

CARTA DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE IN UN'AREA RICCA DI BENI STORICO CULTURALI: LA COSTIERA ROMAGNOLA

Cipriani S.¹, Crespellani T.¹, Madiati C.¹, Pierucci D.¹, Vannucchi G.¹, Marcellini A.², Martelli L.³, Frassinetti G.³

ABSTRACT: *Liquefaction Risk Map of an area rich of historic cultural heritage: the coast of Romagna*

In recent years the coast of Romagna has been the object of numerous studies on liquefaction risk, promoted by the Emilia-Romagna Region (Crespellani et al., 1997a; Crespellani et al, 1997 b; Marcellini et al.1999). The results of these studies have shown that this area is characterised by the seismic and the geotechnical conditions such that the phenomena of liquefaction could occur there during strong earthquakes. In addition, the historical survey has indicated that several effects of past earthquakes described at the time by witnesses (Serpieri, 1889) can be interpreted as liquefaction indices.

Besides having a high population density, the coast of Romagna abounds in numerous monuments, some of which have a very high artistic value (for example, the Malatestian Temple in Rimini).

The Emilia-Romagna Region has collected and digitalised more than 1000 CPTs, that had been carried out in this area in recent years. The Department of Civil Engineering of the University of Florence, which has received all of the digitalised data, has seen to processing them and to drawing up a map of the liquefaction risk. The results of the above research are presented in this paper.

SOMMARIO: *Carta del rischio di liquefazione in un'area ricca di beni storico culturali: la costiera romagnola.*

La costa romagnola è stata oggetto in questi anni di numerosi studi sul rischio di liquefazione promossi dalla Regione Emilia-Romagna (Crespellani et al., 1997a; Crespellani et al, 1997 b; Marcellini et al.1999) che hanno dimostrato che esistono nell'area le condizioni sismiche e le condizioni geotecniche perché possa verificarsi il fenomeno della liquefazione durante terremoti forti. L'indagine storica ha anche evidenziato che alcuni effetti di terremoti passati descritti da testimoni dell'epoca (Serpieri, 1889) possono essere interpretati come indizi di liquefazione.

Oltre ad avere una elevata densità abitativa, la costa romagnola è ricca di numerosi monumenti, alcuni dei quali di elevato pregio artistico (ad esempio Il Tempio Malatestiano di Rimini).

La Regione Emilia-Romagna ha raccolto e digitalizzato oltre 1000 prove penetrometriche statiche (CPT), effettuate nell'area negli ultimi anni. Il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Firenze, a cui è confluito tutto il materiale digitalizzato, compresa la cartografia geologica, ha provveduto al loro trattamento e alla stesura di una carta del rischio di liquefazione. Nel presente lavoro si mostrano i risultati della ricerca.

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Firenze, via Santa Marta 3, 50139 Firenze,
E-mail: giovan@dicea.unifi.it

² Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico, CNR, via Bassini 15, 20133 Milano, E-mail: marcel@irrs.mi.cnr.it

³ Ufficio Geologico, Regione Emilia-Romagna, viale Silvani 4/3, 40122 Bologna,
E-mail: lmartelli@regione.emilia-romagna.it

INTRODUZIONE

La costa romagnola, oltre ad essere un territorio densamente popolato e meta turistica estiva per moltissime persone, è anche ricca di monumenti e di beni storico-culturali. In particolare Rimini, ove sorgono il tempio Malatestiano, massimo monumento cittadino ed una delle più alte creazioni del rinascimento, l'arco di Augusto, il più antico degli archi romani superstiti ed uno dei più belli, il ponte di Tiberio sul fiume Marecchia, il Castel Sigismondo, la chiesa romanico-gotica di Sant'Agostino, etc.. Questo territorio popoloso ed economicamente importante, con un patrimonio storico-culturale così significativo, è vulnerabile ed esposto a rischio sismico.

La costa romagnola è stata colpita in passato da terremoti rovinosi, i cui effetti sul tessuto economico-sociale e sull'ambiente costruito sono descritti in modo dettagliato nelle cronache e nei documenti coevi a partire dal XVII° secolo. In particolare vi è testimonianza dei danni ai monumenti ed ai beni storico-culturali prodotti dai terremoti del 1672, del 1786, del 1875 e del 1916. A titolo di esempio in Figura 1 (Guidoboni e Ferrari, 1986) sono localizzati gli edifici di culto e i palazzi di Rimini danneggiati dal terremoto del 1672.



Figura 1: Rimini: localizzazione degli edifici di culto e dei palazzi maggiormente colpiti dal terremoto del 14 aprile 1672 (da Guidoboni et al., 1986)

Figure 1: Rimini: Map of the churches and of the palaces damaged by earthquake of 14 th April 1672 (da Guidoboni et al., 1986)

La liquefazione del terreno durante i terremoti è una delle più importanti cause di danneggiamento e collasso delle costruzioni fondate su o costruite con terreni sabbiosi saturi, quali sono i terreni della fascia costiera romagnola. Alla liquefazione del terreno possono infatti associarsi estesi fenomeni di subsidenza, movimenti di masse fluidificate di terreno, ecc. ma anche effetti meno devastanti (cedimenti differenziali, lesioni negli edifici, ecc.) che tuttavia possono produrre gravissimi danni al patrimonio abitativo e artistico di una regione.

Le notizie di manifestazioni eccezionali e di effetti spettacolari della liquefazione abbondano nella letteratura sismica mondiale antica e recente. I recenti terremoti di Kobe, della Turchia, di Taiwan hanno mostrato esempi di effetti e sconvolgimenti rovinosi, ma anche in Italia non mancano casi di danni imputabili alla liquefazione del terreno (Galli et al., 1993).

Gli effetti più distruttivi della liquefazione sono stati osservati soprattutto in prossimità di fiumi, laghi, spiagge, e sono risultati spesso particolarmente rovinosi per le costruzioni, le attrezzature portuali, le infrastrutture stradali, e naturalmente per il patrimonio storico culturale.

La liquefazione di un deposito è il risultato dell'effetto combinato di due principali categorie di fattori: le condizioni del terreno (fattore predisponente) e la sismicità (fattore scatenante). Sulla costa romagnola esistono non solo le condizioni geotecniche (fattore predisponente), ma anche le condizioni sismiche (fattore scatenante), perché possa verificarsi il fenomeno della liquefazione: infatti, i terremoti attesi in un periodo di 475 anni sono di intensità $I \geq VIII$ MCS con valori del picco di accelerazione $a_{max} \geq 0.24$ g (Peruzza et al., 1996; Rebez et al., 1996); localmente sono anche possibili valori maggiori del picco di accelerazione per effetto di fenomeni di amplificazione della risposta sismica nei depositi (Frassinetti et al, 1997).

È stato inoltre accertato che la liquefazione tende a riprodursi negli stessi luoghi, ogni qual volta si ripetano le condizioni sismiche. Ebbene, l'indagine storica ha evidenziato che alcuni effetti di terremoti passati (aperture nel terreno con fuoriuscita di sabbia e/o fango e/o ghiaia, formazione di vulcanelli, ecc.) descritti da testimoni dell'epoca, nelle spiagge e nelle zone di sbocco a mare dei corsi d'acqua possono essere interpretati come indizi di liquefazione. Ad esempio, Serpieri (1889) riferisce che durante il terremoto della notte del 17-18 marzo 1875 a Cesenatico *"un cacciatore che passava lungo il lido, vide a un tratto levarsi delle onde che si rovesciarono sulla spiaggia, e mentre fuggiva a tutta corsa s'incontrò con parecchi getti di acqua, che violentemente si alzavano dal suolo; e quindi nei vari punti dove erano sorti si trovarono tante piccole cavità in forma di imbuto"*. Analoghi fenomeni sono stati riscontrati in diversi siti del litorale fra Cervia e Cattolica (Galli e Meloni, 1993; Postpischl, 1985).

Per i motivi su esposti la Regione Emilia Romagna, nell'ambito di un più vasto studio di microzonazione sismica, ha ritenuto necessario che fossero condotte specifiche analisi del rischio di liquefazione nell'area costiera romagnola.

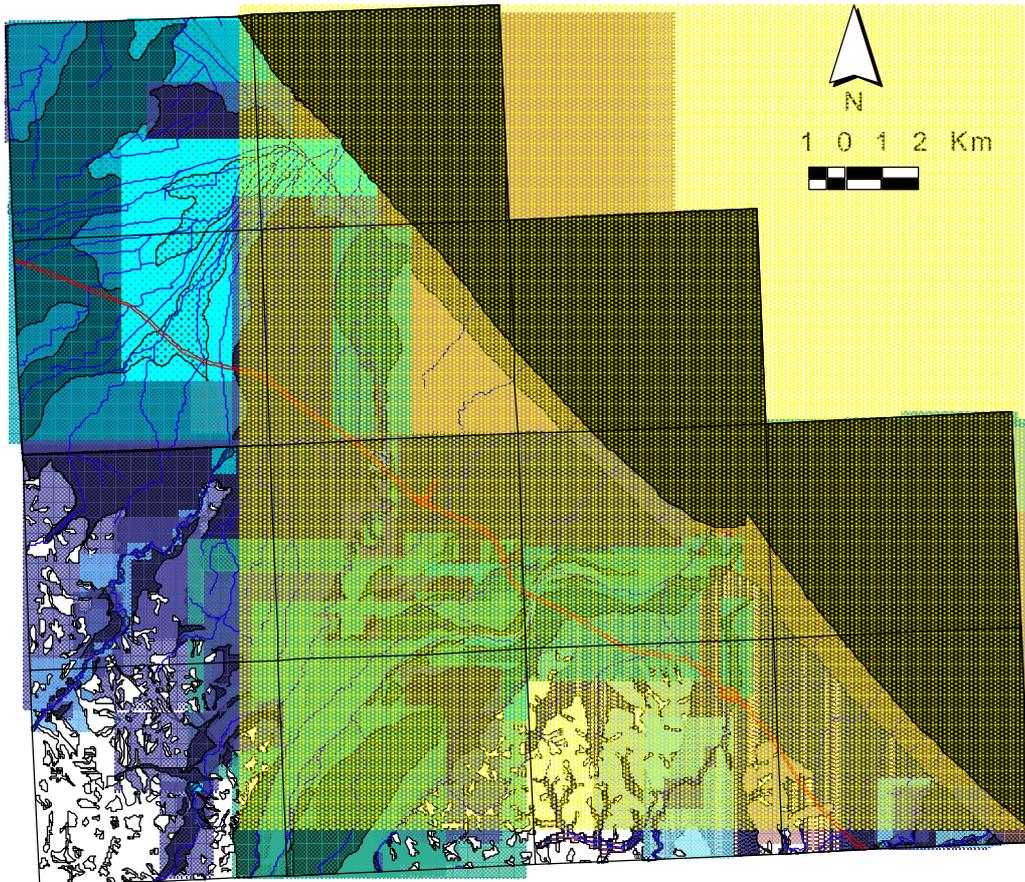
La ricerca, affidata al Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Firenze, ha riguardato l'area del territorio riminese e forlivese che ricade nel foglio n. 256 della cartografia nazionale 1:50.000 dell'IGM.

Lo studio più generale, finalizzato alla microzonazione sismica del territorio, è stato svolto in collaborazione con l'Ufficio Geologico della Regione Emilia Romagna e con l'Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico. L'Ufficio Geologico ha fornito le carte geologiche di superficie, i dati delle stratigrafie e i profili in forma digitalizzata di 1009 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT). L'Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico ha fornito i dati sismici di input indispensabili per lo studio della liquefazione.

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO, MORFOLOGICO E GEOLOGICO

L'area in studio è costituita dai territori delle province di Forlì e di Rimini comprendenti i comuni di Cesenatico, Gatteo, San Mauro Pascoli, Savignano sul Rubicone, Gambettola, Sant'Arcangelo di Romagna, Bellaria-Igea Marina, Rimini e Riccione, situati tra la costa adriatica ed il margine appenninico-padano.

Il settore meridionale è costituito dai primi rilievi appenninici, mentre la maggior parte del territorio è in pianura, fino all'estremità nordorientale coincidente con la costa adriatica. La fascia pedecollinare è modellata dai conoidi del fiume Marecchia e dei torrenti Uso e Rubicone, che scorrono incassati fino alla via Emilia. La pianura si estende, intervallata dai rilevati degli argini naturali e artificiali, fino a comprendere la zona palustre di retroduna, spesso topograficamente più depressa e con difficoltà di scolo naturale a ridosso del subsistema costiero, che funge da barriera naturale (complici le dune eoliche) specie per le aree di bacini interfluviali. La fascia costiera costituita da depositi marini litorali e da dune eoliche, fortemente urbanizzata, ha un'ampiezza verso l'interno di circa 800-1000 metri (Figura 2; derivata da: Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio n. 256 Rimini, Regione Emilia-Romagna - Servizio Geologico d'Italia, in corso di stampa).



Legenda

Classi litologiche

- g- Ghiaie
- ca- Alternanze di sabbie e limi
- pi- Argille e limi di piana
- tr- Alternanze di sabbie, limi e argille
- lt- Sabbie di cordone litorale
- Itg- Ghiaie di barra di foce
- Zona montuosa

δ CPT

Reticolo idrografico

Autostrada A14

Figura 2: Il territorio in esame: carta litologica e ubicazione delle prove CPT

Figure 2: The examined landscape: lithologic map and position of CPTs

I depositi di pianura, di specifico interesse per l'analisi del rischio di liquefazione, sono rappresentati dalla successione quaternaria continentale del Pleistocene medio – Olocene (RER-ENI Agip, 1998), costituita da alluvioni intercalate da depositi di ingressioni marine risultato dell'innalzamento del livello marino durante i periodi interglaciali. I sedimenti alluvionali sono costituiti da cicli deposizionali grossolani alla base (ghiaie e sabbie) e fini al tetto (peliti), mentre le ingressioni sono essenzialmente rappresentate da sabbie di mare basso e spiaggia. Lo spessore di questa successione aumenta progressivamente dal margine appenninico verso il mare; il limite inferiore della successione quaternaria continentale, in corrispondenza della linea di costa, supera i 300 m di profondità.

Lungo la costa, la successione continentale termina verso l'alto con un orizzonte, di spessore massimo variabile da 8 a 12 metri, costituito da sabbie medie, fini e finissime, ben selezionate, di ambiente litorale (spiaggia e dune eoliche) (RER-ENI Agip, 1998) che è anche il principale terreno di fondazione della fascia costiera. In questo orizzonte, la superficie della falda acquifera è mediamente ad una profondità di 1.5-2 metri dal piano campagna, con risalite fino a 1 metro durante il periodo invernale.

BANCA DATI REGIONALE E SISTEMA INFORMATIVO GEOGRAFICO

L'architettura deposizionale della successione quaternaria continentale è stata ricostruita sulla base dei dati stratigrafici e geotecnici archiviati nella banca dati della Regione Emilia-Romagna. I dati relativi alla geologia e alla stratigrafia sono stati sintetizzati in un modello tridimensionale del terreno fino a 50 metri di profondità, integrato in un Sistema Informativo Geografico (GIS). L'utilizzo del GIS permette la raccolta organizzata di tutti i dati relativi al modello geologico ed alla sua caratterizzazione geotecnica e sismica, consente operazioni di interpolazione in campo spaziale, come ad esempio costruire con buona approssimazione la successione verticale delle unità litotecniche in aree prive di sondaggi, e facilita l'integrazione dei risultati ottenuti, carte di microzonazione, con altre carte tematiche (in formato digitale) utili per studi di pianificazione territoriale. Il modello digitale del terreno (DTM) è stato costruito seguendo uno schema a triangoli irregolari. Il sottosuolo è stato modellato attraverso una serie di mappe a varie profondità (generalmente a distanza di circa 2 metri).

METODO UTILIZZATO PER LA STESURA DELLA CARTA DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE

Il metodo per la valutazione del rischio di liquefazione deve essere commisurato al problema di ingegneria geotecnica, ed all'obiettivo che si intende raggiungere.

Possono presentarsi due situazioni limite: a) area di limitata estensione in cui è prevista la realizzazione di un'opera specifica e, b) area estesa con finalità di zonazione, pianificazione, difesa del territorio. Nel primo caso occorrono indagini approfondite in sito e in laboratorio, nel secondo è opportuno utilizzare quanto più possibile le informazioni geotecniche esistenti.

Per l'applicazione alla zona costiera romagnola (situazione di tipo b) si poteva disporre di oltre 1000 prove CPT a punta meccanica. Essendo le prove CPT in numero molto elevato e abbastanza ben distribuite sul territorio, si è ritenuto di utilizzare le procedure di stima che si basano su tali prove, anche perché attualmente tali procedure sono considerate dalla comunità scientifica internazionale come le più affidabili per gli studi su vasta scala.

Premesso che il materiale documentario raccolto costituisce un grandissimo patrimonio di conoscenze geotecniche, forse unico in Italia, ed una base dati fondamentale per un'analisi quantitativa della liquefazione su un'area così estesa, l'impiego delle prove CPT per la valutazione del rischio di liquefazione nel caso specifico non poteva essere immediato in quanto: 1) i dati si riferiscono a prove effettuate con finalità diverse, con attrezzature diverse, in tempi differenti e da Imprese differenti, e 2) a differenza di altre procedure indicate nella letteratura geotecnica, i metodi basati sulle prove CPT sono recenti, ancora non consolidati e poco sperimentati dalla comunità scientifica internazionale. Inoltre, le moderne procedure di elaborazione dei dati penetrometrici al fine di valutare il potenziale di liquefazione si riferiscono a prove con penetrometro elettrico, mentre i dati raccolti e disponibili sono ottenuti con penetrometro meccanico.

Perciò si è dovuto procedere innanzitutto a scegliere il metodo più adatto al caso, confrontando fra loro, su un campione di dati ristretto, i risultati ottenibili. È stata quindi scelta la procedura di Robertson e Wride (1997).

Tale metodo prevede che per ogni verticale di prova venga effettuata:

- a) la stima del profilo di resistenza alla liquefazione, espressa in termini di rapporto di resistenza ciclica (CRR = Cyclic Resistance Ratio) o di resistenza di punta normalizzata (q_{c1N}). Tale resistenza è dedotta dai risultati della prova CPT;
- b) la stima del profilo di azione sismica attesa, espressa in termini di rapporto di sforzo di taglio ciclico (CSR = Cyclic Stress Ratio) o di resistenza di punta normalizzata critica ($q_{c1N,cr}$). Tale azione è espressa in funzione dei parametri sismici caratteristici del terremoto atteso (picco di accelerazione, a_{max} e magnitudo, M) e dello stato tensionale alla profondità di prova;
- c) il calcolo del profilo del fattore di resistenza alla liquefazione ($FSL = CRR/CSR$, o $FSL = q_{c1N}/q_{c1N,cr}$) fino ad una profondità critica oltre la quale si esclude che possano verificarsi fenomeni di liquefazione.

Per poter procedere alla rappresentazione areale del rischio di liquefazione occorre associare ad ogni verticale di prova un unico valore numerico. Un indice sintetico, rappresentativo del rischio di liquefazione, applicabile a tutti i metodi che prevedono il calcolo del profilo del fattore di sicurezza, è l'indice del potenziale di liquefazione P_L , introdotto da Iwasaki et al (1978):

$$P_L = \int_0^{20} p_L(z) dz = \int_0^{20} F(z) \cdot w(z) \cdot dz \quad (1)$$

in cui $F(z)$ è una funzione che per $FSL > 1$ assume il valore zero e per $FSL < 1$ ne è il complemento ad 1, e $w(z) = 10 - 0.5z$ è una funzione linearmente decrescente della profondità z in metri, definita fino al valore critico di 20 m, oltre il quale sono da escludersi fenomeni di liquefazione.

L'indice del potenziale di liquefazione, è compreso nel campo 0 - 100, è facilmente cartografabile mediante linee di livello, ed esprime quantitativamente la severità del rischio di liquefazione. In Tabella 1 sono indicate le classi di severità del rischio in funzione del valore dell'indice del potenziale di liquefazione.

A titolo di esempio in Figura 3 sono mostrati i profili grafici dei dati e dei risultati ottenuti per una delle 1009 prove CPT. I grafici a), b) e c) sono i profili di input del metodo; i grafici d) ed e) sono l'interpretazione litologica della prova, attraverso la quale sono identificati i livelli che, per composizione, sono passibili di liquefazione, il grafico f) contiene i profili di resistenza di punta corretta normalizzata (q_{c1N}) e di resistenza equivalente per sabbie pulite (q_{c1N}_{cs}), quest'ultimo necessario per poter applicare a sabbie limose i metodi predisposti per sabbie pulite, il grafico g) contiene i profili del rapporto di tensione ciclica (CSR), ovvero dell'azione sismica attesa, e del rapporto di resistenza ciclica (CRR), quest'ultimo evidentemente limitato ai soli livelli potenzialmente liquefacibili, il grafico h) mostra il profilo del fattore di sicurezza alla liquefazione (FSL), ed infine il grafico i) rappresenta la funzione cumulata dell'indice del potenziale di liquefazione (P_L).

Note le coordinate delle verticali di esplorazione ed il valore dell'indice del potenziale di liquefazione ad esse associato, sono stati costruiti, il piano quotato e le linee equipotenziali relative alla procedura di Robertson e Wride, (1997) (Figura 4).

Tabella 1- Indice di liquefazione e livello di rischio associato

| Valore di P_L | Rischio di liquefazione |
|-------------------|-------------------------|
| $P_L = 0$ | molto basso |
| $0 < P_L \leq 5$ | basso |
| $5 < P_L \leq 15$ | alto |
| $15 < P_L$ | molto alto |

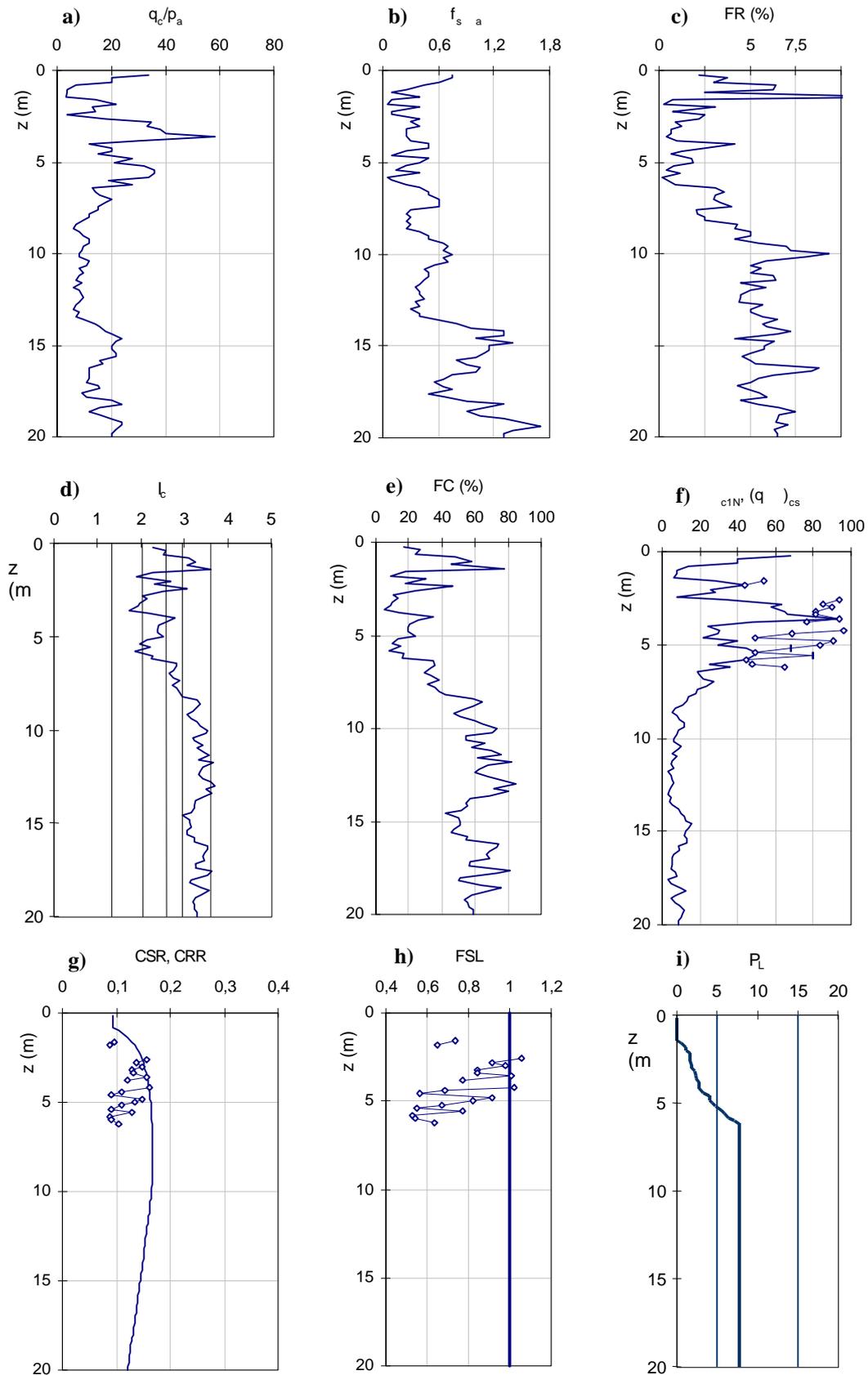


Figura 3 : Grafici dei profili dei dati e dei risultati ottenuti per una delle 1009 prove CPT: a) resistenza di punta normalizzata (q_c/p_a), b) resistenza d'attrito normalizzata (f_s/p_a), c) rapporto d'attrito (FR), d) indice del tipo di terreno (I_c), e) contenuto di fini (FC), f) resistenza di punta corretta normalizzata (q_{c1N}) e resistenza equivalente per sabbie pulite (q_{c1N}_{cs}), g) rapporto di tensione ciclica (CSR) e rapporto di resistenza ciclica (CRR), h) fattore di sicurezza alla liquefazione (FSL), i) indice del potenziale di liquefazione (P_L).

RISULTATI DELLA RICERCA: LA CARTA DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE

La carta del rischio di liquefazione ottenuta è riportata in Figura 4, per l'intera area in studio (da Cesenatico a Riccione), ed in Figura 5, per il tratto di costa tra Cesenatico e Igea Marina (particolare). Nella stessa carta sono riportate le tracce delle verticali esplorate con le prove CPT. Si può osservare che la densità dei punti di indagine non è uniforme e quindi l'accuratezza del risultato è variabile da zona a zona. Il tratteggio rosso corrisponde al livello di rischio alto, il tratteggio verde a livelli di rischio basso. Il colore bianco significa rischio assente (dove esistono informazioni) ovvero rischio non valutabile in quanto non esistono informazioni.

Come si può osservare, il rischio non è uniforme e si concentra principalmente lungo il cordone litorale. A parte alcune aree circoscritte in cui il livello di rischio è 'alto', spesso in corrispondenza dello sbocco a mare dei corsi d'acqua, il livello è complessivamente 'basso', anche se le differenze di livello di rischio sono meno accentuate di quanto non appaia dalla carta, poiché la classificazione del rischio di Iwasaki (Tabella 1) non prevede una classe intermedia fra quelle di rischio basso e di rischio alto.

Dalle Figure 4 e 5, in cui sono state sovrapposte le aree abitate con le zone a rischio, si può vedere che l'area a rischio è densamente abitata, e dunque, i danni attesi durante un terremoto forte sono non gravi ma molto diffusi, e quindi in termini globali elevati.

Per indagare la possibilità che alcune litologie presentino caratteristiche più predisponenti di altre al verificarsi di fenomeni di liquefazione, occorre confrontare la carta del potenziale di liquefazione con quella delle unità litologiche (Figura 2; derivata da: Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio n. 256 Rimini, Regione Emilia-Romagna - Servizio Geologico d'Italia, in corso di stampa). Il risultato più evidente è che la classe litologica più esposta a essere sede di fenomeni di liquefazione, seppure mediamente con rischio basso e solo localmente con rischio alto, è quella indicata con il simbolo **It**. Tale unità, costituita dalle sabbie di cordone litorale, di granulometria fine e media, con spessore da 4 a 12 m che aumenta verso il mare, è un corpo nastriforme praticamente tutto esposto al rischio di liquefazione. Solo localmente presenta delle aree con rischio assente, ma forse più per insufficienza di informazione che per le condizioni del terreno.

Anche la classi litologiche indicate con i simboli **ca** e **tr** risultano, seppure limitatamente ad alcune zone e con livelli di rischio basso, esposte al rischio di liquefazione, non solo per la presenza di alternanze di sabbie fini e finissime, ma anche perché essendo tali litologie riscontrabili in prossimità di canali e rotte fluviali, la falda è spesso molto vicina al piano campagna. La classe **ca**, costituita da alternanze di sabbie fini e finissime spesso limose, e da depositi di argine, canale e rotta fluviale risulta solo localmente esposta (vedi ad esempio l'area di Gambettola). Infatti questa stessa litologia, in altre zone dove pure c'è un buon livello di informazione, risulta a rischio assente. Anche la litologia **tr** costituita da sabbie, limi e argille e da depositi di tracimazione fluviale presenta livelli di rischio differenziati nelle diverse zone, ma in generale il livello di informazione è, soprattutto nelle aree interne piuttosto scarso. Si può concludere che per queste unità geologiche una correlazione litologia-rischio di liquefazione non è di fatto, allo stato delle conoscenze, proponibile.

CONCLUSIONI

Per concludere, si può dire che, nell'area del territorio riminese e forlivese ricadente nel foglio IGMI 1:50.000 n. 256, sulla base delle conoscenze sismiche e geotecniche attualmente disponibili: 1) Esistono le condizioni sismiche e geotecniche perché si verificano fenomeni di liquefazione. 2) Il rischio di liquefazione è disuniforme, concentrato in alcune zone, soprattutto lungo il cordone litorale, è di livello generalmente 'basso', e in qualche zona circoscritta, di livello 'alto'. 3) L'assenza di rischio è spesso solo apparente, poiché legata più alla scarsità o all'assenza di informazione che all'assenza di condizioni predisponenti del terreno; perciò la carta del rischio dovrebbe essere aggiornata man mano che si acquisiscono informazioni sulle condizioni del terreno (stratigrafiche, idrogeologiche e geotecniche). 4) La litologia più esposta al rischio di liquefazione è quella delle sabbie del cordone litorale ma anche i depositi di argine e fluviali, benché non esista una diretta correlazione, presentano condizioni predisponenti al rischio di liquefazione. 6) Nel territorio più esposto al rischio di liquefazione la densità abitativa è molto alta e quindi il danno temuto in termini economici globali è di fatto elevato, in quanto i danni alle costruzioni e alle infrastrutture durante un terremoto forte potrebbero essere diffusi e quantitativamente ingenti. 7) La città di Rimini, che custodisce beni storici, artistici e monumentali di grandissimo valore, è esposta in gran parte al rischio di liquefazione.

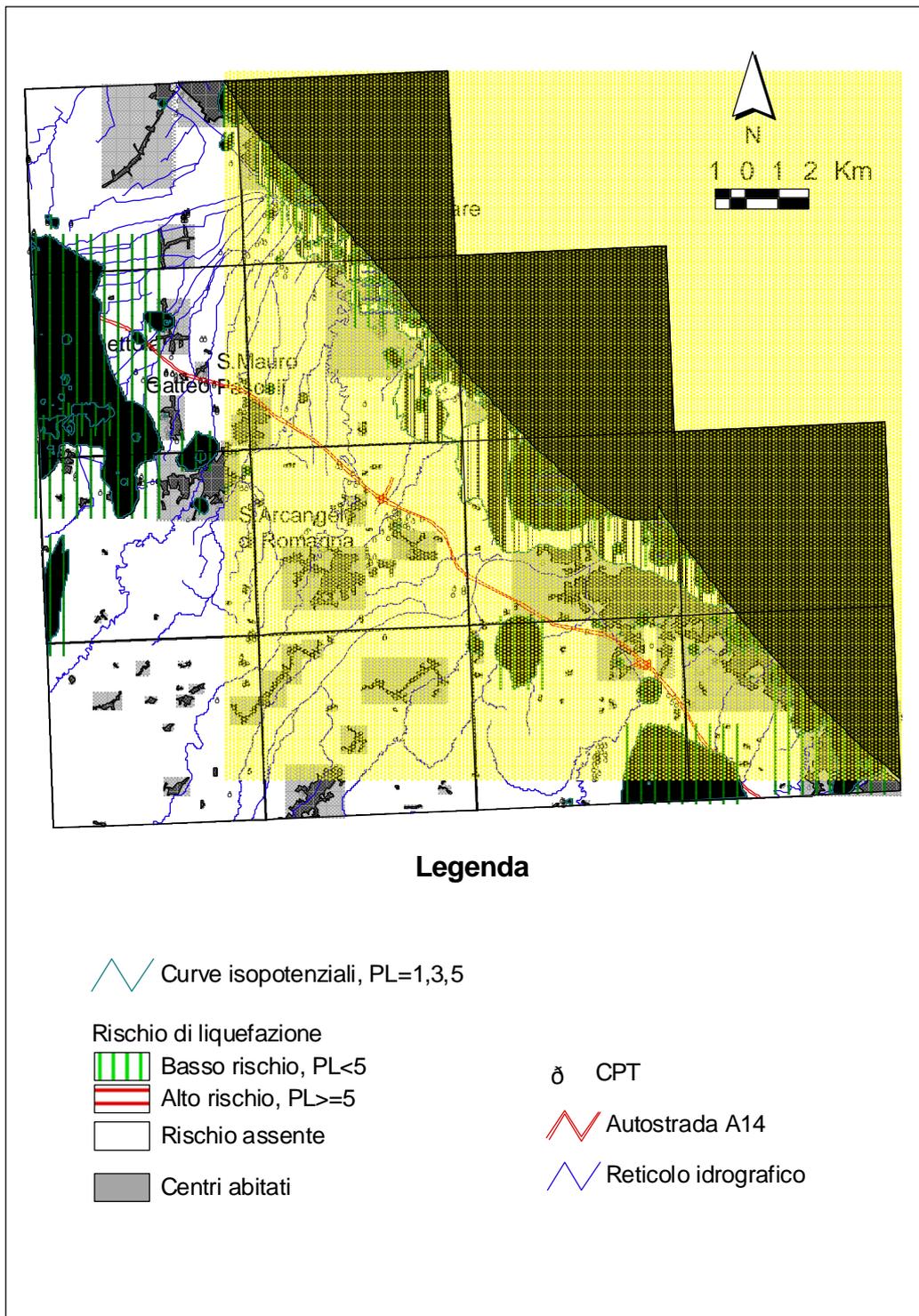


Figura 4: Carta del rischio di liquefazione per l'intera area in studio (da Cesenatico a Riccione)

Figure 4: Map of liquefaction risk of the whole examined area (from Cesenatico to Riccione)

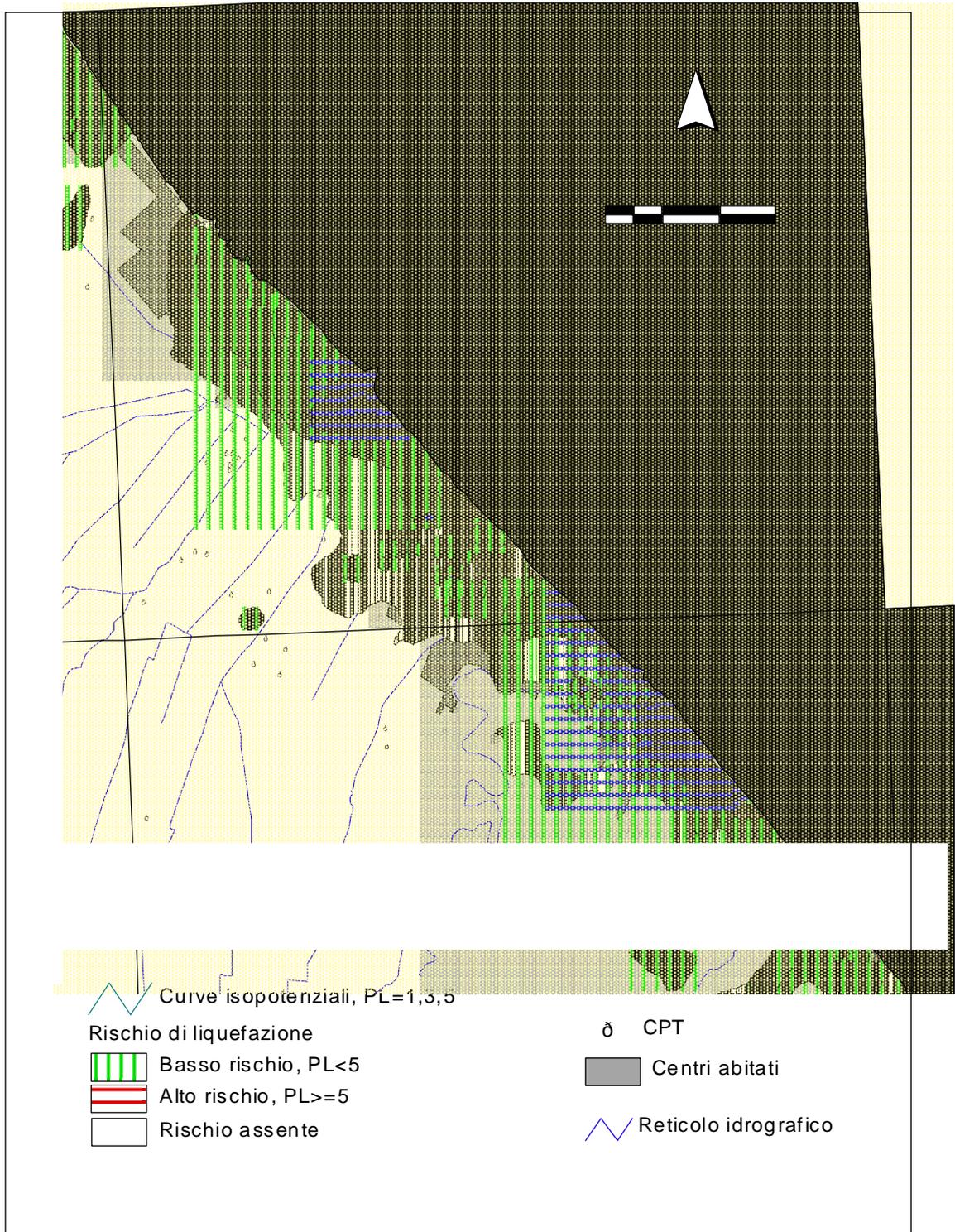


Figura 5: Carta del rischio di liquefazione del tratto di costa tra Cesenatico e Igea Marina (particolare)

Figure 5: Map of liquefaction risk of the section between Cesenatico and Igea Marina (detail)

BIBLIOGRAFIA

- CRESPELLANI T., MADIAI C., VANNUCCHI G (1999) – *Zoning for liquefaction risk in an Italian coastal area using CPT* Proc of 2nd Int. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering, Lisbon, Portugal, June 21-25
- CRESPELLANI T., MADIAI C., VANNUCCHI, G., MARCELLINI, A., MARTELLI, L., FRASSINETI, G. (1997a) - *Analisi del rischio di liquefazione nell'area costiera fra Cesenatico e Bellaria - Igea Marina*. Geologia delle Grandi Aree Urbane, Progetto Strategico CNR, Bologna, 4-5 novembre 1997
- CRESPELLANI T., MADIAI C., VANNUCCHI G. (1997b) - *Valutazione del potenziale di liquefazione di vaste aree mediante prove CPT*. Atti del VIII° Convegno Naz, "L'Ingegneria Sismica in Italia", vol. 3, Taormina
- FRASSINETI G., MARCELLINI A., MARTELLI L., PAGANI M., PALUMBO A., RIVA F., TENTO A., VIEL G. (1997) – *La microzonazione sismica nella pianificazione urbanistica e territoriale: l'esperienza del "Masterplan" del Rubicone e prospettive regionali*. Geologia delle Grandi Aree Urbane, Progetto Strategico CNR, Bologna, 4-5 novembre 1997
- GALLI P., MELONI F. (1993) - *Nuovo catalogo nazionale dei processi di liquefazione avvenuti in occasione dei terremoti storici in Italia*. Il Quaternario, 6 (2), 271-292
- GUIDOBONI E., FERRARI G. (a cura di) (1986) – *Il terremoto di Rimini e della costa romagnola: 25 dicembre 1786. Analisi e interpretazione*. Regione Emilia-Romagna, Provincia di Forlì, Comune di Rimini. SGA, Bologna
- IWASAKI T., TATSUOKA F., TOKIDA K., YASUDA S. (1978) - *A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan*. Proc. 2nd Int. Conf. on Microzonation for Safer Construction - Research and Application, San Francisco, California, vol. 2, 885-896
- MARCELLINI A., DAMINELLI R., PAGANI M., RIVA F., CRESPELLANI T., MADIAI C., VANNUCCHI G., FRASSINETI G., MARTELLI L., PALUMBO D., VIEL G. (1998). - *Seismic microzonation of some Municipalities of the Rubicone area (Emilia-Romagna Region)*. 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, 6-11 September
- PERUZZA L., MONACHESI G., REBEZ A., SLEJKO D, ZERGA A. (1996) - *Specific macroseismic intensity attenuation of the seismogenic sources, and influences on hazard estimates*. In: Thorkelsson B. (ed), Seismology in Europe, Icelandic Meteorological Office, Reykjavik, pp. 373 - 378.
- POSTPISCHL D. (Ed.) (1985) - *Atlas of isoseismal maps of Italian earthquakes*. C.N.R. - P.F.G., Quad. "La ricerca scientifica", 114, 2A, Bologna
- REBEZ A., PERUZZA L., SLEJKO D. (1996) - *Characterization of the seismic input in the seismic hazard assessment of Italian territory*. In: Thorkelsson B. (ed), Seismology in Europe, Icelandic Meteorological Office, Reykjavik, pp. 327 - 332.
- RER-ENI Agip (1998) – *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna..* A cura di G. Di Dio, Regione-Emilia-Romagna – ENI Divisione Agip. S.EL.CA, Firenze, 120 pp.
- ROBERTSON P.K., WRIDE (FEAR), C.E. (1997) - *Cyclic liquefaction and its evaluation based on SPT and CPT*. Final Contribution to the Proc. of the 1996 NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance, Salt Lake City, Utah
- SERPIERI, A. (1889) - *Scritti di sismologia, Parte II, I terremoti del 18 Marzo 1875 e del 28 Luglio 1883*. Tipografia Editrice Calasanziana, Firenze