

REGIONE SARDEGNA
PROVINCE DI ORISTANO E NUORO
Suni(OR) - Sindia (NU) - Macomer (NU)

LOCALITA' "S'ena e Cheos ", "Tiruddone", "Ferralzos"

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO DI PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE EOLICA E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE - 7 AEROGENERATORI

Sezione 9:

RELAZIONI SPECIALISTICHE

Titolo elaborato:

Relazione Geotecnica

N. Elaborato: 9.4

Scala: -

Proponente

ORTA ENERGY 9 Srl

Largo Guido Donegani, 2
CAP 20121 Milano (MI)
P.Iva 11898400962

Amministratore

Francesco DOLZANI

Progettazione



sede legale e operativa

San Martino Sannita (BN) Loc. Chianarile snc Area Industriale

sede operativa

Lucera (FG) via A. La Cava 114

P.IVA 01465940623

Azienda con sistema gestione qualità Certificato N. 50 100 11873




Progettista

Dott. Ing. Nicola Forte




Rev.	Data	Elaborazione	Approvazione	Emissione	DESCRIZIONE
00	LUGLIO 2023	MMG sigla	PR sigla	NF sigla	Emissione progetto definitivo

Nome File sorgente	ES.SUN01.PD.9.4.R00.doc	Nome file stampa	ES.SUN01.PD.9.4.R00.pdf	Formato di stampa	A4
--------------------	-------------------------	------------------	-------------------------	-------------------	----

	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	ES.SUN01.PD.9.4.R00 26/07/2023 05/09/2023 01 1 di 24
---	-----------------------------	---	--

INDICE

1	PREMESSA	2
2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	4
3	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	5
3.1	IDROGEOLOGIA	6
4	MODELLAZIONE GEOTECNICA E PERICOLOSITA' SISMICA DEL SITO	7
4.1	MODELLAZIONE GEOTECNICA FONDAZIONI SUPERFICIALI	7
4.2	PERICOLOSITÀ SISMICA	8
5	SCELTA TIPOLOGICA DELLE OPERE DI FONDAZIONE	9
6	VERIFICHE DI SICUREZZA FONDAZIONI SUPERFICIALI	9
6.1	CARICO LIMITE FONDAZIONI DIRETTE	10
6.1.1	CALCOLO DEI FATTORI N_c , N_q , N_f	11
6.1.2	CALCOLO DEI FATTORI DI FORMA s_c , s_q , s_f	11
6.1.3	CALCOLO DEI FATTORI DI PROFONDITÀ DEL PIANO DI POSA d_c , d_q , d_f	11
6.1.4	CALCOLO DEI FATTORI DI INCLINAZIONE DEL CARICO i_c , i_q , i_f	12
6.1.5	CALCOLO DEI FATTORI DI INCLINAZIONE DEL PIANO DI CAMPAGNA b_c , b_q , b_f	12
6.1.6	CALCOLO DEI FATTORI DI INCLINAZIONE DEL PIANO DI POSA g_c , g_q , g_f	13
6.1.7	CALCOLO DEI FATTORI DI RIDUZIONE PER ROTTURA A PUNZONAMENTO ψ_c , ψ_q , ψ_f	13
6.1.8	CORREZIONE PER FONDAZIONE TIPO PIASTRA	14
6.1.9	CALCOLO DEL CARICO LIMITE IN PRESENZA DI FALDA	14
6.1.10	FATTORI CORRETTIVI AL CARICO LIMITE IN PRESENZA DI SISMA	15
6.1.11	CALCOLO DEL FATTORE CORRETTIVO DOVUTO ALL'EFFETTO CINEMATICO c_f	16
6.1.12	CALCOLO DEI FATTORI CORRETTIVI DOVUTI ALL'EFFETTO INERZIALE z_c , z_q , z_f	16
6.2	GRAFICI SINTETICI PLINTI DI FONDAZIONE	17
6.3	GRAFICI SINTETICI FONDAZIONI SUPERFICIALI	18
7	CONCLUSIONI	24

	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	ES.SUN01.PD.9.4.R00 26/07/2023 05/09/2023 01 2 di 24
---	-----------------------------	---	--

1 PREMESSA

Il progetto descritto nella presente relazione riguarda la realizzazione di un impianto eolico costituito da 7 aerogeneratori della potenza di 6 MW ciascuno, per una potenza di 42 MW, integrato con un sistema di accumulo con batterie agli ioni da 20 MW, per una potenza complessiva in immissione di 62 MW da installare nel comune di Suni (OR) e Sindia (NU) alle località "S'ena e Cheos", "Tiruddone" e "Ferralzos", con opere di connessione alla rete di trasmissione nazionale ricadenti nel comune Macomer (NU) alla località "Mura de Putzu". Proponente dell'iniziativa è la società Orta Energy 9 srl.

Il sito di installazione degli aerogeneratori è ubicato tra i centri abitati di Suni e Sindia, dai quali gli aerogeneratori più prossimi distano rispettivamente 4,5 km e 2,5 km.

Gli aerogeneratori sono collegati tra loro mediante un cavidotto in media tensione interrato denominato "cavidotto interno" che sarà posato quasi totalmente al di sotto di viabilità esistente e che giunge fino alla cabina di raccolta, prevista nel comune di Sindia alla località "Piena Porcalzos" nei pressi della strada comunale Miali Spina.

Dalla cabina di raccolta parte il tracciato del cavidotto interrato in media tensione "esterno", che corre su strada esistente e che, dopo circa 19 km, raggiunge la stazione elettrica di trasformazione 30/150 kV di progetto (in breve SE di utenza).


La SE di utenza, infine, è collegata in antenna a 150 kV sulla sezione a 150 kV della futura Stazione Elettrica (SE) di trasformazione 380/150 kV della RTN da inserire in entra-esce alla linea a 380 kV "Ittiri - Selargius".

All'interno della stazione di utenza è prevista l'installazione di un sistema di accumulo di energia denominato BESS - Battery Energy Storage System, basato su tecnologia elettrochimica a ioni di litio, comprendente gli elementi di accumulo, il sistema di conversione DC/AC e il sistema di elevazione con trasformatore e quadro di interfaccia. Il sistema di accumulo è dimensionato per 20 MW con soluzione containerizzata, composto sostanzialmente da:

- 16 Container metallici Batterie HC ISO con relativi sistemi di comando e controllo;
- 8 Container metallici PCS HC ISO per le unità inverter completi di quadri servizi ausiliari e relativi pannelli di controllo e trasformazione BT/MT.

Completano il quadro delle opere da realizzare una serie di adeguamenti temporanei alle strade esistenti necessari a consentire il passaggio dei mezzi eccezionali di trasporto delle strutture costituenti gli aerogeneratori.

In fase di realizzazione dell'impianto sarà necessario predisporre un'area logistica di cantiere con le funzioni di stoccaggio materiali e strutture, ricovero mezzi, disposizione dei baraccamenti necessari alle maestranze (fornitore degli aerogeneratori, costruttore delle opere civili ed elettriche) e alle figure deputate al controllo della realizzazione (Committenza dei lavori, Direzione Lavori, Coordinatore della Sicurezza in fase di esecuzione, Collaudatore).


 TENPROJECT	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	ES.SUN01.PD.9.4.R00 26/07/2023 05/09/2023 01 3 di 24
---	-----------------------------	---	--

Al termine dei lavori di costruzione dell'impianto, le aree di cantiere, le opere temporanee di adeguamento della viabilità e quelle funzionali alla realizzazione dell'impianto saranno rimosse ed i luoghi saranno ripristinati come ante operam.

La presente relazione descrive le opere strutturali previste per il progetto dell'impianto eolico. Le opere previste per la realizzazione del suddetto impianto consistono in:

- Fondazioni degli aerogeneratori;
- Opere previste per la sottostazione di trasformazione 30/150 kV;

Nei paragrafi successivi la descrizione delle opere.

 TENPROJECT	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	ES.SUN01.PD.9.4.R00 26/07/2023 05/09/2023 01 4 di 24
---	-----------------------------	---	--

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Le fasi di analisi e verifica della struttura sono state condotte in accordo alle seguenti disposizioni normative:

- **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 progettive 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 nelle seguenti norme:

- **Circolare 21 gennaio 2019 n. 7 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti** (G.U. 11 febbraio 2019 n. 35 – Suppl. Ord.)

“Istruzioni per l'applicazione delle 'Norme Tecniche delle Costruzioni' di cui al D.M. 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”.*

	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	5 di 24

3 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Come illustrato nella “Relazione geologica e geomorfologica” (rif. Elaborato ES.SUN01.PD.04.R00), la situazione litostratigrafica, geotecnica, sismica ed idrogeologica dell’area oggetto di studio, è stata ricostruita sulla base dei dati ottenuti dai sondaggi geognostici pregressi effettuati in aree adiacenti al sito in esame, dalle osservazioni dirette di campagna, opportunamente completate dai dati e delle notizie ricavati dalla cartografia ufficiale, dalla letteratura tecnico-scientifica e della banca dati del Servizio Geologico d’Italia.

Di seguito si riportano le proprietà geotecniche dei singoli terreni coinvolti e la stratigrafia di progetto:

Tabella 1 – Terreni area parco

N_{TRN}	γ_T	ϕ	c'
	[N/m ³]	[°]	[MPa]
T001	29.000	50	35

LEGENDA:

- N_{TRN}** Numero identificativo del terreno.
- γ_T** Peso specifico del terreno.
- ϕ** Angolo di attrito del terreno.
- c'** Coesione efficace.

Tabella 2 – Stratigrafia area parco

N_{TRN}	Q_i	Q_f	Cmp. S.
	[m]	[m]	
T001	-3,0	INF	coerente

LEGENDA:

- N_{TRN}** Numero identificativo della stratigrafia.
- Q_i** Quota iniziale dello strato (riferito alla quota iniziale della stratigrafia).
- Q_f** Quota finale dello strato (riferito alla quota iniziale della stratigrafia). INF = infinito (profondità dello strato finale).
- Cmp. S.** Comportamento dello strato.

Tabella 3 – Terreni area stazione

N_{TRN}	γ_T	ϕ	c'
	[N/m ³]	[°]	[MPa]
T001	29.000	50	35

LEGENDA:

- N_{TRN}** Numero identificativo del terreno.
- γ_T** Peso specifico del terreno.
- ϕ** Angolo di attrito del terreno.
- c'** Coesione efficace.


	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	6 di 24

Tabella 4 – Stratigrafia area stazione

N_{TRN}	Q_i	Q_f	Cmp. S.
	[m]	[m]	
T001	-3,0	INF	coerente

LEGENDA:

- N_{TRN}** Numero identificativo della stratigrafia.
- Q_i** Quota iniziale dello strato (riferito alla quota iniziale della stratigrafia).
- Q_f** Quota finale dello strato (riferito alla quota iniziale della stratigrafia). INF = infinito (profondità dello strato finale).
- Cmp. S.** Comportamento dello strato.

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*”).


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

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

Come specificato nella “*Relazione geologica e geomorfologica*” (rif. Elaborato 1531-PD_A_0.4_REL_r00) verrà effettuato un dettagliato e puntuale piano di indagini in campo e di laboratorio che permetterà una caratterizzazione di ancora maggior dettaglio sui parametri geotecnici e quindi un’ottimizzazione sulla progettazione delle opere fondali.

3.1 Idrogeologia

Le indicazioni riportate nella “*Relazione geologica e geomorfologica*” (rif. Elaborato ES.SUN01.PD.04.R00) evidenziano che le falde rinvenute oscillano ad una profondità che sta tra i 30 e 90 metri dal p.c.,

	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	7 di 24

4 MODELLAZIONE GEOTECNICA E PERICOLOSITA' SISMICA DEL SITO

Ai fini della determinazione dell'azione sismica come evidenziato nella “*Relazione geologica e geomorfologica*” sono stati adoperati i risultati di indagini sismiche, dalle quali risulta un V_{seq} maggiore di 800 m/sec che permette pertanto, di classificare il profilo stratigrafico di categoria:

A [A – Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità equivalente superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione con spessore massimo di 3m.].

4.1 Modellazione geotecnica fondazioni superficiali

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 rigidezze 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.

La modellazione del suolo come letto di molle alla Winkler prevede la definizione delle costanti di sottofondo del terreno che vengono definite tramite la seguente espressione:

$$K = c \cdot K_1;$$

dove:

K_1 = costante di Winkler del terreno riferita alla piastra standard di lato $b = 30$ cm (i valori assunti sono definiti sulla base di letteratura ufficiale (*Rif. Fondazioni C. Viggiani, 2003*);

c = coefficiente di correzione, funzione del comportamento del terreno e della particolare geometria degli elementi di fondazione. Nel caso di “*Riduzione Automatica*” è dato dalle successive espressioni (*Rif. Evaluation of coefficients of subgrade reaction K. Terzaghi, 1955 p. 315*):

$$c = \left[\frac{(B + b)^2}{2 \cdot B} \right]^2 \quad \text{per terreni incoerenti}$$


$$c = \left(\frac{L/B + 0,5}{1,5 \cdot L/B} \right) \cdot \frac{b}{B} \quad \text{per terreni coerenti}$$

Essendo:

$b = 0,30$ m, dimensione della piastra standard;

L = lato maggiore della fondazione;

B = lato minore della fondazione.

 TENPROJECT	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	8 di 24

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 delle opere e la vita nominale, in particolare è stata considerata una **Vita Nominale** pari a **100** e per **Classe d'Uso** pari a **2**.

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

Tabella 5 - parametri di pericolosità sismica sito di interesse


Parametri sismici				
	T_R [anni]	a_g [m/s ²]	F_0 [...]	T_C^* [s]
SLO	30	0,183	2,610	0,273
SLD	50	0,231	2,670	0,296
SLV	475	0,490	2,880	0,340
SLC	975	0,591	2,980	0,372

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

a_g/g Coefficiente di accelerazione al suolo.

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.

	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	9 di 24

5 SCELTA TIPOLOGICA DELLE OPERE DI FONDAZIONE

La tipologia delle opere di fondazione è consona alle caratteristiche meccaniche del terreno ed alle azioni agenti sulle strutture. Per il progetto in esame sono previste **fondazioni dirette** per le fondazioni delle turbine eoliche e per le opere di stazione.

6 VERIFICHE DI SICUREZZA FONDAZIONI SUPERFICIALI

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 - Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni - Tabella 6.2.I del 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	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

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 7 - Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno - Tabella 6.2.II del 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_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 8 - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi di fondazioni superficiali - Tabella 6.4.I del D.M. 2018

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

	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	10 di 24

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, N_q, N_γ = 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:

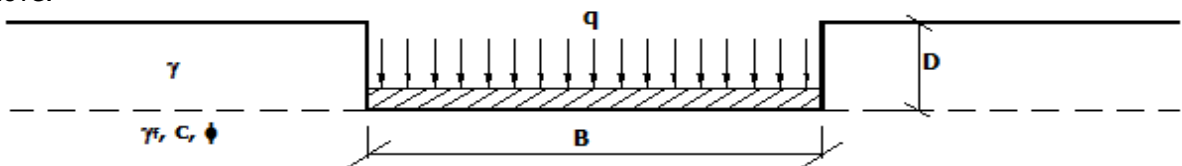



Figura 1 - schematizzazione impostazione di calcolo del carico limite

 TENPROJECT	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	11 di 24

6.1.1 Calcolo dei fattori N_c , N_q , N_γ

Tabella 9 - fattori correttivi formula del carico limite

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

dove:

$k_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$ 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.

6.1.2 Calcolo dei fattori di forma s_c , s_q , s_γ

Tabella 10 - fattori correttivi formula del carico limite

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

con $B'/L' < 1$.

6.1.3 Calcolo dei fattori di profondità del piano di posa d_c , d_q , d_γ


Si definisce il seguente parametro:

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

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

Tabella 11 - fattori correttivi formula del carico limite

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

 TENPROJECT	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	12 di 24

6.1.4 Calcolo dei fattori di inclinazione del carico i_c , i_q , i_y

Si definisce il seguente parametro:

$$m = m_B = \frac{2 + B/L}{1 + B/L} \quad \text{se la forza H è parallela alla direzione trasversale della fondazione}$$

$$m = m_L = \frac{2 + L/B}{1 + L/B} \quad \text{se la forza H è parallela alla direzione longitudinale della fondazione}$$

$$m = m_\theta = m_L \cdot \cos^2\theta + m_B \cdot \sin^2\theta \quad \text{se la forza H forma un angolo } \theta \text{ con la direzione longitudinale della fondazione}$$

Tabella 12 - fattori correttivi formula del carico limite

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

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.

6.1.5 Calcolo dei fattori di inclinazione del piano di campagna b_c , b_q , b_y

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

Tabella 13 - fattori correttivi formula del carico limite

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

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

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

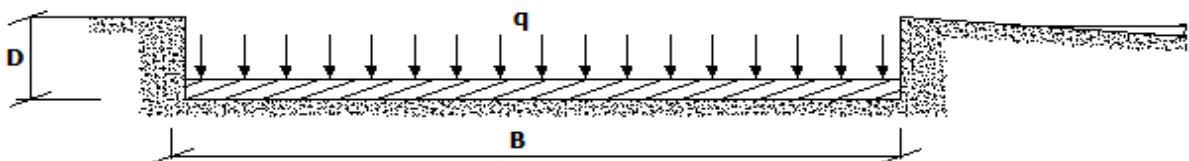



Figura 2 - schematizzazione impostazione di calcolo del carico limite

 TENPROJECT	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	13 di 24

6.1.6 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:

Tabella 14 - fattori correttivi formula del carico limite

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:

$$\varepsilon < 45^\circ$$

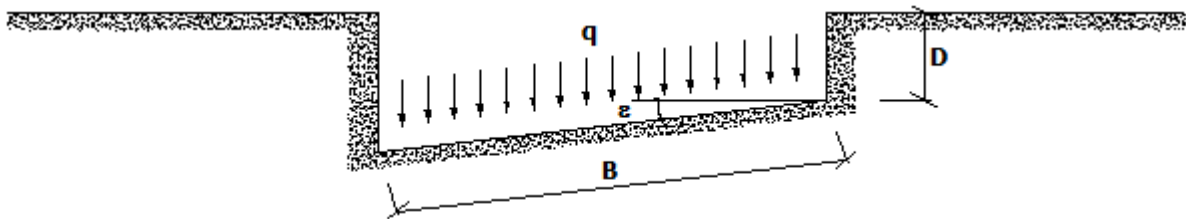


Figura 3 - schematizzazione impostazione di calcolo del carico limite

6.1.7 Calcolo dei fattori di riduzione per rottura a punzonamento Ψ_c , Ψ_q , Ψ_γ

Si definisce l'indice di rigidità del terreno come:

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

dove:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \text{modulo d'elasticità tangenziale del terreno};$$

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 Ψ_c , Ψ_q , Ψ_γ sono inferiori all'unità;

ciò accade quando l'indice di rigidità I_r si mantiene inferiore al valore critico:

$$I_r < I_{r,crit} = \frac{1}{2} \cdot e^{\left[\left(3.3 - 0.45 \frac{B}{L} \right) \cdot \cot \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \right]}$$


	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	14 di 24

Tabella 15 - fattori correttivi formula del carico limite

Terreni puramente coesivi ($c \neq 0, \phi = 0$)	Terreni dotati di attrito e coesione ($c \neq 0, \phi \neq 0$)
$\Psi_c = 0.32 + 0.12 \cdot \frac{B'}{L'} + 0.6 \cdot \text{Log}(I_r)$	$\Psi_c = \Psi_q - \frac{1 - \Psi_q}{N_c \cdot \tan \phi}$
$\Psi_q = 1$	$\Psi_q = e^{\left\{ \left(0.6 \frac{B'}{L'} - 4.4 \right) \tan \phi + \frac{3.07 \cdot \sin \phi \cdot \text{Log}(2 \cdot I_r)}{1 + \sin \phi} \right\}}$
$\Psi_\gamma = 1$	$\Psi_\gamma = \Psi_q$

6.1.8 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.

Tabella 16 - fattori correttivi formula del carico limite

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.


6.1.9 Calcolo del carico limite in presenza di falda

Se il pelo libero della falda è compreso fra il piano campagna ed il piano di posa della fondazione, ad un'altezza a sopra il piano di posa, l'espressione generale del carico limite, valutato in termini di *tensioni effettive*, diviene:

$$q_{lim} = c' \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot g_c \cdot b_c \cdot \Psi_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot g_q \cdot b_q \cdot \Psi_q + \frac{B'}{2} \cdot \gamma'_f \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot g_\gamma \cdot b_\gamma \cdot \Psi_\gamma \cdot r_\gamma + \gamma_{H_2O} \cdot a$$

dove la tensione litostatica al piano di posa è valutata come:

$$q = \gamma \cdot (D - a) + \gamma' \cdot a$$

 TENPROJECT	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	15 di 24

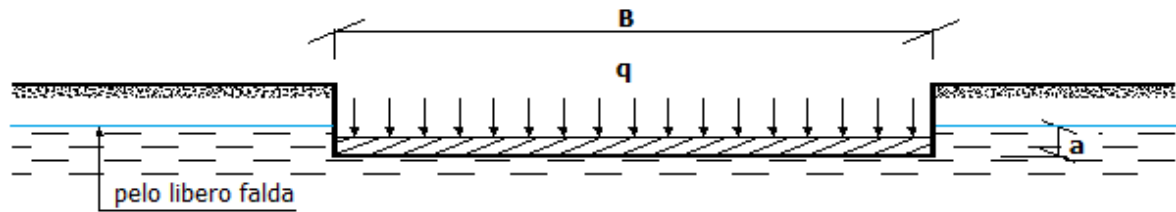


Figura 4 - schematizzazione impostazione di calcolo del carico limite al variare del livello di falda

Se il pelo libero della falda è al di sotto del piano di posa della fondazione di una profondità d , tale che:

$$D \leq d \leq D+B, \quad \text{o in altri termini} \quad d < B$$

l'espressione generale del carico limite, valutato in termini di *tensioni effettive*, diviene:

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

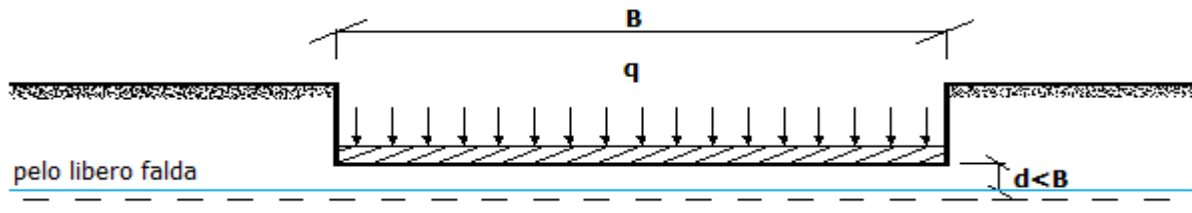


Figura 5 - schematizzazione impostazione di calcolo del carico limite al variare del livello di falda

Se il pelo libero della falda è al di sotto del piano campagna di una profondità d , tale che:

$$d \geq D+B, \quad \text{o in altri termini} \quad d \geq B$$

la presenza della falda viene trascurata.

6.1.10 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.

	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	16 di 24

6.1.11 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:

Tabella 17 - I valori di β in funzione della 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:

Tabella 18 - fattori correttivi formula del carico limite in funzione dell'effetto cinematico

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 $c_\gamma = 0$


6.1.12 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:

Tabella 19 - fattori correttivi formula del carico limite in funzione dell'effetto inerziale

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 $z_\gamma = z_q = 0$

 TENPROJECT	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	17 di 24

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.

6.2 Grafici sintetici plinti di fondazione

Di seguito i risultati maggiormente significativi per i pali di fondazione, riportati i risultati sotto forma di grafici sintetici:

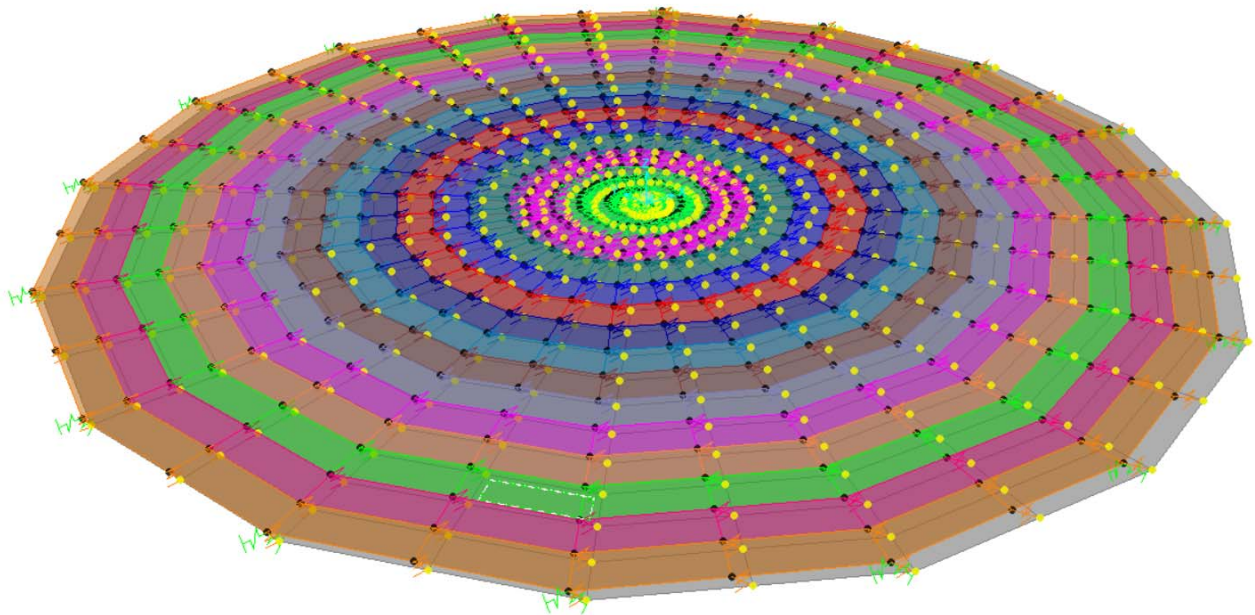



Figura 6 - deformazioni massime

 TENPROJECT	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	18 di 24

6.3 Grafici sintetici fondazioni superficiali

Di seguito i risultati maggiormente significativi per le fondazioni superficiali, riportati i risultati sotto forma di grafici sintetici:

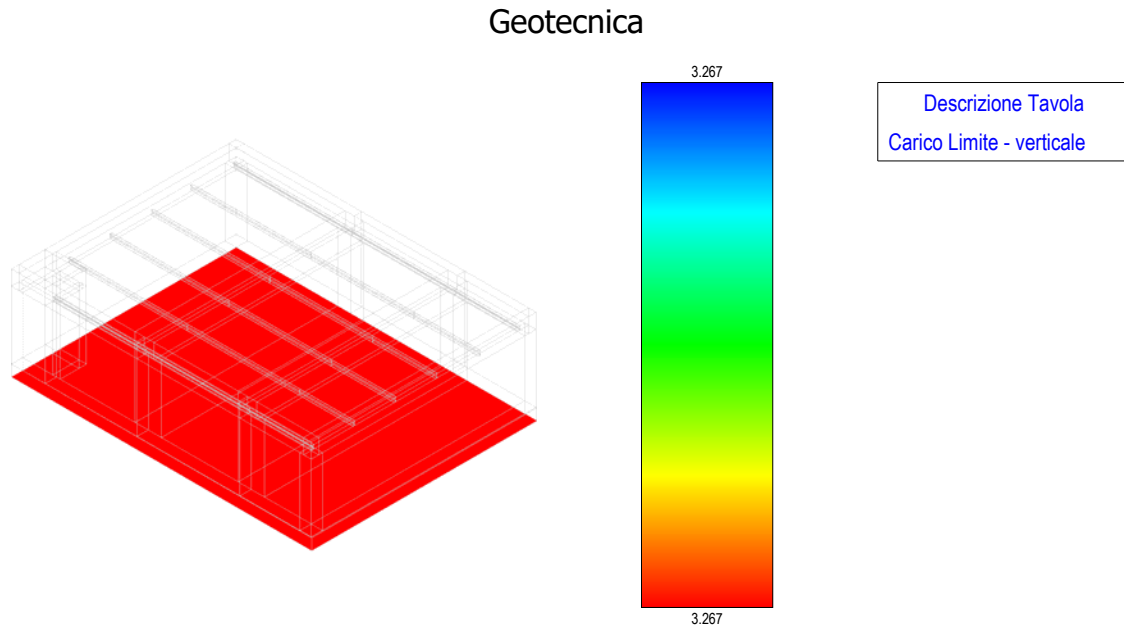


Figura 7 - carico limite – fondazione trasformatore

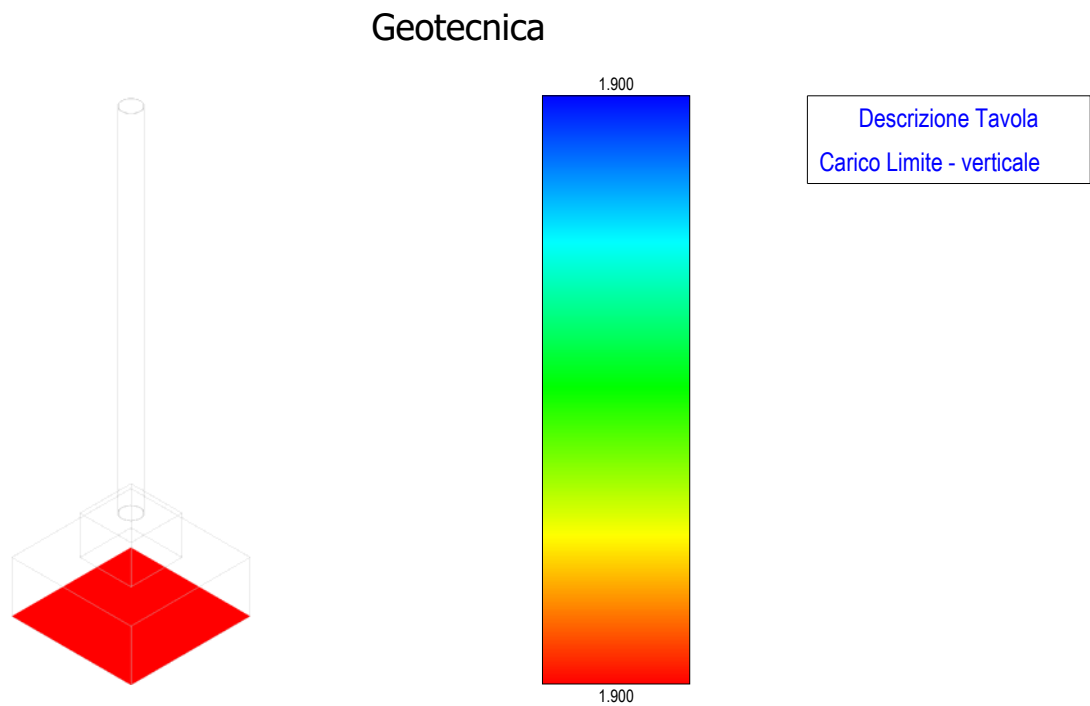



Figura 8 - carico limite – fondazione scaricatore

 TENPROJECT	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	19 di 24

Geotecnica

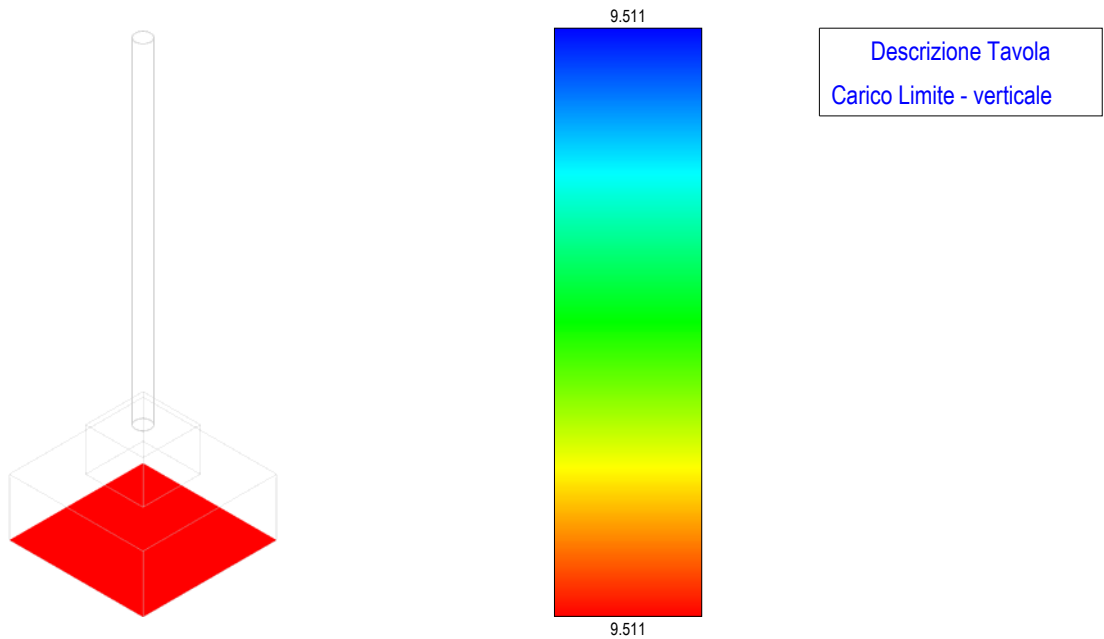


Figura 9 - carico limite – fondazione TV

Geotecnica

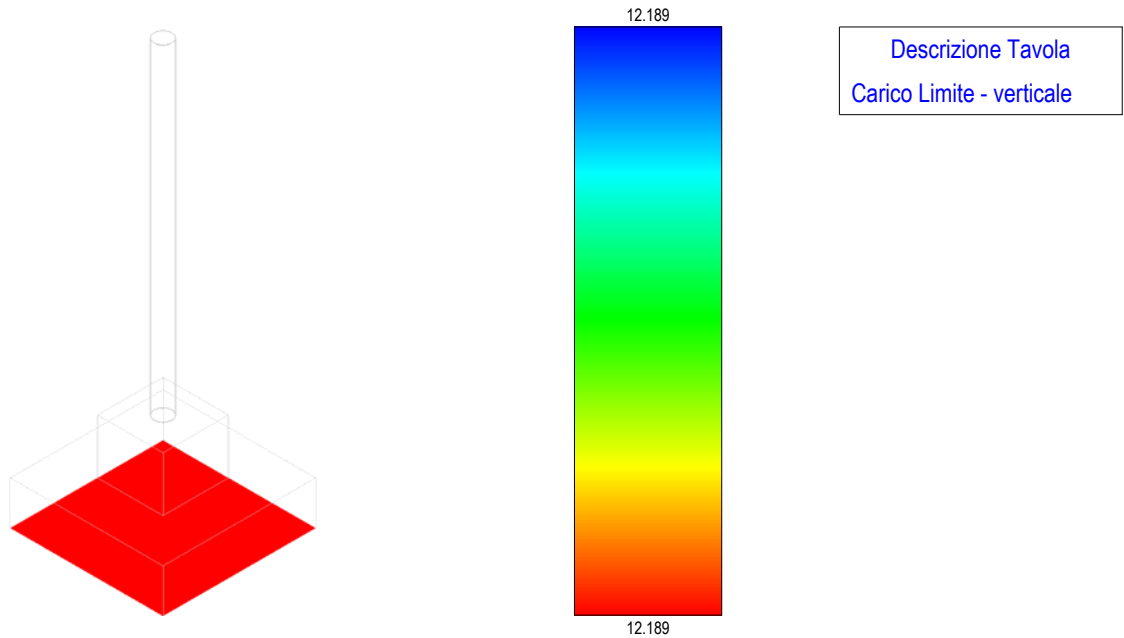



Figura 10 - carico limite – fondazione TA

 TENPROJECT	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	20 di 24

Geotecnica

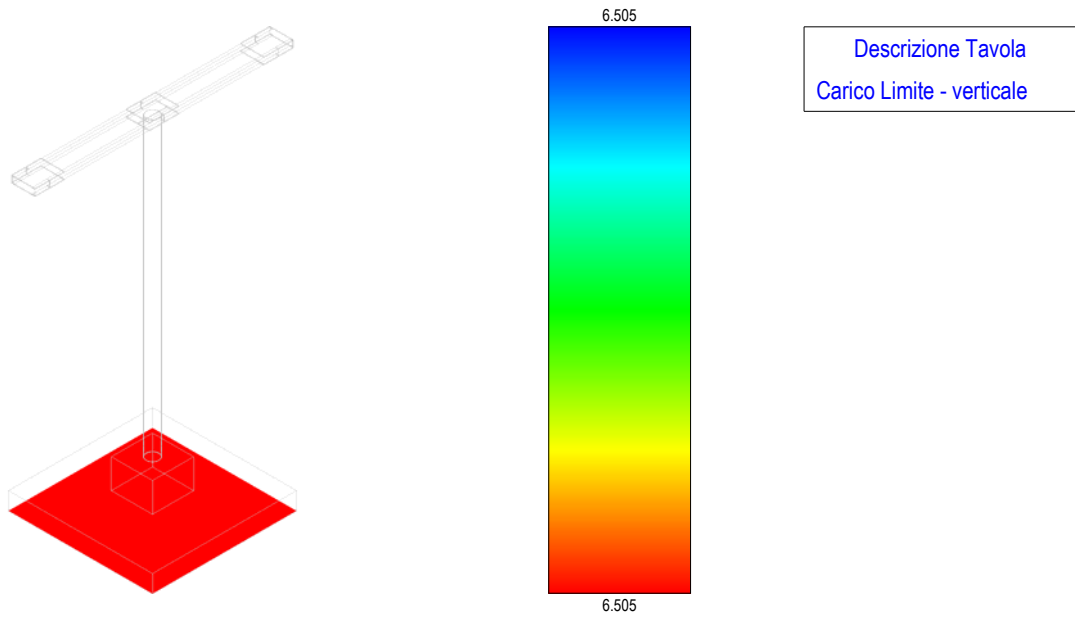


Figura 11 - carico limite – fondazione terminale cavo AT

Geotecnica

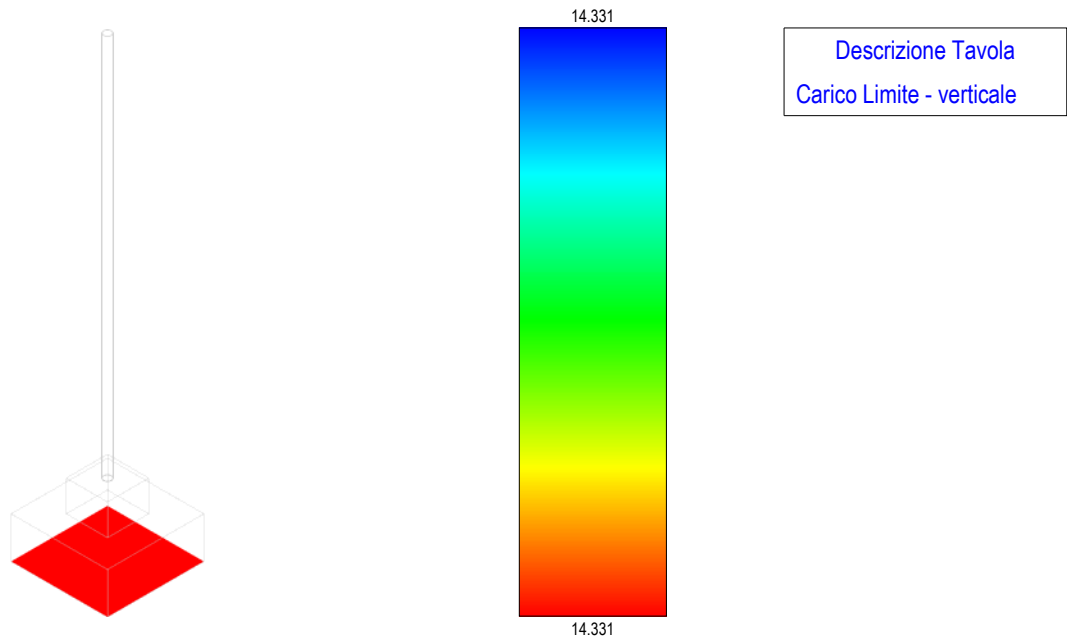



Figura 12 - carico limite – fondazione M.A.T. neutro

 TENPROJECT	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	21 di 24

Geotecnica

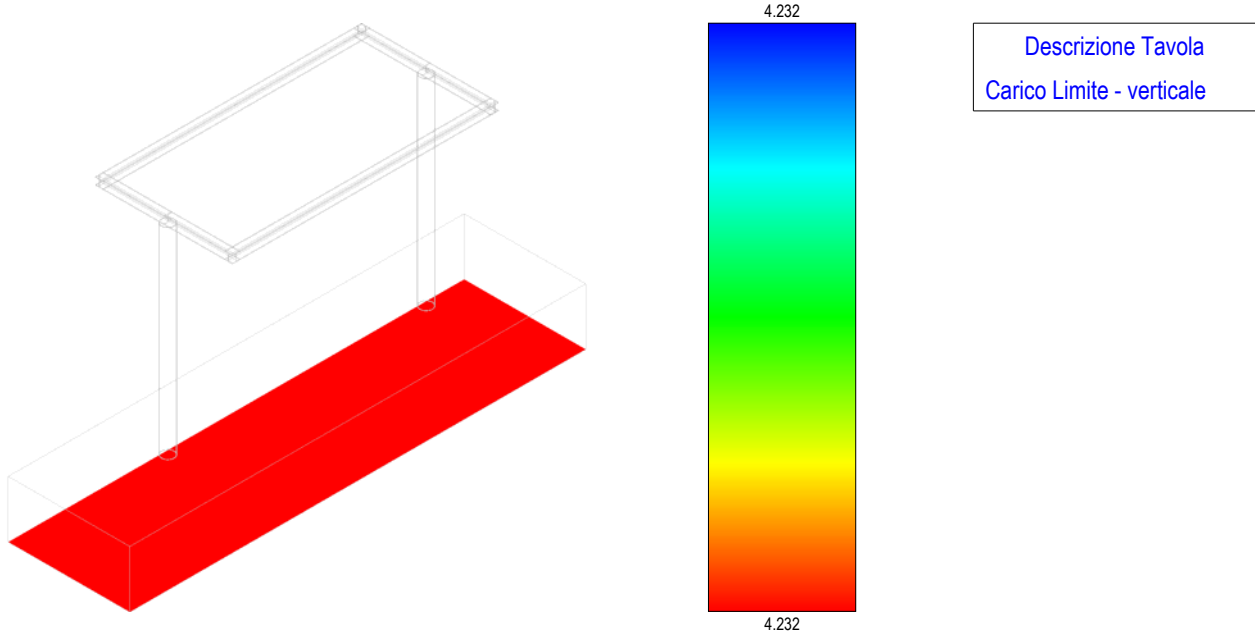


Figura 13 - carico limite – fondazione sezionatore

Geotecnica

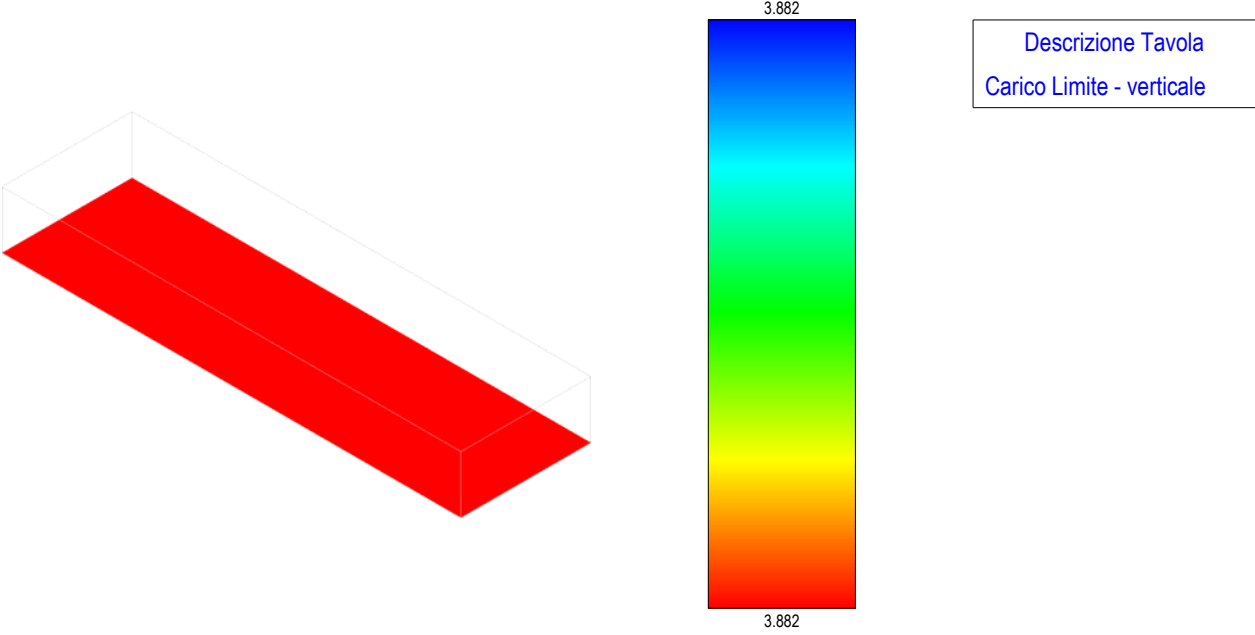



Figura 14 - carico limite – fondazione interruttore

 TENPROJECT	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	22 di 24

Geotecnica

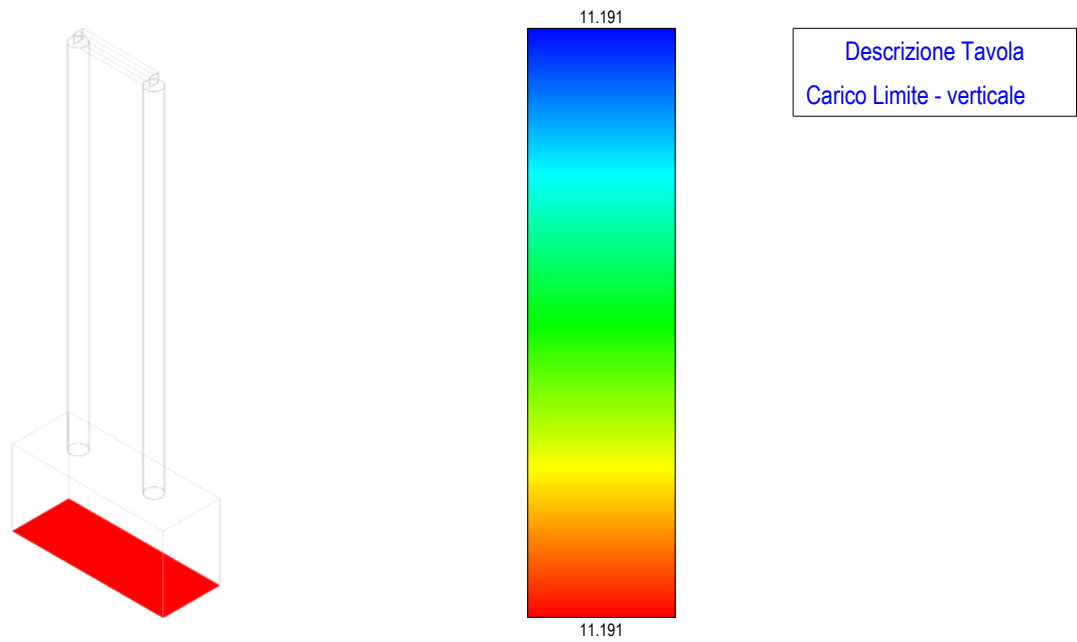


Figura 15 - carico limite – fondazione arrivo cavi MT

Geotecnica

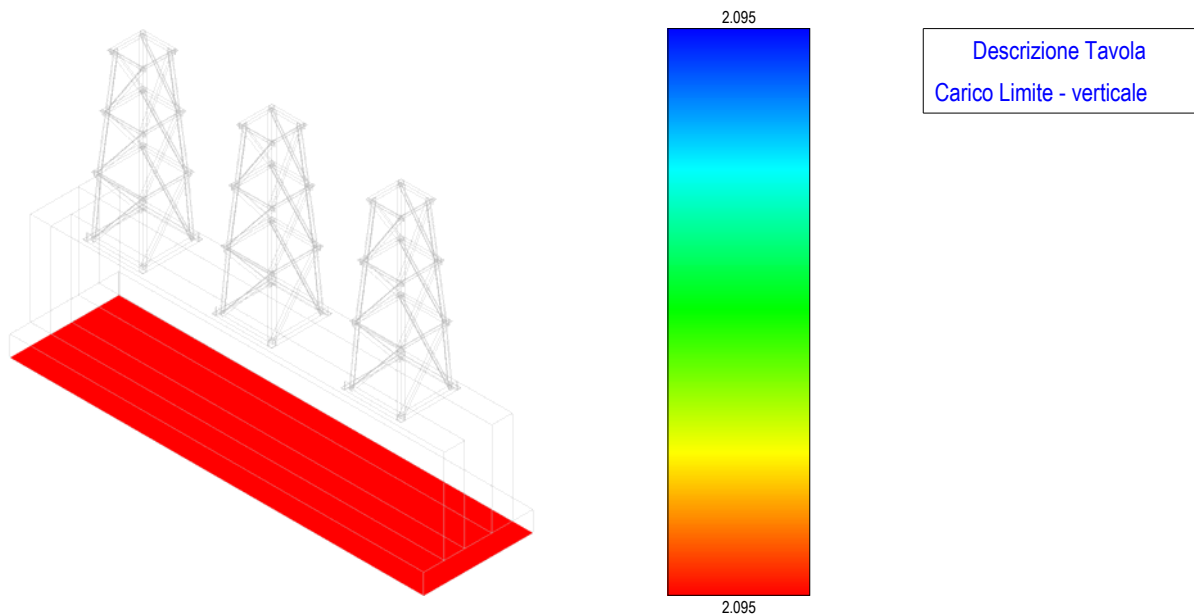



Figura 16 - carico limite – fondazione arrivo cavi AT

 TENPROJECT	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice	ES.SUN01.PD.9.4.R00
		Data creazione	26/07/2023
		Data ultima modif.	05/09/2023
		Revisione	01
		Pagina	23 di 24

Geotecnica

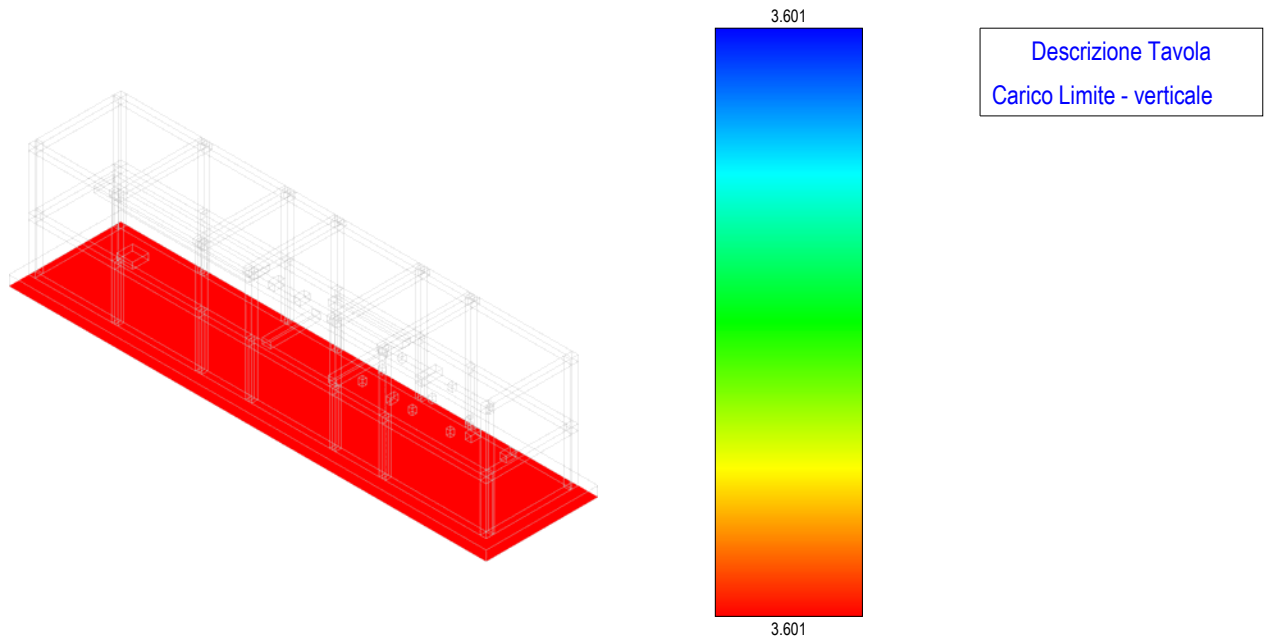



Figura 17 - carico limite – fondazione edificio

 TENPROJECT	RELAZIONE GEOTECNICA	Codice Data creazione Data ultima modif. Revisione Pagina	ES.SUN01.PD.9.4.R00 26/07/2023 05/09/2023 01 24 di 24
---	-----------------------------	---	---

7 CONCLUSIONI

Dalle calcolazioni effettuate è possibile affermare che le verifiche di sicurezza eseguite risultano tutte soddisfatte.