## UN APPROCCIO ALLO STUDIO DEI FENOMENI DI LIQUEFAZIONE CAUSATI DAL TERREMOTO DEL 29 MAGGIO 2012 NEL COMUNE CAVEZZO (MO)

R. Razzano, M.P. Campolunghi

Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, CNR – IGAG, Roma, Italia

**Introduzione.** Durante la sequenza sismica emiliana del maggio-giugno 2012 nei comuni della pianura ferrarese si sono verificati fenomeni di liquefazione, in particolare durante la scossa principale del 20 maggio 2012 (Mw 6.1). Tale fenomeno ha assunto particolare rilevanza a San Carlo frazione del comune di San Agostino e a Mirabello, siti in prossimità dell'epicentro, causando la temporanea inagibilità di alcuni edifici la chiusura di alcune strade e l'interruzione di alcuni servizi per la rottura delle reti di sottoservizi, mentre in occasione della scossa del 29 maggio 2012 (Mw 6.0) tale fenomeno ha riguardato il territorio comunale di Cavezzo (MO) sito ad una distanza di circa 3.9 km dall'epicentro sito nel territorio comunale di Medolla.

L'incremento della sovrappressione neutra indotta da un sisma determina la riduzione della tensione efficace e di conseguenza la perdita di rigidezza e resistenza; il fenomeno della liquefazione dipende dalle caratteristiche geologiche e geotecniche del sottosuolo (presenza di sabbie sciolte sotto falda) e dalle caratteristiche del moto sismico (ampiezza, durata e contenuto in frequenza).

Esistono in letteratura diversi approcci per lo studio del fenomeno che vanno dai metodi semplificati che consistono nell'utilizzo di abachi di natura semi-empirica basati sui lavori proposti da Seed e Idriss (1971) che mettono in relazione la sollecitazione ciclica indotta (CSR, dipendente dalla magnitudo del segnale e dall'accelerazione) con la resistenza ciclica (CRR, dipendente dalla resistenza alla punta o dal numero di colpi della prova SPT).

Altri approcci più raffinati vengono condotti coi metodi propri della dinamica dei terreni con l'ausilio di software che eseguono l'analisi di risposta sismica locale i quali tra l'analisi dinamica semplificata condotta in condizioni monodimensionali in tensioni totali o efficaci integrando, in quest'ultimo caso, le equazioni del moto nel tempo con modelli costitutivi del terreno non lineari; lo sviluppo della sovrappressione neutra indotta è calcolata con ruotine di natura semi-empirica che legano la stessa con il livello deformativo indotto.

Un altro metodo è l'analisi dinamica avanzata che produce in output la distribuzione delle tensioni efficaci, pressioni interstiziali, deformazioni, spostamenti residui e la valutazione del meccanismo di rottura del sistema condotto in condizioni tipicamente bidimensionali (a volte anche tridimensionali) considerando l'accoppiamento tra fase solida e fluida

Quest'ultimo approccio, di notevole complessità numerica, è riservato a studi di particolare importanza (ad esempio le dighe in terra). Lo studio in esame riguarda la modellazione geotecnica del sottosuolo attraverso l'interpretazione delle prove disponibili per riprodurre i fenomeni di liquefazione che hanno interessato il territorio comunale di Cavezzo (MO) utilizzando come moto di input la scossa del 29 maggio 2012 deconvoluta, le analisi verranno affettuate con il metodo dell'analisi dinamica semplificata in tensioni efficaci utilizzando il software monodimensionale Deepsoil 6.0 (Hashash *et al.*, 2015).

**Inquadramento geologico dell'area.** L'area relativa all'epicentro del sisma ricade nel settore centro-settentrionale della pianura emiliana. La morfologia è estremamente regolare con le uniche variazioni altimetriche di 8/10 m rispetto alla pianura circostante, relative a rilevati antropici (strade e ferrovie) e agli argini dei corsi d'acqua. Il sottosuolo è costituito da alternanze di sabbie, limi e argille di origine alluvionale riconducibili al Pleistocene medio – Olocene in cui si individuano due cicli deposizionali di ordine maggiore: il Sistema Emiliano – Romagnolo Inferiore di età compresa tra 450.000/400.000, e il Sintema Emiliano – Romagnolo Superiore di età compresa tra 450.000/400.000 anni e l'Attuale (RER & ENI – Agip, 1998).

Questa successione continentale poggia generalmente su un substrato costituito da depositi marini e transizionali del Pleistocene inferiore e medio, riferibili alle Sabbie Gialle o Sabbie di Imola del margine appenino – padano (RER & ENI – Agip, 1998).

La profondità della base della successione alluvionale varia in funzione della presenza delle Pieghe Ferraresi; nelle aree di sinclinale lo spessore delle alluvioni supera i 500 m mentre nelle aree di anticlinale si riduce fino a 100 m (RER & ENI – Agip, 1998).

Scendendo nel dettaglio dell'assetto relativo ai primi 15-20 m di profondità si individuano tre unità corrispondenti a tre fasi sedimentarie e paleogeografiche ben distinte. L'unità stratigraficamente inferiore appartiene alla successione terminale del Pleistocene e testimonia la diffusione di ambienti di piana alluvionale.

L'unità intermedia, di seguito indicata come "Unità delle paludi", documenta la presenza di ambienti palustri estesi e persistenti ("valli"), in cui sfociavano i fiumi appenninici, sviluppatisi a partire dalla massima trasgressione olocenica in questo settore (datazioni C14 indicano un'età di circa 4400 anni nella porzione inferiore di questa unità, ISPRA, 2009). Questi ambienti, dove non disturbati dall'attività fluviale ed antropica, si sono mantenuti fino all'epoca moderna.

L'unità superiore, "Unità dei canali fluviali", interessata dai fenomeni di liquefazione, è caratterizzata da depositi di canale, argine e rotta e testimonia un'intensa attività fluviale in questi territori. La ricostruzione stratigrafica di dettaglio di questa successione è piuttosto difficoltosa a causa della discontinuità dei corpi e dalle geometrie complesse a "dossi e depressioni", tipiche della piana alluvionale appenninica.

L'assetto idrogeologico relativo a queste tre unità è caratterizzato dalla presenza di un sottile acquifero freatico, spesso una decina di metri circa, sovrapposto ad un complesso sistema multifalda di acquiferi confinati, che prosegue nel sottosuolo per alcune centinaia di metri.

Al di sotto del sottile spessore dell'acquifero freatico sono presenti dei corpi sabbiosi acquiferi, di natura sia appenninica che padana, di ambiente deposizionale fluviale e deltizio, separati tra loro da ingenti spessori di depositi fini che li isolano sia dalla superficie topografica che reciprocamente tra loro. Questa separazione dalla superficie topografica fa sì che le caratteristiche idrogeologiche (livello e qualità) di questi acquiferi siano del tutto diverse rispetto a quelle della falda freatica sovrastante, dalla quale essi sono certamente separati idraulicamente. E' noto che la liquefazione delle sabbie, in seguito ad eventi sismici, avviene entro i primi 15 m circa di profondità, per questo motivo si ritiene che l'influenza degli acquiferi sottostanti all'acquifero freatico, sia pressoché nulla.

Da un punto di vista superficiale è evidente come gli episodi di liquefazione si identifichino in corrispondenza dei "dossi" dell'Unità dei canali fluviali.

In Fig. 1 è presentato il rilievo plano-altimetrico da lidar dell'area di Cavezzo. Si può osservare come i punti di liquefazione (individuati dai triangoli) siano ubicati tutti a quote superiori rispetto al territorio circostante (25 -27 m s.l.m.) lungo gli argini del corso Canalino.

**Metodi di analisi della risposta sismica locale e introduzione a Deepsoil.** Esistono 2 metodi alternativi per condurre l'analisi di risposta sismica locale di un deposito, *l'analisi lineare equivalente* (Seed e Idriss, 1969) viene condotta schematizzando il deposito in strati a comportamento visco-elastico lineare, il software calcola la funzione di trasferimento che moltiplicata per la trasformata di *Fourier* del moto di input fornisce la trasformata stessa in tutti i punti del profilo (prodotto di convoluzione), in pratica essa consiste nel eseguire un numero sufficiente di iterazioni (tipicamente tra 8 e 15) aggiornando al termine di ognuna di essa i valori di rigidezza e smorzamento in funzione di un aliquota del livello deformativo raggiunto all'iterazione precedente, con questo metodo molto utilizzato nella pratica professionale è possibile eseguire anche la deconvoluzione di un moto sismico registrato (ad esempio nel caso di moti sismici registrati su suoli deformabili) in un altro punto del profilo.

Questo tipo di analisi costringe a lavorare in tensioni totali senza quindi tener conto della sovrappressione neutra indotta, tuttavia è possibile determinare la stessa con correlazioni empiriche in funzione della deformazione massima raggiunta (questo valore è tipicamente utilizzato per le verifiche di stabilità post-sisma).

Come detto in precedenza l'utilizzo di questo metodo per la verifica a liquefazione rientra nell'ambito dei metodi di analisi dinamica semplificata valutando il sollecitazione ciclica (CSR)



Fig. 1 – Evidenze di liquefazione a Cavezzo durante la scossa del 29 maggio 2012, i triangoli viola rappresentano i punti dove si sono osservati i fenomeni liquefazione.

dal profilo delle deformazioni tangenziali massime, software che eseguono l'analisi lineare equivalente sono EERA (Bardet *et al.*, 2000), Shake (Schnabel *et al.*, 1972), Shake91 (Idriss e Sun, 1992) e Deepsoil (Phillips e Hashash, 2009).

Con *l'analisi non lineare* (utilizzata nello studio in esame) il deposito viene schematizzato in masse concentrate alla sommità degli strati collegate tra di loro da molle e smorzatori, il software assembla le matrici di massa, rigidezza e smorzamento; la non linearità del legame tensionideformazioni è tenuta in conto attraverso relazioni analitiche che descrivono l'andamento del modulo di rigidezza con la deformazione tangenziale (curva di backbone) e criteri per descrivere i cicli carico e scarico (Masing, 1926).

L'analisi viene condotta aggiornando ad ogni passo temporale la matrice delle rigidezze e per tener conto dello smorzamento a piccole deformazioni (aliquota viscosa), viene introdotta la matrice degli smorzamenti viscosi, a tal fine viene utilizzata la formulazione di Rayleight che assume la matrice stessa come combinazione lineare di quella delle masse e rigidezze fissando il valore di una o più frequenze di controllo.

Questa formulazione conduce a smorzamenti dipendenti dalla frequenza (in contrasto con le evidenze sperimentali nel campo delle frequenze tipiche indotte dai sismi), l'analisi non lineare può essere condotta anche in tensioni efficaci attraverso routine di natura semi-empirica che determina la sovrappressione neutra indotta in funzione del livello deformativo raggiunto.

I software più utilizzati che conducono l'analisi non lineare sono Desra (Lee and Finn, 1978), Dmod (Matasovic, 1993) e Deepsoil (Phillips e Hashash, 2009), il vantaggio dell'utilizzo di Deepsoil è che implementa per l'analisi non lineare dei criteri alternativi a quelli di Masing che sovrastimano lo smorzamento alle alte deformazioni per tener conto dell'indipendenza dello smorzamento viscoso dalla frequenza il software implementa un algoritmo che assembla la matrice stessa indipendente dalla frequenza (Phillips e Hashash, 2009). **Modello geotecnico del sottosuolo.** La modellazione geotecnica del sottosuolo per un'analisi sismica condotta in tensioni efficaci prevede l'individuazione delle successioni stratigrafiche, delle proprietà di rigidezza e smorzamento dei terreni nonché i parametri per la determinazione della sovrappressione neutra indotta

A tal fine sono disponibili 6 prove penetrometriche con penetrometro elettrico, 23 prove penetrometriche meccaniche ed 1 sondaggio stratigrafico fino a 40 m, la sequenza stratigrafica individuata prevede uno strato di copertura composto essenzialmente da limo sabbioso, strato di argilla, sabbia limosa con bassa resistenza alla punta (quindi potenzialmente liquefacibile), strato di argilla sottostante, strato di sabbia mediamente addensata alla profondità di 22 m circa ed argilla fino alla profondità di perforazione, in Tab. 1 è riportata la sequenza stratigrafica individuata, i pesi delle unità di volume e la velocità di propagazione delle onde di taglio entrambe dedotte da correlazioni empiriche con la resistenza alla punta

Tab. 1 - Sequenza stratigrafica per il sito di Cavezzo, pesi delle unità di volume e velocità di propagazione delle onde di taglio.

Terreno	h [m]	γ [kN/m³]	Vs [m/s]
Copertura – Limo sabbioso	2.00	16.0	135
Argilla	3.00	16.5	117
Sabbia limosa	4.20	16.5	135
Argilla	13.30	17.5	196
Sabbia profonda	3.00	18.0	240
Argilla profonda	24.50	18.0	250

Per tener conto della non linearità del legame tensioni-deformazioni il software utilizzato per le analisi (Deepsoil 6.0, Hashash *et al.*, 2015) implementa il modello iperbolico modificato MKZ (Matasovic, 1993) che descrive la curva al primo carico (curva di *backbone*) espressa da:

$$\tau(\gamma) = F_{bb}(\gamma) = \frac{G_{\max} \cdot \gamma}{1 + \beta \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^s}$$

in cui i parametri  $\beta$  ed *s* sono parametri adimensionali di forma tarati per ottenere il miglior *fitting* tra la curva sperimentale e quella teorica,  $\gamma_r$  è la deformazione di riferimento e  $\gamma$  è la deformazione attinta in un generico istante di tempo, per la descrizione dei cicli di caricoscarico il software implementa la formulazione proposta da Phillips e Hashash (2009)

$$\tau(\gamma) = F(\gamma_m) \cdot \frac{2 \cdot G_0(\gamma - \gamma_c)}{1 + \beta \cdot \left(\frac{\gamma - \gamma_c}{2\gamma}\right)^s} - \frac{G_0(\gamma - \gamma_c)}{1 + \beta \cdot \left(\frac{\gamma_m}{2\gamma}\right)^s} + \frac{G_0(\gamma - \gamma_c)}{1 + \beta \cdot \left(\frac{\gamma_m}{2\gamma_c}\right)^s} + \tau_c$$

in cui  $\gamma_c$  and  $\tau_c$  sono la deformazione e la tensione del punto di inversione,  $\gamma_m$  è la deformazione massima raggiunta nella storia di carico del terreno fino all'istante di calcolo e  $F(\gamma_m)$  è un fattore di riduzione tarato sul rapporto tra i dati di smorzamento ottenuti sperimentalmente,  $\xi_{Maeasured}$ , e quelli calcolati adottando i criteri di Masing,  $\xi_{Masing}$ ,

$$F(\gamma_m) = \frac{\xi_{Measured}}{\xi_{Masing}} = P_1 - P_2 \cdot \left(1 - \frac{G(\gamma_m)}{G_{max}}\right)$$

in cui  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ , sono parametri adimensionali che si ottengono dalla regressione dei dati del rapporto  $\xi_{\text{Maesured}}/\xi_{\text{Masing}}$ ,  $G(\gamma_m)$  è il valore del modulo secante corrispondente al massimo del

livello di deformazione raggiunto,  $\gamma_m$ , fino all'istante di calcolo.

Per la determinazione dei parametri di rigidezza e smorzamento nelle formule precedenti sono disponibili numerose prove cicliche e dinamiche effettuate su campioni prelevati nei comuni limitrofi, per gli strati argillosi sono disponibili campioni prelevati a diverse altezze nei comuni di Mirandola, Crevalcore e Poggio Renatico, per gli strati sabbiosi si è utilizzato un campione prelevato sull'argine di Scortichino comune di Bondeno. In Tab. 2 si riportano i valori dei parametri mentre in Fig. 2 si riporta la colonna stratigrafica, il profilo di velocità delle onde di taglio e le curve di decadimento della rigidezza e incremento dello smorzamento.

	D0	β	S	$\gamma_{ref}$	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
Copertura – Limi sabbiosi	1.32	1.485	0.975	0.099	0.596	0.04	3.15
Argilla	2.33	1.80	1.05	0.140	0.500	0.13	0.6
Sabbie limose	1.32	1.485	0.975	0.099	0.596	0.04	3.15
Argilla	2.33	1.80	1.05	0.140	0.500	0.13	0.6
Sabbia profonda	1.32	1.485	0.975	0.099	0.596	0.04	3.15
Argilla profonda	2.33	1.80	1.05	0.140	0.500	0.13	0.6

Tab. 2 - Parametri di rigidezza e smorzamento.



Fig. 2 - Profilo di velocità e curve di rigidezza e smorzamento assunti per il sito di Cavezzo.

Per il calcolo in tensioni efficaci i software implementano delle relazioni di natura semiempirica che legano la sovrappressione neutra indotta  $\Delta u$  con il livello deformativo  $\gamma$ , la cui espressione dipende dalla granulametria del terreno, in particolare per i terreni sabbiosi è utilizzata la relazione proposta da Matasovic (1992)

$$r_{u} = \frac{\Delta u}{\sigma'_{vo}} = \frac{p \cdot f \cdot N_{c} \cdot F \cdot (\gamma_{c} - \gamma_{tvp})^{s}}{1 + p \cdot f \cdot N_{c} \cdot F \cdot (\gamma_{c} - \gamma_{tvp})^{s}}$$

in cui f vale 1 se il fenomeno e monodimensionale e 2 se bidimensionale,  $F, p \in s$  sono parametri adimensionali di forma,  $N_c$  è il numero di cicli,  $\gamma_c$  è la deformazione tangenziale indotta fino all'istante di carico,  $\gamma_{tvp}$  è la soglia di accoppiamento volumetrico distorsionale, per i terreni argillosi è disponibile la relazione proposta da Matasovic e Vucetic, (1995)

$$r_{u} = \frac{\Delta u}{\sigma'_{vo}} = A \cdot N_{c}^{-3s\left(\gamma_{c} - \gamma_{\eta v}\right)} + B \cdot N_{c}^{-2s\left(\gamma_{c} - \gamma_{\eta v}\right)} + C \cdot N_{c}^{-s\left(\gamma_{c} - \gamma_{\eta v}\right)} + D$$

in cui A, B, C, D, r, s sono parametri adimensionali di forma,  $N_c$  è il numero di cicli,  $\gamma_c$  è la deformazione tangenziale indotta fino all'istante di carico,  $\gamma_{tvp}$  è la soglia di accoppiamento volumetrico distorsionale.

I parametri che compaiono nelle relazioni precedenti si ricavano da prove cicliche di laboratorio condotte in condizioni di deformazioni controllate non disponibili per il sito in esame, tuttavia esistono correlazioni empiriche proposte da Carlton (2014) che permettono la stima dei parametri in funzione di Vs ed FC per i terreni sabbiosi (Tab. 3) e in funzione di OCR ed IP per i terreni argillosi (Tab. 4).

	р	f	F	S	γ <sub>tpv</sub> [%]
Sabbie intermedie	1.00	2	1.900	1.415	0.02
Sabbie profonde	1.00	2	0.779	1.415	0.02

Tab. 3 - Parametri tensioni efficaci per i terreni sabbiosi.

Tab. 4 -	Parametri	tensioni	efficaci	per i	terreni	argillosi.
						0

	А	В	С	D	r	S	γ <sub>tpv</sub> [%]
Argille	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.495	0.075	0.1

**Input sismico.** Il moto sismico di riferimento utilizzato per le analisi è la scossa del 29 maggio 2012 (Mw 6.0) registrato alla stazione accelerometrica RAN di Mirandola su suolo di categoria C (distante circa 5 km da Cavezzo ed equidistate rispetto all'epicentro sito nel comune di Medolla) dove non si sono avuti fenomeni di liquefazione. Si è quindi effettuata la deconvoluzione del segnale alla profondità di 50 m dal piano campagna dove al di sotto di tale quota si è assunta la coincidenza tra i profili di Mirandola e Cavezzo, la procedura di deconvoluzione viene eseguita con un'analisi lineare equivalente nel dominio delle frequenze, questa procedura in genere conduce ad errori numerici alle alte frequenze specialmente in presenza di sismi che inducono larghe deformazioni come nel caso in esame. Seguendo il suggerimento di Silva (1988) il segnale è stato preventivamente filtrato con filtro passabasso a 15 Hz e considerando l'87% dell'ampiezza moto di ottenuto, in Fig. 3 sono riportate con linea nera la registrazione accelerometrica alla stazione RAN di Mirandola della componente Nord-Sud e con linea rossa la corrispondente deconvoluta a -50 m.

Risultati analisi dinamiche semplificate in tensioni efficaci. Si riportano i risultati delle analisi dinamiche sulla colonna stratigrafica indagata, in Fig. 3 è riportata l'andamento della



Fig. 3 – Moto sismico del 29 maggio 2012 registrato alla stazione RAN di Mirandola e deconvoluto sviluppo delle sovrappressioni neutre indotte nello strato sabbioso intermedio e nelle sabbie profonde.

sovrappressione neutra indotta nel tempo adimensionalizzata rispetto alla tensione efficace in sito,  $r_u$ , per lo strato di sabbie superiori e per la strato di sabbia profondo sovrapposto alla storia temporale delle accelerazione nei medesimi strati. Si evince che la liquefazione si innesca nello strato sabbioso superiore con conseguente allungamento del periodo, dal modello non risultano fenomeni di liquefazione nello strato di sabbia profondo in quanto la sovrappressione neutra massima calcolata è del 12% circa.

**Conclusioni.** Dallo studio effettuato si evince che i fenomeni di liquefazione riguardano lo strato sabbioso superficiale. Visto il particolare assetto geomorfologico relativo all'area di indagine, dove si è osservato che i fenomeni di liquefazione sono avvenuti in corrispondenza delle spalle dell'alveo, si ritiene opportuno, in uno studio futuro, prendere in considerazione aree esterne all'argine dell'alveo per definire l'eventuale influenza degli spessori superficiali sui fenomeni di liquefazione.

Sebbene si siano adottati dati derivanti da comuni limitrofi rappresentativi anche del sito in esame, la scarsità delle indagini in sito a disposizione (soprattutto per la caratterizzazione degli strati più profondi) e la totale mancanza di campioni prelevati in sito, restituiscono un modello che definisce, allo stato attuale, un primo approccio atto a riprodurre i fenomeni di liquefazione effettivamente osservati nel territorio di Cavezzo.

## Bibliografia

Carlton B.; 2014 : An Improved Description of the Seismic Response of Sites with High Plasticity Soils, Organic Clays, and Deep Soft Soil Deposits. PhD Thesis. University of California, Berkeley

Hashash, Y.M.A., Musgrove M.I., Harmon J.A., Groholski D.R., Phillips C.A., Park D.; 2015 : DEEPSOIL 6.0, User Manual. pp 114 ISPRA; 2009 : Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 203 Poggio Renatico. Coord. Scient.: U. Cibin, Regione Emilia-Romagna. ISPRA, Servizio Geologico d'Italia. Regione Emilia-Romagna, SGSS.

Kramer S. L.; 1996 : Geotechnical earthquake engineering, Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.

- Matasovic N.; 1992 : Seismic response of composite horizontally-layered soil deposits. Ph.D. Thesis, University of California, Los Angeles.
- Matasovic N., Vucetic M.; 1995 : Generalized Cyclic Degradation-Pore Pressure Generation Model for Clays. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 121, No.1, pp 33-42.
- Park D., Hashash Y. M. A.; 2004 : Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis. Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 2, pp 249-274.
- RER, ENI Agip ; 1998 : *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia Romagna*. A cura di G.M. Di Dio. Regione Emilia Romagna ENI, divisione Agip. S.EL.CA., Firenze, pp 120.