

SUOLI SOGGETTI A SISMA: VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

Marco BOZZA *

* *Ingegnere Strutturale, già Direttore della Federazione regionale degli Ordini degli Ingegneri del Veneto (FOIV), Amministratore di ADEPRON*

SOMMARIO

Nella valutazione del rischio sismico di un territorio, uno degli aspetti importanti da valutare è la suscettibilità alla liquefazione. Per una stima accurata della probabilità di liquefazione di un deposito sabbioso saturo durante un terremoto attualmente non esiste un unico modello in grado di tenere in conto tutti i fattori che concorrono a creare le condizioni perché essa possa verificarsi. Questo è dovuto al fatto che sono troppo numerosi i parametri che governano il fenomeno. I criteri di previsione e i metodi di calcolo che sono stati avanzati in questi ultimi anni si concentrano però su un numero di fattori molto più ridotto rispetto a quelli che intervengono a guidare il fenomeno. In questo articolo si dà una breve descrizione introduttiva ai principali criteri di previsione e metodi per la valutazione del potenziale di liquefazione.

FENOMENO DELLA LIQUEFAZIONE

Per comprendere il fenomeno della liquefazione è necessario prima considerare il *Principio degli Sforzi Efficaci*. Questo afferma che in un terreno saturo, i cui spazi interstiziali sono riempiti completamente d'acqua, agisce nello scheletro solido una *tensione efficace* σ' data da:

$$(1) \quad \sigma' = \sigma - p$$

dove σ è la tensione totale agente ortogonalmente a qualsiasi piano passante per un generico punto, e p è la pressione dell'acqua nel medesimo punto. Esprimendo il *Criterio di Resistenza di Mohr-Coulomb* in termini di tensioni efficaci, la resistenza al taglio che può essere mobilitata su un piano normale n soggetto a una tensione normale totale σ_n vale:

$$(2) \quad \tau_n = (\sigma_n - p) \operatorname{tg} \phi + c$$

essendo ϕ l'angolo di resistenza al taglio del materiale e c la coesione.

Cause del fenomeno

Per *liquefazione* si intende un processo di accumulazione della pressione del fluido interstiziale che causa in un terreno non coesivo (sabbia, ghiaia, limo non plastico) saturo diminuzione della resistenza e/o rigidità a taglio a seguito dello scuotimento sismico, potendo dar luogo a deformazioni permanenti significative. La liquefazione consiste quindi in una diminuzione della resistenza del terreno, a seguito del raggiungimento della condizione di fluidità. La perdita totale della resistenza viene raggiunta quando la pressione dell'acqua che riempie gli interstizi arriva a uguagliare la pressione di confinamento, rendendo nulle le tensioni efficaci trasmesse attraverso le particelle solide. Una volta che il terremoto ha innescato il processo di liquefazione, la massa del suolo resta in movimento fino a che non raggiunge una nuova condizione di stabilità.

Dalla relazione (2) si vede che la liquefazione si attua quando il valore limite della tensione tangenziale τ_n tende a zero. E' necessario precisare che la (2) è una relazione del tutto generale, indipendente dalla presenza o meno dell'azione sismica. Come si osserva facilmente il pericolo di liquefazione aumenta al diminuire della coesione c , dell'angolo di attrito ϕ , della tensione totale σ_n , e all'aumentare della pressione interstiziale p . Tale pericolo riguarda pertanto i depositi superficiali di terreni incoerenti o debolmente coerenti, in presenza di falde acquifere.

Le azioni cicliche di un sisma hanno l'effetto di incrementare notevolmente il potenziale di liquefazione del terreno, provocandone la compattazione: ciò riduce il volume dei vuoti aumentando di conseguenza la pressione dell'acqua interstiziale. Questo implica una perdita di resistenza dovuta a meccanismi di generazione di sovrappressione interstiziale nel terreno in condizioni non drenate, vale a dire di deformazione a taglio a volume costante. Ciò è essenzialmente dovuto alla rapidità dei processi di sollecitazione agenti, troppo brevi perché possa avere inizio la dissipazione delle pressioni accumulate nel fluido.

Dai casi verificatisi in passato si è capito che questo fenomeno è profondamente influenzato dal numero dei cicli N del terremoto, dalla densità relativa D e dalla granulometria del terreno. Un terreno incoerente, a parità di altri fattori, è maggiormente esposto al pericolo della liquefazione quanto minore è la sua densità relativa. Il potenziale di liquefazione aumenta poi, ovviamente, al crescere di N .

MANIFESTAZIONI DELLA LIQUEFAZIONE

La manifestazione della liquefazione può dare origine ad effetti di varia natura:

- *affondamento di edifici nel terreno (Figura 1(a));*
- *scorrimento di pendii (Figura 1(b));*
- *collasso di terrapieni, rilevati stradali e opere di terra in genere (Figura 1(c));*
- *collasso di palificate per perdita di connessione laterale (Figura 1(d));*
- *zampillio di copiosi getti d'acqua e di sabbia con formazione dei caratteristici coni (Figura 1(e));*
- *collasso di opere di sostegno per sovraspinta del terreno a monte (Figura 1(f)).*

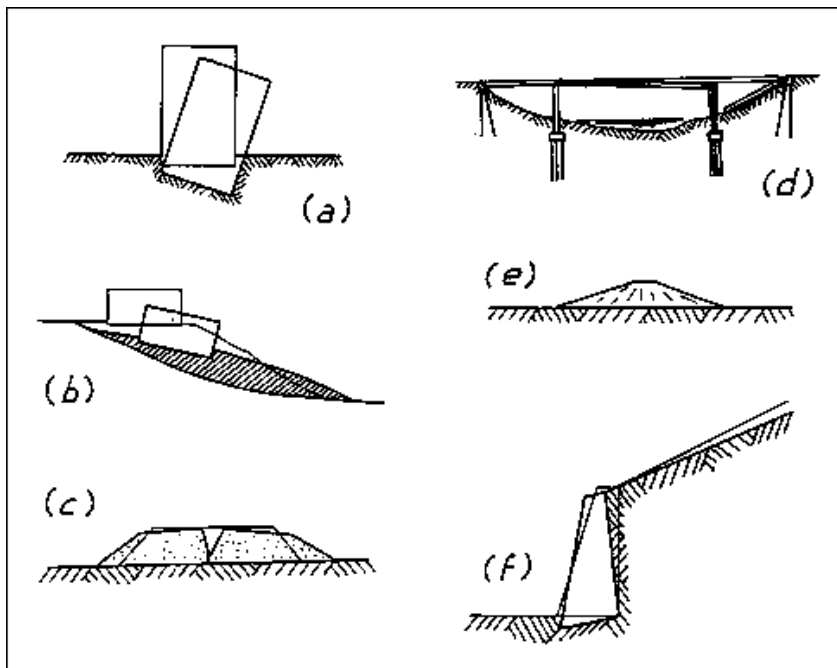


Figura 1

Liquefazione con trasporto di materiale

Questo fenomeno è dovuto al collasso per instabilità accompagnato da trasporto laterale di materiale. Esso può verificarsi solo quando agiscono nella massa del terreno tensioni tangenziali statiche (ad esempio sotto una fondazione), e nel contempo tali tensioni risultano maggiori della resistenza a taglio residua del materiale liquefatto. In tali condizioni la massa del terreno fluisce fino a quando non avrà raggiunto nuove condizioni di stabilità, che dipendono anche dalla configurazione geometrica iniziale della massa stessa. Come detto, l'azione di un sisma può provocare un incremento di pressione interstiziale, necessario per raggiungere la condizione di instabilità che innesca la liquefazione con trasporto di materiale. Attraverso un'analisi geotecnica delle condizioni iniziali del terreno (indice dei vuoti, tensioni di confinamento, tensioni tangenziali agenti), ed il loro accertamento per via sperimentale, è possibile valutare la possibilità che si verifichino fenomeni di liquefazione con trasporto di materiale. È importante sottolineare che in questi fenomeni il collasso e il trasporto del materiale possono occorrere quasi istantaneamente.

Liquefazione con mobilità ciclica

A differenza del caso precedente, le deformazioni del terreno associate a fenomeni di mobilità ciclica si sviluppano più gradualmente, secondo un processo incrementale governato dalle tensioni tangenziali cicliche prodotte dal terremoto. È quindi importante valutare, in particolare sotto l'azione del terremoto di progetto, se gli eventuali materiali non coesivi saturi presenti nel terreno di fondazione di un sito di progetto sono suscettibili di mobilità ciclica o no.

A partire dagli anni '60 furono eseguite sperimentazioni sul comportamento di provini di sabbie sature sottoposti a carico ciclico. Per simulare lo stato tensionale in sito in assenza di tensioni tangenziali statiche (condizioni di terreno piano) e consolidazione isotropa, le prove di laboratorio sottoponevano i provini a regimi triassiali.

In una tipica prova ciclica si osservano i seguenti risultati:

- Fino ad un certo numero di cicli le deformazioni prodotte da ciascun ciclo si mantengono limitate (inferiori all'1%), mentre la pressione interstiziale aumenta secondo un processo caratteristico di accumulazione progressiva. Esso è dovuto all'accoppiamento che si produce nei mezzi granulari tra sollecitazioni tangenziali cicliche e deformazione volumetrica permanente: essendo in condizioni non drenate questa è impedita e si ha trasferimento delle tensioni dallo scheletro solido al fluido.

- Viene raggiunto uno stato nel quale la pressione interstiziale uguaglia per un istante la tensione di confinamento: tale stato viene detto *liquefazione iniziale*. Il numero di cicli necessario per raggiungere questa condizione è funzione della densità relativa, della tensione di confinamento e dell'ampiezza della sollecitazione ciclica.
- A partire dall'istante della liquefazione iniziale le deformazioni in ciascun ciclo successivo aumentano: tale aumento è rapidissimo per sabbie sciolte, e medie, e lento per sabbie dense.
- Nelle sabbie sciolte lo stato di collasso per liquefazione si può fare coincidere con la liquefazione iniziale, mentre per le prove su sabbie dense si assume come indice del collasso un valore di ampiezza della deformazione ciclica del 5%. Nel caso di sabbie dense o molto dense si può escludere che una condizione di collasso venga raggiunta in sito durante un terremoto, poiché il collasso si raggiunge dopo centinaia di cicli di carico a partire dalla liquefazione iniziale.

VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE

Secondo la definizione data nell'Eurocodice 8, e come detto all'inizio, la liquefazione denota una diminuzione di resistenza a taglio (2) e/o di rigidità causata dall'aumento di pressione interstiziale in un terreno saturo non coesivo durante lo scuotimento sismico, tale da generare deformazioni permanenti significative o persino all'annullamento degli sforzi efficaci nel terreno. In questo contesto, il problema principale che si pone in fase di progettazione è la suscettibilità alla liquefazione quando la falda freatica si trova in prossimità della superficie, ed il terreno di fondazione comprende strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda, anche se contenenti una frazione fine lino-argillosa. In altre parole è necessario valutare il potenziale di liquefazione del terreno ove deve essere realizzata la costruzione.

Le ricerche che hanno portato all'evoluzione delle conoscenze sul tipo di parametri più significativi e alla formulazione di metodi empirici e di analisi dinamica hanno preso avvio a partire dai terremoti di Niigata dell'Alaska (1964). Tali studi sono stati condotti lungo due direttrici principali:

- *osservazione delle caratteristiche sismiche, geologiche e geotecniche dei siti colpiti dai terremoti distruttivi;*
- *analisi del comportamento di provini in prove cicliche di laboratorio in condizioni controllate.*

Sono emersi così i primi criteri empirici di previsione, basati sulle caratteristiche granulometriche e sullo stato di addensamento, cui hanno fatto seguito criteri e metodi più raffinati e complessi capaci di tenere conto di un numero di parametri sempre più elevato.

Il quadro dei metodi oggi disponibili è quanto mai vario e va da criteri basati su soli dati geologici qualitativi (età del deposito, origine, stratigrafia, profondità della falda, ecc.) a metodi di analisi dinamica molto sofisticati, basati sulla valutazione in termini di pressione effettive della risposta sismica locale e su prove di laboratorio molto sofisticate e complesse. L'analisi di questi ultimi metodi, benché da riservare alla progettazione di opere di notevole importanza (dighe in terra, strutture off-shore, centrali nucleari, ecc.) è di notevole interesse per comprendere i limiti dei metodi correntemente utilizzati e per comprendere la natura dei problemi che uno studio accurato della liquefazione può comportare.

Tutti i metodi attualmente disponibili per la valutazione della suscettibilità alla liquefazione dei depositi possono essere suddivisi nelle seguenti quattro categorie a crescente livello di complessità:

- *Criteri empirici;*
- *Metodi semplificati;*
- *Metodi di analisi dinamica;*
- *Metodi probabilistici.*

CRITERI EMPIRICI

Questi criteri hanno trovato origine dalle prime osservazioni sulle caratteristiche dei siti che sono stati interessati da fenomeni di liquefazione. In particolare è emersa l'importanza assunta dalla granulometria, dallo stato di addensamento e dalla pressione di confinamento. Tali criteri, che si basano su parametri desunti da prove di identificazione o da misure della densità relativa, ovvero da prove penetrometriche standard, o anche su alcune caratteristiche geologiche qualitative, hanno cercato di identificare i valori critici dei parametri fondamentali.

Generalmente si tratta di criteri molto approssimati che si limitano a valutare la suscettibilità dei depositi, indipendentemente dalla entità della scossa sismica che può produrre liquefazione.

Tuttavia benché molto approssimati questi criteri sono stati confermati durante i terremoti successivi a quelli di riferimento, e per questo motivo vengono ancora utilizzati soprattutto per fini di pianificazione. Si sottolinea comunque la loro scarsa affidabilità quando vengono applicati in situazioni molto diverse da quelle di origine. I più conosciuti di questi criteri sono:

- *Criterio di Kishida (1969);*
- *Criterio di Ohsaki (1970);*
- *Criterio della normativa cinese (1974);*
- *Criterio proposto dalla normativa francese;*
- *Criteri per la microzonazione sismica;*
- *Criterio di Kuribayashi e Tatsuoka (1975).*

METODI SEMPLIFICATI

Questi metodi si basano sul confronto fra le sollecitazioni di taglio che producono liquefazione e quelle indotte dal terremoto, ovvero fra gli stati tensionali che producono liquefazione o livelli di deformazione critici e quelli indotti dalle onde sismiche nella loro propagazione. A tal fine richiedono la precisazione di parametri relativi sia all'evento sismico sia al deposito, valutati questi ultimi o con prove dinamiche di laboratorio o con prove in situ. La loro applicazione richiede quindi:

- la valutazione della resistenza del terreno agli sforzi di taglio ciclici in condizioni non drenate, mediante correlazioni basate su prove in situ e in laboratorio;
- calcolo delle sollecitazioni di taglio indotte.

Essi sono basati sui concetti di *rapporto tensionale ciclico* (CSR), che esprime il carico sismico, e di *rapporto di resistenza ciclica* (CRR), che esprime la capacità del terreno di resistere alla liquefazione. Il rapporto tra le due variabili, da stimare alle diverse profondità del deposito, costituisce il coefficiente di sicurezza rispetto alla liquefazione, consentendo pertanto di stabilire il verificarsi o meno del fenomeno.

Metodo di Seed-Idriss

Tra i metodi semplificati il più noto è quello di Seed e Idriss (1982), basato su una procedura semi-empirica: esso è di facile applicazione e richiede solo la conoscenza di pochi parametri geotecnici: granulometria, numero dei colpi della prova standard SPT, densità relativa, peso di volume. Esso prevede un confronto tra le caratteristiche meccaniche dei terreni (valutata prevalentemente sui risultati di prove di sito, quali la prova penetrometrica dinamica SPT, la prova penetrometrica statica CPT, la misura della velocità delle onde di taglio V_s) con l'eventuale occorrenza nel medesimo sito del fenomeno della liquefazione, a seguito di una sollecitazione sismica (stimata attraverso la massima accelerazione attesa in superficie). Per la valutazione del rapporto di resistenza ciclica CRR il metodo prevede l'utilizzo di un abaco nel quale in ordinata è riportato il rapporto tensionale ciclico CSR (carico sismico) e in ascissa la resistenza del terreno, stimata mediante una delle prove in situ, tipicamente la prova SPT (Figura 2).

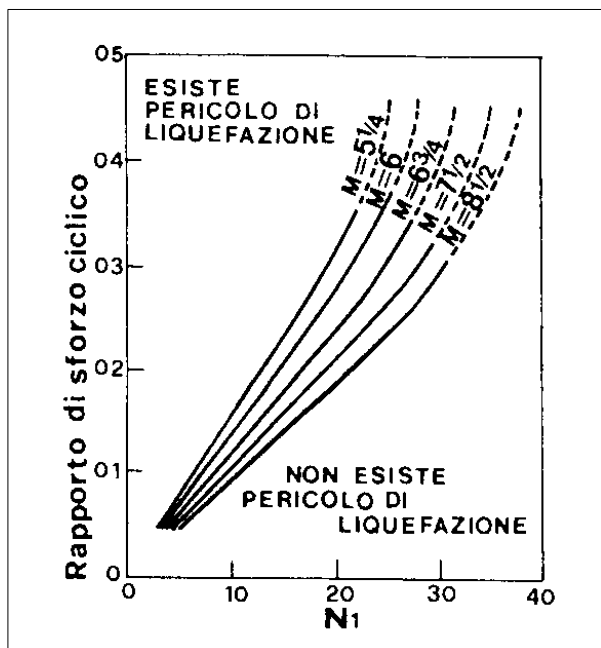


Figura 2

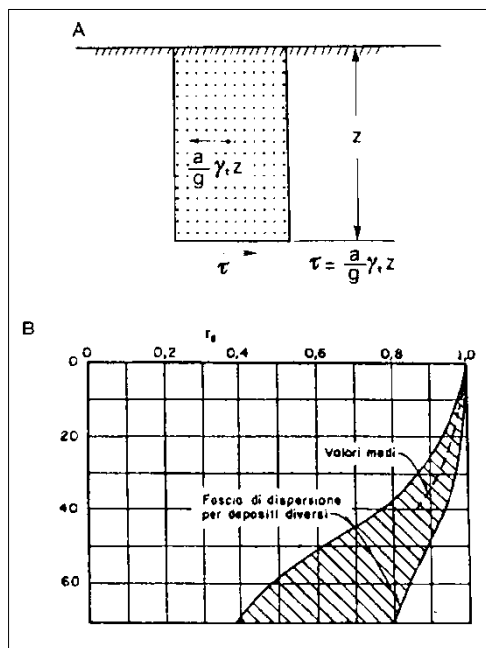


Figura 3

Il rapporto tensionale ciclico è definito dalla relazione:

$$(3) \quad CSR = 0,65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot r_d$$

nella quale:

a_{max} = accelerazione di picco al piano di campagna

g = accelerazione di gravità

σ_v = tensione totale verticale nel sottosuolo

σ'_v = tensione efficace verticale nel sottosuolo

r_d = coefficiente riduttivo dell'azione sismica alla profondità di interesse per tenere in conto la deformabilità del sottosuolo

Nell'ipotesi di propagazione verticale di onde sismiche di taglio la colonna di terreno di altezza z (Figura 3A) si muove rigidamente in direzione orizzontale. Poiché in realtà la colonna di terreno è deformabile, lo sforzo di taglio è minore che nell'ipotesi di corpo rigido. Seed e Idriss hanno fornito a tal proposito i valori del coefficiente r_d della (3) in funzione della profondità in forma grafica (Figura 3B). Le curve limite della Figura 1, per diversi valori della magnitudo M , separano i punti rappresentativi di eventi studiati per i quali si è osservato il fenomeno della liquefazione (sopra le curve limite) da quelli dove la liquefazione non è avvenuta (sotto le curve limite). Le curve limite rappresentano allora il luogo dei minimi rapporti tensionali ciclici CSR necessari affinché uno strato di terreno vada soggetto a liquefazione: esse rappresentano quindi il luogo dei valori corrispondenti alla resistenza ciclica CRR.

Benché utili per valutazioni di massima, i metodi semplificati offrono indicazioni molto approssimate sulla resistenza dei terreni alla liquefazione. La scoperta dell'incidenza sulla resistenza alla liquefazione dei metodi di ricostituzione dei provini, della loro dimensione e di altri effetti secondari, sta portando però sempre più a privilegiare i metodi basati su correlazioni della resistenza alla liquefazione con parametri desunti da prove in situ. Tali metodi fanno riferimento agli stati limite ultimi prescindendo dalle deformazioni e sono impiegati generalmente per la progettazione di opere di media importanza. Il loro impiego si giustifica quindi per la loro facilità di applicazione, ovvero negli ambiti nei quali non sia richiesta una previsione particolarmente accurata.

METODI DI ANALISI DINAMICA

Questi metodi richiedono la determinazione, alle diverse quote, della storia delle sollecitazioni delle tensioni e delle deformazioni di taglio, conseguente ad un input sismico, definito da una storia di accelerazioni al bedrock. In particolare essi si basano su:

- *valutazioni dello stato tensionale in sito prima del terremoto atteso;*
- *valutazioni della resistenza alla liquefazione che tengano conto dei processi deformativi e di sviluppo delle pressioni interstiziali.*

Lo studio delle condizioni di stabilità del deposito richiede innanzitutto un'analisi della risposta sismica locale (in termini locali o effettivi) ad un dato terremoto. Le ampiezze degli sforzi di taglio e delle deformazioni indotte dal sisma vengono quindi confrontate con quelle che provocano la liquefazione dei terreni in prove cicliche di laboratorio sotto un numero di cicli equivalenti alla durata del sisma. I risultati delle prove di laboratorio sono utilizzati sia per un confronto diretto con le sollecitazioni indotte, sia per ricavare leggi costitutive e quelle che regolano lo sviluppo e la dissipazione delle pressioni neutre da incorporare nell'analisi dinamica. Tali metodi, messi a punto per la verifica di stabilità del sottosuolo di grandi manufatti e di opere importanti, possono essere suddivisi, a seconda del tipo di analisi condotto, in due categorie:

- *analisi in termini di pressioni totali;*
- *analisi in termini di pressioni effettive.*

METODI PROBABILISTICI

Costituiscono una versione in termini probabilistici dei metodi precedenti (semplificati e di analisi dinamica) a causa delle elevate incertezze sui valori reali che i parametri rappresentativi del moto sismico e delle proprietà geotecniche del deposito possono assumere. A tal fine sono state sviluppate alcune procedure probabilistiche con lo scopo di incorporare nella stima del potenziale di liquefazione la variabilità dei principali parametri. Questi metodi sono attualmente utilizzati per interesse prevalentemente scientifico in ambiti molto specialistici. Le procedure proposte possono essere raggruppate in due categorie:

- *metodi in cui la descrizione probabilistica riguarda esclusivamente i parametri sismici;*
- *metodi in cui la descrizione probabilistica riguarda anche i più importanti parametri geotecnici.*