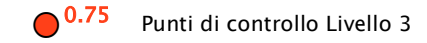
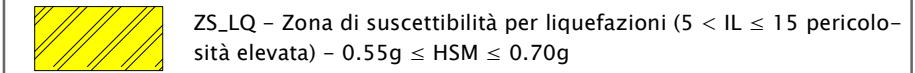




## Legenda

## Classi $H_{SM}$

### Zone suscettibili di instabilità per liquefazioni



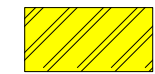

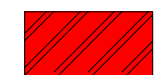
## Distribuzione dei valori H





# Legenda

Classi  $H_{0.4-0.8s}$

Zone suscettibili di instabilità per liquefazioni

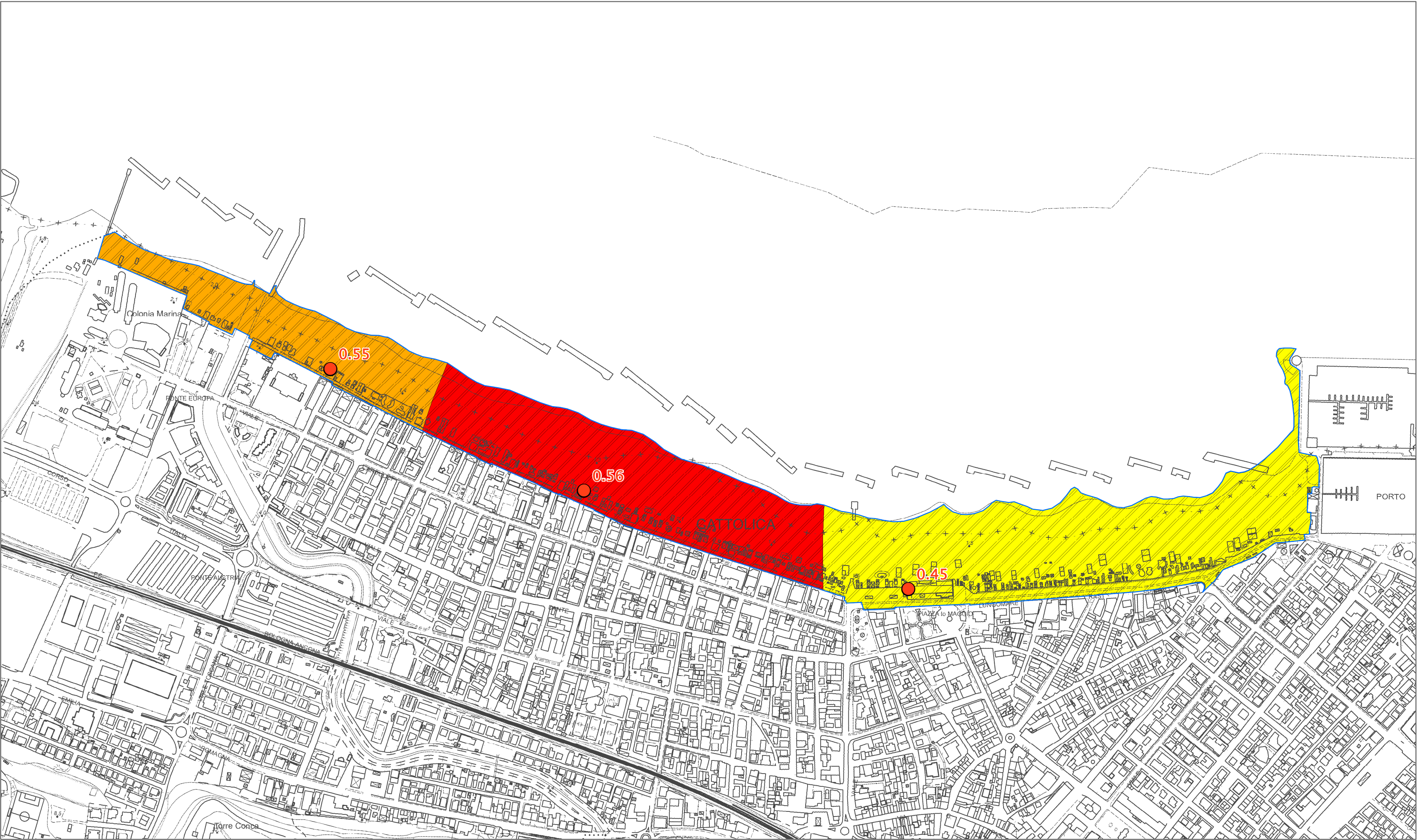
-  ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) –  $0.35g \leq H_{0408} \leq 0.45g$
-  ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) –  $0.46g \leq H_{0408} \leq 0.55g$
-  ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) –  $0.56g \leq H_{0408} \leq 0.65g$

 0.75 Punti di controllo Livello 3

 Limite piano dell'Arenile

0 62.5 125 250 Metri

Distribuzione dei  
valori H












# Legenda

Classi  $H_{0.5-1.5s}$

Zone suscettibili di instabilità per liquefazioni

 ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) –  $0.30g \leq H_{0.515} \leq 0.35g$

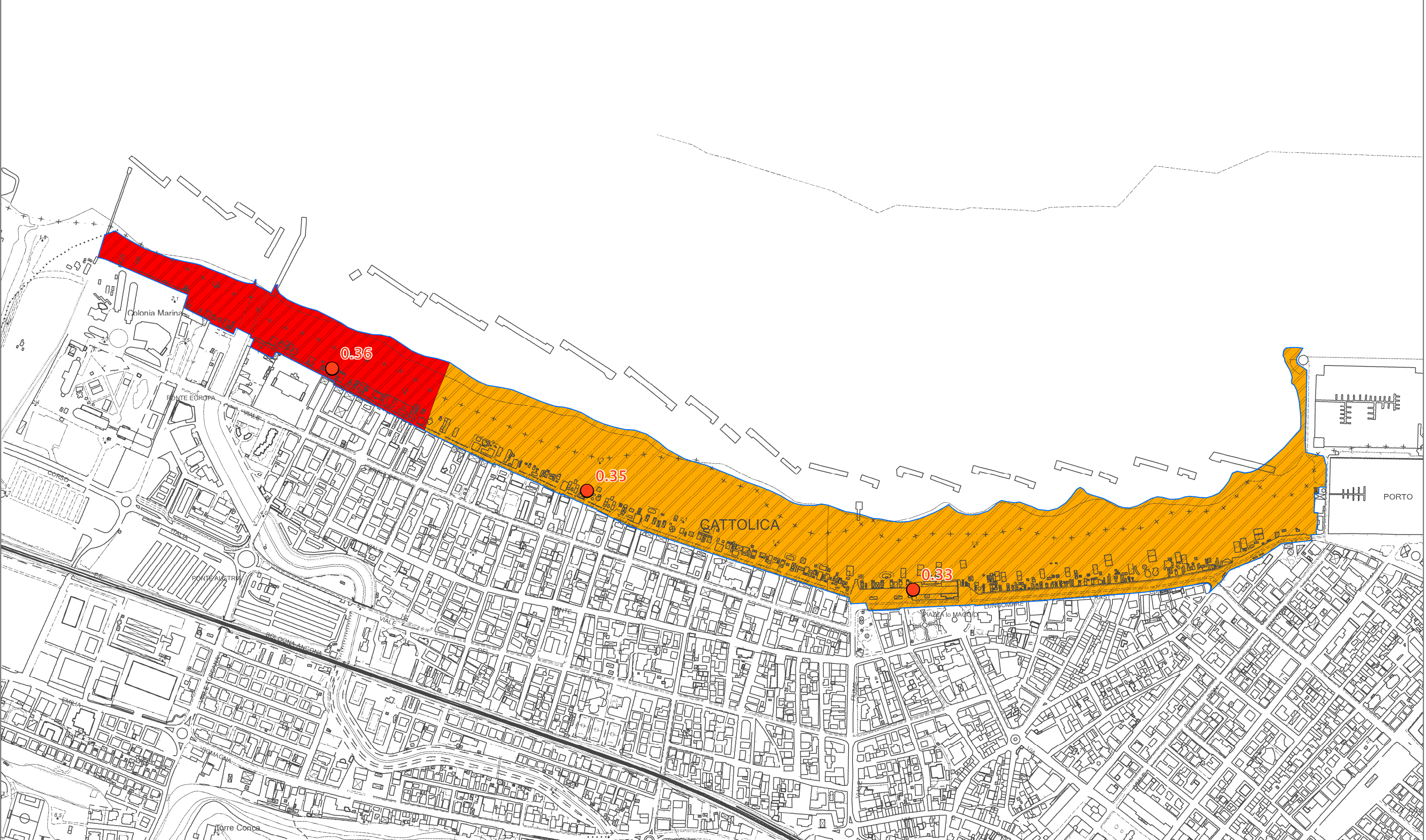
 ZS\_LQ – Zona di suscettibilità per liquefazioni ( $5 < IL \leq 15$  pericolosità elevata) –  $0.36g \leq H_{0.515} \leq 0.45g$

 **0.75** Punti di controllo Livello 3

 Limite piano dell'Arenile

0 62.5 125 250 Metri

Distribuzione dei  
valori H





## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

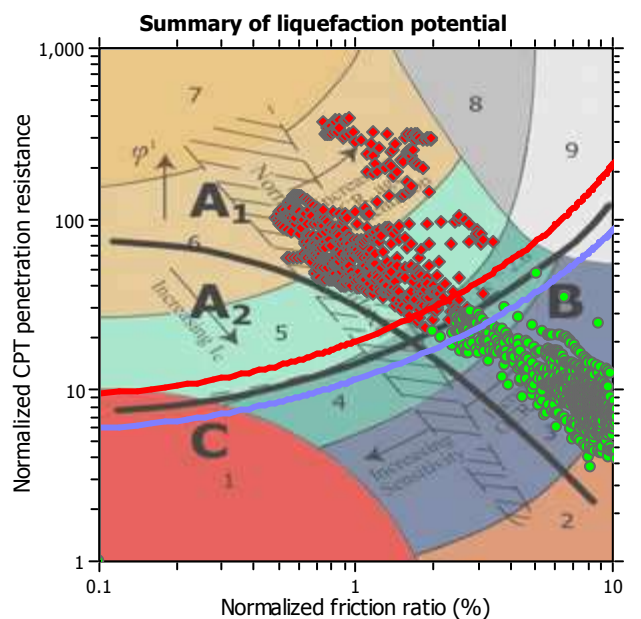
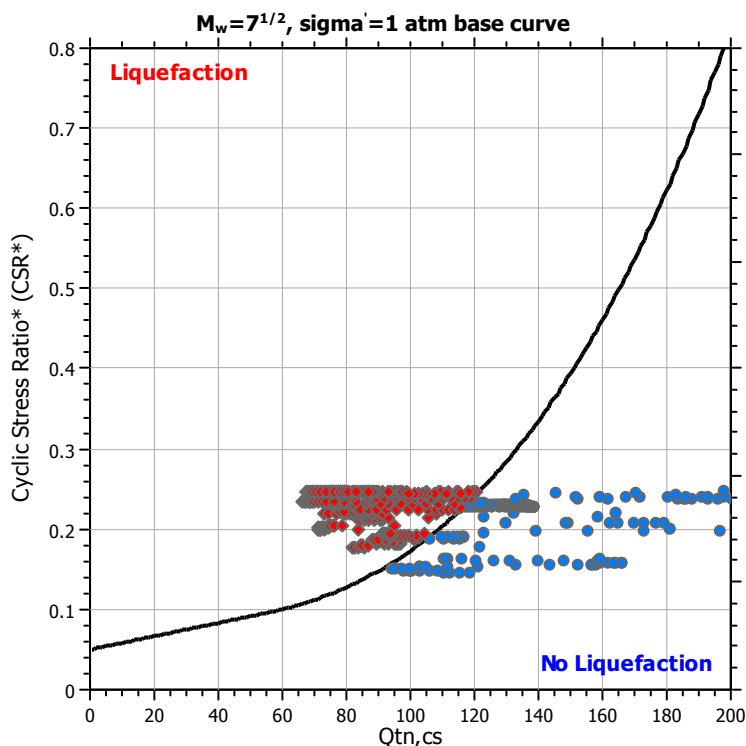
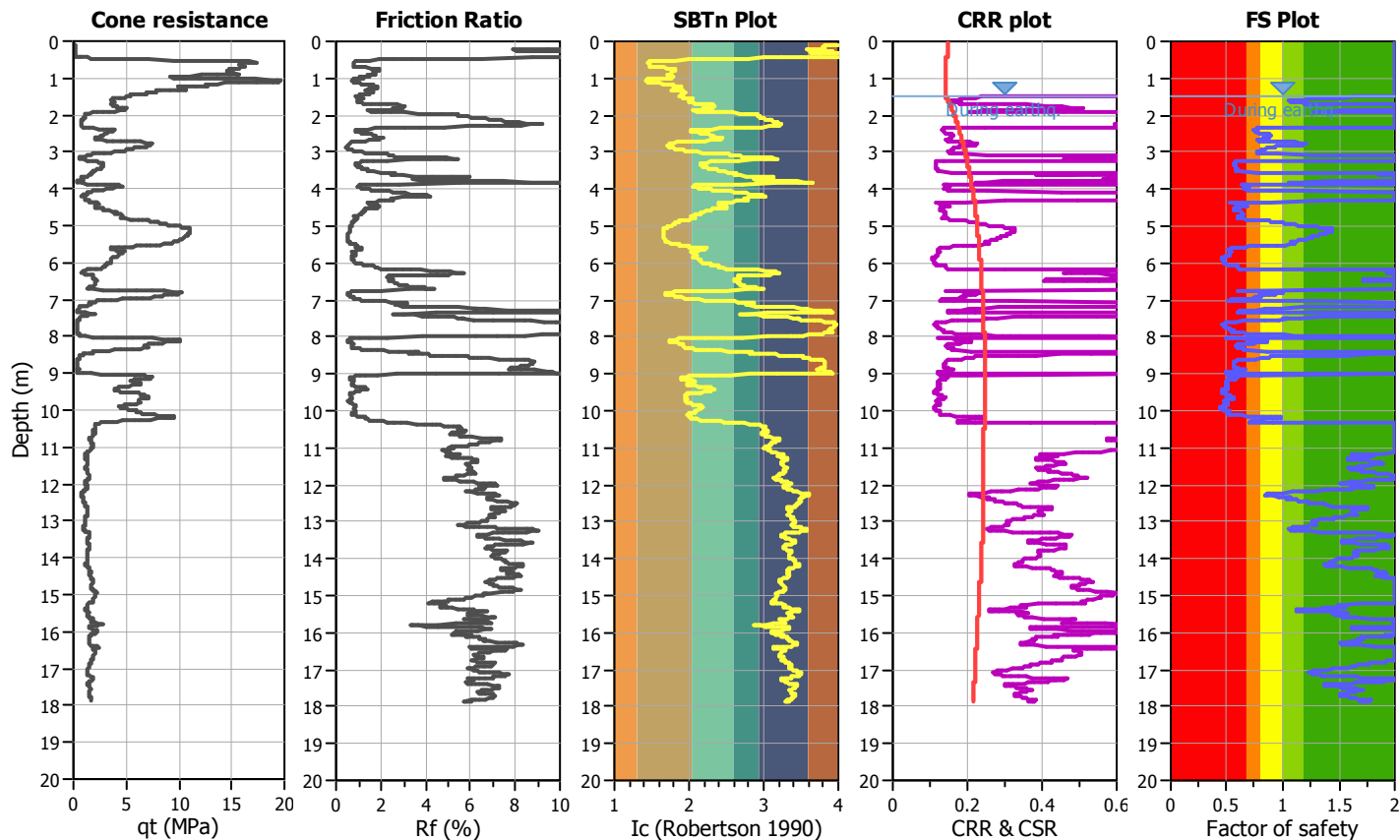
**Project title : Piano dell'Arenile - MS Livello 3**

**Location : Comune di Cattolica (RN)**

**CPT file : P1CPT1**

### Input parameters and analysis data

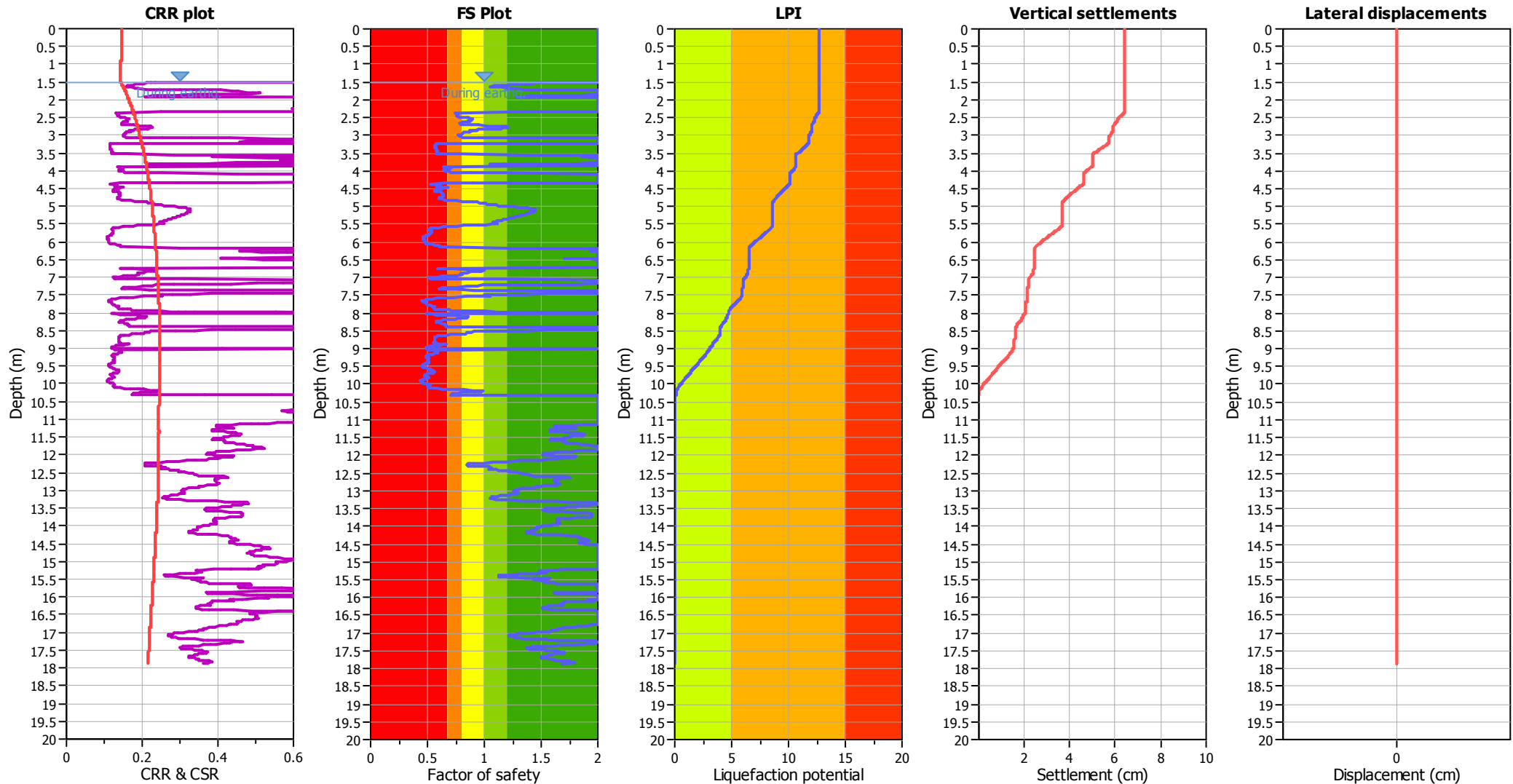
Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	2.40 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.50 m	Fill height:	N/A	applied:	All soils
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_0$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	1.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>o</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	All soils
Peak ground acceleration:	0.31	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.40 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light green	Unlike to liquefy
Dark green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

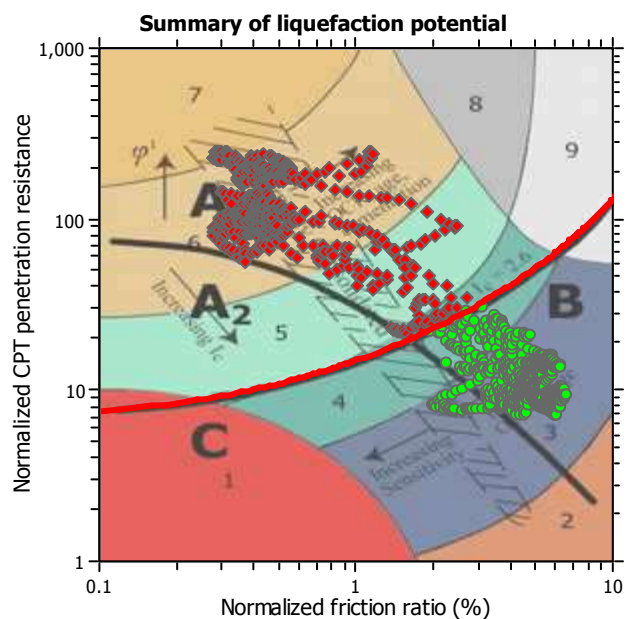
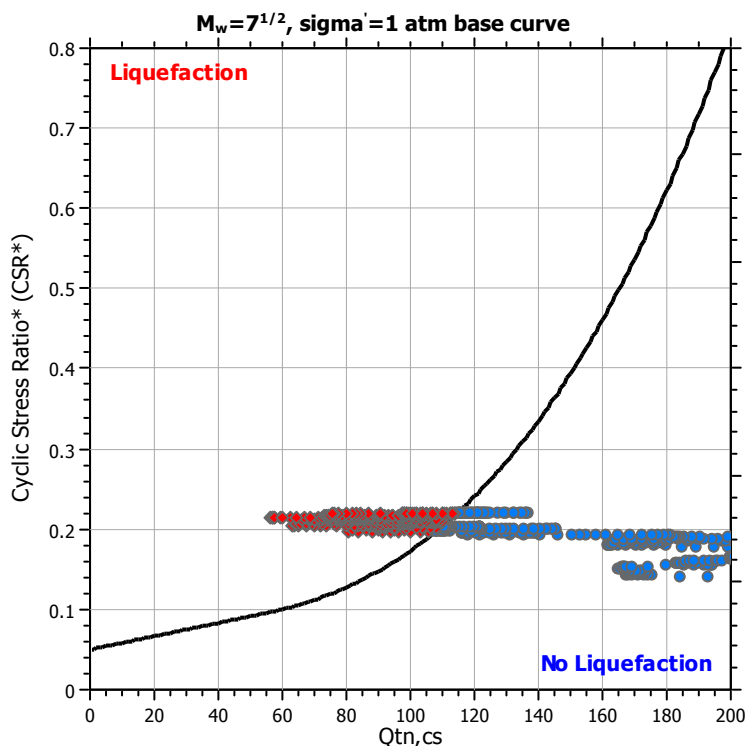
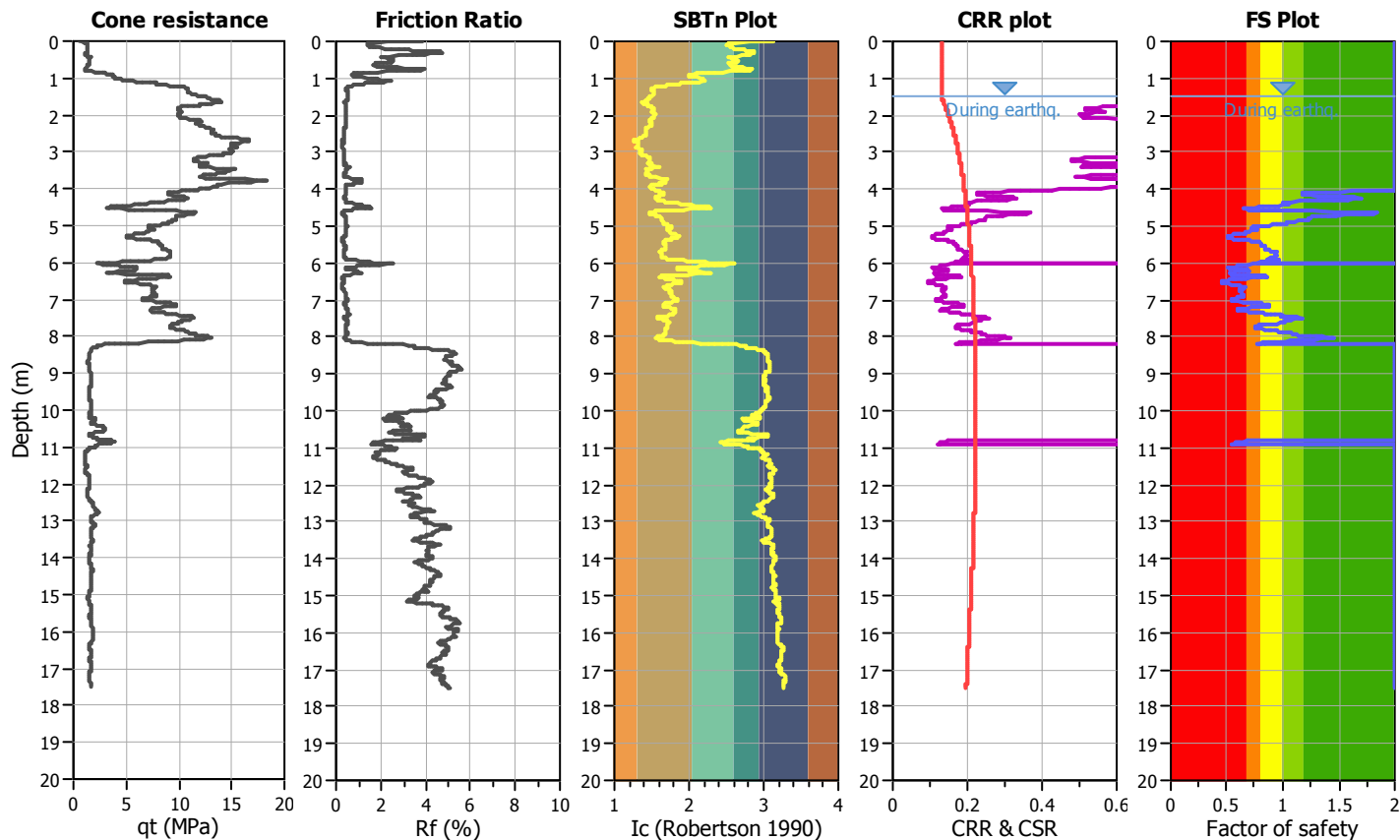
**Project title :** Piano dell'Arenile - MS Livello 3

**Location :** Comune di Cattolica (RN)

**CPT file :** P2CPT2

### Input parameters and analysis data

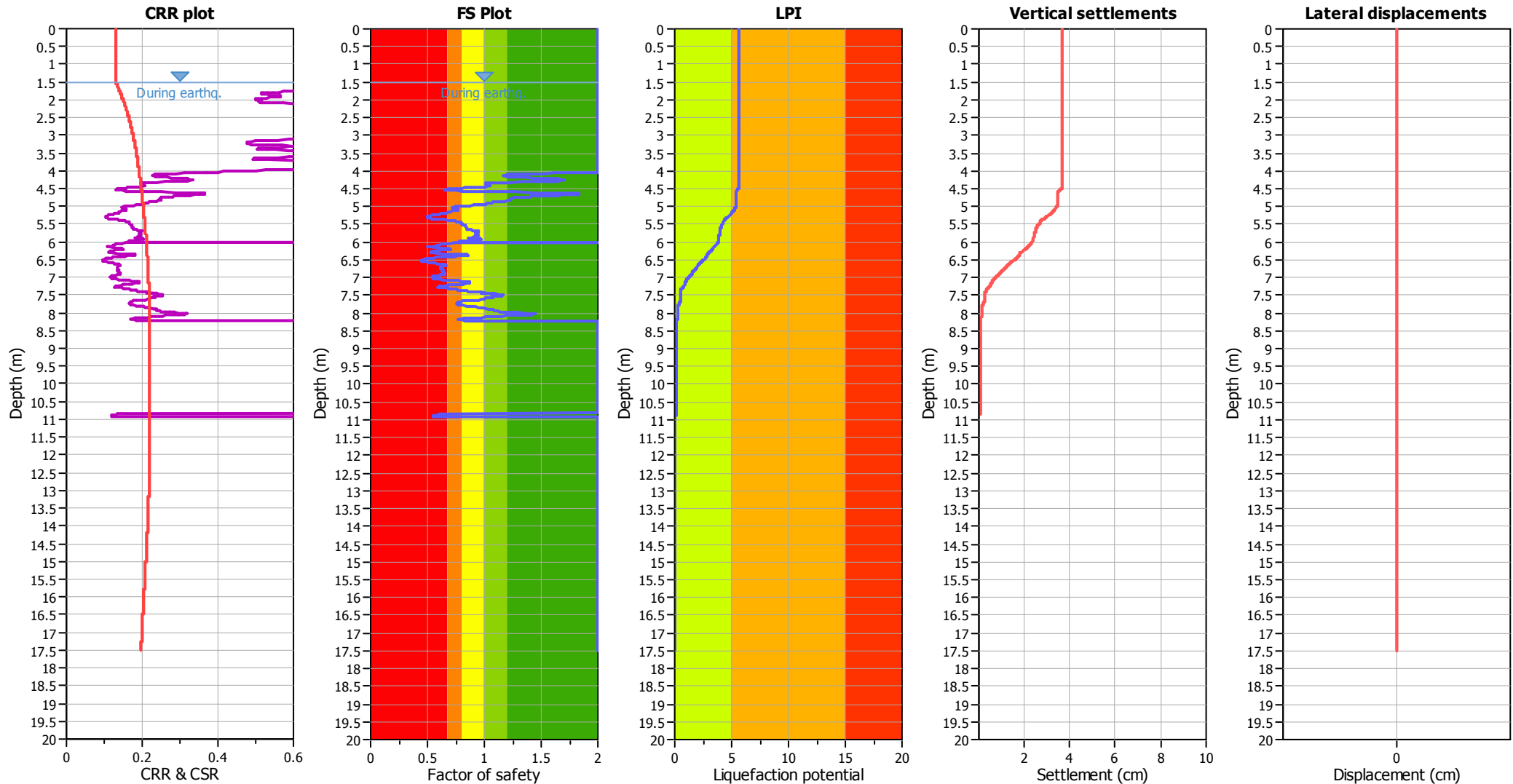
Analysis method:	NCEER (1998)	G.W.T. (in-situ):	2.30 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	NCEER (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.50 m	Fill height:	N/A	applied:	Sands only
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (earthq.):	1.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>o</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.28	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

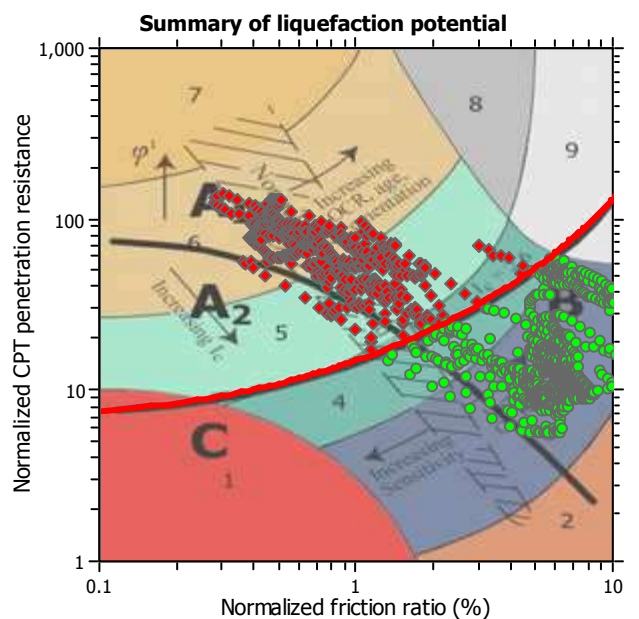
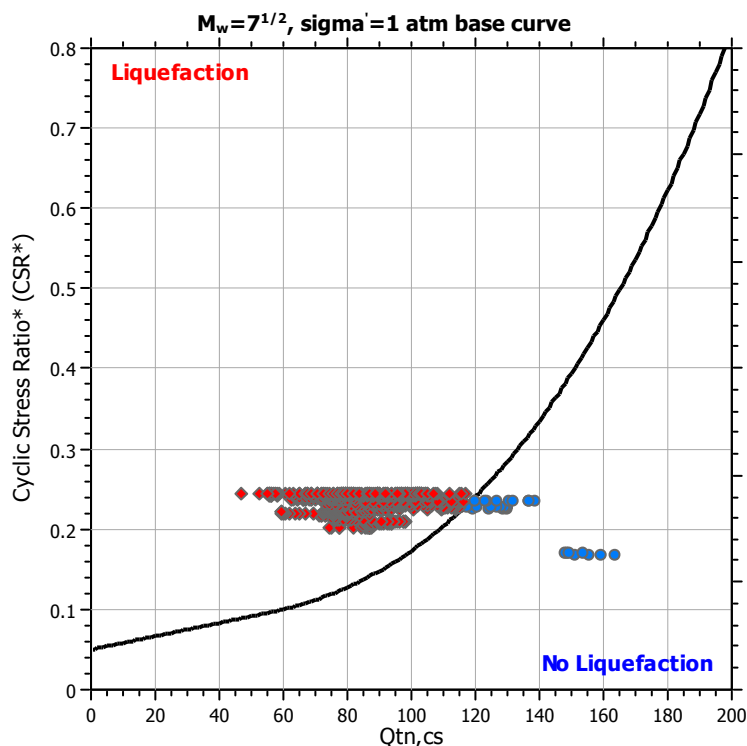
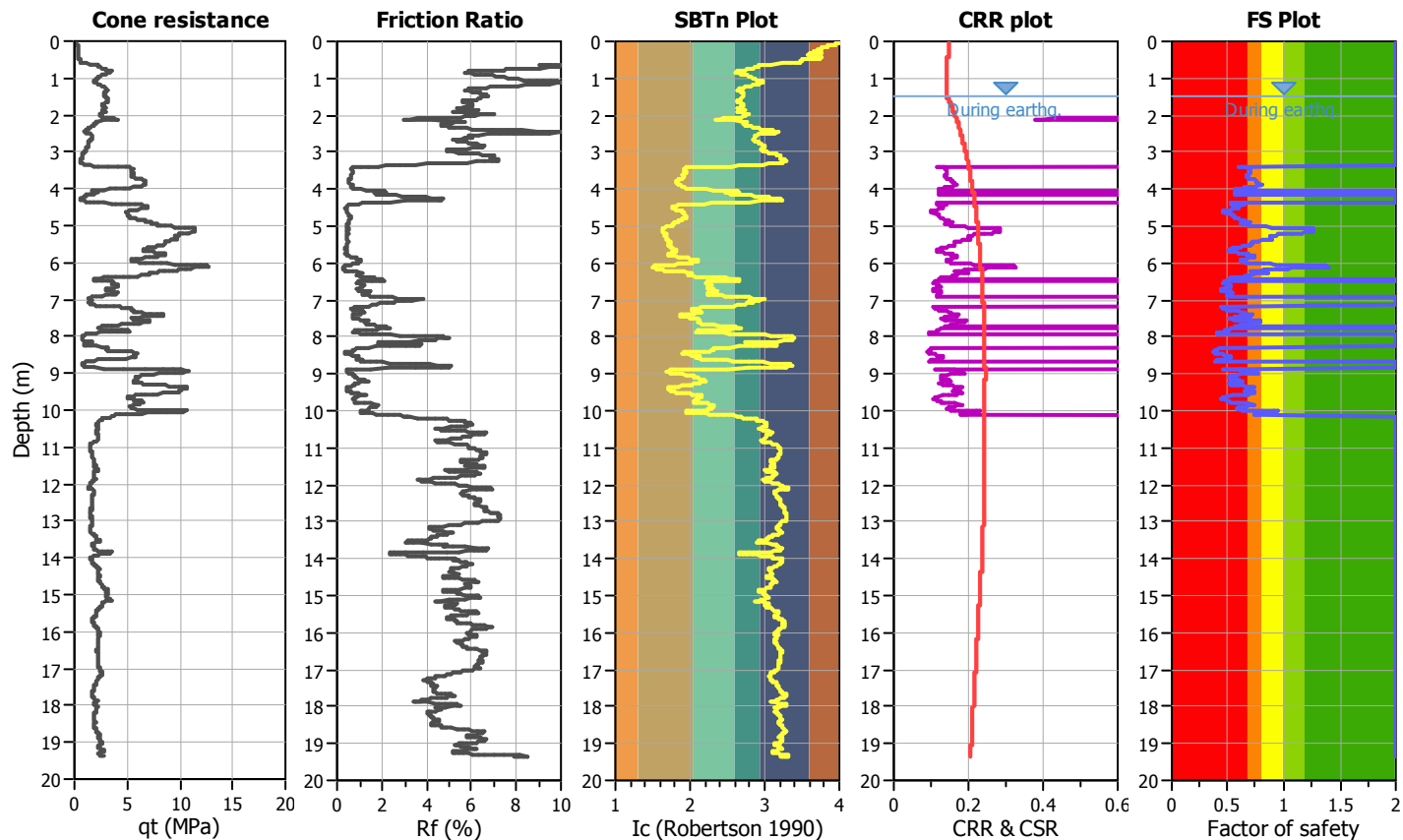
**Project title : Piano dell'Arenile - MS Livello 3**

**Location : Comune di Cattolica (RN)**

**CPT file : P3CPTE3**

### Input parameters and analysis data

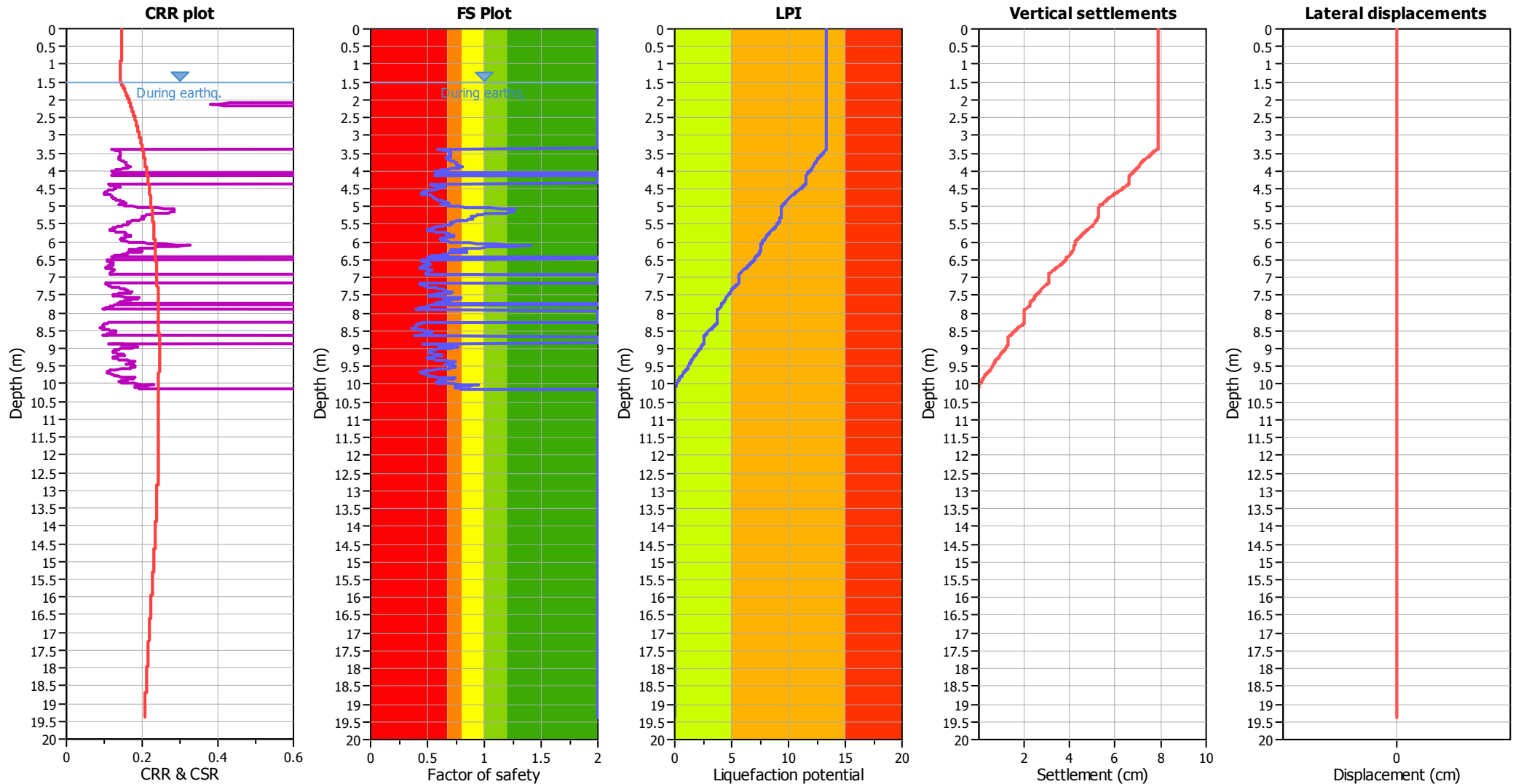
Analysis method:	NCEER (1998)	G.W.T. (in-situ):	3.30 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	NCEER (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.50 m	Fill height:	N/A	applied:	Sands only
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_0$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (earthq.):	1.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>o</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.31	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	3.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

- Almost certain it will liquefy
- Very likely to liquefy
- Liquefaction and no liq. are equally likely
- Unlike to liquefy
- Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

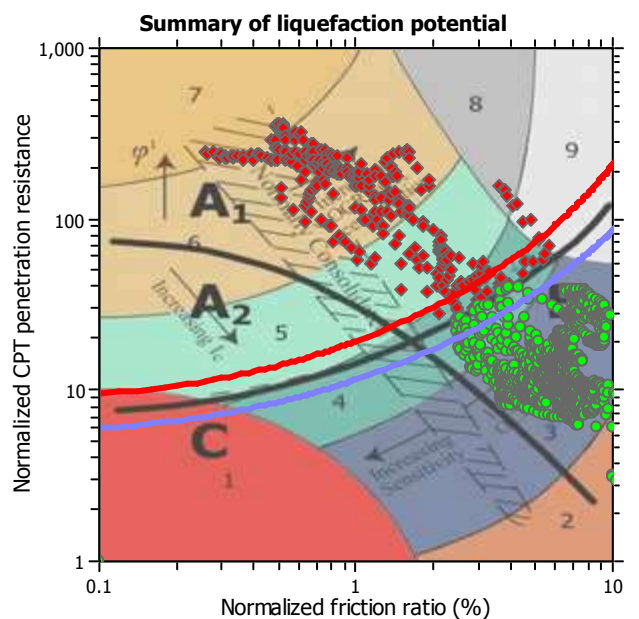
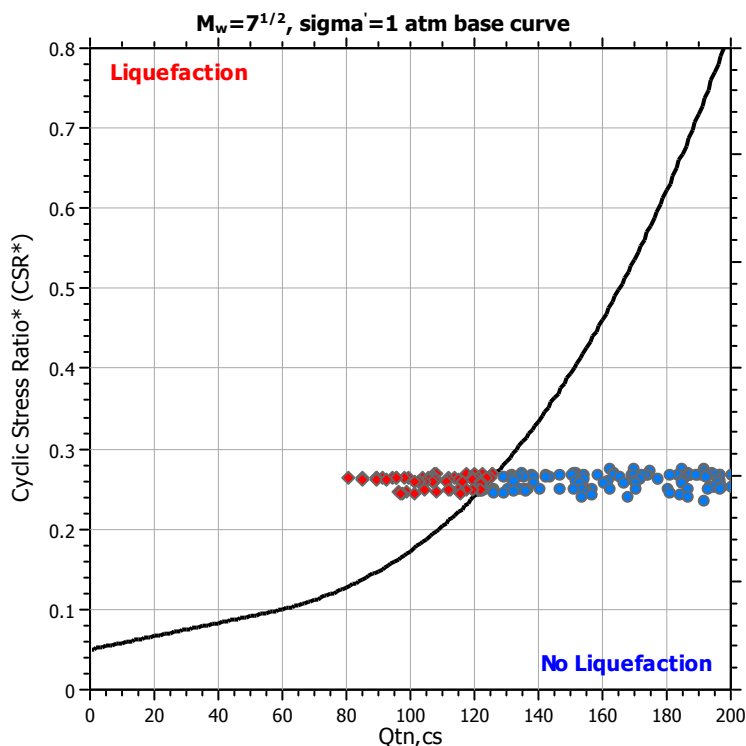
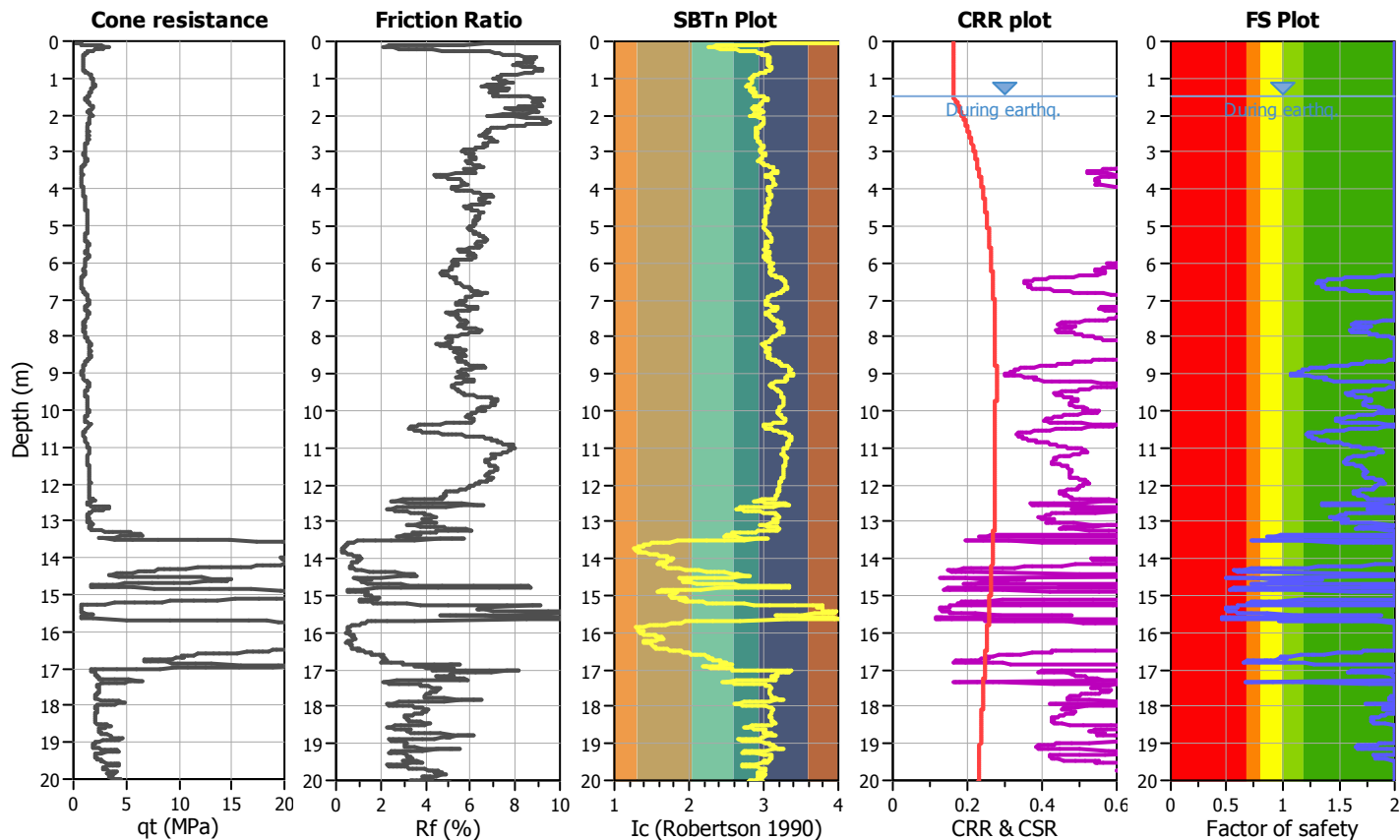
**Project title : Piano dell'Arenile - MS Livello 3**

**Location : Comune di Cattolica (RN)**

**CPT file : P4CPTU4**

### Input parameters and analysis data

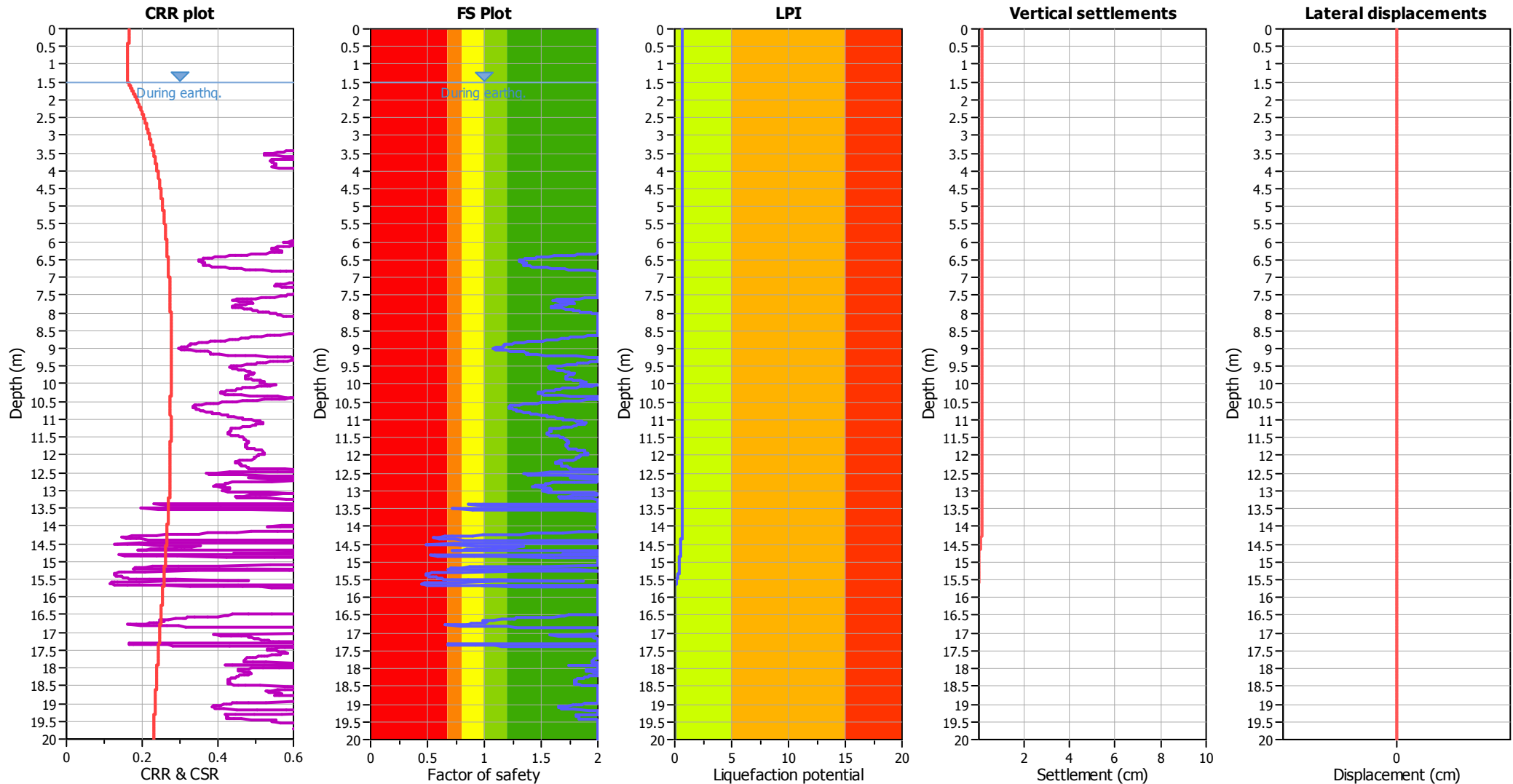
Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	2.80 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.50 m	Fill height:	N/A	applied:	All soils
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.35	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_0$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	1.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>o</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	All soils
Peak ground acceleration:	0.35	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.80 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

- Almost certain it will liquefy
- Very likely to liquefy
- Liquefaction and no liq. are equally likely
- Unlike to liquefy
- Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

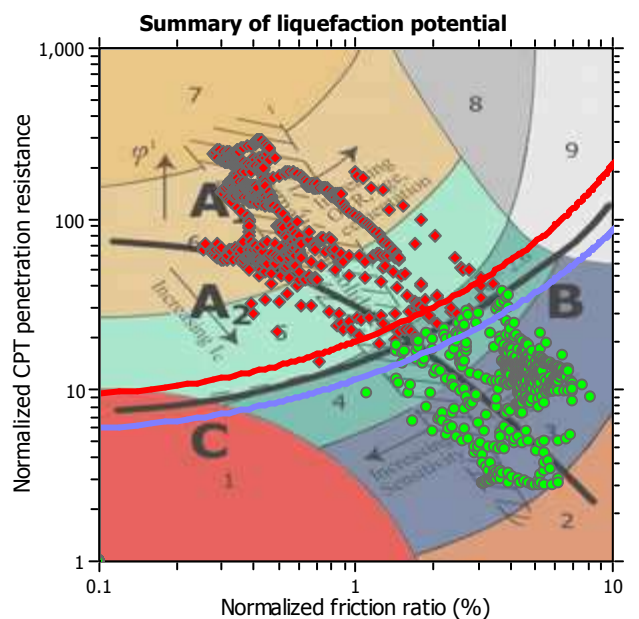
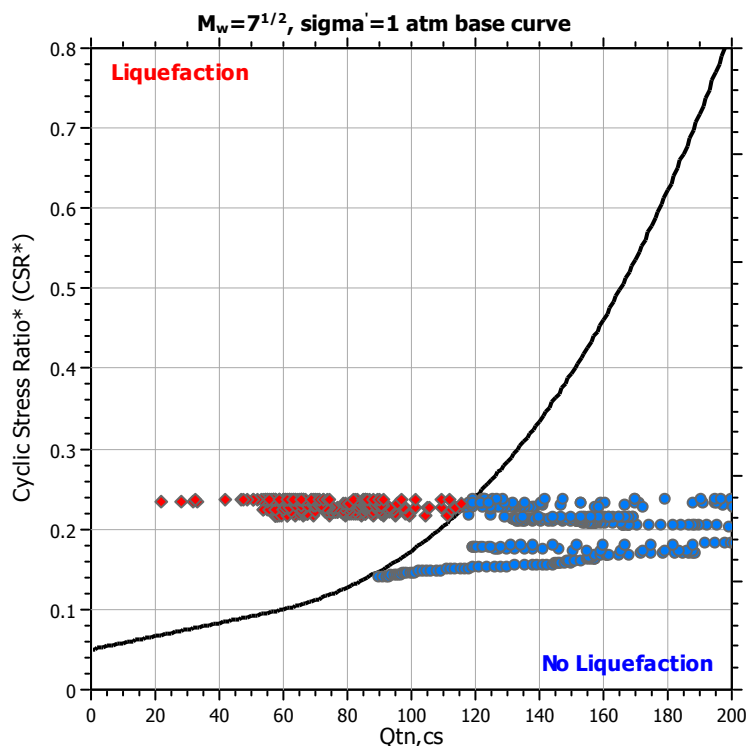
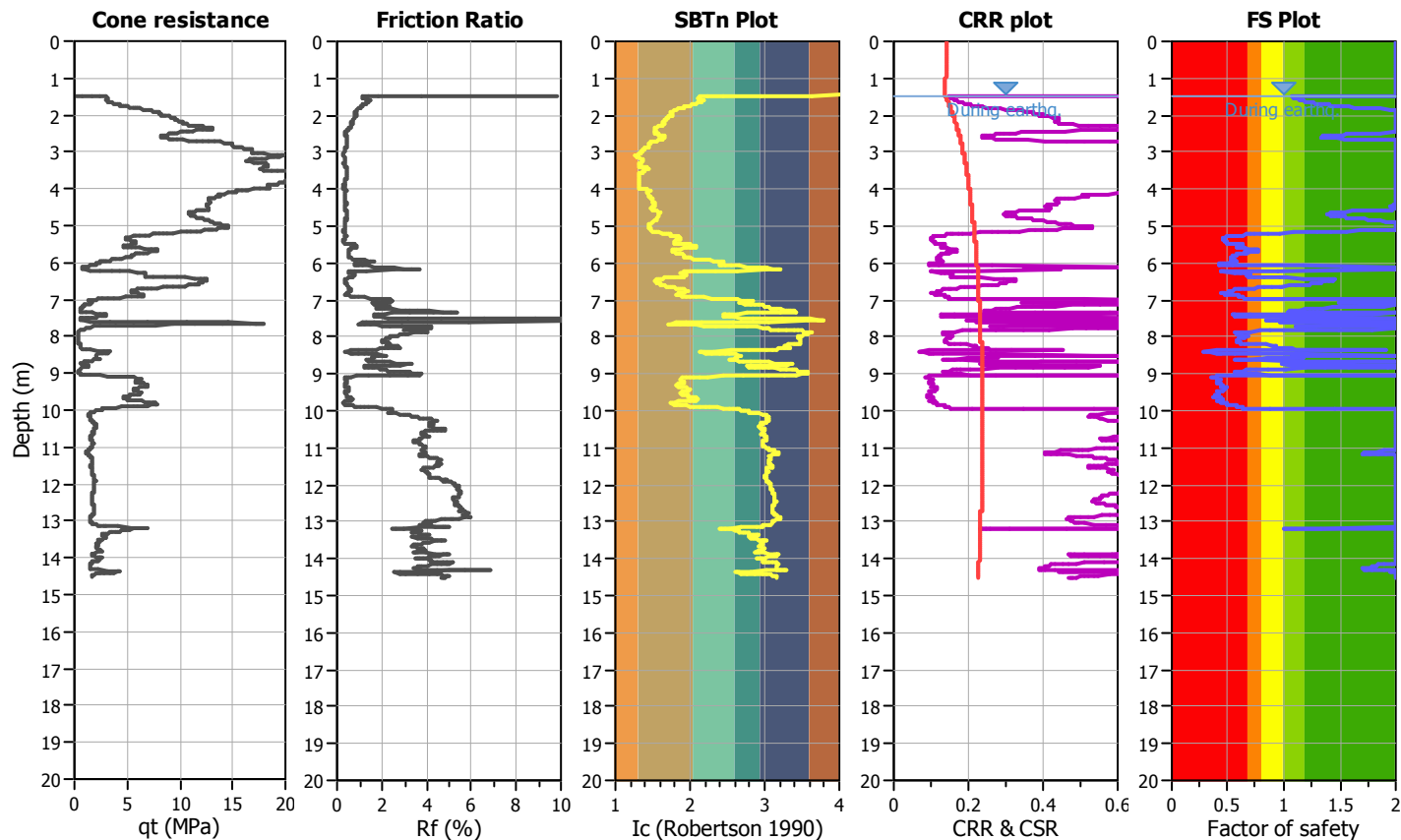
**Project title :** Piano dell'Arenile - MS Livello 3

**Location :** Comune di Cattolica (RN)

**CPT file :** P5CPTU5

### Input parameters and analysis data

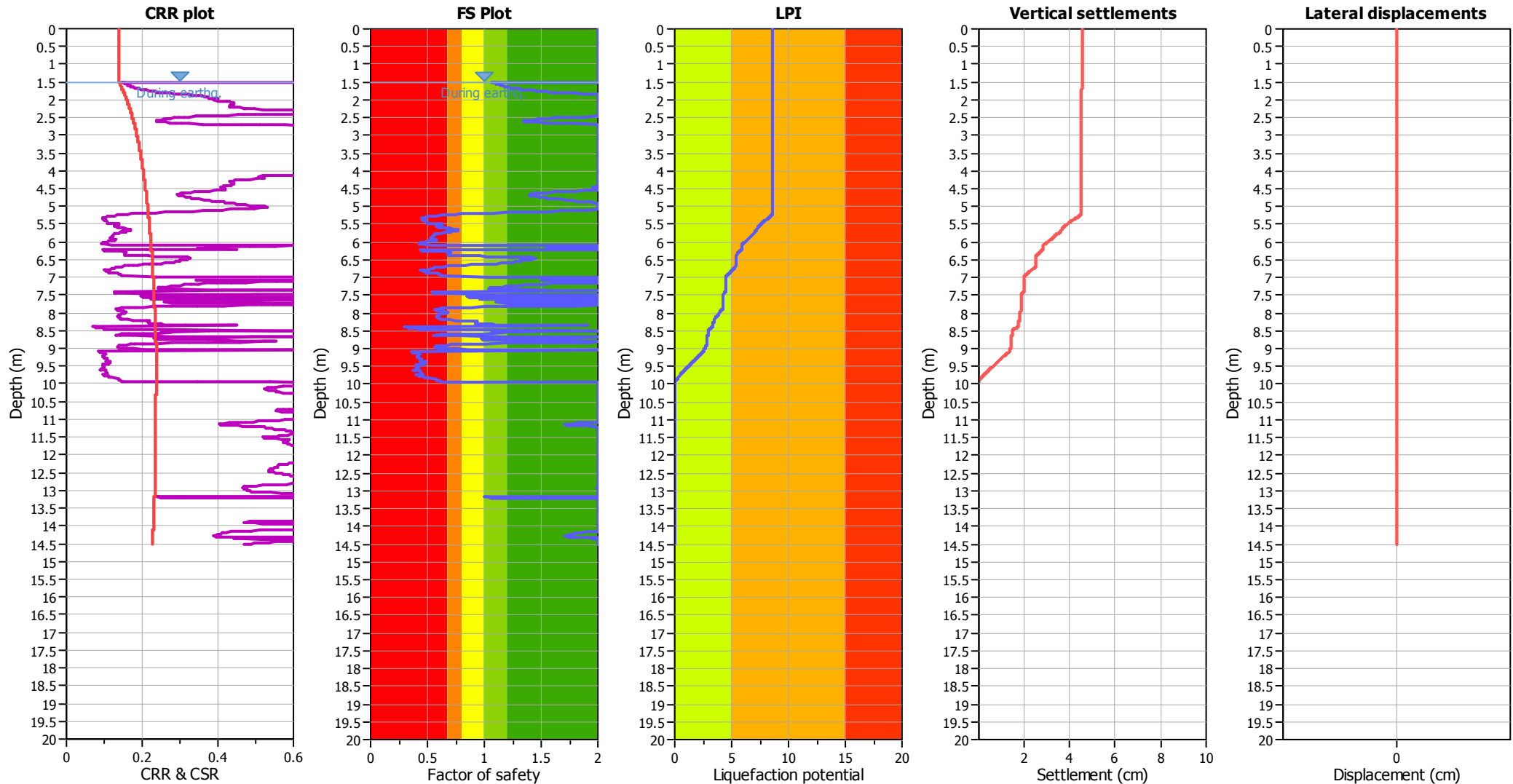
Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	2.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.50 m	Fill height:	N/A	applied:	All soils
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.30	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	1.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>o</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	All soils
Peak ground acceleration:	0.30	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

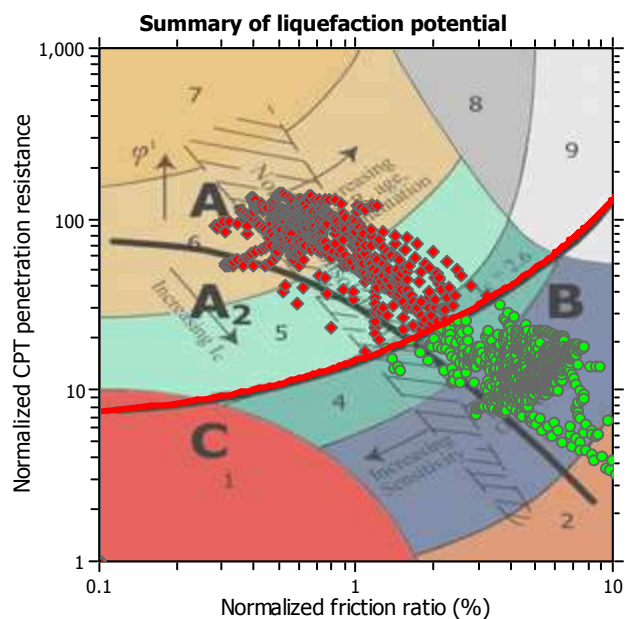
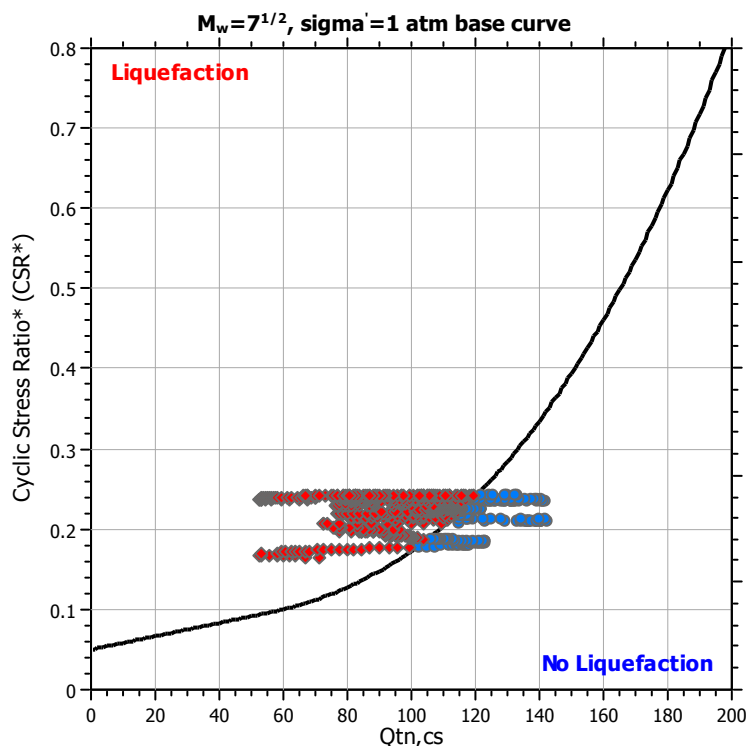
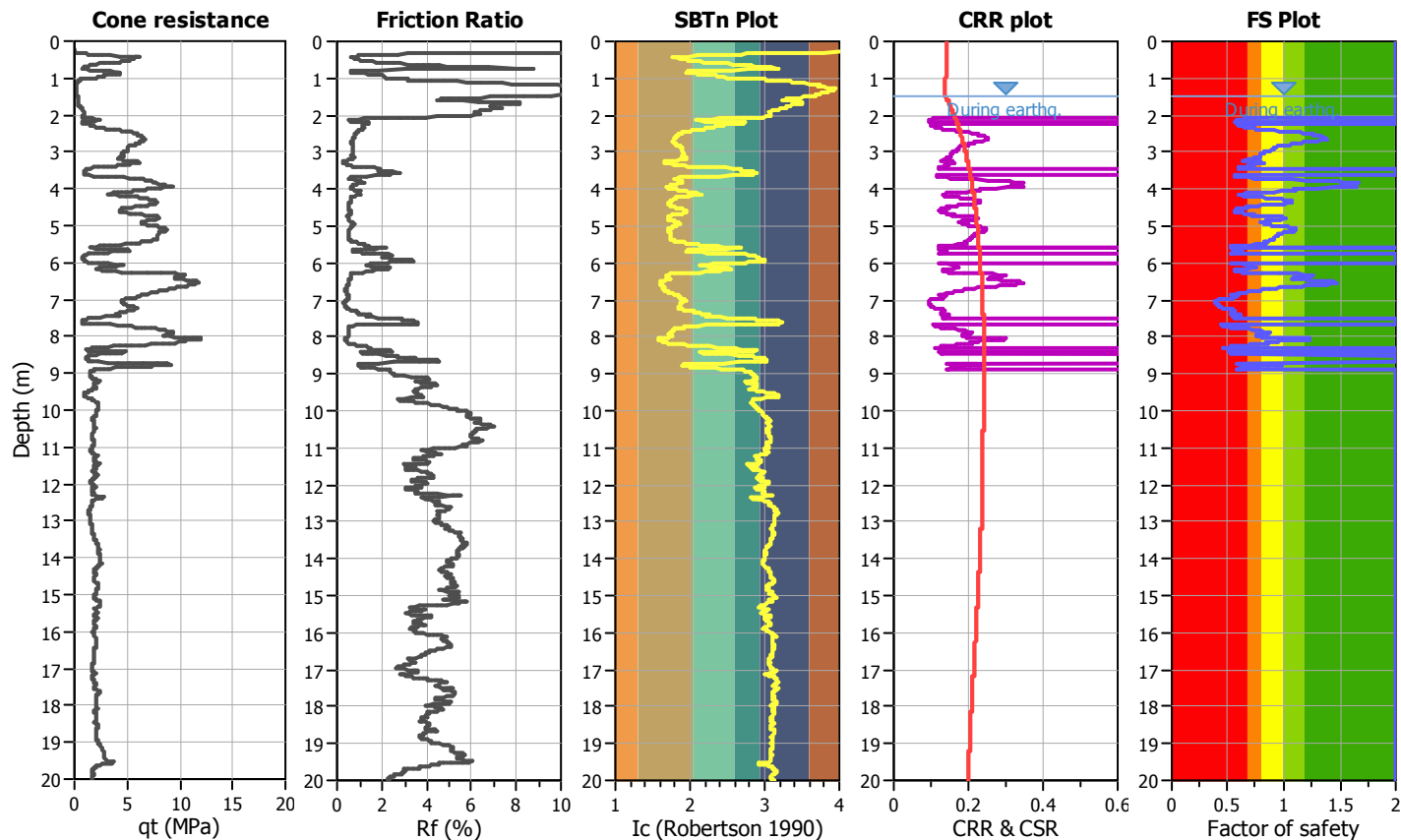
**Project title : Piano dell'Arenile - MS Livello 3**

**Location : Comune di Cattolica (RN)**

**CPT file : P210CPTU210**

### Input parameters and analysis data

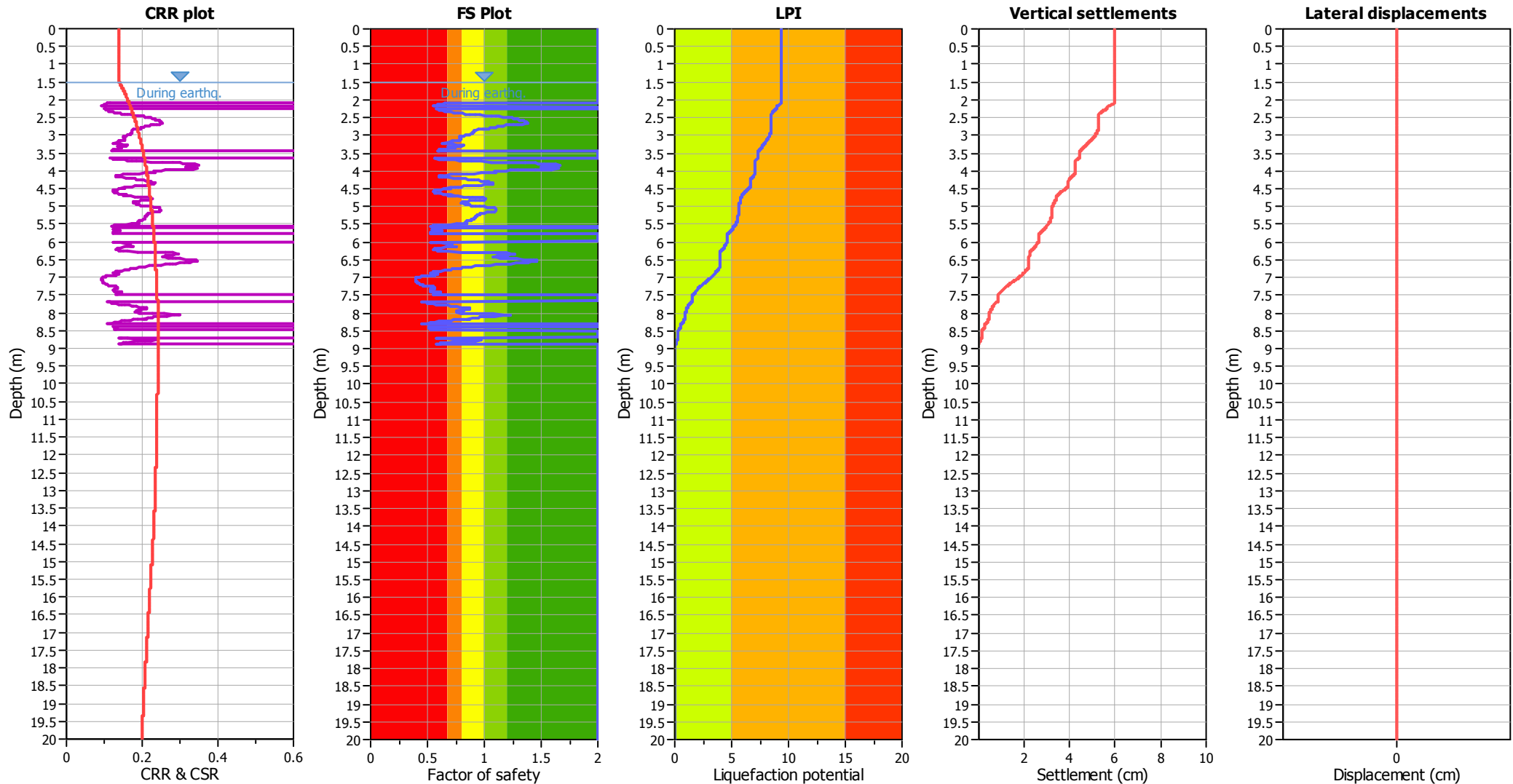
Analysis method:	NCEER (1998)	G.W.T. (in-situ):	1.70 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	NCEER (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.50 m	Fill height:	N/A	applied:	Sands only
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.30	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_0$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (earthq.):	1.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>σ</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.30	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.70 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk