**SCHEDA SU LIQUEFAZIONE**

A cura di Diego Lo Presti Dipartimento di Ingegneria Civile Università di Pisa

**Obiettivo:**

Descrizione del fenomeno e dei suoi effetti sul territorio le costruzioni e le infrastrutture. Metodi di analisi e indagini necessarie. Contromisure

**Definizione:**

La liquefazione è un fenomeno catastrofico che interessa i depositi sabbiosi saturi per effetto di un rapido e significativo aumento della pressione interstiziale (u). In tali condizioni i terreni sabbiosi non-cementati attingono valori nulli o estremamente modesti della resistenza al taglio trasformandosi di fatto in un liquido pesante. L’aumento della pressione interstiziale può essere indotto da fenomeni di filtrazione o da un forte evento sismico.

**Fisica del fenomeno, effetti sul territorio le costruzioni e le infrastrutture**

Gli sforzi di taglio ciclico inducono, in condizioni drenate, delle riduzioni di volume nei terreni sabbiosi sciolti (bassi valori della densità relativa Dr). L’evento sismico può essere schematizzato come una rapida successione temporale di sforzi di taglio (un evento ha durata da pochi secondi ad alcune decine di secondi). La risposta dei terreni sabbiosi a questo tipo di sollecitazione (rapida) è di tipo non drenato nonostante essi abbiano una permeabilità elevata. In altre parole la sollecitazione si sviluppa così rapidamente che invece di dar luogo ad una variazione di volume si manifesta un aumento della u. Richiamando il criterio di Mohr - Coulomb - Terzaghi ffffutan‘+ c’) per descrivere l’inviluppo di rottura dei terreni e ricordando che nei terreni sabbiosi non cementati la coesione apparente c’ = 0, ne consegue che un aumento significativo della u può condurre a valori nulli o trascurabili di ffu (sforzo normale efficace sul piano di rottura a rottura) e quindi di ff (sforzo di taglio a rottura sul piano di rottura).

Il fenomeno può verificarsi in condizioni di campo libero (free – field), ovverosia in condizioni pianeggianti. In questo caso le tensioni geostatiche (tensioni dovute al peso proprio del terreno) sono tensioni principali per cui gli sforzi di taglio indotti dal terremoto non si sommano a sforzi di taglio pre-esistenti in condizioni statiche. Il verificarsi del fenomeno della liquefazione in queste condizioni comporta un aumento della u con successive variazioni di volume nel terreno. Gli effetti della liquefazione in condizioni di free-field sono i cedimenti della superficie del terreno, inoltre la sovrapressione dell’acqua trova sfogo verso l’alto dando luogo a rapidi fenomeni di filtrazione che si manifestano in getti d’acqua con formazione di vulcanelli di sabbia intorno alle bocche d’uscità dell’acqua in pressione. I fenomeni prima descritti possono danneggiare la viabilità e la rete di sottoservizi (ad esempio sollevamento di tubazioni interrate).

Al di sotto di edifici, rilevati o in un pendio naturale gli sforzi di taglio indotti dal terremoto si sommano a quelli pre-esistenti in condizioni statiche. Il verificarsi del fenomeno della liquefazione in queste condizioni può portare ad una liquefazione completa (flow liquefaction) o parziale (cyclic mobility). La liquefazione completa si verifica quando gli sforzi di taglio pre-esistenti sono superiori alla resistenza del materiale liquefatto e comporta la totale perdita di stabilità del terreno. I suoi effetti sono il ribaltamento o l’affondamento di edifici, il galleggiamento di strutture interrate, frane, etc….. Nel caso di liquefazione parziale vengono indotti nel terreno elevati sforzi di taglio che causano cedimenti anche rilevanti di edifici esistenti e grossi spostamenti di pendii. L’instaurarsi di una liquefazione completa o parziale dipende quindi dall’entità degli sforzi di taglio indotti dal sisma, dall’entità degli sforzi di taglio pre-esistenti e dalla resistenza al taglio della sabbia nello stato liquefatto.

Sono suscettibili alla liquefazione prevalentemente i depositi sabbiosi saturi (falda pochi metri al di sotto dal piano campagna) di origine fluviale, colluviale o eolica di età olocenica o manufatti (terrapieni o rinterri mal costipati, riempimenti idraulici). Nell’ambito di questi depositi sono maggiormente suscettibili alla liquefazione quelli che contengono una percentuale modesta di fine. Il cosiddetto criterio cinese è quello largamente accreditato per stabilire la suscettibilità di un terreno alla liquefazione dal punto di vista composizionale: a) Frazione argillosa (d<0.002 mm, CF) < 10 %; b) Limite Liquido (LL) < 32%; c) Contenuto d’acqua (Wn) > 0.9LL.

Nell’ambito dei depositi di terreno liquefacibili per condizioni geologiche e di composizione, sono suscettibili alla liquefazione quelli che, soggetti a sforzi di taglio, tendono a ridurre il proprio volume (sabbie con comportamento contrattivo). Al contrario non si avrà liquefazione nelle sabbie dilatanti (ovverosia sabbie che tendono ad aumentare il volume in conseguenza dell’applicazione di sforzi di taglio). La risposta contrattiva o dilatante di una sabbia dipende dalle condizioni di stato ovverosia la condizione individuata da tensione e densità relativa (o indice dei vuoti). Per ogni sabbia è possibile individuare nel piano e-’3 (indice dei vuoti – tensione principale efficace minore) una linea (detta linea dell’indice dei vuoti critico) che separa lo stato suscettibile alla liquefazione da quello non suscettibile (Figura 1).

Per condurre a liquefazione un terreno suscettibile alla liquefazione è necessaria l’occorrenza di un forte sisma. In termini di Intensità, i fenomeni di Liquefazione completa si verificano solamente per valori superiore al grado VIII della scala MCS. In termini di Magnitudo è necessario che alla distanza di 1 km dal sito si abbia un terremoto di Magnitudo superiore ad almeno 4.2. In termini di accelerazione di picco su roccia (agR), i fenomeni di liquefazione completa si hanno solitamente per terremoti con agR > 0.15 - 0.2g.

L’occorrenza della liquefazione ha effetti in superficie solamente in particolari condizioni. Nel caso di terreno pianeggiante, i danni in superficie sono trascurabili se lo spessore dello strato più superficiale che non liquefa (H1) è maggiore dello spessore dello strato sottostante che liquefa (H2) ovverosia se H1>H2.

Un aspetto rilevante e poco studiato del fenomeno della liquefazione è la modifica del moto sismico. In generale il verificarsi della liquefazione comporta un decremento delle ampiezze di vibrazioni ed un taglio delle frequenze più elevate. Registrazioni accelerometriche in siti liquefatti mostrano (in seguito del fenomeno) ampiezze dell’ordine di 0.05g e periodo predominante di alcuni secondi. I due aspetti insieme (accelerazioni modeste ma con periodi lunghi) comportano spostamenti comunque rilevanti e quindi un potenziale di danno non necessariamente ridotto.

**Metodi di analisi e indagini**

È necessario prevedere, come minimo, l’esecuzione di prove penetrometriche in sito (SPT o CPT) con classificazione in laboratorio dei terreni interessati (granulometria, limiti di Atterberg).

Esistono diversi metodi per valutare la potenziale occorrenza di fenomeni di liquefazione. Quello illustrato di seguito si basa sui risultati della prova SPT e si applica al caso di terreno pianeggiante. Il metodo prevede la valutazione degli sforzi di taglio indotti dal sisma e della resistenza a sforzo ciclico del deposito sabbioso in oggetto.

La sequenza di sforzi di taglio indotti dal sisma viene schematizzata come una storia regolare di sollecitazioni pari al 65% del valore massimo.

 (1)

dove: rd (fattore di riduzione dello sforzo) calcolabile mediante le seguenti espressioni rd= 1.0 - 0.00765z (se z≤9.15 m); rd=1.174 - 0.0267z (se 9.15≤z≤23m); agR = accelerazione su roccia (da ottenere da studi di pericolosità sismica o dalla zonazione sismica); I = fattore di importanza; vo = tensione verticale geostatica totale.

Lo sforzo di taglio espresso dalla (1) viene normalizzato dividendolo per la tensione verticale geostatica efficace ('vo), ed assume la denominazione di Cyclic Stress ratio (CSR).

La resistenza alla liquefazione è calcolata dai valori misurati di resistenza penetrometrica Nspt. Si procede inizialmente a normalizzare i valori misurati, utilizzando allo scopo la seguente espressione:

 (2)

Dove: NSPT è il valore misurato; N1(60) è il valore calcolato  sono fattori correttivi che tengono conto rispettivamente delle tensioni geostatiche, del rendimento energetico dell’apparecchiatura di prova, del tipo di campionatore impiegato, della lunghezza della batteria di aste di battitura e del diametro del foro di sondaggio all’interno del quale si è eseguita la misura SPT. Possibili espressioni dei fattori correttivi sono riportate di seguito. CN = (100/’vo)0.5; CE = ER/60; CB = 1.0 – 1.05 – 1.15 (per diametri del foro di sondaggio pari rispettivamente a  = 65 –115; 150; 200 mm); CR = 0.75 – 0.8 – 0.85 – 0.95 – 1.0 (se la batteria di aste è lunga rispettivamente L < 3 m; 3< L < 4; 4< L < 6; 6 < L < 10; 10 < L < 30); CS = 1.0 (campionatore standard) o 1.3 (Campionatore Standard senza liner in PVC). ER = rendimento energetico del sistema di battitura.

La resistenza ciclica divisa per la tensione geostatica verticale efficace è detta Cyclic Resistance ratio (CRR) ed è calcolata (per un terremoto di Magnitudo Ms =7.5) e per una sabbia pulita utilizzando la seguente espressione. Questa espressione si basa sull’analisi di casi reali in cui si sono verificati fenomeni di liquefazione e per i quali erano disponibili misure di resistenza penetrometrica.

CRR7.5 = 1/[34 - (N1)60] + (N1)60/135 + 50/[10(N1)60 + 45]2 –1/200 (3)

L’equazione 3 perde significato per resistenze penetrometriche superiori a 34 colpi.

L’equazione 3 vale ancora per sabbie con fine se al posto di (N1)60 si utilizza la seguente espressione corretta (N1)60cs =  + (N1)60. I parametri  e  sono riportati in Tabella 1 in funzione del contenuto di fine FC.

La Tabella 2 fornisce invece il fattore CM che va moltiplicato per CRR7.5 nel caso in cui la Magnitudo delle onde di superficie sia diversa da 7.5. La Magnitudo andrebbe definita attraverso una de-aggregazione della pericolosità sismica ovverosia individuando la coppia Magnitudo – distanza che maggiormente contribuisce alla pericolosità sismica. La definizione della Magnitudo attesa equivale alla definizione della possibile durata del sisma e quindi del numero di cicli equivalenti di sollecitazione di taglio.

Tabella 1 Fattore correttivo per sabbie che contengono del fine

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **FC (%)** | **** | **** |
| ≤ 5 | 0 | 1.0 |
| 5 -35 |  = exp(1.76-190/FC2) | =(0.99+FC1.5/1000) |
| >35 | 5.0 | 1.2 |

Tabella 2 Fattore correttivo per Magnitudo diversa da 7.5

|  |  |
| --- | --- |
| **Ms** | **CM** |
| 5.5 | 2.86 |
|  |  |
| 6.5 | 1.69 |
| 7.0 | 1.30 |
| 8.0 | 0.67 |

Il rischio di liquefazione viene valutato dal rapporto CRR/CSR. Molte normative e linee guide suggeriscono valori di tale fattore di sicurezza superiori a 1.25.

La resistenza ciclica può essere valutata dalla resistenza penetrometrica di prove CPT (prove penetrometriche statiche) o dalla misura della velocità di propagazione delle onde di taglio (Vs). Tuttavia, il database di prove CPT o misure di Vs disponibile per stabilire correlazioni empiriche del tipo espresso dall’eq. (3) è decisamente meno ampio e consolidato di quello basata sui risultati di prove SPT.

**Contromisure**

Nel caso di depositi liquefacibili è possibile proceder con differenti strategie:

* dichiarando il sito non idoneo e rilocalizzando le opere in progetto;
* mettendo in opera degli interventi mirati a ridurre la pericolosità (Compattazione superficiale o profonda, cementazione, modifiche granulometriche, abbassamento di falda, pozzi drenanti, diaframmi sotterranei che impediscano il propagarsi delle sovrapressioni d’acqua);
* mettendo in opera degli interventi mirati a ridurre la vulnerabilità delle opere (fondazioni su pali opportunamente incastrati in strati non liquefacibili e opportunamente armati nelle potenziali zone di transizione, rinforzo delle fondazioni, riduzione del sollevamento, giunti flessibili, controllo deformazioni mediante barriera di pali o geogriglie)

**Bibliografia**

Kramer, S.L. (1996) Geotechnical Earthquake Engineering, *Prentice-Hall, New Jersey, pp.653.*

Lo Presti D., Mensi E., Squeglia N. (2007) Valutazione del rischio di liquefazione ai sensi dell'OPCM 3274 (e successive modificazioni) e EC8: un'analisi critica. In Seminari di Geotecnica sulla Normativa antisismica. Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Pisa.

Pasqualini E. (1989) La Liquefazione dei terreni non coesivi. *XIV Ciclo delle Conferenze di Geotecnica di Torino. Politecnico di Torino. Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica.*

TC4-ISSMGE (1993). Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards (Revised Version). Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, ISSMGE, Published by the Japanese Geotechnical Society.

TC4-ISSMGE (2001) Case Histories for Post-Liquefaction Remediaton. Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, ISSMGE, Published by the Japanese Geotechnical Society

Youd T.L. & Idriss I.M. (2001). Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 127(4): 297-313.

**Glossario**