

AUTOSTRADA (A14) : BOLOGNA-BARI-TARANTO

TRATTO: BOLOGNA BORGO PANIGALE - BOLOGNA SAN LAZZARO

POTENZIAMENTO IN SEDE DEL SISTEMA
AUTOSTRADALE E TANGENZIALE DI BOLOGNA

"PASSANTE DI BOLOGNA"

PROGETTO DEFINITIVO

A2 - TANGENZIALE NORD E SUD

OPERE D'ARTE MAGGIORI

111T- VIADOTTO SCANDELLARA AMPL. TANG. 18+677

Relazione di Calcolo Fondazioni

IL PROGETTISTA SPECIALISTICO Ing. Marco Pietro D'Angelantonio Ord. Ingg. Milano n.A20155 RESPONSABILE GEOTECNICA ALL'APERTO	IL RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE Ing. Raffaele Rinaldesi Ord. Ingg. Macerata N. A1068	IL DIRETTORE TECNICO Ing. Andrea Tanzi Ord. Ingg. Parma N. 1154 PROGETTAZIONE NUOVE OPERE AUTOSTRADALI
---	---	---

CODICE IDENTIFICATIVO											ORDINATORE
RIFERIMENTO PROGETTO			RIFERIMENTO DIRETTORIO				RIFERIMENTO ELABORATO				
Codice Commessa	Lotto, Sub-Prog. Cod. Appalto	Fase	Capitolo	Paragrafo	W B S	Parte d'opera	Ttp.	Disciplina	Progressivo	Rev.	SCALA
111465	0000	PD	A2	O15	ST111	FND00	R	A P E	0856	-2	

 gruppo Atlantia	PROJECT MANAGER: Ing. Raffaele Rinaldesi Ord. Ingg. Macerata N. A1068	SUPPORTO SPECIALISTICO:	REVISIONE	
			n.	data
			0	DICEMBRE 2017
			1	SETTEMBRE 2019
			2	SETTEMBRE 2020
REDATTO:	-	VERIFICATO:	-	3 - 4 -

VISTO DEL COMMITTENTE  IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. Fabio Visintin	VISTO DEL CONCEDENTE  Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti <small>DIPARTIMENTO PER LE INFRASTRUTTURE, GLI AFFARI GENERALI ED IL PERSONALE STRUTTURA DI VIGILANZA SULLE CONCESSIONARIE AUTOSTRADALI</small>
---	--

Sommario

1	INTRODUZIONE	5
1.1	DESCRIZIONE DEI SISTEMI FONDAZIONALI.....	5
1.2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	6
1.3	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI.....	7
1.3.1	Strutture di nuova realizzazione	7
1.4	SOFTWARE DI CALCOLO	8
1.5	CONVENZIONI GENERALI	8
1.5.1	Unità di misura.....	8
1.5.2	Convenzioni di segno.....	8
2	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	9
3	CRITERI DI VERIFICA E CALCOLO	11
3.1	PREMESSA	11
3.2	FONDAZIONI SUPERFICIALI.....	11
3.2.1	Verifiche agli stati limite ultimi (SLU).....	11
3.2.2	Stima della capacità portante.....	12
3.2.3	Verifica a scorrimento.....	14
3.3	FONDAZIONI SU PALI.....	14
3.3.1	Verifiche agli stati limite ultimi (SLU).....	14
3.3.2	Resistenza di pali soggetti a carichi assiali	15
3.3.3	Comportamento di pali in gruppo soggetti a carichi trasversali.....	18
4	FONDAZIONE SPALLA - AMPLIAMENTO 2 (NUOVA REALIZZAZIONE) – CARREGGIATA NORD	23
4.1	AZIONI DI CALCOLO	23
4.2	MODELLO DI CALCOLO	28
4.3	ANALISI GEOTECNICA.....	33
4.3.1	Sollecitazioni di calcolo	33
4.3.2	Verifica geotecnica.....	35
4.4	ANALISI STRUTTURALE	37
4.4.1	Sollecitazioni di calcolo	37
4.4.2	Verifica strutturale.....	40
5	FONDAZIONE SPALLA - AMPLIAMENTO 2 (NUOVA REALIZZAZIONE) – CARREGGIATA SUD	44
5.1	AZIONI DI CALCOLO	44
5.2	MODELLO DI CALCOLO	48
5.3	ANALISI GEOTECNICA.....	53
5.3.1	Sollecitazioni di calcolo	53
6	FONDAZIONE PILA - AMPLIAMENTO 2 (NUOVA REALIZZAZIONE) – CARREGGIATA NORD	55
6.1	AZIONI DI CALCOLO	55
6.2	MODELLO DI CALCOLO	59
6.3	ANALISI GEOTECNICA.....	65
6.3.1	Sollecitazioni di calcolo	65
6.3.2	Verifica geotecnica.....	69
6.4	ANALISI STRUTTURALE	72
6.4.1	Sollecitazioni di calcolo	72
6.4.2	Verifica strutturale.....	73
7	FONDAZIONE PILA - AMPLIAMENTO 2 (NUOVA REALIZZAZIONE) – CARREGGIATA SUD	75
7.1	AZIONI DI CALCOLO	75

7.2	MODELLO DI CALCOLO	80
7.3	ANALISI GEOTECNICA	86
7.3.1	<i>Sollecitazioni di calcolo</i>	86
7.3.2	<i>Verifica geotecnica</i>	90
7.4	ANALISI STRUTTURALE	93
7.4.1	<i>Sollecitazioni di calcolo</i>	93
7.4.2	<i>Verifica strutturale</i>	94

Indice delle Tabelle e delle Figure

FIGURA 1-1. CONVENZIONI DI SEGNO - GROUP	8
TABELLA 2-1. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	10
FIGURA 3-1. COEFFICIENTI PARZIALI PER LE AZIONI O L'EFFETTO DELLE AZIONI (TAB.6.2.I DELLE NTC2008)	12
FIGURA 3-2. COEFFICIENTI PARZIALI PER I PARAMETRI GEOTECNICI DEL TERRENO (TAB.6.2.II DELLE NTC2008)	12
FIGURA 3-3. COEFFICIENTI PARZIALI γ_R PER LE VERIFICHE AGLI STATI LIMITE ULTIMI STR E GEO DI MURI DI SOSTEGNO (TAB.6.5.I DELLE NTC2008)	12
FIGURA 3-4. FONDAZIONE EFFICACE EQUIVALENTE NEL CASO DI FONDAZIONE RETTANGOLARE	14
FIGURA 3-5. COEFFICIENTI PARZIALI γ_R DA APPLICARE ALLE RESISTENZE CARATTERISTICHE (TAB.6.4.II DELLE NTC2008)	15
FIGURA 3-6. FATTORI DI CORRELAZIONE E PER LA DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA CARATTERISTICA IN FUNZIONE DEL NUMERO DI VERTICALI INDAGATE (TAB.6.4.IV DELLE NTC2008)	16
FIGURA 3-7. TERRENI GRANULARI – $T_{LIM} = F(N_{SPT})$ (WRIGHT-REESE – 1977)	17
TABELLA 4-1. SOLLECITAZIONI DI CALCOLO RISULTANTI NEL BARICENTRO DELLA PALIFICATA – SISTEMA DI RIFERIMENTO ANALISI DELLA SPALLA.....	26
TABELLA 4-2. SOLLECITAZIONI DI CALCOLO RISULTANTI NEL BARICENTRO DELLA PALIFICATA – SISTEMA DI RIFERIMENTO GROUP	28
FIGURA 4-1. MODELLO DI CALCOLO PALIFICATA: VISTA TRIDIMENSIONALE	28
FIGURA 4-2. MODELLO DI CALCOLO PALIFICATA: PIANO Y-Z	29
FIGURA 4-3. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E MECCANICHE SEZIONE TRASVERSALE PALI	29
FIGURA 4-4. PARAMETRI DEI PALI IN GROUP	30
FIGURA 4-5. DISPOSIZIONE DEI MICROPALI IN GROUP	30
FIGURA 4-6. CARATTERISTICHE MECCANICHE TERRENO	32
FIGURA 4-6. INVILUPPO AZIONI ASSIALE MASSIME COMB. SLU	33
FIGURA 4-6. INVILUPPO AZIONI ASSIALE MASSIME COMB. SLV	34
FIGURA 4-6. INVILUPPO AZIONI ASSIALE MINIME COMB. SLV	34
FIGURA 4-6. STRATIGRAFIA DEL TERRENO MODELLATA CON GROUP	35
FIGURA 4-6. MASSIMO MOMENTO (sx) E TAGLIO (dx) COMBINAZIONE SLU-SLV	37
FIGURA 4-6. ANDAMENTO DEL MOMENTO E DEL TAGLIO LUNGO IL PALO IN COMBINAZIONE SLU-SLV	38
FIGURA 4-6. MASSIMO MOMENTO SLE RARA (sx) E FREQ (CENTRO) E QUASI PERM. (dx)	39
TABELLA 4-1. SOLLECITAZIONI DI CALCOLO RISULTANTI NEL BARICENTRO DELLA PALIFICATA – SISTEMA DI RIFERIMENTO ANALISI DELLA SPALLA.....	46
FIGURA 4-1. MODELLO DI CALCOLO PALIFICATA: VISTA	48
FIGURA 4-2. MODELLO DI CALCOLO PALIFICATA: PIANO Y-Z	49
FIGURA 4-3. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E MECCANICHE SEZIONE TRASVERSALE PALI	49
FIGURA 4-4. PARAMETRI DEI PALI IN GROUP	50
FIGURA 4-5. DISPOSIZIONE DEI MICROPALI IN GROUP	51
FIGURA 4-6. CARATTERISTICHE MECCANICHE TERRENO	52
FIGURA 4-6. INVILUPPO AZIONI ASSIALE MASSIME COMB. SLU	53
FIGURA 4-6. INVILUPPO AZIONI ASSIALE MASSIME COMB. SLV	54
FIGURA 4-6. INVILUPPO AZIONI ASSIALE MINIME COMB. SLV	54
TABELLA 4-1. SOLLECITAZIONI DI CALCOLO RISULTANTI NEL BARICENTRO DELLA PALIFICATA – SISTEMA DI RIFERIMENTO ANALISI DELLA PILA.....	57
TABELLA 4-2. SOLLECITAZIONI DI CALCOLO RISULTANTI NEL BARICENTRO DELLA PALIFICATA – SISTEMA DI RIFERIMENTO GROUP	59
FIGURA 4-2. MODELLO DI CALCOLO PALIFICATA: PIANO Y-Z	60
FIGURA 4-4. PARAMETRI DEI PALI IN GROUP	62
FIGURA 4-6. CARATTERISTICHE MECCANICHE TERRENO	65
FIGURA 4-6. AZIONI ASSIALE MASSIME COMB. SLU	66
FIGURA 4-6. AZIONI ASSIALE MINIME COMB. SLU.....	66
FIGURA 4-6. AZIONI ASSIALE MASSIME COMB. URTO	67
FIGURA 4-6. AZIONI ASSIALE MINIME COMB. URTO	67
FIGURA 4-6. AZIONI ASSIALE MINIME COMB. SLV	68
FIGURA 4-6. AZIONI ASSIALE MINIME COMB. SLV	68
FIGURA 4-6. STRATIGRAFIA DEL TERRENO MODELLATA CON GROUP	69
FIGURA 4-6. MASSIMO MOMENTO (sx) E TAGLIO LUNGO IL MICROPALO PER COMB. SLU-SLV URTO	72
FIGURA 4-6. ANDAMENTO MOMENTO E TAGLIO MASSIMO LUNGO IL MICROPALO PER COMB. SLU-SLV URTO	73
TABELLA 4-1. SOLLECITAZIONI DI CALCOLO RISULTANTI NEL BARICENTRO DELLA PALIFICATA – SISTEMA DI RIFERIMENTO ANALISI DELLA PILA.....	77

TABELLA 4-2. SOLLECITAZIONI DI CALCOLO RISULTANTI NEL BARICENTRO DELLA PALIFICATA – SISTEMA DI RIFERIMENTO GROUP	79
FIGURA 4-2. MODELLO DI CALCOLO PALIFICATA: PIANO Y-Z	81
FIGURA 4-4. PARAMETRI DEI PALI IN GROUP	83
FIGURA 4-6. CARATTERISTICHE MECCANICHE TERRENO	86
FIGURA 4-6. AZIONI ASSIALE MASSIME COMB. SLU	87
FIGURA 4-6. AZIONI ASSIALE MINIME COMB. SLU	87
FIGURA 4-6. AZIONI ASSIALE MASSIME COMB. URTO	87
FIGURA 4-6. AZIONI ASSIALE MINIME COMB. URTO	88
FIGURA 4-6. AZIONI ASSIALE MINIME COMB. SLV	88
FIGURA 4-6. AZIONI ASSIALE MINIME COMB. SLV	89
FIGURA 4-6. STRATIGRAFIA DEL TERRENO MODELLATA CON GROUP	90
FIGURA 4-6. MASSIMO MOMENTO (SX) E TAGLIO LUNGO IL MICROPALO PER COMB. SLU-SLV URTO	93
FIGURA 4-6. ANDAMENTO MOMENTO E TAGLIO MASSIMO LUNGO IL MICROPALO PER COMB. SLU-SLV URTO	94

1 INTRODUZIONE

La presente relazione ha come obiettivo l'esposizione delle analisi svolte e dei principali risultati ottenuti relativamente ai calcoli statici del sottovia autostradale esistente di via Scandellara nell'ambito dei lavori di ampliamento della tangenziale di Bologna, nel tratto Borgo Panigale – Caselle. L'opera è denominata 111T e ubicata indicativamente alla progressiva 18+679.

In particolare, si riportano le verifiche strutturali e geotecniche delle opere fondazionali delle spalle e delle pile relative a:

- Ampliamento 2: ampliamento di nuova realizzazione;
- Ampliamento 1: ampliamento esistente;
- Originaria: struttura esistente (di prima realizzazione).

La relazione di calcolo delle sovrastrutture e delle sottostrutture è il riferimento principale per:

- le caratteristiche generali dell'opera;
- le condizioni ambientali e le classi di esposizione dei materiali;
- le caratteristiche dei materiali, con particolare attenzione ai materiali delle strutture esistenti;
- la caratterizzazione sismica;
- i criteri generali e le metodologie di verifica;
- le combinazioni di calcolo e i coefficienti di combinazione;
- il calcolo delle sollecitazioni risultanti utilizzate per il progetto e la verifica dei sistemi fondazionali.

1.1 DESCRIZIONE DEI SISTEMI FONDAZIONALI

Le fondazioni delle spalle e delle pile sono così realizzate.

<u>SPALLE:</u>	<u>AMPLIAMENTO 2</u>	
	Fondazione indiretta	
	Lunghezza pali:	34m
	Diametro del palo:	Ø1000mm
	<u>AMPLIAMENTO 1</u>	
	Fondazione diretta	
	<u>ORIGINARIA</u>	
	Fondazione diretta	
<u>PILE:</u>	<u>AMPLIAMENTO 2</u>	
	Fondazione indiretta	
	Lunghezza micropali:	24m
	Diametro del perforo:	Ø240mm
	Armatura:	Ø168.30mm – sp.10mm
	<u>AMPLIAMENTO 1</u>	
	Fondazione indiretta	
	Lunghezza micropali:	10m
	Diametro del perforo:	Ø240mm
	Armatura:	Ø168.30mm – sp.10mm
	<u>ORIGINARIA</u>	
	Fondazione diretta	

1.2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Le analisi e le verifiche sono eseguite secondo il metodo semi-probabilistico agli Stati Limite, in accordo alle disposizioni previste dalle vigenti Normative italiana ed europea (Eurocodici).

In particolare, si fa riferimento alle seguenti norme:

- [1] D.M. 17/01/2018: “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni” – GU n°8 del 17/2/2018.
- [2] Circolare 21 gennaio 2019 n.7: “Istruzioni per l’applicazione dell’ Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni” di cui al Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018.
- [3] D.M. 14 gennaio 2008: Nuove norme tecniche per le costruzioni.
- [4] Circolare 2 febbraio 2009, n.617 – Istruzioni per l’applicazione delle “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni” di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008.
- [5] UNI EN 1990: Basi della progettazione strutturale.
- [6] UNI EN 1991-1-4: Azioni sulle strutture – Azione del vento.
- [7] UNI EN 1991-1-5: Azioni sulle strutture – Azioni termiche.
- [8] UNI EN 1991-1-6: Azioni sulle strutture – Azioni in generale – Azioni durante la costruzione.
- [9] UNI EN 1991-2: Azioni sulle strutture – Carichi da traffico sui ponti.
- [10] UNI EN 1992: Progettazione delle strutture di calcestruzzo.
- [11] UNI EN 1992-1-1: Progettazione delle strutture di calcestruzzo – Regole generali e regole per gli edifici.
- [12] UNI EN 1992-2: Progettazione delle strutture di calcestruzzo – Ponti di calcestruzzo.
- [13] UNI EN 1993: Progettazione delle strutture in acciaio.
- [14] UNI EN 1993-1-1: Progettazione delle strutture di acciaio – Regole generali e regole per gli edifici.
- [15] UNI EN 1993-2: Progettazione delle strutture di acciaio – Ponti di acciaio.
- [16] UNI EN 1993-1-5: Progettazione delle strutture di acciaio – Elementi strutturali a lastra.
- [17] UNI EN 1993-1-8: Progettazione delle strutture di acciaio – Progettazione dei collegamenti.
- [18] UNI EN 1993-1-9: Progettazione delle strutture di acciaio – Fatica.
- [19] UNI EN 1993-1-10: Progettazione delle strutture di acciaio – Resilienza del materiale e proprietà attraverso lo spessore.
- [20] UNI EN 1993-1-11: Progettazione delle strutture di acciaio – Progettazione di strutture con elementi tesi.
- [21] UNI EN 1994: Progettazione delle strutture composte acciaio-calcestruzzo.
- [22] UNI EN 1994-2: Progettazione delle strutture composte acciaio-calcestruzzo – Ponti.
- [23] UNI EN 1997: Progettazione geotecnica.
- [24] UNI EN 1998: Progettazione delle strutture per la resistenza sismica.
- [25] UNI EN 1998-2: Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Ponti.
- [26] UNI EN 1998-5:2005 Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.
- [27] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti -
- [28] Autostrade per l’Italia – Direzione sviluppo rete per l’Italia – Ingegneria, Ambiente e Sicurezza – Linee Guida per la redazione e verifica dei progetti di installazione delle barriere integrate (LG 03/2020).

1.3 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

1.3.1 Strutture di nuova realizzazione

Calcestruzzo per pali, micropali: C25/30

Tensione caratteristica cubica	$R_{ck} = 30\text{MPa}$
Tensione caratteristica cilindrica	$f_{ck} = 0.83 \times R_{ck} = 24.90\text{MPa}$
Tensione di compressione media	$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 32.90\text{MPa}$
Tensione massima di compressione per combinazione rara	$0.6 \times f_{ck} = 14.94\text{MPa}$
Tensione massima di compressione per combinazione frequente	$0.45 \times f_{ck} = 11.20\text{MPa}$
Resistenza di calcolo	$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c = 14.11\text{MPa}$
Tensione media a trazione	$f_{ctm} = 0.3 \times f_{ck}^{(2/3)} = 2.56\text{MPa}$
Tensione caratteristica a trazione	$f_{ctk} = 0.7 \times f_{ctm} = 1.79\text{MPa}$
Resistenza di calcolo a trazione	$f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_c = 1.19\text{MPa}$
Modulo elastico	$E_{cm} = 22000 \times (f_{cm}/10)^{0.3} = 31447\text{MPa}$

Micropali / ancoraggi passivi: carpenteria metallica

Acciaio in profili a sezione aperta laminati a caldo saldati:

Tipo EN 10025-2 S355 J2+N (per spessori nominali $t > 40$ mm)

Tipo EN 10025-2 S355 K2+N (per spessori nominali $t > 40$ mm)

Acciaio in profili a sezione aperta laminati a caldo non saldati:

Tipo EN 10025-2 S355 J0+N

Acciaio in profili a sezione cava:

Tipo EN 10210-1 S355 J0H+N

Acciaio per armatura lenta: barre nervate tipo B450C, controllate in stabilimento

$$f_{yk} \geq 450.0 \text{ MPa}$$

$$f_{tk} \geq 540.0 \text{ MPa}$$

$$E_s = 210000\text{MPa}$$

$$u_s = 0.3$$

1.4 SOFTWARE DI CALCOLO

Il software di calcolo utilizzato per la determinazione delle sollecitazioni agenti sui pali / micropali è **Group for Windows – Version 2016**, Ensoft Inc (1985 – 2003).

Per le verifiche delle sezioni in c.a. si impiega il software di calcolo **VcaSlu**, sviluppato dal Prof. Piero Gelfi. Il programma consente la verifica di sezioni in cemento armato normale e precompresso, soggette a pressoflessione o tenso-flessione retta o deviata, sia allo Stato Limite Ultimo che con il Metodo n e permette inoltre di tracciare il dominio M-N.

Per l'elaborazione dei dati di input/output in generale e la creazione di tabelle riepilogative, si adottano procedure opportunamente implementate in fogli elettronici **Microsoft® Office Excel 2016**. La descrizione delle modalità operative dei singoli fogli di calcolo verranno presentate di volta in volta.

1.5 CONVENZIONI GENERALI

1.5.1 Unità di misura

Salvo ove diversamente specificato, le unità di misura sono quelle relative al Sistema Internazionale, ovvero:

Lunghezze: [m]
 Forze: [kN]
 Tensioni: [MPa]

1.5.2 Convenzioni di segno

Per quanto riguarda le convenzioni di segno, si fa riferimento alla seguente figura.

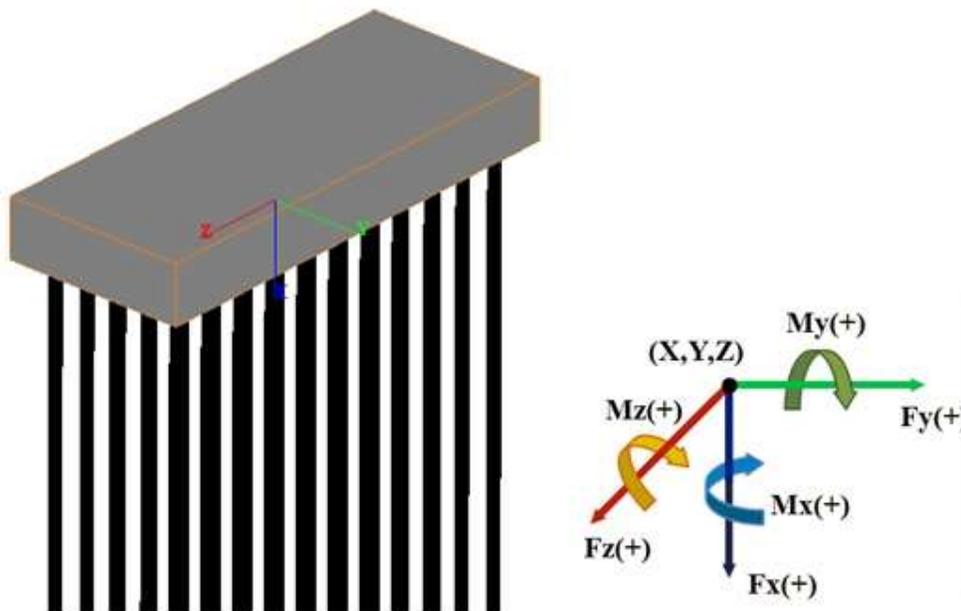


Figura 1-1. Convenzioni di segno - GROUP

2 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Per quanto riguarda la caratterizzazione geotecnica completa del sito ove sorge l'opera in adeguamento, si rimanda alla specifica Relazione Geologica.

Si riporta nel seguito un breve richiamo alle indagini disponibili ed alla stratigrafia di riferimento.

Per la caratterizzazione dei terreni interessati dalle opere si fa riferimento alle schede specifiche relative all'opera in oggetto. Riassumendo le ipotesi adottate sono:

Tabella II: Indagini geognostiche di riferimento

sigla sond./pozz./prova	campagna di indagine	1.1.1.1.1 regressiva (km)	quota p.c. (m s.l.m.)	lunghezza (m)	strumentazione installata
S51	1984	18+670	50.00	16.00	-
CPT122	1984	18+735	50.60	10.00	-
CPT123	1984	18+690	50.60	15.00	-
S105	2000	18+650	57.00	10.00	-
PB24	2016	18+640	50.00	35.00	DH

C (...) = cella piezometrica Casagrande (profondità cella);
 TA (...) = piezometro a tubo aperto (tratto filtrante).
 CH = tubo per misure Cross-hole, DH=tubo per misure Down-hole

Tabella III: Caratterizzazione stratigrafico – geotecnica

Quota p.c. (m s.l.m.)	Profondità (m da p.c.)	descrizione	sigla	Z _w (m da p.c.)	Parametri medi caratteristici
50.00	0.0 ÷ 6.00	Limo argilloso	A	?	Tabella IV
	6.00 ÷ 12.00	Ghiaia e sabbia	B	?	Tabella VI
	12.00 ÷ 26.00	Limo argilloso	A'	?	Tabella V
	26.00 ÷ 40.00	Ghiaia e sabbia	B	?	Tabella VI

Tabella IV: Parametri medi caratteristici dei materiali Limo argilloso (A)

Descrizione	γ (KN/m ³)	c' (KPa)	ϕ (°)	E' (MPa)	σ'_{pre} (MPa)	CR (-)	RR (-)	C _v m/sec ²	C _u (KPa)	E _u (MPa)
Limo argilloso	19	0	26	5	0.4	0.18 ÷ 0.16	0.03÷0.04	3E-07	50 +3.3 z	20

Tabella V: Parametri medi caratteristici dei materiali Limo argilloso (A')

Descrizione	γ (KN/m ³)	c' (KPa)	ϕ (°)	E' (MPa)	σ'_{pre} (MPa)	CR (-)	RR (-)	C_v m/sec ²	C_u (KPa)	E_u (MPa)
Limo argilloso	19	0	26	5	0.4	0.18 ÷ 0.16	0.03÷0.04	3E-07	60+(z- 3)	20

Tabella VI: Parametri medi caratteristici dei materiali Ghiaia e Sabbia (B)

Descrizione	γ (KN/m ³)	c' (KPa)	ϕ (°)	E' (MPa)	σ'_{pre} (MPa)	CR (-)	RR (-)	C_v m/sec ²	C_u (KPa)	E_u (MPa)
Limo argilloso	20	0	38	50	---	---	---	---	---	---
γ_t	= peso di volume del terreno			CR	= angolo di resistenza al taglio					
c'	= coesione efficace			RR	= modulo di elasticità					
ϕ'	= angolo di resistenza al taglio			C_v	= coeff. di consolidazione verticale					
E'	= modulo di elasticità			C_u	= coesione non drenata					
σ'_{pre}	= tensione di preconsolid			E_u	= mod di elasticità in condiz non drenate					

Tabella 2-1. Caratterizzazione geotecnica

3 CRITERI DI VERIFICA E CALCOLO

3.1 PREMESSA

Le verifiche contenute nel presente documento fanno riferimento a quanto prescritto per i sistemi fondazionali nelle NTC2008 e successiva circolare esplicativa.

Le verifiche, sia per le condizioni di esercizio che per quelle in presenza di un evento sismico, sono eseguite nei confronti degli Stati Limite Ultimi (SLU) riferiti allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e al raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali che compongono la fondazione.

Per ogni stato limite ultimo deve essere rispettata la condizione:

$$E_d \leq R_d \quad (\text{eq. 6.2.1 delle NTC2008})$$

dove

E_d valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione;

R_d valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico.

3.2 FONDAZIONI SUPERFICIALI

3.2.1 Verifiche agli stati limite ultimi (SLU)

Nel caso di fondazione superficiale, l'opera è assimilabile ad un muro di sostegno.

Secondo quanto specificato al punto 6.5.3.1 delle NTC2008, nelle verifiche di sicurezza devono essere presi in considerazione tutti i meccanismi di stato limite ultimo, sia a breve sia a lungo termine.

Gli stati limite ultimi delle opere di sostegno si riferiscono allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e al raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali che compongono la fondazione stessa.

Le verifiche devono essere effettuate almeno nei confronti dei seguenti stati limite:

- SLU di tipo geotecnico (GEO) o di equilibrio di corpo rigido (EQU)
 - scorrimento sul piano di posa;
 - collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno;
 - ribaltamento;
- SLU di tipo strutturale (STR)
 - raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali;

accertando che la condizione $E_d \leq R_d$ sia soddisfatta per ogni stato limite considerato.

Le verifiche devono essere effettuate, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.5.I delle NTC2008, seguendo almeno uno dei due approcci previsti al punto 6.5.3.1.1 delle NTC2008.

In generale, il calcolo è condotto mediante:

- Approccio 2 (A1+M1+R3)

Nel caso di muri di sostegno dotati di ancoraggi nel terreno, le verifiche devono essere effettuate con riferimento al solo:

- Approccio 1

Combinazione 1	(A1+M1+R1)
Combinazione 2	(A2+M2+R2)

Nelle verifiche effettuate con l'approccio 2 che siano finalizzate al dimensionamento strutturale, il coefficiente γ_R non deve essere portato in conto.

Lo stato limite di ribaltamento non prevede la mobilitazione della resistenza del terreno di fondazione e deve essere trattato come uno stato limite di equilibrio come corpo rigido (EQU), utilizzando i coefficienti parziali sulle azioni della Tab.2.6.I delle NTC2008 e adoperando coefficienti parziali del gruppo M2 per il calcolo delle spinte.

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

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali ⁽¹⁾	Favorevole	γ_{G2}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

(1) Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. i carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti, si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

Figura 3-1. Coefficienti parziali per le azioni o l'effetto delle azioni (Tab.6.2.I delle NTC2008)

Tabella 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_k$	γ_ϕ	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	γ_c	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ	γ_γ	1,0	1,0

Figura 3-2. Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno (Tab.6.2.II delle NTC2008)

Tabella 6.5.I – Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi STR e GEO di muri di sostegno.

VERIFICA	COEFFICIENTE PARZIALE (R1)	COEFFICIENTE PARZIALE (R2)	COEFFICIENTE PARZIALE (R3)
Capacità portante della fondazione	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,4$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,1$
Resistenza del terreno a valle	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,4$

Figura 3-3. Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi STR e GEO di muri di sostegno (Tab.6.5.I delle NTC2008)

3.2.2 Stima della capacità portante

In condizioni "drenate" (sforzi efficaci), la valutazione della capacità portante delle fondazioni superficiali viene condotta in accordo all'equazione:

$$q_{lim} = 0.5 \cdot \gamma_c \cdot B \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot g_\gamma + c' \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot b_c \cdot g_c + q' \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot b_q \cdot g_q$$

Le espressioni che forniscono i valori dei fattori di capacità portante (N) e dei fattori correttivi (s, i, b, g) sono riportate di seguito:

- Fattori di capacità portante:

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot g(\phi')$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan g(\phi')$$

$$N_q = \tan g^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) \cdot e^{m g(\phi')}$$

- Fattori correttivi di forma:

$$s_c = 1 + \frac{N_c}{N_c} \cdot \frac{B'}{L'}$$

$$s_r = 1 - 0.4 \cdot \frac{B'}{L'}$$

$$s_q = 1 + \frac{B'}{L'} \cdot \text{tg}(\varphi')$$

- Fattori correttivi di profondità:

$$d_c = d_q \cdot \frac{(1-d_q)}{N_c \text{tg}(\varphi')}$$

$$d_q = 1 + [2 (D/B') \text{tg}(\varphi') (1 - \sin(\varphi'))^2] \text{ per } D/B' < 1$$

$$d_q = 1 + [2 \text{tg}(\varphi') (1 - \sin(\varphi'))^2 \text{tg}(D/B')^{-1}] \text{ per } D/B' > 1$$

- Fattori correttivi di inclinazione del carico:

$$i_c = i_q \cdot \left(\frac{(1-i_q)}{(N_c \text{tg}(\varphi'))} \right)$$

$$i_r = \left[1 - \frac{H}{(N + B'L'c' \cot g(\varphi'))} \right]^{(m+1)}$$

$$i_q = \left[1 - \frac{H}{(N + B'L'c' \cot g(\varphi'))} \right]^m$$

$$\text{dove: } m = \frac{[2 + (B'/L')]}{[1 + (B'/L')]}$$

- Fattori correttivi di inclinazione fondazione:

$$b_q = (1 - \alpha \text{tg}(\varphi'))^2$$

$$b_r = (1 - \alpha \text{tg}(\varphi'))^2$$

$$b_c = b_q - [(1-b_q)/(N_c \text{tg}(\varphi'))]$$

- Fattori correttivi di inclinazione piano campagna:

$$g_q = (1 - \text{tg}(\omega))^2$$

$$g_r = (1 - \text{tg}(\omega))^2$$

$$g_c = g_q - [(1-g_q)/(N_c \text{tg}(\varphi'))]$$

Le formule utilizzate si riferiscono alla fondazione efficace equivalente ovvero quella fondazione rispetto alla quale il carico verticale N risulta centrato. La fondazione equivalente è caratterizzata dalle dimensioni B' e L', valutate mediante i criteri riportati in Figura 3-4.

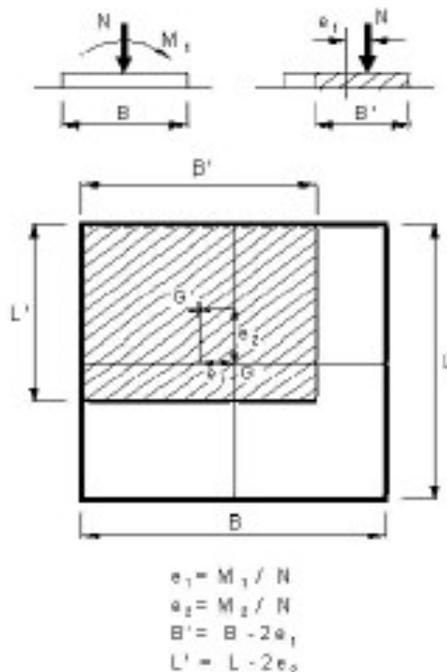


Figura 3-4. Fondazione efficace equivalente nel caso di fondazione rettangolare

Nelle analisi di capacità portante in termini di tensioni totali (condizioni “non drenate”), la resistenza del terreno è definita convenzionalmente mediante il parametro c_u . In questo caso, i fattori di capacità portante valgono:

- $N_y = 0.00$
- $N_c = 5.14$
- $N_q = 1.00$

e il carico limite è dato da:

$$q_{lim} = 5.14 \times c_u \times s_{c0} \times d_{c0} \times i_{c0} \times b_{c0} \times g_{c0} + q \times g_{q0}$$

essendo $q = \gamma \times D$ la pressione totale agente sul piano di posa della fondazione, e avendo indicato con il pedice 0 i fattori correttivi per $\phi = 0$.

3.2.3 Verifica a scorrimento

La verifica allo scorrimento viene condotta confrontando l'azione di taglio trasmessa in fondazione con l'azione di taglio resistente del terreno. Quest'ultima è valutata come:

$$T_{lim} = N \times \text{tg}\phi + c' \times B' \times L' \quad \text{in condizioni drenate}$$

$$T_{lim} = c_u \times B' \times L' \quad \text{in condizioni non drenate}$$

dove N è il carico assiale applicato nel baricentro della fondazione e ϕ l'angolo di attrito terreno – fondazione.

3.3 FONDAZIONI SU PALI

3.3.1 Verifiche agli stati limite ultimi (SLU)

Secondo quanto specificato al punto 6.4.3.1 delle NTC2008, nelle verifiche di sicurezza devono essere presi in considerazione tutti i meccanismi di stato limite ultimo, sia a breve sia a lungo termine.

Gli stati limite ultimi delle fondazioni su pali si riferiscono allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e al raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali che compongono la fondazione stessa.

Le verifiche delle fondazioni su pali sono effettuate con riferimento ai seguenti stati limite, quando pertinenti:

- SLU di tipo geotecnico (GEO)
 - collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi assiali;
 - collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi trasversali;
 - collasso per carico limite di sfilamento nei riguardi dei carichi assiali di trazione;
- SLU di tipo strutturale (STR)
 - raggiungimento della resistenza dei pali;
 - raggiungimento della resistenza della struttura di collegamento dei pali;

accertando che la condizione $E_d \leq R_d$ sia soddisfatta per ogni stato limite considerato.

Le verifiche devono essere effettuate, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.4.II delle NTC2008, seguendo almeno uno dei due approcci previsti al punto 6.4.3.1 delle NTC2008. In particolare, il calcolo è condotto mediante:

- Approccio 2 (A1+M1+R3)

Nelle verifiche effettuate con l'approccio 2 che siano finalizzate al dimensionamento strutturale, il coefficiente γ_R non deve essere portato in conto.

Tabella 6.4.II – Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze caratteristiche.

Resistenza	Simbolo	Pali infissi			Pali trivellati			Pali ad elica continua		
		(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)
Base	γ_b	1,0	1,45	1,15	1,0	1,7	1,35	1,0	1,6	1,3
Laterale in compressione	γ_s	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15
Totale (*)	γ_t	1,0	1,45	1,15	1,0	1,6	1,30	1,0	1,55	1,25
Laterale in trazione	γ_{st}	1,0	1,6	1,25	1,0	1,6	1,25	1,0	1,6	1,25

(*) da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

Figura 3-5. Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze caratteristiche (Tab.6.4.II delle NTC2008)

3.3.2 Resistenza di pali soggetti a carichi assiali

La resistenza dei pali soggetti a carichi assiali è calcolata come prescritto al punto 6.4.3.1.1 delle NTC2008.

La resistenza caratteristica (R_k) del palo singolo può essere dedotta da:

- a) risultati di prove di carico statico di progetto su pali pilota;
- b) metodi di calcolo analitici, dove R_k è calcolata a partire dai valori caratteristici dei parametri geotecnici oppure con l'impiego di relazioni empiriche che utilizzino direttamente i risultati di prove in sito (prove penetrometriche, pressiometriche, ecc.);
- c) risultati da prove dinamiche di progetto, ad alto livello di deformazione, eseguite su pali pilota.

Nelle analisi condotte si è proceduto considerando l'approccio di tipo (b) e come di seguito descritto.

Con riferimento alle procedure analitiche che prevedano l'utilizzo dei parametri geotecnici o dei risultati di prove in sito, il valore caratteristico della resistenza a compressione e a trazione ($R_{c,k}$ ovvero $R_{t,k}$) è ottenuto come:

$$R_k = \min \left\{ \frac{R_{MEDIA}}{\xi_3}, \frac{R_{MIN}}{\xi_4} \right\};$$

con

R_{MEDIA} e R_{MIN} le resistenze calcolate;

ξ_3 e ξ_4 i fattori di correlazione funzione del numero n di verticali indagate riportati alla Tab.6.4.IV delle NTC2008.

Qualora si abbiano a disposizione prove in sito continue (prova tipo CPT o DMT) o discontinue (SPT, pressiometriche, ecc.) ma con passi di campionamenti sufficientemente fitti da considerare una misura continua con la profondità, la stima della resistenza caratteristica è così condotta:

- 1 per ogni verticale di indagine si calcola il profilo di resistenza con la profondità in funzione delle prove in sito e di laboratorio assumendo i valori medi a disposizione nella singola verticale;
- 2 stima, tra quelli calcolati, del profilo di resistenza medio ($R_{MEDI A}$) e di resistenza minimo (R_{MIN});
- 3 la resistenza caratteristica R_k , a compressione o a trazione, sarà il minore dei valori ottenuti:

$$R_k = \min \left\{ \frac{R_{MEDI A}}{\xi_3}; \frac{R_{MIN}}{\xi_4} \right\}$$

con ξ_3 e ξ_4 fattori di correlazione funzione del numero di verticali indagate.

Qualora, invece, si abbiano a disposizione prove in sito o di laboratorio discrete, si procederà secondo il seguente schema:

- 1 per ogni strato vengono scelti il valore medio e minimo tra tutti i valori a disposizione necessari per il calcolo del profilo di resistenza con la profondità;
- 2 stima del profilo di resistenza medio ($R_{MEDI A}$) e di resistenza minimo (R_{MIN}) adottando i parametri medi e minimi ottenuti al punto precedente;
- 3 la resistenza caratteristica (R_k), a compressione o a trazione, sarà il minore dei valori ottenuti:

$$R_k = \min \left\{ \frac{R_{MEDI A}}{\xi_3}; \frac{R_{MIN}}{\xi_4} \right\}$$

con ξ_3 e ξ_4 fattori di correlazione funzione del numero di verticali indagate.

Tabella 6.4.IV – Fattori di correlazione ξ per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali indagate.

Numero di verticali indagate	1	2	3	4	5	7	≥ 10
ξ_3	1,70	1,65	1,60	1,55	1,50	1,45	1,40
ξ_4	1,70	1,55	1,48	1,42	1,34	1,28	1,21

Figura 3-6. Fattori di correlazione ξ per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali indagate (Tab.6.4.IV delle NTC2008)

Il valore di progetto R_d della resistenza si ottiene a partire dal valore caratteristico R_k applicando i coefficienti parziali γ_R della Tabella 6.4.II delle NTC2008 (vedi Figura 3-5).

I criteri utilizzati per la stima delle curve di capacità portante a compressione e trazione sono illustrati nel successivo paragrafo.

3.3.2.1 Stima della resistenza dei pali e micropali soggetti a carichi assiali

La portata ammissibile (Q_{amm}) è calcolata in riferimento alla seguente espressione:

$$Q_{amm} = Q_{B,lim} + Q_{L,lim} = (q_{lim} \times A_b) + \sum_i[(\pi \times d \times \Delta H_i \times T_{lim,i})]$$

dove

$Q_{B,lim}$ portata limite di base (calcolata)

$Q_{L,lim}$ portata limite laterale (calcolata)

q_{lim} portata unitaria limite di base

A_b area di base

ΔH_i altezza del concio unitario di palo

$T_{lim,i}$ attrito laterale unitario limite del concio i-esimo di palo

Portata di base

- Per terreni granulari:

$$q_{lim} = 0.667 \times N_{SPT} \leq 4MPa$$

- Per terreni coesivi:

$$q_{lim} = 9 \times c_u + \sigma_{v0}$$

dove:

c_u = coesione non drenata

σ_{v0} = pressione geostatica verticale totale alla quota della base del palo

Portata laterale

- Per terreni granulari si ha:

$$\tau_{lim} = \min [k \times \sigma'_v \times \tan \phi; \tau = f(N_{SPT})] < 150kPa$$

dove:

$k = 0.70$ nel caso di compressione e $k = 0.50$ nel caso di trazione

σ'_v = pressione geostatica verticale efficace

ϕ = angolo di attrito

N_{SPT} = numero di colpi/piede in prova SPT

I valori di $\tau = f(N_{SPT})$ si possono desumere dalla Figura 3-7:

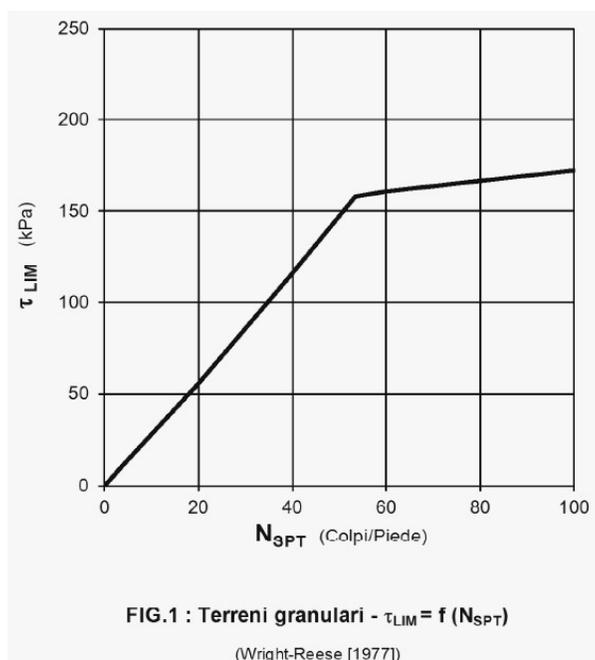


Figura 3-7. Terreni granulari – $\tau_{lim} = f(N_{SPT})$ (Wright-Reese – 1977)

- Per terreni coesivi si ha:

$$\tau_{lim} = \alpha \times c_u < 150kPa$$

dove:

α = coefficiente empirico di aderenza che dipende dal tipo di terreno, dalla resistenza al taglio non drenata del terreno indisturbato, dal metodo di costruzione del palo, dal tempo, dalla profondità, dal cedimento del palo.

3.3.3 Comportamento di pali in gruppo soggetti a carichi trasversali

Il comportamento di pali in gruppo soggetti a carichi trasversali è indagato mediante il programma di calcolo GROUP.

Il programma di calcolo permette di analizzare il comportamento di una palificata sottoposta a carichi orizzontali e verticali modellando l'interazione terreno struttura mediante curve p-y.

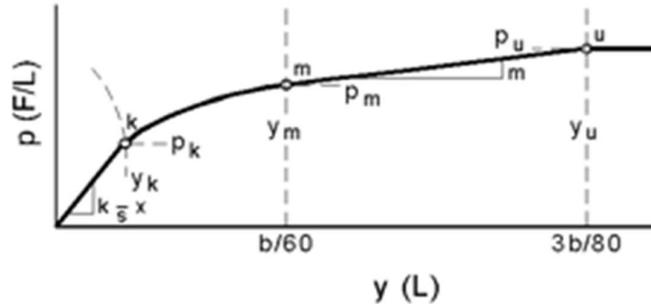
Le curve p-y che esprimono la resistenza del terreno in funzione della profondità e dello spostamento del palo, possono essere ricavate in relazione alla tipologia di terreni e alle proprietà meccaniche che li caratterizzano, in accordo alle procedure proposte da:

- Reese, Cox e Koop (1975) per sabbie
- Welch e Reese (1975) per argille tenere sotto falda
- Reese, Cox e Koop (1975) per argille dure sotto falda
- Reese–Welch (1972) per argille dure sopra falda

Il programma permette di scegliere tra uno dei modelli sopra esposti.

I metodi di calcolo sono descritti sinteticamente nelle pagine seguenti con riferimento sia a carichi statici sia a carichi ciclici.

Modello per sabbie Cox e Reese (1975)



1- calcolo di $p = \min(p_{u1}; p_{u2})$

$$p_{u1} = \gamma \cdot z \cdot \frac{K_0 \cdot z \cdot \tan \phi \cdot \sin \beta}{\tan(\beta - \phi) \cdot \cos \alpha} \cdot A_1 + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi)} \cdot (D \cdot A_3 + z \cdot \tan \beta \cdot \tan \alpha \cdot A_3^2) + \gamma \cdot z \cdot [K_0 \cdot z \cdot \tan \beta \cdot (\tan \phi \cdot \sin \beta - \tan \alpha) \cdot A_1 - K_a \cdot D]$$

$$p_{u2} = K_a \cdot D \cdot \gamma \cdot z \cdot (\tan^8 \beta - 1) + K_0 \cdot D \cdot \tan \phi \cdot \tan^4 \beta$$

$$A_1 = (4 \cdot A_2^3 - 3 \cdot A_2^2 + 1)$$

$$A_2 = (\tan \beta \cdot \tan \delta) / (\tan \beta \cdot \tan \delta + 1)$$

$$A_3 = 1 - A_2$$

dove:

- p_u resistenza laterale unitaria ultima
- y spostamento orizzontale
- γ peso di volume efficace
- z profondità da p.c.
- K_0 coefficiente di spinta a riposo
- ϕ angolo di attrito
- β $45 + \phi/2$
- α $\phi/2$
- D diametro del palo
- K_a $\tan^2(45 + \phi/2)$
- δ inclinazione del piano campagna rispetto all'orizzontale

2- calcolo di $p_{u1} = A_1 \cdot p$

3- calcolo di $p_{u2} = B_1 \cdot p$

4- definizione del tratto iniziale della curva p-y

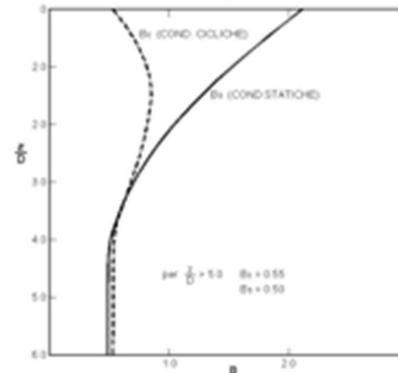
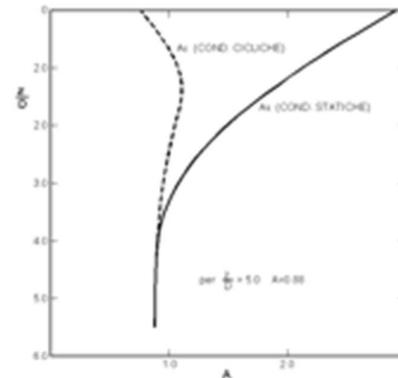
5- definizione del tratto parabolico della curva p-y

$$p = C y^{1/n}$$

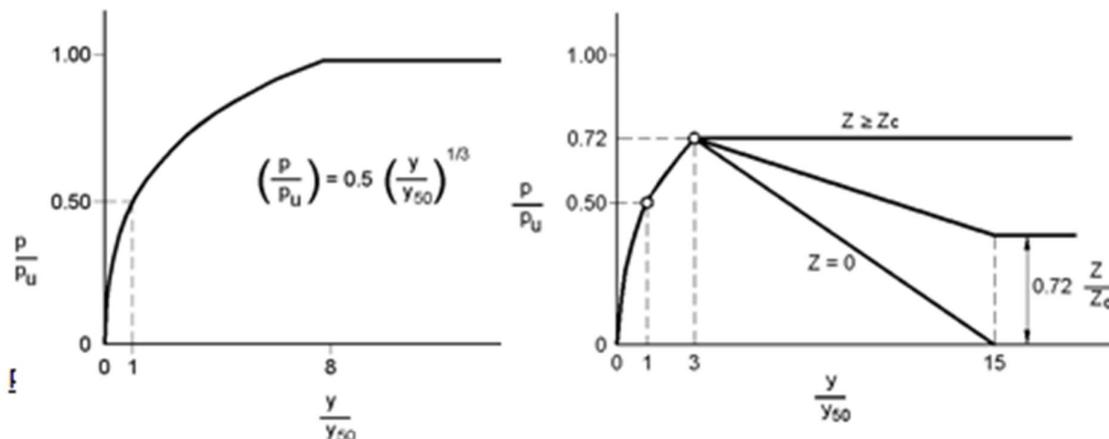
dove:

$$n = p_m / m y_{m0}$$

$$C = p_m / (y_{m0})^{1/n}$$



Modello Welch e Reese (1975) per argille tenere sotto falda



$$p_{u2} = 9 c_u D \alpha$$

$$\alpha = 1/(1+\tan\delta)$$

$$p_u = \min(p_{u1}; p_{u2})$$

$$p/p_u = 0.5 (y/y_{50})^{1/3}$$

$$y_{50} = 2.5 \varepsilon_{50} D$$

dove:

p_u resistenza laterale unitaria ultima

σ' pressione geostatica verticale efficace alla quota z

c_u coesione non drenata

z profondità da p.c.

D diametro del palo

δ inclinazione del piano campagna rispetto all'orizzontale

y spostamento orizzontale

y_{50} spostamento orizzontale per $p=0.5 p_u$

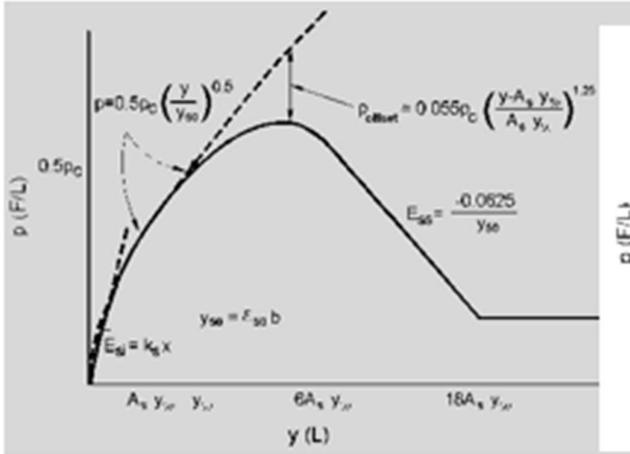
ε_{50} deformazione unitaria corrispondente ad una mobilitazione delle tensioni tangenziali pari al 50% della resistenza al taglio

per carichi ciclici

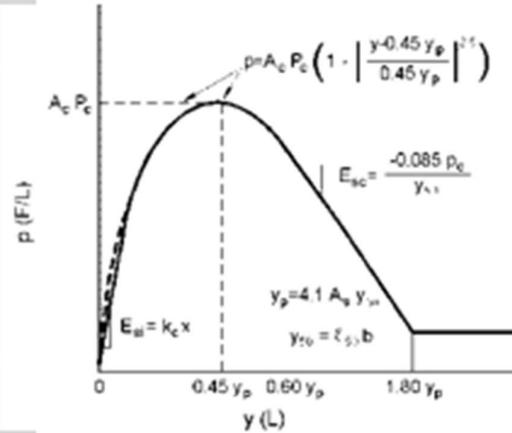
$$z_c = [6 c_u D] / [\gamma' D + 0.5 c_u] \alpha$$

$$\gamma' = \text{peso di volume efficace}$$

Modello Reese, Cox e Koop (1975) per argille dure sotto falda



Carichi statici



Carichi ciclici

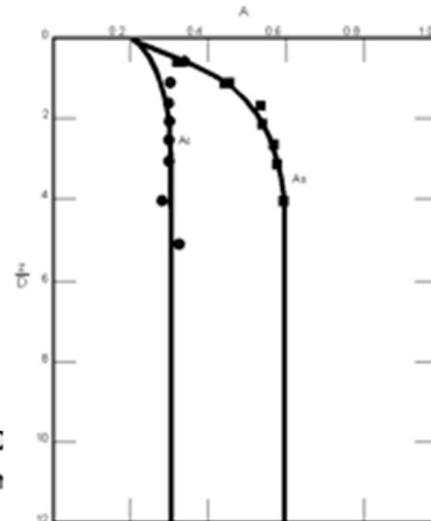
$$p_{u,1} = (3 c_u D + \sigma' D + 2.83 c_u z)$$

$$p_{u,2} = 11 c_u D \alpha$$

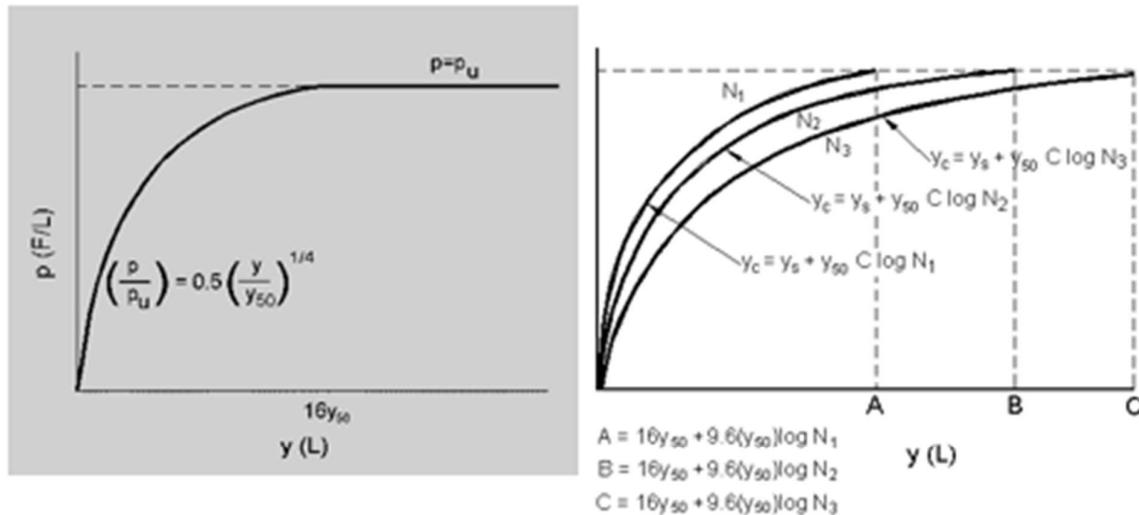
$$\alpha = 1/(1+\tan\delta)$$

$$p_u = \min(p_{u,1}; p_{u,2})$$

- p_u resistenza laterale unitaria ultima
- z profondità da p.c.
- σ' pressione geostatica verticale efficace alla profondità z
- c_u coesione non drenata
- D diametro del palo
- y spostamento orizzontale
- $y_{50} = 2.5 \epsilon_{50} D$ = spostamento orizzontale per $p=c$
- ϵ_{50} deformazione unitaria corrispondente ad una n pari al 50% della resistenza al taglio
- K_s pendenza del tratto iniziale della curva carichi statici
- K_c pendenza del tratto iniziale della curva carichi ciclici
- A_c parametro empirico



Modello Welch-Reese (1972) e Reese–Welch () per argille dure sopra falda



Carichi statici

Carichi ciclici

$$p_{u1} = [3c_u D + \gamma' D z + 2.83c_u z] \alpha$$

$$p_{u2} = 9 c_u D \alpha$$

$$\alpha = 1/(1+\tan\delta)$$

$$p_u = \min (p_{u1}; p_{u2})$$

dove:

p_{u1} resistenza laterale unitaria ultima

γ' peso di volume unitario

c_u coesione non drenata

z profondità da p.c.

D diametro del palo

δ inclinazione del piano campagna rispetto all'orizzontale

y spostamento orizzontale

y_{50} spostamento orizzontale per $p=0.5 p_u (= 2.5 \epsilon_{50} D)$

ϵ_{50} deformazione unitaria corrispondente ad una mobilitazione delle tensioni tangenziali pari al 50% della resistenza al taglio

K_α pendenza del tratto iniziale della curva

4 FONDAZIONE SPALLA - AMPLIAMENTO 2 (NUOVA REALIZZAZIONE) – CARREGGIATA NORD

4.1 AZIONI DI CALCOLO

La seguente tabella riporta le sollecitazioni di calcolo agenti nel baricentro della palificata.

Il sistema di riferimento utilizzato coincide con quello utilizzato per l'analisi della spalla.

			F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]	M_x [kNm]	M_y [kNm]	M_z [kNm]
SLU A1-M1	CC 1	Gr 1	-18	4736	-9530	-5166	8866	7595
	CC 2	Gr 1	-18	4736	-12866	-1093	12017	7595
	CC 3	Gr 1	-18	4736	-9866	-4343	9651	7595
	CC 4	Gr 1	-18	4736	-13202	-271	12802	7595
	CC 5	Gr 1	98	4783	-11259	-6040	14232	7691
	CC 6	Gr 1	98	4783	-14595	-1968	17382	7691
	CC 7	Gr 1	98	4783	-15043	-871	18428	7691
	CC 8	Gr 1	98	4783	-10642	-6391	13969	7691
	CC 9	Gr 1	98	4783	-13977	-2318	17119	7691
	CC 10	Gr 1a	98	4783	-14426	-1221	18165	7691
	CC 11	Gr 1a	98	4783	-13588	-2101	15871	7691
	CC 12	Gr 1a	98	4783	-14020	-1856	16055	7691
	CC 13	Gr 2a	-5	4817	-10722	-7033	12115	7627
	CC 14	Gr 2a	-5	4817	-11059	-6210	12899	7627
	CC 15	Gr 2a	-5	4817	-10290	-7278	11931	7627
	CC 16	Gr 2a	-5	4817	-10627	-6455	12715	7627
	CC 17	Gr 2a	-5	4817	-14058	-2960	15266	7627
	CC 18	Gr 2a	-5	4817	-14394	-2137	16050	7627
	CC 19	Gr 2a	-5	4817	-13626	-3205	15081	7627
	CC 20	Gr 2a	-5	4817	-13962	-2382	15866	7627
	CC 21	Gr 2b	98	4562	-10685	-4879	12904	7336
	CC 22	Gr 2b	98	4562	-11021	-4056	13689	7336
	CC 23	Gr 2b	98	4562	-10253	-5124	12720	7336
	CC 24	Gr 2b	98	4562	-10589	-4301	13505	7336
	CC 25	Gr 2b	98	4562	-14020	-806	16055	7336
	CC 26	Gr 2b	98	4562	-14357	16	16840	7336
	CC 27	Gr 2b	98	4562	-13588	-1051	15871	7336
	CC 28	Gr 2b	98	4562	-13924	-229	16656	7336

SLV M1	CC 45	Gr Ex + 0.3EyEz	3333	4572	-10384	-4804	24492	10756
	CC 46	Gr Ex + 0.3EyEz	3333	4572	-10293	-4855	24453	10756
	CC 47	Gr Ey + 0.3ExEz	987	7858	-10384	-18063	14331	11730
	CC 48	Gr Ey + 0.3ExEz	987	7858	-10293	-18115	14292	11730
	CC 49	Gr Ez + 0.3ExEy	987	4464	-11780	-2176	15632	7747
	CC 50	Gr Ez + 0.3ExEy	987	4464	-11689	-2228	15593	7747
	CC 51	Gr Ex + 0.3Ey	3333	4572	-9786	-5551	23934	10756
	CC 52	Gr Ex + 0.3Ey	3333	4572	-9695	-5603	23895	10756
	CC 53	Gr Ey + 0.3Ex	987	7858	-9786	-18811	13773	11730
	CC 54	Gr Ey + 0.3Ex	987	7858	-9695	-18863	13734	11730

	CC 55	Gr Ez	-19	2964	-11780	4263	11277	4750
	CC 56	Gr Ez	-19	2964	-11689	4211	11238	4750

SLE RARA	CC 69	Gr 1	-12	3437	-9530	-453	8912	5514
	CC 70	Gr 1	-12	3437	-9829	278	9609	5514
	CC 71	Gr 1	65	3468	-10811	-1056	12772	5578
	CC 72	Gr 1	65	3468	-11110	-324	13469	5578
	CC 73	Gr 1	65	3468	-10353	-1315	12577	5578
	CC 74	Gr 1	65	3468	-10652	-584	13275	5578
	CC 75	Gr 1a	65	3468	-10065	-1154	11653	5578
	CC 76	Gr 1a	65	3468	-10385	-973	11789	5578
	CC 77	Gr 2a	-11	3510	-10413	-1868	11204	5557
	CC 78	Gr 2a	-11	3510	-10093	-2050	11068	5557
	CC 79	Gr 2a	-11	3510	-10317	-1502	11591	5557
	CC 80	Gr 2b	65	3321	-10385	-273	11789	5341
	CC 81	Gr 2b	65	3321	-10065	-454	11653	5341
CC 82	Gr 2b	65	3321	-10289	94	12176	5341	

SLE FREQUENTE	CC 83	Gr 1	-19	3287	-9530	271	8851	5271
	CC 84	Gr 1	-19	3287	-9754	819	9374	5271
	CC 85	Gr 1	-19	3287	-10385	155	10704	5271
	CC 86	Gr 1	-19	3287	-10610	703	11227	5271
	CC 87	Gr 1	-19	3287	-10065	-27	10567	5271
	CC 88	Gr 1	-19	3287	-10289	521	11090	5271
	CC 89	Gr 2a	-49	3363	-9541	-367	8617	5358
	CC 90	Gr 2a	-49	3363	-9765	181	9140	5358
	CC 91	Gr 2a	-19	3287	-9530	271	8851	5271
	CC 92	Gr 2a	-19	3287	-9754	819	9374	5271

Q _p	CC 93	Gr 1	-19	2846	-9530	2371	8851	4560
----------------	-------	------	-----	------	-------	------	------	------

Si individuano di seguito le combinazioni maggiormente significative.

COMBINAZIONI A1-M1

	My max	Vx max	N min	Vy max	Mx max	Vy min	Mx min
COMB.	CC 1	CC 5	CC 7	CC 13	CC 15	CC 21	CC 26
N _{Ed} [kN] =	9530.1	11259.1	15043.1	10722.4	10290.2	10684.7	14356.6
M _{x,Ed} [kNm] =	-5166.0	-6040.4	-870.9	-7032.8	-7277.9	-4878.9	16.5
M _{y,Ed} [kNm] =	8866.3	14231.6	18428.4	12114.8	11930.7	12904.5	16839.8
M _{z,Ed} [kNm] =	7594.5	7691.3	7691.3	7627.4	7627.4	7335.8	7335.8
V _{x,Ed} =	-18.3	97.5	97.5	-5.4	-5.4	97.5	97.5
V _{y,Ed} =	4735.9	4782.7	4782.7	4816.7	4816.7	4561.9	4561.9

COMBINAZIONI SLV-M1

	Vx max	Vy max	N min	N max	Mx max	Vy min	My max
COMB.	CC 45	CC 47	CC 49	CC 52	CC 54	CC 55	CC 56
N_{Ed} [kN] =	10384.4	10384.4	11780.1	9694.7	9694.7	11780.1	11688.6
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	-4803.6	-18063.1	-2176.3	-5603.0	-18862.5	4263.1	4211.2
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	24491.6	14330.5	15632.1	23894.8	13733.8	11277.4	11238.4
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	10755.7	11730.1	7746.7	10755.7	11730.1	4750.0	4750.0
$V_{x,Ed}$ =	3332.9	986.9	986.9	3332.9	986.9	-18.6	-18.6
$V_{y,Ed}$ =	4572.5	7857.6	4464.3	4572.5	7857.6	2963.6	2963.6

COMBINAZIONI RARA

	N max	Mx min	Vx max	N min	Vy max	Mx max	Vy min
COMB.	CC 69	CC 70	CC 71	CC 72	CC 77	CC 78	CC 80
N_{Ed} [kN] =	9530.1	9829.1	10810.8	11109.8	10413.2	10093.1	10385.3
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	-452.7	278.5	-1055.5	-324.4	-1868.4	-2049.9	-272.9
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	8911.7	9608.9	12772.1	13469.4	11204.1	11067.7	11789.1
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	5513.8	5513.8	5578.3	5578.3	5557.3	5557.3	5341.3
$V_{x,Ed}$ =	-12.2	-12.2	65.0	65.0	-11.2	-11.2	65.0
$V_{y,Ed}$ =	3437.3	3437.3	3468.5	3468.5	3510.0	3510.0	3321.3

COMBINAZIONI FREQUENTE

	N max	Mx min	M min	Vy max			
COMB.	CC 83	CC 84	CC 86	CC 89			
N_{Ed} [kN] =	9530.1	9754.3	10609.6	9541.2			
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	271.0	819.4	703.0	-367.2			
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	8850.8	9373.8	11226.7	8616.8			
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	5271.5	5271.5	5271.5	5357.9			
$V_{x,Ed}$ =	-18.6	-18.6	-18.6	-49.1			
$V_{y,Ed}$ =	3287.5	3287.5	3287.5	3363.0			

COMBINAZIONI QUASI PERMANENTE

Mx max

COMB.	CC 93						
N _{Ed} [kN] =	9530.1						
M _{x,Ed} [kNm] =	2370.9						
M _{y,Ed} [kNm] =	8850.8						
M _{z,Ed} [kNm] =	4560.4						
V _{x,Ed} =	-18.6						
V _{y,Ed} =	2845.9						

Tabella 4-1. Sollecitazioni di calcolo risultanti nel baricentro della palificata – Sistema di riferimento analisi della spalla

Tali sollecitazioni sono di seguito trasformate nel sistema di riferimento di Group.

COMBINAZIONI A1-M1

	COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
1	CC 1	9530.07	-4735.92	5166.02	18.27	-8866.28	-7594.53
2	CC 5	11259.08	-4782.71	6040.44	-97.53	-14231.60	-7691.26
3	CC 7	15043.11	-4782.71	870.87	-97.53	-18428.37	-7691.26
4	CC 13	10722.36	-4816.68	7032.78	5.40	-12114.79	-7627.43
5	CC 15	10290.18	-4816.68	7277.88	5.40	-11930.66	-7627.43
6	CC 21	10684.68	-4561.90	4878.91	-97.53	-12904.46	-7335.76
7	CC 26	14356.59	-4561.90	-16.47	-97.53	-16839.75	-7335.76

COMBINAZIONI SLV-M1

	COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
8	CC 45	10384.39	-4572.46	4803.55	-3332.86	-24491.59	-10755.72
9	CC 47	10384.39	-7857.56	18063.08	-986.85	-14330.55	-11730.06
10	CC 49	11780.11	-4464.26	2176.34	-986.85	-15632.15	-7746.74
11	CC 52	9694.75	-4572.46	5603.00	-3332.86	-23894.79	-10755.72
12	CC 54	9694.75	-7857.56	18862.53	-986.85	-13733.75	-11730.06
13	CC 55	11780.11	-2963.62	-4263.06	18.58	-11277.41	-4750.05
14	CC 56	11688.64	-2963.62	-4211.18	18.58	-11238.44	-4750.05

COMBINAZIONI RARE

	COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
1	CC 69	9530.071	-3437.271	452.698	12.182	-8911.651	-5513.798
2	CC 70	9829.079	-3437.271	-278.466	12.182	-9608.938	-5513.798
3	CC 71	10810.816	-3468.463	1055.543	-65.021	-12772.126	-5578.289
4	CC 72	11109.824	-3468.463	324.378	-65.021	-13469.413	-5578.289
5	CC 77	10413.245	-3509.979	1868.387	11.228	-11204.124	-5557.339
6	CC 78	10093.113	-3509.979	2049.939	11.228	-11067.728	-5557.339
7	CC 80	10385.336	-3321.256	272.929	-65.021	-11789.065	-5341.285

COMBINAZIONI FREQ.

	COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
8	CC 83	9530.071	-3287.480	-271.021	18.578	-8850.799	-5271.452
9	CC 84	9754.327	-3287.480	-819.394	18.578	-9373.764	-5271.452
10	CC 86	10609.592	-3287.480	-703.034	18.578	-11226.659	-5271.452
11	CC 89	9541.234	-3362.969	367.162	49.078	-8616.823	-5357.874

COMBINAZIONI Q.P.

	COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
12	CC 93	9530.071	-2845.859	-2370.928	18.578	-8850.799	-4560.443

Tabella 4-2. Sollecitazioni di calcolo risultanti nel baricentro della palificata – Sistema di riferimento Group

4.2 MODELLO DI CALCOLO

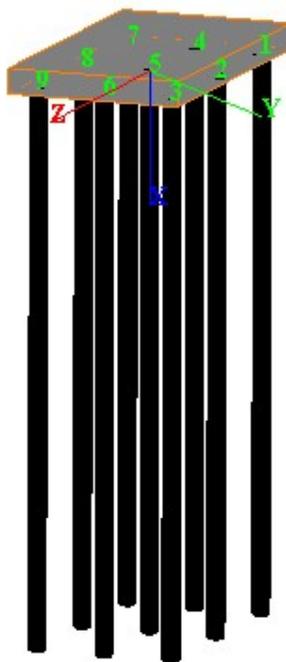


Figura 4-1. Modello di calcolo palificata: vista tridimensionale

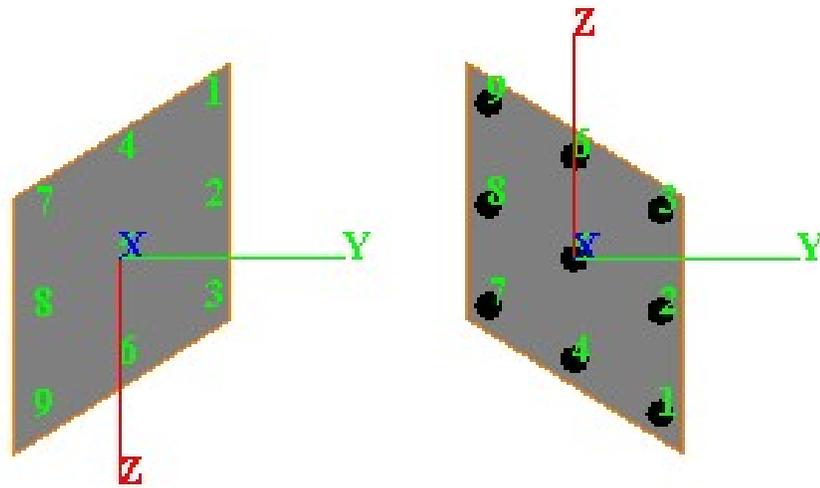


Figura 4-2. Modello di calcolo palificata: piano y-z

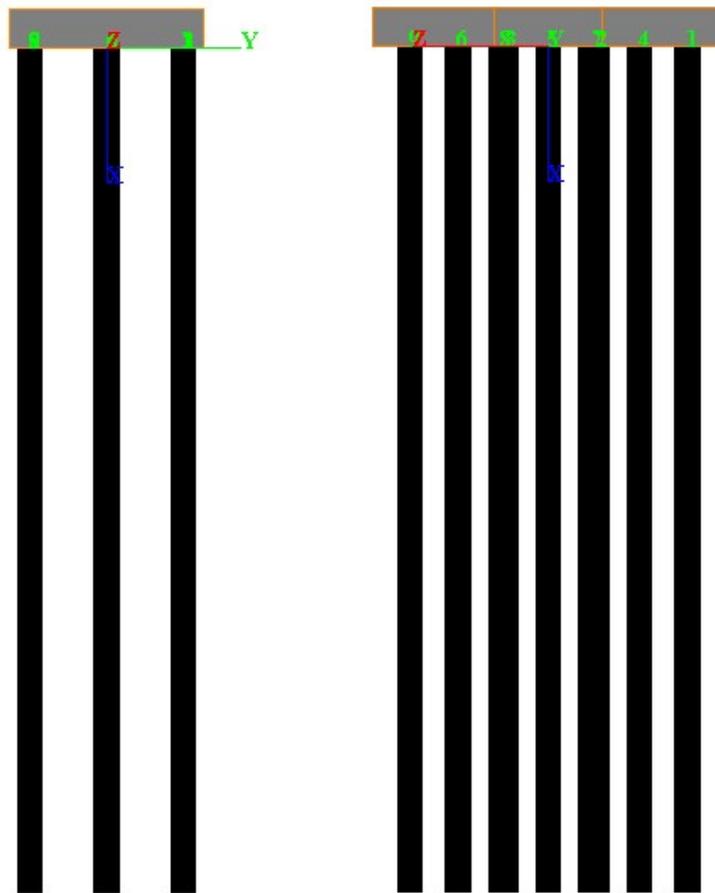


Figura 4-3. Caratteristiche geometriche e meccaniche sezione trasversale pali

Figura 4-4. Parametri dei pali in GROUP

Pile #	Pile-Top Vertical X-Coordinates, (m)	Pile-Top Horizontal Y-Coordinates, (m)	Pile-Top Horizontal Z-Coordinates, (m)	Angle Alpha* (use 0 for vertical pile) (DEG)	Angle Beta** (use 90 for vertical pile) (DEG)	Angle Theta (section rotation) (DEG)	Vert. Dist. from Pile Top to Ground Line ***, (m)
1	0	3	-5,41	0	90	0	0
2	0	3	-1,87	0	90	0	0
3	0	3	1,66	0	90	0	0
4	0	0	-3,54	0	90	0	0
5	0	0	0	0	90	0	0
6	0	0	3,54	0	90	0	0
7	0	-3	-1,66	0	90	0	0
8	0	-3	1,87	0	90	0	0
9	0	-3	5,41	0	90	0	0

Add Row Insert Row Delete Row

* Angle Alpha, angle from Y(+) Axis to the projection of pile on the Y-Z plane (use 0 for vertical pile)
 ** Angle Beta, angle from the projection of pile on the Y-Z plane to the pile axis (use 90 for vertical pile)
 *** Distance from pile top to ground line
 (+) positive if soil ground line is below the pile top
 (-) negative if soil ground line is above the pile top

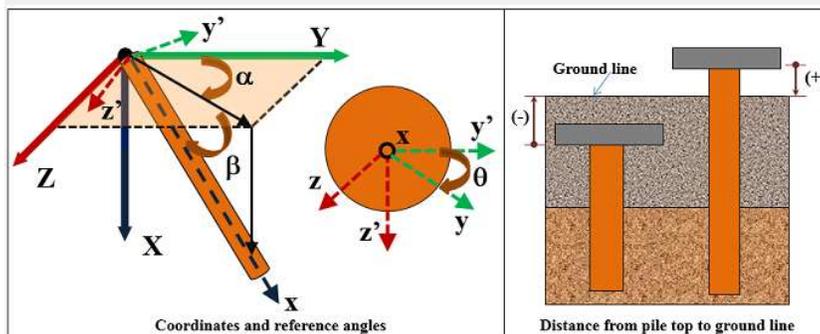


Figura 4-5. Disposizione dei micropali in GROUP

Layer	Soil Type	Depth for Top of Soil Layer (m)	Depth for Bottom of Soil Layer (m)	Properties of Layer
1	Silt (cemented c-phi)	-2,71	0	1: Cemented c-phi Soil
2	Silt (cemented c-phi)	0	3,29	2: Cemented c-phi Soil
3	Sand (Reese)	3,29	9,29	3: Sand (Reese, et al.)
4	Silt (cemented c-phi)	9,29	23,29	4: Cemented c-phi Soil
5	Sand (Reese)	23,29	37,29	5: Sand (Reese, et al.)

Cemented c-phi Soil 1

1=Top, 2=Bottom	Effective Unit Weight (kN/m ³)	Undrained Cohesion, c (kN/m ²)	Friction Angle (DEG.)	p-y Modulus, k (kN/m ³)	Strain Factor E50
1	19	50	26	20000	0,007
2	19	58,943	26	20000	0,007

Cemented c-phi Soil 2

1=Top, 2=Bottom	Effective Unit Weight (kN/m ³)	Undrained Cohesion, c (kN/m ²)	Friction Angle (DEG.)	p-y Modulus, k (kN/m ³)	Strain Factor E50
1	19	58,943	26	20000	0,007
2	19	69,8	26	20000	0,007

Sand (Reese, et al.) 3

1=Top, 2=Bottom	Effective Unit Weight (kN/m ³)	Friction Angle, (DEG.)	p-y Modulus, k (kN/m ³)
1	20	38	50000
2	20	38	50000

Cemented c-phi Soil 4

1=Top, 2=Bottom	Effective Unit Weight (kN/m ³)	Undrained Cohesion, c (kN/m ²)	Friction Angle (DEG.)	p-y Modulus, k (kN/m ³)	Strain Factor E50
1	19	69	26	20000	0,007
2	19	83	26	20000	0,007

Sand (Reese, et al.) 5

1=Top, 2=Bottom	Effective Unit Weight [kN/m ³]	Friction Angle, (DEG.)	p-y Modulus, k [kN/m ³]
1	20	38	50000
2	20	38	50000

Figura 4-6. Caratteristiche meccaniche terreno

4.3 ANALISI GEOTECNICA

4.3.1 Sollecitazioni di calcolo

I seguenti grafici riportano le massime azioni assiali, compressione e trazione, agenti per le combinazioni di calcolo significative.

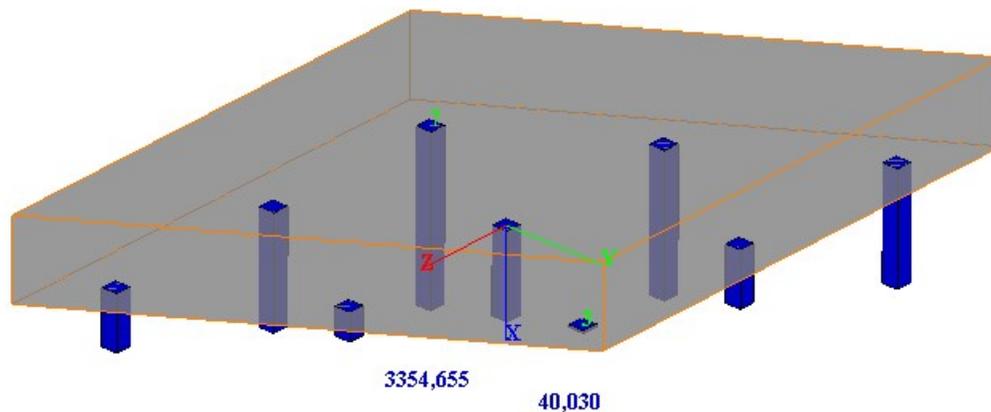


Figura 4-7. Involuppo azioni assiale massime comb. SLU

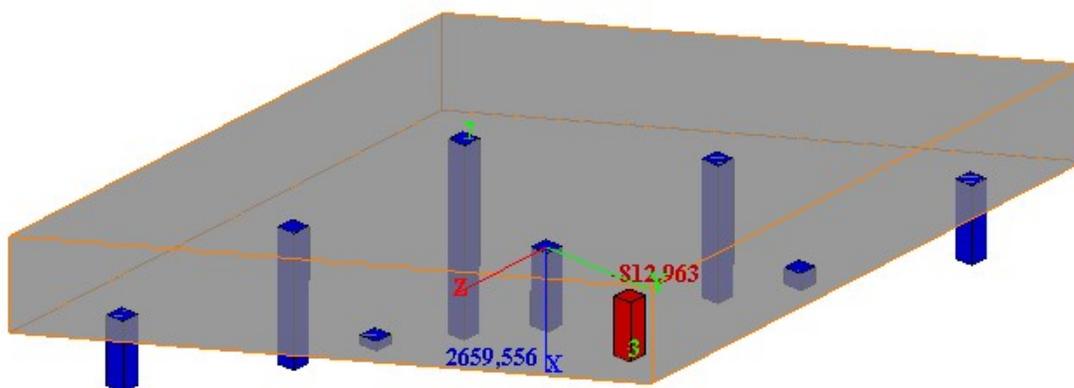


Figura 4-8. Involuppo azioni assiale minime comb. SLU

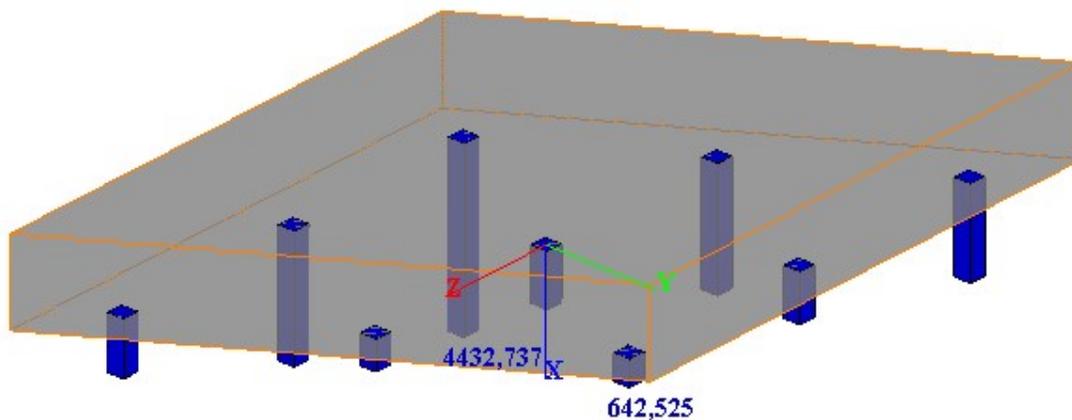


Figura 4-9. Inviluppo azioni assiale massime comb. SLV

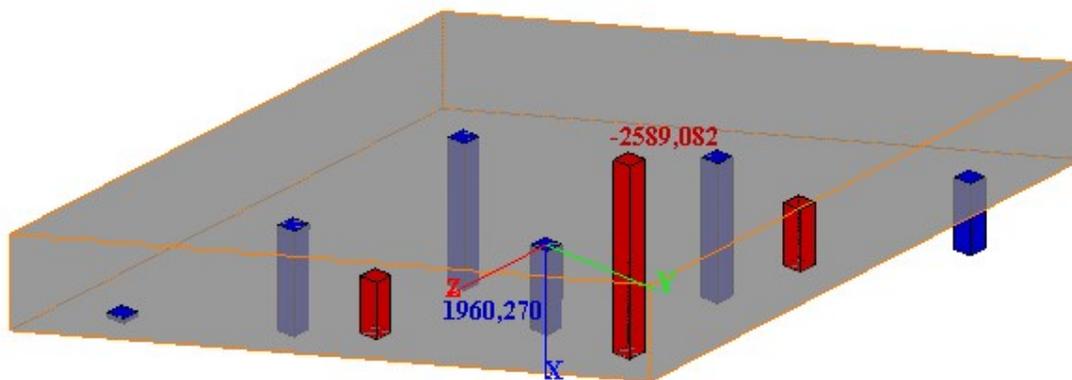


Figura 4-10. Inviluppo azioni assiale minime comb. SLV

4.3.2 Verifica geotecnica

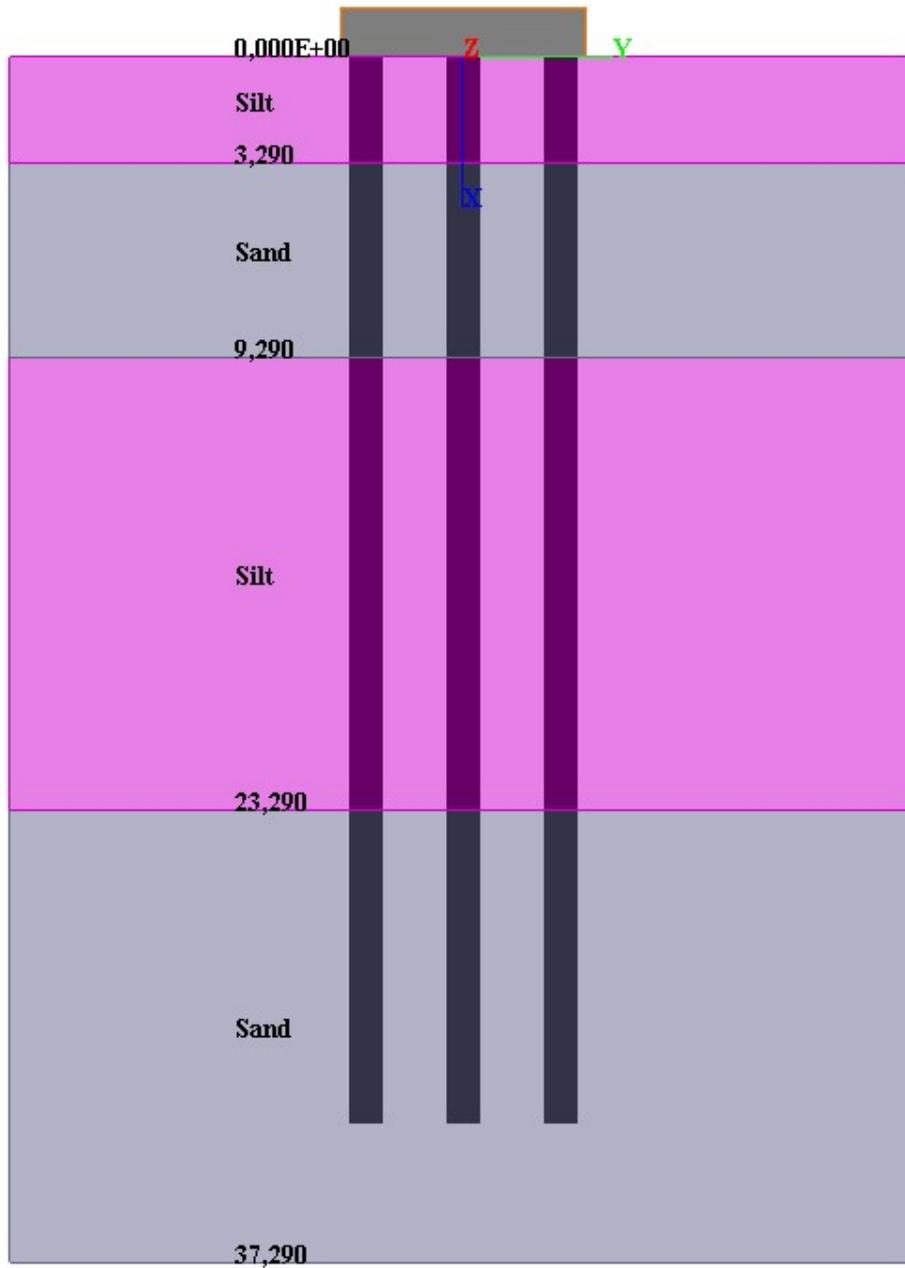


Figura 4-11. Stratigrafia del terreno modellata con Group

STRATIGRAFIA										
Descrizione	strato	q ^{sup.} strato [m]	quota base strato	H strato	γ _k [t/mc]	γ' _k [t/mc]	φ _k [°]	Cu _k [t/mq]	Nspt	f(Nspt)
A	1	0.00	-2.71	2.71	1.90	1.90		5.47	13.00	
A	2	-2.71	-6.00	3.29	1.90	0.90		6.44	13.00	
B	3	-6.00	-12.00	6	2.00	1.00	38		60.00	16.00
A'	4	-12.00	-26.00	14	1.90	0.90		7.60	28.00	
B	5	-26.00	-40.00	14	2.00	1.00	38		60.00	16.00
	6	-40.00	inf.	inf.	2.00	1.00				

quota falda q_r = -2.71 m.s.m.m. (o rispetto p.c.) falda presente

CARATTERISTICHE DEL PALO			
D =	1.00	m diametro palo	q _t = -2.71 m.s.m.m. (o rispetto p.c.) quota testa palo
L _{palo} =	34.00	m lunghezza palo	q _b = -36.71 m.s.m.m. (o rispetto p.c.) quota base palo
q' =	0	t/mq carico su p.c.	γ _{palo} = 0.55 t/mc W _{palo} = 14.69 t

CALCOLO DELLA PORTANZA DEL PALO SOGGETTO A CARICHI ASSIALI			
γ _r =	1.00	γ _c =	1.00
		γ _{cu} =	1.00
		γ _φ =	1.00

PORTATA LATERALE

strato	H strato	γ' [t/mc]	σ _v [t/mq]	As [mq]	φ [°]	μ	k compress	Cu [t/mq]	α	Rs [t] - compr	k trazione	Rs [t] - traz
1	0.00	0.00	5.15	0.00	0	0.00	0.70	5.47	0.65	0.00	0.50	0.00
2	3.29	0.90	6.63	10.34	0	0.00	0.70	6.44	0.53	35.40	0.50	35.40
3	6.00	1.00	11.11	18.85	38	0.78	0.70	0.00	0.00	114.53	0.50	81.81
4	14.00	0.90	20.41	43.98	0	0.00	0.70	7.60	0.40	133.71	0.50	133.71
5	10.71	1.00	32.07	33.65	38	0.78	0.70	0.00	0.00	504.70	0.50	421.45
6	0.00	0.00	37.42	0.00	0	0.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00
										Rs_{tot} =	788.34	672.37

PORTATA DI PUNTA

tipo terreno incoerente	γ' [t/mc]	A _p [mq]	σ _{v,b} [t/mq]	terreno incoerente		terreno coerente		R _b [t]
				φ [°]	N _q	α	Cu [t/mq]	
	1.00	0.7854	37.42	38.00	21.35	9.00	0.00	16.76

modifica parametri alla punta Δφ [°] = 0 ΔCu [t/mq] = 0

CAPACITA' PORTANTE DEL PALO SINGOLO

n° verticali indagate 5 fattore di correlazione ζ₃ = 1.50 ζ₄ = 1.34

Pali trivellati			
	R1	R2	R3
$\gamma_{R,base} =$	1.00	1.70	1.35
$\gamma_{R,lat,c} =$	1.00	1.45	1.15
$\gamma_{R,lat,t} =$	1.00	1.60	1.25
$R_{c,d} = (R_{s,tot}/\gamma_{R,lat,c} + R_b/\gamma_{R,base})/\zeta_4 =$	536.73	369.03	465.29
$R_{t,d} = R_{s,tot}/\gamma_{R,lat,t}/\zeta_4 + W_{palo} =$	462.93	294.84	373.28

	N _{Ed} [t]	R _d [t]	F _s
N _{max}	-463.10	465.29	1.005
N _{min}	258.91	373.28	1.44

tipo di verifica	coeff. rid. gruppo
R3	1.00
R3	1.00

4.4 ANALISI STRUTTURALE

4.4.1 Sollecitazioni di calcolo

I seguenti grafici riportano le massime azioni di taglio e flettenti agenti per le combinazioni di calcolo significative.

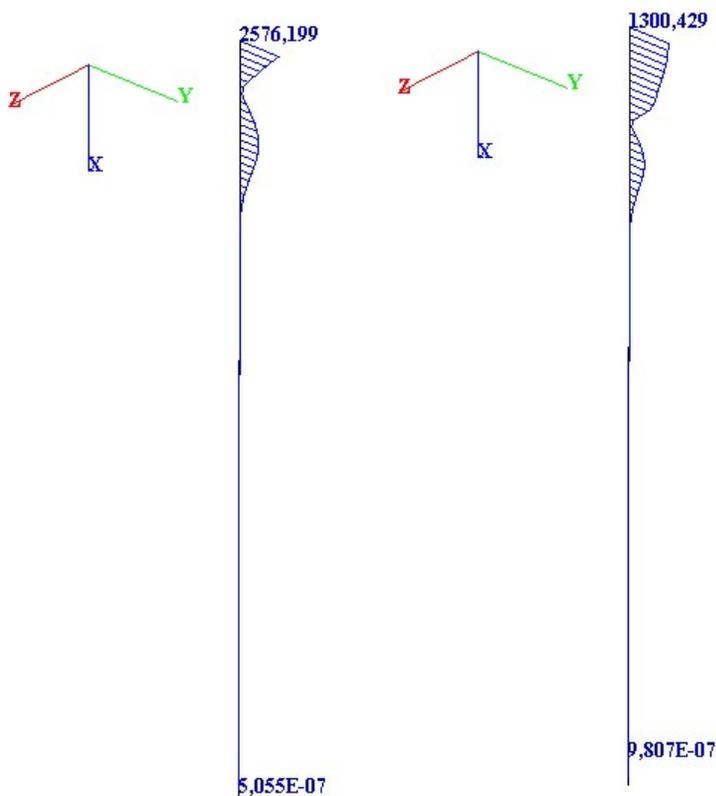


Figura 4-12. Massimo momento (sx) e taglio (dx) combinazione SLU-SLV

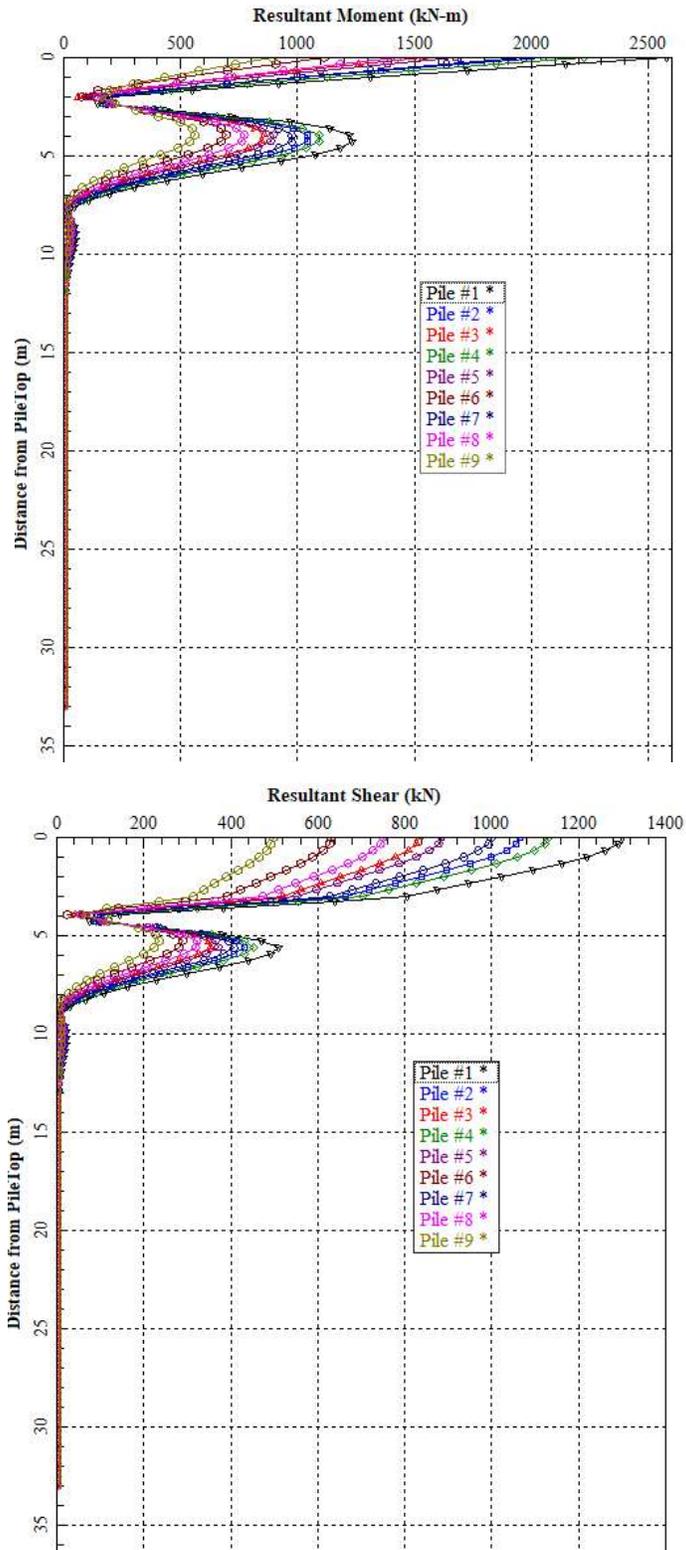


Figura 4-13. Andamento del momento e del taglio lungo il palo in combinazione SLU-SLV

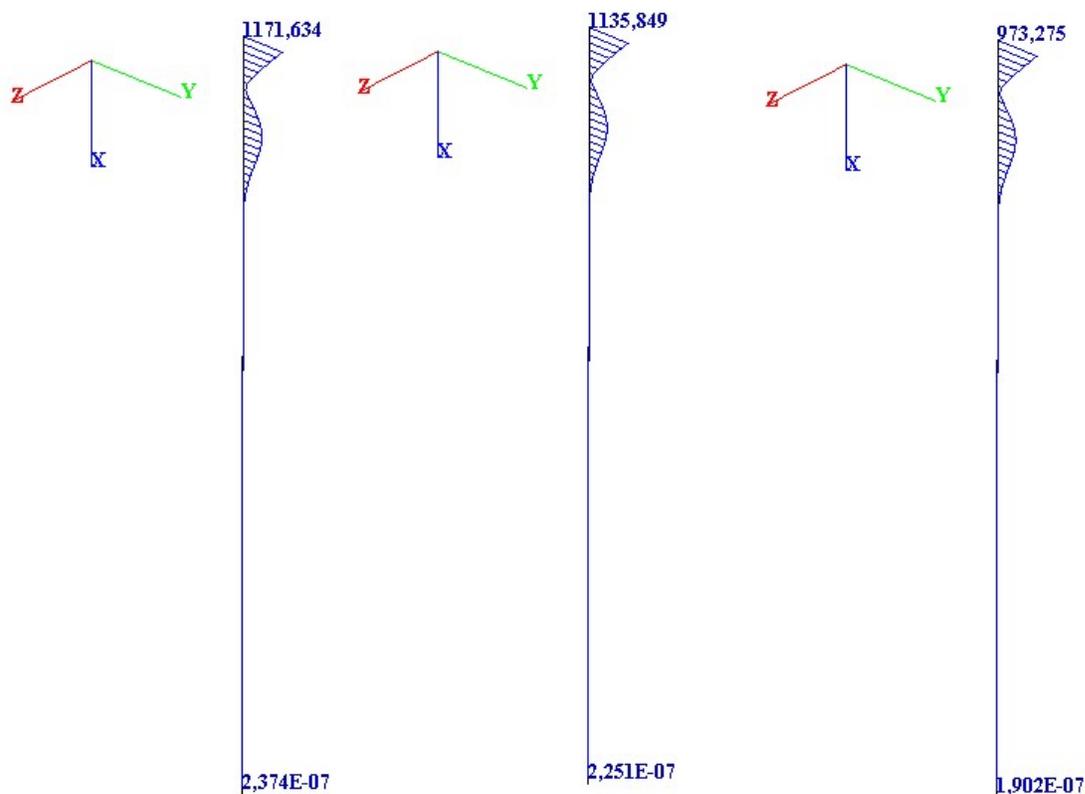


Figura 4-14. Massimo momento SLE Rara (sx) e Freq (centro) e Quasi Perm. (dx)

Per semplicità di lettura si riepilogano le sollecitazioni a testa palo ottenute con il software “Group” applicando i carichi dovuti alla sovrastruttura.

$N_{max} = 4432.74$ kN (compressione)

$N_{min} = - 2589.08$ kN (trazione)

$M = 2576.20$ kN/m

$V = 1300.43$ kN

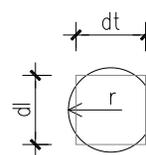
4.4.2 Verifica strutturale

Caratteristiche meccaniche dei materiali

Calcestruzzo	C25/30	$R_{ck} =$	30	N/mm ²	$f_{ck} =$	25	N/mm ²	
	$\gamma_c =$	1.5	$\alpha_{cc} =$	0.85	$f_{cd} =$	14.17	N/mm ²	
			$E_c =$	31476	N/mm ²	$f_{ctm} =$	2.56	N/mm ²
Acciaio	B450C	$E_s =$	200000	N/mm ²	$f_{yk} =$	450	N/mm ²	
	$\gamma_s =$	1.15	$\varepsilon'_{se} =$	1.96	$f_{yd} =$	391.3	N/mm ²	

Geometria della sezione

raggio area	$r =$	0.50	
dimensione longitudinale equivalente	$beq =$	0.82	m
copriferro	$c =$	52.00	m



Combinazione	w_d [mm]	Verifica
FREQ (CC89)	0.1193	OK

Comb. Quasi perm.

Combinazione	posizione	N_{Ed} [kN]	M_{Ed} [kNm]
QUASI PERM (CC93)	TESTA PALO	1372.47	973.28

Combinazione	w_d [mm]	Verifica
QUASI PERM (CC93)	0.0835	OK

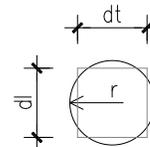
Verifica a taglio sezione cambio armatura a taglio

Caratteristiche meccaniche dei materiali

Calcestruzzo C25/30	$R_{ck} = 30$ N/mm ²	$f_{ck} = 25$ N/mm ²
$\gamma_c = 1.5$	$\alpha_{cc} = 0.85$	$f_{cd} = 14.17$ N/mm ²
	$E_c = 31476$ N/mm ²	$f_{ctm} = 2.56$ N/mm ²
Acciaio B450C	$E_s = 200000$ N/mm ²	$f_{yk} = 450$ N/mm ²
$\gamma_s = 1.15$	$\epsilon'_{se} = 1.96$	$f_{yd} = 391.3$ N/mm ²

Geometria della sezione

raggio area	$r = 0.50$
dimensione longitudinale equivalente	$beq = 0.82$ m
copriferro	$c = 52.00$ m



Caratteristiche geometriche della sezione

$B = 818$ mm base	n.	ϕ (mm)	A_s (mm ²)	y (mm)
$H = 818$ mm altezza	36	26	19113	52.00
$c = 52.00$ mm coprifer.			-	
N_{Ed} positivo di compressione			-	
M_{Ed} positivo se tende le fibre inferiori della sezione			-	
y distanza dell'armatura dal lembo superiore			-	
			Σ 19113	mm ²

Verifiche agli Stati Limite Ultimi

Flessione

Combinazione	posizione	N_{Ed} [kN]	M_{Ed} [kNm]	V_{Ed} [kN]	M_{Rd} [kNm]	$\frac{M_{Rd}}{M_{Ed}}$
SLV	FINE SPIRALE			509.85		

5 FONDAZIONE SPALLA - AMPLIAMENTO 2 (NUOVA REALIZZAZIONE) – CARREGGIATA SUD

Si determinano nel seguito le azioni agenti sui pali di fondazione della spalla della carreggiata Sud (12 pali). Nello specifico si dimostrerà che esse sono inferiori di quelle determinate in precedenza per la spalla della carreggiata Nord (9 pali)

5.1 AZIONI DI CALCOLO

La seguente tabella riporta le sollecitazioni di calcolo agenti nel baricentro della palificata.

Il sistema di riferimento utilizzato coincide con quello utilizzato per l'analisi della spalla.

Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
------------	------------	------------	-------------	-------------	-------------

SLU A1-M1	CC 1	Gr 1	-41	5884	-11966	-11825	-6576	-11169
	CC 2	Gr 1	-41	5884	-16154	-8817	-8766	-11169
	CC 3	Gr 1	-41	5884	-12419	-10721	-7023	-11169
	CC 4	Gr 1	-41	5884	-16607	-7713	-9213	-11169
	CC 5	Gr 1	-346	5760	-13779	-8222	-17679	-11001
	CC 6	Gr 1	-346	5760	-17967	-5214	-19869	-11001
	CC 7	Gr 1	-346	5760	-18570	-3742	-20466	-11001
	CC 8	Gr 1	-346	5760	-13695	-8146	-17770	-11001
	CC 9	Gr 1	-346	5760	-17883	-5139	-19960	-11001
	CC 10	Gr 1a	-346	5760	-18486	-3667	-20557	-11001
	CC 11	Gr 1a	-346	5760	-17309	-5757	-17768	-11001
	CC 12	Gr 1a	-346	5760	-17342	-5787	-17731	-11001
	CC 13	Gr 2a	-449	5735	-13192	-9574	-16411	-10929
	CC 14	Gr 2a	-449	5735	-13644	-8470	-16859	-10929
	CC 15	Gr 2a	-449	5735	-13159	-9544	-16448	-10929
	CC 16	Gr 2a	-449	5735	-13611	-8440	-16895	-10929
	CC 17	Gr 2a	-449	5735	-17380	-6567	-18602	-10929
	CC 18	Gr 2a	-449	5735	-17832	-5462	-19049	-10929
	CC 19	Gr 2a	-449	5735	-17347	-6536	-18638	-10929
	CC 20	Gr 2a	-449	5735	-17799	-5432	-19086	-10929
	CC 21	Gr 2b	-346	5480	-13154	-7499	-15541	-10470
	CC 22	Gr 2b	-346	5480	-13607	-6395	-15989	-10470
	CC 23	Gr 2b	-346	5480	-13121	-7469	-15578	-10470
	CC 24	Gr 2b	-346	5480	-13573	-6365	-16025	-10470
	CC 25	Gr 2b	-346	5480	-17342	-4492	-17731	-10470
	CC 26	Gr 2b	-346	5480	-17795	-3388	-18179	-10470
	CC 27	Gr 2b	-346	5480	-17309	-4461	-17768	-10470
	CC 28	Gr 2b	-346	5480	-17761	-3357	-18215	-10470

SLV M1	CC 45	Gr Ex + 0.3EyEz	-4223	5248	-12989	-7786	-24746	-11438
	CC 46	Gr Ex + 0.3EyEz	-4223	5248	-12977	-7775	-24759	-11438
	CC 47	Gr Ey + 0.3ExEz	-1286	9584	-12989	-25278	-12899	-13739
	CC 48	Gr Ey + 0.3ExEz	-1286	9584	-12977	-25267	-12912	-13739
	CC 49	Gr Ez + 0.3ExEy	-1286	5400	-14750	-7655	-13865	-9563
	CC 50	Gr Ez + 0.3ExEy	-1286	5400	-14737	-7644	-13879	-9563
	CC 51	Gr Ex + 0.3Ey	-4223	5248	-12235	-8353	-24332	-11438

	CC 52	Gr Ex + 0.3Ey	-4223	5248	-12222	-8342	-24345	-11438
	CC 53	Gr Ey + 0.3Ex	-1286	9584	-12235	-25845	-12485	-13739
	CC 54	Gr Ey + 0.3Ex	-1286	9584	-12222	-25833	-12498	-13739
	CC 55	Gr Ez	-27	3671	-14750	-1180	-8788	-6969
	CC 56	Gr Ez	-27	3671	-14737	-1168	-8802	-6969

SLE RARA	CC 69	Gr 1	-27	4268	-11966	-6087	-6470	-8102
	CC 70	Gr 1	-27	4268	-12368	-5105	-6868	-8102
	CC 71	Gr 1	-231	4186	-13309	-3558	-14341	-7991
	CC 72	Gr 1	-231	4186	-13711	-2576	-14739	-7991
	CC 73	Gr 1	-231	4186	-13247	-3502	-14408	-7991
	CC 74	Gr 1	-231	4186	-13649	-2520	-14806	-7991
	CC 75	Gr 1a	-231	4186	-12821	-3960	-12784	-7991
	CC 76	Gr 1a	-231	4186	-12846	-3982	-12757	-7991
	CC 77	Gr 2a	-307	4188	-12874	-4655	-13402	-7977
	CC 78	Gr 2a	-307	4188	-12849	-4633	-13429	-7977
	CC 79	Gr 2a	-307	4188	-13151	-3897	-13727	-7977
	CC 80	Gr 2b	-231	3999	-12846	-3118	-12757	-7637
	CC 81	Gr 2b	-231	3999	-12821	-3096	-12784	-7637
CC 82	Gr 2b	-231	3999	-13123	-2360	-13083	-7637	

SLE FREQUENTE	CC 83	Gr 1	-27	4082	-11966	-5223	-6470	-7748
	CC 84	Gr 1	-27	4082	-12268	-4487	-6768	-7748
	CC 85	Gr 1	-27	4082	-12846	-4377	-9576	-7748
	CC 86	Gr 1	-27	4082	-13148	-3641	-9874	-7748
	CC 87	Gr 1	-27	4082	-12821	-4355	-9603	-7748
	CC 88	Gr 1	-27	4082	-13123	-3619	-9901	-7748
	CC 89	Gr 2a	-58	4157	-11977	-5838	-6727	-7884
	CC 90	Gr 2a	-58	4157	-12279	-5102	-7026	-7884
	CC 91	Gr 2a	-27	4082	-11966	-5223	-6470	-7748
	CC 92	Gr 2a	-27	4082	-12268	-4487	-6768	-7748

GR	CC 93	Gr 1	-27	3522	-11966	-2631	-6470	-6686
----	-------	------	-----	------	--------	-------	-------	-------

Sono ora individuate le combinazioni maggiormente significative.

COMBINAZIONI A1-M1

	Vx max	N min	My max	Vx min	Vy min	Mx min		
COMB.	CC 1	CC 7	CC 10	CC 13	CC 21	CC 28		
N _{Ed} [kN] =	11966.2	18570.1	18486.5	13192.0	13154.3	17761.3		
M _{x,Ed} [kNm] =	-11824.9	-3742.1	-3666.5	-9574.1	-7499.2	-3357.4		
M _{y,Ed} [kNm] =	-6575.7	-20466.1	-20556.9	-16411.4	-15541.4	-18215.4		
M _{z,Ed} [kNm] =	-11168.8	-11001.4	-11001.4	-10929.0	-10470.2	-10470.2		
V _{x,Ed} =	-40.5	-346.3	-346.3	-449.3	-346.3	-346.3		
V _{y,Ed} =	5883.6	5760.0	5760.0	5735.2	5480.4	5480.4		

COMBINAZIONI SLV-M1

	Vx min	My max	Vy max	N min	Mx max	N max	Vx max	Mx min
COMB.	CC 45	CC 46	CC 47	CC 49	CC 53	CC 54	CC 55	CC 56
N _{Ed} [kN] =	12989.3	12976.9	12989.3	14749.8	12234.8	12222.4	14749.8	14737.4
M _{x,Ed} [kNm] =	-7786.5	-7775.3	-25278.0	-7655.3	-25844.5	-25833.4	-1179.6	-1168.4
M _{y,Ed} [kNm] =	-24745.8	-24759.3	-12899.0	-13865.5	-12484.8	-12498.3	-8788.3	-8801.7
M _{z,Ed} [kNm] =	-11438.2	-11438.2	-13739.2	-9562.8	-13739.2	-13739.2	-6969.2	-6969.2
V _{x,Ed} =	-4222.6	-4222.6	-1285.7	-1285.7	-1285.7	-1285.7	-27.0	-27.0
V _{y,Ed} =	5248.1	5248.1	9584.3	5399.8	9584.3	9584.3	3671.5	3671.5

COMBINAZIONI RARA

	N max	N min	My max	Vx min	Vy min	Mx min		
COMB.	CC 69	CC 72	CC 74	CC 77	CC 80	CC 82		
N _{Ed} [kN] =	11966.2	13710.9	13649.0	12874.2	12846.3	13123.0		
M _{x,Ed} [kNm] =	-6086.7	-2576.1	-2520.2	-4655.3	-3118.3	-2359.9		
M _{y,Ed} [kNm] =	-6469.6	-14738.8	-14806.1	-13401.9	-12757.4	-13082.7		
M _{z,Ed} [kNm] =	-8102.4	-7990.8	-7990.8	-7976.6	-7636.7	-7636.7		
V _{x,Ed} =	-27.0	-230.9	-230.9	-307.1	-230.9	-230.9		
V _{y,Ed} =	4267.9	4185.6	4185.6	4187.9	3999.2	3999.2		

COMBINAZIONI FREQUENTE

	N max	N min	M min	Mx min	Vy max			
COMB.	CC 83	CC 86	CC 87	CC 88	CC 89			
N _{Ed} [kN] =	11966.2	13147.8	12821.5	13123.0	11977.4			
M _{x,Ed} [kNm] =	-5222.8	-3641.0	-4354.6	-3618.6	-5837.6			
M _{y,Ed} [kNm] =	-6469.6	-9874.4	-9602.9	-9901.3	-6727.4			
M _{z,Ed} [kNm] =	-7748.3	-7748.3	-7748.3	-7748.3	-7884.2			
V _{x,Ed} =	-27.0	-27.0	-27.0	-27.0	-57.5			
V _{y,Ed} =	4081.5	4081.5	4081.5	4081.5	4157.0			

COMBINAZIONI QUASI PERMANENTE

	Mx max							
COMB.	CC 93							
N _{Ed} [kN] =	11966.2							
M _{x,Ed} [kNm] =	-2631.2							
M _{y,Ed} [kNm] =	-6469.6							
M _{z,Ed} [kNm] =	-6685.9							
V _{x,Ed} =	-27.0							
V _{y,Ed} =	3522.4							

Tabella 5-1. Sollecitazioni di calcolo risultanti nel baricentro della palificata – Sistema di riferimento analisi della spalla

Tali sollecitazioni sono di seguito trasformate nel sistema di riferimento di Group.

COMBINAZIONI A1-M1

	COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
1	CC 1	11966.23	-5883.55	11824.94	40.53	6575.69	11168.81
2	CC 7	18570.07	-5760.01	3742.07	346.32	20466.15	11001.39
3	CC 10	18486.49	-5760.01	3666.53	346.32	20556.94	11001.39
4	CC 13	13191.95	-5735.21	9574.09	449.25	16411.42	10929.04
5	CC 21	13154.27	-5480.43	7499.20	346.32	15541.35	10470.21
6	CC 28	17761.33	-5480.43	3357.36	346.32	18215.44	10470.21

COMBINAZIONI SLV-M1

	COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
7	CC 45	12989.27	-5248.14	7786.48	4222.62	24745.82	11438.18
8	CC 46	12976.88	-5248.14	7775.29	4222.62	24759.27	11438.18
9	CC 47	12989.27	-9584.32	25277.97	1285.70	12899.01	13739.17
10	CC 49	14749.77	-5399.84	7655.28	1285.70	13865.46	9562.82
11	CC 53	12234.76	-9584.32	25844.55	1285.70	12484.82	13739.17
12	CC 54	12222.38	-9584.32	25833.36	1285.70	12498.27	13739.17
13	CC 55	14749.77	-3671.50	1179.62	27.02	8788.25	6969.22
14	CC 56	14737.39	-3671.50	1168.42	27.02	8801.70	6969.22

COMBINAZIONI RARE

	COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
1	CC 69	11966.233	-4267.919	6086.714	27.022	6469.630	8102.419
2	CC 72	13710.938	-4185.555	2576.122	230.879	14738.843	7990.810
3	CC 74	13649.026	-4185.555	2520.160	230.879	14806.095	7990.810
4	CC 77	12874.172	-4187.896	4655.264	307.128	13401.868	7976.561
5	CC 80	12846.263	-3999.174	3118.309	230.879	12757.376	7636.686
6	CC 82	13123.034	-3999.174	2359.875	230.879	13082.707	7636.686

COMBINAZIONI FREQ.

	COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
7	CC 83	11966.233	-4081.537	5222.836	27.022	6469.630	7748.295
8	CC 86	13147.799	-4081.537	3640.967	27.022	9874.436	7748.295
9	CC 87	12821.498	-4081.537	4354.631	27.022	9602.907	7748.295
10	CC 88	13123.034	-4081.537	3618.582	27.022	9901.337	7748.295
11	CC 89	11977.397	-4157.026	5837.618	57.521	6727.427	7884.245

COMBINAZIONI Q.P.

	COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
12	CC 93	11966.233	-3522.393	2631.202	27.022	6469.630	6685.921

5.2 MODELLO DI CALCOLO

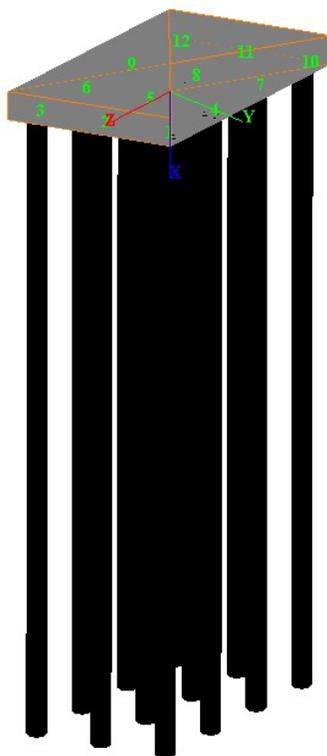


Figura 5-1. Modello di calcolo palificata: vista

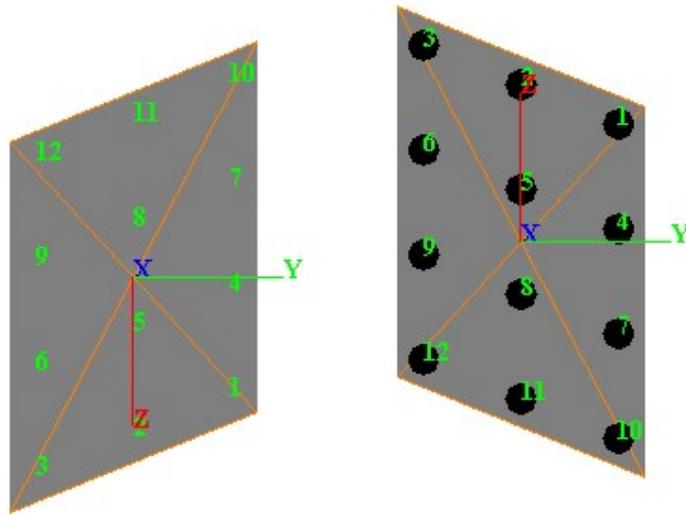


Figura 5-2. Modello di calcolo palificata: piano y-z

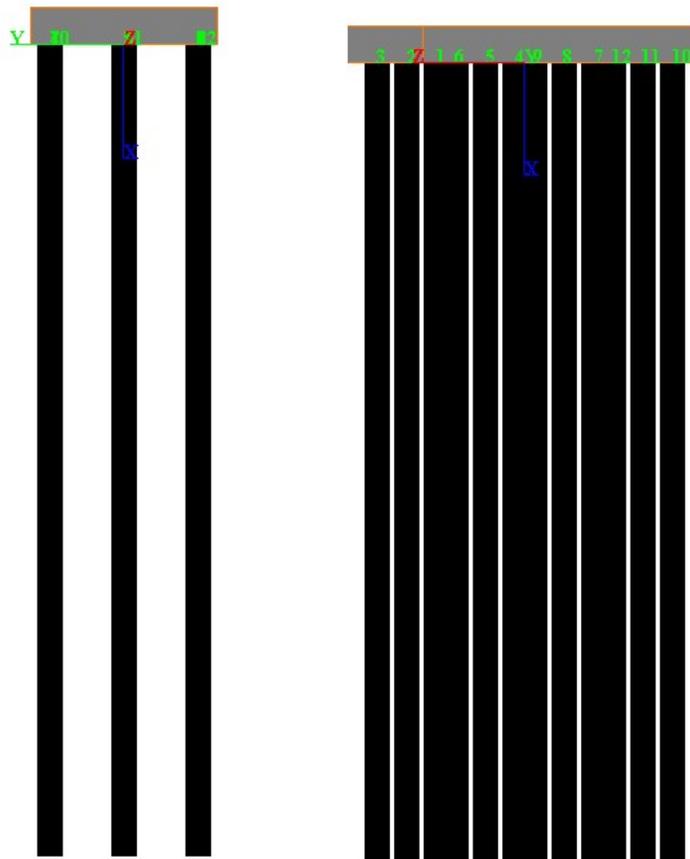
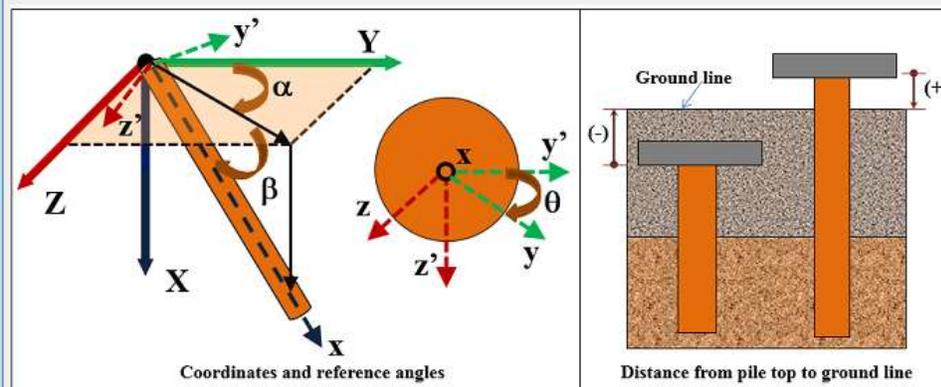


Figura 5-3. Caratteristiche geometriche e meccaniche sezione trasversale pali

Figura 5-4. Parametri dei pali in GROUP

* Angle Alpha, angle from Y(+) Axis to the projection of pile on the Y-Z plane (use 0 for vertical pile)
 ** Angle Beta, angle from the projection of pile on the Y-Z plane to the pile axis (use 90 for vertical pile)
 *** Distance from pile top to ground line
 (+) positive if soil ground line is below the pile top
 (-) negative if soil ground line is above the pile top



Pile #	Pile-Top Vertical X-Coordinates, (m)	Pile-Top Horizontal Y-Coordinates, (m)	Pile-Top Horizontal Z-Coordinates, (m)	Angle Alpha* (use 0 for vertical pile) (DEG)	Angle Beta** (use 90 for vertical pile) (DEG)	Angle Theta (section rotation) (DEG)	Vert. Dist. from Pile Top to Ground Line ***, (m)
1	0	3	3,6376	0	90	0	0
2	0	0	4,8583	0	90	0	0
3	0	-3	6,0789	0	90	0	0
4	0	3	0,3987	0	90	0	0
5	0	0	1,6194	0	90	0	0
6	0	-3	2,8401	0	90	0	0
7	0	3	-2,8401	0	90	0	0
8	0	0	-1,6194	0	90	0	0
9	0	-3	-0,3987	0	90	0	0
10	0	3	-6,0789	0	90	0	0

Pile #	Pile-Top Vertical X-Coordinates, (m)	Pile-Top Horizontal Y-Coordinates, (m)	Pile-Top Horizontal Z-Coordinates, (m)	Angle Alpha* (use 0 for vertical pile) (DEG)	Angle Beta** (use 90 for vertical pile) (DEG)	Angle Theta (section rotation) (DEG)	Vert. Dist. from Pile Top to Ground Line ***, (m)
3	0	-3	6,0789	0	90	0	0
4	0	3	0,3987	0	90	0	0
5	0	0	1,6194	0	90	0	0
6	0	-3	2,8401	0	90	0	0
7	0	3	-2,8401	0	90	0	0
8	0	0	-1,6194	0	90	0	0
9	0	-3	-0,3987	0	90	0	0
10	0	3	-6,0789	0	90	0	0
11	0	0	-4,8583	0	90	0	0
12	0	-3	-3,6376	0	90	0	0

Figura 5-5. Disposizione dei micropali in GROUP

Layer	Soil Type	Depth for Top of Soil Layer (m)	Depth for Bottom of Soil Layer (m)	Properties of Layer
1	Silt (cemented c-phi)	-2,71	0	1: Cemented c-phi Soil
2	Silt (cemented c-phi)	0	3,29	2: Cemented c-phi Soil
3	Sand (Reese)	3,29	9,29	3: Sand (Reese, et al.)
4	Silt (cemented c-phi)	9,29	23,29	4: Cemented c-phi Soil
5	Sand (Reese)	23,29	37,29	5: Sand (Reese, et al.)

Add Row Insert Row Delete Row

1=Top, 2=Bottom	Effective Unit Weight (kN/m ³)	Undrained Cohesion, c (kN/m ²)	Friction Angle (DEG.)	p-y Modulus, k (kN/m ³)	Strain Factor E50
1	19	50	26	20000	0,007
2	19	58,943	26	20000	0,007

 Cemented c-phi Soil 2

1=Top, 2=Bottom	Effective Unit Weight (kN/m ³)	Undrained Cohesion, c (kN/m ²)	Friction Angle (DEG.)	p-y Modulus, k (kN/m ³)	Strain Factor E50
1	19	58,943	26	20000	0,007
2	19	69,8	26	20000	0,007

 Sand (Reese, et al.) 3

1=Top, 2=Bottom	Effective Unit Weight (kN/m ³)	Friction Angle, (DEG.)	p-y Modulus, k (kN/m ³)
1	20	38	50000
2	20	38	50000

 Cemented c-phi Soil 4

1=Top, 2=Bottom	Effective Unit Weight (kN/m ³)	Undrained Cohesion, c (kN/m ²)	Friction Angle (DEG.)	p-y Modulus, k (kN/m ³)	Strain Factor E50
1	19	69	26	20000	0,007
2	19	83	26	20000	0,007

 Sand (Reese, et al.) 5

1=Top, 2=Bottom	Effective Unit Weight (kN/m ³)	Friction Angle, (DEG.)	p-y Modulus, k (kN/m ³)
1	20	38	50000
2	20	38	50000

Figura 5-6. Caratteristiche meccaniche terreno

5.3 ANALISI GEOTECNICA

5.3.1 Sollecitazioni di calcolo

I seguenti grafici riportano le massime azioni assiali, compressione e trazione, agenti per le combinazioni di calcolo significative.

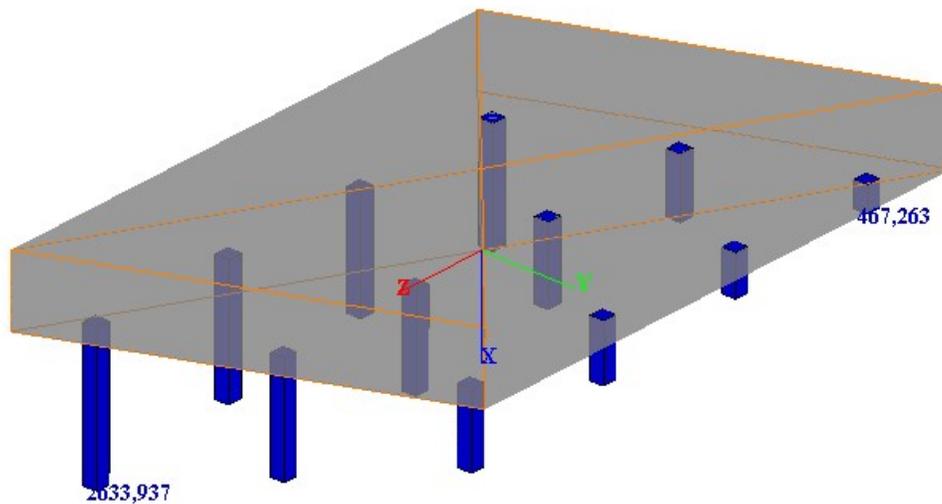


Figura 5-7. Involuppo azioni assiale massime comb. SLU

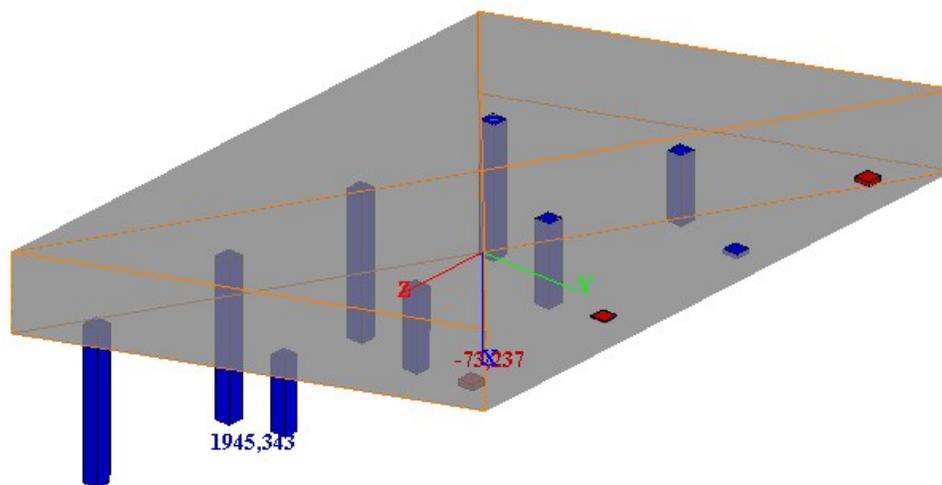


Figura 5-8. Involuppo azioni assiale minime comb. SLU

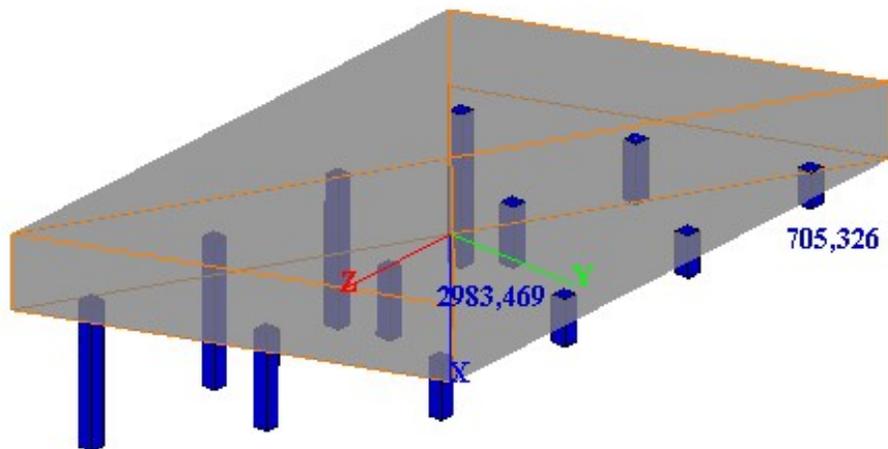


Figura 5-9. Inviluppo azioni assiale massime comb. SLV

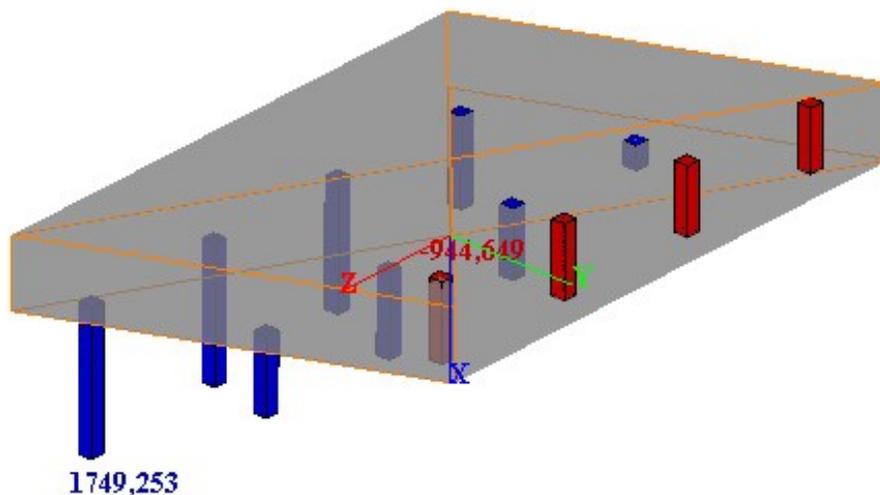


Figura 5-10. Inviluppo azioni assiale minime comb. SLV

Per semplicità di lettura si riepilogano le sollecitazioni a testa palo ottenute con il software “Group” applicando i carichi dovuti alla sovrastruttura.

$N_{max} = 2983.47 \text{ kN}$ (compressione)

$N_{min} = - 944.65 \text{ kN}$ (trazione)

Le sollecitazioni agenti sui pali della spalla della carreggiata Sud sono inferiori di quelle determinate per la carreggiata Nord ($2983.47 \text{ kN} < 4432.74 \text{ kN}$)

Adottano la stessa lunghezza dei pali e le stesse armature, le verifiche geotecniche e strutturali sono dunque soddisfatte.

6 FONDAZIONE PILA - AMPLIAMENTO 2 (NUOVA REALIZZAZIONE) – CARREGGIATA NORD

6.1 AZIONI DI CALCOLO

COMBINAZIONI A1-M1

COMB.	CC 1	CC 2	CC 19	CC 26	CC 28	CC 38	CC 46	CC 48	CC 49	CC 50
N_{Ed} [kN] =	4304.3	7978.4	5930.0	7436.5	6899.8	7436.5	5810.8	4304.3	4304.3	5810.8
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	55.2	-127.4	-662.0	23.1	203.8	23.1	474.7	55.2	55.2	32.1
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	2480.0	5286.3	3704.9	6328.3	6596.7	3848.2	2445.3	1682.0	2679.5	3321.4
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	69.7	69.7	97.1	69.7	69.7	69.7	69.7	69.7	69.7	115.4
$V_{x,Ed}$ =	38.1	-111.4	-111.4	111.4	111.4	-185.7	-63.4	-63.4	63.4	38.4
$V_{y,Ed}$ =	139.5	139.5	194.2	139.5	139.5	139.5	139.5	139.5	139.5	230.7

COMBINAZIONI URTO TRENO

COMB.	URTO-X	URTO-Y							
N_{Ed} [kN] =	4304.3	4304.3							
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	0.0	-4186.4							
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	12180.7	0.0							
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	0.0	0.0							
$V_{x,Ed}$ =	2000.0	0.0							
$V_{y,Ed}$ =	0.0	750.0							

COMBINAZIONI SLV

COMB.	CC 119	CC 123	CC 128	CC 130	CC 131	CC 139	CC 145	CC 149		
N_{Ed} [kN] =	4822.5	4883.4	2689.8	3672.1	5143.7	6292.1	4787.5	4848.4		
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	-342.0	-2158.1	-342.0	100.0	-431.2	-431.2	-591.4	-2407.5		
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	11680.1	5246.8	4129.4	4635.6	-6305.7	743.8	-6571.1	-75.0		
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	124.6	306.8	124.6	124.6	124.6	124.6	124.6	306.8		
$V_{x,Ed}$ =	1202.2	360.7	360.7	360.7	-1202.2	-360.7	-1202.2	-360.7		
$V_{y,Ed}$ =	249.2	613.6	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2	613.6		

COMBINAZIONI RARA

COMB.	CC 179	CC 180	CC 203	CC 205	CC 207	CC 209	CC 210	CC 213		
N_{Ed} [kN] =	5909.9	5602.7	5508.5	5111.0	5508.5	4304.3	4304.3	4304.3		
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	-9.7	-147.9	101.8	235.6	101.8	436.4	436.4	141.3		
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	3984.7	3627.2	5032.1	5230.9	2965.3	1848.3	2513.2	1888.7		
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	76.9		
$V_{x,Ed}$ =	-74.3	-49.8	123.8	123.8	-123.8	-42.3	42.3	-34.0		
$V_{y,Ed}$ =	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0	153.8		

COMBINAZIONI FREQUENTE

COMB.	CC 215	CC 216	CC 217	CC 221	CC 237	CC 241	CC 247			
N_{Ed} [kN] =	5508.5	5278.1	5111.0	4304.3	4304.3	4304.3	4304.3			
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	101.8	-1.9	235.6	436.4	436.4	436.4	377.3			
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	3998.7	3572.9	4197.5	2180.7	2387.4	1974.1	2122.3			
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	52.6			
$V_{x,Ed}$ =	0.0	0.0	0.0	0.0	24.8	-24.8	-6.8			
$V_{y,Ed}$ =	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0	105.1			

COMBINAZIONI QUASI PERMANENTE

COMB.	CC 251									
N_{Ed} [kN] =	4304.3									
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	436.4									
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	2180.7									
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	46.5									
$V_{x,Ed}$ =	0.0									
$V_{y,Ed}$ =	93.0									

AZIONI SOLLECITANTI PER LE VERIFICHE DELLE STRUTTURE DI FONDAZIONE IN CONDIZIONI SISMICHE

Secondo il p.to 7.2.5 del D.M. 14/01/2008 per strutture progettate sia per CD "A" sia per CD "B" il dimensionamento delle strutture di fondazione e la verifica di sicurezza del complesso fondazione-terreno devono essere eseguiti assumendo come azioni in fondazione le resistenze degli elementi strutturali soprastanti.

Più precisamente, la forza assiale negli elementi strutturali verticali derivante dalla combinazione delle azioni deve essere associata al concomitante valore resistente del momento flettente e del taglio; si richiede tuttavia che tali azioni risultino non maggiori di quelle trasferire dagli elementi soprastanti, amplificate per il coefficiente γ_{Rd} e comunque non maggiori di quelle derivanti da un'analisi elastica della struttura in elevazione eseguita con fattori di struttura q pari a 1.

In via semplificata, ma comunque a favore di sicurezza, nelle successive verifiche si considerano le sollecitazioni derivanti dall'analisi amplificate del coefficiente γ_{Rd} .

nel caso in esame la struttura è progettata per CD B => $\gamma_{Rd} = 1.1$

Le sollecitazioni incrementate diventano quindi:

COMB.	CC 119	CC 123	CC 128	CC 130	CC 131	CC 139	CC 145	CC 149
N_{Ed} [kN] =	5304.8	5371.8	2958.8	4039.3	5658.0	6921.3	5266.3	5333.3
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	-376.2	-2373.9	-376.2	110.0	-474.3	-474.3	-650.6	-2648.3
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	12848.1	5771.5	4542.3	5099.2	-6936.2	818.2	-7228.2	-82.5
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	137.0	337.5	137.0	137.0	137.0	137.0	137.0	337.5
$V_{x,Ed}$ =	1322.5	396.7	396.7	396.7	-1322.5	-396.7	-1322.5	-396.7
$V_{y,Ed}$ =	274.1	674.9	274.1	274.1	274.1	274.1	274.1	674.9

Tabella 6-1. Sollecitazioni di calcolo risultanti nel baricentro della palificata – Sistema di riferimento analisi della pila
 Tali sollecitazioni sono di seguito trasformate nel sistema di riferimento di Group.

COMBINAZIONI A1-M1

COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
CC 1	4304.27	139.46	55.17	38.07	2479.97	-69.73
CC 2	7978.38	139.46	-127.39	-111.42	5286.29	-69.73
CC 19	5929.98	194.22	-661.99	-111.42	3704.94	-97.11
CC 26	7436.48	139.46	23.14	111.42	6328.35	-69.73
CC 28	6899.81	139.46	203.77	111.42	6596.68	-69.73
CC 38	7436.48	139.46	23.14	-185.70	3848.15	-69.73
CC 46	5810.77	139.46	474.72	-63.44	2445.28	-69.73
CC 48	4304.27	139.46	55.17	-63.44	1682.02	-69.73
CC 49	4304.27	139.46	55.17	63.44	2679.46	-69.73
CC 50	5810.77	230.72	32.08	38.44	3321.45	-115.36

COMBINAZIONI URTO

COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
URTO-X	4304.274	0	0	2000	12180.74	URTO-X
URTO-Y	4304.274	750	-4186.35	0	0	URTO-Y

COMBINAZIONI SLV

COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
CC 119	5304.796	274.0722	-376.1708	1322.463	12848.1	-137.0361
CC 123	5371.791	674.9493	-2373.869	396.739	5771.46	-337.4746
CC 128	2958.805	274.0722	-376.1708	396.739	4542.329	-137.0361
CC 130	4039.289	274.0722	110.0472	396.739	5099.192	-137.0361
CC 131	5658.036	274.0722	-474.2921	-1322.463	-6936.248	-137.0361
CC 139	6921.261	274.0722	-474.2921	-396.739	818.1668	-137.0361
CC 145	5266.294	274.0722	-650.5759	-1322.463	-7228.213	-137.0361
CC 149	5333.289	674.9493	-2648.274	-396.739	-82.51759	-337.4746

COMBINAZIONI RARA

COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
CC 179	5909.911	92.97068	-9.655452	-74.27923	3984.666	-46.48534
CC 180	5602.654	92.97068	-147.921	-49.82804	3627.19	-46.48534
CC 203	5508.502	92.97068	101.846	123.7987	5032.134	-46.48534
CC 205	5110.972	92.97068	235.6478	123.7987	5230.899	-46.48534
CC 207	5508.502	92.97068	101.846	-123.7987	2965.307	-46.48534
CC 209	4304.274	92.97068	436.3505	-42.29476	1848.26	-46.48534
CC 210	4304.274	92.97068	436.3505	42.29476	2513.219	-46.48534
CC 213	4304.274	153.8145	141.2578	-33.95998	1888.683	-76.90726

COMBINAZIONI FREQUENTE

COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
CC 215	5508.502	92.97068	101.846	0	3998.721	-46.48534
CC 216	5278.059	92.97068	-1.853107	0	3572.903	-46.48534
CC 217	5110.972	92.97068	235.6478	0	4197.486	-46.48534
CC 221	4304.274	92.97068	436.3505	0	2180.739	-46.48534
CC 237	4304.274	92.97068	436.3505	24.75974	2387.422	-46.48534
CC 241	4304.274	92.97068	436.3505	-24.75974	1974.056	-46.48534
CC 247	4304.274	105.1394	377.3319	-6.791997	2122.328	-52.56972

COMBINAZIONI QUASI PERM.

COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
CC 251	4304.274	92.97068	436.3505	0	2180.739	-46.48534

Tabella 6-2. Sollecitazioni di calcolo risultanti nel baricentro della palificata – Sistema di riferimento Group

6.2 MODELLO DI CALCOLO

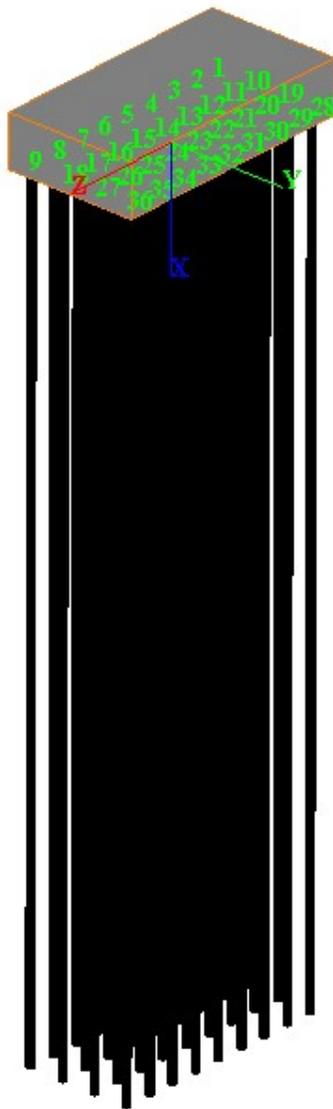


Figura 6-1. Modello di calcolo palificata: vista tridimensionale

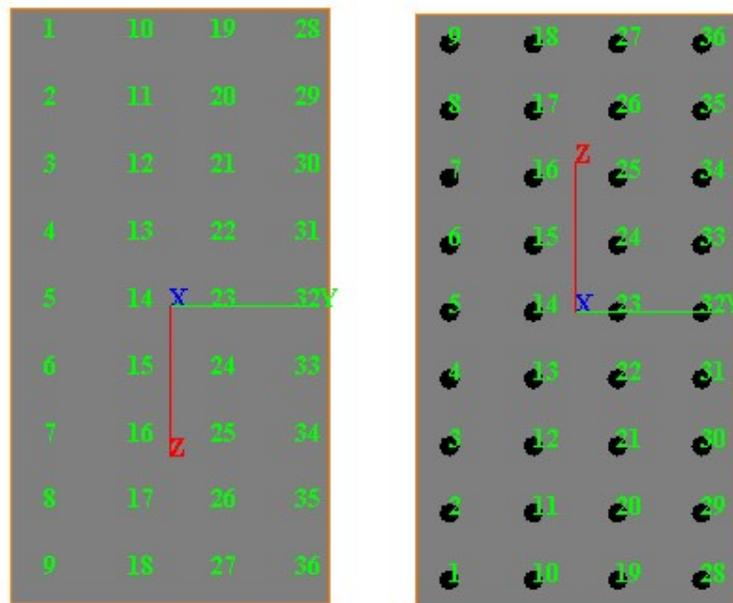


Figura 6-2. Modello di calcolo palificata: piano y-z

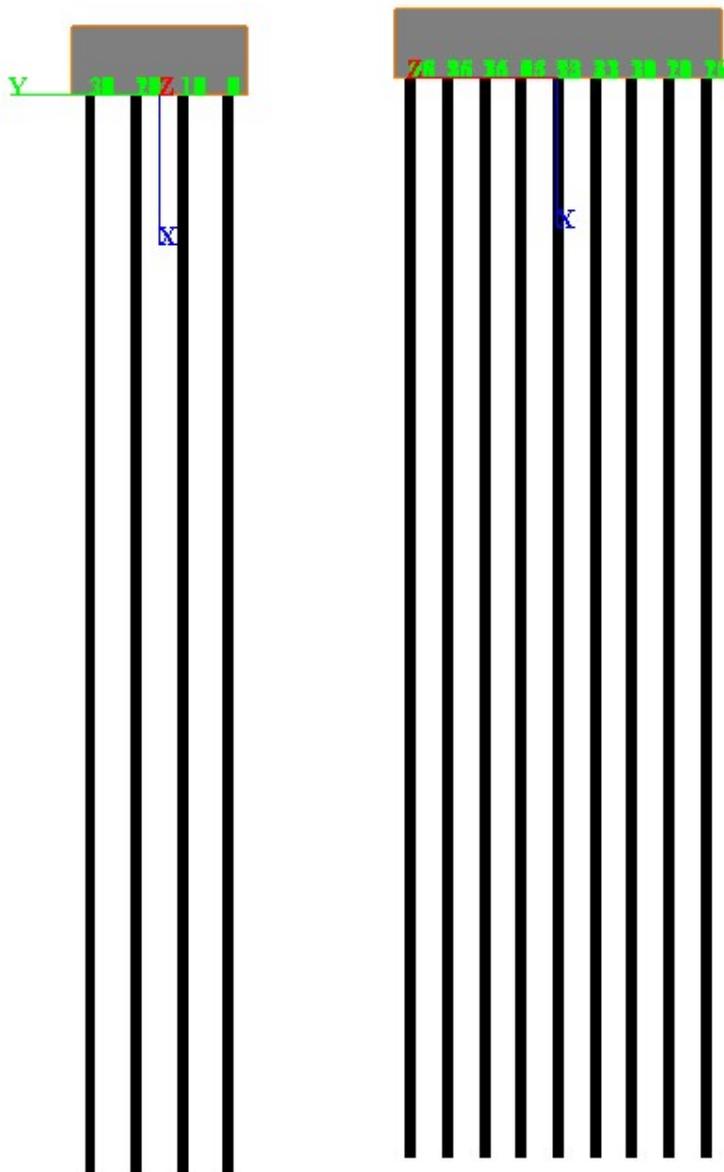


Figura 6-3. Caratteristiche geometriche e meccaniche sezione trasversale pali

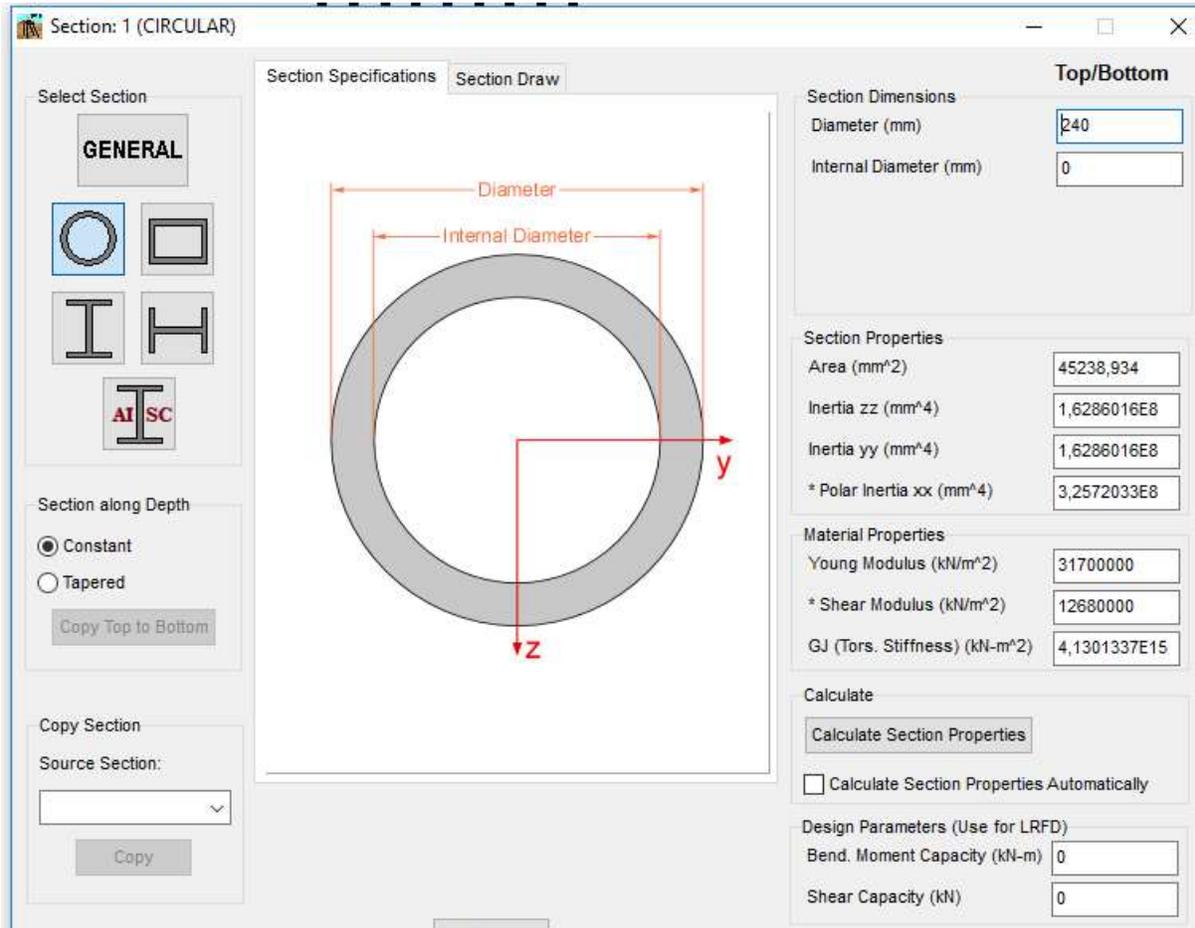
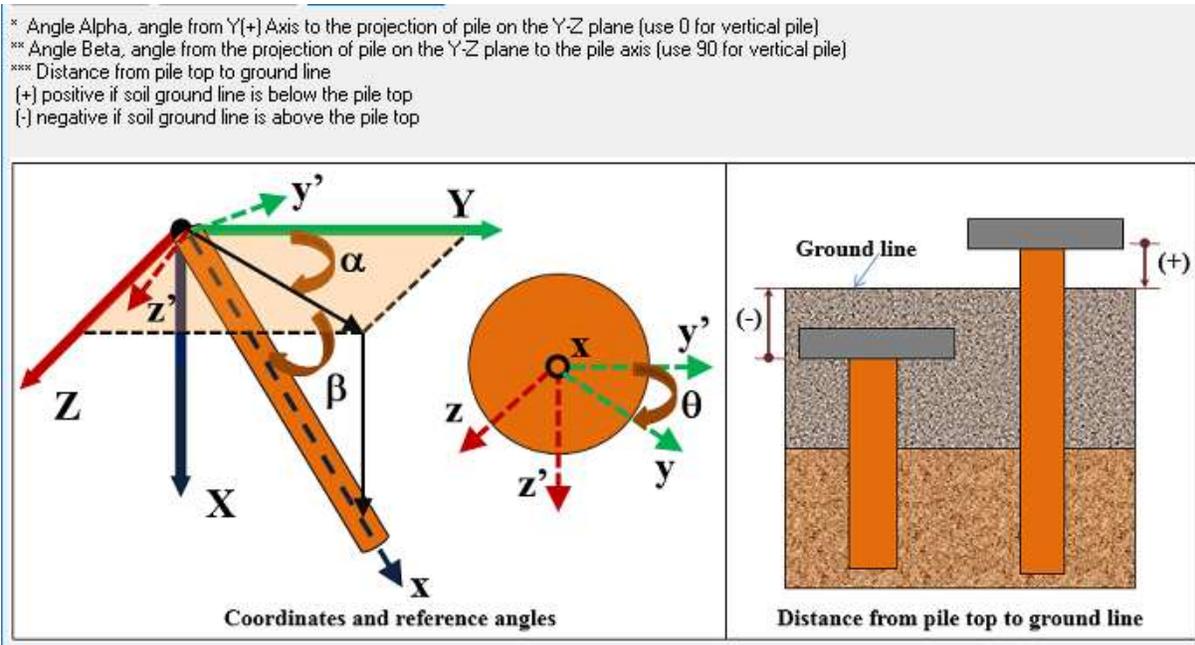


Figura 6-4. Parametri dei pali in GROUP



Pile #	Pile-Top Vertical X-Coordinates, (m)	Pile-Top Horizontal Y-Coordinates, (m)	Pile-Top Horizontal Z-Coordinates, (m)	Angle Alpha* (use 0 for vertical pile) (DEG)	Angle Beta** (use 90 for vertical pile) (DEG)	Angle Theta (section rotation) (DEG)	Vert. Dist. from Pile Top to Ground Line ***, (m)
1	0	-1.5	-3.2	0	90	0	0
2	0	-1.5	-2.4	0	90	0	0
3	0	-1.5	-1.6	0	90	0	0
4	0	-1.5	-0.8	0	90	0	0
5	0	-1.5	0	0	90	0	0
6	0	-1.5	0.8	0	90	0	0
7	0	-1.5	1.6	0	90	0	0
8	0	-1.5	2.4	0	90	0	0
9	0	-1.5	3.2	0	90	0	0
10	0	-0.5	-3.2	0	90	0	0

Pile #	Pile-Top Vertical X-Coordinates, (m)	Pile-Top Horizontal Y-Coordinates, (m)	Pile-Top Horizontal Z-Coordinates, (m)	Angle Alpha* (use 0 for vertical pile) (DEG)	Angle Beta** (use 90 for vertical pile) (DEG)	Angle Theta (section rotation) (DEG)	Vert. Dist. from Pile Top to Ground Line ***, (m)
11	0	-0.5	-2.4	0	90	0	0
12	0	-0.5	-1.6	0	90	0	0
13	0	-0.5	-0.8	0	90	0	0
14	0	-0.5	0	0	90	0	0
15	0	-0.5	0.8	0	90	0	0
16	0	-0.5	1.6	0	90	0	0
17	0	-0.5	2.4	0	90	0	0
18	0	-0.5	3.2	0	90	0	0
19	0	0.5	-3.2	0	90	0	0
20	0	0.5	-2.4	0	90	0	0

Pile #	Pile-Top Vertical X-Coordinates, (m)	Pile-Top Horizontal Y-Coordinates, (m)	Pile-Top Horizontal Z-Coordinates, (m)	Angle Alpha* (use 0 for vertical pile) (DEG)	Angle Beta** (use 90 for vertical pile) (DEG)	Angle Theta (section rotation) (DEG)	Vert. Dist. from Pile Top to Ground Line ***, (m)
21	0	0.5	-1.6	0	90	0	0
22	0	0.5	-0.8	0	90	0	0
23	0	0.5	0	0	90	0	0
24	0	0.5	0.8	0	90	0	0
25	0	0.5	1.6	0	90	0	0
26	0	0.5	2.4	0	90	0	0
27	0	0.5	3.2	0	90	0	0
28	0	1.5	-3.2	0	90	0	0
29	0	1.5	-2.4	0	90	0	0
30	0	1.5	-1.6	0	90	0	0

Pile #	Pile-Top Vertical	Pile-Top Horizontal	Pile-Top Horizontal	Angle Alpha* (use 0	Angle Beta** (use 90	Angle Theta	Vert. Dist. from Pile Top
	X-Coordinates, (m)	Y-Coordinates, (m)	Z-Coordinates, (m)	for vertical pile) (DEG)	for vertical pile) (DEG)	(section rotation) (DEG)	to Ground Line ****, (m)
27	0	0,5	3,2	0	90	0	0
28	0	1,5	-3,2	0	90	0	0
29	0	1,5	-2,4	0	90	0	0
30	0	1,5	-1,6	0	90	0	0
31	0	1,5	-0,8	0	90	0	0
32	0	1,5	0	0	90	0	0
33	0	1,5	0,8	0	90	0	0
34	0	1,5	1,6	0	90	0	0
35	0	1,5	2,4	0	90	0	0
36	0	1,5	3,2	0	90	0	0

Figura 6-5. Disposizione dei micropali in GROUP

Layer	Soil Type	Depth for Top of Soil Layer (m)	Depth for Bottom of Soil Layer (m)	Properties of Layer
1	Silt (cemented c-phi)	-2,5	3,5	1: Cemented c-phi Soil
2	Sand (Reese)	3,5	9,5	2: Sand (Reese, et al.)
3	Silt (cemented c-phi)	9,5	23,5	3: Cemented c-phi Soil
4	Sand (Reese)	23,5	40	4: Sand (Reese, et al.)

1=Top, 2=Bottom	Effective Unit Weight	Undrained Cohesion, c	Friction Angle	p-y Modulus, k	Strain Factor E50	Ultimate Unit Side Friction	Ultimate Unit Tip Resistance
	(kN/m ³)	(kN/m ²)	(DEG.)	(kN/m ³)		(kN/m ²)	(kN/m ²)
1	8	50	26	0	0,007	34,07	656,98
2	9	69,8	26	0	0,007	34,07	656,98

This p-y model requires non-zero values for both cohesion and friction angle.
 A linear interpolation with depth will be used to compute values between the top and bottom of the layer.
 Ultimate Unit Side Friction and Ultimate Unit Tip Resistance:
 - The program uses Ultimate Unit Side Friction to generate t-z curves.
 - The program uses Ultimate Unit Tip Resistance to generate q-w curves.
 - Always check recommended values in Geotechnical Investigation Reports.
 - Program will help to estimate values for Ultimate Unit Side Friction and Ultimate Unit Tip Resistance if zero input values are entered.

1=Top, 2=Bottom	Effective Unit Weight	Friction Angle,	p-y Modulus, k	Ultimate Unit Side Friction	Ultimate Unit Tip Resistance
	(kN/m ³)	(DEG.)	(kN/m ³)	(kN/m ²)	(kN/m ²)
1	10	38	210000	59,61	4000
2	10	38	210000	59,61	4000

A linear interpolation with depth will be used to compute values between the top and bottom of the layer.
 p-y Modulus, k:
 - Always check recommended value in Geotechnical Investigation Reports.
 - Program will help to estimate value for p-y Modulus, k, if zero input value is entered.
 Ultimate Unit Side Friction and Ultimate Unit Tip Resistance:
 - The program uses Ultimate Unit Side Friction to generate t-z curves.
 - The program uses Ultimate Unit Tip Resistance to generate q-w curves.
 - Always check recommended values in Geotechnical Investigation Reports.
 - Program will help to estimate values for Ultimate Unit Side Friction and Ultimate Unit Tip Resistance if zero input values are entered.

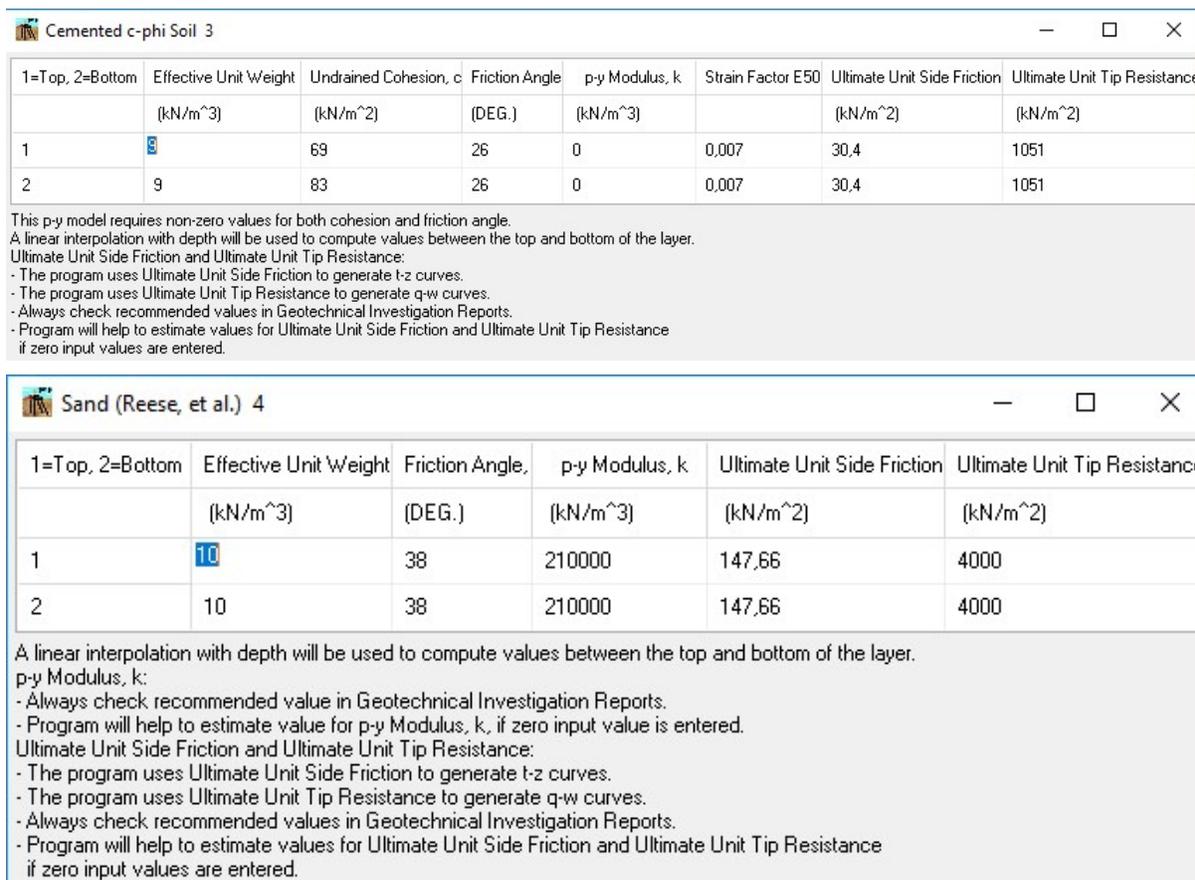


Figura 6-6. Caratteristiche meccaniche terreno

6.3 ANALISI GEOTECNICA

6.3.1 Sollecitazioni di calcolo

I seguenti grafici riportano le massime azioni assiali, compressione e trazione, agenti per le combinazioni di calcolo significative.

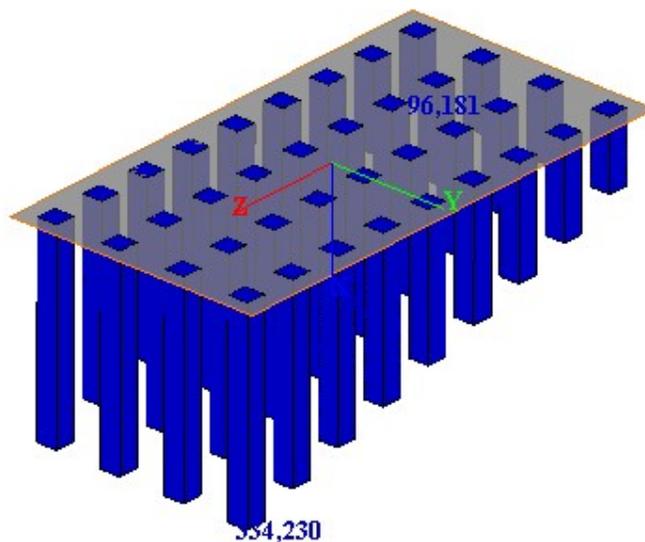


Figura 6-7. Azioni assiale massime comb. SLU

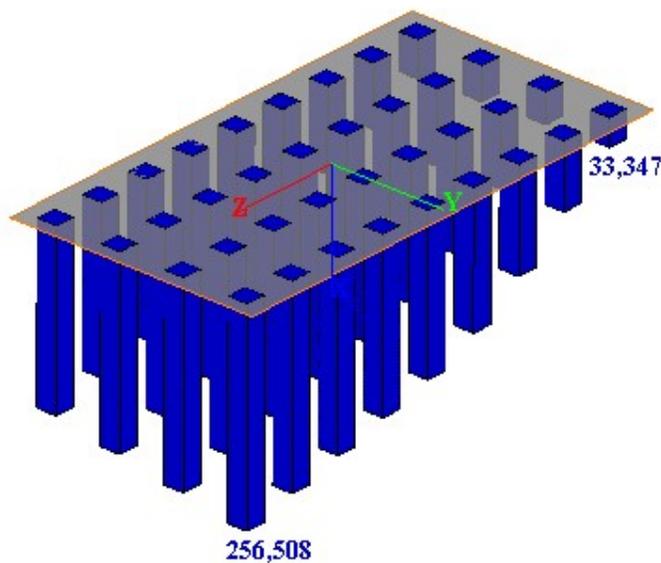


Figura 6-8. Azioni assiale minime comb. SLU

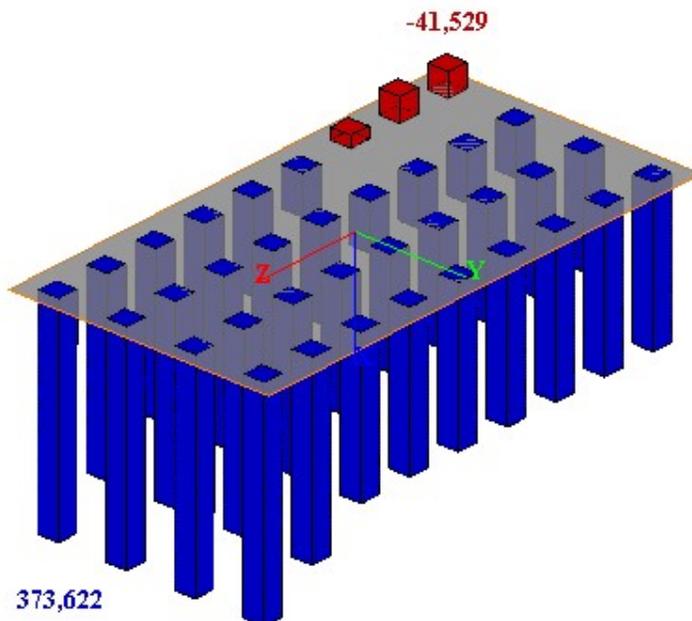


Figura 6-9. Azioni assiale massime comb. URTO

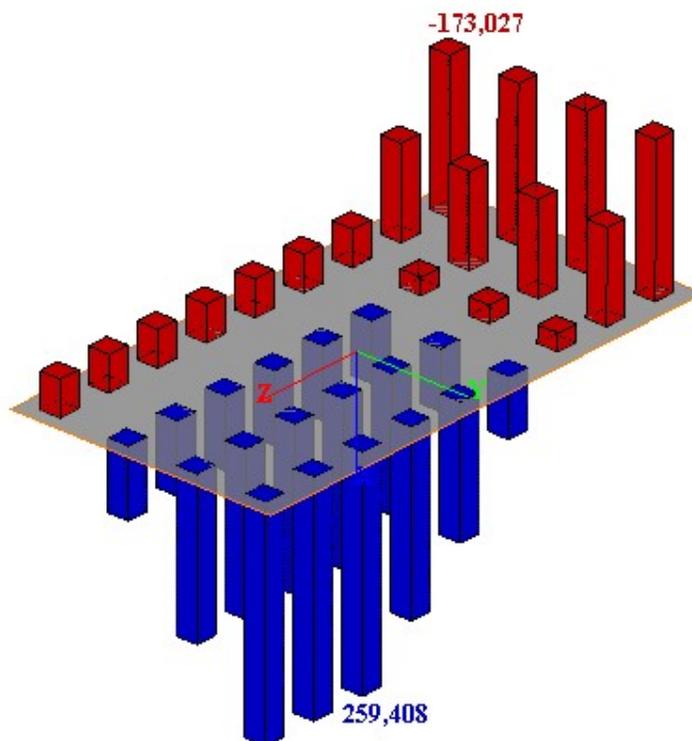


Figura 6-10. Azioni assiale minime comb. URTO

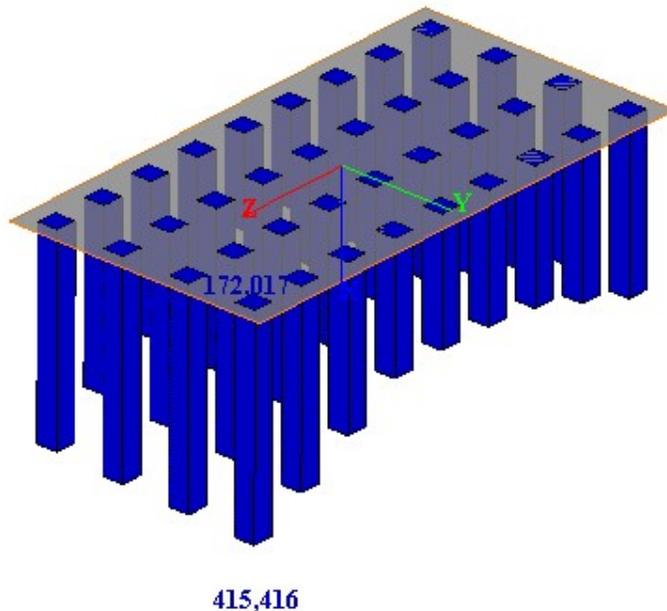


Figura 6-11. Azioni assiale minime comb. SLV

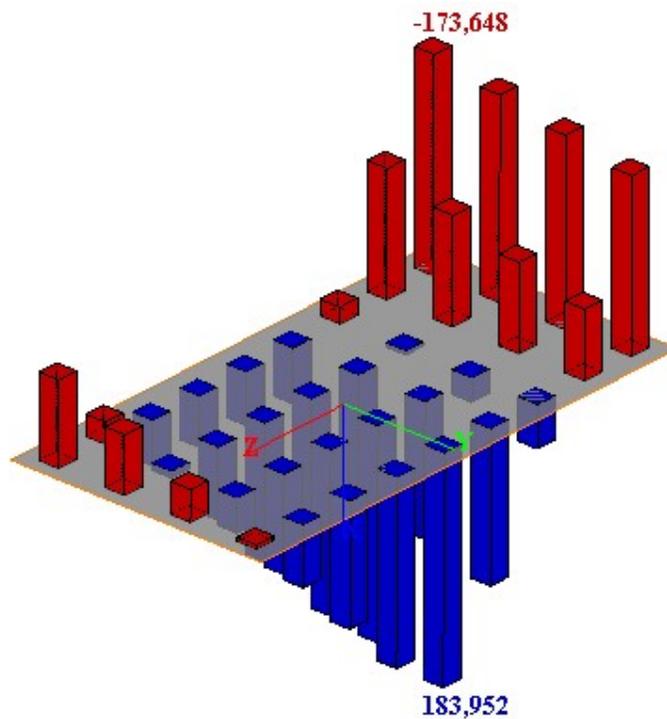


Figura 6-12. Azioni assiale minime comb. SLV

6.3.2 Verifica geotecnica

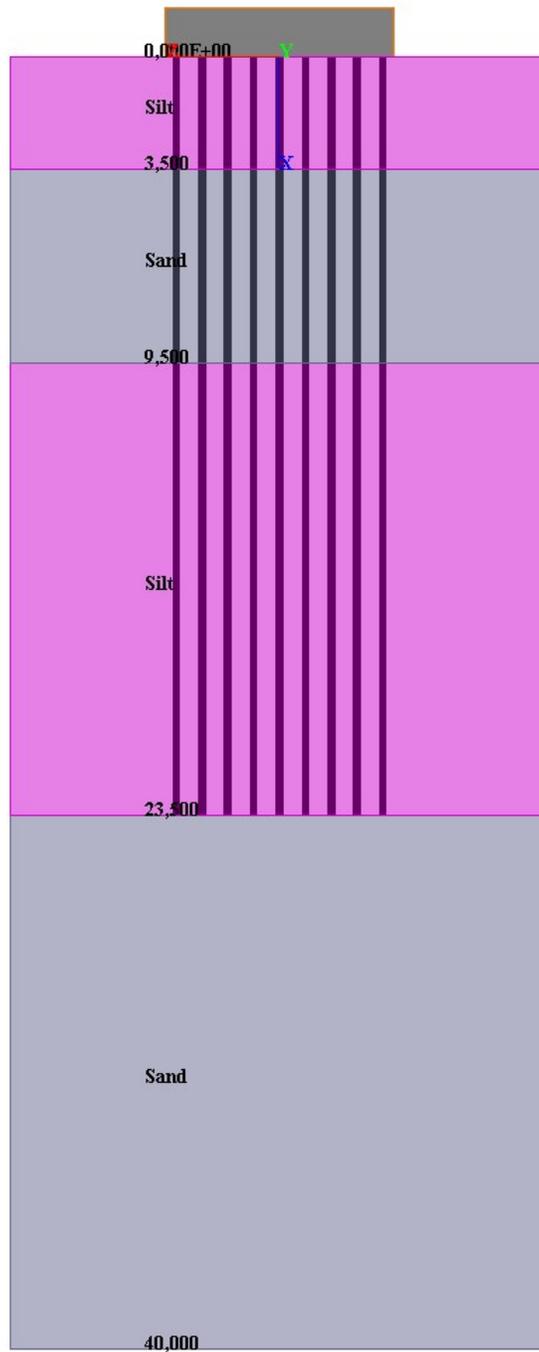


Figura 6-13. Stratigrafia del terreno modellata con Group

STRATIGRAFIA										
Descrizione	strato	q ^{sup.} strato [m]	quota base strato	H strato	γ _k [t/mc]	γ' _k [t/mc]	φ _k [°]	Cu,k [t/mq]	Nspt	f(Nspt)
A	1	0.00	-2.50	2.5	1.90	1.90		5.41		
A	2	-2.50	-6.00	3.5	1.90	0.90		6.40		
B	3	-6.00	-12.00	6	2.00	1.00	38		60.00	16.00
A'	4	-12.00	-26.00	14	1.90	0.90		7.60		
B	5	-26.00	inf.	inf.	2.00	1.00	38		60.00	16.00

quota falda q_f = -2.50 m.s.m.m. (o rispetto p.c.) falda presente

CARATTERISTICHE DEL PALO										
D = 0.24	m diametro palo	q _t = -2.50	m.s.m.m.	(o rispetto p.c.)	quota testa					
L _{palo} = 23.50	m lunghezza palo	q _b = -26.00	m.s.m.m.	(o rispetto p.c.)	quota base palo					
q' = 0	t/mq carico su p.c.	γ _{palo} = 1.50	t/mc	W _{palo} = 1.59	t					

CALCOLO DELLA PORTANZA DEL PALO SOGGETTO A CARICHI ASSIALI

γ_r = 1.00 γ_{c'} = 1.00 γ_{cu} = 1.00 γ_φ = 1.00

PORTATA LATERALE

strato	H strato	γ' [t/mc]	σ' _v [t/mq]	As [mq]	φ [°]	μ	k compress	Cu [t/mq]	α	Rs [t] - compr	k trazione	Rs [t] - traz	
1	0.00	0.00	4.75	0.00	0	0.00		5.41	0.65	0.00		0.00	
2	3.50	0.90	6.33	2.64	0	0.00		6.40	0.53	8.99		8.99	
3	6.00	1.00	10.90	4.52	38	0.78	0.70	0.00	0.00	26.97	0.50	19.3	
4	14.0	0.90	20.20	10.56	0	0.00		7.60	0.40	32.09		32.1	
5	0.00	0.00	26.50	0.00	38	0.78	0.70	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	
										R_{s,tot}	68.05		60.3

PORTATA DI PUNTA

tipo terreno incoerente	γ' [t/mc]	Ap [mq]	σ _{v,b} [t/mq]	terreno incoerente		terreno coerente		R _b [t]
				φ [°]	q _{lim}	α	Cu [t/mq]	
				0.00	0.05	50.00	38.00	

modifica parametri alla punta Δφ [°] = 0 ΔCu [t/mq] = 0

CAPACITA' PORTANTE DEL PALO SINGOLO

fattore di correlazione ζ₃ = 1.50 ζ₄ = 1.34

$$R_{c,d} = (R_{s,tot}/\gamma_{R,lat;c} + R_b/\gamma_{R,base})/\zeta_3 =$$

$$R_{t,d} = R_{s,tot}/\gamma_{R,lat;t}/\zeta_3 + W_{palo} =$$

Pali trivellati			
	R1	R2	R3
$\gamma_{R,base} =$	1.00	1.70	1.35
$\gamma_{R,lat;c} =$	1.00	1.45	1.15
$\gamma_{R,lat;t} =$	1.00	1.60	1.25
	57.43	38.38	48.38
	41.82	26.74	33.78

VERIFICA CAPACITA' PORTANTE DELLA PALIFICATA

GROUP kN	COMB.	Tipo	N_{Ed} [t]	R_d [t]	F_s
-334.23	CC 26	A1-M1	-35.50	48.38	1.36
-373.62	URTO-X		-39.44	57.43	1.46
-415.42	CC 119	SLV-M1	-43.62	48.38	1.11
173.65	CC 119	SLV-M1	15.29	33.78	2.21
-259.41	URTO-Y		-28.01	57.43	2.05

tipo di verifica	coeff. rid. gruppo
R3	1.00
R1	1.00
R3	1.00
R3	1.00
R1	1.00

N <0 compressione

N >0 trazione

6.4 ANALISI STRUTTURALE

6.4.1 Sollecitazioni di calcolo

I seguenti grafici riportano le massime azioni di taglio e flettenti agenti per le combinazioni di calcolo significative.

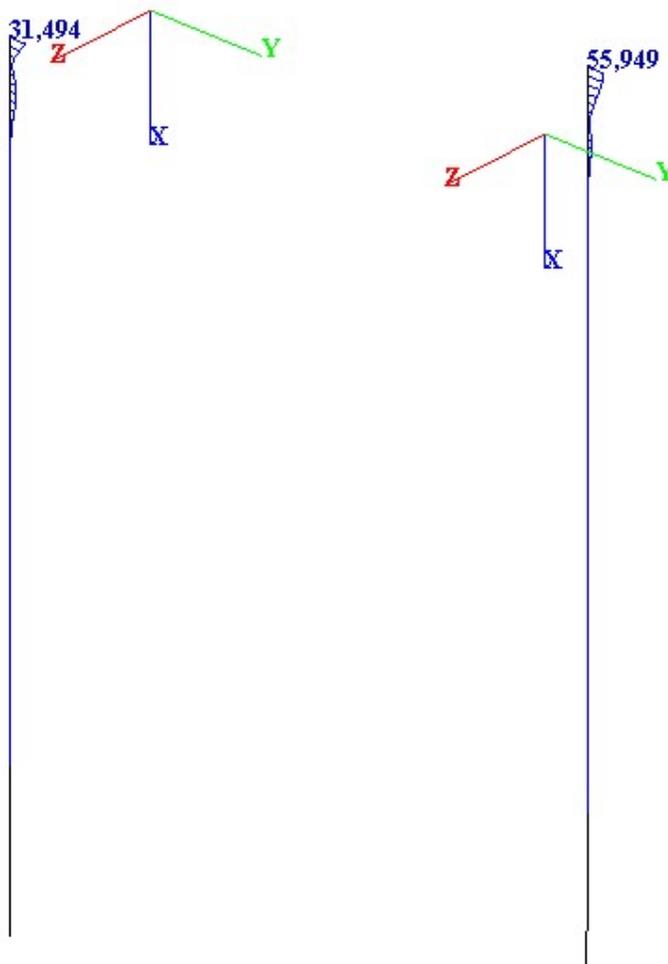


Figura 6-14. Massimo momento (sx) e taglio lungo il micropalo per comb. SLU-SLV URTO

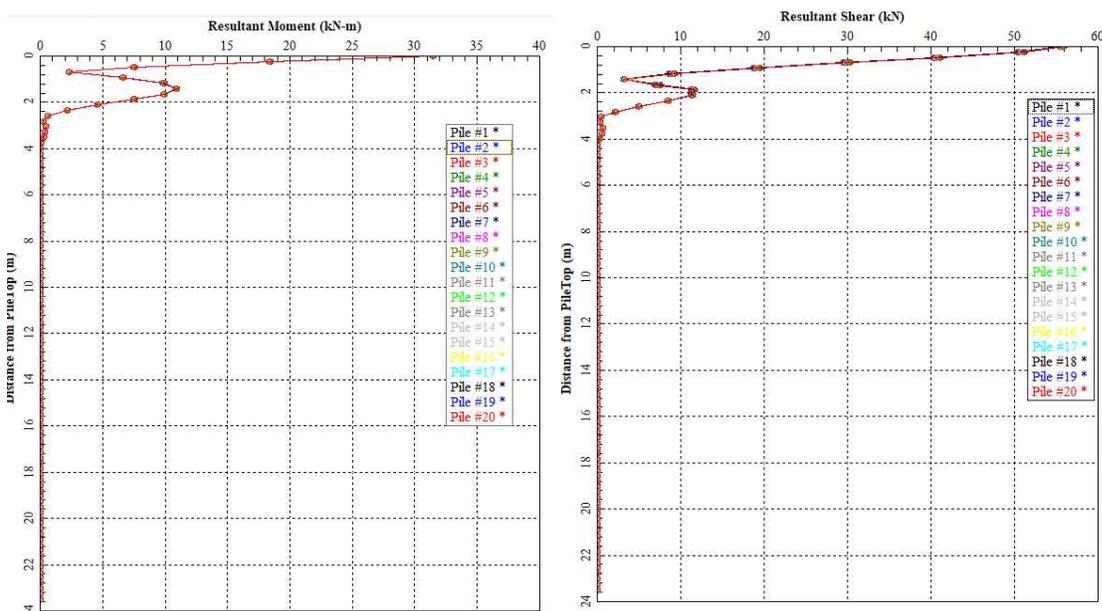


Figura 6-15. Andamento momento e taglio massimo lungo il micropalo per comb. SLU-SLV URTO

6.4.2 Verifica strutturale

Per semplicità di lettura si riepilogano le sollecitazioni a testa micropalo ottenute con il software “Group” applicando i carichi dovuti alla sovrastruttura.

- Nmax = 415.42 kN (compressione)
- Nmin = - 173.65kN (trazione)
- M = 31.49 kN/m
- V = 55.95 kN

Verifica di instabilità a flessione e compressione assiale

Si esegue la verifica a flessione e compressione assiale dell'asta, controllando inoltre che l'instabilità non sia una potenziale causa di collasso.

Le massime sollecitazioni agenti sulla trave valgono (nella combinazione SLU Wx):

$N_{Ed} =$	-415.42	kN	azione assiale di progetto (>0 se di trazione)
$M_{y,Ed} =$	31.49	kNm	momento flettente attorno all'asse y-y di progetto
$M_{z,Ed} =$	0.00	kNm	momento flettente attorno all'asse z-z di progetto
$V_{y,Ed} =$	55.95	kN	azione tagliante di progetto lungo l'asse y
$V_{z,Ed} =$	0.00	kN	azione tagliante di progetto lungo l'asse z

Le sollecitazioni risultanti sono quindi:

$N_{Ed} =$	-415.42	kN
$M_{Ed} =$	31.49	kNm

$V_{Ed} =$	55.95	kN	
$\Delta M_{Ed} =$	0.00	kNm	momento flettente aggiuntivo per sezioni di classe 4
$e_N =$	0	mm	eccentricità del baricentro della sezione efficace

La sezione oggetto delle verifiche è costituito da un tubo tondo 168.3x10 dalle seguenti caratteristiche:

Caratteristiche geometriche della sezione

$A =$	4973	mm ²	$A_v =$	3166	mm ²	$A_{eff} =$	4973	mm ²
$d =$	168.3	mm	$t =$	10	mm	classe =	1	
$W_{pl} =$	250922	mm ³	$W_{el} =$	185857	mm ³	$W_{eff} =$	185857	mm ³
			$I =$	15639839	mm ⁴	$i =$	56	mm

Caratteristiche del materiale

$f_y =$	355	MPa	$E =$	210000	MPa	$G =$	80769	MPa
$\gamma_{M0} =$	1.05		$\gamma_{M1} =$	1.05				

Resistenze caratteristiche e di progetto:

$N_{Rk} = A \cdot f_y =$	1765.47	kN	
$N_{Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0} =$	1681.40	kN	
$M_{Rk} = W \cdot f_y =$	89.08	kNm	
$M_{Rd} = W \cdot f_y / \gamma_{M0} =$	84.84	kNm	
$V_{pl,Rd} = A_v \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} =$	618.00	kN	$> V_{Ed}$

Verifica di resistenza per flessione e compressione

$$0,50 V_{pl,Rd} = 309.00 \text{ kN} > V_{Ed}$$

l'effetto dell'azione tagliante può essere trascurato nella valutazione del momento resistente della sezione

$$N_{Ed} / N_{Rd} + (M_{Ed} + \Delta M_{Ed}) / M_{Rd} = 0.62 < 1$$

7 FONDAZIONE PILA - AMPLIAMENTO 2 (NUOVA REALIZZAZIONE) – CARREGGIATA SUD

7.1 AZIONI DI CALCOLO

Sulla base dei risultati riportati nel precedente capitolo si estraggono quindi le combinazioni maggiormente significative per le verifiche.

COMBINAZIONI A1-M1

COMB.	CC 1	CC 2	CC 19	CC 26	CC 28	CC 38	CC 46	CC 48	CC 49	CC 50
N_{Ed} [kN] =	4304.3	7978.4	5930.0	7436.5	6899.8	7436.5	5810.8	4304.3	4304.3	5810.8
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	55.2	-127.4	-662.0	23.1	203.8	23.1	474.7	55.2	55.2	32.1
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	2480.0	5286.3	3704.9	6328.3	6596.7	3848.2	2445.3	1682.0	2679.5	3321.4
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	69.7	69.7	97.1	69.7	69.7	69.7	69.7	69.7	69.7	115.4
$V_{x,Ed}$ =	38.1	-111.4	-111.4	111.4	111.4	-185.7	-63.4	-63.4	63.4	38.4
$V_{y,Ed}$ =	139.5	139.5	194.2	139.5	139.5	139.5	139.5	139.5	139.5	230.7

COMBINAZIONI URTO TRENO

COMB.	URTO-X	URTO-Y								
N_{Ed} [kN] =	4304.3	4304.3								
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	0.0	-4186.4								
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	12180.7	0.0								
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	0.0	0.0								
$V_{x,Ed}$ =	2000.0	0.0								
$V_{y,Ed}$ =	0.0	750.0								

COMBINAZIONI SLV

COMB.	CC 119	CC 123	CC 128	CC 130	CC 131	CC 139	CC 145	CC 149		
N_{Ed} [kN] =	4822.5	4883.4	2689.8	3672.1	5143.7	6292.1	4787.5	4848.4		
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	-342.0	-2158.1	-342.0	100.0	-431.2	-431.2	-591.4	-2407.5		
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	11680.1	5246.8	4129.4	4635.6	-6305.7	743.8	-6571.1	-75.0		
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	124.6	306.8	124.6	124.6	124.6	124.6	124.6	306.8		
$V_{x,Ed}$ =	1202.2	360.7	360.7	360.7	-1202.2	-360.7	-1202.2	-360.7		
$V_{y,Ed}$ =	249.2	613.6	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2	613.6		

COMBINAZIONI RARA

COMB.	CC 179	CC 180	CC 203	CC 205	CC 207	CC 209	CC 210	CC 213		
N_{Ed} [kN] =	5909.9	5602.7	5508.5	5111.0	5508.5	4304.3	4304.3	4304.3		
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	-9.7	-147.9	101.8	235.6	101.8	436.4	436.4	141.3		
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	3984.7	3627.2	5032.1	5230.9	2965.3	1848.3	2513.2	1888.7		
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	76.9		
$V_{x,Ed}$ =	-74.3	-49.8	123.8	123.8	-123.8	-42.3	42.3	-34.0		

$V_{y,Ed} =$	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0	153.8		
--------------	------	------	------	------	------	------	------	-------	--	--

COMBINAZIONI FREQUENTE

COMB.	CC 215	CC 216	CC 217	CC 221	CC 237	CC 241	CC 247			
N_{Ed} [kN] =	5508.5	5278.1	5111.0	4304.3	4304.3	4304.3	4304.3			
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	101.8	-1.9	235.6	436.4	436.4	436.4	377.3			
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	3998.7	3572.9	4197.5	2180.7	2387.4	1974.1	2122.3			
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	52.6			
$V_{x,Ed}$ =	0.0	0.0	0.0	0.0	24.8	-24.8	-6.8			
$V_{y,Ed}$ =	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0	105.1			

COMBINAZIONI QUASI PERMANENTE

COMB.	CC 251	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N_{Ed} [kN] =	4304.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	436.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	2180.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	46.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$V_{x,Ed}$ =	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$V_{y,Ed}$ =	93.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

AZIONI SOLLECITANTI PER LE VERIFICHE DELLE STRUTTURE DI FONDAZIONE IN CONDIZIONI SISMICHE

Secondo il p.to 7.2.5 del D.M. 14/01/2008 per strutture progettate sia per CD "A" sia per CD "B" il dimensionamento delle strutture di fondazione e la verifica di sicurezza del complesso fondazione-terreno devono essere eseguiti assumendo come azioni in fondazione le resistenze degli elementi strutturali soprastanti.

Più precisamente, la forza assiale negli elementi strutturali verticali derivante dalla combinazione delle azioni deve essere associata al concomitante valore resistente del momento flettente e del taglio; si richiede tuttavia che tali azioni risultino non maggiori di quelle trasferite dagli elementi soprastanti, amplificate per il coefficiente γ_{Rd} e comunque non maggiori di quelle derivanti da un'analisi elastica della struttura in elevazione eseguita con fattori di struttura q pari a 1.

In via semplificata, ma comunque a favore di sicurezza, nelle successive verifiche si considerano le sollecitazioni derivanti dall'analisi amplificate del coefficiente γ_{Rd} .

nel caso in esame la struttura è progettata per CD B $\Rightarrow \gamma_{Rd} = 1.1$

Le sollecitazioni incrementate diventano quindi:

COMB.	CC 119	CC 123	CC 128	CC 130	CC 131	CC 139	CC 145	CC 149
N_{Ed} [kN] =	5304.8	5371.8	2958.8	4039.3	5658.0	6921.3	5266.3	5333.3
$M_{x,Ed}$ [kNm] =	-376.2	-2373.9	-376.2	110.0	-474.3	-474.3	-650.6	-2648.3
$M_{y,Ed}$ [kNm] =	12848.1	5771.5	4542.3	5099.2	-6936.2	818.2	-7228.2	-82.5
$M_{z,Ed}$ [kNm] =	137.0	337.5	137.0	137.0	137.0	137.0	137.0	337.5
$V_{x,Ed}$ =	1322.5	396.7	396.7	396.7	-1322.5	-396.7	-1322.5	-396.7
$V_{y,Ed}$ =	274.1	674.9	274.1	274.1	274.1	274.1	274.1	674.9

Tabella 7-1. Sollecitazioni di calcolo risultanti nel baricentro della palificata – Sistema di riferimento analisi della pila
 Tali sollecitazioni sono di seguito trasformate nel sistema di riferimento di Group.

COMBINAZIONI A1-M1

COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
CC 1	5858.62	213.09	-98.25	-493.61	-9189.36	127.85
CC 2	10192.02	213.09	-138.10	-495.89	-15325.52	127.85
CC 18	9644.85	336.98	-775.95	-495.89	-13862.41	202.19
CC 19	7536.96	336.98	-1338.20	-495.89	-13190.25	202.19
CC 38	9560.13	213.09	12.43	-826.48	-18449.38	127.85
CC 46	8403.69	213.09	464.01	822.69	9522.27	127.85
CC 47	7857.23	213.09	464.01	-822.69	-14707.47	127.85
CC 48	6295.79	213.09	-98.25	822.69	10194.43	127.85
CC 50	7857.23	328.31	-83.31	-846.95	-14822.69	196.99
CC 51	5749.33	328.31	-645.57	-846.95	-14150.54	196.99

COMBINAZIONI URTO

	FX	FY	MZ	FZ	MY	MX
COMB.	(kN)	(kN)	(kN-m)	(kN)	(kN-m)	(kN-m)
URTO-X	6022.562	0	0	2000	8079.557	URTO-X
URTO-Y	6022.562	750	-4219.985	0	0	URTO-Y

COMBINAZIONI SLV

	FX	FY	MZ	FZ	MY	MX
COMB.	(kN)	(kN)	(kN-m)	(kN)	(kN-m)	(kN-m)
CC 119	7457.782	370.9113	-531.9158	1830.995	12302.05	222.5468
CC 120	5918.09	370.9113	-531.9158	1830.995	12635.56	222.5468
CC 123	7605.059	871.7551	-2979.348	549.2985	2094.361	523.0531
CC 128	4121.783	370.9113	-531.9158	549.2985	2817.573	222.5468
CC 130	5772.751	370.9113	211.0195	549.2985	2810.831	222.5468
CC 131	7814.451	370.9113	-630.0371	-1830.995	-17814.78	222.5468
CC 133	7319.161	370.9113	-852.9177	-1830.995	-17812.76	222.5468
CC 139	9610.758	370.9113	-630.0371	-549.2985	-7996.797	222.5468
CC 149	7397.127	871.7551	-3331.54	-549.2985	-7401.97	523.0531

COMBINAZIONI RARA

	FX	FY	MZ	FZ	MY	MX
COMB.	(kN)	(kN)	(kN-m)	(kN)	(kN-m)	(kN-m)
CC 179	7559.057	142.0581	23.97938	-330.5916	-10842.57	85.23485
CC 191	7129.187	228.7111	-424.1761	-333.928	-10040.8	137.2267
CC 207	7097.266	142.0581	135.4809	-550.986	-12816.77	85.23485
CC 210	5840.408	142.0581	469.9853	-548.4607	-9997.023	85.23485
CC 213	6204.715	218.8749	105.1057	556.5467	6194.545	131.3249

COMBINAZIONI FREQUENTE

COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
CC 215	7238.479	142.0581	135.4809	0	-5171.809	85.23485
CC 216	7002.192	142.0581	29.15167	0	-4475.305	85.23485
CC 221	6022.562	172.4803	214.4384	0	-1920.443	103.4882
CC 241	5994.319	142.0581	469.9853	-110.1972	-3449.435	85.23485
CC 244	5986.131	142.0581	469.9853	-109.6921	-3535.759	85.23485
CC 247	6058.992	157.4214	397.0094	111.3093	-297.4454	94.45286

COMBINAZIONI QUASI PERM.

COMB.	FX (kN)	FY (kN)	MZ (kN-m)	FZ (kN)	MY (kN-m)	MX (kN-m)
CC 251	6022.562	142.0581	469.9853	0	-1920.443	85.23485

Tabella 7-2. Sollecitazioni di calcolo risultanti nel baricentro della palificata – Sistema di riferimento Group

7.2 MODELLO DI CALCOLO

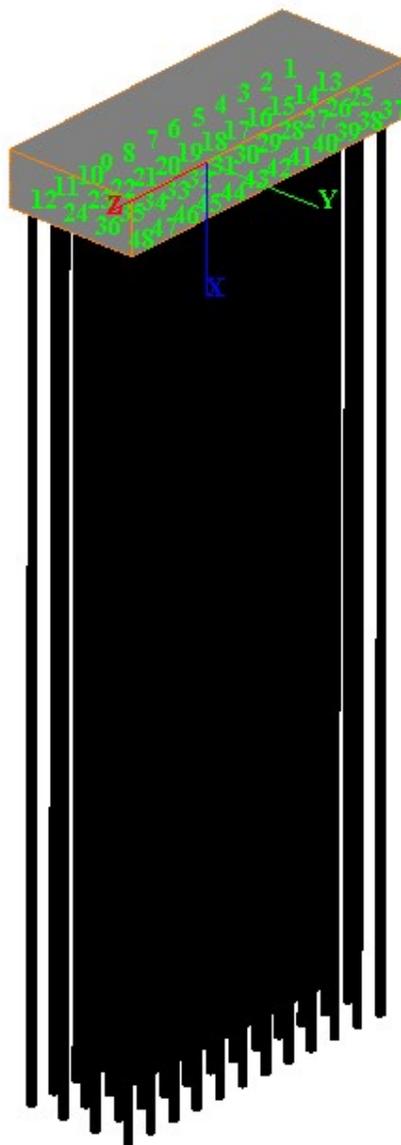


Figura 7-1. Modello di calcolo palificata: vista tridimensionale

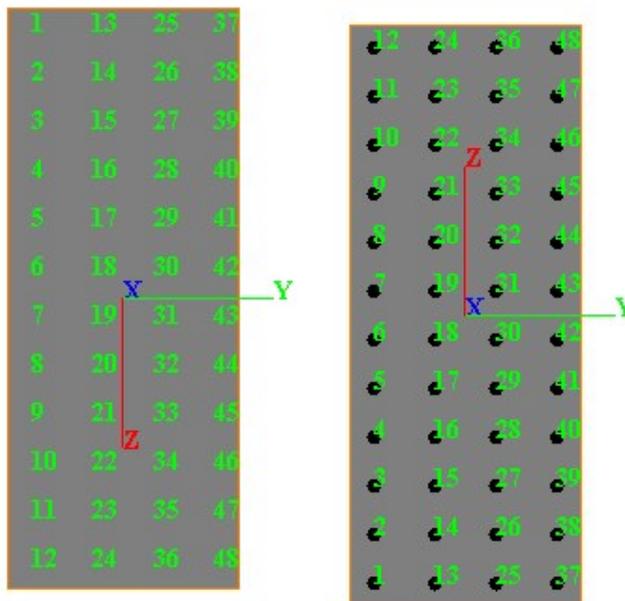


Figura 7-2. Modello di calcolo palificata: piano y-z

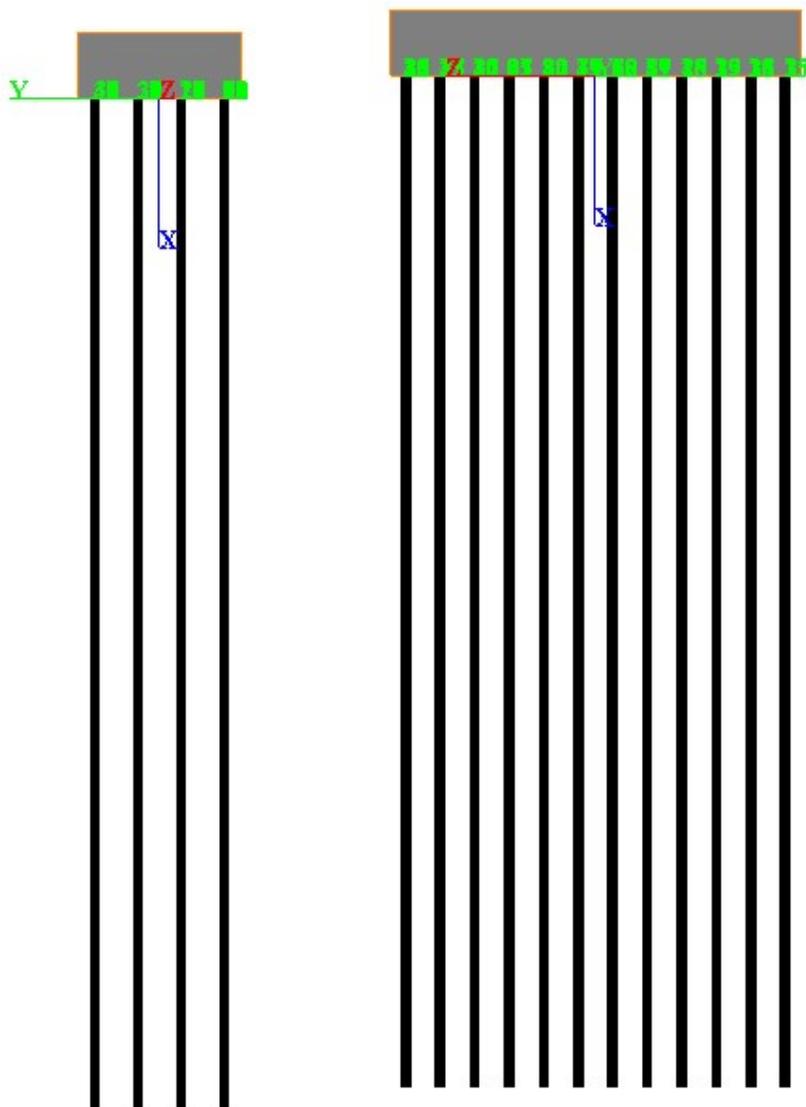


Figura 7-3. Caratteristiche geometriche e meccaniche sezione trasversale pali

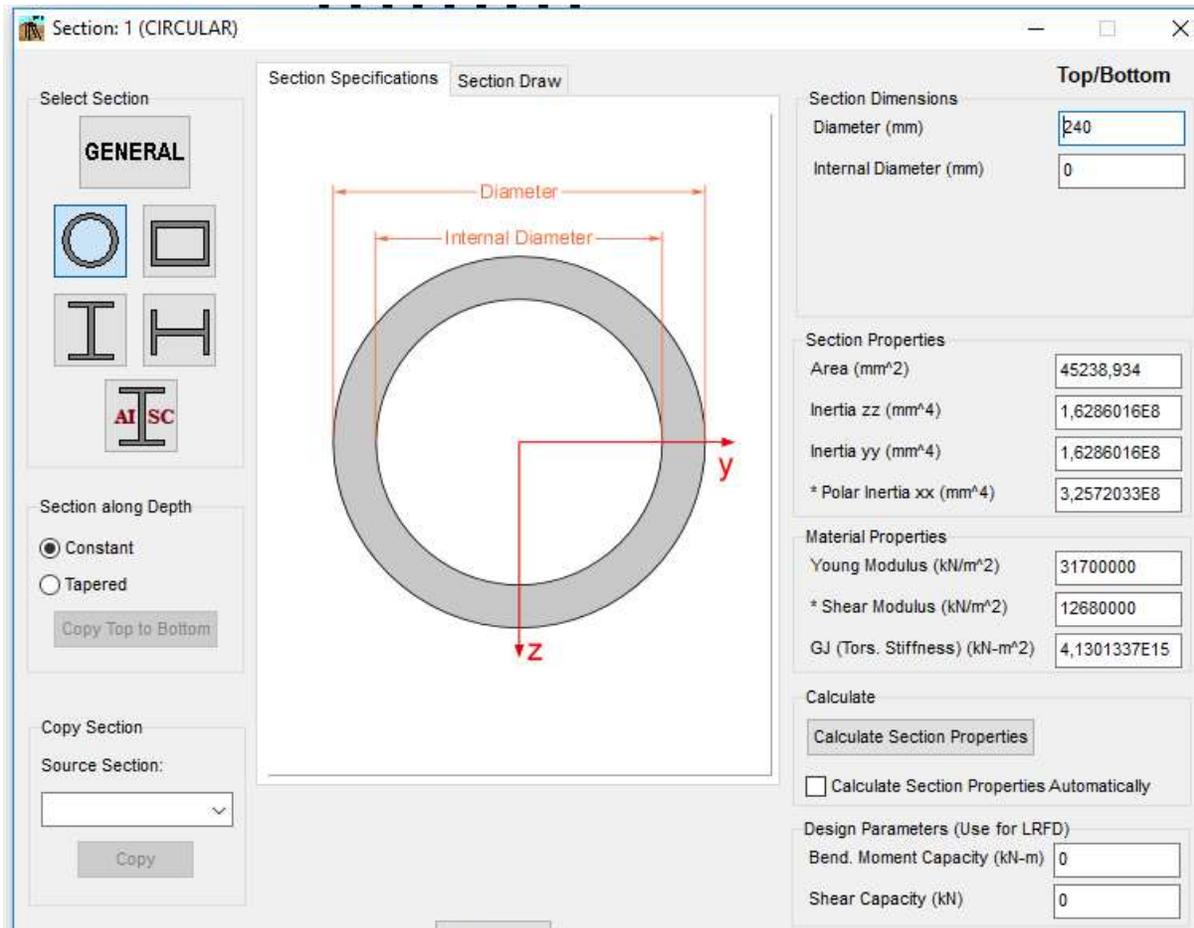
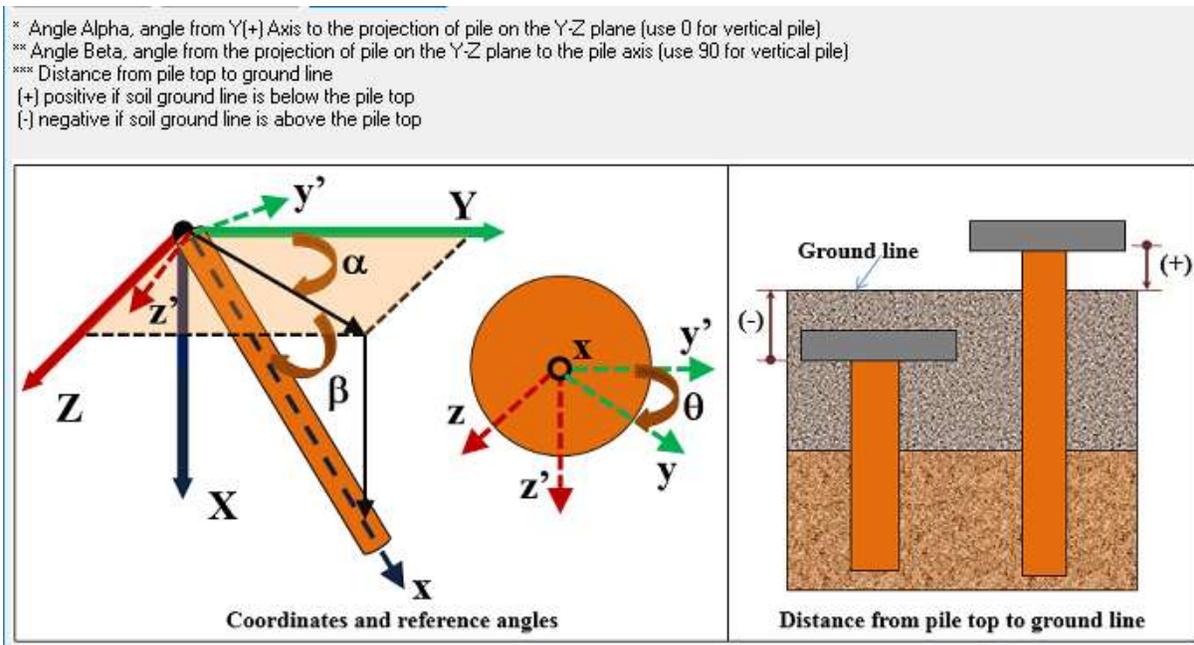


Figura 7-4. Parametri dei pali in GROUP



Pile #	Pile-Top Vertical	Pile-Top Horizontal	Pile-Top Horizontal	Angle Alpha* (use 0	Angle Beta** (use 90	Angle Theta	Vert. Dist. from Pile Top
	X-Coordinates, (m)	Y-Coordinates, (m)	Z-Coordinates, (m)	for vertical pile) (DEG)	for vertical pile) (DEG)	(section rotation) (DEG)	to Ground Line ****, (m)
1	0	-1,5	-4,4	0	90	0	0
2	0	-1,5	-3,6	0	90	0	0
3	0	-1,5	-2,8	0	90	0	0
4	0	-1,5	-2	0	90	0	0
5	0	-1,5	-1,2	0	90	0	0
6	0	-1,5	-0,4	0	90	0	0
7	0	-1,5	0,4	0	90	0	0
8	0	-1,5	1,2	0	90	0	0
9	0	-1,5	2	0	90	0	0
10	0	-1,5	2,8	0	90	0	0

Pile #	Pile-Top Vertical	Pile-Top Horizontal	Pile-Top Horizontal	Angle Alpha* (use 0	Angle Beta** (use 90	Angle Theta	Vert. Dist. from Pile Top
	X-Coordinates, (m)	Y-Coordinates, (m)	Z-Coordinates, (m)	for vertical pile) (DEG)	for vertical pile) (DEG)	(section rotation) (DEG)	to Ground Line ****, (m)
11	0	-1,5	3,6	0	90	0	0
12	0	-1,5	4,4	0	90	0	0
13	0	-0,5	-4,4	0	90	0	0
14	0	-0,5	-3,6	0	90	0	0
15	0	-0,5	-2,8	0	90	0	0
16	0	-0,5	-2	0	90	0	0
17	0	-0,5	-1,2	0	90	0	0
18	0	-0,5	-0,4	0	90	0	0
19	0	-0,5	0,4	0	90	0	0
20	0	-0,5	1,2	0	90	0	0

Pile #	Pile-Top Vertical	Pile-Top Horizontal	Pile-Top Horizontal	Angle Alpha* (use 0	Angle Beta** (use 90	Angle Theta	Vert. Dist. from Pile Top
	X-Coordinates, (m)	Y-Coordinates, (m)	Z-Coordinates, (m)	for vertical pile) (DEG)	for vertical pile) (DEG)	(section rotation) (DEG)	to Ground Line ****, (m)
21	0	-0,5	2	0	90	0	0
22	0	-0,5	2,8	0	90	0	0
23	0	-0,5	3,6	0	90	0	0
24	0	-0,5	4,4	0	90	0	0
25	0	0,5	-4,4	0	90	0	0
26	0	0,5	-3,6	0	90	0	0
27	0	0,5	-2,8	0	90	0	0
28	0	0,5	-2	0	90	0	0
29	0	0,5	-1,2	0	90	0	0
30	0	0,5	-0,4	0	90	0	0

Pile #	Pile-Top Vertical X-Coordinates, (m)	Pile-Top Horizontal Y-Coordinates, (m)	Pile-Top Horizontal Z-Coordinates, (m)	Angle Alpha* (use 0 for vertical pile) (DEG)	Angle Beta** (use 90 for vertical pile) (DEG)	Angle Theta (section rotation) (DEG)	Vert. Dist. from Pile Top to Ground Line *** (m)
31	0	0,5	0,4	0	90	0	0
32	0	0,5	1,2	0	90	0	0
33	0	0,5	2	0	90	0	0
34	0	0,5	2,8	0	90	0	0
35	0	0,5	3,6	0	90	0	0
36	0	0,5	4,4	0	90	0	0
37	0	1,5	-4,4	0	90	0	0
38	0	1,5	-3,6	0	90	0	0
39	0	1,5	-2,8	0	90	0	0
40	0	1,5	-2	0	90	0	0

Pile #	Pile-Top Vertical X-Coordinates, (m)	Pile-Top Horizontal Y-Coordinates, (m)	Pile-Top Horizontal Z-Coordinates, (m)	Angle Alpha* (use 0 for vertical pile) (DEG)	Angle Beta** (use 90 for vertical pile) (DEG)	Angle Theta (section rotation) (DEG)	Vert. Dist. from Pile Top to Ground Line *** (m)
39	0	1,5	-2,8	0	90	0	0
40	0	1,5	-2	0	90	0	0
41	0	1,5	-1,2	0	90	0	0
42	0	1,5	-0,4	0	90	0	0
43	0	1,5	0,4	0	90	0	0
44	0	1,5	1,2	0	90	0	0
45	0	1,5	2	0	90	0	0
46	0	1,5	2,8	0	90	0	0
47	0	1,5	3,6	0	90	0	0
48	0	1,5	4,4	0	90	0	0

Figura 7-5. Disposizione dei micropali in GROUP

Layer	Soil Type	Depth for Top of Soil Layer (m)	Depth for Bottom of Soil Layer (m)	Properties of Layer
1	Silt (cemented c-phi)	-2,5	3,5	1: Cemented c-phi Soil
2	Sand (Reese)	3,5	9,5	2: Sand (Reese, et al.)
3	Silt (cemented c-phi)	9,5	23,5	3: Cemented c-phi Soil
4	Sand (Reese)	23,5	40	4: Sand (Reese, et al.)

1=Top, 2=Bottom	Effective Unit Weight (kN/m ³)	Undrained Cohesion, c (kN/m ²)	Friction Angle (DEG.)	p-y Modulus, k (kN/m ³)	Strain Factor E50	Ultimate Unit Side Friction (kN/m ²)	Ultimate Unit Tip Resistance (kN/m ²)
1	6	50	26	0	0,007	34,07	656,98
2	9	69,8	26	0	0,007	34,07	656,98

This p-y model requires non-zero values for both cohesion and friction angle.
 A linear interpolation with depth will be used to compute values between the top and bottom of the layer.
 Ultimate Unit Side Friction and Ultimate Unit Tip Resistance:
 - The program uses Ultimate Unit Side Friction to generate t-z curves.
 - The program uses Ultimate Unit Tip Resistance to generate q-w curves.
 - Always check recommended values in Geotechnical Investigation Reports.
 - Program will help to estimate values for Ultimate Unit Side Friction and Ultimate Unit Tip Resistance if zero input values are entered.

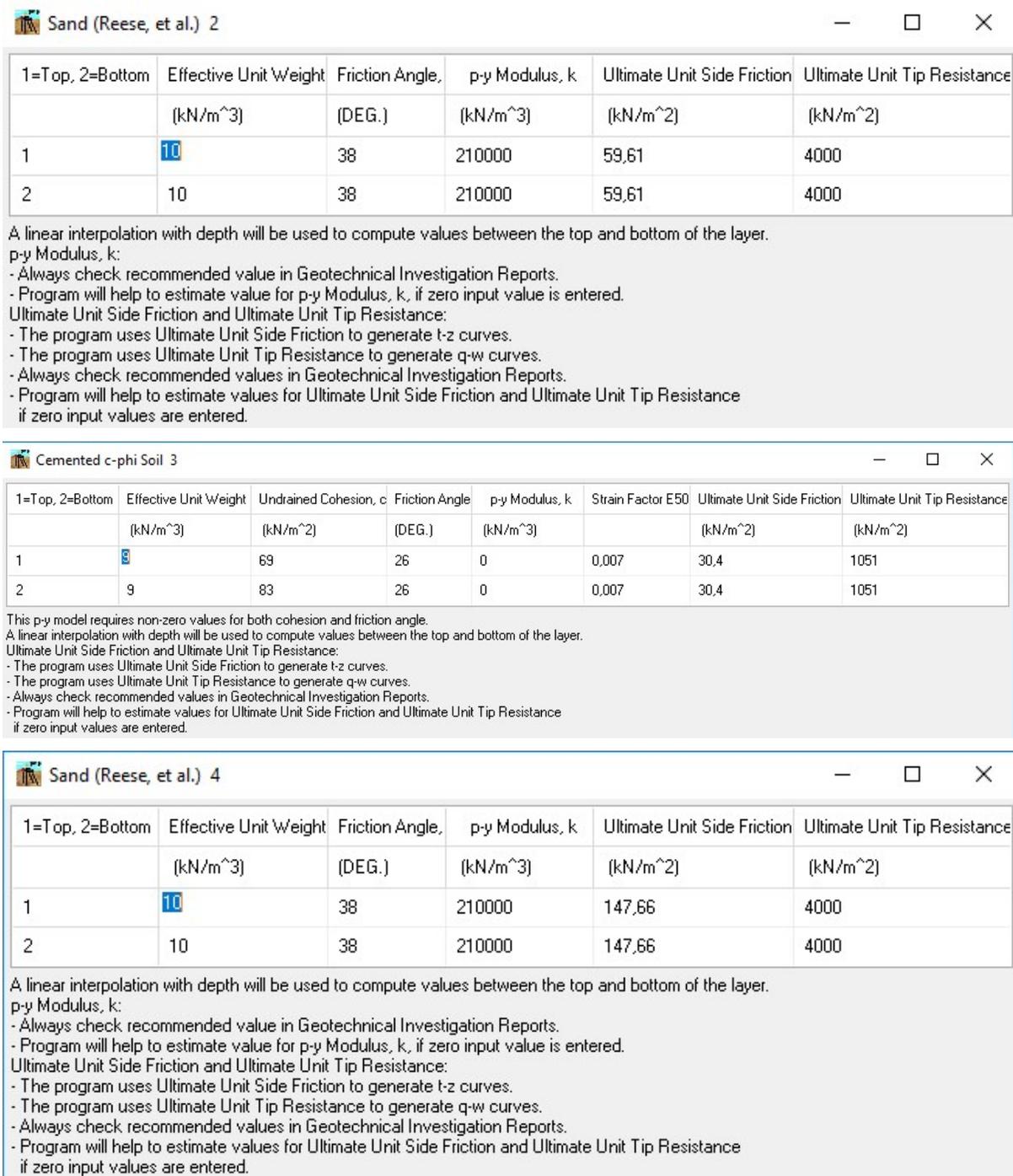


Figura 7-6. Caratteristiche meccaniche terreno

7.3 ANALISI GEOTECNICA

7.3.1 Sollecitazioni di calcolo

I seguenti grafici riportano le massime azioni assiali, compressione e trazione, agenti per le combinazioni di calcolo significative.

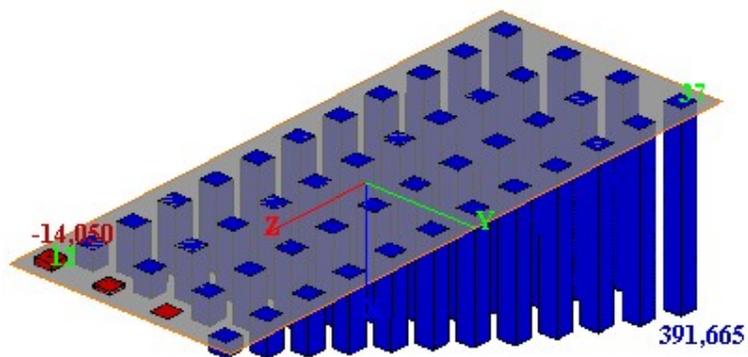


Figura 7-7. Azioni assiale massime comb. SLU

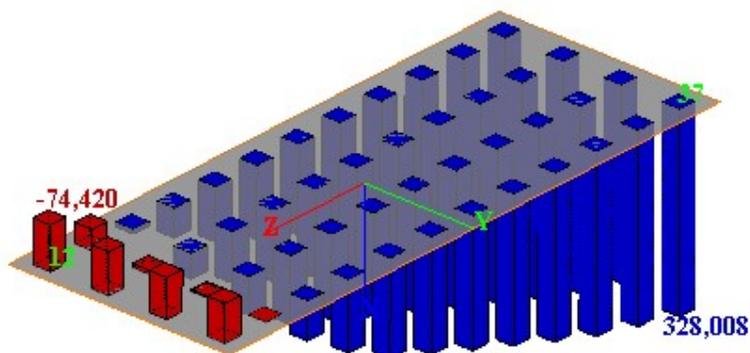


Figura 7-8. Azioni assiale minime comb. SLU

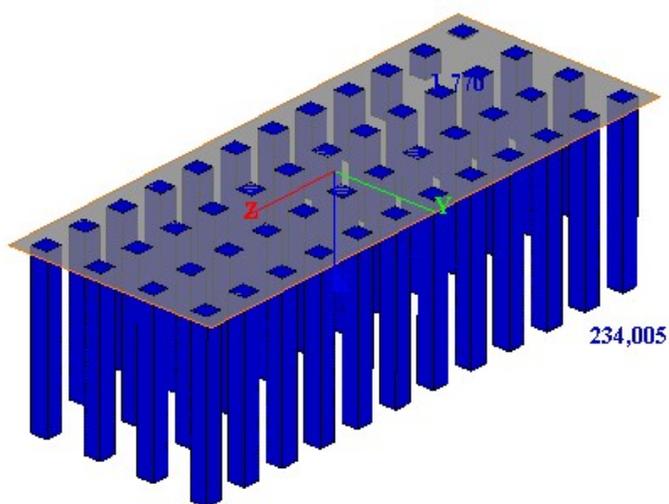


Figura 7-9. Azioni assiale massime comb. URTO

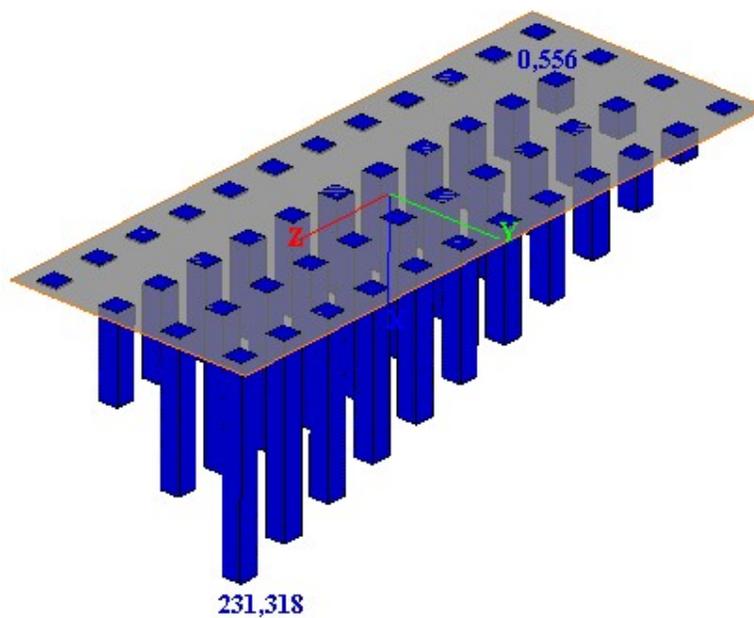


Figura 7-10. Azioni assiale minime comb. URTO

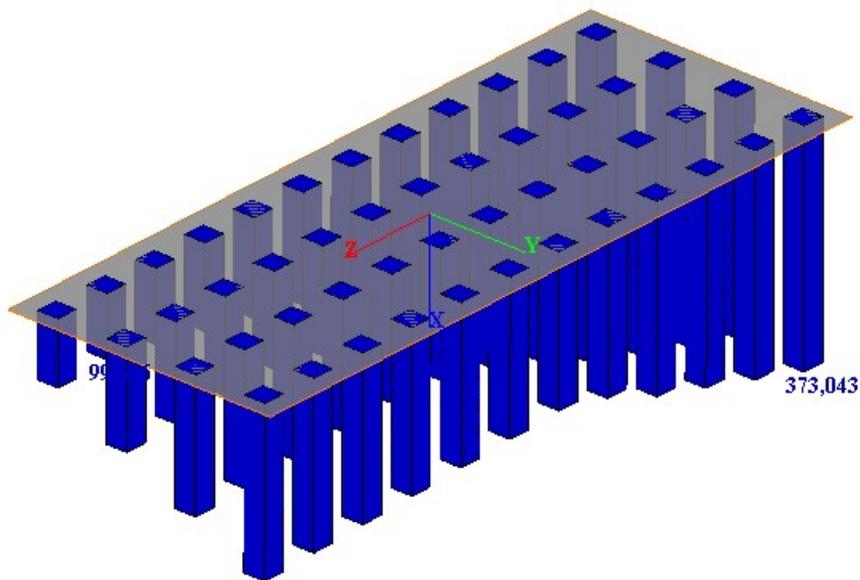


Figura 7-11. Azioni assiale minime comb. SLV

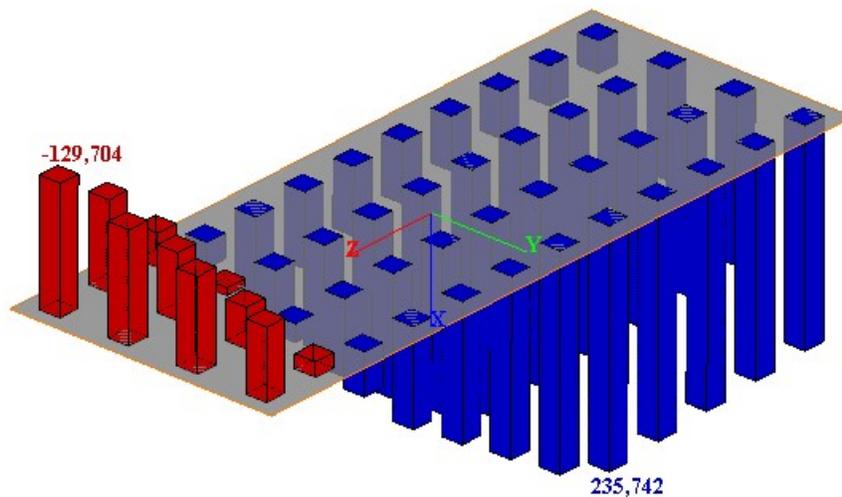


Figura 7-12. Azioni assiale minime comb. SLV

7.3.2 Verifica geotecnica

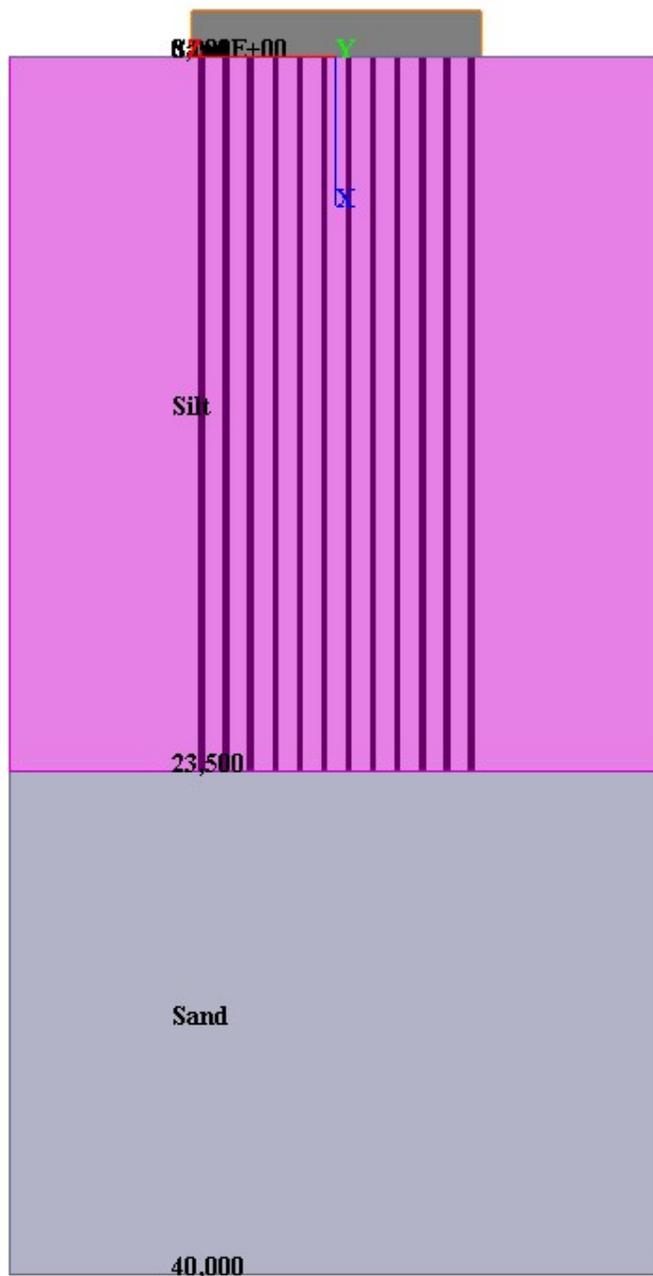


Figura 7-13. Stratigrafia del terreno modellata con Group

STRATIGRAFIA										
Descrizione	strato	q ^{sup.} strato [m]	quota base strato	H strato	γ _k [t/mc]	γ' _k [t/mc]	φ _k [°]	Cu,k [t/mq]	Nspt	f(Nspt)
A	1	0.00	-2.50	2.5	1.90	1.90		5.41		
A	2	-2.50	-6.00	3.5	1.90	0.90		6.40		
B	3	-6.00	-12.00	6	2.00	1.00	38		60.00	16.00
A'	4	-12.00	-26.00	14	1.90	0.90		7.60		
B	5	-26.00	inf.	inf.	2.00	1.00	38		60.00	16.00

quota falda q_r = -2.50 m.s.m.m. (o rispetto p.c.) falda presente

CARATTERISTICHE DEL PALO

D = 0.24 m diametro palo q_t = -2.50 m.s.m.m. (o rispetto p.c.) quota testa palo
 L_{palo} = 23.5 m lunghezza
 = 0 palo q_b = -26.00 m.s.m.m. (o rispetto p.c.) quota base palo
 t/mq carico su W_{palo}
 q' = 0 p.c. γ_{palo} = 1.50 t/mc = 1.59 t

CALCOLO DELLA PORTANZA DEL PALO SOGGETTO A CARICHI ASSIALI

γ_γ = 1.00 γ_{c'} = 1.00 γ_{cu} = 1.00 γ_φ = 1.00

PORTATA LATERALE

strato	H strato	γ' [t/mc]	σ _v [t/mq]	As [mq]	φ [°]	μ	k compress	Cu [t/mq]	α	Rs [t] - compr	k trazione	Rs [t] - traz
1	0.00	0.00	4.75	0.00	0	0.00		5.41	0.65	0.00		0.00
2	3.50	0.90	6.33	2.64	0	0.00		6.40	0.53	8.99		8.99
3	6.00	1.00	10.90	4.52	38	0.78	0.70	0.00	0.00	26.97	0.50	19.3
4	14.0	0.90	20.20	10.56	0	0.00		7.60	0.40	32.09		32.1
5	0.00	0.00	26.50	0.00	38	0.78	0.70	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00
										Rs_{tot}		60.3

PORTATA DI PUNTA

tipo terreno incoerente	γ' [t/mc]	A _p [mq]	σ _{v,b} [t/mq]	terreno incoerente		terreno coerente		R _b [t]
				φ [°]	q _{lim}	α	Cu [t/mq]	
								18.10

modifica parametri alla punta Δφ [°] = 0 ΔCu [t/mq] = 0

CAPACITA' PORTANTE DEL PALO SINGOLO

n° verticali indagate 5 fattore di correlazione ζ₃ = 1.50 ζ₄ = 1.34

Pali trivellati			
	R1	R2	R3
$\gamma_{R;base} =$	1.00	1.70	1.35
$\gamma_{R;lat;c} =$	1.00	1.45	1.15
$\gamma_{R;lat;t} =$	1.00	1.60	1.25
$R_{c,d} = (R_{s,tot}/\gamma_{R;lat;c} + R_b/\gamma_{R;base})/\zeta_3 =$	57.43	38.38	48.38
$R_{t,d} = R_{s,tot}/\gamma_{R;lat;t}/\zeta_3 + W_{palo} =$	41.82	26.74	33.78

VERIFICA CAPACITA' PORTANTE DELLA PALIFICATA

GROUP	COMB.	Tipo	N _{Ed} [t]	R _d [t]	F _s	tipo di verifica	coeff. rid. gruppo
-391.67	CC 38	A1-M1	-41.24	48.38	1.17	R3	1.00
-234.00	URTO-Y		-25.47	57.43	2.25	R1	1.00
-373.04	CC 131	SLV-M1	-39.38	48.38	1.23	R3	1.00
117.91	CC 133	SLV-M1	9.72	33.78	3.48	R3	1.00
-231.3	URTO-X		-25.21	57.43	2.28	R1	1.00

N < 0 compressione

N > 0 trazione

7.4 ANALISI STRUTTURALE

7.4.1 Sollecitazioni di calcolo

I seguenti grafici riportano le massime azioni di taglio e flettenti agenti per le combinazioni di calcolo significative.

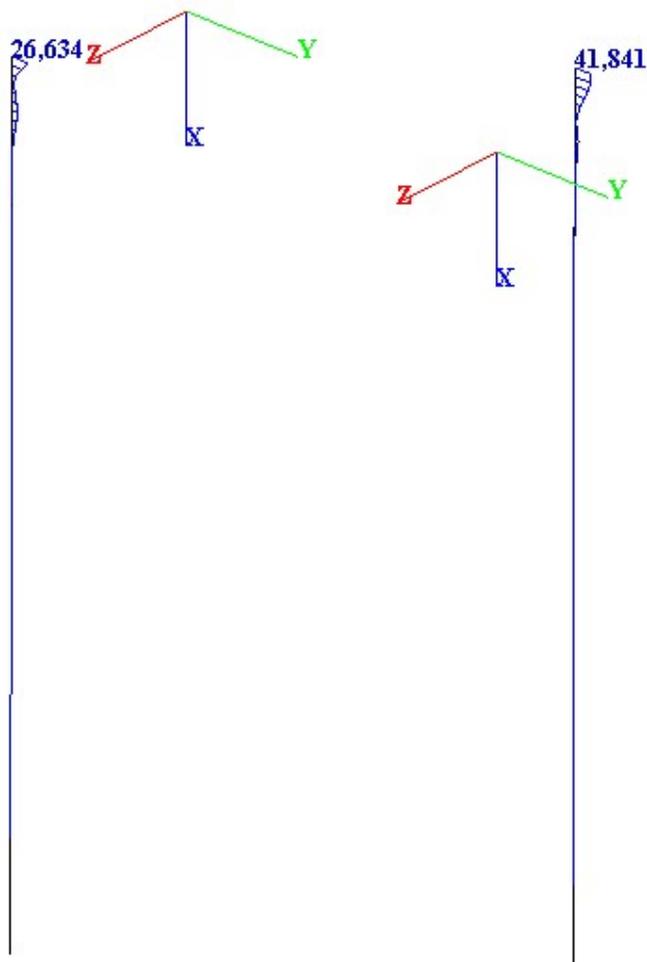


Figura 7-14. Massimo momento (sx) e taglio lungo il micropalo per comb. SLU-SLV URTO

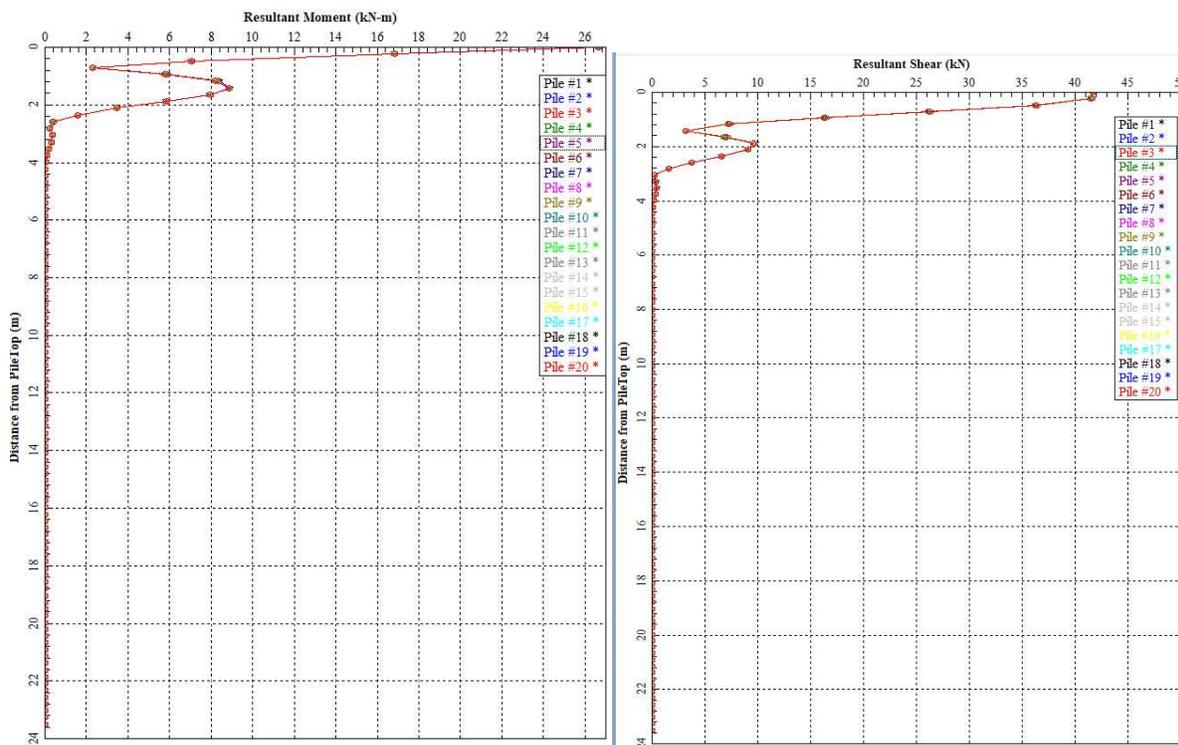


Figura 7-15. Andamento momento e taglio massimo lungo il micropalo per comb. SLU-SLV URTO

7.4.2 Verifica strutturale

Per semplicità di lettura si riepilogano le sollecitazioni a testa micropalo ottenute con il software “Group” applicando i carichi dovuti alla sovrastruttura.

$N_{max} = 391.67 \text{ kN}$ (compressione)

$N_{min} = - 129.70 \text{ kN}$ (trazione)

$M = 26.63 \text{ kN/m}$

$V = 41.84 \text{ kN}$

Le sollecitazioni agenti sui micropali della pila della carreggiata Sud sono inferiori di quelle determinate per la carreggiata Nord.

Adottano la stessa lunghezza dei micropali e lo stesso tubo di armatura, le verifiche geotecniche e strutturali sono dunque soddisfatte.