

# LIQUEFAZIONE<sup>®</sup>: un nuovo codice di calcolo a supporto degli studi di liquefazione nelle Microzonazioni di terzo livello

Ing. Salvatore Santangelo - Analista Stacec s.r.l.

Prof. Ing. Giovanna Vessia – Professore aggregato - Università degli Studi "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara

## Sommario

L'accumulo delle pressioni interstiziali in terreni sabbiosi e limosi sollecitati da carichi sismici di media e alta intensità, in terreni sotto falda, può generare l'abbattimento della rigidità e della resistenza del materiale, portandolo ad un cambiamento di stato, da solido a liquido: questo fenomeno prende il nome di **liquefazione**. L'insorgere del suddetto fenomeno e dei danni da esso derivanti è noto alla comunità scientifica fin dagli anni settanta e nel tempo sono stati formulati diversi metodi numerici, più o meno sofisticati, in grado di stimare il potenziale di liquefazione in presenza di diversi tipi di terreno in differenti contesti geologici. In Italia dopo i terremoti dell'Aquila (6 aprile 2009: 6.3 Mw, 8.8km di profondità), dell'Emilia Romagna (20 maggio 2012: 6.1 Mw, 6.3km di profondità; 29 May 2021: 5.8 Mw, 5 km di profondità) e la sequenza sismica Amatrice-Norcia-Visso (2016/2017, tra cui: 24 agosto 2016: 6 Mw, 8.1 km profondità; 30 ottobre 2016: 6.5Mw, 9 km di profondità) sono stati registrati diffusi fenomeni di liquefazione che hanno portato nel 2018 all'integrazione degli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" con le linee guida per la gestione delle aree interessate da fenomeni di liquefazioni. L'azienda **Stacec s.r.l.** e ed il **Dipartimento di Ingegneria e Geologia dell'Università degli Studi "Gabriele d'Annunzio" di Chieti-Pescara** hanno avviato un progetto di ricerca con l'obiettivo di implementare e commercializzare un codice di calcolo per stimare l'incremento delle sovrappressioni interstiziali indotto dal sisma a valle di analisi numeriche di risposta sismica locale. La stima dell'entità delle pressioni interstiziali come indicatore dell'avvenuta liquefazione potrà essere utilizzata sia a fini di progettazione e mitigazione della pericolosità da liquefazione nelle Zone di Rispetto per instabilità da liquefazione individuate mediante il Potenziale di Liquefazione introdotto nella Microzonazione Sismica di livello 2 (MS 2).

## Introduzione

Recenti aggiornamenti delle Linee Guida Italiane sulla microzonazione sismica in aree soggette ad instabilità da Liquefazione (LG, 2018) riportano che nella MS 3 (in chiave di Liquefazione) è necessario identificare le aree di Rispetto ZRLQ mediante il calcolo del Potenziale di Liquefazione  $IL$ . In tali aree  $IL$  dovrà superare il valore 15. Tuttavia, le perimetrazioni delle ZRLQ dovranno essere verificate mediante ulteriori analisi che confermino l'insorgere effettivo della liquefazione nelle ZRLQ. A tale riguardo, LG (2018) recitano: "Sulle verticali delle indagini e delle analisi presenti all'interno della ZRLQ sarà necessario applicare una delle metodologie di analisi dinamica di suscettibilità alla liquefazione: (1) analisi dinamica semplificata in termini di tensioni totali o efficaci; (2) analisi dinamica avanzata." L'azienda **Stacec s.r.l.** ed il **Dipartimento di Ingegneria e Geologia dell'Università degli Studi "Gabriele d'Annunzio" di Chieti-Pescara** hanno avviato un progetto di ricerca con l'obiettivo di implementare e commercializzare un codice di calcolo per stimare l'incremento delle sovrappressioni interstiziali indotto dal sisma a valle di analisi numeriche di risposta sismica locale. Tale metodologia fa parte dei metodi di "analisi dinamica semplificata in termini di tensioni totali o efficaci" indicati dalle LG (2018). Il nuovo Codice di Calcolo 1D, LIQUEFAZIONE<sup>®</sup>, è adesso disponibile per tutti i tecnici coinvolti negli studi di microzonazione sismica. Di seguito si presenta il metodo di calcolo implementato ed alcune considerazioni sulle prime applicazioni condotte su un caso reale italiano.

## Il codice di calcolo "LIQUEFAZIONE"

LIQUEFAZIONE® è un applicativo completamente integrato in LSR<sub>2D</sub> (anch'esso prodotto e commercializzato da Stacec s.r.l.). Esso consente all'utente di effettuare una stima semplificata dell'incremento delle sovrappressioni interstiziali, attraverso la determinazione della curva CSR (cyclic stress ratio) mediante analisi di risposta sismica locale. Il codice fornisce profili di rapporti di sovrappressione  $r_u$  che possono essere confrontati con i profili di Potenziale di Liquefazione  $LI$ , comunemente calcolati con i metodi semplificati o di campagna, previsti nelle MS di livello 2. La **Figura 1** mostra l'interfaccia dell'applicativo.

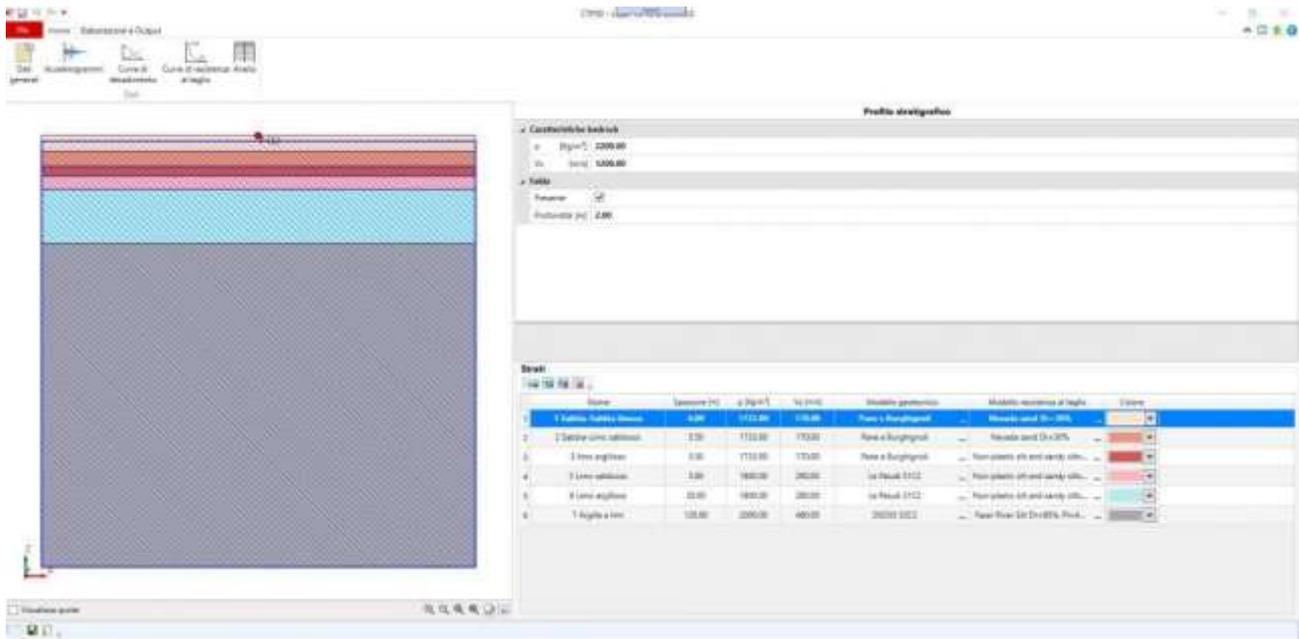


Figura 1. Interfaccia principale del software LIQUEFAZIONE®.

## Interoperabilità con LSR<sub>2D</sub>

L'interoperabilità con il software per le analisi bidimensionali di risposta sismica locale LSR<sub>2D</sub> avviene attraverso gli oggetti detti "colonna di controllo" definiti all'interno dello stesso applicativo (**Figura 2**). In particolare, per ogni colonna di controllo, attraverso la funzione di esportazione dedicata, l'applicativo determina, sulla base della geometria bidimensionale comprendente anche la posizione della falda, dei modelli monodimensionali processabili attraverso il software LIQUEFAZIONE®.

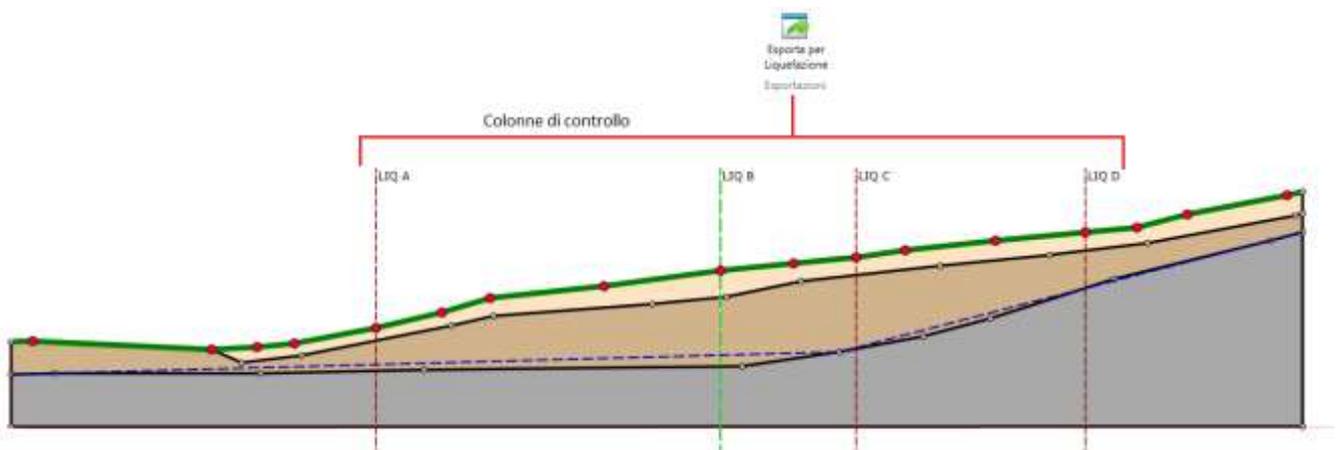


Figura 2. Interfaccia del sw LSR<sub>2D</sub> e funzione di esportazione verso "LIQUEFAZIONE®".

Le definizioni di tutti gli accelerogrammi e delle analisi associate di risposta sismica locale vengono mantenute nella generazione dei files.

### Metodo implementato nel codice "LIQUEFAZIONE®"

Il metodo proposto ed implementato all'interno dell'applicativo LIQUEFAZIONE® consiste nel calcolo, in condizioni *free-field*, dell'incremento delle pressioni interstiziali indotto dall'evento sismico. La condizione di sicurezza nei confronti della liquefazione viene espressa mediante un coefficiente detto rapporto di sovrappressione interstiziale:

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} \quad (1)$$

dove  $\Delta u$  è l'incremento di sovrappressione interstiziale e  $\sigma'_{v0}$  la tensione verticale litostatica. È evidente che valori prossimi all'unità di  $r_u$  rappresentano una condizione di totale perdita di resistenza da parte del materiale e dunque il collasso per liquefazione. Tale rapporto di sovrappressione interstiziale  $r_u$  varia in funzione della deformazione da taglio  $\gamma$  indotta dal sisma e dal numero di cicli di carico  $N$  generalmente normalizzato rispetto al numero di cicli di carico limite  $N_L$ , che è il massimo numero di cicli di carico necessario perché un fissato terreno nelle condizioni di sito, arrivi a liquefazione.

Quindi il codice LIQUEFAZIONE® calcola il rapporto  $N/N_L$  lungo la verticale della colonna di studio. Per quanto riguarda il numero di cicli limite  $N_L$  questo dipende dalle caratteristiche meccaniche del materiale e dal livello tensionale a cui lo stesso è sottoposto in ogni punto del modello; tale valore viene ottenuto mediante l'uso di curve di resistenza del materiale definite dall'utente ed in funzione del livello di sollecitazione *CSR* (cyclic stress ratio) determinato dall'analisi di risposta sismica locale mediante la seguente espressione:

$$CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_{v0}} \quad (2)$$

dove  $\tau_{max}$  rappresenta la tensione tangenziale massima durante l'evento sismico.

In **Figura 3** viene rappresentato uno schema che riassume come viene determinato  $N_L$  lungo la colonna analizzata, i passaggi sono i seguenti:

- è assegnata ad ogni sismostrato, in funzione del tipo di materiale, una curva di resistenza al taglio in grado di fornire il numero di cicli limite  $N_L$  in funzione del livello di sollecitazione *CSR*;
- si calcola la tensione verticale efficace litostatica in funzione della stratigrafia, del peso per unità di volume dei singoli strati e della posizione della falda;
- per ogni accelerogramma in ingresso si esegue un'analisi di risposta sismica locale in tensioni totali con approccio lineare equivalente in modo da determinare la tensione tangenziale massima indotta  $\tau_{max}$ ;
- si calcola mediante l'equazione (2) il rapporto di sollecitazione ciclica *CSR*;
- si entra nelle curve di resistenza dei materiali definite per ogni singolo strato con il valore di *CSR* e si ottiene il numero di cicli limite  $N_L$ .

Una volta ottenuto il numero di cicli limite  $N_L$  il rapporto di sovrappressione ciclica  $r_u$  si ottiene mediante la determinazione del numero di cicli di carico  $N$  corrispondenti ad ogni singolo accelerogramma. In accordo con la normativa italiana, gli accelerogrammi applicati per un'analisi di risposta sismica locale saranno 7. Ognuno di essi mostra una storia di carico di tipo irregolare, pertanto il numero di cicli di carico che si sta ricercando necessita una conversione dalla storia di carico irregolare ad un numero di cicli di carico che caratterizza la storia equivalente (carichi ciclici armonici).

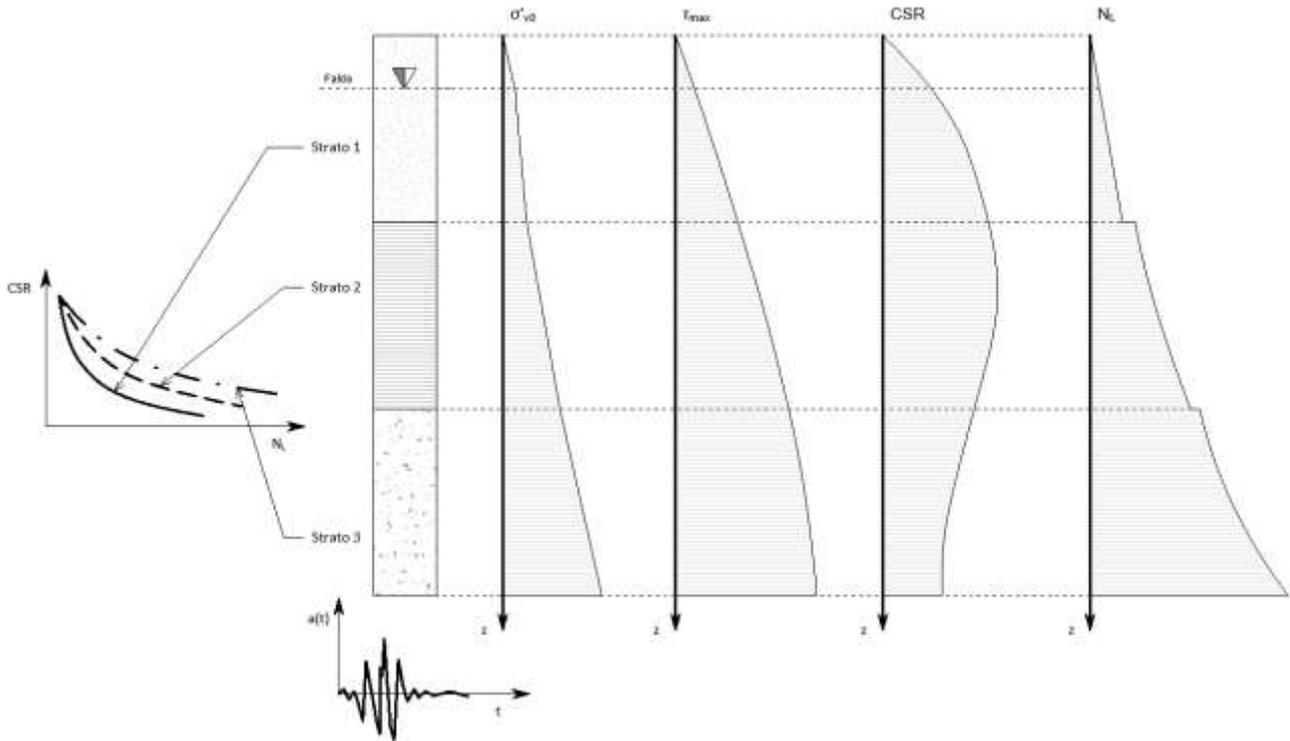


Figura 3. Schema monodimensionale per il calcolo del numero di cicli limite NL lungo la verticale in funzione del CSR.

La procedura di conversione utilizzata dall'applicativo LIQUEFAZIONE® è quella proposta da Biondi et al. (2012) e viene descritta nei prossimi paragrafi.

### Rapporto di sovrappressione interstiziale

Per il calcolo delle sovrappressioni interstiziali, è stata considerata la formulazione di Seed et al. (1975):

$$r_u = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[ 2 \left( \frac{N}{N_L} \right)^{1/\beta} - 1 \right] \quad (3)$$

dove:

- $r_u$ : pressioni interstiziali residue normalizzate rispetto alla tensione iniziale efficace di confinamento;
- $N$ : numero di cicli equivalenti;
- $N_L$ : numero di cicli necessari per generare liquefazione;
- $\beta$ : parametro empirico.

Quest'ultimo può essere calcolato mediante la seguente equazione proposta da Polito et al. (2008):

$$\beta = c_1 FC + c_2 D_r + c_3 CSR + c_4 \quad (4)$$

dove per frazione di fine  $FC < 35\%$  i coefficienti della regressione assumono i seguenti valori:

$$c_1 = 0.01166; c_2 = 0.007397; c_3 = 0.01034; c_4 = 0.5058 \quad (5)$$

mentre per frazione di fine  $FC \geq 35\%$  i coefficienti della regressione assumono questi altri valori:

$$c_1 = 0.002149; c_2 = -0.0009398; c_3 = 1.667; c_4 = 0.4285 \quad (6)$$

La densità relativa  $D_r$  è espressa in percentuale, mentre il rapporto di tensione di taglio CSR calcolato con un'analisi di risposta sismica locale.

La procedura di calcolo automatico prevede l'uso dell'equazione appena illustrata per il calcolo del rapporto di sovrappressione interstiziale  $r_u$  ottenendo il valore di  $N_L$  da opportune curve di resistenza al taglio ciclico  $CSR - N_L$  misurate da prove di laboratorio ed il valore di  $N$  in funzione della storia temporale delle accelerazioni dell'evento sismico che si è analizzato nella risposta sismica locale.

### Curve di resistenza al taglio

L'approccio numerico utilizzato si basa sull'uso di curve di resistenza al taglio che identificano il numero di cicli di carico per il raggiungimento della liquefazione dei depositi terrigeni, da sabbiosi a limosi. Tali curve, fondamentali per l'uso dell'applicativo, sono generalmente misurate in laboratorio mediante prove di taglio ciclico su campioni indisturbati.

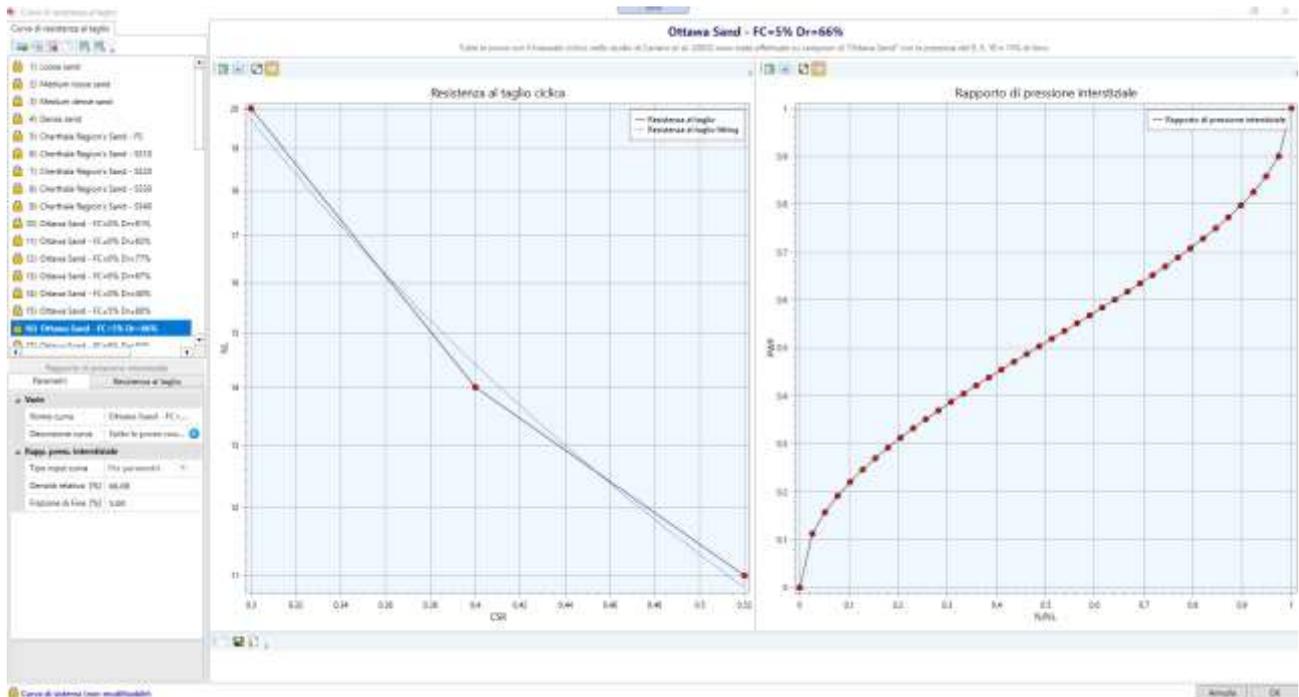


Figura 4. Database di sistema delle curve di resistenza al taglio.

All'interno del codice LIQUEFAZIONE<sup>®</sup> sono state implementate curve  $CSR - N_L$  raccolte da letteratura internazionale in un database integrato nell'applicativo. Tali curve potranno essere adattate alle diverse tipologie di terreno normalmente ricorrenti nei casi pratici. Esse rappresentano una preliminare alternativa alle prove di laboratorio per i professionisti che intendono ricorrere a questa procedura di analisi. Ovviamente, il codice LIQUEFAZIONE<sup>®</sup> consente agli utenti di implementare nuove curve nel database. Tale database si suddivide essenzialmente per famiglie di curve, all'interno della stessa famiglia si trovano poi ulteriori sottotipi che variano in funzione della frazione di fine  $FC$  e della densità relativa  $DR$ .

### Numero di cicli di carico equivalenti $N_{eq}$

Il parametro  $N_{eq}$  è stato studiato da molti ricercatori sin dagli anni '60 (Seed e Idriss, 1967; Seed, 1968) nell'ambito di studi sul comportamento dei terreni granulari saturi sottoposti a storie di carico irregolari indotte da un evento sismico. La prima definizione di numero di cicli di carico equivalente è riconducibile al lavoro di Lee e Chan (1972) che definiscono  $N_{eq}$  come il numero dei cicli di carico "uniformi" (regolari) di tensioni tangenziali  $\tau_{av}$  applicati ad un provino di terreno in laboratorio, tali da generare un effetto equivalente in termini di risposta tensionale o deformativa a quello indotto da una storia temporale sismica irregolare. La metodologia implementata all'interno del modulo LIQUEFAZIONE<sup>®</sup>, è quella proposta da Biondi et al. (2012).

Quest'ultima procedura di conversione, fa uso di risultati di prove cicliche di laboratorio descritti in termini di curve di resistenza alla liquefazione generalmente rappresentate nel piano  $CSR - N_L$  e descritte mediante la seguente equazione:

$$\frac{CSR}{CSR_{N=15}} = \beta(N_L)^{-m} \quad (7)$$

in cui il rapporto di resistenza ciclica viene normalizzato rispetto al valore corrispondente ad un numero di cicli pari a  $N_L = 15$ .

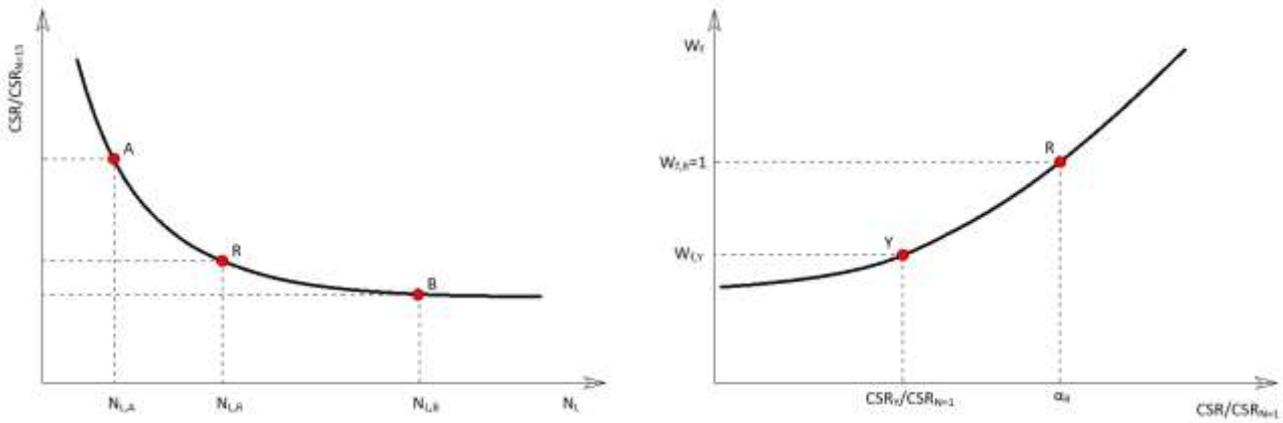


Figura 5. Schema per la definizione del criterio di conversione dei cicli di carico.

Presi due punti A e B della curva, l'equazione (7) consente di scrivere:

$$CSR_A(N_{L,A})^m = CSR_B(N_{L,B})^m \quad (8)$$

Normalizzando la curva rispetto ad un valore arbitrario di riferimento  $CSR_R$  al quale corrisponde il valore  $N_{L,R}$  e lo si fa coincidere con il punto B, l'equazione (8) diviene:

$$CSR_A = CSR_R \left( \frac{N_{L,R}}{N_{L,A}} \right)^m \quad (9)$$

Da cui ne consegue che un generico ciclo di carico di ampiezza  $CSR_A$  può essere convertito in  $W_{f,A}$  cicli equivalenti di ampiezza  $CSR_R$ , purché sia:

$$W_{f,A} = \frac{N_{L,R}}{N_{L,A}} \quad (10)$$

dove il coefficiente  $W_{f,A}$  è un fattore di conversione delle ampiezze dei cicli di carico che consente di definire una curva di conversione. Si osservi la figura 4-b in cui al rapporto tensionale  $CSR_Y/CSR_{N=1}$  relativo all'Y-esimo ciclo di ampiezza  $CSR_Y$  corrisponda il fattore di conversione  $W_{f,Y}$ . Cumulando tale rapporto per tutti i  $k$  cicli da convertire, la storia di carico equivalente risulta composta da un numero di cicli pari a:

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^k \frac{N_{L,R}}{N_{L,i}} \quad (11)$$

Sebbene i  $k$  contributi dell'equazione (11) dovrebbero comprendere tutti i cicli di carico della storia irregolare da convertire, dato l'andamento decrescente del fattore di conversione  $W_{f,A}$  con il rapporto di resistenza ciclica,

vi è una soglia del valore di tale rapporto oltre la quale i contributi risultano trascurabili. In tale procedura di conversione, pertanto, vengono selezionati degli emicicli positivi e negativi al di sopra di una certa soglia, funzione delle curve di resistenza al taglio, che contribuiscono al calcolo del valore del numero di cicli equivalenti  $N_{eq}$  (Figura 6).

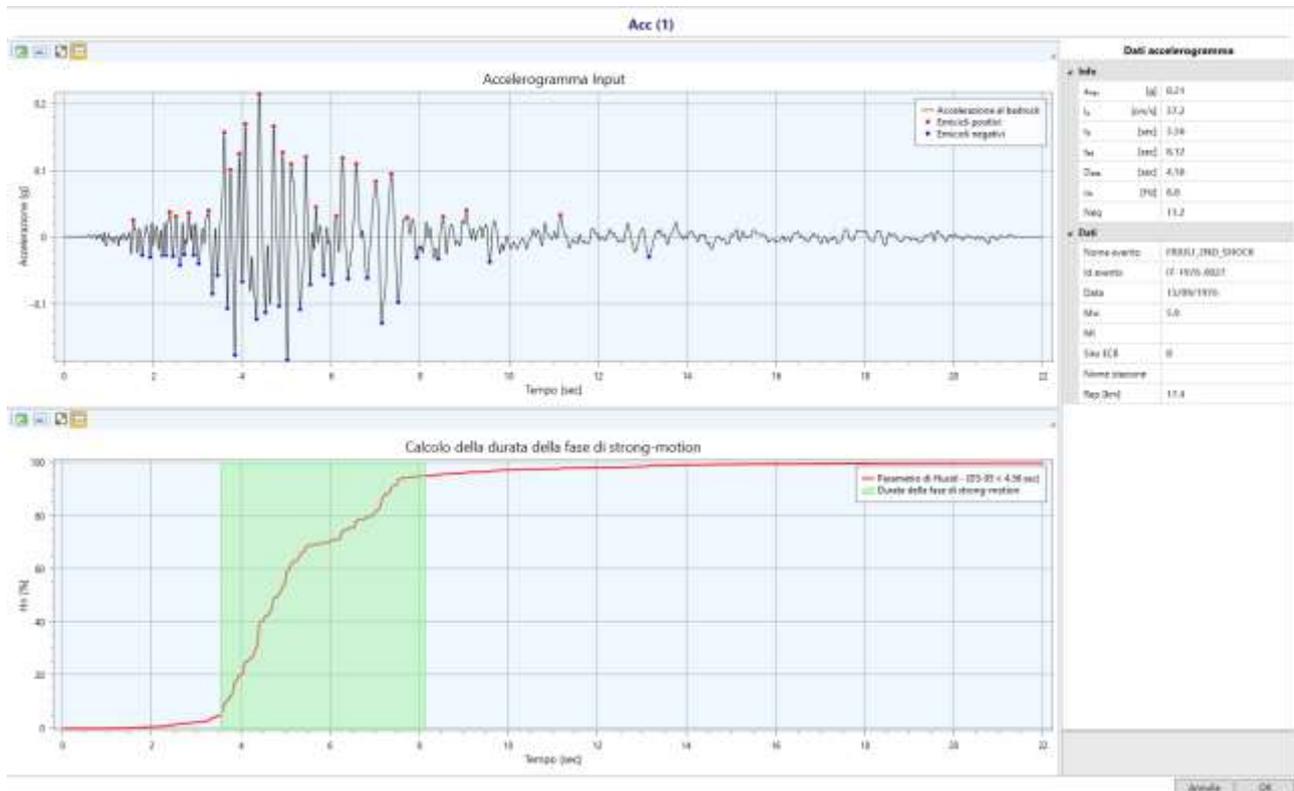


Figura 6. Interfaccia di gestione degli accelerogrammi e risultati della procedura di conversione.

È utile osservare che nell'applicare tale procedura di conversione direttamente sulle storie temporali dell'accelerazione si assume che il rapporto  $CSR/CSR_{max}$ , tra l'ampiezza del generico ciclo di carico da convertire e la massima ampiezza che caratterizza l'intera storia, viene assunto pari al corrispondente rapporto  $a/a_{max}$ . In altre parole si assume una proporzionalità diretta tra la storia delle tensioni di taglio indotte dal sisma e la storia delle accelerazioni sismiche in superficie.

### Individuazione di strati potenzialmente liquefacibili

Noti  $N$  ed  $N_L$  si procede a calcolare il rapporto di sovrappressione interstiziale mediante l'equazione (3) da cui è possibile ottenere la sovrappressione interstiziale dalla seguente equazione:

$$\Delta u = r_u \cdot \sigma_{z,statico} \quad (12)$$

Quando  $r_u = 1$ , la tensione effettiva di confinamento si annulla innescando, la liquefazione. Si osservi che il valore unitario del rapporto di sovrappressione interstiziale rappresenta una condizione ideale, pertanto valori già prossimi a 0.9 rappresentano una condizione altamente pericolosa (Figura 7).

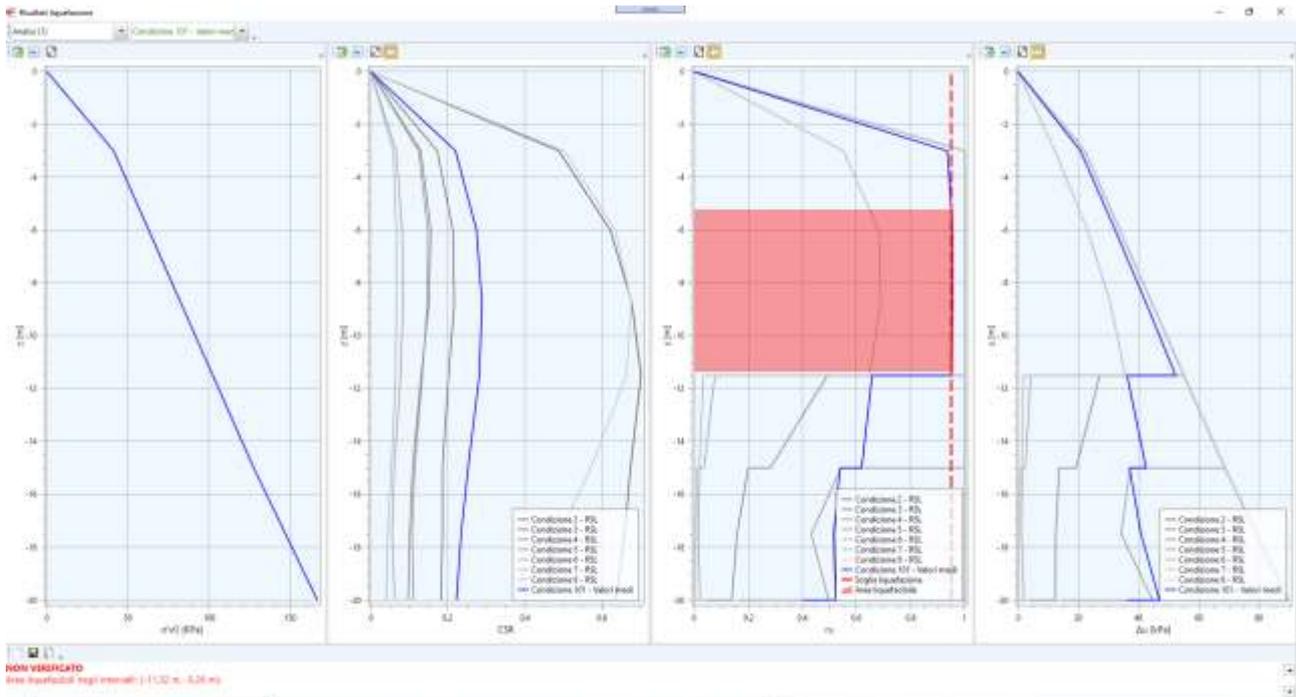


Figura 7. Interfaccia di verifica del sw e variazione del rapporto di sovrappressione interstiziale con la profondità.

### Test di confronto tra $r_u$ ed $IL$

L'applicativo LIQUEFAZIONE® è stato testato per il caso reale della Piana del Fucino, nel comune di Avezzano (Antonelli, 2020). In questo comune, nell'ambito delle attività di Microzonazione di livello 1 e 3 promosse e finanziate dalla Regione Abruzzo, sono state condotte prove in sito ed in laboratorio e modellazioni numeriche di risposta sismica locale da numerose università e centri di ricerca sin dal 2014 (Boncio et al., 2014, 2018, 2020; Famiani et al., 2014; Amoroso et al., 2015, Perini, 2018; attività di microzonazione sismica di livello 3 in fase di completamento (novembre 2021) a cura di Regione Abruzzo, Università di Chieti - Pescara, INGV e Politecnico di Milano). I progetti di ricerca di questi anni hanno portato ad una conoscenza geologico tecnica dell'area piuttosto buona, sebbene concentrata per lo più nei pressi dei centri abitati. Avezzano è stato uno dei comuni più studiati ed investigati in Abruzzo, sia dal punto di vista geologico di base che di pericolosità sismica locale (si veda ad esempio Boncio et al., 2014 e la relativa bibliografia). I progetti di ricerca di questi anni hanno portato ad una conoscenza geologico tecnica dell'area piuttosto buona, sebbene concentrata per lo più nei pressi dei centri abitati. Avezzano è stato uno dei comuni più studiati ed investigati in Abruzzo, sia dal punto di vista geologico di base che di pericolosità sismica locale (si veda ad esempio Boncio et al., 2014 e la relativa bibliografia).

In relazione alle verifiche di liquefazione, nel comune di Avezzano sono state investigate 13 verticali dove sono state effettuate altrettante prove penetrometriche con piezocono CPTu. Lungo queste verticali, è stato calcolato il Fattore di Sicurezza alla Liquefazione FSL:

$$FSL = \frac{CRR}{CSR} \quad (13)$$

dove il  $CRR$  è il rapporto di resistenza ciclica (cyclic resistance ratio) calcolato con 5 diverse formule (Robertson and Wride, 1998; Robertson, 2010; Moss, 2006; Idriss and Boulanger, 2008; Boulanger and Idriss, 2007) implementate nel codice CLIQ (<https://geologismiki.gr/>) utilizzato per condurre le verifiche a Liquefazione con il metodo semplificato delle indagini di sito. Sono state infatti utilizzate come indagini di sito le 13 CPTu succitate condotte nel comune di Avezzano.

Le diverse formule di *CRR* usano diversi parametri e sono utilizzate per terreni con indice di comportamento  $I_c$  variabile. I risultati delle stesse, forniscono valori di *IL* che solo in alcuni casi risultano molto simili.

Tale variabilità legata alle diverse formule impiegate per il calcolo del *CRR* genera una incertezza sui valori che *IL* assumerà. Tale circostanza porta a non poter basare la scelta della *ZRLQ* solo sul calcolo di *IL* ma deve essere impiegato un metodo più avanzato per effettuare una verifica di avvenuta liquefazione: il calcolo delle sovrappressioni interstiziali. Una proposta in questa direzione è offerta dal codice di calcolo monodimensionale LIQUEFAZIONE<sup>®</sup>.

Il *CSR*, cyclic shear ratio, rappresenta la sollecitazione indotta nel terreno dalle onde sismiche:

$$CSR_{M=7.5, v=1atm} = 0.65 \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot r_d \cdot \frac{1}{MSF} \cdot \frac{1}{K_\sigma} \quad (14)$$

dove  $\sigma_v$  e  $\sigma'_v$  sono rispettivamente le tensioni totali ed efficaci iniziali alla profondità considerata;  $a_{max}$  è il picco di accelerazione al suolo, in genere calcolato mediante una analisi 1D di risposta sismica locale;  $g$  è l'accelerazione di gravità;  $r_d$  è il coefficiente riduttivo delle tensioni, secondo l'espressione:

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M] \quad (14)$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \quad (15)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \quad (16)$$

*MSF* è il fattore di riduzione o maggiorazione della magnitudo, quand'essa è diversa da 7.5:

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln\left(\frac{\sigma'_v}{Pa}\right) \leq 1.1 \quad (14)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{37.3 - 8.27 \cdot (q_{c1Ncs})^{0.264}} \leq 0.3 \quad (15)$$

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \cdot \left(8.64 \cdot \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 1.325\right) \quad (16)$$

$$MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{180}\right)^3 \leq 2.2 \quad (17)$$

Ad esso sono stati dati in input i profili di accelerazione ottenute dalle analisi di RSL 1D condotte lungo le 13 verticali, ricostruite anche grazie a misure di velocità e prove di laboratorio per la misura delle curve di decadimento del modulo di taglio  $G(\gamma)/G_{max}$  e del rapporto di smorzamento  $D(\gamma)$ . Quindi, è stato calcolato il potenziale di Liquefazione secondo la formula di Iwasaki et al. (1982):

$$IL = \int_{z=0}^{20} w_z \cdot F_z \cdot dz \quad (18)$$

dove  $w_z = 10 - 5z$  è un fattore peso che decresce con la profondità fino ad annullarsi per  $z = z_{crit} = 20m$  ed  $F_z$  è funzione di  $FSL$ :

$$F_z = 1 - FS \text{ se } FSL \leq 1 \quad (19)$$

$$F_z = 0 \text{ se } FSL > 1 \quad (20)$$

Il criterio base dell'interpretazione dei dati ottenuti in termini di  $r_u$ , ha previsto che tutti gli orizzonti per cui il rapporto delle sovrappressioni interstiziali eccedesse il valore di soglia di 0,9 venissero considerati liquefacibili.

Al fine di stabilire una correlazione tra i metodi  $IL$  e  $r_u$ , i risultati forniti dall'applicativo LIQUEFAZIONE® in termini di rapporto di sovrappressioni interstiziali, sono stati confrontati con i valori del potenziale di liquefazione  $IL$ . Si ricorda che i valori del Potenziale di Liquefazione sono divisi in 4 classi, come mostrato nella **Tabella 1**.

*Tabella 1. Classi di pericolosità da liquefazione nell'ambito della MS di livello 3.*

Valori di $IL$	Classi di Pericolosità da Liquefazione
$0 < IL \leq 2$	Nulla-Basso
$2 < IL \leq 5$	Moderato
$5 < IL \leq 15$	Alto
$IL > 15$	Molto Alto

Dalle analisi condotte nell'ambito del benchmark, in conclusione, è possibile affermare che:

1. Dal confronto degli  $r_u$  e degli  $IL$  (entrambi ottenuti da analisi 1D) si può desumere che  $r_u$  supera il valore di 0.9 quando  $IL$  supera 5, cioè quando il potenziale di liquefazione ricade nell'intervallo di pericolosità da alta e molto alta.
2. I valori di  $IL$ , dipendono fortemente dalla formula adottata per il suo calcolo. Infatti, il potenziale di liquefazione non solo si azzerava sempre alla profondità critica di 20 m ma per le CPT, delle 13 considerate, che non raggiungono i 20m il valore di  $IL$  può essere solo considerato un VALORE MINIMO. Tale assunzione rende il valore di  $IL$  solo indicativo di una tendenza a liquefare che viene a volte anche smentita dal calcolo più rigoroso di  $r_u$ . Quest'ultimo parametro è invece direttamente espressione della sollecitazione indotta in termini di tensioni totali e sovrappressioni interstiziali lungo l'intera successione stratigrafica analizzata. Anche i valori di  $r_u$ , in questo approccio, sono ottenuti non da legami costitutivi avanzati ma da relazioni sperimentalmente ottenute basate sulle curve  $CSR - N_L$ . Pertanto questo approccio è più rigoroso di quello basato sul potenziale di liquefazione, ma pur sempre semplificato.

In questo studio, si deve ricordare, sono state utilizzate curve  $CSR - N_L$  derivate dalla letteratura internazionale data l'assenza di curve disponibili sui terreni italiani considerati. Esse, quindi, sono state adattate alle condizioni di densità relativa e contenuto in fine dei depositi analizzati sulla base di alcune informazioni di campagna e di laboratorio nonché sull'età geologica dei depositi.

## Conclusioni

Il codice di calcolo LIQUEFAZIONE®, utilizzato insieme al codice LSR<sub>2D</sub> consente di coniugare le analisi di risposta sismica locale 2D con le stime 1D della sovrappressione interstiziale indotta dallo scuotimento sismico al sito. I profili delle sovrappressioni interstiziali, sono calcolate in termini del rapporto di sovrappressione  $r_u$  che consente, sito per sito, di riconoscere la condizione di incipiente passaggio di stato di un terreno sotto falda

indotto dalla liquefazione. Tale calcolo è condotto indipendentemente dalla stima del Potenziale di Liquefazione richiesto dalle Linee Guida (2018). I vantaggi del codice proposto per il calcolo della condizione di incipiente liquefazione coniuga la semplicità di un approccio numerico ben noto in letteratura alla necessità di misurare in laboratorio le curve  $CSR - N/N_L$ . Tuttavia, il codice LIQUEFAZIONE® ha a disposizione dell'utente una banca dati di curve che dovranno essere scelte opportunamente dall'utilizzatore. Pertanto, il nuovo codice LIQUEFAZIONE® insieme al codice LSR<sub>2D</sub> si propone come utile strumento a servizio di professionisti ed amministrazioni locali coinvolti nelle attività di redazione degli studi di MS di livello 3 e dei loro periodici aggiornamenti.

## Ringraziamenti

Gli autori vogliono ringraziare il Prof. Paolo Boncio per aver messo a disposizione tutti i dati raccolti nel comune di Avezzano per il caso di studio analizzato con il codice LIQUEFAZIONE®.

## Bibliografia

Amoroso S., Boncio P., Famiani D., Hailemikael S., Manuel M.R., Milana G., Monaco P., Vassallo M., Vessia G. (2015) - **Preliminary Liquefaction Studies for Seismic Microzonation of Avezzano, Italy** - 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE FLAT DILATOMETER, 14-16 June 2015, Rome, Italy, 285-292. ISBN: 979-12-200-0116-8.; 01/2015.

Antonelli Valentina (2020) - **Analisi di instabilità a liquefazione con approccio alle tensioni per studi di microzonazione sismica di livello III nel comune di Avezzano (L'AQ)** - Tesi di Laurea Magistrale, Università "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara (Tutor: Prof.ssa G. Vessia, Prof. P. Boncio, Ing. S. Santangelo).

Biondi G., Cascone E., Di Filippo G. (2012) - **Affidabilità di alcune correlazioni empiriche per la stima del numero di cicli di carico equivalente** - *Rivista Italiana di Geotecnica*, 2: 11-41.

Boncio P., Galadini F., Rosatelli G., Mancini T., Di Naccio D., Francescone M., Nardone M., Milana G., Famiani D., Cara F., Di Giulio G., Vassallo M. (2014) - **Microzonazione Sismica di Livello 1 del Comune di Avezzano** - Regione Abruzzo, Università di Chieti - Pescara, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, 94 pp., 21 tavole fuori testo, Chieti 2014.

Boncio, P., Amoroso, S., Vessia, G., Francescone, M., Nardone, M., Monaco, P., Famiani, D., Di Naccio, D., Mercuri, A., Manuel, M.R., Galadini, F., Milana, G., 2018 - **Evaluation of liquefaction potential in an intermountain Quaternary lacustrine basin (Fucino basin, Central Italy)** - *Bull. Earthq. Eng.* 16, 91-111. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0201-z>.

Boncio, P.; Amoroso, S.; Galadini, F.; Galderisi, A.; Iezzi, G.; Liberi, F., 2020 - **Earthquake-induced liquefaction features in a late Quaternary fine-grained lacustrine succession (Fucino Lake, Italy): Implications for microzonation studies** - *ENGINEERING GEOLOGY*, 272, 1-15, 10.1016/j.ENGGEOL.2020.105621.

Boulanger, R.W. and Idriss, I. M., 2007 - **Evaluation of Cyclic Softening in Silts and Clays** - *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* June, Vol. 133, No. 6 pp 641-652.

Di Naccio D.; Famiani D.; Liberi F.; Boncio P.; Cara F.; De Santis A; Di Giulio G., Galadini F; Milana G.; Rosatelli G.; Vassallo M., 2020 - **Site effects and widespread susceptibility to permanent coseismic deformation in the Avezzano town (Fucino basin, Central Italy): Constraints from detailed geological study** - *ENGINEERING GEOLOGY*, 270, 10.1016/j.enggeo.2020.105583.

Famiani D., Boncio P., Cara F., Cogliano R., Di Giulio G., Fodarella A., Milana G., Pucillo S., Riccio G., Vassallo M. (2014) - **Local Seismic Response in a Large Intra-mountain Basin as Observed from Earthquakes and Microtremor Recordings: The Avezzano Area (Central Italy)**. In: Lollino et al. (eds.) - *Engineering Geology for*

*Society and Territory* – Volume 5, DOI: 10.1007/978-3-319-09048-1\_220, ISBN 978-3-319-09047-4, ISBN (eBook) 978-3-319-09048-1, © SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING SWITZERLAND.

Idriss, I. M., and Boulanger, R. W. (2008) - **Soil liquefaction during earthquakes** - Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.

Iwasaki, T., Tokida, K. I., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., & Sato, H. (1982) - **Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods** - In *Proceedings of the 3rd international conference on microzonation, Seattle (Vol. 3, No. 2, pp. 1310-1330)*.

Lee K.L., Chan K. (1972) - **Number of equivalent significant cycles in strong motion earthquakes** - *Proc. International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application, vol. II, Seattle, pp. 609-627*.

LG (2018) - **Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni (LQ), versione 1.0** - Roma, 2018.

Moss, R. E. S., Seed, R. B., Kayen, R. E., Stewart, J. P., Der Kiureghian, A., and Cetin, K. O. (2006) - **CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential, J** - *Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE 132(8)*.

Perini Sara (2018) - **Analisi della risposta sismica locale in zona di conoide con inversione di velocità mediante simulazione numerica 2D (Avezzano nord, AQ)** - Master Degree Thesis, University "G. d'Annunzio" of Chieti-Pescara.

Polito C.P., Green R.A. and Lee J. (2008) - **Pore pressure generation models for sands and silty soils subjected to cyclic loading** - *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering 134, 1490*.

Robertson, P. K., and Wride Fear, C. E. (1998) - **Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test** - *Can. Geotech. J., 35, 442-459*.

Robertson, P.K. (2010) - **Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the Cone Penetration Test** - *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 136, 842-853*.

Seed, B., & Lee, K. L. (1966) - **Liquefaction of saturated sands during cyclic loading** - *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 92(ASCE# 4972 Proceeding)*.

Seed, B., Idriss I. M., Makdisi, F., and Banerjee N. (1975) - **Representation of Irregular Stress Time Histories by Equivalent Uniform Stress Series in Liquefaction Analyses** - Report No. EERC 75-29, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, October.

Seed, H.B. and Booker, J.R. (1977) - **Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains** - *Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of ASCE, Vol. 103, No. GT7, pp. 757-768*.

Perini Sara (2018) - **Analisi della risposta sismica locale in zona di conoide con inversione di velocità mediante simulazione numerica 2D (Avezzano nord, AQ)** - Master Degree Thesis, University "G. d'Annunzio" of Chieti-Pescara.