# INCONTRO INFORMATIVO SU

# *ADOZIONE LINEE GUIDA GESTIONE DEL TERRITORIO IN AREE INTERESSATE DA LIQUEFAZIONE DEI SUOLI*

**Genova, 29 settembre 2021**
**Sala Colombo - Via Fieschi 15**

*Dott. Geol. Carlo Civelli*

REGIONE LIGURIA

# *COS'E' LA LIQUEFAZIONE DI UN TERRENO*.

**Per liquefazione di un terreno s'intende il quasi totale annullamento della sua resistenza al taglio con l'assunzione del comportamento meccanico caratteristico dei liquidi.**
**I fenomeni di liquefazione interessano in genere depositi sabbiosi saturi e dipendono principalmente da: proprietà geotecniche dei terreni, caratteristiche delle vibrazioni sismiche e loro durata, genesi e storia geologica dei terreni.**

**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. Nel terreno si possono generare fenomeni di liquefazione se la scossa sismica produce un numero di cicli tale da far si che la pressione interstiziale uguagli la pressione di confinamento**.

REGIONE LIGURIA

# COS'E' LA LIQUEFAZIONE DI UN TERRENO.

Nei depositi 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. 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.

# COS'E' LA LIQUEFAZIONE DI UN TERRENO.

REGIONE LIGURIA

# COS'E' LA LIQUEFAZIONE DI UN TERRENO.

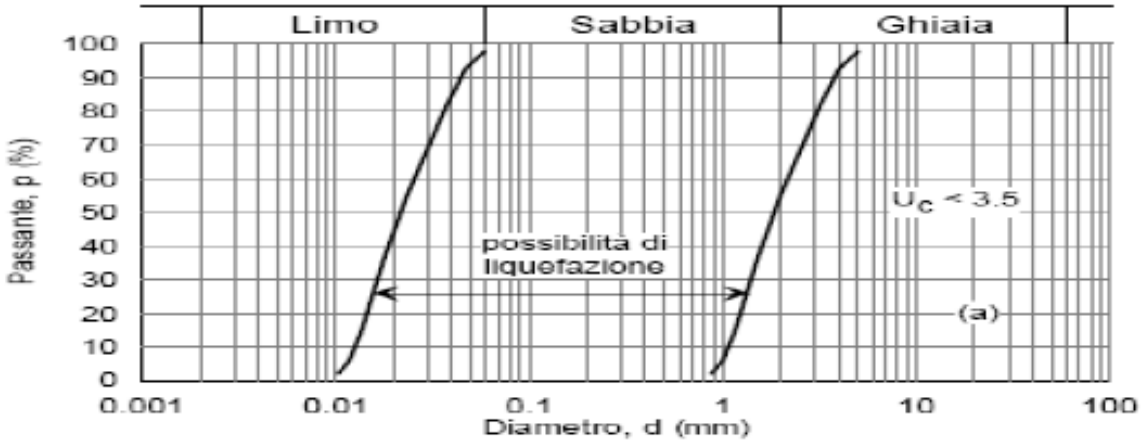
REGIONE LIGURIA

# Esclusione della verifica a liquefazione

*La verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:*

1. accelerazioni massime attese al piano campagna *in assenza di manufatti* (condizioni di campo libero) minori di 0,1*g*; *[Trattasi di amax]*
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3 depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata* *(N1)60 > 30* oppure *qc1N > 180* *dove (N1)60 è il valore della resistenza determinata in prove* penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e *qc1N è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche* statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 7.11.1(a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità *Uc < 3,5 ed in Figura 7.11.1(b) nel caso di terreni con* coefficiente di uniformità *Uc > 3,5.*

REGIONE LIGURIA




Uc rapporto D60/D10, dove D60 e D10 sono il diametro delle particelle corrispondenti rispettivamente al 60% e al 10% del passante sulla curva granulometrica cumulativa

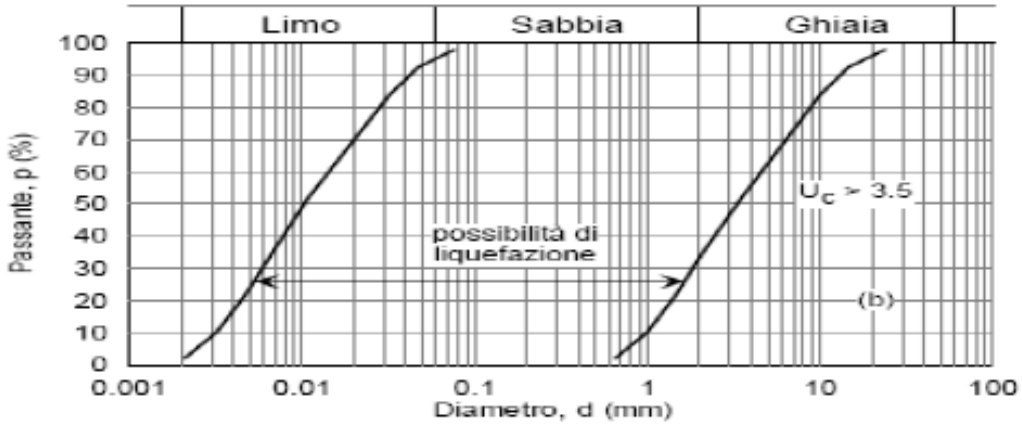



**Figura 7.11.1** – *Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione.*

**Quando la condizione 1 (Ndr: accelerazione max attesa amax < 0,1 g) non risulti soddisfatta, le indagini geotecniche devono essere finalizzate almeno alla determinazione dei parametri necessari per la verifica delle condizioni 2, 3 e 4.**

## . DATI DI BASE PER VALUTARE LA SUSCETTIBILITA' ALLA LIQUEFAZIONE

Gli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica- Gruppo di lavoro MS 2008" riportano i seguenti suggerimenti:

Per le valutazioni della suscettibilità alla liquefazione sono indispensabili dati su:

- magnitudo degli eventi attesi;
- scuotimento in superficie (in genere, in termini di accelerazione massima del suolo, PGA);
- litostratigrafia;
- granulometria;
- profondità della falda;
- resistenza dei terreni sotto carico ciclico.

**La suscettibilità del terreno alla liquefazione deve essere valutata sulla base di prove in sito (SPT e/o CPT e/o prove geofisiche per la determinazione dell'andamento Vs/profondità in foro del tipo (DH, CH) o di superficie (es. MASW REMI) e/o di laboratorio cicliche di taglio o triassiali, esplorando un numero di verticali adeguato all'importanza dell'opera e all'estensione dell'area di indagine e sufficiente ad accertare la variabilità spaziale delle caratteristiche stratigrafiche e geotecniche del deposito. Dovrà anche essere determinata con appropriate rilevazioni l'entità delle fluttuazioni dei livelli di falda e nelle analisi dovrà considerarsi la condizione meno cautelativa.**

# Carotaggi – prove SPT

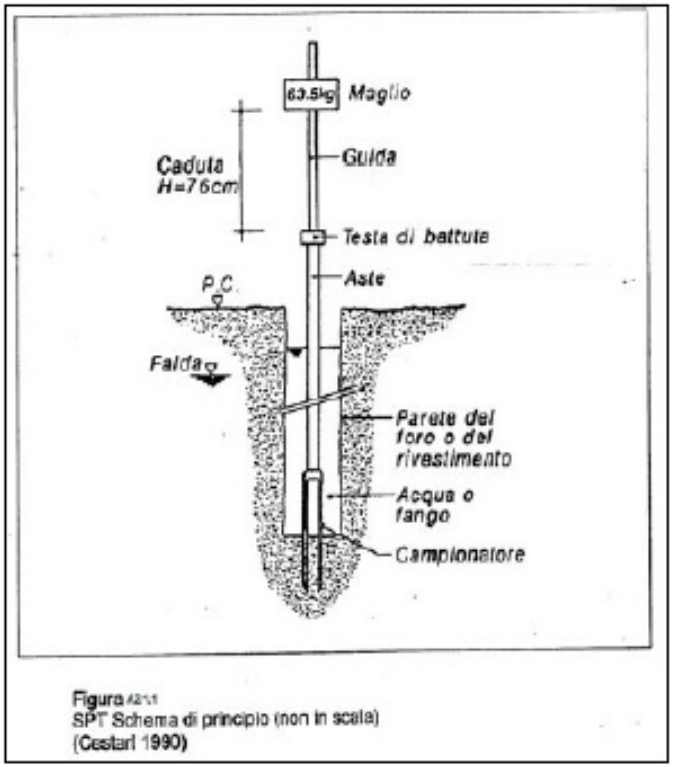



Figura
SPT Schema di principio (non in scala)
(Cestari 1990)

Lo scopo della prova è quello di determinare il numero di colpi (N ) SPT necessari ad infiggere, per una profondità di 300 mm, un campionatore di dimensioni standard mediante battitura. I valori ottenuti consentono una stima qualitativa della consistenza del terreno. Inoltre è possibile stimare mediante correlazioni empiriche i seguenti parametri:
- la densità relativa, l'angolo di resistenza al taglio e la resistenza alla liquefazione dei terreni granulari.
- il modulo di taglio a piccole deformazioni sia nel caso di terreni a grana grossa che in quelli a grana fine.

Sul fondo foro, opportunamente pulito, dovrà essere infisso a percussione un campionatore di forma e dimensioni standard. Viene determinato il numero di colpi necessari alla penetrazione di 45 cm, misurati separatamente in tre tratti di 15 cm ciascuno.
La prova va preferibilmente realizzata in terreni granulari. Tuttavia può essere eseguita in qualsiasi terreno ed anche nel caso di alcune rocce tenere. Unicamente in presenza di grossi elementi lapidei, la prova perde di significato

# Prove penetrometriche statiche

La prova penetrometrica statica, che consiste nell'infissione a pressione nel terreno di una punta d'acciaio chiusa di forma conica, ha lo scopo di misurare la forza necessaria alla penetrazione della punta,la forza di attrito laterale tra il terreno ed un manicotto d'acciaio situato al di sopra della punta ed eventualmente la pressione della fase liquida nei pori durante l'avanzamento della punta.
Da queste misure, effettuate separatamente, ma in modo continuo, è possibile determinare tramite correlazioni semiempiriche le seguenti caratteristiche:
- andamento stratigrafico;
- densità relativa , angolo di resistenza al taglio ($\phi'$) e resistenza alla liquefazione dei terreni granulari;
- resistenza al taglio non drenata dei terreni a grana fine;
- modulo di taglio elastico a piccole deformazioni (G0).

Campo di applicazione
La prova penetrometrica statica può essere realizzata in qualsiasi tipo di terreno sciolto. La prova risulta in genere drenata nel caso dei terreni granulari (ghiaie fini, sabbie, sabbie debolmente limose) e non drenata in quelli saturi a grana fine (argille,argille limose).

# Prove penetrometriche dinamiche

Lo scopo della prova è quello di determinare il numero di colpi (N ) necessari ad infiggere, per una profondità standard, una punta conica di dimensioni standard mediante battitura. I valori ottenuti consentono una stima qualitativa della consistenza del terreno. Inoltre è possibile correlare empiricamente i valori misurati con quelli ricavati dalla prova SPT. E' pertanto possibile ricavare i seguenti parametri:

- la densità relativa, l'angolo di resistenza al taglio e la resistenza alla liquefazione dei terreni granulari.
- il modulo di taglio a piccole deformazioni sia nel caso di terreni a grana grossa che in quelli a grana fine.

I penetrometri dinamici sono classificati in base al peso del maglio M . Normalmente, per una maggiore affidabilità del dato specie in presenza di terreni molto consistentii, si farà ricorso a penetrometri superpesanti.

Leggero DPL $M \leq 10$ Medio DPM $10 < M < 40$ Pesante DPH $40 \leq M < 60$
Superpesante DPSH $M \geq 60$

Campo di applicazione

La prova trova il suo miglior campo di applicazione nei terreni granulari. Tuttavia può essere eseguita in qualsiasi terreno ed anche nel caso di alcune rocce tenere. Unicamente in presenza di grossi elementi lapidei, che potrebbero danneggiare la punta, la prova non è eseguibile.

# Prospezioni sismiche

L'obiettivo della prospezione sismica è quello di determinare le caratteristiche **elastiche** del sottosuolo a partire dall'analisi di un segnale sismico generato **artificialmente** e registrato alla **superficie** del volume di sottosuolo oggetto dell'indagine

In particolare, si tenta di determinare **la velocità e le modalità di propagazione** delle diverse **fasi sismiche**(P, S, Rayleigh, Love)

Ricostruendo queste modalità di propagazione è possibile ricostruire le variazioni di proprietà meccaniche del sottosuolo (nei moduli elastici e densità) e da queste risalire alla geometria ed alle caratteristiche dei corpi sepolti(**inversione-contrasti di impedenza**)

In funzione del tipo di sorgente considerata esistono due grandi famiglie di metodi sismici per l'esplorazione del sottosuolo

**Metodi attivi**(sorgenti artificiali)

1.1 Metodo dei primi arrivi (rifrazione, tomografia sismica)

1.2 Metodo delle onde riflesse

1.3 Metodo delle onde superficiali (MASW)

**2. Metodi passivi**(sorgenti naturali)

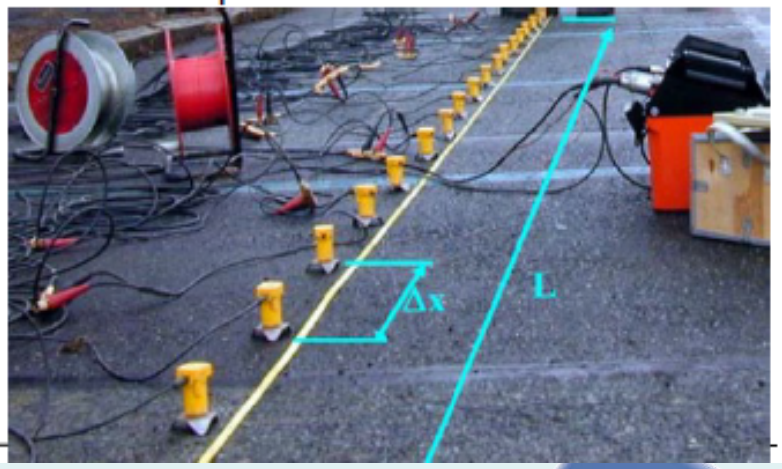
2.1 Metodo a stazione singola (HVSR)

2.2 Metodo dell'antenna sismica (REMI, ESAC, FK, MUSIC)

I metodi attivi sono basati sullo studio delle **onde di volume** e delle **onde superficiali** mentre quel passivi sono essenzialmente legati all'analisi delle **onde superficiali**

# Prospezioni onde superficiali attive MASW passive REMI

Le prove non invasive basate sulla propagazione di onde di superficie per la stima del profilo di vs hanno trovato negli ultimi anni grande diffusione grazie ai ridotti tempi di acquisizione in sito.
In un mezzo eterogeneo avente rigidezza variabile con la profondità si manifesta il fenomeno della dispersione geometrica, per cui la velocità di fase con cui si propagano le onde superficiali è funzione della frequenza.
La relazione che lega la velocità di fase delle onde di Rayleigh (vR) alla frequenza f viene usualmente definita curva di dispersione e rappresenta l'elemento centrale nell'utilizzo delle onde di Rayleigh ai fini della caratterizzazione dei terreni. Infatti la curva di dispersione è funzione delle proprietà fisico-meccaniche e geometriche del mezzo.
L'analisi dei segnali acquisiti consente una stima della curva di dispersione caratteristica del sito in oggetto, che viene successivamente utilizzata per un processo di inversione fornendo come risultato finale il profilo verticale della velocità delle onde di taglio nel terreno e quindi una stima del modulo di taglio a piccole deformazioni in funzione della profondità.



# Prospezioni in foro

Il metodo Down-hole rappresenta una delle più accurate misure sismiche per la determinazione delle proprietà fisico-meccaniche dinamiche dei terreni. Lo scopo della prova consiste nel determinare la velocità di propagazione delle onde di volume, di compressione (onde P) e di taglio (onde S), misurando il tempo che esse impiegano nel tragitto tra la sorgente, posta in superficie, ed i ricevitori posti all'interno di fori di sondaggi, considerando nota la distanza sorgente-ricevitori

La prova consiste nel produrre, sulla superficie del terreno, sollecitazioni verticali (per la generazione di onde di compressione P) ed orizzontali (per onde di taglio polarizzate orizzontalmente Sh) mediante una sorgente meccanica, e nel registrare l'istante di primo arrivo del treno d'onde ad un sistema composto almeno da una coppia di geofoni tridimensionali, alloggiati a profondità note nel foro di sondaggio appositamente strumentato.
Conosciuta la distanza tra sorgente e ricevitori e determinato il tempo di propagazione, è possibile stimare in maniera accurata la distribuzione delle velocità sismiche (P ed Sh) in corrispondenza della verticale di misura.
Le prove sismiche Cross-Hole prevedono la misura delle velocità delle onde sismiche fra due fori di sondaggio ove si energizzi uno dei due ad una certa quota e si misuri nell'altro alla medesima quota, con un geofono tridimensionale ancorato. Per l`applicazione della metodologia Cross-Hole devono quindi essere disponibili due fori di sondaggio rivestiti e ben cementati di cui sia nota la reciproca distanza a tutte le quote di misura. Le onde elastiche possono venir generate dall`esplosione di una cartuccia alle diverse profondità nel foro di energizzazione.

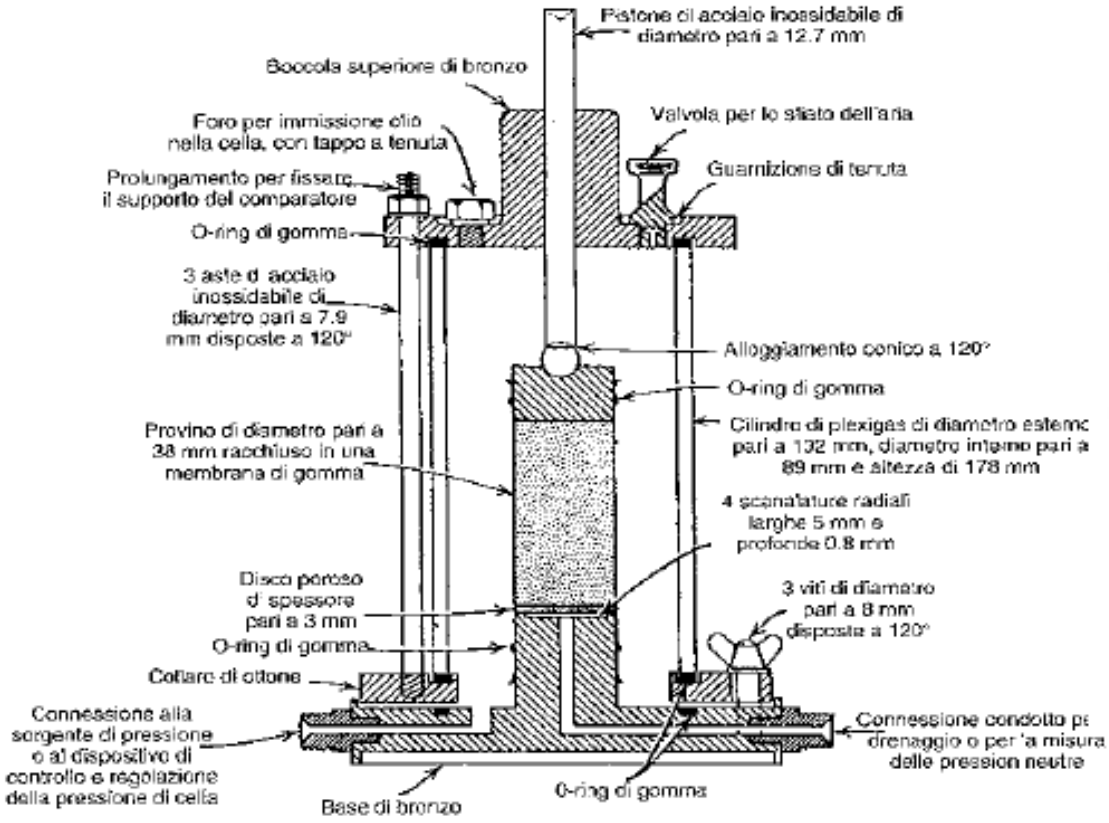
# Prospezioni sismiche attive – sorgenti artificiali

Mazza 10 kg

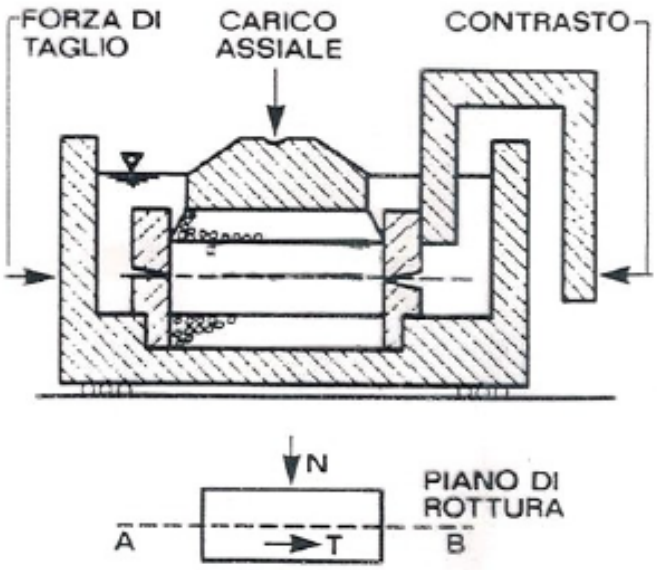
Fucile sismico

Grave a caduta

# *Indagini di laboratorio*




triassiale




taglio

REGIONE LIGURIA

## Valutazione della capacità di Resistenza alla Liquefazione da prove in sito, CRR

Le prove in sito comunemente utilizzate per la valutazione della resistenza alla liquefazione sono la Standard Penetration Test (SPT), la prova penetrometrica statica (CPT) e le misure di velocità delle onde di taglio ($V_s$). Vantaggi e svantaggi di queste prove sono messi a confronto in Tabella.

| TIPI DI PROVA: | SPT | CPT | $V_S$ |
|---|---|---|---|
| Numero di prove eseguite in siti liquefatti | molte | molte | limitate |
| Tipo di comportamento tensioni-deformazioni di prova | parzialmente drenato, grandi deformazioni | drenato, grandi deformazioni | piccole deformazioni |
| Controllo di qualità e ripetibilità | da scarso a buono | molto buono | buono |
| Riconoscimento stratigrafico | buono per prove ravvicinate | molto buono | discreto |
| Tipi di terreno per i quali è raccomandata la prova | non ghiaiosi | non ghiaiosi | tutti |
| Possibilità di prelievo di campioni | si | no | no |

REGIONE LIGURIA

## METODI SEMPLIFICATI PER VALUTARE LA SUSCETTIBILITA' DEI TERRENI ALLA LIQUEFAZIONE

La resistenza del deposito alla liquefazione viene quindi valutata in termini di fattore di resistenza alla liquefazione**: Fl =CRR/CSR**

dove CRR (Cyclic Resistance Ratio) indica la resistenza del terreno agli sforzi di taglio ciclico e CSR (Cyclic Stress Ratio) la sollecitazione di taglio massima indotta dal sisma.

Se il fattore è Fl > 1.25 la liquefazione è da escludere; se è FL < 1.25 è possibile che avvengano fenomeni di liquefazione.

I metodi semplificati differiscono fra loro soprattutto per il modo con cui viene ricavata CRR, la resistenza alla liquefazione.

Il parametro maggiormente utilizzato è il numero dei colpi nella prova SPT anche se oggi, con il progredire delle tecniche, si preferisce valutare il potenziale di liquefazione utilizzando prove statiche (CPT) o anche tramite prove di misurazione delle onde di taglio Vs.

I metodi CRR/CSR hanno come base la metodologia elaborata da Seed e Idriss (1982) in cui:

La grandezza CSR è la sequenza di sforzi di taglio indotti dal sisma, normalizzata rispetto alla tensione efficace verticale iniziale, viene schematizzata come una storia regolare di sollecitazioni pari al 65% del valore massimo attraverso la relazione:

***CSR = Tmedia/ Svo' = 0,65 ag Svo/Svo' rd/Msf***

dove:

ag = accelerazione sismica max in superficei riferita all'accelerazione di gravità;

*Sv0 = pressione verticale totale alla profondità z dal p.c.;*

*Sv0' = pressione verticale efficace alla profondità z dal p.c.;*

$r_d$ = coefficiente riduttivo dell'azione sismica che porta in conto la deformabilità del sottosuolo in funzione della profondità dal p.c., valutabile secondo il seguente schema:

$r_d$=1-0.00765z per z<9.15 m

$r_d$=1.174-0.0267z per 9.15<z<23 m

$r_d$=0.774-0.008z per 23<z<30 m

$r_d$=0.5 per z>30 m

Msf = coefficiente correttivo funzione della magnitudo del sisma atteso

REGIONE LIGURIA

Le relazioni per la valutazione di CSR sono state dedotte su base empirica, dalle osservazioni del comportamento di depositi naturali durante eventi sismici con magnitudo di momento M pari a 7.5. Di conseguenza, laddove il terremoto atteso nell'area sia caratterizzato da una magnitudo diversa è necessario rivalutare la sollecitazione sismica introducendo il coeff correttivo Msf di cui sopra.

Di seguito tabella per l'individuazione del fattore correttivo (a destra):

| Magnitudo | Seed H. B. & Idriss I. M. (1982) |
|---|---|
| 5.5 | 1.43 |
| 6.0 | 1.32 |
| 6.5 | 1.19 |
| 7.0 | 1.08 |
| 7.5 | 1.00 |
| 8.0 | 0.94 |
| 8.5 | 0.89 |

REGIONE LIGURIA

La grandezza CRR è la resistenza agli sforzi di taglio, normalizzata rispetto alla tensione efficace verticale iniziale ***CRR = Tult/ Svo'***

che può essere valutata attraverso gli abachi e le relazioni di seguito proposti e tratti da "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica- Gruppo di lavoro MS 2008", in funzione di parametri desunti da prove SPT , CPT e da misure della velocità delle onde di taglio Vs e corretti secondo le relazioni riportate a lato di ogni abaco.

Gli abachi forniscono una indicazione di campo, per pervenire ad un valore del fattore di sicurezza FL è possibile utilizzare le seguenti relazioni a partire dai valori normalizzati di ogni parametro:

Per prove CPT:

$$CRR = \exp\left\{\left[\frac{q_{c1N}}{540} + \left(\frac{q_{c1N}}{67}\right)^2\right] - \left[\left(\frac{q_{c1N}}{80}\right)^3 + \left(\frac{q_{c1N}}{114}\right)^4 - 3\right]\right\}$$

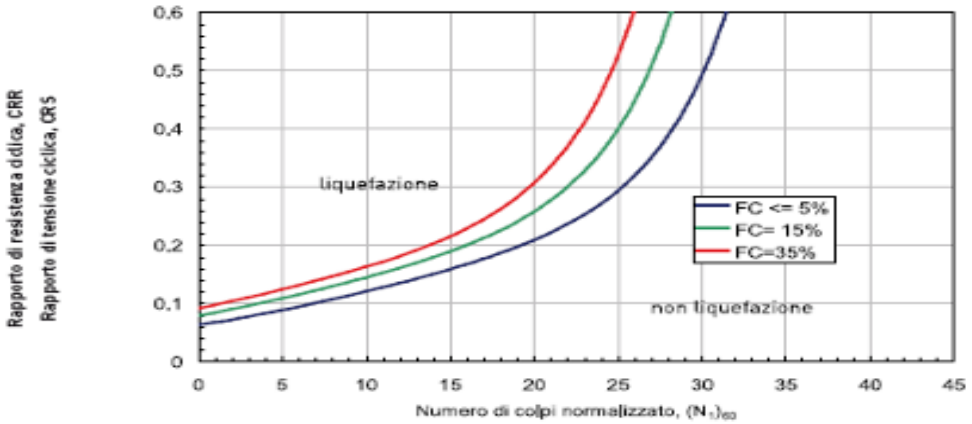
Per prove SPT:

$$CRR_{N1,60} = \exp\left\{\left[\frac{N1,60}{14.1} + \left(\frac{N1,60}{126}\right)^2 + \right] - \left[\left(\frac{N1,60}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{N1,60}{25.4}\right)^4 - 2.8\right]\right\}$$

Per misure di VS:

$$CRR_{Vs1} = [0.022]\left(\frac{Vs1}{100}\right)^2 + \left(\frac{2.8}{215-Vs1}\right) - \left(\frac{1}{215}\right)$$

REGIONE LIGURIA




$$(N_1)_{60} = N_{SPT} C_N C_E C_B C_R C_S$$

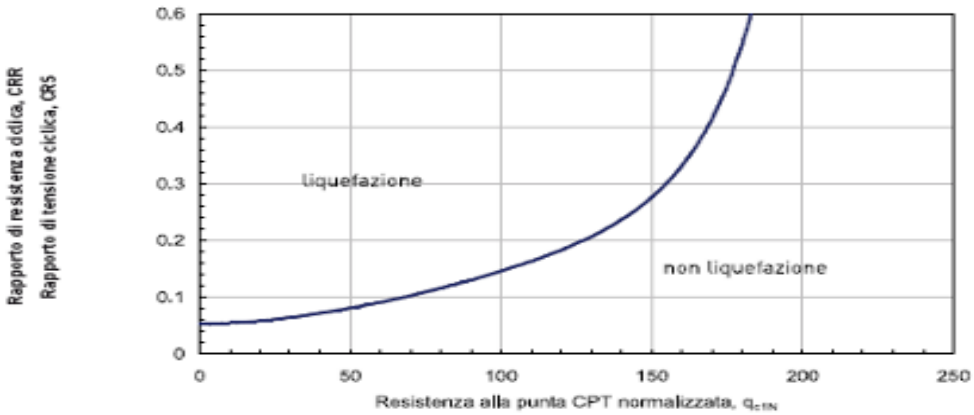
dove:

$$C_N = \left(\frac{p_a}{\sigma'_v}\right)^{0.784 - 0.0768\sqrt{(N_1)_{60}}}$$

$C_N$ non deve superare il valore di 1,7

$p_a$ (pressione atmosferica ≡ 100 kPa) e $\sigma'_v$ sono espresse nelle stesse unità di misura

$C_E C_B C_R C_S = 1$

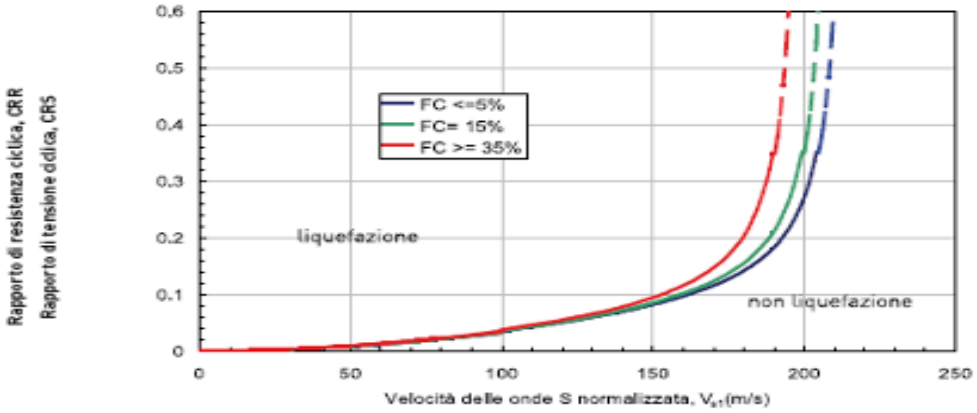



$$q_{c1N} = C_Q \frac{q_c}{p_a}$$

dove:

$p_a$ (pressione atmosferica di riferimento ≡ 100 kPa) e σ'v sono espresse nelle stesse unità di misura

$$C_Q = \left(\frac{p_a}{\sigma'_v}\right)^{1.338 - 0.294(q_{c1N})^{0.264}}$$




$$v_{s1} = C_v v_s$$

dove:

$p_a$ (pressione atmosferica di riferimento ≡ 100 kPa) e $\sigma'_v$ sono espresse nelle stesse unità di misura

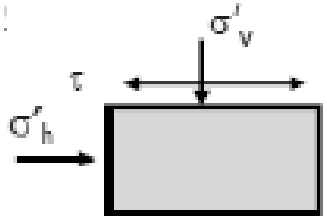
$$C_v = \left(\frac{p_a}{\sigma'_v}\right)^{0.25}$$

Figura 2.7-2 - Carte per la stima della resistenza normalizzata alla liquefazione *CRR* di un terreno sabbioso saturo in funzione della percentuale di fino FC e sulla base dei valori di $N_{SPT}$, $q_c$ e $V_S$ corretti.

REGIONE LIGURIA

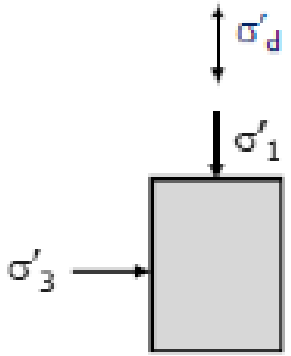
# *RESISTENZA CICLICA* CRR da prove di laboratorio

## Taglio semplice ciclico




$CRR_{sito}=0.9\ (\tau/\sigma'v)$

## Prove triassiali cicliche




$CRR_{sito}=0.9\ Cr\ (\ \sigma'd\ /\ 2\sigma'3)$

Cr=fattore di correzione

- per $K_0$= 0.4  Cr = 0.57
- per $K_0$= 1.0  Cr = 1.0

REGIONE LIGURIA

# FINE !

REGIONE LIGURIA