

*Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2008 - IARG 2008  
Catania, 15-17 Settembre 2008*

## **CALCOLO DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE SU VASTA SCALA: APPROCCIO DETERMINISTICO E APPROCCIO PROBABILISTICO**

Johann Facciorusso

*Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze*

[johannf@dicea.unifi.it](mailto:johannf@dicea.unifi.it)

### **Sommario**

Per la stima del potenziale di liquefazione nelle grandi aree sono in genere preferibili i metodi semplificati basati sui risultati di prove in sito, considerata la ampiezza delle aree in esame, le finalità dello studio (ad esempio la definizione di mappe di pericolosità di liquefazione da utilizzare nella pianificazione territoriale e nelle operazioni di mitigazione del rischio sismico) e la numerosità delle prove in sito in genere disponibili. I metodi semplificati possono essere applicati seguendo due differenti tipi di approccio: l'approccio deterministico e l'approccio probabilistico. Tra i metodi semplificati, basati sulle prove CPT, sono stati scelti quello proposto da Robertson e Wride, nella versione di Youd et al. (2001), al quale sono state apposte nell'ambito di tale applicazione alcune modifiche, e il metodo formulato da Moss (2003). Per esprimere in maniera sintetica e cumulata il potenziale di liquefazione dell'intera verticale esplorata è stata utilizzata, per l'approccio deterministico, l'espressione dell'indice del potenziale di liquefazione, LPI, proposta da Iwasaki et al. (1982) e modificata nel presente studio. Seguendo invece l'approccio probabilistico è stato introdotto un nuovo indice di probabilità di liquefazione, LPbl. I valori così calcolati del potenziale di liquefazione cumulato secondo i due approcci, sono stati poi confrontati e utilizzati per la definizione di mappe della pericolosità di liquefazione, definita secondo i criteri di classificazione proposti in letteratura.

### **1. I metodi semplificati: approccio deterministico e probabilistico**

Nella comune pratica ingegneristica l'approccio prevalente per la valutazione del potenziale di liquefazione, specie per analisi di microzonazione eseguite su vasta scala, è quello basato sui metodi semplificati, che consistono nell'applicazione di correlazioni empiriche tra osservazioni di casi reali di liquefazione (e non liquefazione), effettuate in seguito a terremoti di cui si hanno sistematiche e dettagliate descrizioni, e i corrispondenti parametri del terreno misurati con le prove geotecniche in sito di tipo corrente (quali il numero di colpi  $N_{SPT}$ , la resistenza alla punta  $q_c$ , l'attrito laterale  $f_s$  o la velocità delle onde  $S$ ,  $V_s$ ) e che sono in qualche misura rappresentativi della resistenza del terreno alla liquefazione sismica. Nel presente studio è stato utilizzato un ampio database geotecnico (caratterizzato da più di 7300 verticali distribuite su una vasta porzione, di circa 1300 km<sup>2</sup>, della costa Adriatica nord-occidentale) messo a disposizione dalla Regione Emilia-Romagna; tra le prove disponibili sono state scelte le prove CPT, sia per la loro numerosità, densità e copertura dell'area oggetto di studio, che per la natura continua della prova.

I metodi semplificati possono essere applicati seguendo due differenti tipi di approccio: l'approccio deterministico e l'approccio probabilistico. Nell'approccio deterministico, in primo luogo, la curva di resistenza alla liquefazione (o curva di stato limite) che esprime la

resistenza del terreno, in termini di rapporto di tensione ciclica (CRR) in funzione del parametro misurato (con le opportune correzioni e normalizzazioni), viene determinata tracciando una curva che discrimina i casi di liquefazione osservati da quelli di non liquefazione, in modo quasi interamente “visuale”, senza alcun trattamento probabilistico dei dati. In secondo luogo, il verificarsi o meno della liquefazione viene predetto calcolando il *fattore di sicurezza FSL*, inteso come rapporto tra la resistenza alla liquefazione del terreno (CRR) e la domanda sismica corrispondente al terremoto atteso di progetto, anch’essa espressa come rapporto di tensione ciclica (CSR), e valutando se esso sia minore di uno (liquefazione) o maggiore di uno (non liquefazione). Nell’approccio probabilistico si considera simultaneamente l’influenza di più variabili (ciascuna trattata come grandezza aleatoria) in grado di contribuire alla liquefazione, si stimano e riducono le incertezze riguardanti gli errori di misura e le imperfezioni del modello adottato e, tramite modelli più o meno complessi, vengono ottenute infinite curve di resistenza alla liquefazione, ciascuna corrispondente a una differente probabilità di inizio liquefazione. In tal caso il potenziale di liquefazione di un terreno, sempre in relazione a un evento sismico prefissato, può essere descritto in termini di *probabilità di inizio di liquefazione, P<sub>L</sub>*.

## 2. Il metodo di Robertson e Wride modificato (deterministico), il metodo di Moss (probabilistico) e loro applicazioni

Tra i metodi di concezione deterministica è stato applicato nel presente studio il metodo proposto da Robertson e Wride nella sua forma più aggiornata (Youd et al., 2001), apportando, sulla base delle più recenti ricerche condotte sull’argomento, alcune ulteriori modifiche sia nella formulazione della resistenza alla liquefazione, CRR, (alla quale è stato apportato un fattore correttivo  $k_s$  come suggerito da Youd et al., 2001) che nell’utilizzo di quest’ultima per il calcolo del potenziale di liquefazione (come verrà di seguito illustrato).

Tra i numerosi metodi “probabilistici” messi a punto negli ultimi anni, è stato scelto quello proposto da Moss (2003) per l’ampiezza del database su cui è calibrato, l’affidabilità dei dati in esso contenuti, i robusti strumenti probabilistici adottati (First Order Reliability Method) e la definizione all’interno del modello, mediante regressione dei dati osservati, di nuove formulazioni dei fattori correttivi della resistenza di punta, del fattore di scala della magnitudo, MSF, e del fattore di riduzione della risposta sismica con la profondità,  $r_d$ . L’equazione finale che il metodo propone per determinare la probabilità di inizio liquefazione, modificata per eventi di magnitudo 7.5, è di seguito riportata:

$$P_L = \Phi \left\{ \frac{[q_{c,1}^{1.045} + q_{c,1}(0.110 \cdot R_f) + 0.001 \cdot R_f + c \cdot (1 + 0.850 \cdot R_f)] - 7.177 \cdot \ln(CSR_{7.5}) - 0.848 \cdot \ln(7.5) - 0.002 \cdot \ln(\sigma'_v) - 20.923}{1.632} \right\} \quad (1)$$

dove  $R_f$  è il rapporto di attrito ( $f_s/q_c$ ) espresso in percentuale,  $\sigma'_v$  la tensione efficace verticale (espressa in kPa)  $\Phi$  rappresenta la funzione di probabilità cumulata relativa a una distribuzione normale standard,  $q_{c,1}$  la resistenza alla punta normalizzata rispetto la tensione litostatica (con coefficiente di normalizzazione  $c$ ). La domanda sismica  $CSR_{7.5} = CSR/MSF$  è riferita all’ evento sismico atteso di magnitudo 7.5.

Per meglio estrinsecare le potenzialità dei due metodi in questione e per rendere più completo il confronto fra i risultati da essi ottenuti in termini di potenziale di liquefazione, si è deciso di applicare il metodo di Robertson e Wride anche in termini probabilistici e quello di Moss in termini deterministici. Per applicare il metodo di Robertson e Wride in modo probabilistico ed assegnare quindi a ciascun strato di terreno investigato anche una probabilità di inizio di liquefazione, è stata messa a punto da Juang et al. (2002) una procedura che ha consentito di tracciare le curve di resistenza alla liquefazione per differenti livelli di probabilità e di descrivere il fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione, FSL, calcolato secondo il

metodo di Robertson e Wride, in funzione della probabilità di inizio di liquefazione, secondo l'equazione:

$$P_L = \frac{1}{1 + \left(\frac{FSL}{A}\right)^B} \text{ con } A = 1.0; B=3.3 \quad (2)$$

Come risulta evidente anche dalla equazione (2), la curva di stato limite proposta da Robertson e Wride corrisponde ad una probabilità  $P_L = 50\%$ .

Per applicare il metodo di Moss in maniera deterministica è sufficiente invertire la formula (1) sopra riportata per il calcolo della probabilità e determinare il valore limite della domanda sismica,  $CSR_{7.5}$ , quindi della resistenza alla liquefazione,  $CRR_{7.5} = CSR_{7.5}$  corrispondente a un prefissato livello di probabilità, che Moss (2003) suggerisce, per un'applicazione deterministica del suo metodo, intorno al 15% e che, per ragioni che verranno di seguito esposte, è stato assunto pari al 25%. Dividendo la resistenza così ottenuta per la domanda sismica si ottiene il fattore di sicurezza FSL.

### 3. Calcolo del potenziale di liquefazione per ciascuna verticale esaminata in termini deterministici (indice del potenziale di liquefazione) e probabilistici (indice di probabilità di liquefazione)

Applicando i metodi sopra citati, una volta definito l'evento sismico atteso di riferimento, è possibile stimare, per ciascuno strato di terreno attraversato dalle prove CPT prese in esame, il potenziale di liquefazione (in termini deterministici in funzione del fattore di sicurezza, FSL o in termini probabilistici come probabilità di inizio liquefazione,  $P_L$ ). Per esprimere, in maniera sintetica e cumulata, il potenziale di liquefazione dell'intera verticale esplorata, e quindi del deposito a cui fa riferimento, è stata utilizzata, per l'approccio deterministico, l'espressione dell'indice del potenziale di liquefazione, LPI, proposta da Iwasaki et al. (1982):

$$LPI = \int_{20}^0 F(z) \cdot W(z) dz \quad (3)$$

dove  $W(z) = 10-z/2$  è una funzione di pesi che tiene in conto la profondità dello strato liquefacibile e la funzione  $F(z)$  esprime il potenziale di liquefazione per ciascun strato e viene calcolata in funzione del fattore di sicurezza, assumendolo pari a zero in caso di non liquefazione e pari a  $1-FSL$  in caso di liquefazione. A differenza della formulazione originaria, la soglia discriminante per FSL tra liquefazione e non liquefazione è stata portata, solo per il metodo di Robertson e Wride, da 1 a 1.4 in quanto, come già sopra osservato, tale metodo non risulta affatto conservativo (ma corrisponde al 50% di probabilità di liquefazione, cioè uguale probabilità di liquefazione o non liquefazione) mentre da un punto di vista ingegneristico si tende ad assumere delle scelte spesso più conservative basate sul rischio (risk based design) che tengano conto anche delle strutture da salvaguardare. Ad esempio, con riferimento alla carta di classificazione della probabilità di liquefazione proposta da Chen e Juang (2000) e riportata nella legenda di Figura 4, il Building Seismic Safety Council raccomanda la prima classe per le strutture strategiche e la seconda per quelle ordinarie, ciò significa che il livello di salvaguardia da garantire per le strutture ordinarie, come quelle ricadenti nell'area in esame, corrisponde ad una probabilità media del 25% (liquefazione improbabile), a cui corrisponde, applicando la (2), una soglia di 1.4 per FSL. La formulazione di  $F(z)$  risultante, ispirandosi alla forma proposta da Sonmez et al. (2003), è:

$$F(z) = \begin{cases} 0 & \text{per } FSL > 1.4 \\ 2 \cdot 10^6 e^{-18.427 \cdot FSL} & \text{per } 0.95 < FSL \leq 1.4 \\ 1 - FSL & \text{per } FSL \leq 0.95 \end{cases} \quad (4)$$

Nel caso della probabilità di liquefazione è stato introdotto un nuovo indice, LPbI, che, come l'analogo indice LPI, desse una misura globale e cumulativa della probabilità di liquefazione corrispondente all'intera verticale esaminata, ed è stato ottenuto ponendo il potenziale di liquefazione  $F(z)$  che compare nella (3) uguale alla probabilità di inizio liquefazione  $P_L(z)$ .

#### 4. Mappe della pericolosità di liquefazione in termini deterministici e probabilistici

L'area oggetto di studio si estende per circa 1300 km<sup>2</sup> lungo la costa Adriatica settentrionale includendo tutti i comuni costieri compresi tra Ravenna e Cattolica ed è evidenziata in Fig. 1 insieme alla litologia superficiale e all'ubicazione delle prove in sito utilizzate per l'analisi.

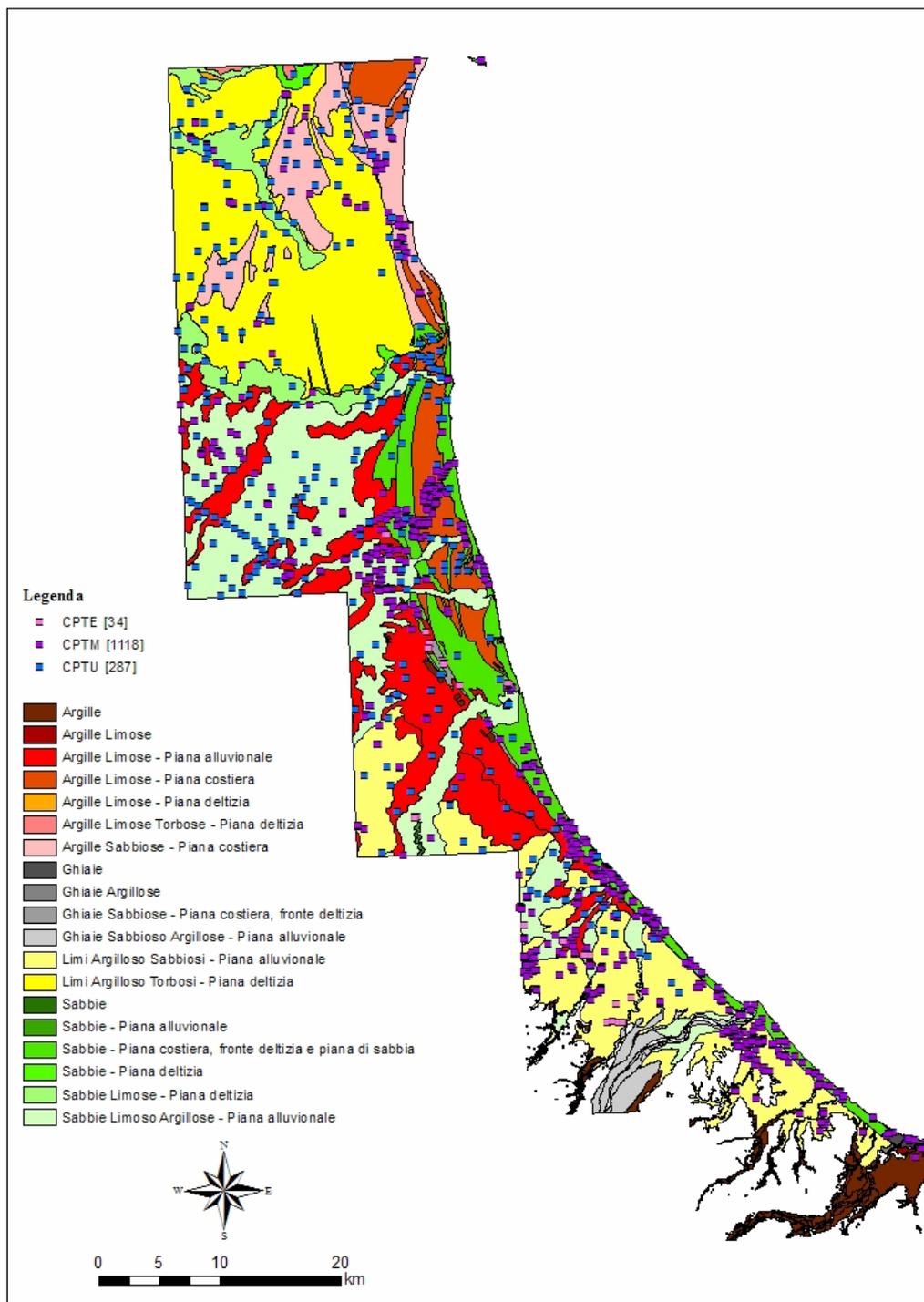


Figura 1. Carta litologica dell'area in esame e ubicazione delle prove CPT (elettriche, CPTe, meccaniche, CPTM e con piezocono, CPTU)

Come evidenziato nella Figura, la gran parte delle prove utilizzate sono concentrate in una ristretta area costiera (a meno di 1 km dalla linea di costa), mentre un numero limitato di esse si distribuisce fino a una distanza massima di 20 km dalla linea di costa. Da un punto di vista geologico, le litologie affioranti nell'area investigata sono quasi interamente riconducibili ad una medesima unità stratigrafica (comprendente depositi litorali, fluviali e deltizi), relativamente superficiale e recente (pleistocene superiore-olocene), con uno spessore inferiore a venti metri e poggiante su uno strato di sedimenti alluvionali (argille e limi di piana). Nella parte settentrionale dell'area, tale unità risulta ancora più recente ed esigua in spessore (con un valore massimo di circa 10 metri) e caratterizzata da significativi e frequenti strati ghiaiosi. La carta litologica riportata in Figura 1 mette in evidenza come, procedendo dalla costa verso l'interno, si distinguono due zone di interesse per questo studio: una fascia costiera (dove si concentra la maggior parte delle prove) costituita prevalentemente da sabbie litorali nella sua parte centro-meridionale e da argille torbose di origine deltizia, nella parte settentrionale; una fascia intermedia immediatamente più interna costituita da limi argilloso-torbosi di piana deltizia, nella parte settentrionale (che si spinge molto verso l'interno) e da limi argilloso-sabbiosi di piana alluvionale, nella parte meridionale.

Per la definizione dell'azione sismica di progetto si è fatto riferimento a quanto previsto dalla normativa nazionale vigente in materia antisismica (D.M. 14.01.2008) ed ai più specifici indirizzi regionali forniti dalla Regione Emilia-Romagna (D.R. 02.05.2007). L'azione sismica di progetto, per ciascuno dei siti esaminati, è riferita ad un periodo di ritorno di 475 anni; la magnitudo momento assunta per l'evento atteso,  $M_w$ , varia intorno a 5.9 per la parte centrale e meridionale (zona sismica 2), mentre varia tra 5 e 5.2 nella parte più settentrionale (zona sismica 3); il picco di accelerazione massima orizzontale atteso al suolo,  $PGA_{max}$ , varia invece tra un minimo di 0.128 g e 0.317 g, con i valori più bassi nella parte più settentrionale.

### 5. Analisi dei risultati e conclusioni

Con riferimento all'approccio deterministico, in Figura 2a sono confrontati i valori dell'indice del potenziale di liquefazione  $LPI_{R\&W}$  ottenuti, per ciascuno dei siti esaminati, col metodo deterministico di Robertson e Wride, modificato nel presente studio, e i corrispondenti valori,  $LPI_{Moss}$  ottenuti applicando il metodo probabilistico di Moss in versione "deterministica": appare evidente come il metodo di Moss sovrastimi sistematicamente i valori di LPI rispetto a quello di Robertson e Wride, determinando in alcuni casi anche una transizione verso una o addirittura due classi superiori (in entrambi i casi non si raggiunge mai la classe più alta), secondo la classificazione proposta da Sonmez (2003).

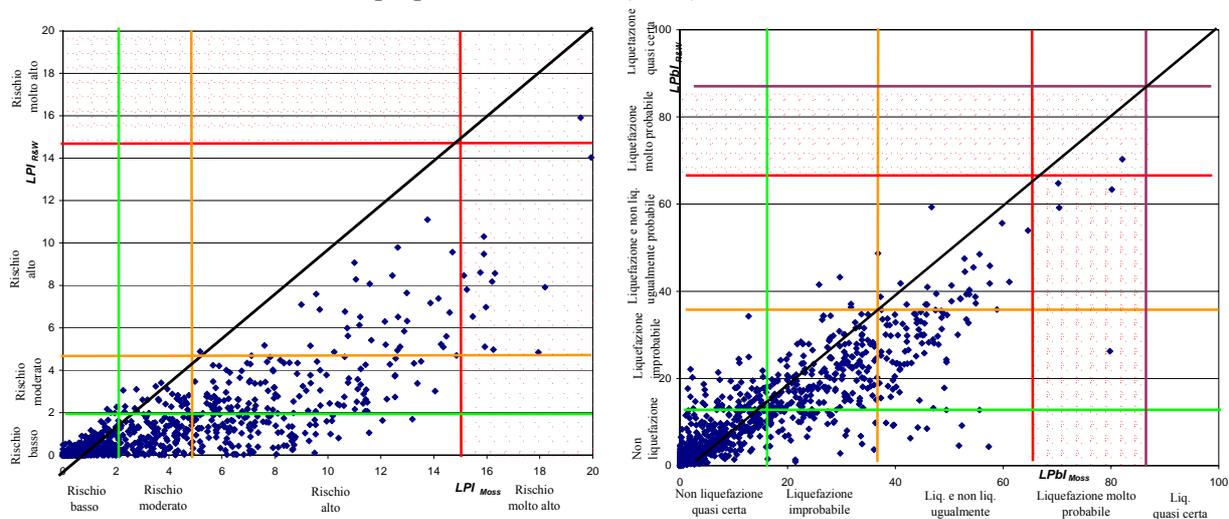


Figura 2. Confronto tra i valori dell'indice del potenziale di liquefazione  $LPI$  (a) e di probabilità di liquefazione  $LPbI$  (b) calcolati partendo dal metodo di Robertson e Wride e dal metodo di Moss.

Un analogo andamento (Fig. 2b) può essere rilevato in termini di indice di probabilità di liquefazione,  $LPbI_{R\&W}$  e  $LPbI_{Moss}$ , anche se in maniera meno evidente, essendovi anche molti casi in cui il metodo di Moss sottostima il valore di  $LPbI$  rispetto a quello di Robertson e Wride, seppur limitatamente a valori bassi di probabilità (anche in termini di probabilità non si raggiungono mai le classi più alte, riportate secondo la classificazione di Chen e Juang, 2000). Le discrepanze osservate, che rivelano come il metodo di Moss sia sistematicamente più cautelativo di quello di Robertson e Wride, sono attribuibili al fatto che, come già ricordato, il metodo di Moss introduce nuovi fattori correttivi per la resistenza alla punta e per la magnitudo che richiedono maggiori approfondimenti, specie per le notevoli differenze rispetto a quelli comunemente adottati dalla comunità scientifica (Youd et al., 2001).

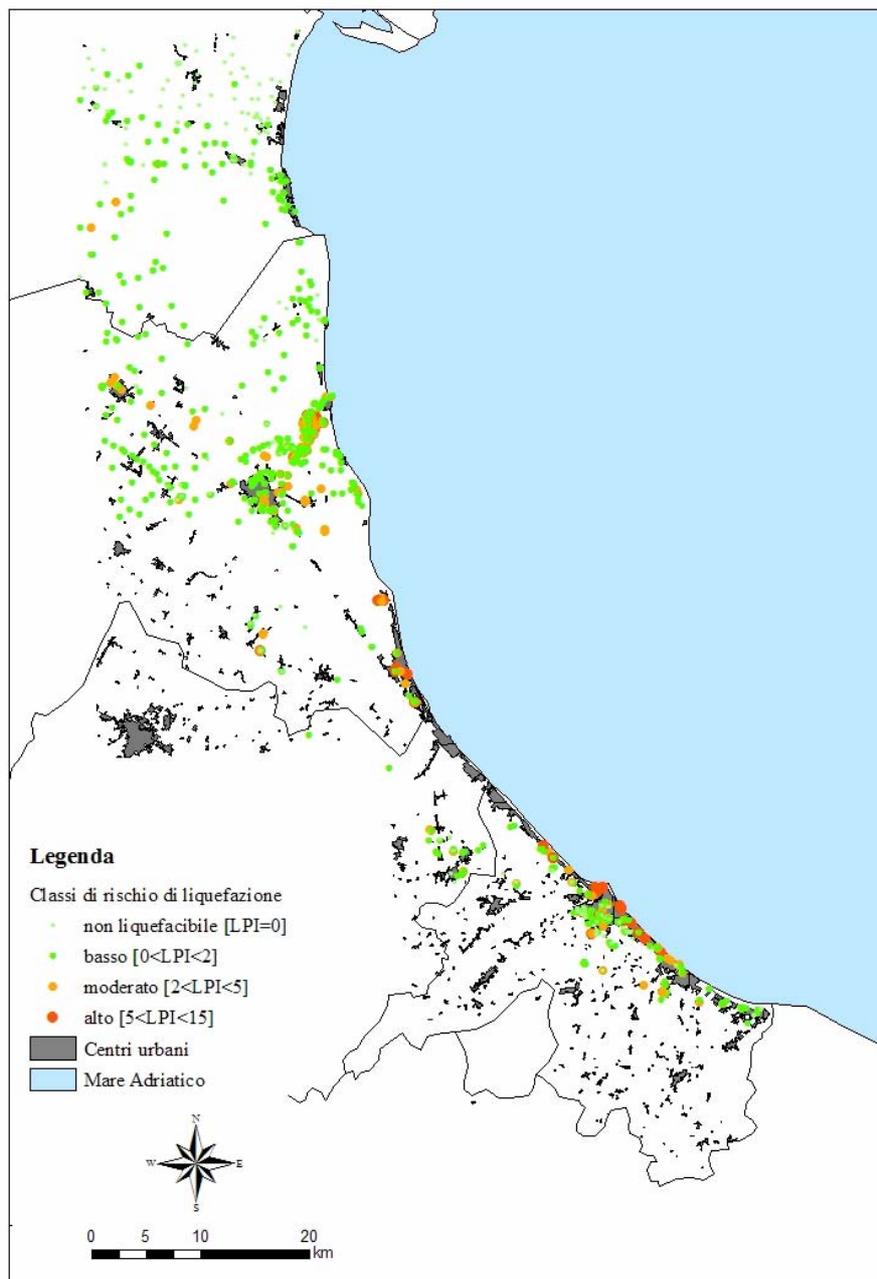


Figura 3. Mappa di pericolosità sismica espressa secondo l'approccio deterministico in termini di indice del potenziale di liquefazione, LPI

In particolare il fattore correttivo della resistenza alla punta che tiene conto del contenuto di fini diventa un termine additivo e, specie per terreni sabbiosi con elevato contenuto di fine (e indice di classe  $I_c$  di poco inferiore a 2.6), come quelli che si incontrano con maggiore frequenza nell'area di studio, produce resistenze corrette largamente inferiori a quelle analoghe prodotte dal metodo di Robertson e Wride. Inoltre il fattore di scala della magnitudo MSF, per magnitudo dell'ordine di quelle utilizzate in questo studio (inferiori a 6), è decisamente inferiore (prossimo al limite della fascia suggerita da Youd et al., 2001) rispetto a quello assunto da Robertson e Wride, determinando valori della domanda sismica corretta  $CSR_{7,5}$  notevolmente superiori.

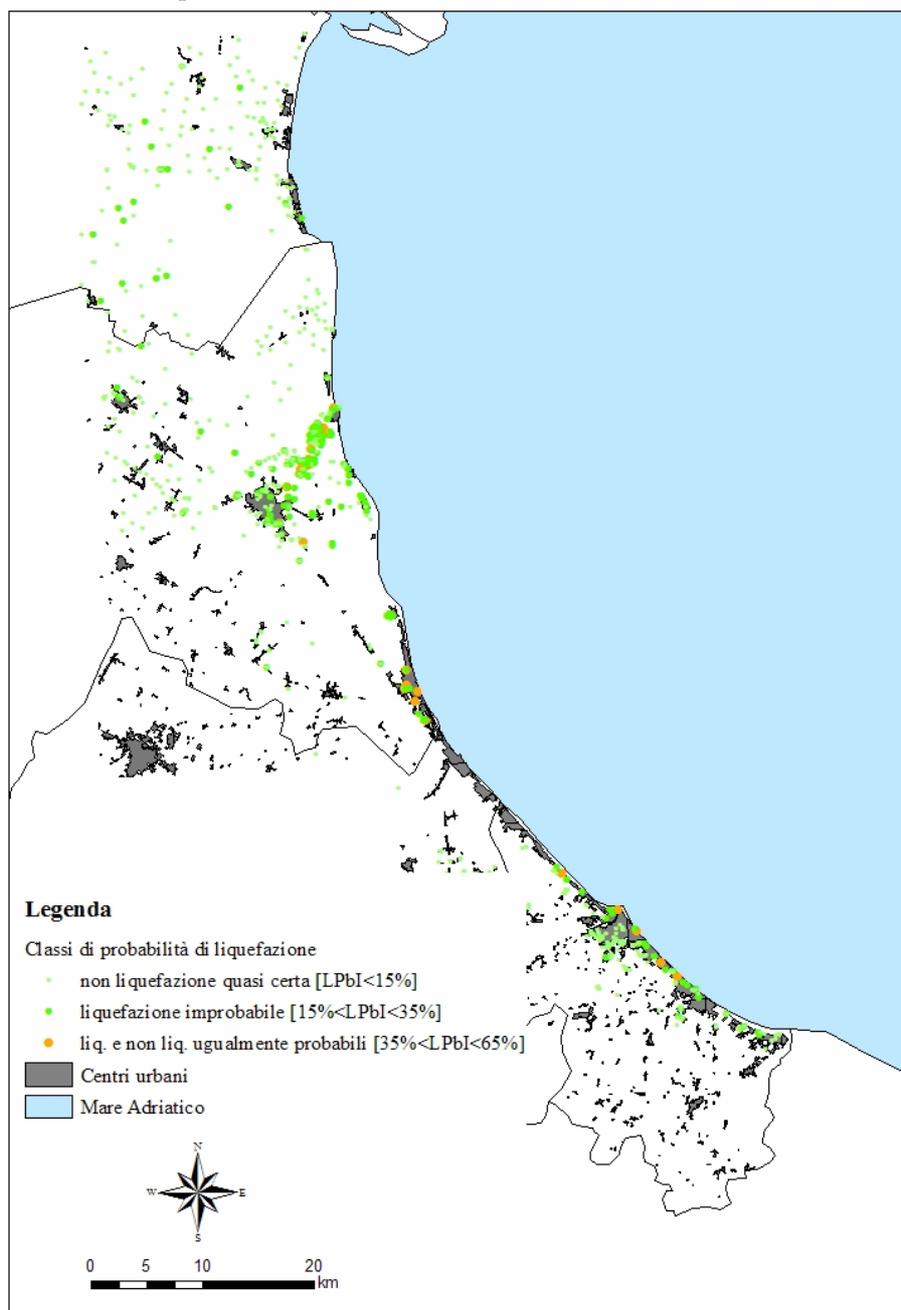


Figura 4. Mappa di pericolosità sismica espressa secondo l'approccio probabilistico in termini di indice di probabilità di liquefazione, LPbI

Ne consegue che, almeno nell'ambito di tale lavoro, si è ritenuto opportuno fornire i risultati ottenuti dal solo metodo di Robertson e Wride, applicato secondo entrambi gli approcci. In particolare nelle Figure 3 e 4 è riportata per l'intera area in esame la mappa di pericolosità

sismica definita utilizzando il metodo di Robertson e Wride, sia secondo l'approccio deterministico, quindi in termini di indice del potenziale di liquefazione LPI, che secondo l'approccio probabilistico, ovvero utilizzando l'indice di probabilità LPbI. Dall'analisi di tali figure si può osservare che è ben identificabile una zona, nella parte alta dell'area studiata, caratterizzata da rischio di liquefazione nullo o basso ( $LPI < 2$ ) e probabilità inferiori al 15% (a causa della scarsa suscettibilità dei terreni alla liquefazione e della minore sismicità); una zona centrale con aree di modesta estensione e ben identificabili a maggior rischio di liquefazione (moderato e alto) e con probabilità che superano anche il 60%, corrispondenti a depositi alluvionali di origine fluviale, anche interni rispetto alla costa, e zone costiere di estensione limitata, mentre la parte restante di costa non presenta rischio molto alto (anche a causa della presenza di strati ghiaiosi superficiali). Infine una parte meridionale caratterizzata da una più estesa area a rischio da moderato ad alto e probabilità localmente superiori al 50% (a causa probabilmente della maggiore uniformità delle sabbie ivi presenti e della sismicità più elevata). In ogni caso su tutta l'area studiata non si raggiunge mai la classe di rischio di liquefazione più alta ( $LPI > 15$ ) e la probabilità di liquefazione è sempre inferiore al 65%. In conclusione, sebbene i metodi probabilistici siano più adeguati nel trattare un problema intrinsecamente incerto come quello della liquefazione e si prestino a una migliore e più utile applicazione ingegneristica, consentendo di esprimere il potenziale di liquefazione con una quantità probabilistica, legata quindi a un livello di incertezza, e quindi di prendere decisioni basate sul livello di salvaguardia che il progettista intende assumere, occorre tuttavia testare e consolidare l'applicazione di tali metodi. Oppure si può ricorrere ai metodi deterministici consolidati e produrne una versione probabilistica, che però, vale la pena di ricordare, è strettamente dipendente dal database da cui è stata ricavata e dalle assunzioni statistiche (coefficienti di variazione) sui parametri che concorrono alla definizione di FSL.

## Bibliografia

- Chen, C. J. and Juang, C. H. (2000). "Calibration of SPT- and CPT-based liquefaction evaluation methods." *Innovations Applications in Geotechnical Site Characterization*, Mayne, P. and Hryciw, R., Eds., *Geotechnical Special Publication No. 97*, ASCE, New York, 49–64.
- D.M. 14.01.2008, Decreto Ministeriale del 14/01/2008, Norme Tecniche per le costruzioni
- D.R. 02.05.2007, Delibera Regionale del 02/05/2007, Indirizzi per gli studi di microzonazione in Emilia-Romagna
- Iwasaki T, Tokida K, Tatsuoka F, Watanabe S, Yasuda S, Sato H (1982) Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods vol 3. In: *Proceedings of 3rd international conference on microzonation*, Seattle, pp 1319–1330
- Juang, C. H., Jiang, T., and Andrus, R. D. (2002). "Assessing probability-based methods for liquefaction evaluation." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 128(7), 580–589.
- Moss, R. E. S. \_2003\_. "CPT-based probabilistic assessment of seismic soil liquefaction initiation." Doctor of Philosophy dissertation, Univ. of California, Berkeley, Calif.
- Seed, H.B., and Idriss, I.M. 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 97(SM9): 1249–1273.
- Sonmez H (2003) Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for liquefaction-prone area (Inegol-Turkey). *Environ Geology* 44(7):862–871
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Liam Finn, W. D., Harder, L. F., Jr., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Laio, S. S. C., Marcuson, III, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., Stokoe, II, K. H. (2001). "Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 127(10), 817–833.