



REGIONE CALABRIA

COMUNE DI TROEPA

PROVINCIA DI VIBO VALENTIA



P.O.R. Calabria FERS - FSE 2014/2020. Asse prioritario 7 - Obiettivo specifico 7.2 - Azione 7.2.2.

Potenziamento, riqualificazione e messa in sicurezza del porto di Tropea

PROGETTO ESECUTIVO

ELAB.	TITOLO
13 SCALA VARIE	RELAZIONE SUL MIGLIORAMENTO GEOTECNICO DEL TERRENO DI FONDAZIONE DEL TERMINAL

Progettazione, Direzione dei lavori e geologia

R.T.P. **TEC MED S.r.l.**

Tec Med s.r.l.

Ing. Stefano Ponti
Ing. Giovanni Oggiano
Ing. Maurizio Sassu



Il Responsabile Unico del Procedimento

Arch. Gabriele CRISAFIO

E3 società cooperativa

Ing. Giuseppe Maradei
dott.ssa Paola Angela Basta



Consultec società cooperativa

Ing. ~~Omario Bassani~~
Ing. ~~Mario Bonella~~



Ing. Rosario Bruzzaniti

Ing. Francesco Bagnato

Arch. Maria Carmela Giuditta



Studi ambientali: dott.ssa Jasmine de Marco

Studi acustici: Ing. Federica Crocco

Responsabile della sicurezza: Ing. Rosario Bruzzaniti

INDICE

PREMESSA	2
1 IL MIGLIORAMENTO MECCANICO DELLE CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL TERRENO.....	3
2 DESCRIZIONE DELLA PROCEDURA.....	4
2.1 Procedimento di vibrocompattazione	5
2.2 Vantaggi	6
3 MODALITÀ DI CALCOLO.....	8
4 PRESCRIZIONI SUI MATERIALI DA IMPIEGARE	13

PREMESSA

Nel caso in esame, accertato il rischio di liquefazione, si rende necessario prevedere sistemi di fondazione tali da garantire la stabilità delle nuove opere in presenza di sisma.

A tal fine, si è deciso di progettare un sistema di addensamento del terreno per mezzo della tecnica di vibrosostituzione tale per cui, in concomitanza del sisma di progetto, la formazione non risulti suscettibile di liquefazione.

I sistemi di vibrocompattazione e vibrosostituzione sono applicazioni versatili per il miglioramento delle proprietà meccaniche dei terreni e sono utilizzabili quando le caratteristiche del terreno non sono sufficienti a raggiungere la capacità portante di progetto o quando, come nel caso presente, si richiede l'addensamento del terreno per motivi legati al rischio di liquefazione in condizioni sismiche.

I sistemi di vibrocompattazione e vibrosostituzione sono utilizzati per diversi sistemi d'impegno, che differiscono sia per le modalità esecutive che per le modalità di trasferimento del carico.

In funzione della natura e della curva granulometrica del terreno da trattare esistono varie tecnologie che risultano di volta in volta più efficienti (Figura 1).

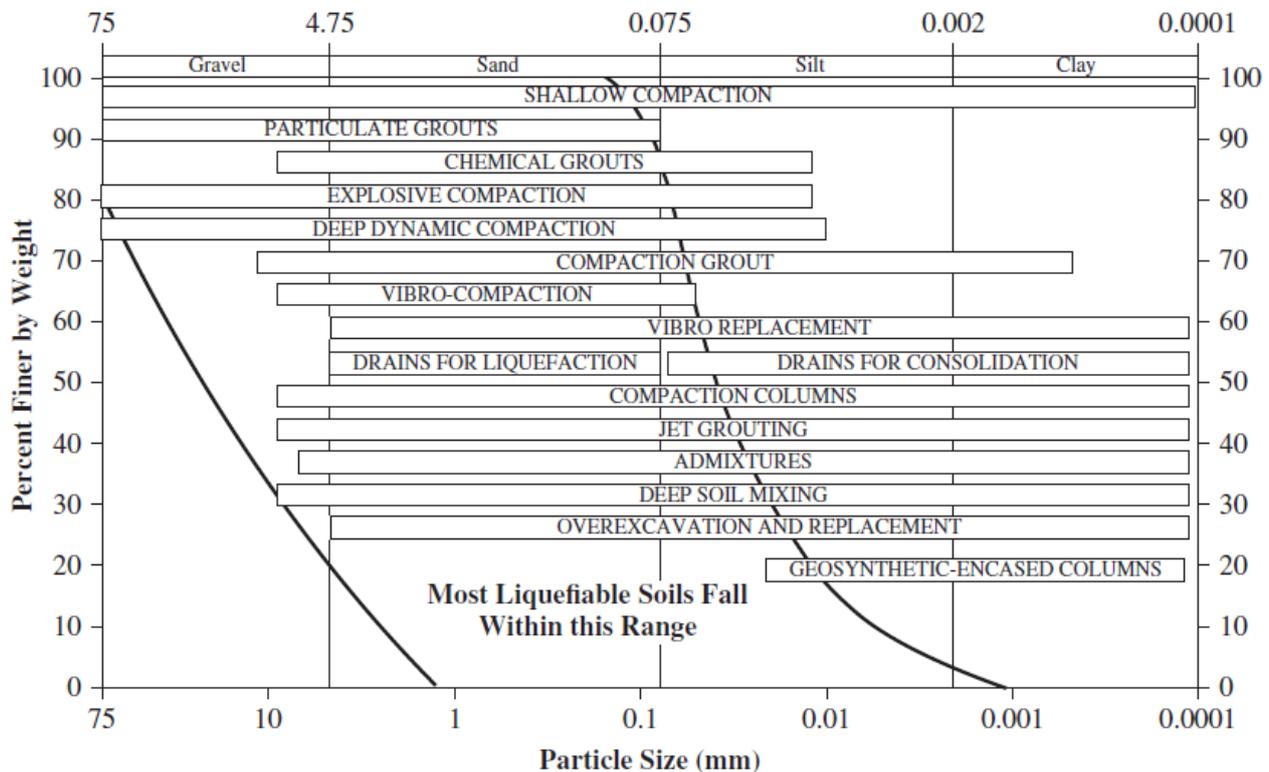


Figura 1: ambito di applicazione delle tecnologie di addensamento dei terreni

Se la frazione di fine eccede il 10–15% il terreno non è in grado di autoaddensarsi per sola vibrazione e quindi è indispensabile l'utilizzo dei procedimenti di vibrosostituzione. In questi casi, quindi, può essere applicabile la tecnologia delle colonne in ghiaia vibrocompattata. In ogni caso l'utilizzo delle colonne in ghiaia consente un miglioramento delle caratteristiche dell'addensamento.

L'introduzione delle colonne in ghiaia, inoltre, migliora le performance del terreno di fondazione non solo in termini di sicurezza alla liquefazione ma anche rispetto alla capacità portante del terreno; ma a vantaggio di sicurezza il miglioramento della capacità portante non è stato considerato nei calcoli statici dei cedimenti.

Gli aspetti operativi e le peculiarità della tecnologia sono descritti in seguito.

1 IL MIGLIORAMENTO MECCANICO DELLE CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL TERRENO

Diverse sono i trattamenti meccanici dei terreni che consentono il miglioramento delle caratteristiche geotecniche tali da scongiurare il rischio liquefazione. Una disanima delle tecniche attualmente in uso è riscontrabile all'interno di "LIQUEFACT Assessment and mitigation of Liquefaction potential across Europe: a holistic approach to protect structures/infrastructure for improved resilience to earthquake induced Liquefaction disasters. (H2020-DRA-2015 GA no. 700748) Guidelines for the use of ground improvement technologies to mitigate the liquefaction risk on critical infrastructures. Questo documento è stato edito dalla commissione europea nel 2019 (<http://www.liquefact.eu/wp-content/uploads/2020/03/D7.4.pdf>)

La vibrocompattazione profonda dei terreni è concepita all'inizio del secolo ad opera del gruppo Keller e descritta in GROUND ENGINEERING ~ DECEMBER , 1995 "The design of vibro replacement by Heinz J Priebe, Keller Grundbau GmbH, Kaiserleistr. 44, 63067 Offenbach"..

La tecnica consiste nel trasferire nel sottosuolo, attraverso l'uso di un apposito utensile "vibro", vibrazioni orizzontali ad alta frequenza in grado di addensare il terreno circostante alle profondità volute.

Le caratteristiche proprie delle oscillazioni, indotte dal moto circolare di una massa eccentrica attorno all'asse del "vibro", sono tali in ampiezza d'onda e frequenza da provocare solo gli effetti benefici sul terreno senza interferire con le strutture circostanti.

Le vibrazioni indotte nel terreno si propagano su fronti cilindrici attorno all'asse del vibro e, nei terreni granulari (terreni incoerenti, ghiaie, sabbie e sabbie limose), inducono i seguenti effetti positivi:

- un addensamento, con l'aumento dei valori di densità relativa (DR) e di conseguenza dei valori di deformabilità (modulo elastico E e di deformabilità)
- un incremento dei valori di resistenza dovuto all'aumento dell'angolo di attrito efficace ϕ' indotto da un miglior assetto strutturale ("packing") del terreno.
- una riduzione delle pressioni neutre (u – pressioni interstiziali) dovute all'espulsione dell'acqua dai pori.

Le caratteristiche geomeccaniche del terreno di fondazione sono ulteriormente incrementate attraverso l'inserimento, e il successivo addensamento a mezzo del vibro, di ghiaia vibrocompattata a formare colonne resistenti di opportuna sezione.

In definitiva questo procedimento meccanico consente una variazione delle caratteristiche del terreno, eliminando quelle caratteristiche che facilitano il processo di liquefazione.

2 DESCRIZIONE DELLA PROCEDURA

Il principio fondamentale della densificazione che si ottiene con il procedimento di vibro-sostituzione è il raggiungimento di uno stato più denso del terreno esistente (cioè con una riduzione del rapporto di vuoto del materiale) per mezzo della compattazione dei granuli che costituiscono l'ammasso trattato. La compattazione avviene in tutto l'ammasso di terreno trattato grazie alla vibrazione indotta dal sistema vibrante poi stabilizzato con la posa del materiale granulare a maggior diametro.

Nella successiva Figura 2 è riportata una schematica rappresentazione della fisica del fenomeno di incremento della densità del terreno, per come descritta da Madan Kumar Annam¹ e V. R. Raju in “*Ground Improvement Solutions to Mitigate Liquefaction: Case Studies*, <https://www.semanticscholar.org/paper/Ground-Improvement-Solutions-to-Mitigate-%3A-Case-Annam-Raju/1b9fa52b26adc4f475ee60af31fa8049de9bdb4d>)”.

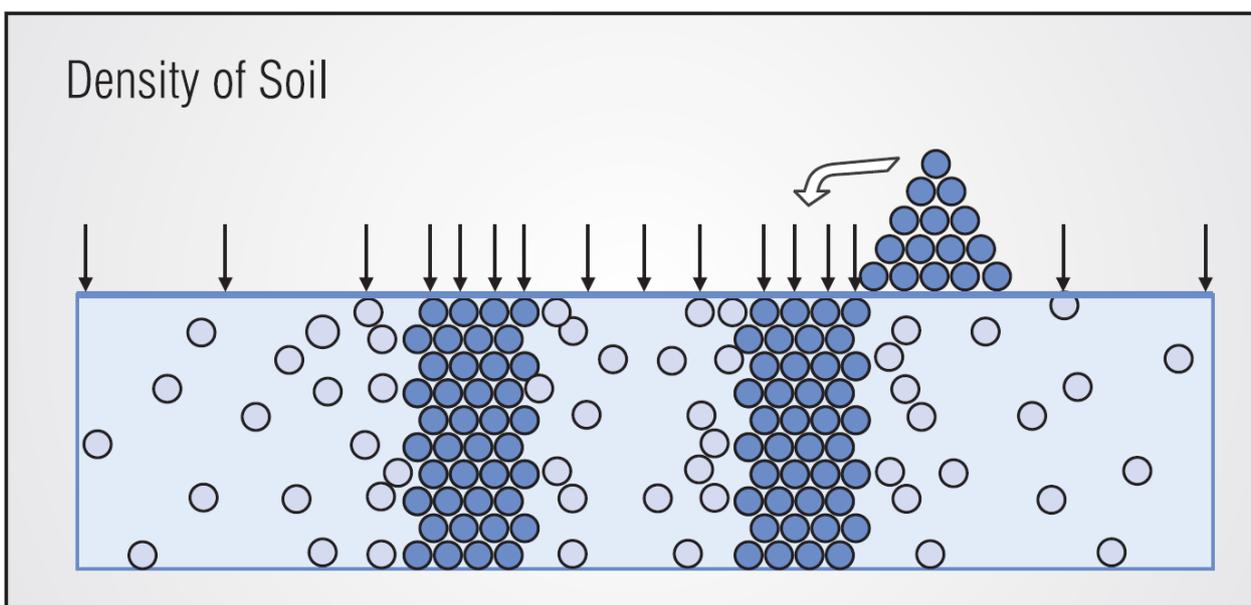


Figura 2: Schematizzazione del processo di incremento di densità del terreno a seguito della vibrosostituzione

Il procedimento e i risultati ottenuti sono descritti anche da H.Q.LE, Y.W.YEE, TRAN NGOC MINH e C.F.LEUNG, R.F.SHEN in “APPLICATION OF VIBRO STONE COLUMNS FOR A FABRICATION YARD IN VIETNAM (18th Southeast Asian Geotechnical & Inaugural AGSSEA Conference 29 - 31 May 2013, Singapore Leung, Goh&Shen (eds))”

In definitiva un terreno originariamente suscettibile di liquefazione viene trattato meccanicamente in modo da risultare più addensato e perdere la caratteristica di suscettibilità a liquefazione.

La riorganizzazione delle particelle diventa possibile solo quando le forze indotte sono superiori all'attrito interparticellare. In un terreno privo di coesione e sottofaldato, la vibrazione può generare un eccesso di pressione dell'acqua interstiziale, che riduce le forze di contatto (cioè le tensioni efficaci) e quindi le forze di attrito.

La vibro-sostituzione consiste nell'azionare una sonda vibrante nel terreno, che genera forze vibratorie laterali capaci di riordinare le particelle in uno stato più denso e successivamente iniettare terreno a granulometria maggiore come mostrato nella successiva Figura 3.

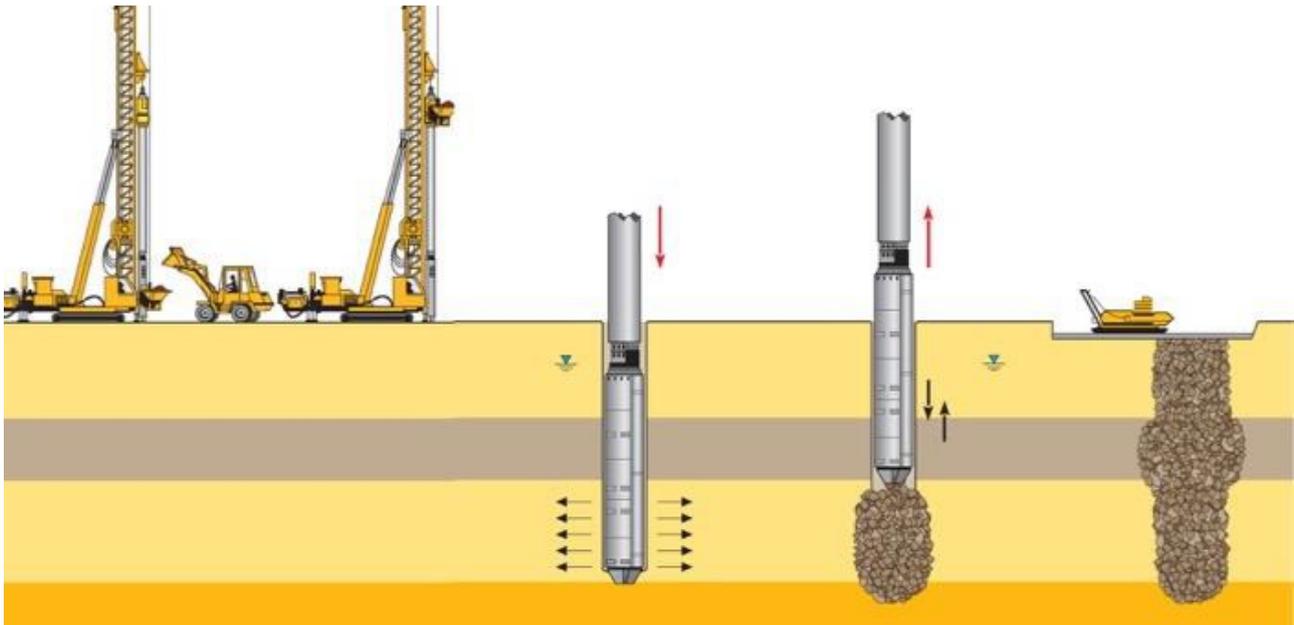


Figura 3: fasi esecutive del consolidamento mediante colonne vibrocompattate

La sequenza operativa del sistema prevede:

- 1) Infissione: l'utensile vibro penetra nel terreno con l'ausilio di getti d'acqua in pressione. La frazione fine del terreno viene contestualmente dilavata e portata in superficie. Al raggiungimento della profondità di progetto il flusso di acqua viene ridotto;
- 2) Compattazione: il trattamento viene eseguito per step successivi dal basso verso l'alto. Si possono raggiungere diametri di terreno trattato fino a 5 m. Il crescente grado di addensamento si manifesta con l'incremento di assorbimento di energia (amperaggio) richiesto dal motore elettrico del vibro.
- 3) Riempimento: Intorno al vibro si forma un cono che viene man mano riempito con materiali granulari approvvigionati dall'esterno o riutilizzando i terreni in sito. Il volume del materiale necessario può raggiungere il 15% del volume trattato.
- 4) Finitura: Dopo la conclusione del trattamento la superficie viene ri-livellata e compattata mediante rullatura.

Questo tipo di intervento è diventato molto utilizzato in Italia specialmente a seguito del sisma del 2012 in Emilia-Romagna, nel corso del quale si sono verificati diversi fenomeni di liquefazione, anche in ambiti costieri. La soluzione qui proposta prende spunto da progetti sviluppati ed eseguiti nell'ambito del consolidamento dei piazzali di banchina del porto di Ravenna (approvato dal Consiglio superiore dei Lavori Pubblici) e nel progetto di Completamento del Molo di Sottoflutto di Pozzuoli – 2^A fase (2018 – 2021).

Un interessante contributo all'utilizzo di questa tecnica in ambito marittimo è stato presentato al IAGIG 2021 Pisa, 3-4 Settembre 2021 da Tommaso Tassi, Chiara Scarpa, Alessandra Bortoluzzi, Luca Masiero in riferimento al PROLUNGAMENTO DELLA DIGA DI SALERNO CON CASSONI REWEC (pag 77-80).

2.1 Procedimento di vibrocompattazione

Un utensile vibrante, attaccato ad una gru o montato su di una torre guida, viene infisso nel terreno, penetrandolo con o senza l'utilizzo di un getto d'acqua. L'energia data dalla vibrazione riduce le forze intergranulari tra le particelle di terreno, rendendole più dense già durante la fase di sollevamento dell'utensile. Il riempimento con l'inerte avviene da piano compagna in modo da compensare qualsiasi diminuzione dei volumi di terreno. La fase si ripete, aggiungendo e compattando altro materiale inerte procedendo dal basso e fino ad arrivare al piano campagna.

La profondità di trattamento richiesta è pianificata ad hoc per ogni progetto ed è tipicamente compresa tra 4,5 e 15,0 metri con una profondità massima di 35 metri (che è funzione, comunque, dei terreni da attraversare).

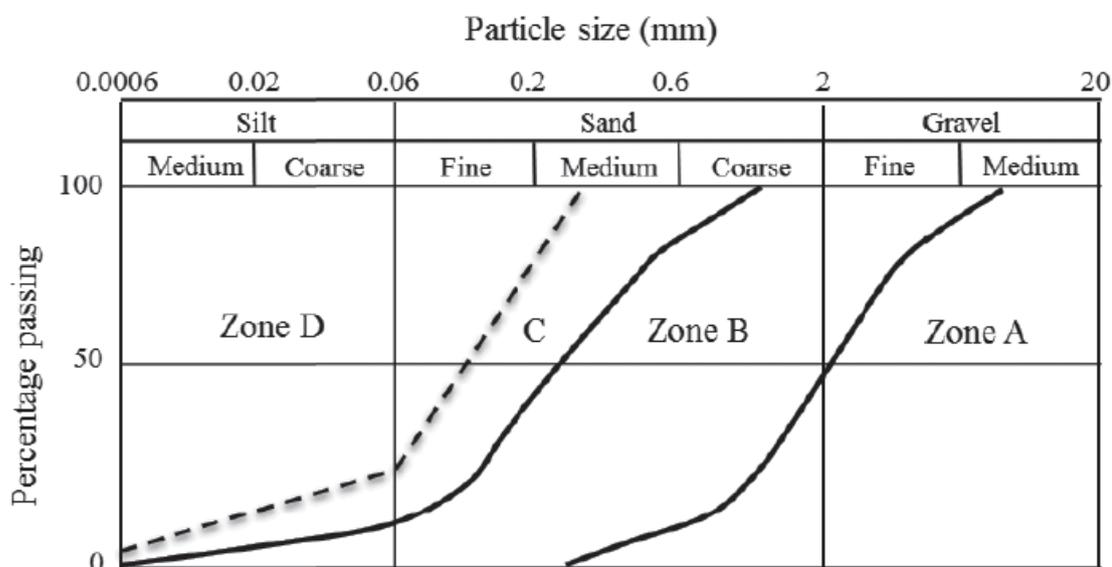
Le macchine per la vibrocompattazione possono essere completamente strumentate con un sistema di acquisizione dati a bordo. I dati, come l'amperaggio e la velocità di sollevamento, possono quindi essere registrati e visualizzati in tempo reale insieme ai valori target specificati su un monitor posizionato in cabina. Questo monitoraggio consente all'operatore di correggere eventuali deviazioni in tempo reale durante il processo di realizzazione della colonna, per mantenere la vibrocompattazione entro le specifiche di progetto.

Per eseguire le operazioni è prevalentemente utilizzato il vibrocompattatore a carica pneumatica, dove il materiale ghiaioso di apporto fuoriesce direttamente, sotto pressione d'aria, alla punta dell'utensile (metodo Bottom Feed a secco). L'infissione a secco è ottenuta grazie ad un tirabasso montato su una specifica torreguida.

L'azione del tirabasso comporta una ottimale compattazione della colonna in ghiaia (attivazione) ed una estensione in profondità dell'addensamento oltre la massima profondità raggiunta.

La colonna viene formata per passi successivi di estrazione, fuoriuscita e schiacciamento della ghiaia sia verso il basso, sia lateralmente: in questo modo si ottengono elementi colonnari che, interagendo con il terreno, contribuiscono al miglioramento della capacità portante delle stratificazioni consolidate, sostengono i carichi e consentono la limitazione dei cedimenti attesi nei limiti di progetto.

Il metodo a secco, senza fluidi di perforazione, associato all'utilizzo di sola ghiaia naturale consente di operare nelle condizioni di massima compatibilità ambientale.



Zone A: Vibro-compaction appropriate, but penetration difficult.

Zone B: Most suitable for vibro-compaction appropriate.

Zone C: Vibro-compaction feasible, but longer time required.

Zone D: Vibro-compaction not feasible - use stone columns.

Figura 4: ambito di applicazione delle tecnologie di vibroaddensamento dei terreni

2.2 Vantaggi

Il processo di vibrocompattazione presenta i seguenti vantaggi rispetto ad altri sistemi:

1. si tratta di un metodo versatile per il consolidamento del terreno che può essere utilizzato su un'ampia varietà di condizioni del terreno e per diversi requisiti della fondazione;
2. offre una soluzione economica per il consolidamento del terreno;
3. può essere eseguito in profondità in funzione delle caratteristiche del terreno;

4. l'esecuzione è relativamente rapida ed i successivi lavori strutturali possono essere eseguiti quasi in concomitanza;
5. il miglioramento del suolo consente la realizzazione di plinti di fondazione poco profondi e il conseguente risparmio economico;
6. rispetta l'ambiente in quanto si utilizzano materiali naturali;
7. non comporta in fase di esecuzione un sensibile inquinamento acustico e provoca vibrazioni ridotte e localizzate nel suolo, non interagendo con eventuali strutture limitrofe;
8. durante il trattamento si produce pochissimo materiale di risulta, abbattendo così i costi di smaltimento che si avrebbero con altre tecnologie (es. pali trivellati);
9. non viene modificato il piano campagna.

3 MODALITÀ DI CALCOLO

Nei metodi di natura deterministica la resistenza del terreno alla liquefazione ad una certa profondità è definita attraverso un parametro denominato rapporto di resistenza ciclica (CRR, in inglese Cyclic Resistance Ratio). Esso è funzione di un indice penetrometrico misurato a quella profondità a partire dai risultati di prove penetrometriche SPT oppure CPT opportunamente corretti e normalizzati. Tale rapporto di resistenza ciclica (CRR) viene confrontato con il rapporto di sforzo ciclico (CSR, in inglese Cyclic Stress Ratio) che rappresenta una misura della severità dell'azione sismica attesa a quella profondità.

Eseguendo il calcolo dei parametri CRR e CSR a diverse profondità è possibile tracciare una curva limite che discrimina le situazioni in cui è attesa liquefazione da quelle in cui l'accadimento del fenomeno è ritenuto improbabile. La curva limite è definita in modo empirico sulla base di evidenze storiche di liquefazione riscontrate in terremoti del passato avvenuti in siti ben caratterizzati dal punto di vista geotecnico. L'analisi viene effettuata attraverso l'introduzione di un fattore di sicurezza (FS), definito come rapporto tra i parametri CRR e CSR.

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

Il dimensionamento del sistema di addensamento si basa sul concetto di garantire un coefficiente di sicurezza minimo sufficiente nei confronti della liquefazione del terreno in condizioni sismiche.

Il fattore di sicurezza minimo scelto per la verifica è pari a 2.5. Per i dettagli circa il calcolo dei fattori CRR e CSR si rimanda alla letteratura specifica.

La procedura di calcolo impiegata è riassunta in seguito:

- fissato il coefficiente di sicurezza minimo si determina un valore cautelativo di CRR;
- il valore di CSR è ricavato applicando la procedura prevista in Seed H.B., Idriss M. (1971). *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, J. Soil Mech. Found. Div., 97, 1249-1273*, in cui il parametro è definito CSR_M (Figura 5)

$$CSR_M = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \frac{a_{max,s}}{g} r_d$$

Figura 5: equazione di calcolo della CSR

in cui:

- τ_{media} è il valore medio della sollecitazione indotta dall'azione sismica (pari a 0.65 per la sollecitazione massima τ_{max});
- $a_{max,s}$ è l'accelerazione massima attesa al piano campagna per l'evento sismico assunto come riferimento per la verifica a liquefazione;
- g è l'accelerazione di gravità;
- σ_{vo} e σ'_{vo} rappresentano, rispettivamente, la tensione verticale totale e la tensione verticale efficace alla profondità considerata;
- r_d è un coefficiente riduttivo dell'azione sismica che dipende dalla profondità e che porta in conto la deformabilità del sottosuolo ed i suoi effetti sul profilo della massima accelerazione sismica orizzontale attesa

L'area d'interesse è compresa fra il sondaggio S08 e S09 (Figura 6) e i parametri sono riportati in Figura 7.

La sezione litotecnica scelta è la "sezione A", come definita all'interno della relazione geologica, su cui è calcolato il massimo valore di CSR fino alla profondità di 6 m (Figura 8 e Figura 8).

Il valore di CSR è stato considerato alla profondità di 6 m, essendo questa la profondità massima di sovratensione dovuta allo scarico della fondazione dell'edificio.

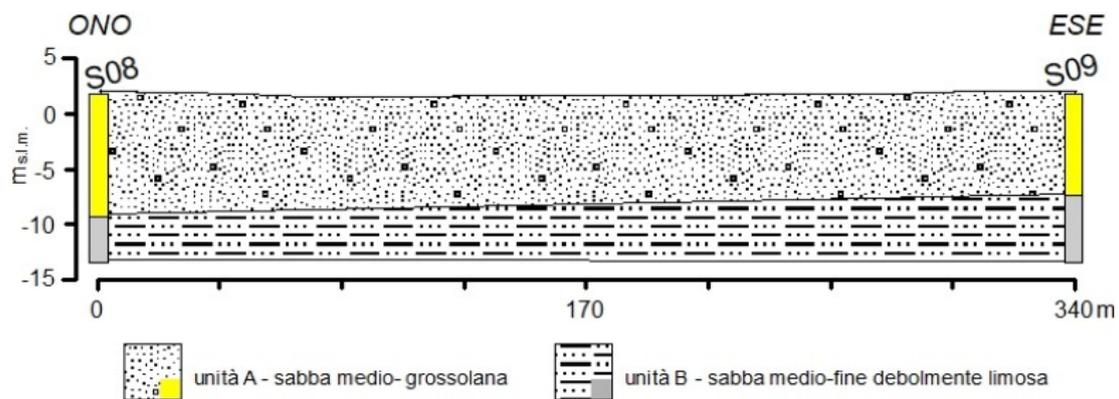


Figura 6: Sezione litotecnica fra S08 e S09

Unità litotecnica	Descrizione	Parametri geotecnici						
		Nspt	Peso unità di volume	Angolo d'attrito	Coesione	Qc (kg/cm ²)	Modulo edometrico (kg/cm ²)	Modulo elastico (kg/cm ²)
A	Sabbia medio-grossolana	34	$\gamma=1.9$ t/m ³	$\phi=32^\circ$	c= 0kPa	98	280	315
B	Sabbia medio-fine debolmente limosa	46	$\gamma=2$ t/m ³	$\phi=30^\circ$	c=0 kPa	114	320	360

Figura 7: Valori dei parametri geotecnici della sezione litotecnica

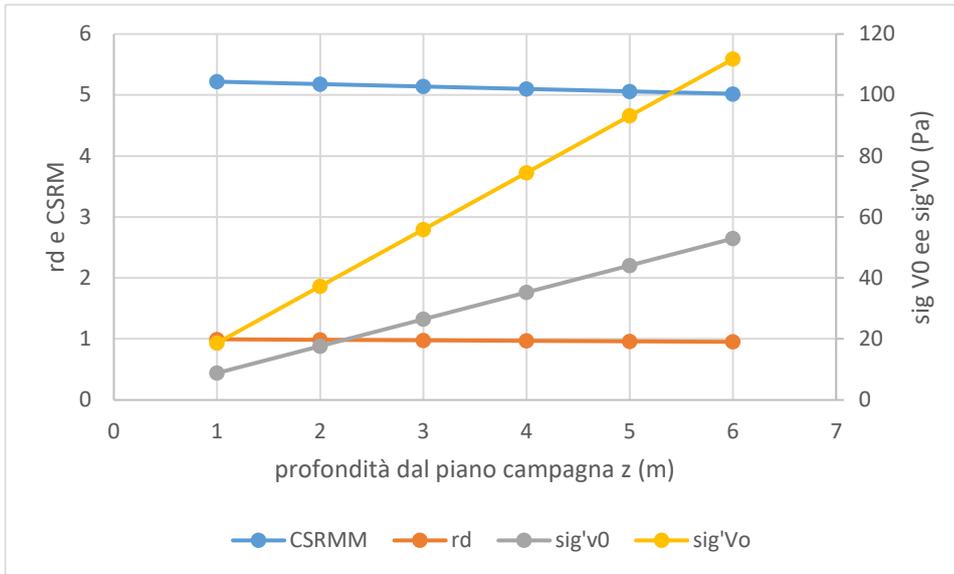


Figura 8: Determinazione del valore di CSRMM (asse delle ordinate di sinistra)

Fissato di conseguenza il valore di riferimento $CRR=5.22 \times 0.30=13.05$ e ricordato che esiste una correlazione tra CRR e il numero di colpi N_{60} di una prova SPT (come da equazione in Figura 9), si tratta di risolvere l'equazione assumendo come variabile N_{60} .

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm} = \exp \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right)$$

Figura 9; Calcolo del CRRM alla magnitudo di 7.5

Il valore di N_{160cs} calcolato con la relazione è pari a 43, che determina un valore di $N_{60}=\exp(N_{160cs} / \sigma'z_0)$, dove $\sigma'z_0$ è calcolato alla profondità di calcolo, nel caso in esame pari a 6 m, pari a 31.

Per correlare il valore di N_{60} con il numero di colpi di una prova SPT si è utilizzata la relazione presente in *Robertson, P. K., and Wride, C. E., 1998. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test, Canadian Geotechnical Journal 35, 442–459.*

$N = \frac{0.6 \cdot N_{60}}{C_E \cdot C_B \cdot C_S \cdot C_g}$, dove i coefficienti al denominatore si ricavano dalle prove geotecniche eseguite in situ:

C_E	0.925	Coefficiente del tasso d'energia
C_B	1	Larghezza del foro di prova
C_S	1	Metodo di campionamento
C_R	0.85	Lunghezza dell'asta

Il valore di N così determinato è pari a 23.

In definitiva 23 è il numero di colpi che dovrebbe avere una prova SPT per ottenere un CRR pari a 13.05 e, quindi essere il terreno non suscettibile a liquefazione con un coefficiente di sicurezza pari a 2.5 .

Al fine di raggiungere questo risultato è necessario intervenire meccanicamente o sostituendo tutto il volume coinvolto nello scarico delle sovratensioni dalle fondazioni dell'edificio o migliorando le caratteristiche

geotecniche del terreno in situ attraverso il processo di vibrosostituzione. La combinazione di vibrocompattazione e sostituzione di un volume di materiale, consente di ottenere il miglioramento geotecnico desiderato. Il volume di materiale da sostituire non comporta l'asportazione del materiale esistente, come precedentemente descritto.

Il volume di materiale da sostituire si determina in base al rapporto fra valore medio di N_{60} post addensamento e N_{60} ante addensamento attraverso l'utilizzo dell'abaco in Figura 10. Il rapporto a_s , definito come rapporto di sostituzione, è pari al rapporto tra l'area della colonna e l'area complessiva di terreno di competenza della singola colonna.

$$a_s = \frac{A_c}{A_e} = C \left(\frac{d_c}{s} \right)^2$$

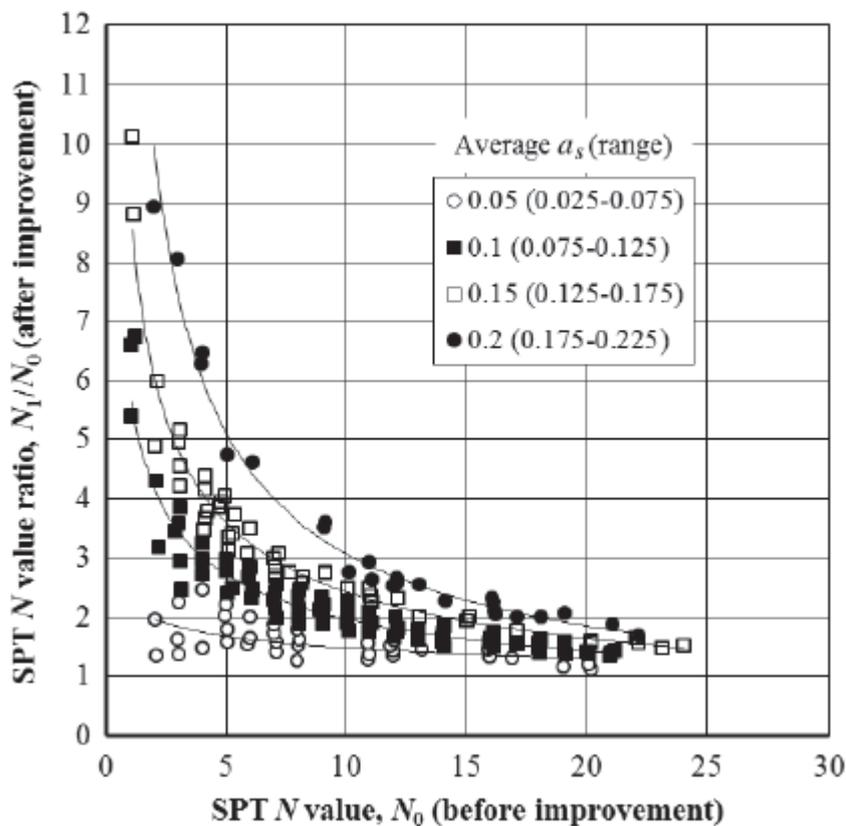


Figura 10: abaco per la determinazione di a_s

Il valore di a_s così ricavato consente di fissare il diametro della colonna e la spaziatura fra le colonne.

Nell'abaco si entra con il valore di N prima dell'intervento è il rapporto fra i valori di N dopo e prima l'intervento.

Nel caso in esame il valore di N prima dell'intervento è pari a 17, mentre il rapporto di N dopo e prima l'intervento è pari a $23/17=1.36$; entrando nell'abaco in Figura 10 si ricava un valore di $a_s=0.075$.

Il numero e il diametro delle colonne di progetto, quindi, dovranno essere tali che il valore di a_s sia superiore a quello ricavato dall'abaco.

Si è scelto, quindi, di considerare un reticolo di pali in ghiaia di diametro 0.6 m, avente area della sezione trasversale pari a 0.28 m^2 , con interasse 1.6 m a maglia quadrata.

Questa scelta comporta un valore dell'area d'influenza del singolo palo pari a 2.56 m^2 . Il rapporto $0.2/2.56=0.078125 > 0.075$ e quindi il sistema di addensamento previsto è tale da garantire la non suscettibilità del terreno al processo di liquefazione sotto l'azione sismica di progetto.

4 PRESCRIZIONI SUI MATERIALI DA IMPIEGARE

La ghiaia utilizzata per la realizzazione delle colonne deve essere conforme alle prescrizioni di dettaglio definite dallo specifico esecutore, che deve indicare i limiti granulometrici e il diametro massimo necessari, rispettivamente, ad avere una compattazione ottimale, sulla base delle esperienze pregresse, a consentire il passaggio della ghiaia nel sistema di pressurizzazione ed espulsione del vibroflottatore, sulla base del brevetto impiegato.

In linea generale, si tratta di ghiaie a granulometria inclusa in fusi come quello riportato, a titolo esemplificativo, nella seguente Figura 11 (da Vrettos e Savidis, 2004, in coerenza con Saito et al. 1987)

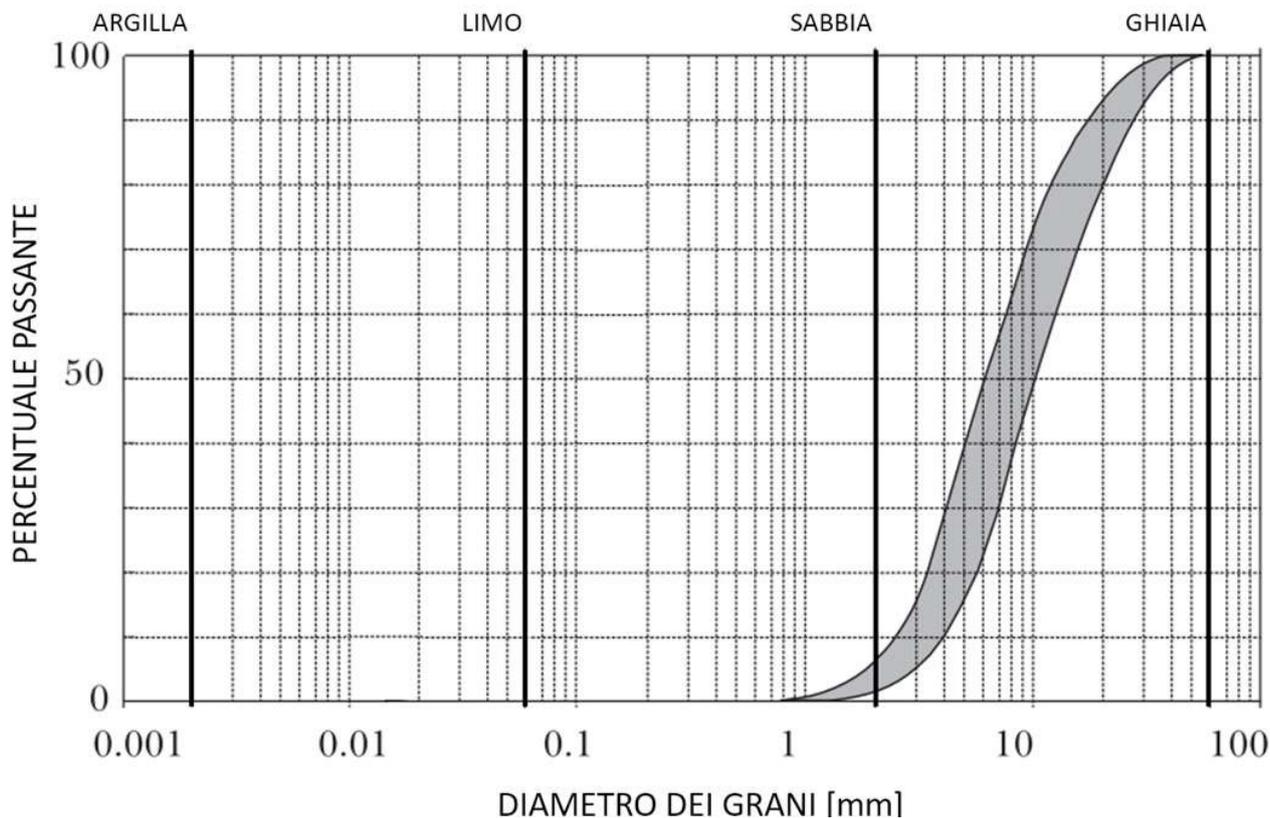


Figura 11: Fuso granulometrico tipo per colonne in ghiaia

In generale, comunque, bisognerà utilizzare una ghiaia naturale a spigoli vivi (definita pietrischetto) con dimensioni comprese tra 2 e 25 mm avente le caratteristiche granulometriche indicate in Tabella 1 (coerente con UNI 11531- 1/2014), ed il seguenti limiti, in termini di equivalente in sabbia, $SE \geq 70\%$ e resistenza alla frammentazione in prova Los Angeles, $LA \leq 40\%$.

Tabella 1: Limiti granulometrici per il materiale drenante da utilizzare

DIMENSIONE GRANULI	PASSANTE
25mm	100%
2mm	$\leq 15\%$
0.063mm	$\leq 3\%$