

Comune di SANGINETO

Provincia di Cosenza - Regione Calabria



**LAVORI DI ADEGUAMENTO SISMICO E DI
RIQUALIFICAZIONE DELL'EDIFICIO SCOLASTICO
COMUNALE SCUOLA MATERNA ED ELEMENTARE DI
VIALE MARIO ARAGONA IN SANGINETO LIDO**

Protocollo

PROGETTO ESECUTIVO

Scala:

Data: **novembre 2019**

ELABORATO

RELAZIONE GEOTECNICA E RELAZIONE
SULLE FONDAZIONI POST OPERAM

LA PROGETTISTA

Ing. Albina R. Farace

IL R.U.P.

Geom. Marco Antonucci



IL SINDACO

Am. Michele Guardia

TAVOLA N.

R.06

1 - DESCRIZIONE GENERALE DELL'OPERA

La presente relazione geotecnica riguarda le indagini, la caratterizzazione e modellazione geotecnica del "volume significativo" per l'opera in esame e valuta l'interazione opera/terreno ai fini del dimensionamento delle relative fondazioni.

Questa relazione è stata redatta sulla base dei dati risultanti dalle prove di campagna e/o di laboratorio.

2 - NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Le fasi di analisi e verifica della struttura sono state condotte in accordo alle seguenti disposizioni normative, per quanto applicabili in relazione al criterio di calcolo adottato dal progettista, evidenziato nel prosieguo della presente relazione:

Legge 5 novembre 1971 n. 1086 (G. U. 21 dicembre 1971 n. 321)

"Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica".

Legge 2 febbraio 1974 n. 64 (G. U. 21 marzo 1974 n. 76)

"Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche"

Indicazioni progettuali per le nuove costruzioni in zone sismiche a cura del Ministero per la Ricerca scientifica - Roma 1981.

D. M. Infrastrutture Trasporti 17/01/2018 (G.U. 20/02/2018 n. 42 - Suppl. Ord. n. 8)

"Aggiornamento delle Norme tecniche per le Costruzioni".

Inoltre, in mancanza di specifiche indicazioni, ad integrazione della norma precedente e per quanto con esse non in contrasto, sono state utilizzate le indicazioni contenute nella:

Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. (G.U. Serie Generale n. 35 del 11/02/2019 - Suppl. Ord. n. 5)

Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.

Eurocodice 7 - *"Progettazione geotecnica"* - EN 1997-1 per quanto non in contrasto con le disposizioni del D.M. 2018 *"Norme Tecniche per le Costruzioni"*.

3 - INDAGINI E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Sulla base di quanto dettagliato nella relazione geologica dell'area di sito, si è proceduto alla progettazione della campagna di indagini geognostiche finalizzate alla determinazione delle caratteristiche geotecniche dei terreni interessati dal "volume significativo" dell'opera in esame.

3.1 Prove effettuate e Caratterizzazione geotecnica

Al fine della determinazione delle caratteristiche geotecniche dei terreni coinvolti nel "volume significativo" dell'opera in esame, sono state condotte delle prove geotecniche, riassunte nella relazione geologica.

Le indagini realizzate hanno permesso di ricostruire le seguenti stratigrafie per ognuna delle quali sono state definite le proprietà geotecniche dei singoli terreni coinvolti.

TERRENI

N _{TRN}	γ _T [N/m ³]	K1			φ [°]	c _u [N/mm ²]	c' [N/mm ²]	E _d [N/mm ²]	E _{cu} [N/mm ²]	A _{S-B}
		K _{1X}	K _{1Y}	K _{1Z}						
		[N/cm ³]	[N/cm ³]	[N/cm ³]						
Sabbie ghiaiose subordinatamente limose										
T001	18.700	80	80	300	30	0,000	0,000	150	0	0,000
Calcere scarsamente fratturato										
T002	24.000	100	100	1000	40	0,000	0,000	25.000	0	0,000

LEGENDA:

N_{TRN}	Numero identificativo del terreno.
γ_T	Peso specifico del terreno.
K1	Valori della costante di Winkler riferita alla piastra Standard di lato b = 30 cm nelle direzioni degli assi del riferimento globale X (K _{1X}), Y (K _{1Y}), e Z (K _{1Z}).
φ	Angolo di attrito del terreno.
c_u	Coesione non drenata.
c'	Coesione efficace.
E_d	Modulo edometrico.
E_{cu}	Modulo elastico in condizione non drenate.
A_{S-B}	Parametro "A" di Skempton-Bjerrum per pressioni interstiziali.

NB: Nel caso di fondazioni dirette con stratigrafia, il calcolo del carico limite (q_{lim}) viene fatto su un terreno "equivalente" con parametri geotecnici calcolati come media pesata degli strati compresi tra la quota del piano di posa e la quota della profondità "significativa" (stabilita come "Multiplo della dimensione Significativa della fondazione").

$$\text{Parametro "J"} = \frac{\sum_i^n [\text{Parametro "J"} (\text{strato}, i) \cdot \text{Spessore} (\text{strato}, i)]}{\text{Profondità significativa}}$$

con i = 1, ..., n (numero di strati compresi tra la quota del piano di posa e la quota della profondità significativa).

3.2 Idrogeologia

Non è stata riscontrata la presenza di falde acquifere a profondità di interesse relativamente al "volume significativo" investigato.

3.3 Problematiche riscontrate

Durante l'esecuzione delle prove e dall'elaborazione dei dati non sono emerse problematiche rilevanti alla realizzazione delle opere di fondazione.

4 - MODELLAZIONE GEOTECNICA E PERICOLOSITA' SISMICA DEL SITO

Le indagini effettuate, permettono di classificare il profilo stratigrafico, ai fini della determinazione dell'azione sismica, di categoria:

B [B - Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti], basandosi sulla valutazione della velocità delle onde di taglio (V_{S30}) e/o del numero di colpi dello Standard Penetration Test (N_{SPT}) e/o della resistenza non drenata equivalente (c_{u,30}).
Tutti i parametri che caratterizzano i terreni di fondazione sono riportati nei successivi paragrafi.

4.1 Modellazione geotecnica

Ai fini del calcolo strutturale, il terreno sottostante l'opera viene modellato secondo lo schema di Winkler, cioè un sistema costituito da un letto di molle elastiche mutuamente indipendenti. Ciò consente di ricavare le rigidità offerte dai manufatti di fondazione, siano queste profonde o superficiali, che sono state introdotte direttamente nel modello strutturale per tener conto dell'interazione opera/terreno.

4.2 Pericolosità sismica

Ai fini della pericolosità sismica sono stati analizzati i dati relativi alla sismicità dell'area di interesse e ad eventuali effetti di amplificazione stratigrafica e topografica. Si sono tenute in considerazione anche la classe dell'edificio e la vita nominale.

Per tale caratterizzazione si riportano di seguito i dati di pericolosità come da normativa:

DATI GENERALI ANALISI SISMICA NON LINEARE

Dati generali analisi sismica non lineare				
Ang	NV	MP	C.S.T.	ξ
[°]				[%]
0	15	caOld	B	5

LEGENDA:

Ang Direzione di una componente dell'azione sismica rispetto all'asse X (sistema di riferimento globale); la seconda componente dell'azione sismica e' assunta con direzione ruotata di 90 gradi rispetto alla prima.

NV Nel caso di analisi dinamica, indica il numero di modi di vibrazione considerati.

MP Tipo di struttura sismo-resistente prevalente: [ca] = calcestruzzo armato - [caOld] = calcestruzzo armato esistente - [muOld] = muratura esistente - [muNew] = muratura nuova - [muArm] = muratura armata - [ac] = acciaio.

C.S.T. Categoria di sottosuolo: [A] = Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi - [B] = Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti - [C] = Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti - [D] = Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti - [E] = Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D.

ξ Coefficiente viscoso equivalente.

NOTE [-] = Parametro non significativo per il tipo di calcolo effettuato.

Stato Limite	T_r	a_g/g	Amplif. Stratigrafica		F_0	T_c^*	T_B	T_C	T_D
			S_s	C_c					
	[t]					[s]	[s]	[s]	[s]
SLO	45	0,0517	1,200	1,383	2,431	0,319	0,147	0,441	1,807
SLD	75	0,0647	1,200	1,358	2,472	0,349	0,158	0,474	1,859
SLV	712	0,1566	1,200	1,289	2,553	0,453	0,195	0,584	2,227
SLC	1462	0,1978	1,193	1,278	2,619	0,472	0,201	0,604	2,391

LEGENDA:

T_r Periodo di ritorno dell'azione sismica. [t] = anni.

a_g/g Coefficiente di accelerazione al suolo.

S_s Coefficienti di Amplificazione Stratigrafica allo SLO/SLD/SLV/SLC.

C_c Coefficienti di Amplificazione di T_c allo SLO/SLD/SLV/SLC.

F_0 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.

T_B Periodo di inizio del tratto accelerazione costante dello spettro di progetto.

T_C Periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro di progetto.

T_D Periodo di inizio del tratto a spostamento costante dello spettro di progetto.

CI Ed	V_N	V_R	Lat.	Long.	Q_g	C _{Top}	S_T
	[t]	[t]	[°ssdc]	[°ssdc]	[m]		
3	50	75	39.5880	15.8691	40	T1	1,00

LEGENDA:

CI Ed Classe dell'edificio

Lat. Latitudine geografica del sito.

Long. Longitudine geografica del sito.

Q_g Altitudine geografica del sito.

C_{Top} Categoria topografica. (Vedi NOTE)

S_T Coefficiente di amplificazione topografica.

NOTE [-] = Parametro non significativo per il tipo di calcolo effettuato.

Categoria topografica.

T1: Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$.

T2: Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$.

T3: Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$.

T4: Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$.

5 - SCELTA TIPOLOGICA DELLE OPERE DI FONDAZIONE

La tipologia delle opere di fondazione sono consone alle caratteristiche meccaniche del terreno definite in base ai risultati delle indagini geognostiche.

Nel caso in esame, la struttura di fondazione è costituita da:

- fondazioni dirette.

6 - VERIFICHE DI SICUREZZA

Nelle verifiche allo stato limite ultimo deve essere rispettata la condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove:

- E_d è il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione;
- R_d è il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico.

Le verifiche strutturali e geotecniche delle fondazioni, sono state effettuate con l'**Approccio 2** come definito al §2.6.1 del D.M. 2018, attraverso la combinazione **A1+M1+R3**. Le azioni sono state amplificate tramite i coefficienti della colonna A1 (STR) definiti nella tabella 6.2.I del D.M. 2018.

Tabella 6.2.I - Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni [cfr. D.M. 2018]

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente parziale γ_F (o γ_E)	A1 (STR)	A2 (GEO)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	1,00	1,00
	Sfavorevole		1,30	1,00
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,80	0,80
	Sfavorevole		1,50	1,30
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_{Qi}	0,00	0,00
	Sfavorevole		1,50	1,30

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}

I valori di resistenza del terreno sono stati ridotti tramite i coefficienti della colonna M1 definiti nella tabella 6.2.II del D.M. 2018.

Tabella 6.2.II - Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno [cfr. D.M. 2018]

PARAMETRO GEOTECNICO	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	M1	M2
Tangente dell'angolo di resistenza a taglio	$\tan\phi_k$	$\gamma_{\phi'}$	1,00	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,00	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,00	1,40
Peso dell'unità di volume	γ	γ_γ	1,00	1,00

I valori calcolati delle resistenze totali dell'elemento strutturale sono stati divisi per i coefficienti R3 della tabella 6.4.I del D.M. 2018 per le fondazioni superficiali.

Tabella 6.4.I - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi di fondazioni superficiali.

Verifica	Coefficiente Parziale (R3)
Carico limite	$\gamma_R = 2,3$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$

Per le varie tipologie di fondazioni sono di seguito elencate le metodologie ed i modelli usati per il calcolo del carico limite ed i risultati di tale calcolo.

6.1 Carico limite fondazioni dirette

La formula del carico limite esprime l'equilibrio fra il carico applicato alla fondazione e la resistenza limite del terreno. Il carico limite è dato dalla seguente espressione:

$$q_{lim} = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot g_c \cdot b_c \cdot \Psi_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot g_q \cdot b_q \cdot \Psi_q + \frac{B'}{2} \cdot \gamma_f \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot g_\gamma \cdot b_\gamma \cdot \Psi_\gamma \cdot r_\gamma$$

in cui:

- c = coesione del terreno al disotto del piano di posa della fondazione;
- $q = \gamma \cdot D$ = pressione geostatica in corrispondenza del piano di posa della fondazione;
- γ = peso unità di volume del terreno al di sopra del piano di posa della fondazione;
- D = profondità del piano di posa della fondazione;
- B' = larghezza ridotta della suola di fondazione (vedi **NB**);
- L = lunghezza della fondazione;
- γ_f = peso unità di volume del terreno al disotto del piano di posa della fondazione;
- N_{c_r} N_{q_r} N_{γ_r} = fattori di capacità portante;
- s, d, i, g, b, ψ, r = coefficienti correttivi.

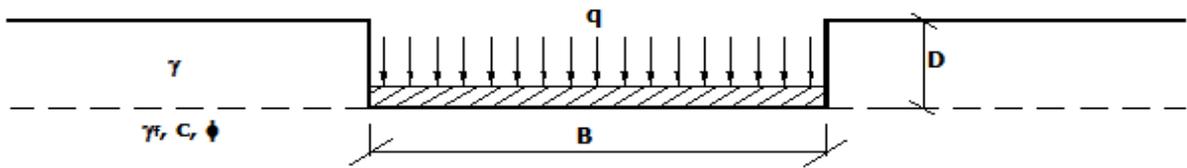
NB: Se la risultante dei carichi verticali è eccentrica, B e L saranno ridotte rispettivamente di:

$$B' = B - 2 \cdot e_B \quad e_B = \text{eccentricità parallela al lato di dimensione } B;$$

$$L' = L - 2 \cdot e_L \quad e_L = \text{eccentricità parallela al lato di dimensione } L;$$

con $B' \leq L'$.

dove:



Calcolo dei fattori N_{c_r} N_{q_r} N_{γ_r}

Terreni puramente coesivi ($c \neq 0, \phi = 0$)	Terreni dotati di attrito e coesione ($c \neq 0, \phi \neq 0$)
$N_c = 2 + \pi$	$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \phi$
$N_q = 1$	$N_q = K_p \cdot e^{\pi \cdot \tan \phi}$
$N_{\gamma_r} = 0$ se $\omega = 0$ $N_{\gamma_r} = -2 \cdot \sin \omega$ se $\omega \neq 0$	$N_{\gamma_r} = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan \phi$

dove:

$$k_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \text{ è il coefficiente di spinta passiva di Rankine;}$$

ϕ = angolo di attrito del terreno al disotto del piano di posa della fondazione;

ω = angolo di inclinazione del piano campagna.

Calcolo dei fattori di forma s_{c_r} s_{q_r} s_{γ_r}

Terreni puramente coesivi ($c \neq 0, \phi = 0$)	Terreni dotati di attrito e coesione ($c \neq 0, \phi \neq 0$)
$s_c = 1 + \frac{B'}{(2 + \pi) \cdot L'}$	$s_c = 1 + \frac{N_q}{N_c} \cdot \frac{B'}{L'}$
$s_q = 1$	$s_q = 1 + \frac{B'}{L'} \cdot \tan \phi$
$s_{\gamma_r} = 1 - 0.40 \cdot \frac{B'}{L'}$	$s_{\gamma_r} = 1 - 0.40 \cdot \frac{B'}{L'}$

con $B'/L' < 1$.

Calcolo dei fattori di profondità del piano di posa d_{c_r} d_{q_r} d_{γ_r}

Si definisce il seguente parametro:

$$K = \frac{D}{B'} \quad \text{se} \quad \frac{D}{B'} \leq 1;$$

$$K = \arctg \left(\frac{D}{B'} \right) \quad \text{se} \quad \frac{D}{B'} > 1.$$

Terreni puramente coesivi ($c \neq 0, \phi = 0$)	Terreni dotati di attrito e coesione ($c \neq 0, \phi \neq 0$)
$d_c = 1 + 0,4 \cdot K$	$d_c = d_q - \frac{1 - d_q}{N_c \cdot \tan \phi}$
$d_q = 1$	$d_q = 1 + 2 \cdot \tan \phi \cdot (1 - \sin \phi)^2 \cdot K$
$d_\gamma = 1$	$d_\gamma = 1$

Calcolo dei fattori di inclinazione del carico i_c i_q i_γ

Si definisce il seguente parametro:

$$m = m_B = \frac{2 + B/L}{1 + B/L}$$

se la forza H è parallela alla direzione trasversale della fondazione

$$m = m_L = \frac{2 + L/B}{1 + L/B}$$

se la forza H è parallela alla direzione longitudinale della fondazione

$$m = m_\theta = m_L \cdot \cos^2 \theta + m_B \cdot \sin^2 \theta$$

se la forza H forma un angolo θ con la direzione longitudinale della fondazione

Terreni coesivi ($c \neq 0, \phi = 0$)	Terreni incoerenti ($c = 0, \phi \neq 0$)	Terreni dotati di attrito e coesione ($c \neq 0, \phi \neq 0$)
$i_c = 1 - \frac{m \cdot H}{c \cdot N_c \cdot B \cdot L}$	$i_c = 0$	$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \cdot \tan \phi}$
$i_q = 1$	$i_q = \left(1 - \frac{H}{V}\right)^m$	$i_q = \left(1 - \frac{H}{V + B \cdot L \cdot c \cdot \cot \phi}\right)^m$
$i_\gamma = 0$	$i_\gamma = \left(1 - \frac{H}{V}\right)^{m+1}$	$i_\gamma = \left(1 - \frac{H}{V + B \cdot L \cdot c \cdot \cot \phi}\right)^{m+1}$

dove:

H = componente orizzontale dei carichi agente sul piano di posa della fondazione;

V = componente verticale dei carichi agente sul piano di posa della fondazione.

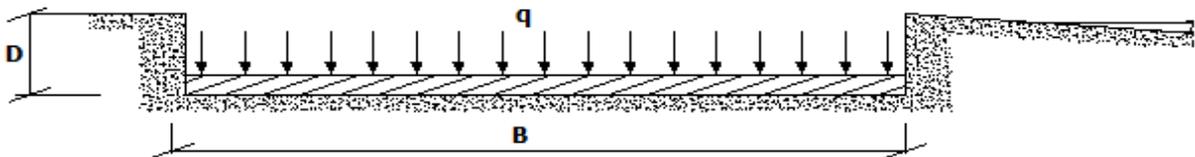
Calcolo dei fattori di inclinazione del piano di campagna b_c b_q b_γ

Indicando con ω la pendenza del piano campagna, si ha:

Terreni puramente coesivi ($c \neq 0, \phi = 0$)	Terreni dotati di attrito e coesione ($c \neq 0, \phi \neq 0$)
$b_c = 1 - \frac{2 \cdot \omega}{(2 + \pi)}$	$b_c = b_q - \frac{1 - b_q}{N_c \cdot \tan \phi}$
$b_q = (1 - \tan \omega)^2 \cdot \cos \omega$	$b_q = (1 - \tan \omega)^2 \cdot \cos \omega$
$b_\gamma = b_q / \cos \omega$	$b_\gamma = b_q / \cos \omega$

Per poter applicare tali coefficienti correttivi deve essere verificata la seguente condizione:

$$\omega < \phi; \quad \omega < 45^\circ.$$

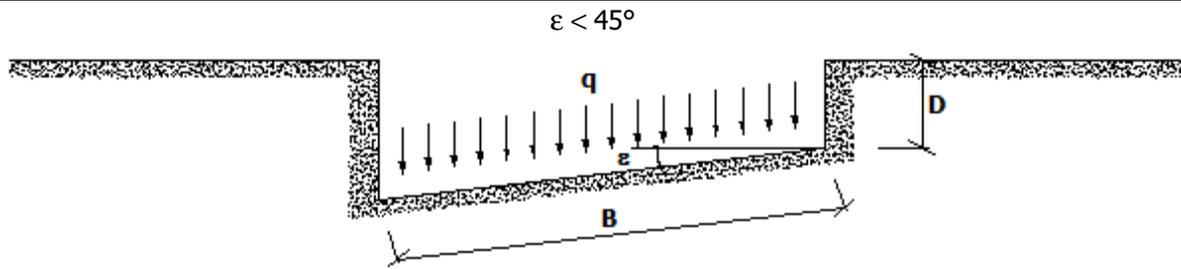


Calcolo dei fattori di inclinazione del piano di posa g_c g_q g_γ

Indicando con ε la pendenza del piano di posa della fondazione, si ha:

Terreni puramente coesivi ($c \neq 0, \phi = 0$)	Terreni dotati di attrito e coesione ($c \neq 0, \phi \neq 0$)
$g_c = 1 - \frac{2 \cdot \varepsilon}{(2 + \pi)}$	$g_c = g_q - \frac{1 - g_q}{N_c \cdot \tan \phi}$
$g_q = 1$	$g_q = (1 - \varepsilon \cdot \tan \phi)^2$
$g_\gamma = 1$	$g_\gamma = g_q$

Per poter applicare tali coefficienti correttivi deve essere verificata la seguente condizione:



Calcolo dei fattori di riduzione per rottura a punzonamento $\Psi_c, \Psi_q, \Psi_\gamma$

Si definisce l'indice di rigidità del terreno come:

$$I_r = \frac{G}{c + \sigma \cdot \tan \phi}$$

dove:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

= modulo d'elasticità tangenziale del terreno;

E= modulo elastico del terreno (nei calcoli è utilizzato il modulo edometrico);

ν = modulo di Poisson. Sia in condizioni non drenate che drenate è assunto pari a 0,5 (a vantaggio di sicurezza);

σ = tensione litostatica alla profondità $D+B/2$.

La rottura a punzonamento si verifica quando i coefficienti di punzonamento $\Psi_c, \Psi_q, \Psi_\gamma$ sono inferiori all'unità; ciò accade quando l'indice di rigidità I_r si mantiene inferiore al valore critico:

$$I_r < I_{r,crit} = \frac{1}{2} \cdot e^{\left[\left(3,3 - 0,45 \frac{B}{L} \right) \cot \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \right]}$$

Terreni puramente coesivi ($c \neq 0, \phi = 0$)	Terreni dotati di attrito e coesione ($c \neq 0, \phi \neq 0$)
$\Psi_c = 0,32 + 0,12 \cdot \frac{B'}{L'} + 0,6 \cdot \text{Log}(I_r)$	$\Psi_c = \Psi_q - \frac{1 - \Psi_q}{N_c \cdot \tan \phi}$
$\Psi_q = 1$	$\Psi_q = e^{\left\{ \left(0,6 \frac{B'}{L'} - 4,4 \right) \tan \phi + \frac{3,07 \sin \phi \cdot \text{Log}(2 \cdot I_r)}{1 + \sin \phi} \right\}}$
$\Psi_\gamma = 1$	$\Psi_\gamma = \Psi_q$

Correzione per fondazione tipo piastra

Bowles, al fine di limitare il contributo del termine " $B \cdot N_\gamma$ ", che per valori elevati di B porterebbe ad ottenere valori del carico limite prossimi a quelli di una fondazione profonda, propone il seguente fattore di riduzione r_γ :

$$r_\gamma = 1 - 0,25 \cdot \text{Log}(B/2) \quad \text{con } B \geq 2 \text{ m}$$

Nella tabella sottostante sono riportati una serie di valori del coefficiente r_γ al variare della larghezza dell'elemento di fondazione.

B [m]	2	2,5	3	3,5	4	5	10	20	100
r_γ	1,00	0,97	0,95	0,93	0,92	0,90	0,82	0,75	0,57

Questo coefficiente assume particolare importanza per fondazioni larghe con rapporto D/B basso, caso nel quale il termine " $B \cdot N_\gamma$ " è predominante.

Calcolo del carico limite in condizioni non drenate

L'espressione generale del carico limite, valutato in termini di *tensioni totale*, diventa:

$$q_{lim} = c_u \cdot (2 + \pi) \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot g_c \cdot b_c + q + \frac{B'}{2} \cdot \gamma_{sat} \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot r_\gamma$$

dove:

c_u = coesione non drenata;

γ_{sat} = peso unità di volume del terreno in condizioni di saturazione.

N.B: Nel calcolo in condizioni non drenate (situazione molto rara per un terreno incoerente) si assume, sempre e comunque, che l'angolo di attrito ϕ sia nullo ($\phi = 0$).

6.2 Fattori correttivi al carico limite in presenza di sisma

L'azione del sisma si traduce in accelerazioni nel sottosuolo (**effetto cinematico**) e nella fondazione, per l'azione delle forze d'inerzia generate nella struttura in elevazione (**effetto inerziale**).

Nell'analisi pseudo-statica, modellando l'azione sismica attraverso la sola componente orizzontale, tali effetti possono essere portati in conto mediante l'introduzione di coefficienti sismici rispettivamente denominati K_{hi} e K_{hk} , il primo definito dal rapporto tra le componenti orizzontale e verticale dei carichi trasmessi in fondazione ed il secondo funzione dell'accelerazione massima attesa al sito.

La formula generale del carico limite si modifica nel seguente modo:

$$q_{lim} = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot g_c \cdot b_c \cdot \Psi_c \cdot Z_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot g_q \cdot b_q \cdot \Psi_q \cdot Z_q + \frac{B'}{2} \cdot \gamma_f \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot g_\gamma \cdot b_\gamma \cdot \Psi_\gamma \cdot r_\gamma \cdot Z_\gamma \cdot C_\gamma$$

in cui, oltre ai termini già precedentemente indicati, si sono introdotti i seguenti termini:

Z_c, Z_q, Z_γ = coefficienti correttivi dovuti all'effetto inerziale;
 C_γ = coefficiente correttivo dovuto all'effetto cinematico.

Calcolo del fattore correttivo dovuto all'effetto cinematico c_γ

L'effetto cinematico modifica il solo coefficiente N_γ in funzione del coefficiente sismico K_{hk} che è pari a:

$$K_{hk} = \beta_s \cdot S_s \cdot S_T \cdot a_g / g;$$

dove:

β_s = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;
 g = accelerazione di gravità;
 S_s = coefficiente di amplificazione stratigrafica;
 S_T = coefficiente di amplificazione topografica;
 a_g = accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

I valori di β_s sono riportati nella seguente tabella:

	CATEGORIA DI SOTTOSUOLO	
	A	B,C,D,E
	β_s	β_s
$0,2 < a_g(g) \leq 0,4$	0,30	0,28
$0,1 < a_g(g) \leq 0,2$	0,27	0,24
$a_g(g) \leq 0,1$	0,20	0,20

Il fattore correttivo dovuto all'effetto cinematico c_γ è stato, pertanto, determinato con la seguente relazione:

Terreni puramente coesivi ($c \neq 0, \phi = 0$)	Terreni dotati di attrito e coesione ($c \neq 0, \phi \neq 0$)
$c_\gamma = 1$	$c_\gamma = \left(1 - \frac{K_{hk}}{\tan \phi}\right)^{0.45}$ se $\frac{K_{hk}}{\tan \phi} < 1$, altrimenti $c_\gamma = 0$

Calcolo dei fattori correttivi dovuti all'effetto inerziale Z_c, Z_q, Z_γ

L'effetto inerziale produce variazioni di tutti i coefficienti di capacità portante del carico limite in funzione del coefficiente sismico K_{hi} .

Tali effetti correttivi vengono valutati con la teoria di **Paolucci - Pecker** attraverso le seguenti relazioni:

Terreni puramente coesivi ($c \neq 0, \phi = 0$)	Terreni dotati di attrito e coesione ($c \neq 0, \phi \neq 0$)	
$Z_c = Z_q = Z_\gamma = 1$	$Z_c = 1 - 0,32 \cdot K_{hi}$	se $Z_c > 0$ altrimenti $Z_c = 0$
	$Z_\gamma = Z_q = \left(1 - \frac{K_{hi}}{\tan \phi}\right)^{0.35}$	se $\frac{K_{hi}}{\tan \phi} < 1$ altrimenti $Z_\gamma = Z_q = 0$

dove:

K_{hi} è ricavato dallo spettro di progetto allo SLV attraverso la relazione:

$$K_{hi} = S_s \cdot S_T \cdot a_g / g;$$

i cui termini sono stati precedentemente precisati.

Si fa notare che il coefficiente sismico K_{hi} coincide con l'ordinata dello spettro di progetto allo SLU per $T = 0$ ed è indipendente dalle combinazioni di carico.

Verifiche nei confronti degli stati limite ultimi (SLU)

Di seguito si riporta una tabella riepilogativa relativa alla verifica dello stato limite di collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno.

Si precisa che il valore relativo alla colonna $Q_{d,Rd}$, di cui nella tabella seguente, è da intendersi come il valore di progetto della resistenza R_d , ossia il rapporto fra il carico limite q_{lim} (calcolato come sopra esposto) ed il valore del coefficiente parziale di sicurezza γ_R relativo alla capacità portante del complesso terreno-fondazione, in relazione all'approccio utilizzato. Nel caso in esame il coefficiente parziale di sicurezza γ_R è stato assunto pari a 2,3 (tabella 6.4.I del D.M. 2018).

Si precisa che, nella sottostante tabella:

- la coppia Q_{Ed} e $Q_{d,Rd}$ è relativa alla combinazione di carico, fra tutte quelle esaminate, che da luogo al minimo coefficiente di sicurezza (CS);
- nelle colonne "per N_q , per N_c e per N_γ ", relative ai "Coef. Cor. Terzaghi", viene riportato il prodotto tra i vari coefficienti correttivi presenti nell'espressione generale del carico limite. Ad esempio si è posto:

$$\text{Coef. Cor. Terzaghi per } N_q = s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot g_q \cdot b_q \cdot \psi_q \cdot Z_q$$

$$\text{Coef. Cor. Terzaghi per } N_c = s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot g_c \cdot b_c \cdot \psi_c \cdot Z_c$$

$$\text{Coef. Cor. Terzaghi per } N_\gamma = s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot g_\gamma \cdot b_\gamma \cdot \psi_\gamma \cdot r_\gamma \cdot Z_\gamma \cdot C_\gamma$$

VERIFICHE CARICO LIMITE FONDAZIONI DIRETTE ALLO SLU

Verifiche Carico Limite fondazioni dirette allo SLU

Id _{Fnd}	CS	L _x	L _y	R _{tz}	Z _{p.cmp}	Z _{Fid}	Cmp T	C. Terzaghi			Q _{Ed}	Q _{Rd}	R _f			
								per N _q	per N _c	per N _γ						
		[m]	[m]	[°]	[m]	[m]					[N/mm ²]	[N/mm ²]				
Trave 1-2	2,56	6,40	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,47	0,00	0,86	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,132	0,337	N O
Trave 18-19	4,69	4,00	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,77	0,00	0,76	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,417	1,959	N O
Trave 17-18	4,08	2,82	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,52	0,00	0,85	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,443	1,808	N O
Trave 16-17	4,10	2,98	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	0,00	0,00	0,00	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,082	0,337	N O
Trave 14-15	26,0 4	6,30	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,50	0,00	0,87	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,069	1,798	N O
Trave 13-14	2,37	5,95	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	0,00	0,00	0,00	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,051	0,121	N O
Trave 21-20	17,7 2	6,40	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,60	0,00	0,82	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,105	1,856	N O
Trave 22-21	12,0 7	6,30	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,57	0,00	0,83	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,153	1,842	N O
Trave 24-23	2,37	2,82	1,40	0,00	1,25	-	NON Coesivo	0,00	0,00	0,00	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,072	0,000	SI
Trave 23-22	12,9 4	6,18	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,50	0,00	0,86	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,139	1,795	N O
Trave 11-12	1,22	4,00	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,68	0,00	0,75	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,320	0,389	N O
Trave 10-11	3,74	5,80	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,47	0,00	0,83	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,096	0,358	N O
Trave 8-9	2,89	6,30	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,53	0,00	0,83	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,127	0,368	N O
Trave 6-12	2,00	3,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	0,00	0,00	0,00	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,044	0,088	N O
Trave 25-27	1,21	1,40	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	0,00	0,00	0,00	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,152	0,184	N O
Trave 12-19	1,98	6,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,50	0,00	0,88	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,174	0,345	N O
Trave 19-25	2,77	6,50	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,41	0,00	0,91	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,119	0,329	N O
Trave 2-4	1,44	5,50	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,63	0,00	0,80	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,572	0,824	N O
Trave 8-14	1,25	6,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,40	0,00	0,93	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,423	0,529	N O
Trave 14-21	1,87	6,50	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,55	0,00	0,86	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,188	0,352	N O

...

Verifiche Carico Limite fondazioni dirette allo SLU

Id _{Fnd}	CS	L _X	L _Y	Rtz	Z _{P.cmp}	Z _{Fld}	Cmp T	C. Terzaghi						Q _{Ed}	Q _{Rd}	R _f
								per N _q	per N _c	per N _γ	N _q	N _c	N _γ			
		[m]	[m]	[°]	[m]	[m]							[N/mm ²]	[N/mm ²]		
Trave 7-13	1,45	6,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,57	0,00	0,83	18,40	30,14	22,40	0,243	0,353	NO
Trave 13-20	1,93	6,52	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,48	0,00	0,82	18,40	30,14	22,40	0,175	0,336	NO
Trave 1-3	1,22	5,50	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,89	0,00	0,68	18,40	30,14	22,40	0,463	0,565	NO
Trave 3-7	1,01	3,23	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	0,00	0,00	0,00	18,40	30,14	22,40	0,069	0,070	NO
Trave 9-15	2,00	6,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,55	0,00	0,85	18,40	30,14	22,40	0,175	0,351	NO
Trave 15-22	1,04	6,50	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,76	0,00	0,74	18,40	30,14	22,40	0,383	0,400	NO
Trave 17-23	2,25	6,50	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	0,00	0,00	0,00	18,40	30,14	22,40	0,055	0,124	NO
Trave 5-11	1,12	3,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	0,00	0,00	0,00	18,40	30,14	22,40	0,047	0,053	NO
Trave 11-18	4,96	6,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,40	0,00	0,92	18,40	30,14	22,40	0,066	0,329	NO
Trave 10-16	2,80	6,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,48	0,00	0,89	18,40	30,14	22,40	0,122	0,341	NO
Trave 5-6	2,69	4,00	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,68	0,00	0,79	18,40	30,14	22,40	0,138	0,372	NO
Trave 18-5b	3,77	5,16	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,86	0,00	0,65	18,40	30,14	22,40	0,110	0,414	SI

LEGENDA:

- Id_{Fnd}** Descrizione dell'oggetto di fondazione al quale è riferita la verifica.
- CS** Coefficiente di sicurezza ([NS] = Non Significativo se CS ≥ 100; [VNR]= Verifica Non Richiesta; Informazioni aggiuntive sulla condizione: [V] = statica; [E] = eccezionale; [S] = sismica; [N] = sismica non lineare).
- L_{X/Y}** Dimensioni dell'elemento di fondazione.
- Rtz** Angolo compreso tra l'asse X e il lato più lungo del minimo rettangolo che delimita il poligono della platea.
- Z_{P.cmp}** Profondità di posa dell'elemento di fondazione dal piano campagna.
- Z_{Fld}** Profondità della falda dal piano campagna.
- Cmp T** Classificazione del comportamento del terreno ai fini del calcolo.
- C.** Coefficienti correttivi per la formula di Terzaghi.
- Terzaghi**
- hi**
- Q_{Ed}** Carico di progetto sul terreno.
- Q_{Rd}** Resistenza di progetto del terreno.
- R_f** [SI] = elemento con presenza di rinforzo; [NO] = elemento senza rinforzo.

VERIFICHE CARICO LIMITE FONDAZIONI DIRETTE ALLO SLD

...

Verifiche Carico Limite fondazioni dirette allo SLD

Id _{Fnd}	CS	L _X	L _Y	Rtz	Z _{P.cmp}	Z _{Fld}	Cmp T	C. Terzaghi						Q _{Ed}	Q _{Rd}	R _f
								per N _q	per N _c	per N _γ	N _q	N _c	N _γ			
		[m]	[m]	[°]	[m]	[m]							[N/mm ²]	[N/mm ²]		
Trave 24-26	1,64	1,40	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,46	0,00	0,79	18,40	30,14	22,40	0,273	0,449	SI
Trave 1-2	6,04	6,40	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,23	0,00	0,80	18,40	30,14	22,40	0,061	0,370	NO
Trave 18-19	32,00	4,00	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,41	0,00	0,83	64,20	75,31	109,41	0,068	2,172	NO
Trave 17-18	26,16	2,82	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,50	0,00	0,79	64,20	75,31	109,41	0,086	2,239	NO

...

Verifiche Carico Limite fondazioni dirette allo SLD

Id _{Fnd}	CS	L _x	L _y	Rtz	Z _{P.cmp}	Z _{Fld}	Cmp T	C. Terzaghi						Q _{Ed}	Q _{Rd}	R _f
								per N _q	per N _c	per N _γ	N _q	N _c	N _γ			
		[m]	[m]	[°]	[m]	[m]										
Trave 16-17	25,5 1	2,98	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,49	0,00	0,80	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,088	2,241	N O
Trave 14-15	37,0 6	6,30	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,30	0,00	0,88	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,057	2,097	N O
Trave 15-16	24,2 1	3,20	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,48	0,00	0,82	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,092	2,239	N O
Trave 13-14	32,7 5	5,95	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,33	0,00	0,86	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,064	2,106	N O
Trave 21-20	39,1 2	6,40	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,28	0,00	0,85	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,052	2,043	N O
Trave 22-21	29,9 3	6,30	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,29	0,00	0,84	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,069	2,058	N O
Trave 24-23	30,5 1	2,82	1,40	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,69	0,00	0,73	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,084	2,553	SI
Trave 25-24	54,2 5	4,00	1,40	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,49	0,00	0,80	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,045	2,414	SI
Trave 23-22	30,1 6	6,18	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,29	0,00	0,85	64,2 0	75,3 1	109, 41	0,068	2,057	N O
Trave 11-12	8,64	4,00	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,34	0,00	0,80	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,049	0,421	N O
Trave 10-11	8,43	5,80	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,24	0,00	0,79	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,047	0,397	N O
Trave 7-8	8,43	5,95	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,27	0,00	0,80	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,048	0,405	N O
Trave 8-9	8,18	6,30	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,22	0,00	0,78	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,048	0,391	N O
Trave 9-10	5,72	3,20	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,34	0,00	0,74	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,072	0,415	N O
Trave 6-12	5,26	3,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,39	0,00	0,80	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,077	0,407	N O
Trave 25-27	2,15	1,40	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,78	0,00	0,60	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,223	0,481	N O
Trave 12-19	5,23	6,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,26	0,00	0,82	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,072	0,378	N O
Trave 19-25	5,33	6,50	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,24	0,00	0,81	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,070	0,372	N O
Trave 2-4	4,63	5,50	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,25	0,00	0,79	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,080	0,373	N O
Trave 4-8	3,37	3,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,39	0,00	0,81	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,121	0,409	N O
Trave 8-14	5,09	6,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,32	0,00	0,87	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,078	0,397	N O
Trave 14-21	5,39	6,50	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,30	0,00	0,87	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,073	0,393	N O
Trave 7-13	4,71	6,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,24	0,00	0,79	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,078	0,369	N O
Trave 13-20	4,78	6,52	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,21	0,00	0,77	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,075	0,361	N O
Trave 1-3	4,68	5,50	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,27	0,00	0,80	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,081	0,378	N O
Trave 3-7	3,27	3,23	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,37	0,00	0,78	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,122	0,400	N O
Trave 9-15	5,23	6,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,31	0,00	0,86	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,075	0,394	N O
Trave 15-22	4,92	6,50	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,31	0,00	0,88	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,080	0,395	N O
Trave 17-23	5,86	6,50	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,32	0,00	0,89	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,068	0,397	N O
Trave 5-11	4,71	3,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,44	0,00	0,82	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,089	0,420	N O
Trave 11-18	6,93	6,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,31	0,00	0,88	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,057	0,396	N O
Trave 10-16	6,01	6,20	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,32	0,00	0,88	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,066	0,397	N O
Trave 5-6	7,84	4,00	0,80	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,33	0,00	0,82	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,050	0,393	N O
Trave 26-27	16,8 4	4,00	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,36	0,00	0,81	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,025	0,429	SI
Trave 18-5b	5,29	5,16	1,10	0,00	1,25	-	NON Coesivo	1,54	0,00	0,67	18,4 0	30,1 4	22,4 0	0,086	0,453	SI

Id _{Fnd}	CS	L _X	L _Y	R _{tz}	Z _{P.cmp}	Z _{Fld}	Cmp T	C. Terzaghi						Q _{Ed}	Q _{Rd}	R _f
								per N _q	per N _c	per N _γ	N _q	N _c	N _γ			
		[m]	[m]	[°]	[m]	[m]								[N/mm ²]	[N/mm ²]	

LEGENDA:

- Id_{Fnd}** Descrizione dell'oggetto di fondazione al quale è riferita la verifica.
- CS** Coefficiente di sicurezza ([NS] = Non Significativo se CS ≥ 100; [VNR]= Verifica Non Richiesta; Informazioni aggiuntive sulla condizione: [V] = statica; [E] = eccezionale; [S] = sismica; [N] = sismica non lineare).
- L_{X/Y}** Dimensioni dell'elemento di fondazione.
- R_{tz}** Angolo compreso tra l'asse X e il lato più lungo del minimo rettangolo che delimita il poligono della platea.
- Z_{P.cmp}** Profondità di posa dell'elemento di fondazione dal piano campagna.
- Z_{Fld}** Profondità della falda dal piano campagna.
- Cmp T** Classificazione del comportamento del terreno ai fini del calcolo.
- C.** Coefficienti correttivi per la formula di Terzaghi.
- Terzaghi**
- hi**
- Q_{Ed}** Carico di progetto sul terreno.
- Q_{Rd}** Resistenza di progetto del terreno.
- R_f** [SI] = elemento con presenza di rinforzo; [NO] = elemento senza rinforzo.