

Allegato 6.1B
Liquefazione dei Terreni in Condizioni Sismiche

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
2	GENERALITÀ	2
2.1	FATTORI CHE PREDISPONGONO ALLA LIQUEFAZIONE	3
2.2	METODI DI CALCOLO DELLA SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	4
2.2.1	Metodi di Calcolo Empirici	4
2.2.2	Metodi Semplificati	7

1

INTRODUZIONE

Il presente documento analizza, sulla base dei dati sperimentali raccolti nelle campagne geognostiche eseguite in sito dal Proponente (allegato 6.1A), la possibilità che, in caso di eventi sismici, possano aver luogo fenomeni di liquefazione dei terreni che possano compromettere la stabilità dei manufatti di Centrale.

GENERALITÀ

I fenomeni di liquefazione che interessano i depositi alluvionali saturi dipendono da:

- proprietà geotecniche dei terreni;
- caratteristiche delle vibrazioni sismiche e loro durata;
- genesi e storia geologica dei terreni;
- fattori ambientali.

Un terreno incoerente saturo, in assenza di sollecitazioni sismiche è soggetto soltanto alla pressione litostatica, dovuta al peso dei sedimenti sovrastanti (in campo libero e con superficie piana).

Durante una sollecitazione sismica vengono indotte nel terreno delle sollecitazioni cicliche di taglio, dovute alla propagazione delle onde sismiche verso la superficie, mentre la pressione litostatica resta costante. Per tutta la durata della scossa ogni elemento di terreno è soggetto ad una serie di sforzi tangenziali che cambiano ripetutamente verso ed ampiezza. Nel terreno si possono generare fenomeni di liquefazione se la scossa sismica produce un numero di cicli tale da far sì che la pressione interstiziale uguagli la pressione di confinamento. Nei depositi alluvionali la pressione di confinamento aumenta con la profondità, mentre l'ampiezza dello sforzo di taglio indotto dal sisma diminuisce. La resistenza alla liquefazione quindi è maggiore con la profondità. Quindi, maggiore è la durata di un terremoto più alta è la possibilità che si arrivi (maggior numero di cicli) alla liquefazione. Inoltre, maggiore è l'ampiezza della vibrazione e della deformazione indotta e minore è il numero di cicli necessari per giungere a tale condizione.

La probabilità che un deposito raggiunga le condizioni per la liquefazione dipende anche dallo stato di addensamento, dalla composizione granulometrica, dalle condizioni di drenaggio, dalla storia delle sollecitazioni sismiche e dall'età del deposito stesso. Tanto minore è il grado di addensamento del materiale (elevato indice dei vuoti e bassa densità relativa) tanto maggiore è la probabilità che, a parità di altre condizioni, un deposito raggiunga lo stato di liquefazione.

Anche la distribuzione, la forma delle particelle e il grado di uniformità influenzano notevolmente il fenomeno, per le implicazioni che questi fattori hanno sulla resistenza al taglio e per il modo di dissiparsi della pressione interstiziale in eccesso.

Per quanto riguarda la storia delle sollecitazioni sismiche su un deposito di può affermare che precedenti deformazioni moderate influiscano positivamente sulla resistenza del deposito, mentre una storia caratterizzata da alti livelli di

deformazione (deposito già soggetto a liquefazione) ha effetti negativi sul potenziale di riliquefazione.

I depositi sabbiosi con più alto potenziale di liquefazione sono i più recenti. A parità di composizione e di altre condizioni lo stesso deposito, se più antico, avrà sviluppato legami intergranulari e cementazioni sempre più forti con il tempo. Inoltre la struttura di un deposito antico sarà resa più stabile e omogenea per gli effetti delle vibrazioni indotte da precedenti terremoti di piccola entità.

2.1

FATTORI CHE PREDISPONGONO ALLA LIQUEFAZIONE

Di seguito si descrivono, nel dettaglio, i fattori principali che predispongono un terreno alla liquefazione, prima di passare ad illustrare i metodi di calcolo della suscettibilità.

Poiché ai terreni incoerenti sono associati generalmente valori del coefficiente di permeabilità relativamente elevati, l'applicazione di sovraccarichi gradualmente (per es. dovuti alla costruzione di un fabbricato) non conduce a significativi incrementi di carico di pressione neutra (u). In questi casi infatti non si generano gradienti di pressione fra la zona sollecitata e quella indisturbata tali da produrre rapidi flussi idrici fra le due zone. I vuoti dello scheletro solido sono quasi sempre sufficientemente larghi da non ostacolare questo flusso.

Nel caso, viceversa, di sollecitazioni intense sottoposte ad incrementi rapidi, come si verifica durante un evento sismico, i gradienti di pressione che si generano possono essere tali da produrre elevati flussi idrici dall'interno verso l'esterno. Se il fenomeno si manifesta in depositi incoerenti a granulometria relativamente fine (per es. sabbie fini), la larghezza limitata dei vuoti dello scheletro tenderà ad ostacolare il flusso idrico, con il conseguente sviluppo di elevate pressioni neutre.

Oltre alla granulometria, altri fattori condizionano la suscettibilità di un deposito sciolto al fenomeno della liquefazione. I principali sono la profondità del livello potenzialmente liquefacibile ed il suo grado di addensamento. Con l'aumentare della profondità del deposito diminuisce la probabilità di liquefazione dello stesso durante l'evento sismico.

È evidente infatti che con l'aumentare della profondità siano richiesti valori di carico di pressione neutra (u) sempre più elevati per annullare la pressione litostatica crescente. Inoltre con la profondità tende a diminuire anche l'intensità delle sollecitazioni indotte dal sisma. L'influenza della pressione litostatica permette di spiegare il fenomeno della migrazione della liquefazione dai depositi più superficiali a quelli più profondi.

I livelli meno profondi sono quelli che per primi subiscono la liquefazione, che è facilitata dalla minore pressione litostatica.

Gli strati più profondi, che inizialmente non subiscono il fenomeno, nel momento in cui il deposito superiore va in liquefazione risentono di un calo del peso della

colonna di terreno sovrastante, evento che aumenta la probabilità che anch'essi subiscano la liquefazione.

Fondamentale è anche il grado di addensamento del terreno, esprimibile attraverso il parametro densità relativa (D_r %). I terreni molto addensati, se sollecitati, subiscono un aumento di volume (fenomeno di dilatanza) con conseguente diminuzione della D_r %, che tende a portarsi verso un valore critico, variante in funzione principalmente della granulometria del deposito. L'aumento di volume ha come conseguenza, nei depositi saturi, un richiamo dell'acqua dall'esterno verso l'interno, con creazione di una pressione neutra (u) di segno negativo (cioè si ha un aumento del carico "efficace" ($\sigma_v(\text{totale}) - u$) incrementando la resistenza al taglio).

L'esatto contrario avviene in terreni poco addensati, dove una sollecitazione tende a produrre una diminuzione di volume, con conseguente flusso idrico verso l'esterno e la generazione di una u di segno positivo (diminuisce il valore del carico "efficace" verticale ($\sigma_v(\text{totale}) - u$)).

In conclusione si possono ritenere potenzialmente liquefacibili quei depositi sciolti che presentano le seguenti caratteristiche:

- granulometricamente sono sabbie da fini a medie con contenuto in fine variabile generalmente dallo 0 al 25%;
- si trovano sotto falda;
- sono da poco a mediamente addensati.
- si trovano a profondità relativamente basse (di solito inferiori ai 15 metri).

2.2

METODI DI CALCOLO DELLA SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE

Escludendo dall'esame i metodi analitici e numerici più complessi (per es. i metodi agli elementi finiti), che risultano eccessivamente onerosi per i casi pratici più comuni, vengono qui presi in esame alcuni fra i più utilizzati metodi empirici e semplificati.

2.2.1

Metodi di Calcolo Empirici

I metodi empirici vengono utilizzati generalmente per fornire una valutazione di massima della vulnerabilità di un deposito sabbioso saturo alla liquefazione, prendendo in considerazione solo i parametri geologico - tecnici del sito. Si tratta di metodi estremamente semplificati, di rapido e semplice impiego, utili in particolare per lavori di microzonazione sismica.

Procedura di Sherif & Ishibashi (1978)

Il metodo di Sherif & Ishibashi ammette che si possano verificare fenomeni di liquefazione solo nei livelli che presentino le seguenti caratteristiche:

- siano costituiti da sabbie o sabbie limose;

- si trovino sotto il livello statico della falda;
- gli strati di copertura non abbiano spessore maggiore di 3 metri.

Se sono verificati tali requisiti, si prosegue nell'elaborazione, prendendo in considerazione la granulometria e l'addensamento del deposito. Il metodo richiede che siano condotte analisi granulometriche su campioni dello strato potenzialmente liquefacibile. Le curve ricavate vanno confrontate con due profili granulometrici di riferimento (*Figura 2.2.1a*), uno per granulometrie uniformi, l'altro per granulometrie estese (presenza di frazioni argillose o ghiaiose). In assenza di analisi granulometriche, va effettuata almeno una descrizione sommaria della litologia del deposito, da confrontare con i due profili.

Confrontando le curve granulometriche relative al sito in esame, riprodotte nell'*Allegato A "Caratterizzazione geotecnica di massima"*, con le curve di potenziale liquefazione del terreno (*Figura 2.2.1a*), si può notare come, da questo punto, di vista si sia in presenza di un terreno potenzialmente liquefacibile.

Verificato che la granulometria dello strato sia predisponente al manifestarsi di fenomeni di liquefazione, per poter emettere un giudizio definitivo sulla vulnerabilità del deposito, occorre prendere in considerazione il suo grado di addensamento, valutato attraverso prove penetrometriche SPT o CPT (*Figura 2.2.1b*). Se il numero di colpi ricade, anche parzialmente, nella fascia A, il deposito è liquefacibile, se ricade nella fascia C non è liquefacibile. La fascia B infine riguarda strati in cui la liquefazione è possibile, ma non probabile.

Come emerge dalla *Figura 2.2.1b*, tutti i numeri di colpi alle diverse profondità misurati nei sondaggi S1, S2, S3 si collocano infatti nella Zona C, non liquefacibile.

Figura 2.2.1a *Fusi Granulometrici di Terreni Suscettibili alla Liquefazione - Diagrammi di Sherif & Ishibashi*

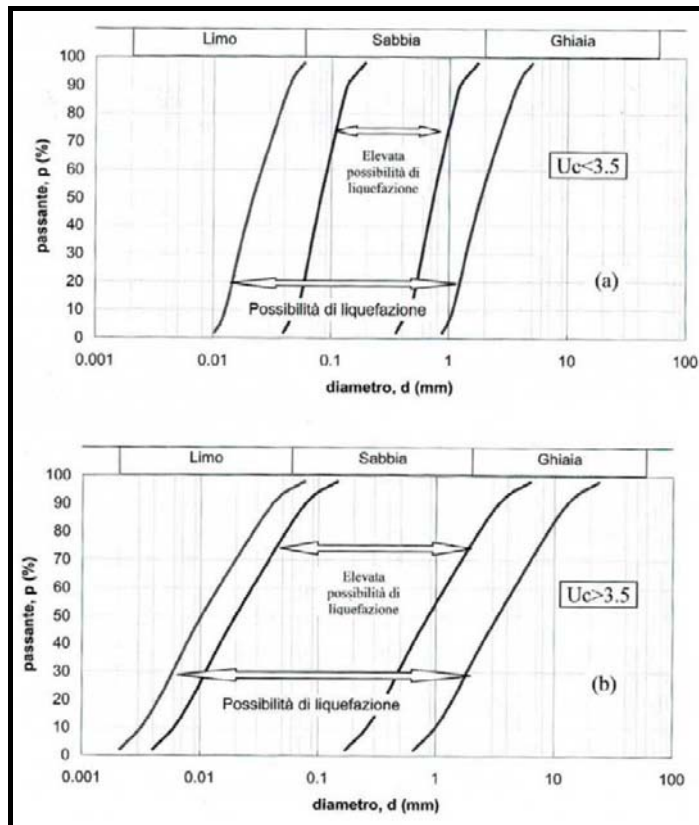
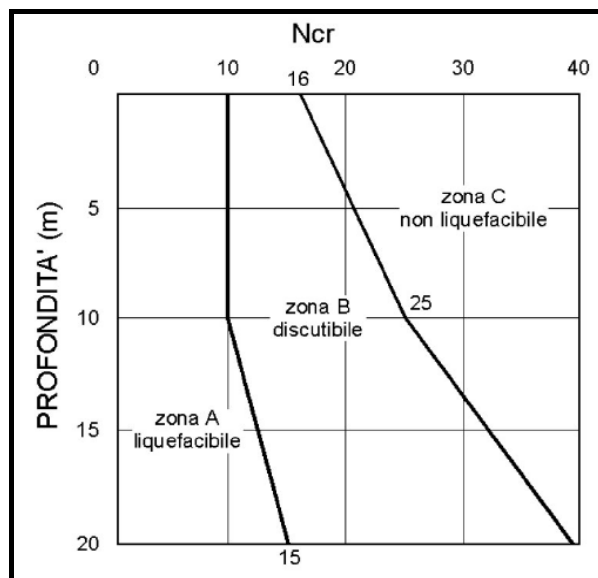


Figura 2.2.1b *Profili Critici di N_{SPT} nei Confronti della Liquefazione (Sherif & Ishibashi, 1978)*



Criterio di Youd e Perkins (1978)

Si tratta di un metodo di ancor più rapida e semplice applicazione del precedente. Sulla base del tipo di deposito sedimentario e della sua età, viene fornita un indicazione qualitativa del grado di vulnerabilità del deposito stesso.

La probabilità di liquefazione è ricavabile dalla *Tabella 2.2.1a*.

Tabella 2.2.1a Criterio di Youd e Perkins

Tipo deposito	Età del deposito			
	<500 anni	Olocene	Pleistocene	Pre-Pleistocene
Depositi continentali				
Canali fluviali	Molto alta	Alta	Bassa	Molto bassa
Pianure di esondazione	Alta	Moderata	Bassa	Molto bassa
Pianure e conoidi alluvionali	Moderata	Bassa	Bassa	Molto bassa
Spianate e terrazze marini	----	Bassa	Molto bassa	Molto bassa
Deltaici	Alta	Moderata	Bassa	Molto bassa
Lacustri	Alta	Moderata	Bassa	Molto bassa
Colluvioni	Alta	Moderata	Bassa	Molto bassa
Scarpate	Bassa	Bassa	Molto bassa	Molto bassa
Dune	Alta	Moderata	Bassa	Molto bassa
Loess	Alta	Alta	Alta	Molto bassa
Glaciali	Bassa	Bassa	Molto bassa	Molto bassa
Tuff	Bassa	Bassa	Molto bassa	Molto bassa
Tephra	Alta	Alta	?	?
Terreni residuali	Bassa	Bassa	Molto bassa	Molto bassa
Sebkha	Alta	Moderata	Bassa	Molto bassa
Zone costiere				
Deltaici	Molto alta	Alta	Bassa	Molto bassa
Di estuario	Alta	Moderata	Bassa	Molto bassa
Di spiaggia con elevata energia delle onde	Moderata	Bassa	Molto bassa	Molto bassa
Di spiaggia con bassa energia delle onde	Alta	Moderata	Bassa	Molto bassa

Come riportato nello studio di caratterizzazione geotecnica (*Allegato A*), i depositi del sito in esame ricadono in un settore di transizione tra i depositi alluvionali del Fiume Amato ed i depositi di conoide di deiezione di un suo tributario di destra (Vallone Marucca).

I depositi del Fiume Amato e di conoide costituiscono, nel complesso, un potente materasso alluvionale (spessore stimato, da dati bibliografici, pari a 40 m circa) d'età olocenica, poggiante su un substrato pliocenico. In conclusione il sito in esame si colloca secondo la tabella in un campo qualitativo di basso grado di vulnerabilità.

2.2.2 Metodi Semplificati

Al contrario della maggior parte dei metodi empirici, quelli semplificati richiedono che venga definito un sisma di progetto, attraverso l'introduzione dell'accelerazione sismica orizzontale massima in superficie e della magnitudo di riferimento.

Ai sensi del D.M. 14/01/2008, concernente le norme tecniche di costruzione (NTC), *“la pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale*

massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} [...]; gli spettri di normativa sono definiti in funzione di tre parametri:

- a_g accelerazione orizzontale massima del terreno (Peak Ground Acceleration, PGA);
- F_o valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_C periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Le forme spettrali sono caratterizzate da prescelte probabilità di superamento e vite di riferimento; la vita di riferimento e la probabilità di superamento dell'accelerazione al suolo sono legate tra loro tramite il periodo di ritorno T_R definito dalla seguente relazione:

$$T_R = \frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

Per il progetto in esame, essendo una centrale termoelettrica un edificio che ricade in classe d'uso n° IV, con coefficiente d'uso C_U pari a 2, ed avendo una vita nominale massima (V_n) di 50 anni, si determina una vita di riferimento per le azioni sismiche (V_r) pari a 100 anni. Considerando, inoltre, lo stato limite SLV "Stato Limite di Salvaguardia della Vita", per il quale il valore di P_{VR} è pari al 10%, si ottiene un valore di T_R pari a 949 anni.

Il valore della pericolosità sismica per il periodo di ritorno considerato, in termini di a_g relativa al sito di progetto, è stato ricavato a partire dal reticolo di riferimento di cui all'Allegato B del D.M. 14/01/2008, concernente le norme tecniche di costruzione (NTC), attraverso il quale è stato discretizzato l'intero territorio nazionale. Poiché il sito interessato dalla realizzazione della centrale non corrisponde ai nodi del reticolo di riferimento, il valore di a_g è stato calcolato come media pesata dei valori assunti nei quattro vertici più vicino al sito di interesse, ottenendo così un valore di PGA pari a 0,366 g.

Secondo quanto riportato al capo C.7.11.3.4 della Circolare n.617 del 02/02/2009 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti "Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14/01/2008, la sicurezza alla liquefazione viene valutata localmente con l'impiego di metodologie di analisi avanzate, attraverso la determinazione del coefficiente di sicurezza, definito come di seguito:

$$F_s = \frac{CRR}{CSR}$$

dove:

$$CRR = \frac{v_f}{\sigma'_{vb}}$$

è la resistenza ciclica alla liquefazione,

$$CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{v0}}$$

è la sollecitazione ciclica indotta dall'azione sismica.

La resistenza ciclica alla liquefazione può essere determinata con prove cicliche di laboratorio o con relazioni empiriche basate su risultati di prove e misure in sito. La sollecitazione ciclica indotta dal sisma è correlata alla massima tensione tangenziale indotta dall'azione sismica alla profondità considerata, τ_{max} , determinabile direttamente, con analisi di risposta sismica locale, o, indirettamente, con l'ausilio di relazioni empiriche.

Un deposito è considerato suscettibile di liquefazione se il coefficiente di sicurezza F_s sarà minore di 1 e non liquefacibile un deposito in cui sia $F_s > 1,25$.

Calcolo della Resistenza Ciclica alla Liquefazione (CRR)

Tale parametro può essere ricavato da prove penetrometriche dinamiche utilizzando il metodo di Seed e Idriss (1982).

In tale metodo la resistenza alla liquefazione può essere stimata con la seguente formula:

$$CRR = \frac{N_a}{90}$$

dove N_a è calcolato con la formula:

$$N_a = N_{SPT} \left(\frac{1,7}{\sigma'_{v0} + 0,7} \right) + N_1$$

dove:

σ'_v (kg/cm) è la pressione verticale efficace;

$N_1 = 0$ se $d_{50}(\text{mm}) > 0,25$, $N_1 = 7,5$ se $d_{50}(\text{mm}) \leq 0,25$.

Calcolo della Sollecitazione Ciclica indotta dall'Azione Sismica (CSR)

Il valore di CSR, per un evento sismico di magnitudo M pari a 7,5, viene ricavato attraverso la relazione (Seed & Idriss, 1971):

$$CSR_{M=7,5} = 0,65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d$$

dove:

a_{max} accelerazione sismica massima (PGA);

g accelerazione di gravità = 980,7 cm/s²;

σ_{v0} pressione verticale totale alla profondità z dal piano campagna;

σ'_{v0} pressione verticale efficace alla profondità z dal piano campagna;

r_d coefficiente di riduzione sismica, funzione della profondità z dal piano campagna, valutabile secondo il seguente schema (Liao & Whitman, 1986):

$$r_d = \begin{cases} 1 - 0,00765z; & z \leq 9,15 \text{ m} \\ 1,174 - 0,0267z; & 9,15 < z \leq 23 \text{ m} \\ 0,774 - 0,008z; & 23 < z \leq 30 \text{ m} \\ 0,5; & z > 30 \text{ m} \end{cases}$$

Qualora il valore della magnitudo dovesse essere diverso da 7,5, occorre ricondurre il carico sismico a quello equivalente di un terremoto di magnitudo 7,7, attraverso la seguente relazione:

$$CSR_{M=7,8} = \frac{CSR_{M=7,5}}{MSF}$$

dove MSF è un coefficiente correttivo funzione della magnitudo del sisma e ricavabile con la relazione:

$$MSF = 6,9 \exp\left(-\frac{M}{4}\right) - 0,058$$

Condizioni di Verifica

La verifica alla liquefacibilità del deposito alluvionale presente in sito è stata verificata applicando i sopra descritti metodi di calcolo della sollecitazione di taglio indotta dal sisma (CSR) e della resistenza alla liquefazione (CRR) di Seed & Idriss, basandosi sui dati delle prove penetrometriche dinamiche riportate in Allegato A.

Il calcolo del Fattore di Sicurezza per il rischio di liquefazione è stato calcolato prendendo in considerazione i parametri geotecnici del Campione N2 del sondaggio S1 prelevato alla profondità 7,00 m – 7,30 m, riportati in *Tabella 2.2.2a*.

La verifica è stata condotta utilizzando un valore di N_{spt} pari a 38, riferito ad una profondità di 11,5 m dal piano campagna.

E' stato verificato il Fattore di Sicurezza per il valore di 38 N_{spt} (minimo valore registrato tra tutti i sondaggi alla profondità massima di 11,5 m); la verifica è stata condotta ipotizzando un evento sismico di Magnitudo 7,5 con un'accelerazione al suolo di picco (PGA) pari a 0,366 g.

Il potenziale rischio di liquefazione è stato verificato per due valori di profondità z dal piano campagna:

- 25 m di depositi sabbiosi o sabbioso limosi; con una soggiacenza di falda pari a 19 m;
- 11,5 m, che corrisponde alla profondità intercettata dalla prova SPT considerata.

Tabella 2.2.2a Proprietà Geotecniche del Terreno

Parametro	Valore
Peso specifico	$\gamma_s = 2,688$ [t/m ³]
Peso dell'unità di volume	$\gamma = 1,872$ [t/m ³]
Peso secco unita' di volume	$\gamma_d = 1,694$ [t/m ³]
Porosità	$n = 0,370$
Indice di porosità	$e = 0,587$
Grado di saturazione	$S = 0,481$
Carico totale a 25m	$\sigma_v = 4,79$ [kg/cm ²]
Carico efficace a 25m	$\sigma'_v = 4,19$ [kg/cm ²]
Carico pressione neutra (u) a 25m	$u = 0,6$ [kg/cm ²]

La *Tabella 2.2.2b* riporta i valori calcolati.

Tabella 2.2.2b Valori Calcolati

Profondità dal p.c.	Resistenza Ciclica CRR	Sollecitazione Ciclica CSR	Fattore di Sicurezza (Fs = CRR/CSR)
11,5 m	0,33	0,21	1,62
25 m	0,23	0,16	1,47

Entrambi i valori del Fattore di Sicurezza risultano essere superiori al valore soglia di rischio liquefazione posto dal metodo Seed & Idriss a 1,25.

In conclusione i risultati ottenuti fanno escludere la possibilità di liquefazione dello spessore di terreno considerato.