

**LAVORI DI COLLEGAMENTO TRA LA S.S.11 A MAGENTA E LA TANGENZIALE OVEST DI MILANO**

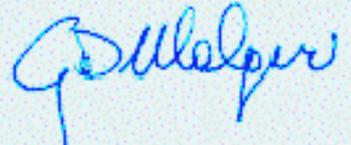
**VARIANTE DI ABBIATEGRASSO E ADEGUAMENTO IN SEDE DEL TRATTO ABBIATEGRASSO-VIGEVANO FINO AL PONTE SUL FIUME TICINO**

**1° STRALCIO DA MAGENTA A VIGEVANO - TRATTA C**

**PROGETTO ESECUTIVO**

 <p><b>STUDIO CORONA</b></p>	 <p><b>Ing. Valerio Bajetti</b> Ordine degli Ingg. di Roma e provincia n° A-26211</p>	<p><b>ING. RENATO DEL PRETE</b></p> <p><b>Ing. Renato Del Prete</b> Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 5073</p>	 <p><b>Arch. Nicoletta Frattini</b> Ordine degli Arch. di Torino e provincia n° A-8433</p>	 <p><b>Ing. Gabriele Incecchi</b> Ordine degli Ingg. di Roma e provincia n° A-12102</p>
	<p><b>Ing. Renato Vaira</b> (Ordine degli Ingg. di Torino e Provincia n° 4663 W)</p>	 <p><b>Prof. Ing. Matteo Ranieri</b> Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 1137</p>	<p><b>SETAC Srl</b> Servizi &amp; Engineering Trasporti Ambiente Costruzioni</p> <p><b>Prof. Ing. Luigi Monterisi</b> Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 1771</p>	<p><b>ARKE' INGEGNERIA s.r.l.</b> Via Impugnato, 2 - 70132 Bari</p> <p><b>Ing. Gioacchino Angarano</b> Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 5970</p>

VISTO: IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO



Dott. Ing. Giuseppe Danilo MALGERI

INTEGRATORE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE



Ing. Valerio BAJETTI

GEOLOGO



Prof. Ing. Geol. Luigi MONTERISI

IL COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE



Ing. Gianluca CICIRIELLO

**HE05**

**H - PROGETTO STRUTTURALE OPERE PRINCIPALI**

**HE - P002 - PONTE ROGGIA TICINELLO**

**RELAZIONE DI CALCOLO GEOTECNICA - PALI DI FONDAZIONE**

CODICE PROGETTO

PROGETTO      LIV. PROG.      N. PROG.

LO203      E      1801

NOME FILE

HE05-P03PO02STRRE05\_B.dwg

REVISIONE

SCALA:

CODICE ELAB. P03PO02STRRE05

B

-----

C					
B	EMISSIONE A SEGUITO DI RAPPORTO INTERMEDIO DI VERIFICA ITCF-C186001-01-ATF-RA-00001	FEBBRAIO 2019	ING. GIUSEPPE CRISÀ	ING. GAETANO RANIERI	ING. VALERIO BAJETTI
A	EMISSIONE	SETTEMBRE 2018	ING. GIUSEPPE CRISÀ	ING. GAETANO RANIERI	ING. VALERIO BAJETTI
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

## SOMMARIO

1	PREMESSA .....	3
1.1	Normativa .....	5
2	UNITA' DI MISURA .....	5
3	MATERIALI .....	6
3.1	Calcestruzzo .....	6
3.1.1	Calcestruzzo per opere di sottofondazione .....	6
3.1.2	Calcestruzzo per pali di fondazione (UNI 11104-2016) .....	6
3.2	Acciaio .....	6
3.2.1	Acciaio per armatura lenta .....	6
3.3	Calcolo dei copriferri minimi .....	6
4	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI .....	8
4.1	Definizione della stratigrafia e dei parametri geotecnici di calcolo .....	8
4.2	Approccio di calcolo .....	10
5	AZIONI SOLLECITANTI SUI PALI DI FONDAZIONE DELLE SPALLE .....	11
5.1	Azioni sollecitanti di calcolo trasmesse dalla spalla .....	11
5.2	Azioni sollecitanti sul singolo palo connesse alla deformabilità orizzontale del terreno ...	12
5.2.1	Valutazione della costante di reazione orizzontale del terreno .....	12
5.2.2	Combinazione SLE – Quasi Permanente .....	14
5.2.3	Combinazione SLE – Frequente .....	15
5.2.4	Combinazione SLE – Rara .....	16
5.2.5	Combinazione SLU – STR .....	17
5.2.6	Combinazione SLV .....	18
6	PALI DI FONDAZIONE DELLE SPALLE – VERIFICHE STRUTTURALI .....	19
6.1	Sezione ed armatura di verifica .....	19
6.2	Verifica allo Stato Limite di limitazione delle tensioni .....	19
6.2.1	Combinazione Quasi Permanente – Azione normale massima .....	19
6.2.2	Combinazione Quasi Permanente – Azione normale minima .....	20
6.2.3	Combinazione Frequente – Azione normale massima .....	21
6.2.4	Combinazione Frequente – Azione normale minima .....	22
6.2.5	Combinazione Caratteristica – Azione normale massima .....	23
6.2.6	Combinazione Caratteristica – Azione normale minima .....	24
6.3	Verifica allo Stato Limite di fessurazione .....	25
6.3.1	Combinazione allo SLE – Quasi Permanente – Azione normale massima .....	25
6.3.2	Combinazione allo SLE – Quasi Permanente – Azione normale minima .....	26
6.3.3	Combinazione allo SLE – Frequente – Azione normale massima .....	27
6.3.4	Combinazione allo SLE – Frequente – Azione normale massima .....	28
6.4	Verifica allo Stato Limite Ultimo per pressoflessione .....	29
6.4.1	Condizione statica – Azione normale massima .....	29
6.4.2	Condizione statica – Azione normale minima .....	30
6.4.3	Condizione sismica – Azione normale massima .....	31
6.4.4	Condizione sismica – Azione normale minima .....	32
6.5	Verifica allo Stato Limite Ultimo per taglio .....	33
7	PALI DI FONDAZIONE DELLE SPALLE – VERIFICHE GEOTECNICHE .....	34
7.1	Formulazioni adottate per la verifica del carico limite ultimo .....	34
7.1.1	Palo in terreno coesivo saturo .....	34
7.1.2	Palo in terreno incoerente .....	35

7.2	Valutazione del coefficiente di capacità portante alla punta $N_q$ .....	36
7.3	Verifiche di portanza verticale (carico limite ultimo) e laterale del palo .....	37
7.4	Valutazione dell'efficienza dei pali in gruppo .....	45
7.5	Validazione manuale dei risultati del software .....	46
7.6	Calcolo dei cedimenti verticali allo Stato Limite di Esercizio – Combinazione caratteristica 48	
8	AZIONI SOLLECITANTI SUI PALI DI FONDAZIONE DELLE PILE .....	51
8.1	Azioni sollecitanti di calcolo trasmesse dalle pile .....	51
8.2	Azioni sollecitanti sul singolo palo connesse alla deformabilità orizzontale del terreno ...	52
8.2.1	Valutazione della costante di reazione orizzontale del terreno .....	52
8.2.2	Combinazione SLE – Quasi Permanente .....	54
8.2.3	Combinazione SLE – Frequente .....	55
8.2.4	Combinazione SLE – Rara .....	56
8.2.5	Combinazione SLU – STR .....	57
8.2.6	Combinazione SLV .....	58
9	PALI DI FONDAZIONE DELLE PILE – VERIFICHE STRUTTURALI .....	59
9.1	Sezione ed armatura di verifica .....	59
9.2	Verifica allo Stato Limite di limitazione delle tensioni .....	59
9.2.1	Combinazione Quasi Permanente – Azione normale massima .....	59
9.2.2	Combinazione Quasi Permanente – Azione normale minima .....	60
9.2.3	Combinazione Frequente – Azione normale massima .....	61
9.2.4	Combinazione Frequente – Azione normale minima .....	62
9.2.5	Combinazione Caratteristica – Azione normale massima .....	63
9.2.6	Combinazione Caratteristica – Azione normale minima .....	64
9.3	Verifica allo Stato Limite di fessurazione .....	65
9.4	Verifica allo Stato Limite Ultimo per pressoflessione .....	65
9.4.1	Condizione statica – Azione normale massima .....	65
9.4.2	Condizione statica – Azione normale minima .....	66
9.4.3	Condizione sismica – Azione normale massima .....	67
9.4.4	Condizione sismica – Azione normale minima .....	68
9.5	Verifica allo Stato Limite Ultimo per taglio .....	69
10	PALI DI FONDAZIONE DELLE PILE – VERIFICHE GEOTECNICHE .....	70
10.1	Formulazioni adottate per la verifica del carico limite ultimo .....	70
10.1.1	Palo in terreno coesivo saturo .....	70
10.1.2	Palo in terreno incoerente .....	71
10.2	Valutazione del coefficiente di capacità portante alla punta $N_q$ .....	72
10.3	Verifiche di portanza verticale (carico limite ultimo) e laterale del palo .....	73
10.4	Valutazione dell'efficienza dei pali in gruppo .....	80
10.5	Validazione manuale dei risultati del software .....	81
10.6	Calcolo dei cedimenti verticali allo Stato Limite di Esercizio – Combinazione caratteristica .....	82

## 1 PREMESSA

La presente relazione riporta i calcoli geotecnici e strutturali relativi alla progettazione esecutiva delle fondazioni profonde del viadotto di scavalco della Roggia Ticinello, di una strada locale e di un fosso irriguo, nell'ambito della Tratta "C" del "Collegamento tra la S.S. 11 "Padana Superiore" a Magenta e la Tangenziale ovest di Milano, con variante di Abbiategrasso e adeguamento in sede del tratto del Tratto Abbiategrasso-Vigevano fino al ponte sul fiume Ticino".

L'opera in oggetto presenta uno schema statico di trave continua su tre campate aventi luci tra gli assi di appoggio pari a 31+38+31 m.

L'impalcato è composto, da quattro travi continue in acciaio a doppio T ad altezza variabile sostenenti la soletta di scorrimento stradale in calcestruzzo armato ordinario.

In riguardo agli aspetti sismici, l'impalcato è isolato alla sommità delle pile e spalle mediante isolatori elastomerici armati.

### Dimensioni dell'impalcato:

Larghezza cordoli	= 0.75 m
Larghezza carreggiata, categoria C1	= 10.50 m
Larghezza totale soletta	= 12.00 m
Numero delle travi	= 4
Interasse travi	= 3.20 m
Altezza delle travi (variabile)	= 1.00÷2.00 m
Spessore soletta	= 30 cm (lastra 6 cm + getto 24 cm)

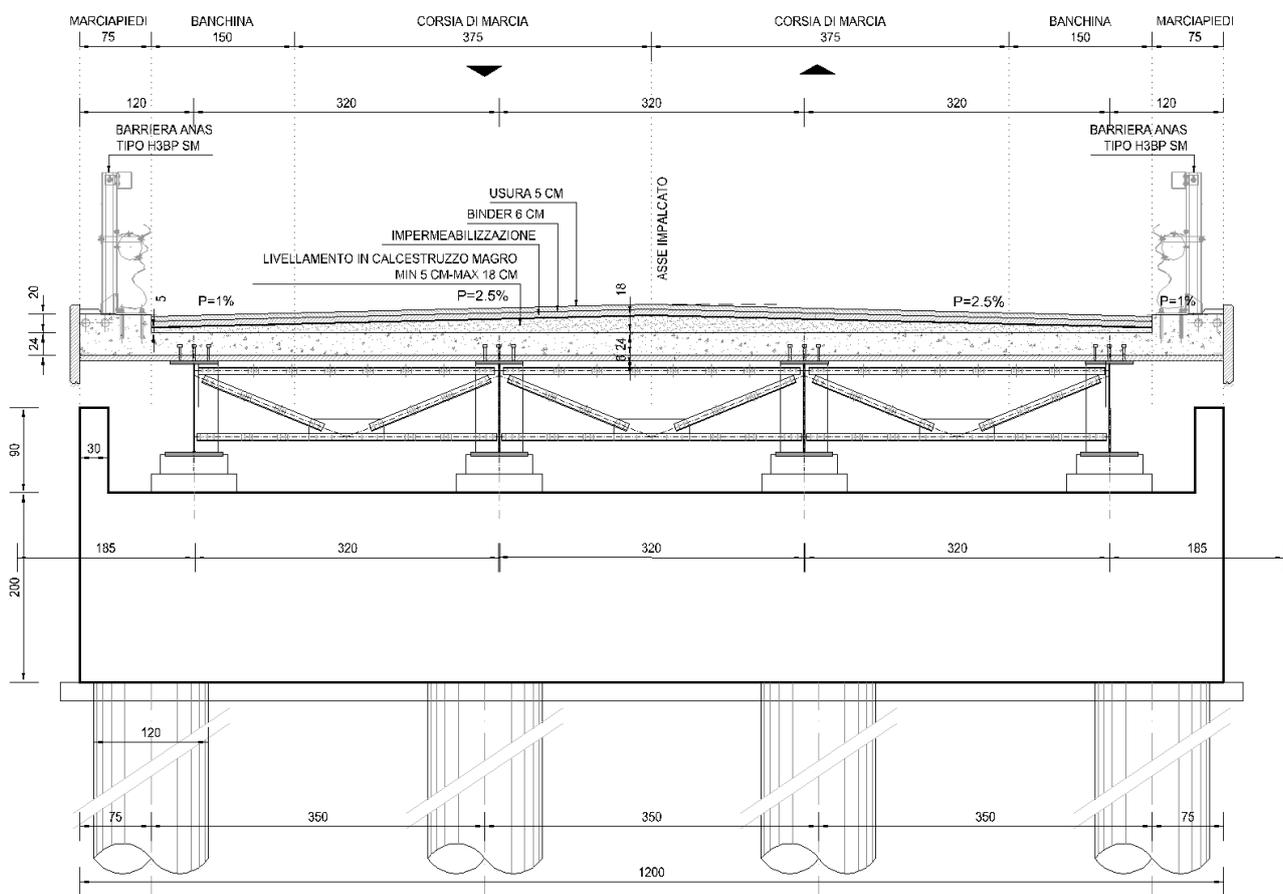


FIGURA 1 - SEZIONE TIPICA IMPALCATO (SU SPALLA)

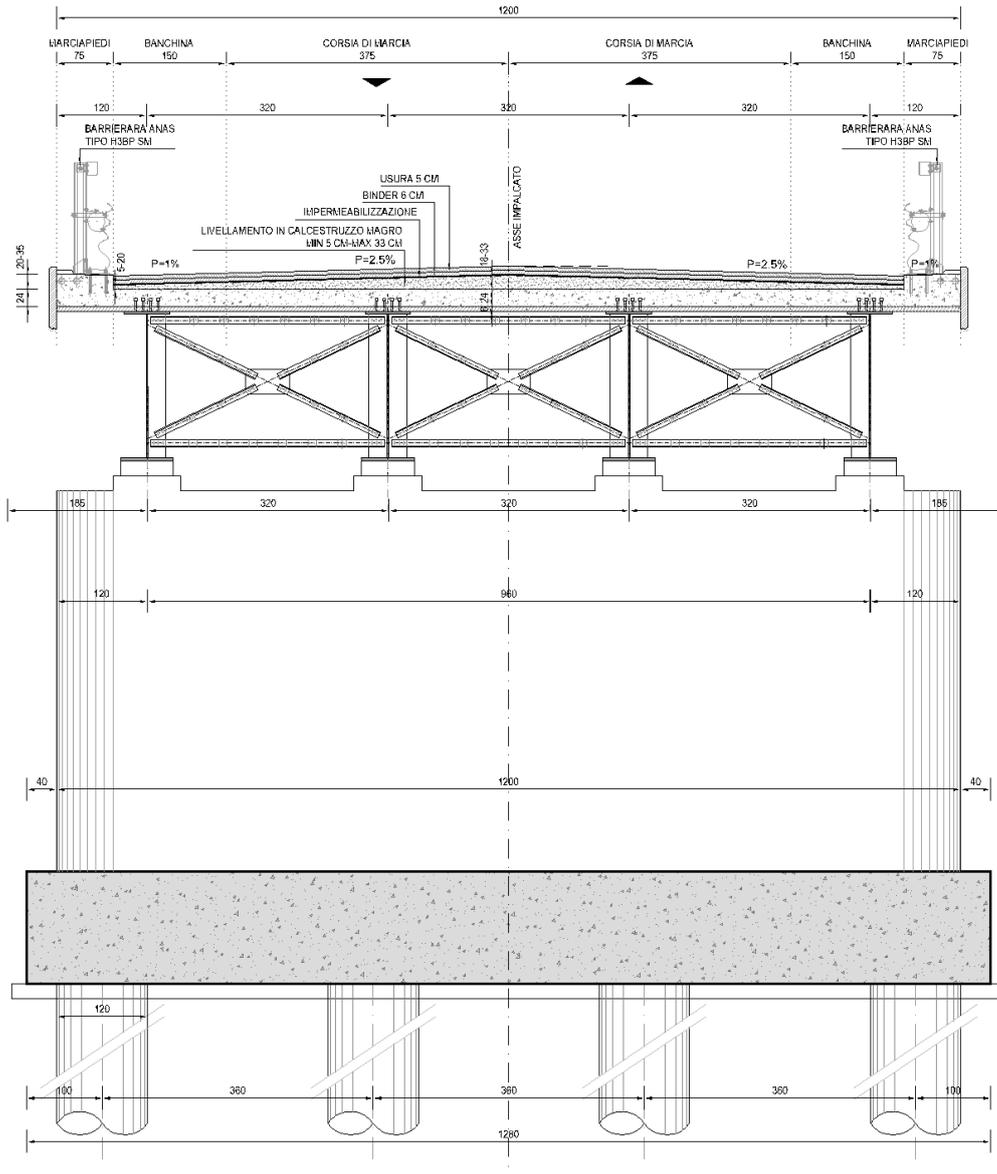


FIGURA 2- SEZIONE IMPALCATO (SU PILA)

I pali di fondazione sono trivellati in calcestruzzo armato, di diametro pari a 1200 mm e hanno la seguente disposizione:

- Spalle:

- numero pali:  $N = 4$
- interasse trasv.:  $l_t = 3,20 \text{ m}$
- lunghezza:  $L = 26,00 \text{ m}$

- Pile (separate per ogni carreggiata):

- numero pali:  $N = 8$
- interasse trasv.:  $l_t = 3,60 \text{ m}$
- interasse long.:  $l_l = 3,60 \text{ m}$
- lunghezza:  $L = 21,00 \text{ m}$

## 1.1 NORMATIVA

Nella redazione dei calcoli statici ci si è attenuti alle prescrizioni della Normativa vigente; in particolare:

- **Legge n°1086 del 05/11/1971** “Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica”
- **Legge n°64 del 02/02/1974**: “Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche”
- **Decreto Ministeriale 17/01/2018** Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”
- **Circolare Min. 02/02/2009, n° 617** “Istruzioni per l’applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008”
- **UNI EN 1993-1-1:2005** “Eurocodice 3 – Progettazione delle strutture in acciaio – Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici”
- **UNI EN 1993-1-5:2007** “Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture in acciaio – Parte 1-5: Elementi strutturali a lastra”
- **UNI EN 1993-1-9:2005** “Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture in acciaio – Parte 1-9: Fatica”
- **UNI EN 1993-1-10:2005** “Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture in acciaio – Parte 1-10: Resilienza del materiale e proprietà attraverso lo spessore”
- **UNI EN 1993-2:2007** “Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture in acciaio – Parte 2: Ponti in acciaio”
- **UNI EN 1994-1-1:2005** “Eurocodice 4 - Progettazione delle strutture composte acciaio-calcestruzzo – Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici”
- **UNI EN 1994-2:2006** “Eurocodice 4 - Progettazione delle strutture composte acciaio-calcestruzzo – Parte 2: Regole generali e regole per i ponti”

## 2 UNITA' DI MISURA

Nei calcoli è stato fatto uso delle seguenti unità di misura:

- per i carichi:  $\text{kN/m}^2, \text{kN/m}, \text{kN}$
- per i momenti:  $\text{kNm}$
- per i tagli e sforzi normali:  $\text{kN}$
- per le tensioni:  $\text{N/mm}^2$
- per le accelerazioni:  $\text{m/sec}^2$

### 3 MATERIALI

#### 3.1 CALCESTRUZZO

##### 3.1.1 CALCESTRUZZO PER OPERE DI SOTTOFONDAZIONE

Per le opere di sottofondazione è stato previsto un calcestruzzo con classe di resistenza **C12/15** e classe di esposizione **X0**.

Tale calcestruzzo non ha valenza strutturale e quindi non se ne riportano le caratteristiche meccaniche.

##### 3.1.2 CALCESTRUZZO PER PALI DI FONDAZIONE (UNI 11104-2016)

Per le opere di fondazione (zattera) è stato previsto un calcestruzzo con classe di resistenza **C25/30** con le seguenti caratteristiche meccaniche:

CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI CALCESTRUZZI - D.M. 17.01.2018			
Classe di resistenza del calcestruzzo		C25/30	▼
Resistenza caratteristica cubica a compressione	$R_{ck}$	<b>30,00</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]
Resistenza caratteristica cilindrica a compressione	$f_{ck}$	<b>24,90</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]
Resistenza cilindrica media a compressione a 28 gg	$f_{cm}$	<b>32,90</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]
Resistenza di calcolo a compressione	$f_{cd}$	<b>14,11</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]
Resistenza media a trazione	$f_{ctm}$	<b>2,56</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]
Resistenza caratteristica a trazione	$f_{ctk}$	<b>1,79</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]
Resistenza di calcolo a trazione	$f_{ctd}$	<b>1,19</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]
Modulo elastico istantaneo	$E_c$	<b>31.220,19</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]
Modulo elastico medio	$E_{cm}$	<b>30.440,77</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]

- Classe di esposizione: **XC2**

#### 3.2 ACCIAIO

##### 3.2.1 ACCIAIO PER ARMATURA LENTA

Per le armature lente è stato previsto un acciaio del tipo **B450C**, con le seguenti caratteristiche meccaniche:

- $f_{t,k}$  = 540,00 N/mm<sup>2</sup> (resistenza caratteristica a rottura)
- $f_{y,k}$  = 450,00 N/mm<sup>2</sup> (tensione caratteristica di snervamento)
- $f_{y,d}$  = 391,30 N/mm<sup>2</sup> (tensione di snervamento di calcolo –  $\gamma_s=1,15$ )
- $E_s$  = 210.000,00 N/mm<sup>2</sup> (modulo elastico istantaneo)

#### 3.3 CALCOLO DEI COPRIFERRI MINIMI

Ai sensi delle prescrizioni di cui alla normativa vigente e con riferimento alla procedura di calcolo prevista dalla Circolare Applicativa (riferita alla normativa del 2008 ma a tutt'oggi valida) si riporta di seguito il calcolo del copriferro minimo inteso come ricoprimento delle barre:

	CODICE FILE	MAT-02
	OGGETTO:	CALCOLO COPRIFERRO

Definizione delle condizioni ambientali (TABELLA 4.1.IV - Descrizione delle condizioni ambientali)		
<b>Condizioni ambientali</b>	<b>Classe di esposizione</b>	<b>Classe di esposizione di progetto</b>
Ordinarie	X0,XC1,XC2,XC3,XF1	XC2
Aggressive	XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3	<b>Condizioni ambientali di progetto</b>
Molto Aggressive	XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4	<b>Ordinario</b>

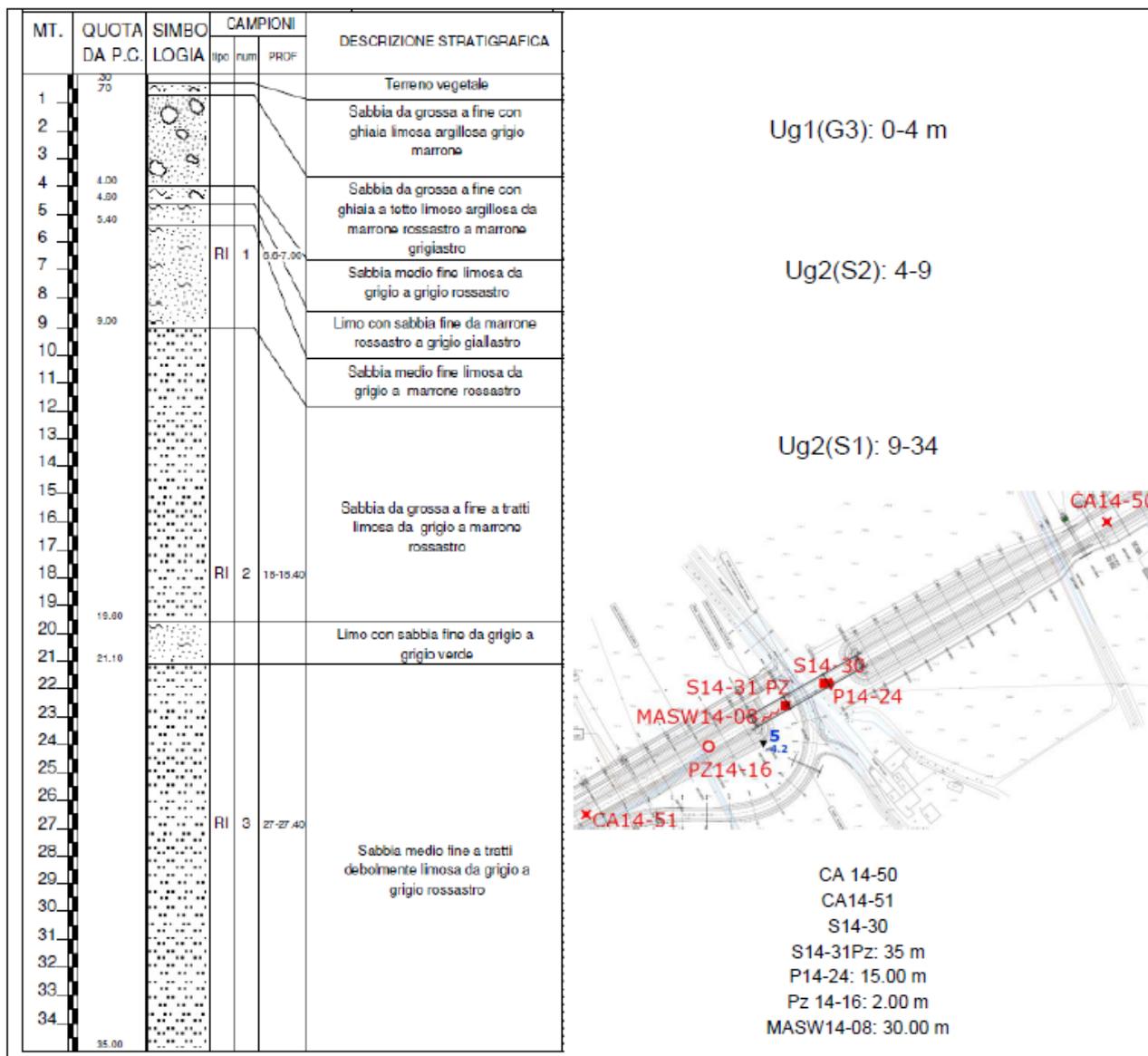
Definizione della classi di resistenza rispetto alla Tabelle C4.1.IV		
<b>Classe minima Cmin</b>	<b>Classe di resistenza del calcestruzzo</b>	<b>Classe di resistenza del calcestruzzo</b>
C25/30	Barre da c.a. altri elemen	C25/30
<b>Classe C0</b>	<b>Vita Nominale dell'opera</b>	<b>Produzioni sottoposte a controllo qualità</b>
C45/55	100 Anni	NO

Determinazione del copriferro minimo (Tab. C4.1.IV)	
Copriferro minimo ai sensi della tabella e delle precisazioni di cui al capitolo C4.1.6.1.3 della Circolare Applicativa	35 mm
Tolleranza costruttiva	5 mm
<b>COPRIFERRO MINIMO DI PROGETTO</b>	<b>40 mm</b>

## 4 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI

### 4.1 DEFINIZIONE DELLA STRATIGRAFIA E DEI PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

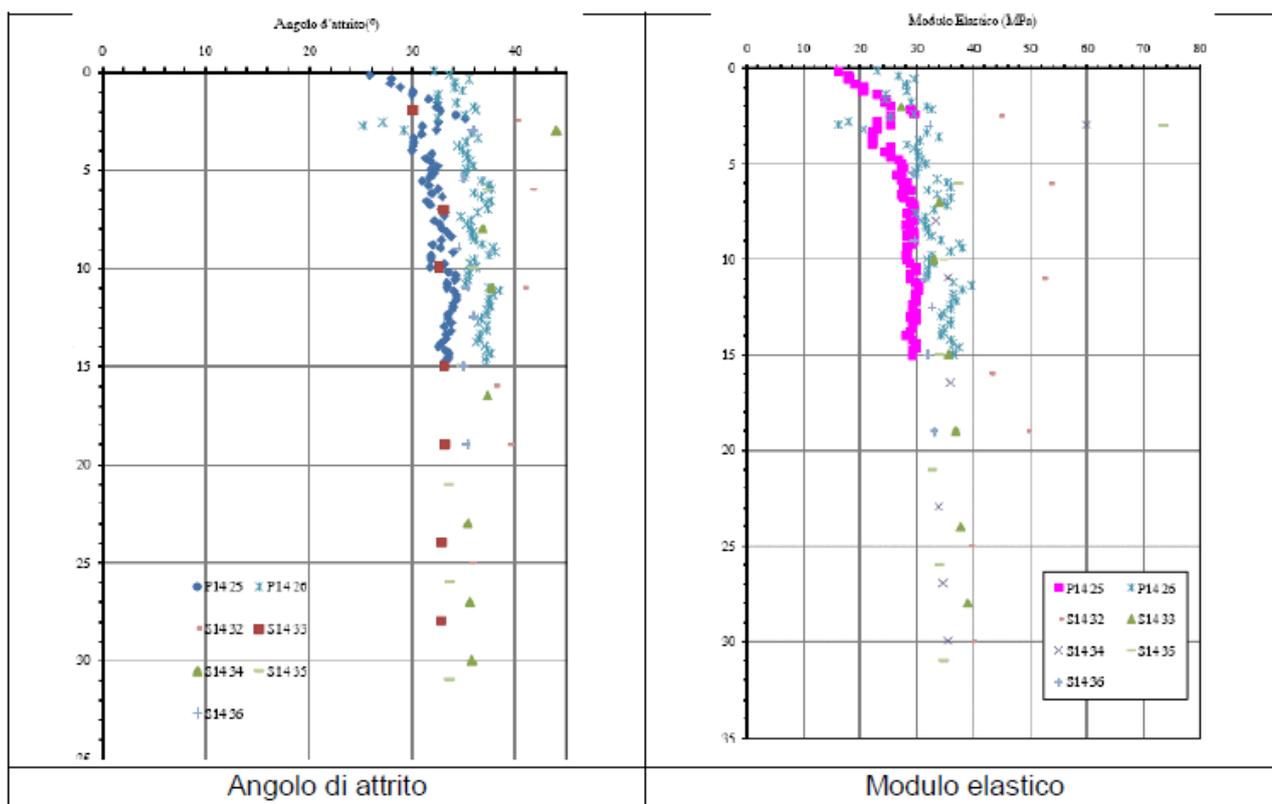
In relazione a quanto riportato all'interno della relazione geologica e geotecnica per la verifica geotecnica dei pali di fondazione delle spalle e delle pile si farà riferimento alla seguente stratigrafia:



In base ai dati disponibili, la profondità della falda si colloca a quota **2,17** m dal piano campagna. Ai fini delle verifiche sismiche risulta:

- Categoria sottosuolo: C
- Categoria topografica: T1

Nelle immagini seguenti si riportano i diagrammi  $\Phi, z$  e  $E, z$  forniti dalla elaborazione delle prove penetrometriche SPT eseguite in zona limitrofa a quella dell'opera in esame:



Infine, nella tabella seguente si riportano gli intervalli di valori dei parametri geotecnici relativi alla zona in cui ricade l'opera:

PARAMETRI GEOTECNICI GENERALI								
UNITA'	$D_R$ (%)	$\gamma_t$ (kN/mc)	$\Phi'$	$\Phi'_{op}$	LL (%)	cu (kPa)	E (MPa)	$E_{op}$
Ug1 (G3)	40 ÷ 70	18.50 ÷ 19.50	30° ÷ 38°	35°			26 ÷ 38	32
Ug2 (S2/S1)	---	18.00 ÷ 20.00	32° ÷ 36°	34°	26 ÷ 36		32 ÷ 38	34

I valori di progetto di  $\Phi'$  e E sono indicati con  $\Phi'_{op}$  e  $E_{op}$

Per le spalle viene considerata al di sopra del piano di campagna la presenza dello strato di terreno da rilevato. Per tale strato l'attrito laterale viene trascurato in quanto il palo è rivestito di lamierino.

- Peso specifico:  $\gamma = 20,00 \text{ kN/m}^3$
- Angolo di attrito interno:  $\phi = 35,00^\circ$  (trascurato per portanza laterale)
- Coesione drenata:  $c' = 0,00 \text{ kN/m}^2$
- Modulo elastico:  $E = 22,50 \text{ N/mm}^2$

La falda di progetto è posta a quota **- 1,00 m** di profondità dal piano di campagna.

## 4.2 APPROCCIO DI CALCOLO

Le verifiche geotecniche di carico limite ultimo e di portanza laterale vengono condotte secondo l'approccio 2 previsto dal D.M.17.01.2018 "Norme Tecniche per le Costruzioni" - Combinazione A1 - M1 - R3.

**Tab. 6.4.II** – Coefficienti parziali  $\gamma_R$  da applicare alle resistenze caratteristiche a carico verticale dei pali

Resistenza	Simbolo	Pali infissi	Pali trivellati	Pali ad elica continua
	$\gamma_R$	(R3)	(R3)	(R3)
Base	$\gamma_b$	1,15	1,35	1,3
Laterale in compressione	$\gamma_s$	1,15	1,15	1,15
Totale (*)	$\gamma$	1,15	1,30	1,25
Laterale in trazione	$\gamma_{st}$	1,25	1,25	1,25

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

È stata considerata la presenza di un'unica verticale indagata (S14-31Pz) al fine di determinare il valore dei fattori di riduzione delle resistenze caratteristiche  $\xi_3$  e  $\xi_4$ :

Numero di verticali indagate	1	2	3	4	5	7	$\geq 10$
$\xi_3$	1,70	1,65	1,60	1,55	1,50	1,45	1,40
$\xi_4$	1,70	1,55	1,48	1,42	1,34	1,28	1,21

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

## 5 AZIONI SOLLECITANTI SUI PALI DI FONDAZIONE DELLE SPALLE

### 5.1 AZIONI SOLLECITANTI DI CALCOLO TRASMESSE DALLA SPALLA

Di seguito sono riportati i valori delle azioni sollecitanti trasmesse dalla zattera di fondazione della spalla e valutate in sommità dei singoli pali di fondazione (Elaborato **HE04-P03PO02STRRE04\_A**):

Numero di pali di fondazione	4					
	Y	-4,80	-1,60	1,60	4,80	
	Y <sup>2</sup>	23,04	2,56	2,56	23,04	51,20

COMBINAZIONI DI CARICO		N <sub>Sd,1</sub> [kN]	N <sub>Sd,2</sub> [kN]	N <sub>Sd,3</sub> [kN]	N <sub>Sd,4</sub> [kN]	M <sub>Sd</sub> [kNm]	V <sub>Sd</sub> [kN]
SLE - QUASI PERMANENTI	GEN Q.P.(max)	1.210,77	1.210,77	1.210,77	1.210,77	-668,96	191,47
	GEN Q.P.(min)	1.198,38	1.198,38	1.198,38	1.198,38	-695,89	179,23
SLE - FREQUENTI	GEN FREQ Mobili(max)	1.259,73	1.423,45	1.587,17	1.750,89	-461,39	298,14
	GEN FREQ Vento(max)	1.203,62	1.208,39	1.213,16	1.217,93	-466,65	295,78
	GEN FREQ Termico(max)	1.201,50	1.208,50	1.215,51	1.222,51	-463,96	297,25
	GEN FREQ Mobili(min)	1.405,55	1.241,83	1.078,11	914,39	-501,68	279,83
	GEN FREQ Vento(min)	1.205,52	1.200,75	1.195,98	1.191,21	-493,58	283,54
	GEN FREQ Termico(min)	1.207,64	1.200,64	1.193,64	1.186,63	-496,27	282,58
SLE - RARE	GEN RARA Mobili(max)	1.237,98	1.535,24	1.832,50	2.129,76	-388,22	338,52
	GEN RARA Vento(max)	1.185,11	1.399,45	1.613,78	1.828,12	-391,24	340,87
	GEN RARA Frenam(max)	1.260,64	1.426,42	1.592,20	1.757,99	-336,25	359,15
	GEN RARA Termico(max)	1.219,17	1.414,09	1.609,00	1.803,92	-380,48	341,61
	GEN RARA Mobili(min)	1.577,34	1.280,08	982,81	685,55	-442,98	313,87
	GEN RARA Vento(min)	1.480,18	1.265,84	1.051,50	837,17	-436,96	320,53
	GEN RARA Frenam(min)	1.404,65	1.238,87	1.073,08	907,30	-491,95	288,39
	GEN RARA Termico(min)	1.446,12	1.251,20	1.056,29	861,37	-447,72	311,30
SLU - STR	GEN SLU Mobili(max)	1.713,04	2.118,72	2.524,39	2.930,06	-526,43	456,93
	GEN SLU Vento(max)	1.637,31	1.933,94	2.230,58	2.527,22	-530,51	461,30
	GEN SLU Frenamento(max)	1.750,18	1.973,99	2.197,80	2.421,60	-456,28	483,97
	GEN SLU Termico(max)	1.686,91	1.954,42	2.221,92	2.489,43	-517,60	460,32
	GEN SLU Mobili(min)	2.186,51	1.780,83	1.375,16	969,49	-595,51	425,89
	GEN SLU Vento(min)	2.059,71	1.763,07	1.466,43	1.169,79	-587,39	436,10
	GEN SLU Frenamento(min)	1.946,83	1.723,02	1.499,22	1.275,41	-661,62	390,64
SLV	GEN SLV Long(max)	1.192,16	1.215,05	1.237,95	1.260,85	-380,97	355,24
		1.177,17	1.200,07	1.222,97	1.245,87	-359,61	355,24
		1.208,18	1.220,39	1.232,61	1.244,83	-380,97	353,15
	GEN SLV Trasv(max)	1.193,20	1.205,41	1.217,63	1.229,84	-359,61	353,15
		1.109,02	1.185,10	1.261,18	1.337,25	-589,96	273,90
		1.094,04	1.170,12	1.246,19	1.322,27	-568,60	273,90
		1.109,02	1.185,10	1.261,18	1.337,25	-673,16	230,67
		1.094,04	1.170,12	1.246,19	1.322,27	-651,81	230,67
	GEN SLV Vert(max)	1.213,52	1.236,51	1.259,51	1.282,51	-614,60	243,34
		1.229,54	1.241,86	1.254,17	1.266,48	-614,60	240,29
		1.213,52	1.236,51	1.259,51	1.282,51	-698,08	193,36
		1.229,54	1.241,86	1.254,17	1.266,48	-698,08	189,51
	GEN SLV Long(min)	1.215,95	1.203,73	1.191,52	1.179,30	-870,31	87,76
		1.200,96	1.188,75	1.176,53	1.164,32	-848,95	87,76
		1.231,97	1.209,07	1.186,17	1.163,28	-870,31	95,80
		1.216,99	1.194,09	1.171,19	1.148,29	-848,95	95,80
	GEN SLV Trasv(min)	1.315,10	1.239,03	1.162,95	1.086,87	-672,56	241,68
		1.300,12	1.224,04	1.147,97	1.071,89	-651,21	241,68
		1.315,10	1.239,03	1.162,95	1.086,87	-755,77	201,04
		1.300,12	1.224,04	1.147,97	1.071,89	-734,41	201,04
	GEN SLV Vert(min)	1.179,60	1.167,29	1.154,97	1.142,66	-626,56	202,53
1.195,62		1.172,63	1.149,63	1.126,64	-626,56	206,14	
1.179,60		1.167,29	1.154,97	1.142,66	-709,77	151,78	
1.195,62		1.172,63	1.149,63	1.126,64	-709,77	156,56	

Nella tabella successiva sono riepilogati i valori massimi dell'azione normale (compressione e trazione), del momento flettente e dell'azione tagliante agenti sui pali di fondazione:

$N_{Sd,MAX}$ [kN]	$N_{Sd,MIN}$ [kN]	$M_{Sd,MAX}$ [kNm]	$V_{Sd,MAX}$ [kN]
1.210,77	1.198,38	-695,89	191,47
1.750,89	914,39	-501,68	279,83
2.129,76	685,55	-491,95	288,39
2.930,06	969,49	-661,62	390,64
1.337,25	1.071,89	-870,31	87,76

## 5.2 AZIONI SOLLECITANTI SUL SINGOLO PALO CONNESSE ALLA DEFORMABILITÀ ORIZZONTALE DEL TERRENO

Per effetto del taglio e della deformabilità del terreno nell'intorno del palo si generano le azioni sollecitanti definite nel seguito.

### 5.2.1 VALUTAZIONE DELLA COSTANTE DI REAZIONE ORIZZONTALE DEL TERRENO

Per terreni **prevalentemente incoerenti** si considera la costante di reazione orizzontale del terreno variabile con la profondità, secondo la seguente relazione lineare:

$$k_h = n_h \cdot \frac{z}{d}$$

dove:

- $n_h$  → costante dipendente dalla litologia
- $z$  → profondità
- $d$  → diametro del palo

Il valore della costante  $n_h$  viene determinato mediante la seguente relazione (Viggiani 1999 – [14.25]):

$$n_h = \frac{A \cdot \gamma}{1,35}$$

Il coefficiente  $A$  per terreni incoerenti è determinato secondo la seguente tabella (Viggiani 1999 – Tab. 14.5), in relazione allo stato di addensamento del terreno:

Stato di addensamento	Sciolto	Medio	Denso
Campo dei valori di $A$	100 ÷ 300	300 ÷ 1000	1000 ÷ 3000
Valore consigliato di $A$	200	600	1500
$N_h$ [N/cm <sup>3</sup> ], sabbie non immerse	2,5	7,5	20
$N_h$ [N/cm <sup>3</sup> ], sabbie immerse	1,5	5	12

Lo stato di addensamento del terreno è valutato come segue in relazione alla densità relativa del terreno stesso:

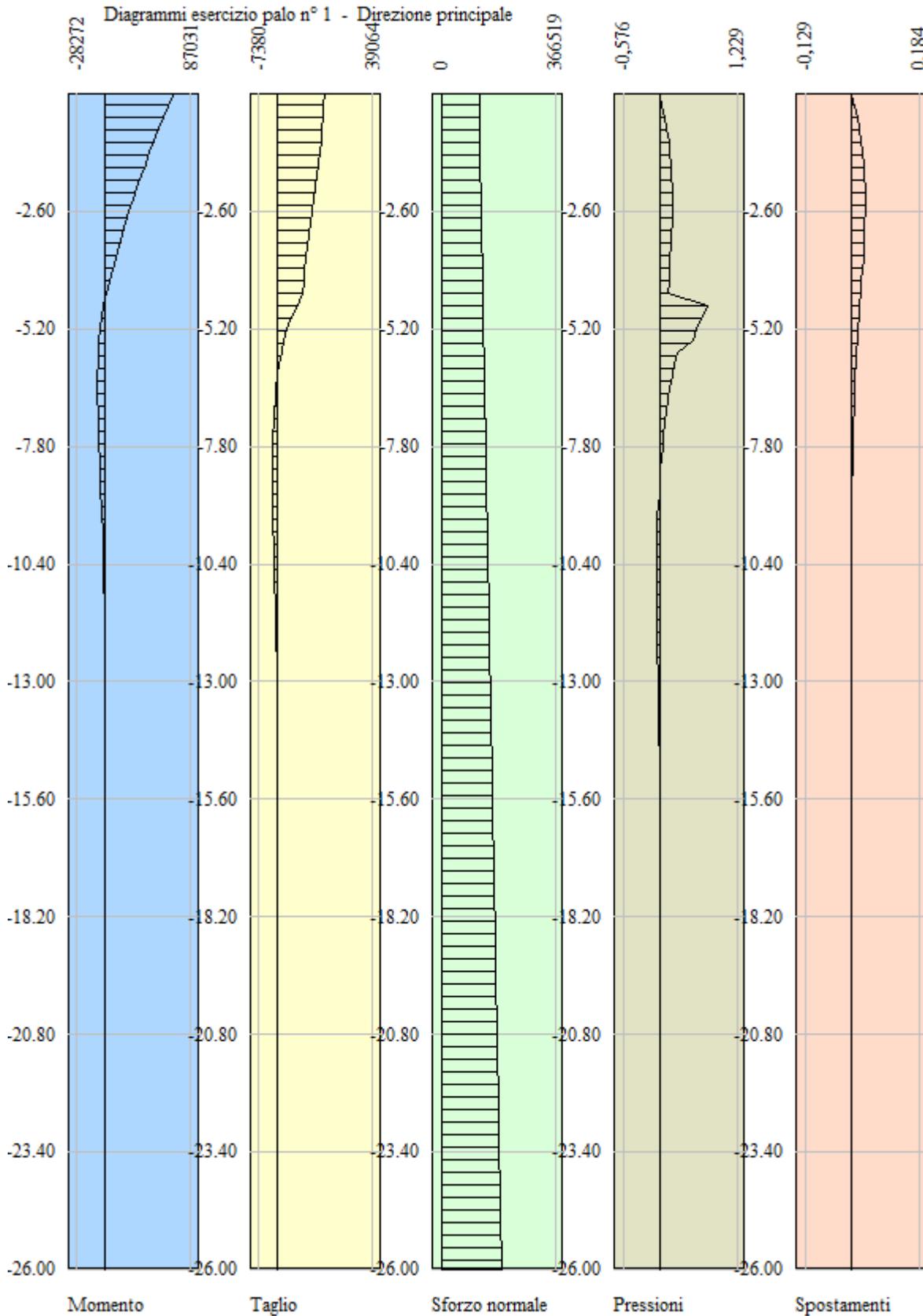
$D_r$ (%)	stato di addensamento
0 – 15	molto sciolto
15 – 35	sciolto
35 – 65	medio
65 – 85	denso
85 – 100	molto denso

Essendo stata posta la falda di progetto a **-1,00 m** dal piano di campagna, il terreno al di sopra di tale quota è considerato “secco – umido”, mentre il terreno al di sotto è considerato “satturo”.  
Il valore di  $k_h$  finale è stato determinato come media ponderata dei valori di  $k_h$  valutati per ciascuno strato della stratigrafia considerata:

STRATO	UNITA' LITOTECNICA	QUOTA INIZIALE [m]	QUOTA FINALE [m]	QUOTA INIZIALE (riferita alla testa palo) [m]	QUOTA FINALE (riferita alla testa palo) [m]	$H_{strato}$ [m]	STATO DI ADDENSAMENTO	A	Y [kN/m <sup>2</sup> ]	$n_s$ [N/cm <sup>2</sup> ]	d [m]	$k_h$ QUOTA INIZIALE	$k_h$ QUOTA FINALE	$k_{h,media}$ STRATO
1	RILEVATO	4,60	0,00	0,00	-4,60	4,60	SCIOLTO	200,00	20,00	2,963	1,20	0,00	11,36	5,68
2	G3	0,00	-1,00	-4,60	-5,60	1,00	MEDIO	600,00	18,50	8,222	1,20	31,52	38,37	34,94
3	G3	-1,00	-4,00	-5,60	-8,60	3,00	MEDIO	600,00	8,50	3,778	1,20	17,63	27,07	22,35
4	S1/S2	-4,00	-21,40	-8,60	-26,00	17,40	MEDIO	600,00	9,00	4,000	1,20	28,67	86,67	57,67

**Le azioni sollecitanti sui pali sono valutate nel caso di “palo libero di ruotare in testa soggetto ad azione tagliante e moment flettente”.**

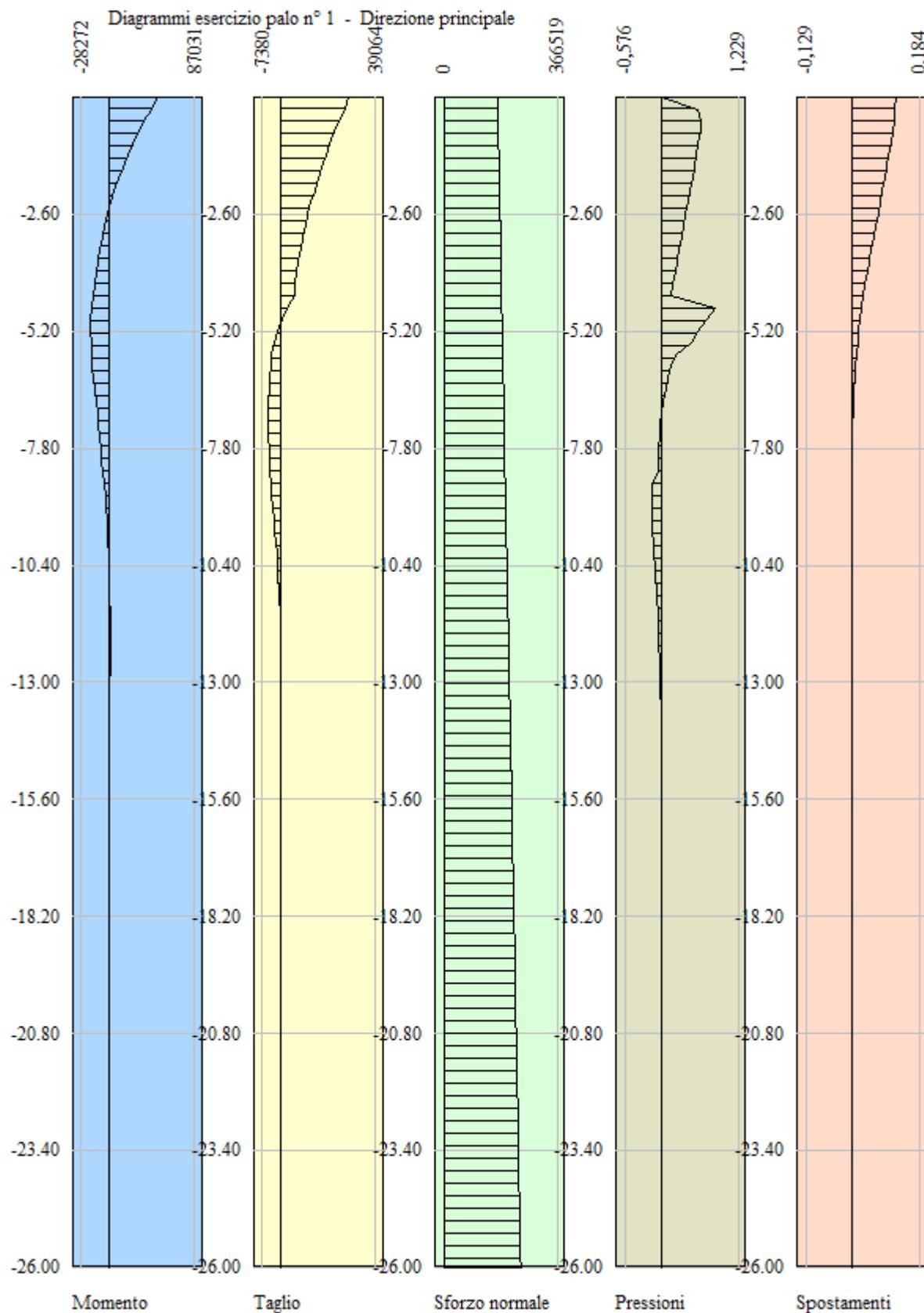
### 5.2.2 COMBINAZIONE SLE – QUASI PERMANENTE



Il momento flettente massimo di calcolo risulta pari a  $M_{Sd} = -695,89 \text{ kNm}$ .

L'azione tagliante massima di calcolo risulta pari a  $V_{Sd} = 191,47 \text{ kN}$ .

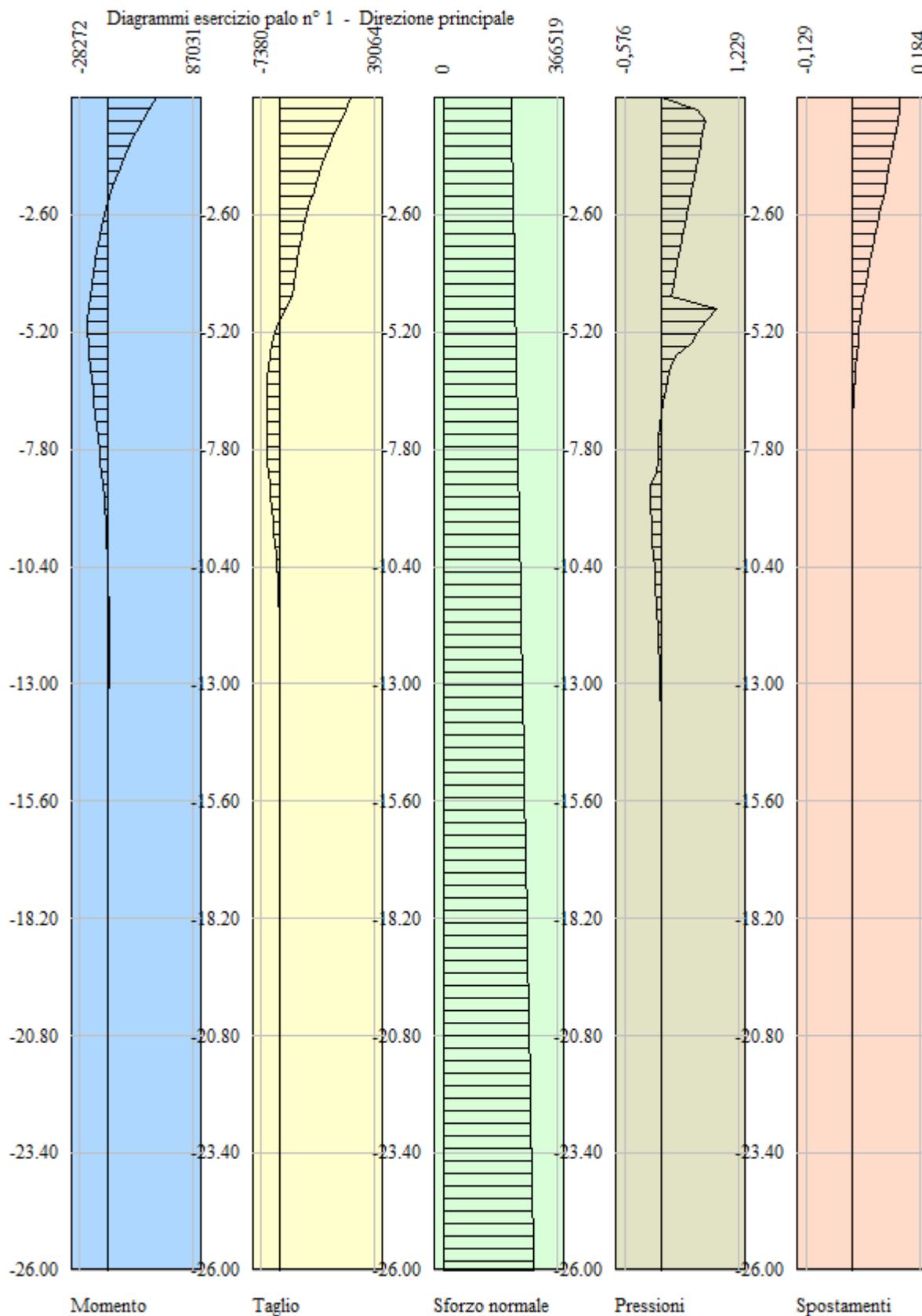
### 5.2.3 COMBINAZIONE SLE – FREQUENTE



Il momento flettente massimo di calcolo risulta pari a  $M_{Sd} = -501,68 \text{ kNm}$ .

L'azione tagliante massima di calcolo risulta pari a  $V_{Sd} = 279,83 \text{ kN}$ .

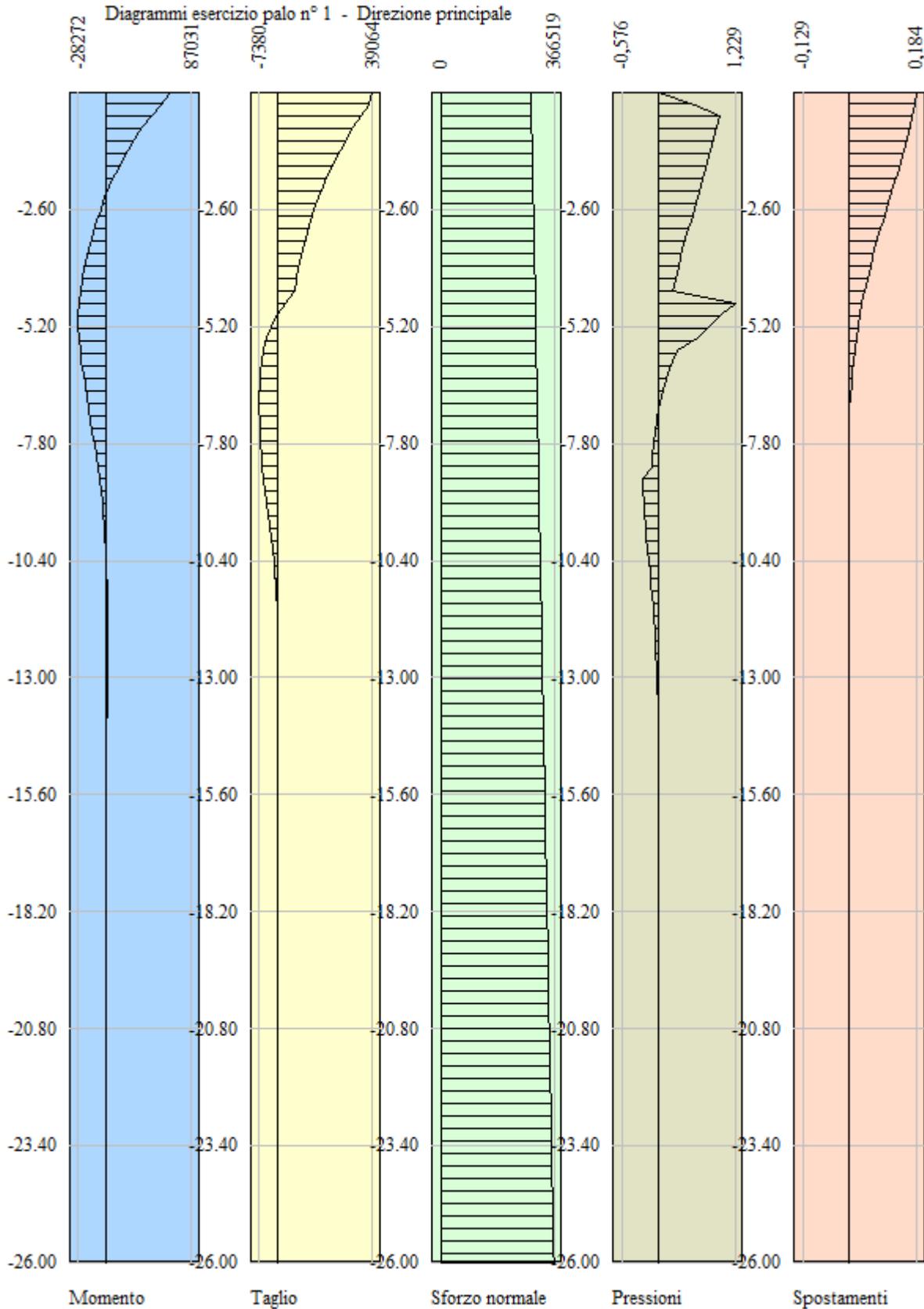
### 5.2.4 COMBINAZIONE SLE – RARA



Il momento flettente massimo di calcolo risulta pari a  $M_{Sd} = -491,95 \text{ kNm}$ .

L'azione tagliante massima di calcolo risulta pari a  $V_{Sd} = 288,39 \text{ kN}$ .

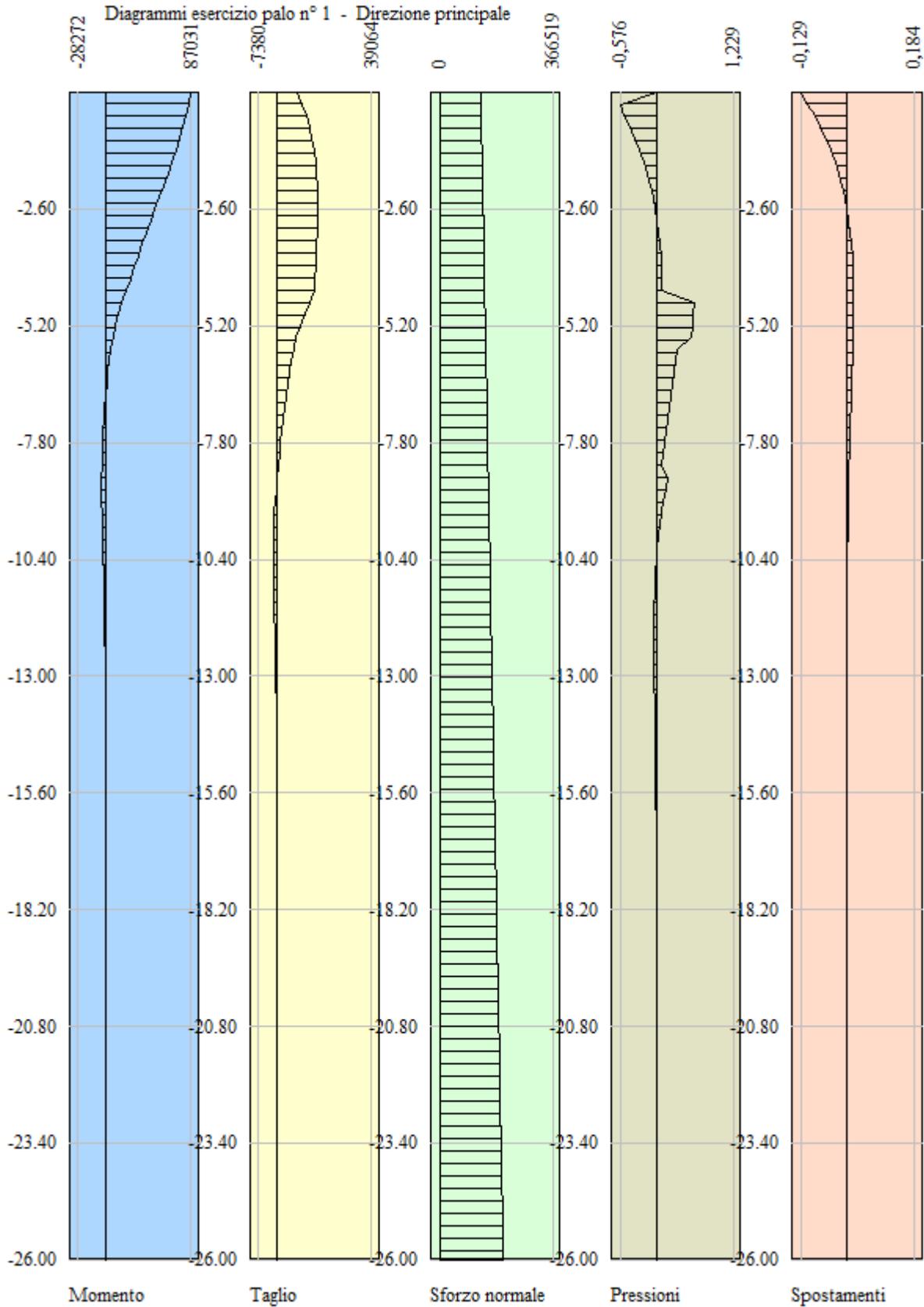
### 5.2.5 COMBINAZIONE SLU – STR



Il momento flettente massimo di calcolo risulta pari a  $M_{sd} = -661,62 \text{ kNm}$ .

L'azione tagliante massima di calcolo risulta pari a  $V_{sd} = 390,64 \text{ kN}$ .

### 5.2.6 COMBINAZIONE SLV



Il momento flettente massimo di calcolo risulta pari a  $M_{Sd} = -870,31$  kNm.  
 L'azione tagliante massima di calcolo risulta pari a  $V_{Sd} = 168,19$  kN.

## 6 PALI DI FONDAZIONE DELLE SPALLE – VERIFICHE STRUTTURALI

### 6.1 SEZIONE ED ARMATURA DI VERIFICA

La sezione di verifica è circolare con diametro pari a 120 cm.

L'armatura verticale (armatura di forza) è prevista come segue:

- 24Ø26 disposti a raggiera

L'armatura a taglio è costituita da una spirale Ø12/20.

Il copriferro netto minimo è assunto pari a 60 mm.

A favore di sicurezza nelle verifiche non sarà tenuto conto del peso del palo.

### 6.2 VERIFICA ALLO STATO LIMITE DI LIMITAZIONE DELLE TENSIONI

#### 6.2.1 COMBINAZIONE QUASI PERMANENTE – AZIONE NORMALE MASSIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 1.210,77$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = -695,89$  kNm.

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo: \_\_\_\_\_

Sezione circolare cava

Raggio esterno: 60 [cm]  
 Raggio interno: 0 [cm]  
 N° barre uguali: 24  
 Diametro barre: 2,6 [cm]  
 Copriferro (baric.): 8,5 [cm]

N° barre: 0 Zoom

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub>: 1210,77 kN  
 M<sub>xEd</sub>: -695,89 kNm  
 M<sub>yEd</sub>: 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN: 0 yN: 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C C25/30

ε<sub>su</sub>: 67,5 ‰ ε<sub>c2</sub>: 2 ‰  
 f<sub>yd</sub>: 391,3 N/mm<sup>2</sup> ε<sub>cu</sub>: 3,5 ‰  
 E<sub>s</sub>: 200.000 N/mm<sup>2</sup> f<sub>cd</sub>: 14,17 ‰  
 E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub>: 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub>: 0,8  
 ε<sub>syd</sub>: 1,957 ‰ σ<sub>c,adm</sub>: 9,75 ‰  
 σ<sub>s,adm</sub>: 255 N/mm<sup>2</sup> τ<sub>co</sub>: 0,6  
 τ<sub>cl</sub>: 1,829

σ<sub>c</sub>: -5,523 N/mm<sup>2</sup>  
 σ<sub>s</sub>: 77,21 N/mm<sup>2</sup>  
 ε<sub>s</sub>: 0,3861 ‰  
 d: 111,5 cm  
 x: 57,71 x/d: 0,5176  
 δ: 1

Vertici: 52  
 Verifica  
 N° iterazioni: 4  
 Precompresso

Le tensioni sui materiali risultano pari a:

$$\sigma_c = 5,52 \text{ N/mm}^2 < 0,45 f_{ck} = 11,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = 77,21 \text{ N/mm}^2 < 0,80 f_{yk} = 360,00 \text{ N/mm}^2$$

La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 6.2.2 COMBINAZIONE QUASI PERMANENTE – AZIONE NORMALE MINIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 1.198,38 \text{ kN}$ .

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = -695,89 \text{ kNm}$ .

The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. The main window displays various input fields and calculation results. The 'Sezione circolare cava' section includes: Raggio esterno (60 cm), Raggio interno (0 cm), N° barre uguali (24), Diametro barre (2,6 cm), and Copriferro (baric.) (8,5 cm). The 'Sollecitazioni' section shows:  $N_{Ed}$  (0 kN),  $M_{xEd}$  (0 kNm), and  $M_{yEd}$  (0 kNm). The 'P.to applicazione N' section shows: Centro (selected), Baricentro cls (unselected), and Coord. [cm] (xN: 0, yN: 0). The 'Metodo di calcolo' section shows: S.L.U.+ (unselected), S.L.U.- (unselected), and Metodo n (selected). The 'Materiali' section shows: B450C and C25/30. The 'Materiali' section includes:  $\epsilon_{su}$  (67,5 ‰),  $\epsilon_{c2}$  (2 ‰),  $f_{yd}$  (391,3 N/mm<sup>2</sup>),  $\epsilon_{cu}$  (3,5 ‰),  $E_s$  (200.000 N/mm<sup>2</sup>),  $f_{cd}$  (14,17 N/mm<sup>2</sup>),  $E_s/E_c$  (15),  $f_{cc}/f_{cd}$  (0,8),  $\epsilon_{syd}$  (1,957 ‰),  $\sigma_{c,adm}$  (9,75 N/mm<sup>2</sup>),  $\sigma_{s,adm}$  (255 N/mm<sup>2</sup>),  $\tau_{co}$  (0,6), and  $\tau_{c1}$  (1,829). The 'Verifica' section shows:  $\sigma_c$  (-5,527 N/mm<sup>2</sup>),  $\sigma_s$  (78,01 N/mm<sup>2</sup>), Vertici (52),  $\epsilon_s$  (0,3901 ‰),  $d$  (111,5 cm),  $x$  (57,44),  $x/d$  (0,5152),  $\delta$  (1), and N° iterazioni (4). The 'Precompresso' checkbox is unchecked.

Le tensioni sui materiali risultano pari a:

$$\sigma_c = 5,52 \text{ N/mm}^2 < 0,45 f_{ck} = 11,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = 78,01 \text{ N/mm}^2 < 0,80 f_{yk} = 360,00 \text{ N/mm}^2$$

La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 6.2.3 COMBINAZIONE FREQUENTE – AZIONE NORMALE MASSIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 1.750,89$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = -501,68$  kNm.

The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. The main window displays the following data:

- Sezione circolare cava:** Raggio esterno 60 [cm], Raggio interno 0 [cm], N° barre uguali 24, Diametro barre 2,6 [cm], Copriferro (baric.) 8,5 [cm].
- Sollecitazioni:** Metodo n,  $N_{Ed}$  1750,89 kN,  $M_{xEd}$  -501,68 kNm,  $M_{yEd}$  0.
- Materiali:** B450C and C25/30.  $\epsilon_{su}$  67,5 ‰,  $\epsilon_{c2}$  2 ‰,  $f_{yd}$  391,3 N/mm<sup>2</sup>,  $\epsilon_{cu}$  3,5 ‰,  $E_s$  200.000 N/mm<sup>2</sup>,  $f_{cd}$  14,17 N/mm<sup>2</sup>,  $E_s/E_c$  15,  $\epsilon_{syd}$  1,957 ‰,  $\sigma_{c,adm}$  9,75 N/mm<sup>2</sup>,  $\tau_{co}$  0,6,  $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm<sup>2</sup>,  $\tau_{c1}$  1,829.
- P.to applicazione N:** Centro,  $xN$  0,  $yN$  0.
- Metodo di calcolo:** Metodo n.
- Results:**  $\sigma_c$  -3,931 N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_s$  17 N/mm<sup>2</sup>,  $\epsilon_s$  0,085 ‰,  $d$  111,5 cm,  $x$  86,55,  $x/d$  0,7762,  $\delta$  1.
- Other parameters:** Vertici: 52, N° iterazioni: 3, Precompresso (unchecked).

Le tensioni sui materiali risultano pari a:

$$\sigma_c = 3,93 \text{ N/mm}^2 < 0,45 f_{ck} = 11,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = 17,00 \text{ N/mm}^2 < 0,80 f_{yk} = 360,00 \text{ N/mm}^2$$

La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 6.2.4 COMBINAZIONE FREQUENTE – AZIONE NORMALE MINIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 914,39$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = -501,68$  kNm.

The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. Key sections include:

- Sezione circolare cava:** Raggio esterno 60 [cm], Raggio interno 0 [cm], N° barre uguali 24, Diametro barre 2,6 [cm], Copriferro (baric.) 8,5 [cm].
- Sollecitazioni:**  $N_{Ed}$  914,39 kN,  $M_{xEd}$  -501,68 kNm,  $M_{yEd}$  0.
- Materiali:** B450C (concrete) and C25/30 (steel). Properties include  $\epsilon_{su}$  67,5 ‰,  $f_{yd}$  391,3 N/mm<sup>2</sup>,  $E_s$  200.000 N/mm<sup>2</sup>,  $\epsilon_{s}/E_c$  15,  $\epsilon_{c2}$  2 ‰,  $\epsilon_{cu}$  3,5,  $f_{cd}$  14,17,  $\sigma_c$  -3,97 N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_s$  53,02 N/mm<sup>2</sup>,  $\tau_{co}$  0,6,  $\tau_{c1}$  1,829.
- Geometric and Design Parameters:**  $d$  111,5 cm,  $x$  58,98,  $x/d$  0,529,  $\delta$  1.
- Calculation Method:** Metodo n selected.
- Iteration:** N° iterazioni: 4.

Le tensioni sui materiali risultano pari a:

$$\sigma_c = 3,97 \text{ N/mm}^2 < 0,45 f_{ck} = 11,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = 53,02 \text{ N/mm}^2 < 0,80 f_{yk} = 360,00 \text{ N/mm}^2$$

La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 6.2.5 COMBINAZIONE CARATTERISTICA – AZIONE NORMALE MASSIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 2.129,76$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = -491,95$  kNm.

The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. The main window displays various input fields and calculation results. The 'Sezione circolare cava' section includes: Raggio esterno (60 cm), Raggio interno (0 cm), N° barre uguali (24), Diametro barre (2,6 cm), and Copriferro (baric.) (8,5 cm). The 'Sollecitazioni' section shows:  $N_{Ed}$  (2129,76 kN),  $M_{xEd}$  (-491,95 kNm), and  $M_{yEd}$  (0). The 'Materiali' section lists properties for B450C and C25/30, including  $\epsilon_{su}$  (67,5‰),  $f_{yd}$  (391,3 N/mm²),  $E_s$  (200.000 N/mm²),  $\epsilon_{c2}$  (2‰),  $\epsilon_{cu}$  (3,5‰),  $f_{cd}$  (14,17),  $E_s/E_c$  (15),  $\epsilon_{syd}$  (1,957‰),  $\sigma_{c,adm}$  (255 N/mm²),  $\tau_{co}$  (0,6), and  $\tau_{c1}$  (1,829). The 'P.to applicazione N' section shows 'Centro' selected. The 'Metodo di calcolo' section shows 'Metodo n' selected. The 'Verifica' section shows 'Vertici: 52' and 'N° iterazioni: 3'. The 'Precompresso' checkbox is unchecked. The 'Tipo Sezione' section shows 'Circolare' selected. The 'P.to applicazione N' section shows 'Centro' selected. The 'Metodo di calcolo' section shows 'Metodo n' selected. The 'Verifica' section shows 'Vertici: 52' and 'N° iterazioni: 3'. The 'Precompresso' checkbox is unchecked. The 'P.to applicazione N' section shows 'Centro' selected. The 'Metodo di calcolo' section shows 'Metodo n' selected. The 'Verifica' section shows 'Vertici: 52' and 'N° iterazioni: 3'. The 'Precompresso' checkbox is unchecked.

Le tensioni sui materiali risultano pari a:

$$\sigma_c = 4,02 \text{ N/mm}^2 < 0,60 f_{ck} = 14,94 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = 7,80 \text{ N/mm}^2 < 0,80 f_{yk} = 360,00 \text{ N/mm}^2$$

La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 6.2.6 COMBINAZIONE CARATTERISTICA – AZIONE NORMALE MINIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 685,55$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = -491,95$  kNm.

The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. The main window displays the following data:

- Sezione circolare cava:** Raggio esterno: 60 [cm], Raggio interno: 0 [cm], N° barre uguali: 24, Diametro barre: 2,6 [cm], Copriferro (baric.): 8,5 [cm].
- Sollecitazioni:**  $N_{Ed}$ : 685,55 kN,  $M_{xEd}$ : -491,95 kNm,  $M_{yEd}$ : 0.
- Materiali:** B450C (concrete) and C25/30 (steel). Properties include  $\epsilon_{su}$  (67,5‰),  $f_{yd}$  (391,3 N/mm²),  $E_s$  (200.000 N/mm²),  $\epsilon_{c2}$  (2‰),  $\epsilon_{cu}$  (3,5‰),  $f_{cd}$  (14,17 N/mm²),  $E_s/E_c$  (15),  $\epsilon_{syd}$  (1,957‰),  $\sigma_{c,adm}$  (255 N/mm²),  $\tau_{co}$  (0,6), and  $\tau_{c1}$  (1,829).
- Calcolo:**  $\sigma_c$  (-3,953 N/mm²),  $\sigma_s$  (66,21 N/mm²),  $\epsilon_s$  (0,3311‰),  $d$  (111,5 cm),  $x$  (52,67),  $x/d$  (0,4724),  $\delta$  (1).
- Other parameters:** Vertici: 52, N° iterazioni: 4, Precompresso: .

Le tensioni sui materiali risultano pari a:

$$\sigma_c = 3,95 \text{ N/mm}^2 < 0,60 f_{ck} = 14,94 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = 66,21 \text{ N/mm}^2 < 0,80 f_{yk} = 360,00 \text{ N/mm}^2$$

La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 6.3 VERIFICA ALLO STATO LIMITE DI FESSURAZIONE

#### 6.3.1 COMBINAZIONE ALLO SLE – QUASI PERMANENTE – AZIONE NORMALE MASSIMA

Dati	<u>Verifica fessurazione sezione circolare</u> <u>CIRCOLARE 2/02/2009 N°617 Par.C.4.1.2.2.4.6</u>	
$\sigma_s$	77 N/mm <sup>2</sup>	Tensione massima armatura tesa sezione fessurata
R <sub>ck</sub>	30,0 N/mm <sup>2</sup>	Resistenza caratteristica cubica cls
$\phi_l$	26 mm	Diametro barre longitudinali
$\phi_s$	12 mm	Diametro staffe o spirale
n	24	Numero ferri longitudinali
c	60 mm	Ricoprimento del calcestruzzo
D	1200 mm	Diametro
$k_t$	0,4	$k_t=0,6; 0,4$ carichi breve durata/lunga durata
$k_2$	0,5	$k_2=0,5; 1,0$ caso flessione/trazione semplice
$k_1$	0,8	$k_1=0,8; 1,6$ barre aderenza migliorata/lisce
w	0,1 mm	Valore limite apertura fessure
Dati		
f <sub>ck</sub>	24,9 N/mm <sup>2</sup>	Resistenza caratteristica cilindrica cls
i	135 mm	Interasse ferri longitudinali
A <sub>φ</sub>	531 mm <sup>2</sup>	Area barra longitudinale
E <sub>s</sub>	210000,0 N/mm <sup>2</sup>	Modulo elastico acciaio da c.a
f <sub>ctm</sub>	2,6 N/mm <sup>2</sup>	Resistenza a trazione media cls
E <sub>cm</sub>	31447,2 N/mm <sup>2</sup>	Modulo elastico medio cls
α <sub>e</sub>	6,68	Rapporto E <sub>s</sub> /E <sub>cm</sub>
f <sub>cm</sub>	32,9 N/mm <sup>2</sup>	Resistenza media cls
ρ <sub>eff</sub>	0,0270	Rapporto area acciaio/area efficace
ε <sub>sm1</sub>	0,000154	Deformazione unitaria media barre di calcolo
ε <sub>sm2</sub>	0,000221	Deformazione unitaria media barre valore minimo
ε <sub>sm</sub>	0,000221	Deformazione unitaria media
k <sub>3</sub>	3,4	Coefficiente
k <sub>4</sub>	0,4	Coefficiente
Δs <sub>max</sub>	367,9 mm	Distanza massima tra le fessure
w <sub>d</sub>	✓ 0,081 mm	Valore di calcolo apertura fessure

### 6.3.2 COMBINAZIONE ALLO SLE – QUASI PERMANENTE – AZIONE NORMALE MINIMA

Dati	<u>Verifica fessurazione sezione circolare</u> <u>CIRCOLARE 2/02/2009 N°617 Par.C.4.1.2.2.4.6</u>	
$\sigma_s$	78 N/mm <sup>2</sup>	Tensione massima armatura tesa sezione fessurata
R <sub>ck</sub>	30,0 N/mm <sup>2</sup>	Resistenza caratteristica cubica cls
$\phi_l$	26 mm	Diametro barre longitudinali
$\phi_s$	12 mm	Diametro staffe o spirale
n	24	Numero ferri longitudinali
c	60 mm	Ricoprimento del calcestruzzo
D	1200 mm	Diametro
k <sub>t</sub>	0,4	k <sub>t</sub> =0,6 ; 0,4 carichi breve durata/lunga durata
k <sub>2</sub>	0,5	k <sub>2</sub> =0,5 ; 1,0 caso flessione/trazione semplice
k <sub>1</sub>	0,8	k <sub>1</sub> =0,8 ; 1,6 barre aderenza migliorata/lisce
w	0,1 mm	Valore limite apertura fessure
Dati		
f <sub>ck</sub>	24,9 N/mm <sup>2</sup>	Resistenza caratteristica cilindrica cls
i	135 mm	Interasse ferri longitudinali
A <sub>φ</sub>	531 mm <sup>2</sup>	Area barra longitudinale
E <sub>s</sub>	210000,0 N/mm <sup>2</sup>	Modulo elastico acciaio da c.a
f <sub>ctm</sub>	2,6 N/mm <sup>2</sup>	Resistenza a trazione media cls
E <sub>cm</sub>	31447,2 N/mm <sup>2</sup>	Modulo elastico medio cls
α <sub>e</sub>	6,68	Rapporto E <sub>s</sub> /E <sub>cm</sub>
f <sub>cm</sub>	32,9 N/mm <sup>2</sup>	Resistenza media cls
ρ <sub>eff</sub>	0,0270	Rapporto area acciaio/area efficace
ε <sub>sm1</sub>	0,000158	Deformazione unitaria media barre di calcolo
ε <sub>sm2</sub>	0,000223	Deformazione unitaria media barre valore minimo
ε <sub>sm</sub>	0,000223	Deformazione unitaria media
k <sub>3</sub>	3,4	Coefficiente
k <sub>4</sub>	0,4	Coefficiente
Δs <sub>max</sub>	367,9 mm	Distanza massima tra le fessure
w <sub>d</sub>	✓ 0,082 mm	Valore di calcolo apertura fessure

### 6.3.3 COMBINAZIONE ALLO SLE – FREQUENTE – AZIONE NORMALE MASSIMA

Dati	<u>Verica fessurazione sezione circolare</u> <u>CIRCOLARE 2/02/2009 N°617 Par.C.4.1.2.2.4.6</u>	
$\sigma_s$	17 N/mm <sup>2</sup>	Tensione massima armatura tesa sezione fessurata
R <sub>ck</sub>	30,0 N/mm <sup>2</sup>	Resistenza caratteristica cubica cls
$\phi_l$	26 mm	Diametro barre longitudinali
$\phi_s$	12 mm	Diametro staffe o spirale
n	24	Numero ferri longitudinali
c	60 mm	Ricoprimento del calcestruzzo
D	1200 mm	Diametro
k <sub>t</sub>	0,4	k <sub>t</sub> =0,6 ; 0,4 carichi breve durata/lunga durata
k <sub>2</sub>	0,5	k <sub>2</sub> =0,5 ; 1,0 caso flessione/trazione semplice
k <sub>1</sub>	0,8	k <sub>1</sub> =0,8 ; 1,6 barre aderenza migliorata/lisce
w	0,2 mm	Valore limite apertura fessure
<b>Dati</b>		
f <sub>ck</sub>	24,9 N/mm <sup>2</sup>	Resistenza caratteristica cilindrica cls
i	135 mm	Interasse ferri longitudinali
A <sub>φ</sub>	531 mm <sup>2</sup>	Area barra longitudinale
E <sub>s</sub>	210000,0 N/mm <sup>2</sup>	Modulo elastico acciaio da c.a
f <sub>ctm</sub>	2,6 N/mm <sup>2</sup>	Resistenza a trazione media cls
E <sub>cm</sub>	31447,2 N/mm <sup>2</sup>	Modulo elastico medio cls
α <sub>e</sub>	6,68	Rapporto E <sub>s</sub> /E <sub>cm</sub>
f <sub>cm</sub>	32,9 N/mm <sup>2</sup>	Resistenza media cls
ρ <sub>eff</sub>	0,0270	Rapporto area acciaio/area efficace
ε <sub>sm1</sub>	-0,000132	Deformazione unitaria media barre di calcolo
ε <sub>sm2</sub>	0,000049	Deformazione unitaria media barre valore minimo
ε <sub>sm</sub>	0,000049	Deformazione unitaria media
k <sub>3</sub>	3,4	Coefficiente
k <sub>4</sub>	0,4	Coefficiente
Δs <sub>max</sub>	367,9 mm	Distanza massima tra le fessure
w <sub>d</sub>	✓ 0,018 mm	Valore di calcolo apertura fessure

### 6.3.4 COMBINAZIONE ALLO SLE – FREQUENTE – AZIONE NORMALE MASSIMA

Dati	<u>Verica fessurazione sezione circolare</u> <u>CIRCOLARE 2/02/2009 N°617 Par.C.4.1.2.2.4.6</u>	
$\sigma_s$	53 N/mm <sup>2</sup>	Tensione massima armatura tesa sezione fessurata
R <sub>ck</sub>	30,0 N/mm <sup>2</sup>	Resistenza caratteristica cubica cls
$\phi_l$	26 mm	Diametro barre longitudinali
$\phi_s$	12 mm	Diametro staffe o spirale
n	24	Numero ferri longitudinali
c	60 mm	Ricoprimento del calcestruzzo
D	1200 mm	Diametro
k <sub>t</sub>	0,4	k <sub>t</sub> =0,6 ; 0,4 carichi breve durata/lunga durata
k <sub>2</sub>	0,5	k <sub>2</sub> =0,5 ; 1,0 caso flessione/trazione semplice
k <sub>1</sub>	0,8	k <sub>1</sub> =0,8 ; 1,6 barre aderenza migliorata/lisce
w	0,2 mm	Valore limite apertura fessure
Dati		
f <sub>ck</sub>	24,9 N/mm <sup>2</sup>	Resistenza caratteristica cilindrica cls
i	135 mm	Interasse ferri longitudinali
A <sub>φ</sub>	531 mm <sup>2</sup>	Area barra longitudinale
E <sub>s</sub>	210000,0 N/mm <sup>2</sup>	Modulo elastico acciaio da c.a
f <sub>ctm</sub>	2,6 N/mm <sup>2</sup>	Resistenza a trazione media cls
E <sub>cm</sub>	31447,2 N/mm <sup>2</sup>	Modulo elastico medio cls
α <sub>e</sub>	6,68	Rapporto E <sub>s</sub> /E <sub>cm</sub>
f <sub>cm</sub>	32,9 N/mm <sup>2</sup>	Resistenza media cls
ρ <sub>eff</sub>	0,0270	Rapporto area acciaio/area efficace
ε <sub>sm1</sub>	0,000039	Deformazione unitaria media barre di calcolo
ε <sub>sm2</sub>	0,000151	Deformazione unitaria media barre valore minimo
ε <sub>sm</sub>	0,000151	Deformazione unitaria media
k <sub>3</sub>	3,4	Coefficiente
k <sub>4</sub>	0,4	Coefficiente
Δs <sub>max</sub>	367,9 mm	Distanza massima tra le fessure
w <sub>d</sub>	✓ 0,056 mm	Valore di calcolo apertura fessure

## 6.4 VERIFICA ALLO STATO LIMITE ULTIMO PER PRESSOFLESSIONE

### 6.4.1 CONDIZIONE STATICA – AZIONE NORMALE MASSIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 2.930,06$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = -661,62$  kNm.

**Sezione circolare cava**

- Raggio esterno: 60 [cm]
- Raggio interno: 0 [cm]
- N° barre uguali: 24
- Diametro barre: 2,6 [cm]
- Copriferro (baric.): 8,5 [cm]

**Materiali**

- B450C:  $\epsilon_{su} = 67,5$  ‰,  $f_y = 391,3$  N/mm<sup>2</sup>,  $E_s = 200.000$  N/mm<sup>2</sup>,  $\epsilon_s / \epsilon_c = 15$ ,  $\epsilon_{syd} = 1,957$  ‰,  $\sigma_{s,adm} = 255$  N/mm<sup>2</sup>
- C25/30:  $\epsilon_{c2} = 2$  ‰,  $\epsilon_{cu} = 3,5$  ‰,  $f_{cd} = 14,17$  N/mm<sup>2</sup>,  $f_{cc} / f_{cd} = 0,8$ ,  $\sigma_{c,adm} = 9,75$  N/mm<sup>2</sup>,  $\tau_{co} = 0,6$ ,  $\tau_{c1} = 1,829$

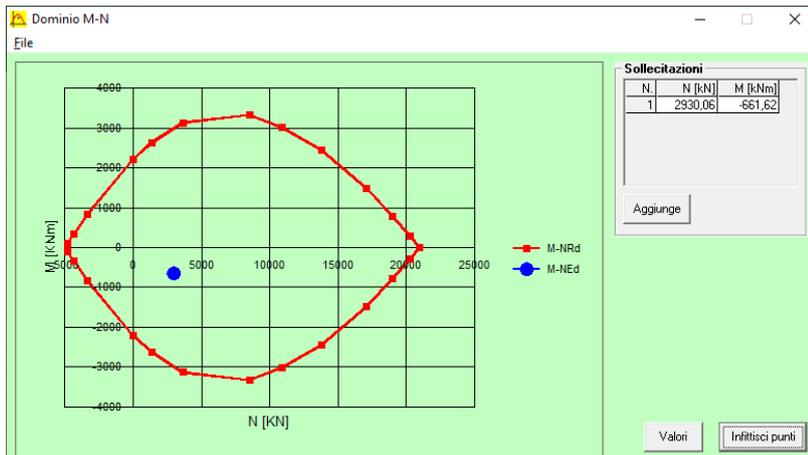
**Calcoli**

- $M_{Rd} = -3.002$  kNm
- $\sigma_c = -14,17$  N/mm<sup>2</sup>
- $\sigma_s = 391,3$  N/mm<sup>2</sup>
- $\epsilon_c = 3,5$  ‰
- $\epsilon_s = 5,387$  ‰
- $d = 111,5$  cm
- $x = 43,91$ ,  $x/d = 0,3938$
- $\delta = 0,9323$

Il momento resistente risulta pari a:

$$M_{Rd} = -3.002,00 \text{ kNm} > M_{Sd} = -661,62 \text{ kNm}$$

Nell'immagine successiva è riportato il dominio di resistenza della sezione:



La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 6.4.2 CONDIZIONE STATICA – AZIONE NORMALE MINIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 969,49$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = -661,92$  kNm.

The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. The main window is titled 'Verifica C.A. S.L.U. - File'. The interface is divided into several panels:

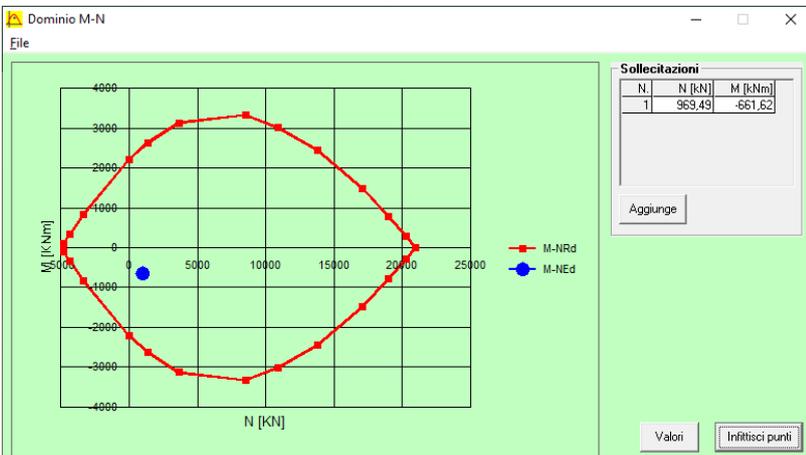
- Sezione circolare cava:** Raggio esterno: 60 [cm], Raggio interno: 0 [cm], N° barre uguali: 24, Diametro barre: 2,6 [cm], Copriferro (baric.): 8,5 [cm].
- Sollecitazioni:** S.L.U. Metodo n. N<sub>Ed</sub>: 969,49 kN, M<sub>xEd</sub>: -661,62 kNm, M<sub>yEd</sub>: 0 kNm.
- Materiali:** B450C, C25/30. Properties:  $\epsilon_{su}$ : 67,5 ‰,  $\epsilon_{c2}$ : 2 ‰,  $f_{yd}$ : 391,3 N/mm<sup>2</sup>,  $\epsilon_{cu}$ : 3,5 ‰,  $E_s$ : 200.000 N/mm<sup>2</sup>,  $f_{cd}$ : 14,17,  $E_s/E_c$ : 15,  $\tau_{cc}/f_{cd}$ : 0,8,  $\epsilon_{syd}$ : 1,957 ‰,  $\sigma_{c,adm}$ : 9,75,  $\sigma_{s,adm}$ : 255 N/mm<sup>2</sup>,  $\tau_{co}$ : 0,6,  $\tau_{c1}$ : 1,829.
- P.to applicazione N:** Centro, Baricentro cls, Coord.[cm].
- Tipo rottura:** Lato calcestruzzo - Acciaio snervato.
- Metodo di calcolo:** S.L.U.+, S.L.U.-, Metodo n.
- Tipo flessione:** Retta, Deviata.
- Vertici:** 52, N° rett.: 100.
- Calcola MRd:** Dominio M-N.
- L<sub>0</sub>:** 0 cm, Col. modello.
- Precompresso:**

Additional parameters shown: M<sub>xRd</sub>: -2,527 kNm,  $\sigma_c$ : -14,17 N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_s$ : 391,3 N/mm<sup>2</sup>,  $\epsilon_s$ : 3,5 ‰,  $\epsilon_s$ : 8,14 ‰, d: 111,5 cm, x: 33,53, x/d: 0,3007,  $\delta$ : 0,8159.

Il momento resistente risulta pari a:

$$M_{Rd} = -2.527,00 \text{ kNm} > M_{Sd} = -932,25 \text{ kNm}$$

Nell'immagine successiva è riportato il dominio di resistenza della sezione:



La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 6.4.3 CONDIZIONE SISMICA – AZIONE NORMALE MASSIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 1.337,25$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = -870,31$  kNm.

**Verifica C.A. S.L.U. - File**

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

**Sezione circolare cava**

Raggio esterno: 60 [cm]  
 Raggio interno: 0 [cm]  
 N° barre uguali: 24  
 Diametro barre: 2,6 [cm]  
 Copriferro (baric.): 8,5 [cm]

N° barre: 0 Zoom

**Tipo Sezione**

Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

**Sollecitazioni**

S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub>: 1337,25 0 kN  
 M<sub>xEd</sub>: -870,31 0 kNm  
 M<sub>yEd</sub>: 0 0

**P.to applicazione N**

Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN: 0 yN: 0

**Tipo rottura**

Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

**Metodo di calcolo**

S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

**Tipo flessione**

Retta  Deviata

Vertici: 52 N° rett.: 100  
 Calcola MRd Dominio M-N  
 L<sub>0</sub>: 0 cm Col. modello

Precompresso

**Materiali**

B450C C25/30

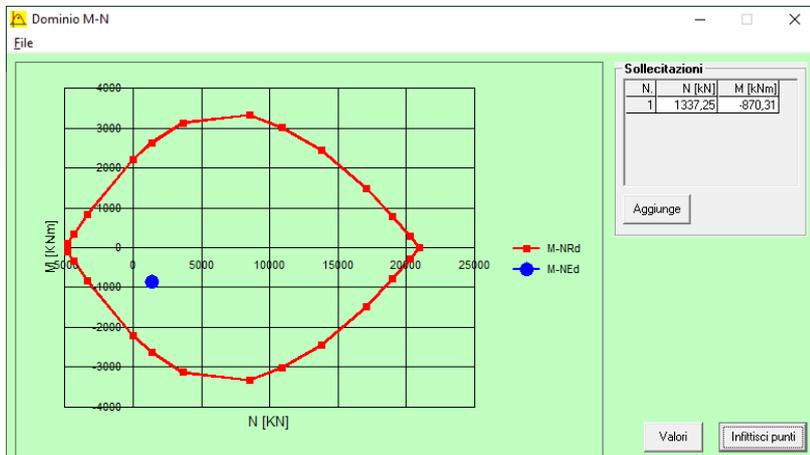
ε<sub>su</sub>: 67,5 ‰ ε<sub>c2</sub>: 2 ‰  
 f<sub>yd</sub>: 391,3 N/mm<sup>2</sup> ε<sub>cu</sub>: 3,5 ‰  
 E<sub>s</sub>: 200.000 N/mm<sup>2</sup> f<sub>cd</sub>: 14,17  
 E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub>: 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub>: 0,8  
 ε<sub>syd</sub>: 1,957 ‰ σ<sub>c,adm</sub>: 9,75  
 σ<sub>s,adm</sub>: 255 N/mm<sup>2</sup> τ<sub>co</sub>: 0,6  
 τ<sub>c1</sub>: 1,829

M<sub>xRd</sub>: -2.633 kNm  
 σ<sub>c</sub>: -14,17 N/mm<sup>2</sup>  
 σ<sub>s</sub>: 391,3 N/mm<sup>2</sup>  
 ε<sub>s</sub>: 3,5 ‰  
 ε<sub>s</sub>: 7,501 ‰  
 d: 111,5 cm  
 x: 35,47 x/d: 0,3182  
 δ: 0,8377

Il momento resistente risulta pari a:

$M_{Rd} = -2.633,00$  kNm >  $M_{Sd} = -870,31$  kNm

Nell'immagine successiva è riportato il dominio di resistenza della sezione:



La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 6.4.4 CONDIZIONE SISMICA – AZIONE NORMALE MINIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 1.071,89$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = -870,31$  kNm.

**Verifica C.A. S.L.U. - File**

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

**Titolo:** \_\_\_\_\_

**Sezione circolare cava**

Raggio esterno: 60 [cm]  
 Raggio interno: 0 [cm]  
 N° barre uguali: 24  
 Diametro barre: 2,6 [cm]  
 Copriferro (baric.): 8,5 [cm]

N° barre: 0 Zoom

**Tipo Sezione**

Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

**Sollecitazioni**

S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub>: 1071,89 0 kN  
 M<sub>xEd</sub>: -870,31 0 kNm  
 M<sub>yEd</sub>: 0 0

**P.to applicazione N**

Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN: 0 yN: 0

**Tipo rottura**

Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

**Metodo di calcolo**

S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

**Tipo flessione**

Retta  Deviata

Vertici: 52 N° rett.: 100  
 Calcola MRd Dominio M-N  
 L<sub>0</sub>: 0 cm Col. modello

Precompresso

**Materiali**

B450C C25/30

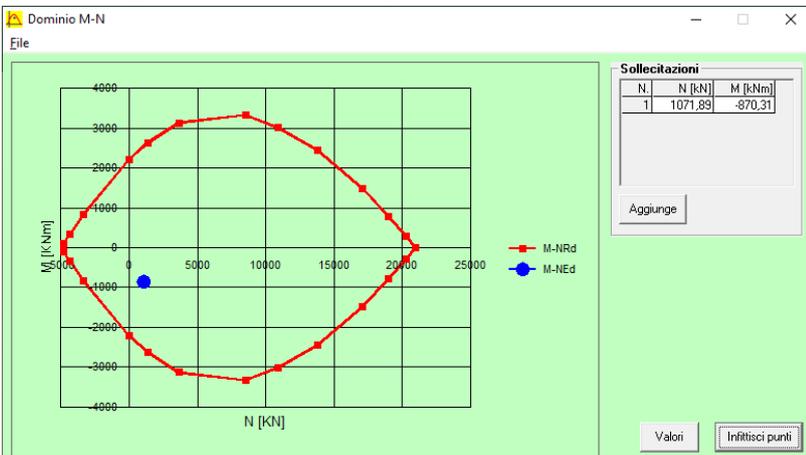
ε<sub>su</sub>: 67,5 ‰ ε<sub>c2</sub>: 2 ‰  
 f<sub>yd</sub>: 391,3 N/mm<sup>2</sup> ε<sub>cu</sub>: 3,5 ‰  
 E<sub>s</sub>: 200.000 N/mm<sup>2</sup> f<sub>cd</sub>: 14,17 ‰  
 E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub>: 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub>: 0,8  
 ε<sub>syd</sub>: 1,957 ‰ σ<sub>c,adm</sub>: 9,75  
 σ<sub>s,adm</sub>: 255 N/mm<sup>2</sup> τ<sub>co</sub>: 0,6  
 τ<sub>c1</sub>: 1,829

M<sub>xRd</sub>: -2,557 kN m  
 σ<sub>c</sub>: -14,17 N/mm<sup>2</sup>  
 σ<sub>s</sub>: 391,3 N/mm<sup>2</sup>  
 ε<sub>s</sub>: 3,5 ‰  
 ε<sub>s</sub>: 7,959 ‰  
 d: 111,5 cm  
 x: 34,06 x/d: 0,3054  
 δ: 0,8218

Il momento resistente risulta pari a:

$M_{Rd} = -2.557,00$  kNm  $>$   $M_{Sd} = -870,31$  kNm

Nell'immagine successiva è riportato il dominio di resistenza della sezione:



La verifica risulta pertanto soddisfatta.

## 6.5 VERIFICA ALLO STATO LIMITE ULTIMO PER TAGLIO

L'azione tagliante di calcolo è assunta pari a  $V_{Sd} = 390,64 \text{ kN}$ .

A favore di sicurezza non viene considerato il contributo dell'azione normale.

La verifica viene condotta su una sezione quadrata equivalente di lato pari a **106,35 cm** (equivalenza d'area).

### VERIFICA ALLO STATO LIMITE ULTIMO PER TAGLIO - ELEMENTI CON ARMATURE TRASVERSALI RESISTENTI AL TAGLIO

D.M. 17.01.2018 - CAPITOLO 4.1.2.3.5.2

#### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE

Base della sezione trasversale:	b	106,35	[cm]
Altezza della sezione trasversale:	h	106,35	[cm]
Copriferro netto:	c	6,00	[cm]
Altezza utile della sezione:	d	100,35	[cm]

#### CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Classe di resistenza del calcestruzzo:		C25/30	
Resistenza caratteristica cubica a compressione:	$R_{ck}$	30,00	[N/mm <sup>2</sup> ]
Resistenza caratteristica cilindrica a compressione:	$f_{ck}$	24,90	[N/mm <sup>2</sup> ]
Resistenza di calcolo a compressione:	$f_{cd}$	14,11	[N/mm <sup>2</sup> ]
Tipologia dell'acciaio da armatura:		B450C	
Tensione caratteristica di rottura:	$f_{tk}$	540,00	[N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione caratteristica di snervamento:	$f_{yk}$	450,00	[N/mm <sup>2</sup> ]
Resistenza di calcolo:	$f_{yd}$	391,30	[N/mm <sup>2</sup> ]

#### AZIONI SOLLECITANTI DI CALCOLO

Azione tagliante di calcolo:	$V_{S,d}$	390,64	[kN]
Azione normale di calcolo:	$N_{S,d}$	0,00	[kN]

#### ARMATURA TRASVERSALE

Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo:	$\theta$	45,00	[°]
Cotangente dell'angolo $\theta$ :	$\cot(\theta)$	1,00	
Inclinazione dell'armatura trasversale rispetto all'asse della trave:	$\alpha$	90,00	[°]
Numero di bracci dell'armatura trasversale:	n	2,00	
Passo longitudinale delle armature trasversali:	s	20,00	[cm]
Diametro dell'armatura trasversale:	$\varnothing_{trav}$	12,00	[mm]
Area della singola barra:	$A_{barra}$	1,13	[cm <sup>2</sup> ]
Area totale dell'armatura trasversale:	$A_{tot}$	11,30	[cm <sup>2</sup> /m]

#### VERIFICA ALLO S.L.U. PER TAGLIO

La resistenza di calcolo a "taglio trazione" viene valutata mediante la seguente relazione - D.M. 17.01.2018 [4.1.27]:

$$V_{Rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot [\cot(\alpha) + \cot(\theta)] \cdot \sin(\alpha)$$

La resistenza di calcolo a "taglio compressione" viene valutata mediante la seguente relazione - D.M. 17.01.2018 [4.1.28]:

$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \frac{[\cot(\alpha) + \cot(\theta)]}{[1 + \cot^2(\theta)]}$$

Larghezza minima della sezione:	$b_w$	106,35	[cm]
Resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo:	$f_{yd}$	7,06	[N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione media di compressione nella sezione:	$\sigma_{cp}$	0,00	[N/mm <sup>2</sup> ]
Coefficiente maggiorativo $\alpha_c$ :	$\alpha_c$	1,00	
RESISTENZA DI CALCOLO A "TAGLIO TRAZIONE"	$V_{Rsd}$	399,35	[kN]
RESISTENZA DI CALCOLO A "TAGLIO COMPRESSIONE"	$V_{Rcd}$	3388,16	[kN]
AZIONE TAGLIANTE RESISTENTE DELLA SEZIONE:	$V_{R,d}$	399,35	[kN]
COEFFICIENTE DI SICUREZZA:	$F_s = V_{R,d} / V_{S,d}$	1,02	

LA VERIFICA RISULTA POSITIVA.

## 7 PALI DI FONDAZIONE DELLE SPALLE – VERIFICHE GEOTECNICHE

### 7.1 FORMULAZIONI ADOTTATE PER LA VERIFICA DEL CARICO LIMITE ULTIMO

La stima della capacità portante per carico verticale di un palo isolato  $Q_{LIM}$  mediante formule statiche è ottenuta valutando i massimi mobilizzabili, in condizioni di equilibrio limite, della resistenza laterale  $Q_S$  e di quella di punta  $Q_P$ :

$$Q_{LIM} + W_P = Q_S + Q_P$$

essendo  $W_P$  il peso proprio del palo.

Si fanno le seguenti ipotesi:

- il carico limite del sistema palo – terreno è condizionato dalla resistenza del terreno e non da quella del palo;
- il palo è un corpo cilindrico rigido;
- i termini di capacità portante per attrito e/o aderenza laterale  $Q_S$  e di capacità portante di punta  $Q_P$  non si influenzano reciprocamente e possono essere determinati separatamente.

#### 7.1.1 PALO IN TERRENO COESIVO SATURO

##### Stima della capacità portante laterale $Q_S$

La capacità portante per aderenza e/o per attrito laterale  $Q_S$  per un palo di diametro  $D$  e lunghezza  $L$  è per definizione:

$$Q_S = \pi \cdot D \cdot \int_0^L \tau_s \cdot dz$$

Si assume che le tensioni tangenziali limite siano una quota parte della resistenza a taglio non drenata originaria del terreno indisturbato:

$$\tau_s = \alpha \cdot c_u$$

In cui  $\alpha$  è un 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 e dal cedimento del palo.

Per la valutazione del coefficiente  $\alpha$  per i pali trivellati si assume la seguente formulazione con  $c_u$  espresso in [kPa] (Viggiani, 1999):

- $c_u < 25 \rightarrow \alpha = 0,70$
- $25 < c_u < 70 \rightarrow \alpha = 0,70 - 0,08 \cdot (c_u - 25)$
- $70 < c_u \rightarrow \alpha = 0,35$

##### Stima della capacità portante di punta $Q_P$

Per la stima della capacità portante di punta  $Q_P$  si esegue un'analisi in condizioni non drenate, in termini di tensioni totali. L'equazione di riferimento è formalmente identica a quella della capacità portante di fondazioni superficiali su terreno coesivo in condizioni non drenate:

$$Q_P = A_P \cdot q_P = A_P \cdot (c_u \cdot N_c + \sigma_{v0,P})$$

in cui:

- $A_P$  è l'area di base del palo;
- $q_P$  è la capacità portante unitaria;
- $c_u$  è la resistenza al taglio in condizioni non drenate del terreno alla profondità della base del palo;
- $\sigma_{v0,P}$  è la tensione verticale totale alla punta;
- $N_c$  è il fattore di capacità portante, il cui valore è assunto pari a **9,00**.

### 7.1.2 PALO IN TERRENO INCOERENTE

Nel caso di pali in terreni incoerenti, e quindi a elevata permeabilità, l'analisi è svolta sempre con riferimento alle condizioni drenate e quindi in termini di tensioni efficaci.

#### Stima della capacità portante laterale $Q_s$

La capacità portante per aderenza e/o per attrito laterale per un palo di diametro  $D$  e lunghezza  $L$  è per definizione:

$$Q_s = \pi \cdot D \cdot \int_0^L \tau_s \cdot dz$$

Si assume che le sovrappressioni interstiziali che si generano durante la messa in opera del palo si siano dissipate al momento di applicazione del carico e che pertanto la tensione tangenziale limite possa essere valutata, con riferimento alle tensioni efficaci, nel modo seguente:

$$\tau_s = \sigma'_h \cdot \tan \delta = K \cdot \sigma'_{v0} \cdot \tan \delta$$

in cui:

- $\sigma'_h$  è la tensione efficace orizzontale nel terreno a contatto con il palo;
- $\sigma'_{v0}$  è la tensione efficace verticale iniziale prima della messa in opera del palo;
- $K$  è un coefficiente di spinta, rapporto fra  $\sigma'_h$  e  $\sigma'_{v0} \rightarrow K = 1 - \text{sen}(\varphi')$
- $\tan \delta$  è il coefficiente di attrito palo – terreno  $\rightarrow \mu = \tan \delta = \tan(\varphi')$

#### Stima della capacità portante di punta $Q_P$

Per la stima della capacità portante di punta  $Q_P$  dei pali in terreni incoerenti è stimata con l'equazione:

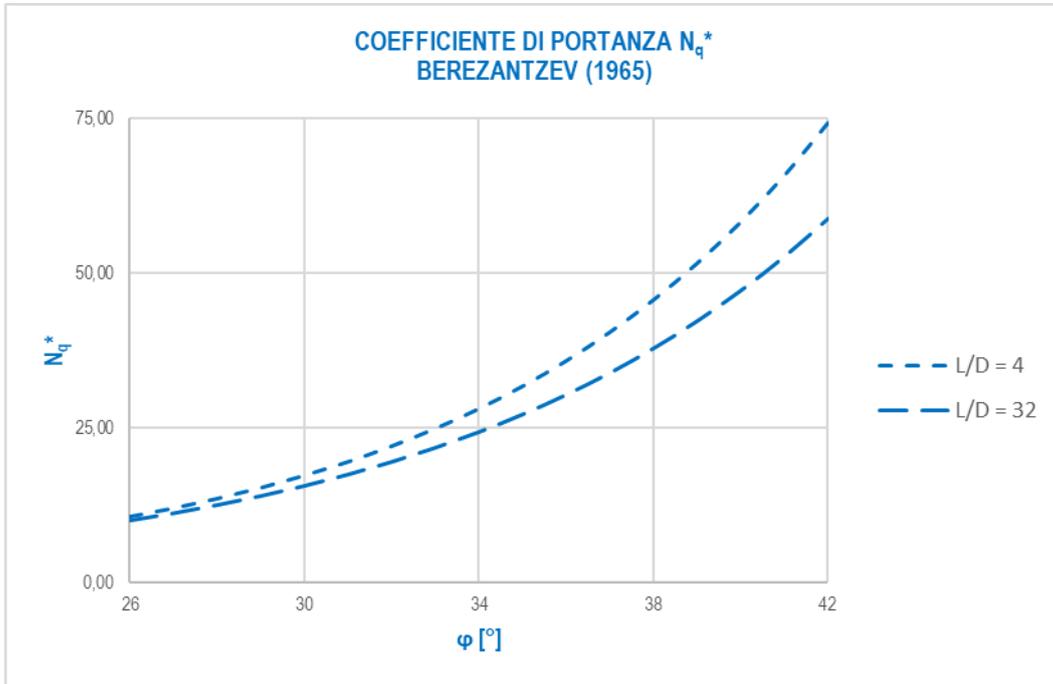
$$Q_P = A_P \cdot q_P = A_P \cdot \sigma'_{v0,P} \cdot N_q$$

in cui:

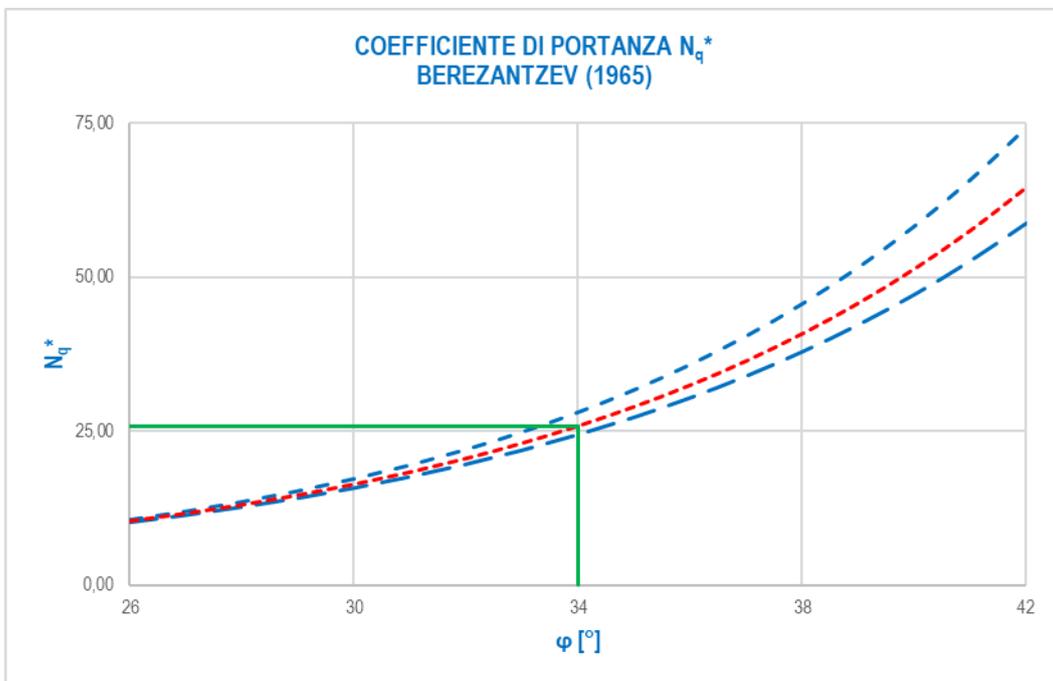
- $A_P$  è l'area di base del palo;
- $q_P$  è la capacità portante unitaria;
- $\sigma'_{v0,P}$  è la tensione verticale efficace alla punta;
- $N_q$  è il fattore di capacità portante.

## 7.2 VALUTAZIONE DEL COEFFICIENTE DI CAPACITÀ PORTANTE ALLA PUNTA $N_q$

Il fattore di capacità portante  $N_q$  è definito mediante il metodo di Berezantzev “ridotto” (1965), in funzione al valore dell’angolo di attrito del terreno in corrispondenza della base del palo e del rapporto tra lunghezza del palo  $L$  e diametro del palo  $D$ . Il valore di  $N_q^*$  è estrapolabile dal seguente abaco (per valori intermedi si procede mediante interpolazione lineare):



Considerato un terreno alla base con angolo di attrito pari a  $34,0^\circ$  e un rapporto  $L/D = 26,00/1,20 = 17,50$ , è stato determinato un valore del coefficiente di portanza alla punta pari a  $N_q^* = 25,25$ .



Considerato l’utilizzo del metodo di Berezantzev “ridotto” per i pali di grande diametro (cautelativo), non è stata presa in considerazione la correlazione di Kishida per i pali trivellati.

### 7.3 VERIFICHE DI PORTANZA VERTICALE (CARICO LIMITE ULTIMO) E LATERALE DEL PALO

Le verifiche geotecniche di carico limite ultimo e portanza laterale sono state condotte mediante il software CARL 12.0 (Aztec Informatica).

Le verifiche sono state condotte per le combinazioni allo Stato Limite Ultimo statiche e sismiche maggiormente gravose, considerando i seguenti carichi:

COMBINAZIONE	$N_{Sd}$ [kN]	$M_{Sd}$ [kNm]	$V_{Sd}$ [kN]
SLU - STR	2.930,06	-661,62	390,74
SLV	1.337,25	-870,31	87,76

Il peso proprio del palo è tenuto in conto in maniera automatica dal software di calcolo.

Prima di entrare nel merito delle verifiche, si rappresenta che i calcoli sono stati eseguiti tenendo conto della presenza dello strato di rilevato, al quale è stato assegnato un angolo di attrito nullo per tenere conto in tale strato di lamierino a perdere (e conseguentemente un contributo nullo alla portanza laterale). Tale strato, generando un carico esterno su piano di campagna vergine, aumenta la pressione verticale alla base, dando un contributo positivo alla valutazione della portanza di punta. Da qui i coefficienti di sicurezza elevati rappresentati nelle verifiche di seguito riportate, le quali, comunque, rappresentano il reale comportamento del palo.

A titolo di completezza è stata comunque eseguita la verifica del carico limite ultimo del palo, assumendo una lunghezza del palo pari a 21,0 m (lunghezza del palo al di fuori del lamierino → all'interno della stratigrafia vergine). Tale verifica a comunque fornito esito positivo.

Di tale verifica si dà evidenza esclusivamente nei risultati finali.

#### Richiami teorici

##### Determinazione della capacità portante

Il carico verticale che grava sul palo va confrontato con il valore di calcolo della resistenza verticale del palo stesso. Il problema che si pone, quindi, è quello di determinare la capacità portante del palo. Determinata la capacità portante, la resistenza di calcolo verticale del palo si ottiene applicando degli opportuni coefficienti di sicurezza.

La capacità portante di un palo viene valutata come somma di due contributi: portanza di base (o di punta) e portanza per attrito laterale lungo il fusto. Cioè si assume valida l'espressione:

$$Q_T = Q_P + Q_L - W_P$$

dove:

- $Q_T$  Portanza totale del palo;
- $Q_P$  Portanza di base del palo;
- $Q_L$  Portanza per attrito laterale del palo;
- $W_P$  Peso proprio del palo.

Le due componenti  $Q_P$  e  $Q_L$  sono calcolate in modo indipendente fra loro. Risulta molto difficoltoso, tranne che in poche situazioni, stabilire quanta parte del carico viene assorbita per attrito laterale e quanta per resistenza alla base.

Nel caso di pali soggetti a trazione la resistenza allo sfilamento vale:

$$Q_T = Q_L + W_P$$

Dalla capacità portante del palo si ricava il carico ammissibile del palo  $Q_A$  applicando degli opportuni coefficienti di sicurezza rispettivamente  $\gamma_b$  e  $\gamma_s$ .

I coefficienti  $\gamma_b$  e  $\gamma_s$  rappresentano rispettivamente i valori del coefficiente di sicurezza per la portanza di punta e quello per la portanza laterale.

Quindi nel caso di pali compressi abbiamo la seguente relazione:

$$Q_A = Q_P/\gamma_b + Q_L/\gamma_s - W_P$$

Nel caso invece di pali soggetti a sforzi di trazione abbiamo la seguente relazione:

$$Q_A = Q_L/\gamma_s + W_P$$

### Capacità portante di punta

In generale la capacità portante di punta viene calcolata tramite l'espressione:

$$Q_p = A_p (c N_c + q_b N_q)$$

dove  $A_p$  è l'area portante efficace della punta del palo,  $c$  è la coesione,  $q_b$  è la pressione del terreno alla quota della punta del palo ed i coefficienti  $N_c$  e  $N_q$  sono i coefficienti delle formule della capacità portante corretti per tener conto degli effetti di profondità.  $N_c$  ed  $N_q$  dipendono sia dalla geometria del palo che dalle caratteristiche del terreno angolo di attrito e coesione ( $\phi$  e  $c$ ).

### Capacità portante per attrito laterale

La portanza laterale è data dall'integrale esteso a tutta la superficie laterale del palo delle tensioni tangenziali palo-terreno in condizioni limiti:

$$Q_L = \text{Int}(\tau_a) dS$$

dove  $\tau_a$  è dato dalla nota relazione di Coulomb:

$$\tau_a = c_a + \sigma_h \text{tg } \delta$$

dove  $c_a$  è l'adesione palo-terreno,  $\delta$  è l'angolo di attrito palo-terreno, e  $\sigma_h$  è la tensione orizzontale alla generica profondità  $z$ . La tensione orizzontale  $\sigma_h$  è legata alla pressione verticale  $\sigma_v$  tramite il coefficiente di spinta  $K_s$

$$\sigma_h = K_s \sigma_v$$

Indicando con  $C$  il perimetro e con  $L$  la lunghezza del palo abbiamo:

$$\text{Int}^L(C(c_a + K_s \sigma_v \text{tg } \delta) dz)$$

### Analisi del palo soggetto a forze orizzontali (Portanza trasversale)

La resistenza limite laterale di un palo è determinata dal minimo valore fra il carico orizzontale necessario per produrre il collasso del terreno lungo il fusto del palo ed il carico orizzontale necessario per produrre la plasticizzazione del palo. Il primo meccanismo (plasticizzazione del terreno) si verifica nel caso di pali molto rigidi in terreni poco resistenti (meccanismo di palo corto) mentre il secondo meccanismo si verifica nel caso di pali aventi rigidità non eccessive rispetto al terreno di infissione (meccanismo di palo lungo o intermedio). Nel modello di terreno alla Winkler il terreno viene schematizzato come una serie di molle elastiche indipendenti fra di loro. Le molle che schematizzano il terreno vengono caratterizzate tramite una costante di rigidità elastica,  $K_h$ , espressa in Kg/cm<sup>2</sup>/cm che rappresenta la pressione (in Kg/cm<sup>2</sup>) che bisogna applicare per ottenere lo spostamento di 1 cm. La determinazione di questa costante può essere fatta o tramite prove di carico su piastra o mediante metodi analitici (convenzionali). La variazione della costante di Winkler con la profondità dipende dal tipo di terreno in cui il palo è immerso. Ad esempio nel caso di terreni coesivi in condizioni non drenate  $K_h$  assume un valore costante con la profondità mentre nel caso di terreni incoerenti la variazione di  $K_h$  è di tipo lineare (crescente con la profondità). In generale l'espressione di  $K_h$  assume una forma binomia del tipo:

$$K_h(z) = A + B z^n$$

Per l'analisi di pali caricati trasversalmente si utilizza il modello di Winkler. Il palo viene suddiviso in un determinato numero (100) di elementi tipo trave aventi area ed inerzia pari a quella della sezione trasversale del palo. In corrispondenza di ogni nodo di separazione fra i vari elementi viene inserita una molla orizzontale di opportuna rigidità che schematizza il terreno. Il comportamento delle molle che schematizzano il terreno non è infinitamente elastico ma è di tipo elastoplastico. La singola molla reagisce fino ad un valore limite di spostamento o di reazione; una volta che è stato superato tale limite la molla non offre ulteriori incrementi di resistenza (diagramma tipo elastoplastico perfetto). Indicando con  $dy_e$  la lunghezza del tratto di influenza della molla, con  $D$  il diametro del palo la molla avrà una rigidità pari a:

$$K_m = dy_e D K_k$$

La resistenza limite del terreno rappresenta il valore limite di resistenza che il terreno può esplicare quando il palo è soggetto ad un carico orizzontale. La resistenza limite  $p_u = p_u(z)$  dipende dalle caratteristiche del terreno e dalla geometria del palo. In terreni puramente coesivi ( $c=c_u$ ,  $\phi=0$ ) la resistenza cresce dal valore 0 in sommità fino ad un valore limite in corrispondenza di una profondità pari a circa 3 diametri. Il valore limite in tal caso è variabile fra 8 e 12  $c_u$ . Nel caso di terreni dotati di attrito e coesione la resistenza limite ad una generica profondità  $z$  è rappresentata dalla relazione (Brinch Hansen):

$$P_u = q K_{pq} + c K_{pc}$$

dove:

$D$  diametro del palo

$q$  pressione geostatica alla profondità  $z$

$c$  coesione alla profondità  $z$

$K_{pq}$ ,  $K_{pc}$  coefficienti funzione dell'angolo di attrito del terreno  $\phi$  e del rapporto  $z/D$ .

Broms ha eseguito l'analisi considerando il caso sia di palo vincolato in testa che di palo libero immerso in un mezzo omogeneo. Nel caso di terreni coesivi Broms assume in questo caso un diagramma di resistenza nullo fino ad una profondità pari a  $1,5D$  e poi valore costante pari a  $9c_u D$ .

Nel caso di terreni incoerenti Broms assume che la resistenza laterale sia variabile con la profondità dal valore 0 (in testa) fino al valore  $3\sigma_v K_p D$  (alla base) essendo  $K_p$  il coefficiente di resistenza passiva espresso da  $K_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2)$ .

## Dati

### Geometria della fondazione

#### Simbologia adottata

<i>Descr</i>	Descrizione del palo
<i>Frm</i>	Forma del palo ((C)=Costante, (R)=Rastremato)
<i>X</i>	Ascissa del baricentro del palo espressa in [m]
<i>Y</i>	Ordinata del baricentro del palo espressa in [m]
<i>D</i>	Diametro del palo espresso in [cm]
<i>L</i>	Lunghezza del palo espressa in [m]

Descr	Frm	X [m]	Y [m]	D [m]	L [m]
Palo 120	(C)	0,00	0,00	120,00	26,00

### Materiali palo

#### Calcestruzzo

Tipo	Rck 250	
Resistenza caratteristica a compressione $R_{ck}$	250,00	[kg/cm <sup>2</sup> ]
Peso specifico	2500,00	[kg/mc]
Modulo elastico	306658,85	[kg/cm <sup>2</sup> ]
Coeff. di omogeneizzazione	15,00	

#### Acciaio

Tipo	B450C	
Tensione caratteristica di snervamento	4588,65	[kg/cm <sup>2</sup> ]

### Coefficienti di sicurezza sui materiali

Coefficiente di sicurezza calcestruzzo	1.50
Fattore riduzione da resistenza cubica a cilindrica	0.83
Fattore di riduzione per carichi di lungo periodo	0.85
Coefficiente di sicurezza acciaio	1.15
Coefficiente di sicurezza sezione	1.00

### Caratteristiche pali

Pali in c.a.  
 Armatura con ferri longitudinali e staffe  
 Vincolo in testa di tipo CERNIERA  
 Tipo di palo TRIVELLATO  
 Contributo sia della portanza laterale sia della portanza di punta

### Descrizione terreni e falda

#### Simbologia adottata

<i>Descrizione</i>	Descrizione terreno
$\gamma$	Peso di volume del terreno espresso in [kg/mc]
$\gamma_{sat}$	Peso di volume saturo del terreno espresso in [kg/mc]
$\phi$	Angolo di attrito interno del terreno espresso in gradi
$\delta$	Angolo di attrito palo-terreno espresso in gradi
$c$	Coesione del terreno espressa in [kg/cm <sup>2</sup> ]
$ca$	Adesione del terreno espressa in [kg/cm <sup>2</sup> ]
$\phi_{min}, \phi_{med}$	Angolo di attrito interno del terreno minimo e medio espresso in gradi
$\delta_{min}, \delta_{med}$	Angolo di attrito palo-terreno minimo e medio espresso in gradi
$c_{min}, c_{med}$	Coesione del terreno minima e media espressa in [kg/cm <sup>2</sup> ]
$ca_{min}, ca_{med}$	Adesione del terreno minima e media espressa in [kg/cm <sup>2</sup> ]

### Parametri caratteristici

Descrizione	$\gamma$ [kg/mc]	$\gamma_{sat}$ [kg/mc]	$\phi$ [°]	$\delta$ [°]	c [kg/cm <sup>2</sup> ]	ca [kg/cm <sup>2</sup> ]
Rilevato	2000,0	2000,0	35,00	35,00	0,000	0,000
G3	1850,0	1850,0	35,00	35,00	0,000	0,000
S1/S2	1900,0	1900,0	34,00	34,00	0,000	0,000

### Parametri minimi

Descrizione	$\phi_{min}$ [°]	$\delta_{min}$ [°]	C <sub>min</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	Ca <sub>min</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]
Rilevato	34,99	34,99	0,000	0,000
G3	34,99	34,99	0,000	0,000
S1/S2	33,99	33,99	0,000	0,000

### Parametri medi

Descrizione	$\phi_{med}$ [°]	$\delta_{med}$ [°]	C <sub>med</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	Ca <sub>med</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]
Rilevato	35,00	35,00	0,000	0,000
G3	35,00	35,00	0,000	0,000
S1/S2	34,00	34,00	0,000	0,000

### Falda

Profondità dal piano di posa 5,60 [m]

### Descrizione stratigrafia

#### Simbologia adottata

- N Identificativo strato
- Z1 Quota dello strato in corrispondenza del punto di sondaggio n°1 espressa in [m]
- Z2 Quota dello strato in corrispondenza del punto di sondaggio n°2 espressa in [m]
- Z3 Quota dello strato in corrispondenza del punto di sondaggio n°3 espressa in [m]
- Terreno Terreno dello strato
- Kw Costante di Winkler espressa in Kg/cm<sup>2</sup>/cm
- Ks Coefficiente di spinta
- $\alpha$  Coefficiente di espansione laterale

n°	Z1 [m]	Z2 [m]	Z3 [m]	Terreno	Kw [kg/cm <sup>2</sup> /cm]	Ks	$\alpha$
1	-4,6	-4,6	-4,6	Rilevato	0.57	0.00	1.00
2	-5,6	-5,6	-6,5	G3	3.49	0.43	1.00
3	-8,4	-8,4	-8,4	G3	2.24	0.43	1.00
4	-13,8	-13,8	-13,8	S1/S2	5.77	0.44	1.00

### Normativa

N.T.C. 2008 - Approccio 2

#### Simbologia adottata

- $\gamma_{Gsfav}$  Coefficiente parziale sfavorevole sulle azioni permanenti
- $\gamma_{Gfav}$  Coefficiente parziale favorevole sulle azioni permanenti
- $\gamma_{Qsfav}$  Coefficiente parziale sfavorevole sulle azioni variabili
- $\gamma_{Qfav}$  Coefficiente parziale favorevole sulle azioni variabili
- $\gamma_{tan\phi}$  Coefficiente parziale di riduzione dell'angolo di attrito drenato
- $\gamma_c$  Coefficiente parziale di riduzione della coesione drenata
- $\gamma_{cu}$  Coefficiente parziale di riduzione della coesione non drenata
- $\gamma_{qu}$  Coefficiente parziale di riduzione del carico ultimo
- $\gamma_r$  Coefficiente parziale di riduzione della resistenza a compressione uniaxiale delle rocce

### Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni:

Carichi	Effetto		Statici		Sismici	
			A1	A2	A1	A2
Permanenti	Favorevole	$\gamma_{Gfav}$	1.00	1.00	1.00	1.00
Permanenti	Sfavorevole	$\gamma_{Gsfav}$	1.30	1.00	1.00	1.00
Variabili	Favorevole	$\gamma_{Qfav}$	0.00	0.00	0.00	0.00
Variabili	Sfavorevole	$\gamma_{Qsfav}$	1.50	1.30	1.00	1.00

### Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno:

Parametri	Statici		Sismici	
	M1	M2	M1	M2

Parametri		Statici		Sismici	
		M1	M2	M1	M2
Tangente dell'angolo di attrito	$\gamma_{\tan\phi}$	1.00	1.25	1.00	1.25
Coesione efficace	$\gamma_c$	1.00	1.25	1.00	1.25
Resistenza non drenata	$\gamma_{cu}$	1.00	1.40	1.00	1.40
Resistenza a compressione uniassiale	$\gamma_{qu}$	1.00	1.60	1.00	1.60
Peso dell'unità di volume	$\gamma_r$	1.00	1.00	1.00	1.00

## PALI DI FONDAZIONE

CARICHI VERTICALI. Coefficienti parziali  $\gamma_R$  per le verifiche dei pali

### Pali trivellati

		R3
Punta	$\gamma_b$	1.35
Laterale compressione	$\gamma_s$	1.15
Totale compressione	$\gamma_t$	1.30
Laterale trazione	$\gamma_{st}$	1.25

CARICHI TRASVERSALI. Coefficienti parziali  $\gamma_T$  per le verifiche dei pali.

		R3
	$\gamma_T$	1.30

Coefficienti di riduzione  $\xi$  per la determinazione della resistenza caratteristica dei pali

Numero di verticali indagate 1  $\xi_3=1.70$   $\xi_4=1.70$

## Condizioni di carico

### Simbologia e convenzioni di segno adottate

Carichi verticali positivi verso il basso.

Carichi orizzontali positivi verso sinistra.

Momento positivo senso antiorario.

$fnd$  Indice della fondazione

$N_{TOT}$  Sforzo normale totale espressa in [kg]

$M_{YTOT}$  Momento in direzione Y espresso in [kgm]

$T_{TOT}$  Forza di taglio espressa in [kg]

### Condizione n° 1 - Condizione n° 1 - VARIABILE

Fondazione	$N_{TOT}$ [kg]	$M_{YTOT}$ [kgm]	$T_{TOT}$ [kg]
Palo 120	293006,0	-66162,0	39064,0

### Condizione n° 2 - Condizione n° 2 - PERMANENTE

Fondazione	$N_{TOT}$ [kg]	$M_{YTOT}$ [kgm]	$T_{TOT}$ [kg]
Palo 120	133725,0	-87031,0	8776,0

## Descrizione combinazioni di carico

### Simbologia adottata

$\gamma$  Coefficiente di partecipazione della condizione

$\Psi$  Coefficiente di combinazione della condizione

### Combinazione n° 1 - STR - A1-M1-R3

Cond	$\gamma$	$\Psi$
Condizione n° 1	1.00	1.00

### Combinazione n° 2 - STR - A1-M1-R3

Cond	$\gamma$	$\Psi$
Condizione n° 2	1.00	1.00

## Opzioni di calcolo

### Analisi in condizioni drenate

#### Verifica della portanza assiale

Il metodo utilizzato per il calcolo della portanza verticale è: Berezantzev ridotto.

L'andamento della pressione verticale  $\sigma_v$  con la profondità, per il calcolo della portanza di punta, è stata definita come: Pressione geostatica.

#### Verifica della portanza trasversale

Costante di Winkler orizzontale definita da STRATO

Criterio di rottura palo-terreno: Pressione limite (Pressione passiva con moltiplicatore = 3.00)

## Risultati

### Verifica della portanza assiale

#### Simbologia adottata

cmb	Identificativo della combinazione
Nc, Nq	Fattori di capacità portante
P <sub>lmin</sub> , P <sub>lmed</sub>	Portanza laterale minima e media espressa in [kg]
P <sub>pmin</sub> , P <sub>pmed</sub>	Portanza di punta minima e media espressa in [kg]
Pd	Portanza di progetto espressa in [kg]
N	Scarico verticale in testa al palo espresso in [kg]
η	Coeff. di sicurezza per carichi verticali

cmb	Nc	Nq
1	35.96	25.25
2	35.96	25.25

cmb	P <sub>lmed</sub>	P <sub>pmed</sub>	P <sub>lmin</sub>	P <sub>pmin</sub>	Wp	Pd	N	η
	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	
1	471299	835975	471122	835032	73513	531318	293006	<b>1.813</b>
2	471299	835975	471122	835032	73513	531318	133725	<b>3.973</b>

### Verifica della portanza trasversale

#### Simbologia adottata

cmb	Identificativo della combinazione
Tu	Taglio resistente ultimo in testa al palo, espresso in [kg]
Tx	Taglio agente in testa al palo, espresso in [kg]
η=Tu/Tx	Coeff. di sicurezza per carichi orizzontali

cmb	Tu	T	η
	[kg]	[kg]	
1	122356	39064	<b>3,132</b>
2	23168	8776	<b>2,640</b>

### Spostamenti e pressioni

#### Simbologia adottata

Nr.	Identificativo sezione palo
Y	ordinata palo espressa in [cm]
Ue	spostamento espresso in [cm]
Pe	pressione espressa in [kg/cmq]

#### Combinazione n° 1

n°	Y	Ue	Pe	n°	Y	Ue	Pe	n°	Y	Ue	Pe
	[m]	[cm]	[kg/cmq]		[m]	[cm]	[kg/cmq]		[m]	[cm]	[kg/cmq]
1	0,00	1,0560	0,000	2	0,26	1,0206	0,576	3	0,52	0,9841	0,559
4	0,78	0,9465	0,538	5	1,04	0,9081	0,516	6	1,30	0,8691	0,494

RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE

n°	Y	Ue	Pe	n°	Y	Ue	Pe	n°	Y	Ue	Pe
	[m]	[cm]	[kg/cmq]		[m]	[cm]	[kg/cmq]		[m]	[cm]	[kg/cmq]
7	1,56	0,8297	0,471	8	1,82	0,7900	0,449	9	2,08	0,7503	0,426
10	2,34	0,7106	0,404	11	2,60	0,6711	0,381	12	2,86	0,6319	0,359
13	3,12	0,5933	0,337	14	3,38	0,5552	0,315	15	3,64	0,5179	0,294
16	3,90	0,4815	0,273	17	4,16	0,4460	0,253	18	4,42	0,4116	0,234
19	4,68	0,3784	1,322	20	4,94	0,3465	1,211	21	5,20	0,3159	1,104
22	5,46	0,2867	1,002	23	5,72	0,2590	0,579	24	5,98	0,2328	0,520
25	6,24	0,2080	0,465	26	6,50	0,1847	0,413	27	6,76	0,1628	0,364
28	7,02	0,1424	0,318	29	7,28	0,1234	0,276	30	7,54	0,1058	0,236
31	7,80	0,0896	0,200	32	8,06	0,0746	0,167	33	8,32	0,0610	0,136
34	8,58	0,0486	0,280	35	8,84	0,0374	0,215	36	9,10	0,0273	0,157
37	9,36	0,0183	0,105	38	9,62	0,0103	0,059	39	9,88	0,0032	0,019
40	10,14	-0,0029	-0,017	41	10,40	-0,0082	-0,047	42	10,66	-0,0127	-0,073
43	10,92	-0,0165	-0,095	44	11,18	-0,0197	-0,113	45	11,44	-0,0222	-0,128
46	11,70	-0,0242	-0,140	47	11,96	-0,0257	-0,148	48	12,22	-0,0268	-0,154
49	12,48	-0,0275	-0,158	50	12,74	-0,0278	-0,160	51	13,00	-0,0278	-0,160
52	13,26	-0,0276	-0,159	53	13,52	-0,0271	-0,156	54	13,78	-0,0265	-0,153
55	14,04	-0,0257	-0,148	56	14,30	-0,0247	-0,143	57	14,56	-0,0237	-0,137
58	14,82	-0,0225	-0,130	59	15,08	-0,0214	-0,123	60	15,34	-0,0201	-0,116
61	15,60	-0,0189	-0,109	62	15,86	-0,0176	-0,101	63	16,12	-0,0163	-0,094
64	16,38	-0,0151	-0,087	65	16,64	-0,0139	-0,080	66	16,90	-0,0127	-0,073
67	17,16	-0,0115	-0,067	68	17,42	-0,0104	-0,060	69	17,68	-0,0094	-0,054
70	17,94	-0,0084	-0,048	71	18,20	-0,0074	-0,043	72	18,46	-0,0065	-0,038
73	18,72	-0,0057	-0,033	74	18,98	-0,0049	-0,028	75	19,24	-0,0042	-0,024
76	19,50	-0,0035	-0,020	77	19,76	-0,0029	-0,017	78	20,02	-0,0023	-0,014
79	20,28	-0,0018	-0,011	80	20,54	-0,0013	-0,008	81	20,80	-0,0009	-0,005
82	21,06	-0,0005	-0,003	83	21,32	-0,0002	-0,001	84	21,58	0,0001	0,001
85	21,84	0,0004	0,002	86	22,10	0,0007	0,004	87	22,36	0,0009	0,005
88	22,62	0,0011	0,006	89	22,88	0,0013	0,008	90	23,14	0,0015	0,009
91	23,40	0,0016	0,009	92	23,66	0,0018	0,010	93	23,92	0,0019	0,011
94	24,18	0,0020	0,012	95	24,44	0,0022	0,012	96	24,70	0,0023	0,013
97	24,96	0,0024	0,014	98	25,22	0,0025	0,014	99	25,48	0,0026	0,015
100	25,74	0,0027	0,016	101	26,00	0,0028	0,016	102			

Combinazione n° 2

n°	Y	Ue	Pe	n°	Y	Ue	Pe	n°	Y	Ue	Pe
	[m]	[cm]	[kg/cmq]		[m]	[cm]	[kg/cmq]		[m]	[cm]	[kg/cmq]
1	0,00	-0,2516	0,000	2	0,26	-0,2231	-0,127	3	0,52	-0,1964	-0,112
4	0,78	-0,1715	-0,097	5	1,04	-0,1483	-0,084	6	1,30	-0,1269	-0,072
7	1,56	-0,1070	-0,061	8	1,82	-0,0887	-0,050	9	2,08	-0,0719	-0,041
10	2,34	-0,0565	-0,032	11	2,60	-0,0425	-0,024	12	2,86	-0,0298	-0,017
13	3,12	-0,0184	-0,010	14	3,38	-0,0082	-0,005	15	3,64	0,0009	0,000
16	3,90	0,0089	0,005	17	4,16	0,0159	0,009	18	4,42	0,0220	0,012
19	4,68	0,0271	0,095	20	4,94	0,0315	0,110	21	5,20	0,0351	0,123
22	5,46	0,0380	0,133	23	5,72	0,0402	0,090	24	5,98	0,0418	0,094
25	6,24	0,0429	0,096	26	6,50	0,0435	0,097	27	6,76	0,0437	0,098
28	7,02	0,0435	0,097	29	7,28	0,0429	0,096	30	7,54	0,0420	0,094
31	7,80	0,0409	0,091	32	8,06	0,0395	0,088	33	8,32	0,0379	0,085
34	8,58	0,0362	0,209	35	8,84	0,0344	0,198	36	9,10	0,0325	0,187
37	9,36	0,0305	0,176	38	9,62	0,0285	0,165	39	9,88	0,0265	0,153
40	10,14	0,0246	0,142	41	10,40	0,0226	0,130	42	10,66	0,0207	0,120
43	10,92	0,0189	0,109	44	11,18	0,0171	0,099	45	11,44	0,0154	0,089
46	11,70	0,0138	0,079	47	11,96	0,0122	0,071	48	12,22	0,0108	0,062
49	12,48	0,0094	0,054	50	12,74	0,0082	0,047	51	13,00	0,0070	0,040
52	13,26	0,0059	0,034	53	13,52	0,0049	0,028	54	13,78	0,0040	0,023
55	14,04	0,0032	0,018	56	14,30	0,0024	0,014	57	14,56	0,0017	0,010
58	14,82	0,0011	0,007	59	15,08	0,0006	0,003	60	15,34	0,0001	0,001
61	15,60	-0,0003	-0,002	62	15,86	-0,0006	-0,004	63	16,12	-0,0009	-0,005
64	16,38	-0,0012	-0,007	65	16,64	-0,0014	-0,008	66	16,90	-0,0016	-0,009
67	17,16	-0,0017	-0,010	68	17,42	-0,0018	-0,010	69	17,68	-0,0019	-0,011
70	17,94	-0,0019	-0,011	71	18,20	-0,0019	-0,011	72	18,46	-0,0019	-0,011
73	18,72	-0,0019	-0,011	74	18,98	-0,0019	-0,011	75	19,24	-0,0019	-0,011
76	19,50	-0,0018	-0,010	77	19,76	-0,0017	-0,010	78	20,02	-0,0017	-0,010
79	20,28	-0,0016	-0,009	80	20,54	-0,0015	-0,009	81	20,80	-0,0014	-0,008
82	21,06	-0,0013	-0,008	83	21,32	-0,0012	-0,007	84	21,58	-0,0011	-0,006
85	21,84	-0,0010	-0,006	86	22,10	-0,0009	-0,005	87	22,36	-0,0008	-0,005
88	22,62	-0,0007	-0,004	89	22,88	-0,0006	-0,004	90	23,14	-0,0005	-0,003
91	23,40	-0,0004	-0,003	92	23,66	-0,0004	-0,002	93	23,92	-0,0003	-0,001
94	24,18	-0,0002	-0,001	95	24,44	-0,0001	0,000	96	24,70	0,0000	0,000
97	24,96	0,0001	0,001	98	25,22	0,0002	0,001	99	25,48	0,0003	0,002
100	25,74	0,0004	0,002	101	26,00	0,0005	0,003	102			

## Spostamenti e pressioni limiti

### Simbologia adottata

Nr.	Identificativo sezione palo
Y	ordinata palo espressa in [cm]
Ur	spostamento limite espresso in [cm]
Pr	pressione limite espressa in [kg/cmq]

n°	Y	Ur	Pr	n°	Y	Ur	Pr	n°	Y	Ur	Pr
	[m]	[cm]	[kg/cmq]		[m]	[cm]	[kg/cmq]		[m]	[cm]	[kg/cmq]
1	0,00	3,2964	0,000	2	0,26	3,1839	0,576	3	0,52	3,0679	1,151
4	0,78	2,9489	1,675	5	1,04	2,8276	1,606	6	1,30	2,7046	1,536
7	1,56	2,5805	1,466	8	1,82	2,4557	1,395	9	2,08	2,3308	1,324
10	2,34	2,2062	1,253	11	2,60	2,0824	1,183	12	2,86	1,9598	1,113
13	3,12	1,8389	1,044	14	3,38	1,7200	0,977	15	3,64	1,6036	0,911
16	3,90	1,4899	0,846	17	4,16	1,3793	0,783	18	4,42	1,2722	0,723
19	4,68	1,1688	4,084	20	4,94	1,0695	3,737	21	5,20	0,9744	3,405
22	5,46	0,8838	3,088	23	5,72	0,7977	1,783	24	5,98	0,7163	1,601
25	6,24	0,6394	1,429	26	6,50	0,5672	1,268	27	6,76	0,4995	1,116
28	7,02	0,4363	0,975	29	7,28	0,3776	0,844	30	7,54	0,3232	0,722
31	7,80	0,2730	0,610	32	8,06	0,2269	0,507	33	8,32	0,1849	0,413
34	8,58	0,1466	0,846	35	8,84	0,1121	0,646	36	9,10	0,0810	0,467
37	9,36	0,0533	0,307	38	9,62	0,0288	0,166	39	9,88	0,0072	0,042
40	10,14	-0,0116	-0,067	41	10,40	-0,0277	-0,160	42	10,66	-0,0415	-0,239
43	10,92	-0,0531	-0,306	44	11,18	-0,0627	-0,361	45	11,44	-0,0704	-0,406
46	11,70	-0,0764	-0,440	47	11,96	-0,0809	-0,467	48	12,22	-0,0841	-0,485
49	12,48	-0,0860	-0,496	50	12,74	-0,0869	-0,501	51	13,00	-0,0869	-0,501
52	13,26	-0,0860	-0,496	53	13,52	-0,0845	-0,487	54	13,78	-0,0824	-0,475
55	14,04	-0,0798	-0,460	56	14,30	-0,0768	-0,443	57	14,56	-0,0735	-0,424
58	14,82	-0,0699	-0,403	59	15,08	-0,0662	-0,382	60	15,34	-0,0623	-0,359
61	15,60	-0,0584	-0,337	62	15,86	-0,0544	-0,314	63	16,12	-0,0505	-0,291
64	16,38	-0,0466	-0,269	65	16,64	-0,0428	-0,247	66	16,90	-0,0391	-0,226
67	17,16	-0,0355	-0,205	68	17,42	-0,0321	-0,185	69	17,68	-0,0288	-0,166
70	17,94	-0,0257	-0,148	71	18,20	-0,0228	-0,131	72	18,46	-0,0200	-0,116
73	18,72	-0,0174	-0,101	74	18,98	-0,0150	-0,087	75	19,24	-0,0128	-0,074
76	19,50	-0,0107	-0,062	77	19,76	-0,0088	-0,051	78	20,02	-0,0071	-0,041
79	20,28	-0,0055	-0,032	80	20,54	-0,0040	-0,023	81	20,80	-0,0027	-0,016
82	21,06	-0,0015	-0,009	83	21,32	-0,0004	-0,002	84	21,58	0,0005	0,003
85	21,84	0,0014	0,008	86	22,10	0,0022	0,013	87	22,36	0,0029	0,017
88	22,62	0,0036	0,020	89	22,88	0,0041	0,024	90	23,14	0,0046	0,027
91	23,40	0,0051	0,030	92	23,66	0,0056	0,032	93	23,92	0,0060	0,034
94	24,18	0,0063	0,037	95	24,44	0,0067	0,039	96	24,70	0,0070	0,041
97	24,96	0,0074	0,043	98	25,22	0,0077	0,044	99	25,48	0,0080	0,046
100	25,74	0,0084	0,048	101	26,00	0,0087	0,050	102			

Di seguito sono riepilogati i coefficienti di sicurezza delle verifiche geotecniche desunti dal software di calcolo relativamente alle diverse combinazioni di carico considerate:

COMBINAZIONE	CARICO LIMITE	PORTANZA LATERALE
SLU - STR	1,813	3,132
SLV	3,973	2,640

Come anticipato in precedenza, di seguito sono riepilogati i coefficienti di sicurezza delle verifiche geotecniche relativamente alle diverse combinazioni di carico considerate, prendendo in esame esclusivamente i 21,0 m di palo al di fuori del lamierino (stratigrafia vergine con esclusione dello strato di rilevato):

COMBINAZIONE	CARICO LIMITE	PORTANZA LATERALE
SLU - STR	1,22	3,44
SLV	2,68	2,62

#### 7.4 VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA DEI PALI IN GRUPPO

Poiché l'interasse tra i pali di fondazione è inferiore a 3 volte il diametro dei pali stessi ( $i = 3,20 \text{ m} < 3 \cdot d = 3,60 \text{ m}$ ) si procede di seguito alla valutazione dell'efficienza dei pali in gruppo mediante la formulazione di Converse – Labarre:

$$E_g = 1 - \theta \cdot \frac{(n-1) \cdot m + (m-1) \cdot n}{90 \cdot m \cdot n}$$

dove:

- $m \rightarrow n$ . di colonne di pali
- $n \rightarrow n$ . di righe di pali
- $\theta = \arctan(D/s)$  espresso in gradi
- $D \rightarrow$  diametro del palo
- $S \rightarrow$  interasse tra i pali

Sul singolo concio del muro si ha:

- $m = 4$
- $n = 1$
- $\theta = \arctan(120/320) = 20,55^\circ$
- $D = 120 \text{ cm}$
- $S = 320 \text{ cm}$

Si ottiene pertanto un'efficienza dei pali in gruppo pari a:

**$E_g = 0,829$**

Applicando tale valore ai coefficienti di sicurezza a carico limite ultimo si ottiene:

COMBINAZIONE	$C_{\text{sicurezza}}$ CALCOLATO	$E_g$	$C_{\text{sicurezza}}$ FINALE
SLU - STR	1,813	0,829	1,503
SLV	3,973	0,829	3,294

Prendendo in esame esclusivamente i 21,0 m di palo al di fuori del lamierino (stratigrafia vergine con esclusione dello strato di rilevato) si ottiene invece:

COMBINAZIONE	$C_{\text{sicurezza}}$ CALCOLATO	$E_g$	$C_{\text{sicurezza}}$ FINALE
SLU - STR	1,22	0,829	1,011
SLV	2,68	0,829	2,222

In tutti i casi il coefficiente di sicurezza finale risulta comunque superiore all'unità.

Si sottolinea infine che l'applicazione della formulazione di Converse – Labarre per i terreni granulari (come nel caso in esame nel quale la stratigrafia è costituita per la maggior percentuale da terreni incoerenti) è spesso eccessivamente cautelativa.

## 7.5 VALIDAZIONE MANUALE DEI RISULTATI DEL SOFTWARE

Nella tabella successiva è riportata la determinazione della portanza laterale caratteristica del palo di fondazione:

Diametro del palo	1,20	[m]
Lunghezza del palo	26,00	[m]
Quota di falda	5,60	[m]
Pressione al piano di posa della zattera di fondazione	0,00	[kN/m <sup>2</sup> ]

z [m]	γ [kN/m <sup>3</sup> ]	γ' [kN/m <sup>3</sup> ]	γ <sub>w</sub> [kN/m <sup>3</sup> ]	σ <sub>v</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	σ <sub>w</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	σ' <sub>v</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	φ [°]	K = 1-sen(φ)	μ=tan(δ)=tan(φ)	T <sub>s</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	T <sub>s,media</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	R <sub>L,k</sub> [kN]
0,00	20,00	20,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,000	0,000	0,00	0,00	0,00
1,00	20,00	20,00	0,00	20,00	0,00	20,00	0,00	1,000	0,000	0,00	0,00	0,00
2,00	20,00	20,00	0,00	40,00	0,00	40,00	0,00	1,000	0,000	0,00	0,00	0,00
3,00	20,00	20,00	0,00	60,00	0,00	60,00	0,00	1,000	0,000	0,00	0,00	0,00
4,00	20,00	20,00	0,00	80,00	0,00	80,00	0,00	1,000	0,000	0,00	0,00	0,00
4,60	20,00	20,00	0,00	92,00	0,00	92,00	0,00	1,000	0,000	0,00	0,00	0,00
5,00	18,50	18,50	0,00	99,40	0,00	99,40	35,00	0,426	0,700	29,68	14,84	22,38
5,60	18,50	18,50	0,00	110,50	0,00	110,50	35,00	0,426	0,700	32,99	31,34	93,26
6,00	18,50	8,50	10,00	117,90	4,00	113,90	35,00	0,426	0,700	34,01	33,50	143,78
7,00	18,50	8,50	10,00	136,40	14,00	122,40	35,00	0,426	0,700	36,55	35,28	276,77
8,00	18,50	8,50	10,00	154,90	24,00	130,90	35,00	0,426	0,700	39,08	37,82	419,33
8,40	18,50	8,50	10,00	162,30	28,00	134,30	35,00	0,426	0,700	40,10	39,59	479,04
9,00	19,00	9,00	10,00	173,70	34,00	139,70	34,00	0,441	0,675	41,54	40,82	571,37
10,00	19,00	9,00	10,00	192,70	44,00	148,70	34,00	0,441	0,675	44,21	42,87	733,00
11,00	19,00	9,00	10,00	211,70	54,00	157,70	34,00	0,441	0,675	46,89	45,55	904,72
12,00	19,00	9,00	10,00	230,70	64,00	166,70	34,00	0,441	0,675	49,56	48,23	1.086,53
13,00	19,00	9,00	10,00	249,70	74,00	175,70	34,00	0,441	0,675	52,24	50,90	1.278,43
14,00	19,00	9,00	10,00	268,70	84,00	184,70	34,00	0,441	0,675	54,92	53,58	1.480,42
15,00	19,00	9,00	10,00	287,70	94,00	193,70	34,00	0,441	0,675	57,59	56,25	1.692,49
16,00	19,00	9,00	10,00	306,70	104,00	202,70	34,00	0,441	0,675	60,27	58,93	1.914,65
17,00	19,00	9,00	10,00	325,70	114,00	211,70	34,00	0,441	0,675	62,94	61,61	2.146,91
18,00	19,00	9,00	10,00	344,70	124,00	220,70	34,00	0,441	0,675	65,62	64,28	2.389,24
19,00	19,00	9,00	10,00	363,70	134,00	229,70	34,00	0,441	0,675	68,30	66,96	2.641,67
20,00	19,00	9,00	10,00	382,70	144,00	238,70	34,00	0,441	0,675	70,97	69,63	2.904,19
21,00	19,00	9,00	10,00	401,70	154,00	247,70	34,00	0,441	0,675	73,65	72,31	3.176,79
22,00	19,00	9,00	10,00	420,70	164,00	256,70	34,00	0,441	0,675	76,32	74,99	3.459,48
23,00	19,00	9,00	10,00	439,70	174,00	265,70	34,00	0,441	0,675	79,00	77,66	3.752,26
24,00	19,00	9,00	10,00	458,70	184,00	274,70	34,00	0,441	0,675	81,68	80,34	4.055,13
25,00	19,00	9,00	10,00	477,70	194,00	283,70	34,00	0,441	0,675	84,35	83,01	4.368,08
26,00	19,00	9,00	10,00	496,70	204,00	292,70	34,00	0,441	0,675	87,03	85,69	4.691,13

Il valore caratteristico della portanza laterale è risultato pari a  $R_{L,k} = 4.691,13$  kN.

Considerato:

- Coefficiente di portanza alla punta  $N^*_q = 25,25$
- Pressione verticale efficace alla base  $\sigma'_v = 292,70$  kN/m<sup>2</sup>

il valore caratteristico della portanza di punta risulta pari a:

$$R_{p,k} = \pi \times 1,20^2 / 4 \times 25,25 \times 292,70 = 8.358,66 \text{ kN}$$

Di seguito è riportato il form di output del software di calcolo recante la determinazione dei valori caratteristici della portanza laterale e di punta:

Dettagli risultati palo [comb 1] SLU - Approccio 2

**Geometria palo**  
 L = 26,00 m    D = 120,00 cm

**Portanza verticale**  
 Pp min = 835032 kg    Pp med = 835975 kg  
 Pl min = 471122 kg    Pl med = 471299 kg  
 Wp = 73513 kg  
 Pd = 531318 kg    N = 293006 kg     $\eta = 1,81$

**Coefficienti di capacità portante**  
 Nc = 35,96    Nq = 25,25  
 N'c = 35,96    N'q = 25,25

**Portanza trasversale**  
 Tu = 114374 kg    T = 39064 kg     $\eta = 2,93$   
 Mu = 193713 kgm

**Armatura palo (primo tratto)**  
 Armatura: 58  $\phi$  16    A = 116,62 cm<sup>2</sup>    MuSez = 213238 kgm

**Armatura palo (secondo tratto) - y =**  
 Armatura:  $\phi$     A =    MuSez =

**Cedimenti**  
 w = 0,309 cm    u = 1,056 cm

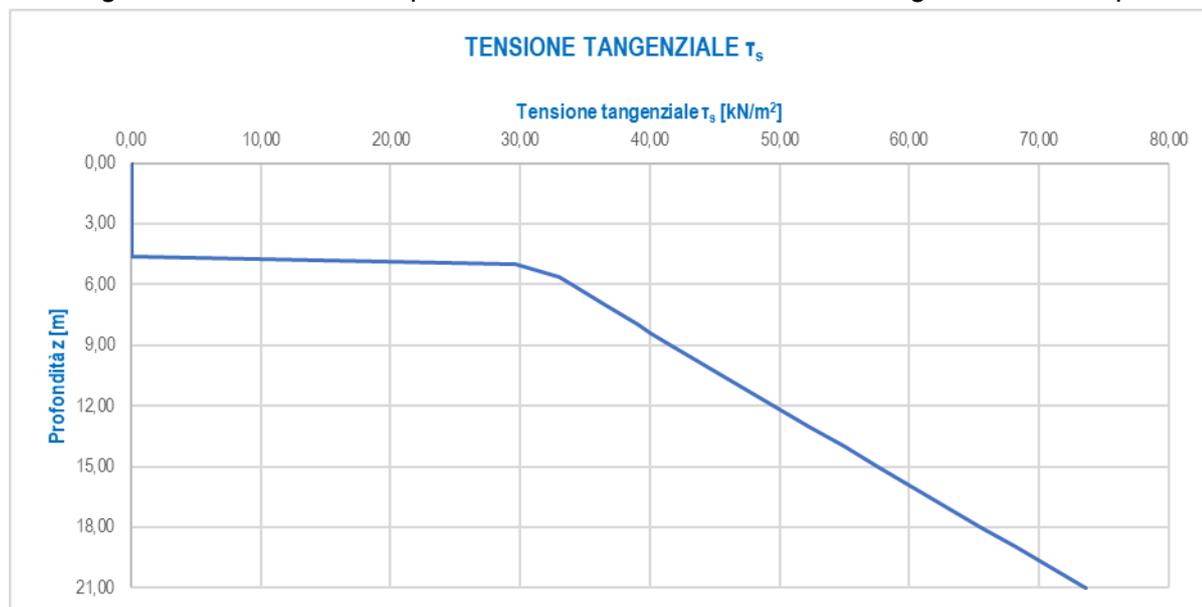
<< 1 >> Help

Risulta pertanto:

PORTANZA	SOFTWARE	VALIDAZIONE
di punta [kN]	8.359,75	8.358,66
laterale [kN]	4.712,99	4.691,13

I risultati risultano perfettamente confrontabili.

Nel diagramma successivo è riportato l'andamento della tensione tangenziale con la profondità:



La tensione tangenziale risulta sempre inferiore a **100,00 kPa**, nel rispetto dell'assunzione presente nel progetto definitivo.

## 7.6 CALCOLO DEI CEDIMENTI VERTICALI ALLO STATO LIMITE DI ESERCIZIO – COMBINAZIONE CARATTERISTICA

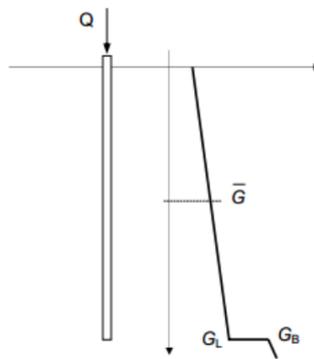
Il cedimento del palo per la combinazione maggiormente gravosa allo Stato Limite di Esercizio – Combinazione Caratteristica viene determinato mediante il metodo di Randolph e Worth di seguito descritto.

Il cedimento del singolo palo è determinato mediante la seguente relazione:

$$\frac{Q}{G_L \cdot r_0 \cdot w} = \left[ \frac{4}{\eta \cdot (1-\nu)} + \frac{2 \cdot \pi}{\zeta} \cdot \rho \cdot \frac{L}{r_0} \cdot \frac{\tanh(\mu \cdot L)}{\mu \cdot L} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{4}{\eta \cdot (1-\nu)} + \frac{1}{\pi \cdot L} \cdot \frac{L}{r_0} \cdot \frac{\tanh(\mu \cdot L)}{\mu \cdot L} \right]^{-1}$$

dove:

- Q = carico sul palo
- $r_0$  = raggio del palo
- w = cedimento del palo
- $E_p$  = modulo elastico del calcestruzzo costituente il palo



- $G_m$  = modulo di rigidezza trasversale media del terreno lungo lo sviluppo del palo
- $G_L$  = modulo di rigidezza trasversale del terreno alla lunghezza L
- $G_b$  = modulo di rigidezza trasversale del terreno in corrispondenza della base del palo
- $\nu$  = coefficiente di Poisson del terreno
- $r_b$  = raggio del palo alla base

$$\rho = \frac{G_m}{G_L}$$

$$\lambda = \frac{E_p}{G_L}$$

$$\xi = \frac{G_L}{G_b}$$

$$\eta = \frac{r_b}{r_0}$$

$$r_m = L \cdot \left\{ \frac{L}{4} + \left[ 2 \cdot \rho \cdot (1-\nu) - \frac{L}{4} \right] \cdot \xi \right\}$$

$$\zeta = \ln \left( \frac{r_m}{r_0} \right)$$

- $$\mu = \frac{\sqrt{\frac{2}{\xi \cdot \lambda}}}{r_0}$$

Il carico massimo sul singolo palo determinato per lo Stato Limite di Esercizio – Combinazione caratteristica è risultato pari a:

**Q = 2.129,76 kN**

A tale carico, trasmesso dalla pila, viene sommato il peso proprio del palo, che risulta pari a:

**P<sub>palo</sub> = 26,00 x π x 1,20<sup>2</sup> / 4 x 25,00 = 735,13 kN**

Viene infine sottratto il peso del terreno rimosso durante la trivellazione del palo:

**P<sub>t</sub> = π x 1,20<sup>2</sup> / 4 x (4,60 x 20,00 + 3,80 x 18,50 + 17,60 x 19,00) = 561,75 kN**

Il carico massimo in condizioni di esercizio utilizzato per la stima del cedimento verticale risulta dunque pari a:

**Q = 2.129,76 + 735,13 – 561,75 = 2.303,14 kN**

Sulla base della caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione si assumono i seguenti valori del modulo elastico:

- Strato 1 (rilevato stradale) → E = 22,50 Mpa = **22.500,00 kN/m<sup>2</sup>**
- Strato 2 (Unità Ug1) → E = 32,00 Mpa = **32.000,00 kN/m<sup>2</sup>**
- Strato 3 (Unità Ug2) → E = 34,00 Mpa = **34.000,00 kN/m<sup>2</sup>**

Il valore medio del modulo elastico lungo lo sviluppo del palo è valutato mediante la seguente media ponderata:

**E<sub>m</sub> = (4,60 x 22.500,00 + 3,80 x 32.000,00 + 17,60 x 34.000,00) / (4,60 + 3,80 + 17,60) = 31.673,08 kN/m<sup>2</sup>**

Considerato un coefficiente di Poisson del terreno pari a ν = 0,30, si ottengono i seguenti valori del modulo di rigidezza trasversale:

- **G<sub>m</sub> = 12.181,95 kN/m<sup>2</sup>**
- **G<sub>L</sub> = 13.076,92 kN/m<sup>2</sup>**
- **G<sub>b</sub> = 13.076,92 kN/m<sup>2</sup>**

Di seguito è riportata la valutazione del cedimento massimo verticale in esercizio riferito al singolo palo:

Q	2.303,14	[kN]
L	26,00	[m]
$r_0$	0,60	[m]
$r_b$	0,60	[m]
$E_p$	31.220.185,78	[kN/m <sup>2</sup> ]
$E_m$	31.673,08	[kN/m <sup>2</sup> ]
$E_L$	34.000,00	[kN/m <sup>2</sup> ]
$E_b$	34.000,00	[kN/m <sup>2</sup> ]
$G_m$	12.181,95	[kN/m <sup>2</sup> ]
$G_L$	13.076,92	[kN/m <sup>2</sup> ]
$G_b$	13.076,92	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\nu$	0,30	[-]
$r_m$	33,91	[m]
$\zeta$	4,03	[-]
$\eta$	1,00	[-]
$\xi$	1,00	[-]
$\rho$	0,93	[-]
$\mu$	0,0240	[-]
$\lambda$	2.387,43	[-]
$\mu L$	0,62	[m]
w	4,91	[mm]

Il cedimento calcolato risulta compatibile con la funzionalità in esercizio dell'opera, considerando anche che il cedimento indotto dal peso del palo, dal peso delle sottostrutture e dell'impalcato metallico viene comunque scontato in fase di esecuzione e che dunque non ingenera azioni parassite sulla sovrastruttura.

**8 AZIONI SOLLECITANTI SUI PALI DI FONDAZIONE DELLE PILE**

**8.1 AZIONI SOLLECITANTI DI CALCOLO TRASMESSE DALLE PILE**

Di seguito sono riportati i valori delle azioni sollecitanti trasmesse dalla zattera di fondazione delle pile (pila 2) e valutate in sommità dei singoli pali di fondazione (Elaborato **HE03-P03PO02STRRE03\_A**):

Numero di pali di fondazione

**8**

	PALO 1	PALO 2	PALO 3	PALO 4	PALO 5	PALO 6	PALO 7	PALO 8	
X	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	
Y	-5,40	-1,80	1,80	5,40	-5,40	-1,80	1,80	5,40	
X <sup>2</sup>	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	<b>25,92</b>
Y <sup>2</sup>	29,16	3,24	3,24	29,16	29,16	3,24	3,24	29,16	<b>129,60</b>

COMBINAZIONI DI CARICO		N <sub>Sd,1</sub> [kN]	N <sub>Sd,2</sub> [kN]	N <sub>Sd,3</sub> [kN]	N <sub>Sd,4</sub> [kN]	N <sub>Sd,5</sub> [kN]	N <sub>Sd,6</sub> [kN]	N <sub>Sd,7</sub> [kN]	N <sub>Sd,8</sub> [kN]	V <sub>Sd</sub> [kN]	
SLE - QUASI PERMANENTI	GEN Q.P.(max)	-	1.690,90	1.690,90	1.690,90	1.690,90	1.763,35	1.763,35	1.763,35	8,58	
	GEN Q.P.(min)	-	1.706,59	1.706,59	1.706,59	1.706,59	1.735,27	1.735,27	1.735,27	3,40	
SLE - FREQUENTI	GEN FREQ Mobili(max)	-	1.730,22	1.831,98	1.933,74	2.035,51	1.833,55	1.935,31	2.037,08	12,28	
	GEN FREQ Vento(max)	-	1.669,66	1.683,82	1.697,99	1.712,16	1.742,11	1.756,27	1.770,44	11,33	
	GEN FREQ Termico(max)	-	1.689,33	1.689,33	1.689,33	1.689,33	1.766,16	1.766,16	1.766,16	9,10	
	GEN FREQ Mobili(min)	-	1.855,14	1.753,37	1.651,61	1.549,85	1.846,49	1.744,72	1.642,96	1.541,19	1,43
	GEN FREQ Vento(min)	-	1.727,83	1.713,67	1.699,50	1.685,33	1.756,52	1.742,35	1.728,19	1.714,02	8,15
	GEN FREQ Termico(min)	-	1.708,16	1.708,16	1.708,16	1.708,16	1.732,47	1.732,47	1.732,47	1.732,47	2,88
SLE - RARE	GEN RARA Mobili(max)	-	1.679,60	1.913,77	2.147,93	2.382,10	1.793,80	2.027,96	2.262,13	2.496,30	24,46
	GEN RARA Vento(max)	-	1.604,41	1.777,01	1.949,60	2.122,20	1.693,44	1.866,03	2.038,63	2.211,22	37,94
	GEN RARA Frenam(max)	-	1.596,43	1.698,19	1.799,96	1.901,72	1.914,50	2.016,26	2.118,02	2.219,79	28,72
	GEN RARA Termico(max)	-	1.640,62	1.784,88	1.929,15	2.073,41	1.747,15	1.891,42	2.035,68	2.179,94	23,42
	GEN RARA Mobili(min)	-	2.035,47	1.801,30	1.567,13	1.332,97	1.976,66	1.742,49	1.508,33	1.274,16	28,65
	GEN RARA Vento(min)	-	1.944,91	1.772,32	1.599,72	1.427,12	1.913,18	1.740,59	1.567,99	1.395,39	40,00
	GEN RARA Frenam(min)	-	1.952,90	1.851,13	1.749,37	1.647,60	1.692,12	1.590,36	1.488,59	1.386,83	39,94
	GEN RARA Termico(min)	-	1.908,70	1.764,44	1.620,18	1.475,91	1.859,46	1.715,20	1.570,94	1.426,67	27,49
SLU - STR	GEN SLU Mobili(max)	-	2.314,87	2.637,37	2.959,87	3.282,37	2.483,11	2.805,61	3.128,11	3.450,61	40,96
	GEN SLU Vento(max)	-	2.206,57	2.450,20	2.693,83	2.937,46	2.341,67	2.585,30	2.828,93	3.072,56	59,08
	GEN SLU Frenam(max)	-	2.211,78	2.349,16	2.486,55	2.623,93	2.655,98	2.793,36	2.930,75	3.068,13	52,62
	GEN SLU Termico(max)	-	2.262,77	2.463,90	2.665,03	2.866,16	2.418,88	2.620,01	2.821,14	3.022,27	39,28
	GEN SLU Mobili(min)	-	2.811,58	2.489,07	2.166,57	1.844,07	2.754,17	2.431,66	2.109,16	1.786,66	36,43
	GEN SLU Vento(min)	-	2.695,28	2.451,65	2.208,02	1.964,39	2.675,26	2.431,63	2.188,00	1.944,37	56,92
	GEN SLU Frenam(min)	-	2.690,07	2.552,69	2.415,31	2.277,93	2.360,95	2.223,57	2.086,19	1.948,80	39,00
	GEN SLU Termico(min)	-	2.639,08	2.437,95	2.236,82	2.035,69	2.598,05	2.396,92	2.195,79	1.994,66	35,00
	GEN SLV Long(max)	1	1.073,85	1.112,12	1.150,39	1.188,66	1.639,08	1.677,35	1.715,62	1.753,89	102,79
	GEN SLV Long(max)	2	1.066,09	1.104,36	1.142,63	1.180,90	1.631,32	1.669,59	1.707,86	1.746,13	102,79
GEN SLV Long(max)	3	1.077,73	1.113,41	1.149,10	1.184,78	1.642,96	1.678,65	1.714,33	1.750,01	99,38	
GEN SLV Long(max)	4	1.069,97	1.105,65	1.141,33	1.177,02	1.635,20	1.670,88	1.706,57	1.742,25	99,38	
GEN SLV Trasv(max)	1	1.110,32	1.232,80	1.355,28	1.477,76	1.335,38	1.457,85	1.580,33	1.702,81	104,12	
GEN SLV Trasv(max)	2	1.102,56	1.225,04	1.347,52	1.470,00	1.327,61	1.450,09	1.572,57	1.695,05	104,12	
GEN SLV Trasv(max)	3	1.116,79	1.239,27	1.361,75	1.484,23	1.328,91	1.451,39	1.573,87	1.696,34	99,57	
GEN SLV Trasv(max)	4	1.109,03	1.231,51	1.353,99	1.476,47	1.321,15	1.443,62	1.566,10	1.688,58	99,57	
GEN SLV Vert(max)	1	1.251,32	1.290,21	1.329,11	1.368,00	1.485,87	1.524,77	1.563,66	1.602,55	51,32	
GEN SLV Vert(max)	2	1.255,20	1.291,51	1.327,81	1.364,12	1.489,75	1.526,06	1.562,37	1.598,67	44,00	
GEN SLV Vert(max)	3	1.257,79	1.296,68	1.333,58	1.374,47	1.479,41	1.518,30	1.557,19	1.596,09	39,85	
GEN SLV Vert(max)	4	1.261,67	1.297,98	1.334,28	1.370,59	1.483,29	1.519,59	1.555,90	1.592,20	29,83	
GEN SLV Long(min)	1	1.655,52	1.619,84	1.584,15	1.548,47	1.191,42	1.155,74	1.120,06	1.084,37	87,55	
GEN SLV Long(min)	2	1.647,76	1.612,08	1.576,39	1.540,71	1.183,66	1.147,98	1.112,30	1.076,61	87,55	
GEN SLV Long(min)	3	1.659,40	1.621,13	1.582,86	1.544,59	1.195,30	1.157,03	1.118,76	1.080,49	91,40	
GEN SLV Long(min)	4	1.651,64	1.613,37	1.575,10	1.536,83	1.187,54	1.149,27	1.111,00	1.072,73	91,40	
GEN SLV Trasv(min)	1	1.616,46	1.493,98	1.371,50	1.249,02	1.505,48	1.383,00	1.260,52	1.138,04	97,61	
GEN SLV Trasv(min)	2	1.608,70	1.486,22	1.363,74	1.241,26	1.497,72	1.375,24	1.252,76	1.130,28	97,61	
GEN SLV Trasv(min)	3	1.622,93	1.500,45	1.377,97	1.255,49	1.499,01	1.376,53	1.254,05	1.131,57	100,42	
GEN SLV Trasv(min)	4	1.615,17	1.492,69	1.370,21	1.247,73	1.491,25	1.368,77	1.246,29	1.123,81	100,42	
GEN SLV Vert(min)	1	1.463,82	1.427,51	1.391,21	1.354,90	1.343,34	1.307,03	1.270,73	1.234,42	20,29	
GEN SLV Vert(min)	2	1.467,70	1.428,81	1.389,91	1.351,02	1.347,22	1.308,33	1.269,43	1.230,54	33,32	
GEN SLV Vert(min)	3	1.470,29	1.433,98	1.397,67	1.361,37	1.336,87	1.300,56	1.264,26	1.227,95	32,96	
GEN SLV Vert(min)	4	1.474,17	1.435,27	1.396,38	1.357,49	1.340,75	1.301,86	1.262,96	1.224,07	42,24	

Nella tabella successiva sono riepilogati i valori massimi dell'azione normale (compressione e trazione), del momento flettente e dell'azione tagliante agenti sui pali di fondazione:

COMBINAZIONE	N <sub>Sd,MAX</sub> [kN]	N <sub>Sd,MIN</sub> [kN]	V <sub>Sd,max</sub> [kN]
SLE - QUASI PERMANENTE	1.763,35	1.690,90	8,58
SLE - FREQUENTE	2.138,84	1.541,19	12,28
SLE - RARA	2.496,30	1.274,16	40,00
SLU - STR	3.450,61	1.786,66	59,08
SLV	1.753,89	1.066,09	104,12

## 8.2 AZIONI SOLLECITANTI SUL SINGOLO PALO CONNESSE ALLA DEFORMABILITÀ ORIZZONTALE DEL TERRENO

Per effetto del taglio e della deformabilità del terreno nell'intorno del palo si generano le azioni sollecitanti definite nel seguito.

### 8.2.1 VALUTAZIONE DELLA COSTANTE DI REAZIONE ORIZZONTALE DEL TERRENO

Per terreni **prevalentemente incoerenti** si considera la costante di reazione orizzontale del terreno variabile con la profondità, secondo la seguente relazione lineare:

$$k_h = n_h \cdot \frac{z}{d}$$

dove:

- $n_h$  → costante dipendente dalla litologia
- $z$  → profondità
- $d$  → diametro del palo

Il valore della costante  $n_h$  viene determinato mediante la seguente relazione (Viggiani 1999 – [14.25]):

$$n_h = \frac{A \cdot \gamma}{1,35}$$

Il coefficiente  $A$  per terreni incoerenti è determinato secondo la seguente tabella (Viggiani 1999 – Tab. 14.5), in relazione allo stato di addensamento del terreno:

Stato di addensamento	Sciolto	Medio	Denso
Campo dei valori di $A$	100 ÷ 300	300 ÷ 1000	1000 ÷ 3000
Valore consigliato di $A$	200	600	1500
$N_h$ [N/cm <sup>3</sup> ], sabbie non immerse	2,5	7,5	20
$N_h$ [N/cm <sup>3</sup> ], sabbie immerse	1,5	5	12

Lo stato di addensamento del terreno è valutato come segue in relazione alla densità relativa del terreno stesso:

$D_r$ (%)	stato di addensamento
0 – 15	molto sciolto
15 – 35	sciolto
35 – 65	medio
65 – 85	denso
85 – 100	molto denso

Essendo stata posta la falda di progetto a **-1,00 m** dal piano di campagna, il terreno al di sopra di tale quota è considerato “secco – umido”, mentre il terreno al di sotto è considerato “satturo”.  
 Il valore di  $k_h$  finale è stato determinato come media ponderata dei valori di  $k_h$  valutati per ciascuno strato della stratigrafia considerata:

STRATO	UNITA' LITOTECNICA	QUOTA INIZIALE [m]	QUOTA FINALE [m]	QUOTA INIZIALE (riferita alla testa palo) [m]	QUOTA FINALE (riferita alla testa palo) [m]	$H_{strato}$ [m]	STATO DI ADDENSAMENTO	A	Y [kN/m <sup>2</sup> ]	$n_v$ [N/cm <sup>2</sup> ]	d [m]	$k_h$ QUOTA INIZIALE	$k_h$ QUOTA FINALE	$k_{h,media}$ STRATO
2	G3	0,00	-4,00	0,00	-4,00	4,00	MEDIO	600,00	8,50	3,778	1,20	0,00	12,59	6,30
3	S1/S2	-4,00	-21,00	-4,00	-21,00	17,00	MEDIO	600,00	9,00	4,000	1,20	13,33	70,00	41,67
						21,00							47,96	

$$k_h = 47,96 / 21,00 = 2,28 \text{ N/cm}^3$$

**Le azioni sollecitanti sui pali sono valutate nel caso di “palo impedito di ruotare in testa soggetto a forze orizzontali”.**

Per la valutazione delle azioni sollecitanti sul palo di fondazione per effetto dell'azione tagliante in testa e della deformabilità è stato utilizzato il metodo di Matlock & Reese con  $k_h$  variabile con la profondità.

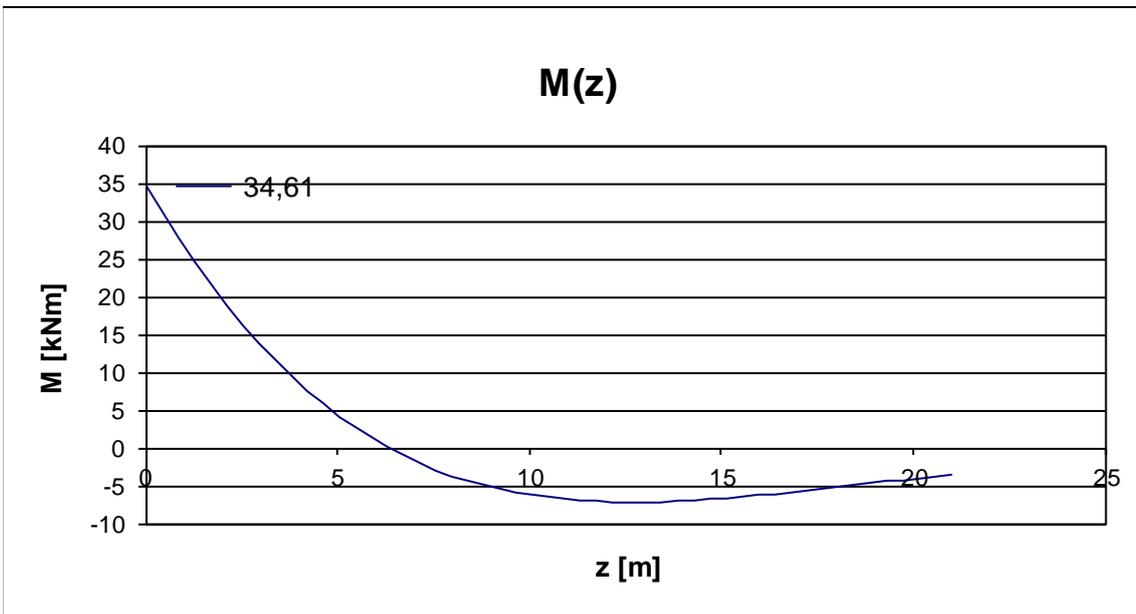
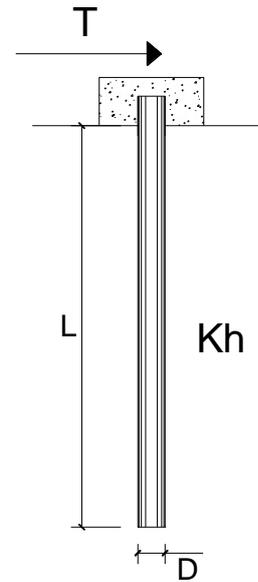
### 8.2.2 COMBINAZIONE SLE – QUASI PERMANENTE

#### PALI IMPEDITI DI RUOTARE IN TESTA SOGGETTI A FORZE ORIZZONTALI

**OPERA:**

**DATI DI INPUT:**

Diametro del palo (D):	1,2	(m)
Lunghezza del palo (L)	21	(m)
Coefficiente di reazione laterale ( $k_h$ ):	2,28	(N/cm <sup>3</sup> )
Forza orizzontale agente (T):	8,58	(kN)
fck del calcestruzzo:	24,9	(MPa)
fcm del calcestruzzo:	32,9	(MPa)
Ecls ( $E = 22000(f_{cm}/10)^{0.3}$ ):	31447	(MPa)
J ( $J = \pi \cdot D^4/64$ ):	10178760	(cm <sup>4</sup> )
$\lambda$ (lunghezza elastica $\lambda = (4 \cdot EJ/k_h \cdot D)^{1/4}$ ):	827,09	(cm)



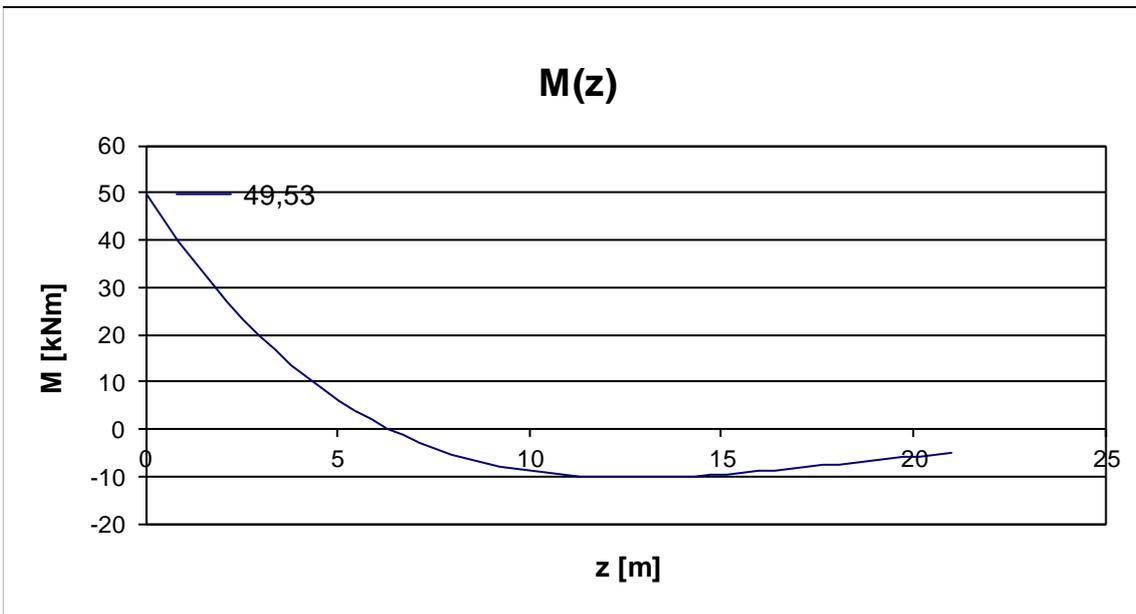
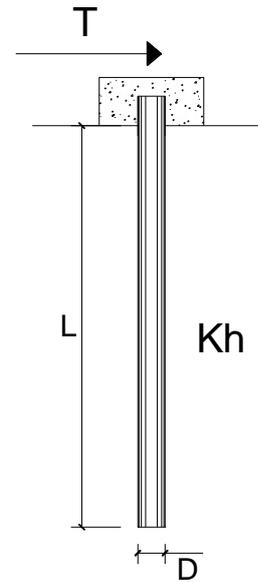
### 8.2.3 COMBINAZIONE SLE – FREQUENTE

#### PALI IMPEDITI DI RUOTARE IN TESTA SOGGETTI A FORZE ORIZZONTALI

**OPERA:**

**DATI DI INPUT:**

Diametro del palo (D):	1,2	(m)
Lunghezza del palo (L)	21	(m)
Coefficiente di reazione laterale ( $k_h$ ):	2,28	(N/cm <sup>3</sup> )
Forza orizzontale agente (T):	12,28	(kN)
fck del calcestruzzo:	24,9	(MPa)
fcm del calcestruzzo:	32,9	(MPa)
Ecls ( $E = 22000(fcm/10)^{0.3}$ ):	31447	(MPa)
J ( $J = \pi \cdot D^4 / 64$ ):	10178760	(cm <sup>4</sup> )
$\lambda$ (lunghezza elastica $\lambda = (4 \cdot EJ / k_h \cdot D)^{1/4}$ ):	827,09	(cm)



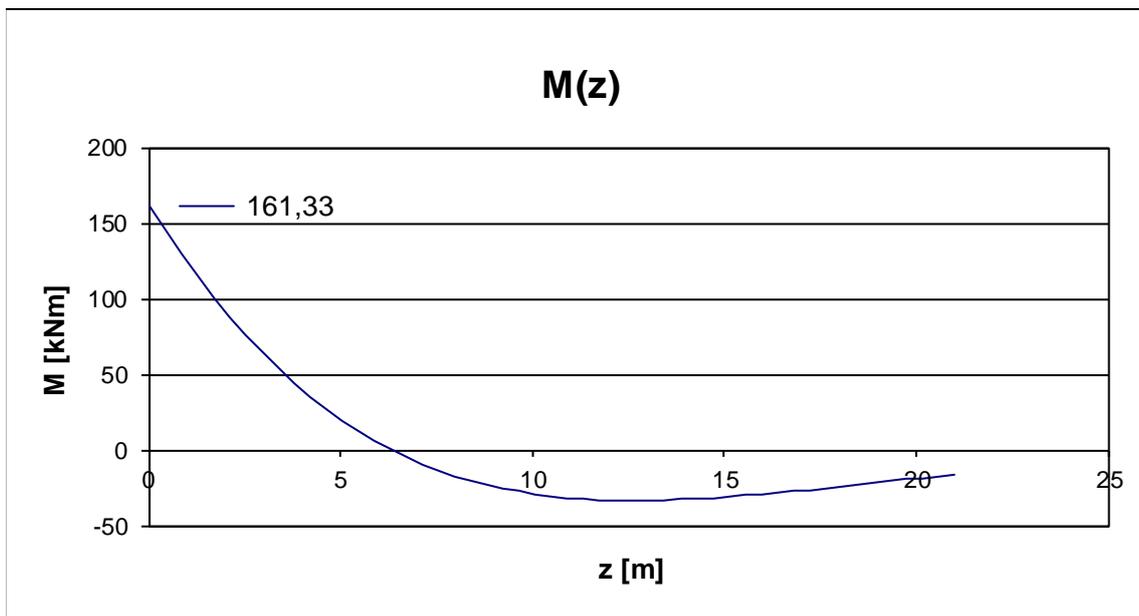
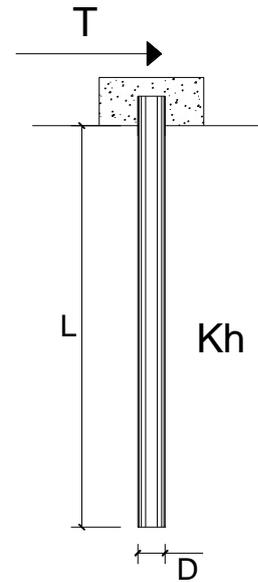
### 8.2.4 COMBINAZIONE SLE – RARA

#### PALI IMPEDITI DI RUOTARE IN TESTA SOGGETTI A FORZE ORIZZONTALI

**OPERA:**

**DATI DI INPUT:**

Diametro del palo (D):	1,2	(m)
Lunghezza del palo (L)	21	(m)
Coefficiente di reazione laterale ( $k_h$ ):	2,28	(N/cm <sup>3</sup> )
Forza orizzontale agente (T):	40	(kN)
fck del calcestruzzo:	24,9	(MPa)
fcm del calcestruzzo:	32,9	(MPa)
Ecls ( $E = 22000(f_{cm}/10)^{0.3}$ ):	31447	(MPa)
J ( $J = \pi \cdot D^4/64$ ):	10178760	(cm <sup>4</sup> )
$\lambda$ (lunghezza elastica $\lambda = (4 \cdot EJ/k_h \cdot D)^{1/4}$ ):	827,09	(cm)



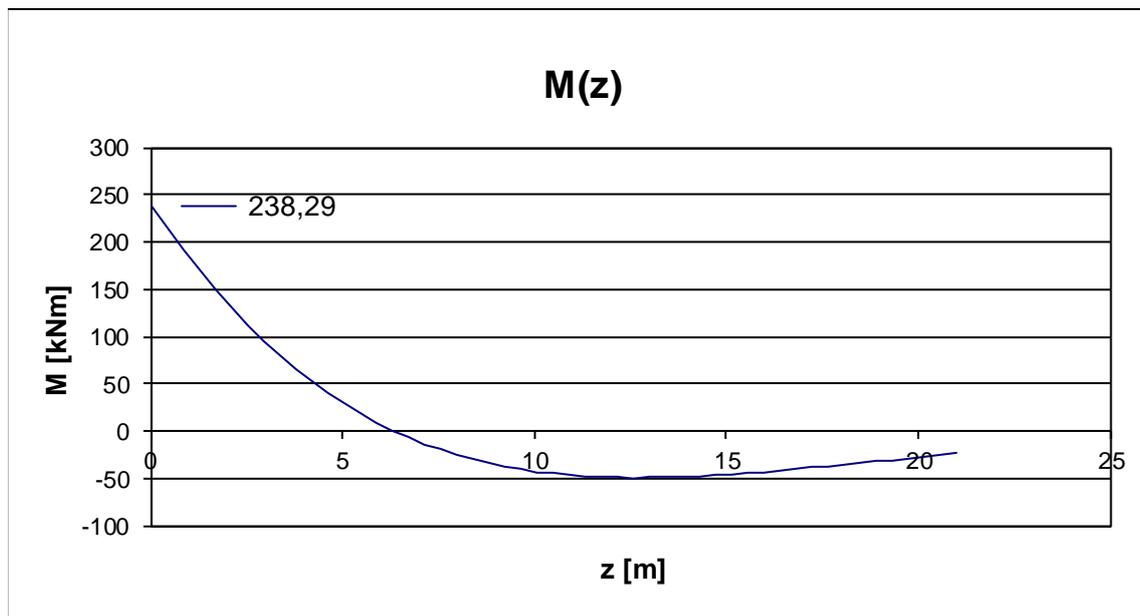
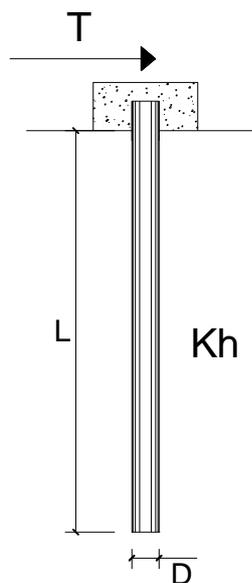
### 8.2.5 COMBINAZIONE SLU – STR

#### PALI IMPEDITI DI RUOTARE IN TESTA SOGGETTI A FORZE ORIZZONTALI

**OPERA:**

**DATI DI INPUT:**

Diametro del palo (D):	1,2	(m)
Lunghezza del palo (L)	21	(m)
Coefficiente di reazione laterale ( $k_h$ ):	2,28	(N/cm <sup>3</sup> )
Forza orizzontale agente (T):	59,08	(kN)
fck del calcestruzzo:	24,9	(MPa)
fcm del calcestruzzo:	32,9	(MPa)
Ecls ( $E = 22000(f_{cm}/10)^{0.3}$ ):	31447	(MPa)
J ( $J = \pi \cdot D^4/64$ ):	10178760	(cm <sup>4</sup> )
$\lambda$ (lunghezza elastica $\lambda = (4 \cdot EJ/k_h \cdot D)^{1/4}$ ):	827,09	(cm)



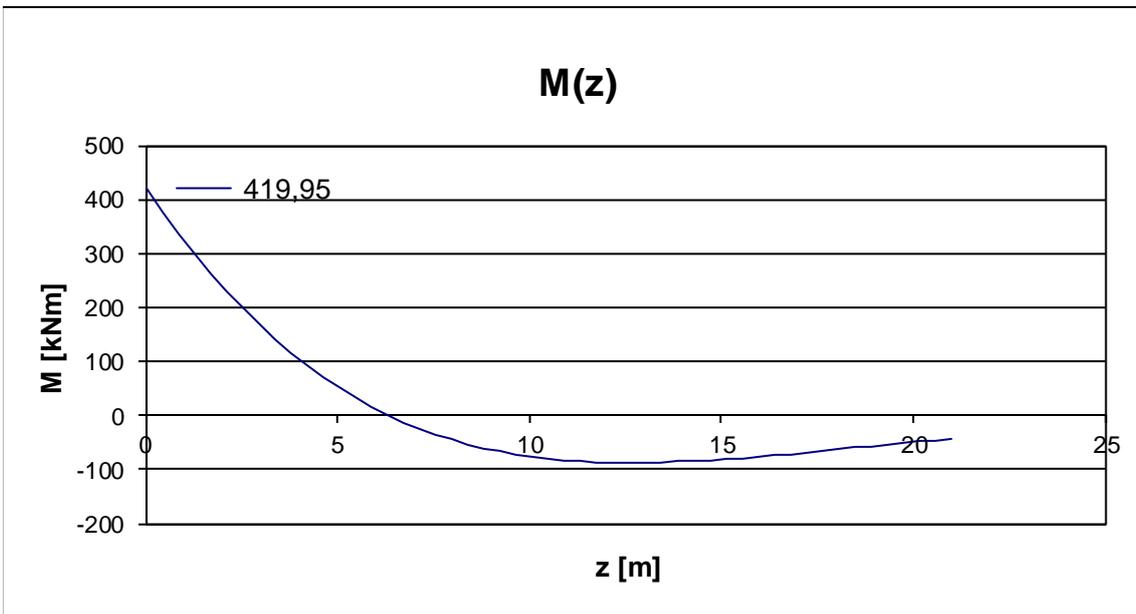
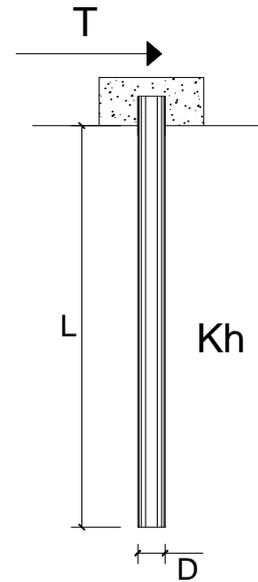
### 8.2.6 COMBINAZIONE SLV

#### PALI IMPEDITI DI RUOTARE IN TESTA SOGGETTI A FORZE ORIZZONTALI

**OPERA:**

**DATI DI INPUT:**

Diametro del palo (D):	1,2	(m)
Lunghezza del palo (L)	21	(m)
Coefficiente di reazione laterale ( $k_h$ ):	2,28	(N/cm <sup>3</sup> )
Forza orizzontale agente (T):	104,12	(kN)
fck del calcestruzzo:	24,9	(MPa)
fcm del calcestruzzo:	32,9	(MPa)
Ecls ( $E = 22000(f_{cm}/10)^{0.3}$ ):	31447	(MPa)
J ( $J = \pi \cdot D^4/64$ ):	10178760	(cm <sup>4</sup> )
$\lambda$ (lunghezza elastica $\lambda = (4 \cdot EJ/k_h \cdot D)^{1/4}$ ):	827,09	(cm)



## 9 PALI DI FONDAZIONE DELLE PILE – VERIFICHE STRUTTURALI

### 9.1 SEZIONE ED ARMATURA DI VERIFICA

La sezione di verifica è circolare con diametro pari a 120 cm.

L'armatura verticale (armatura di forza) è prevista come segue:

- 16Ø24 disposti a raggiera

L'armatura a taglio è costituita da una spirale Ø12/20.

Il copriferro netto minimo è assunto pari a 60 mm.

A favore di sicurezza nelle verifiche non sarà tenuto conto del peso del palo.

### 9.2 VERIFICA ALLO STATO LIMITE DI LIMITAZIONE DELLE TENSIONI

#### 9.2.1 COMBINAZIONE QUASI PERMANENTE – AZIONE NORMALE MASSIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 1.763,35$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = 34,61$  kNm.

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo :

Sezione circolare cava

Raggio esterno 60 [cm]

Raggio interno 0 [cm]

N° barre uguali 16

Diametro barre 2,4 [cm]

Copriferro (baric.) 8,4 [cm]

N° barre 0 Zoom

Tipo Sezione

Rettan.re  Trapezi

a T  Circolare

Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni

S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 1763,35 kN

M<sub>Ed</sub> 0 34,61 kNm

M<sub>yEd</sub> 0

P.to applicazione N

Centro  Baricentro cls

Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo

S.L.U.+  S.L.U.-

Metodo n

Materiali

B450C C25/30

ε<sub>su</sub> 67,5 ‰ ε<sub>c2</sub> 2 ‰

f<sub>yd</sub> 391,3 N/mm<sup>2</sup> ε<sub>cu</sub> 3,5 ‰

E<sub>s</sub> 200.000 N/mm<sup>2</sup> f<sub>cd</sub> 14,17

E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0,8

ε<sub>syd</sub> 1,957 ‰ σ<sub>c,adm</sub> 9,75

σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm<sup>2</sup> τ<sub>co</sub> 0,6

τ<sub>c1</sub> 1,829

σ<sub>c</sub> -1,605 N/mm<sup>2</sup>

ε<sub>s</sub> -0,09536 ‰

Vertici: 52

Verifica

N° iterazioni: 0

Precompresso

Le tensioni sui materiali risultano pari a:

$$\sigma_c = 1,60 \text{ N/mm}^2 < 0,45 f_{ck} = 11,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = - \text{N/mm}^2 \text{ (sezione interamente compressa)}$$

La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 9.2.2 COMBINAZIONE QUASI PERMANENTE – AZIONE NORMALE MINIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{sd} = 1.690,90$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{sd} = 34,61$  kNm.

**Sezione circolare cava**

- Raggio esterno: 60 [cm]
- Raggio interno: 0 [cm]
- N° barre uguali: 16
- Diametro barre: 2,4 [cm]
- Copriferro (baric.): 8,4 [cm]

**Sollecitazioni**

S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub>: 1690,90 kN  
 M<sub>xEd</sub>: 34,61 kNm  
 M<sub>yEd</sub>: 0

**Materiali**

B450C C25/30

ε<sub>su</sub>: 67,5 ‰ ε<sub>c2</sub>: 2 ‰  
 f<sub>yd</sub>: 391,3 N/mm² ε<sub>cu</sub>: 3,5 ‰  
 E<sub>s</sub>: 200.000 N/mm² f<sub>cd</sub>: 14,17 ‰  
 E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub>: 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub>: 0,8  
 ε<sub>syd</sub>: 1,957 ‰ σ<sub>c,adm</sub>: 9,75 ‰  
 σ<sub>s,adm</sub>: 255 N/mm² τ<sub>co</sub>: 0,6  
 τ<sub>c1</sub>: 1,829

σ<sub>c</sub>: -1,547 N/mm²  
 ε<sub>s</sub>: -0,09097 ‰

Vertici: 52  
 Verifica  
 N° iterazioni: 0  
 Precompresso

Le tensioni sui materiali risultano pari a:

$$\sigma_c = 1,54 \text{ N/mm}^2 < 0,45 f_{ck} = 11,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = - \text{N/mm}^2 \text{ (sezione interamente compressa)}$$

La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 9.2.3 COMBINAZIONE FREQUENTE – AZIONE NORMALE MASSIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{sd} = 2.138,84$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{sd} = 49,53$  kNm.

The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. Key sections include:

- Sezione circolare cava:** Raggio esterno 60 [cm], Raggio interno 0 [cm], N° barre uguali 16, Diametro barre 2,4 [cm], Copriferro (baric.) 8,4 [cm].
- Sollecitazioni:** S.L.U. Metodo n.  $N_{Ed}$  2138,84 kN,  $M_{xEd}$  49,53 kNm,  $M_{yEd}$  0.
- Materiali:** B450C (E<sub>su</sub> 67,5‰, f<sub>yd</sub> 391,3 N/mm<sup>2</sup>, E<sub>s</sub> 200.000 N/mm<sup>2</sup>, E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15, ε<sub>syd</sub> 1,957‰, σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm<sup>2</sup>) and C25/30 (ε<sub>c2</sub> 2‰, ε<sub>cu</sub> 3,5‰, f<sub>cd</sub> 14,17, f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0,8, σ<sub>c,adm</sub> 9,75, τ<sub>co</sub> 0,6, τ<sub>c1</sub> 1,829).
- Calcolo:** Metodo di calcolo S.L.U. + Metodo n. Risultati: σ<sub>c</sub> -1,986 N/mm<sup>2</sup>, ε<sub>s</sub> -0,1131‰.
- Altri parametri:** Vertici: 52, N° iterazioni: 0, Precompresso checkbox.

Le tensioni sui materiali risultano pari a:

$$\sigma_c = 1,98 \text{ N/mm}^2 < 0,45 f_{ck} = 11,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = - \text{N/mm}^2 \text{ (sezione interamente compressa)}$$

La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 9.2.4 COMBINAZIONE FREQUENTE – AZIONE NORMALE MINIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 1.541,19$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = 49,53$  kNm.

The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. Key sections include:

- Sezione circolare cava:** Raggio esterno 60 [cm], Raggio interno 0 [cm], N° barre uguali 16, Diametro barre 2,4 [cm], Copriferro (baric.) 8,4 [cm].
- Sollecitazioni:** Metodo n,  $N_{Ed}$  1541,19 kN,  $M_{xEd}$  49,53 kNm,  $M_{yEd}$  0.
- Materiali:** B450C (E<sub>su</sub> 67,5 ‰, f<sub>yd</sub> 391,3 N/mm<sup>2</sup>, E<sub>s</sub> 200.000 N/mm<sup>2</sup>, E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15, ε<sub>syd</sub> 1,957 ‰, σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm<sup>2</sup>) and C25/30 (ε<sub>c2</sub> 2 ‰, ε<sub>cu</sub> 3,5 ‰, f<sub>cd</sub> 14,17 N/mm<sup>2</sup>, f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0,8, σ<sub>c,adm</sub> 9,75 N/mm<sup>2</sup>, τ<sub>co</sub> 0,6, τ<sub>c1</sub> 1,829).
- P.to applicazione N:** Centro, xN 0, yN 0.
- Metodo di calcolo:** S.L.U.+, S.L.U.-, Metodo n (selected).
- Verticali:** 52, N° iterazioni: 0.
- Precompresso:** checkbox (unchecked).

Le tensioni sui materiali risultano pari a:

$$\sigma_c = 1,50 \text{ N/mm}^2 < 0,45 f_{ck} = 11,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = - \text{N/mm}^2 \text{ (sezione interamente compressa)}$$

La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 9.2.5 COMBINAZIONE CARATTERISTICA – AZIONE NORMALE MASSIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 2.496,30$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = 161,33$  kNm.

The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. Key sections include:

- Sezione circolare cava:** Raggio esterno: 60 [cm], Raggio interno: 0 [cm], N° barre uguali: 16, Diametro barre: 2,4 [cm], Copriferro (baric.): 8,4 [cm].
- Sollecitazioni:** Metodo n,  $N_{Ed}$ : 2469,30 kN,  $M_{xEd}$ : 161,33 kNm,  $M_{yEd}$ : 0.
- Materiali:** B450C (concrete) and C25/30 (steel). Properties include  $\epsilon_{su}$ : 67,5 ‰,  $f_{yd}$ : 391,3 N/mm<sup>2</sup>,  $E_s$ : 200.000 N/mm<sup>2</sup>,  $\epsilon_{c2}$ : 2 ‰,  $\epsilon_{cu}$ : 3,5 ‰,  $f_{cd}$ : 14,17 N/mm<sup>2</sup>,  $E_s/E_c$ : 15,  $\epsilon_{syd}$ : 1,957 ‰,  $\sigma_{c,adm}$ : 255 N/mm<sup>2</sup>,  $\tau_{co}$ : 0,6,  $\tau_{c1}$ : 1,829.
- Calcolo:** Metodo di calcolo: Metodo n. Risultati:  $\sigma_c$ : -2,833 N/mm<sup>2</sup>,  $\epsilon_s$ : -0,0958 ‰.
- Altri parametri:** Vertici: 52, N° iterazioni: 0, Precompresso: .

Le tensioni sui materiali risultano pari a:

$$\sigma_c = 2,83 \text{ N/mm}^2 < 0,60 f_{ck} = 14,94 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = - \text{N/mm}^2 \text{ (sezione interamente compressa)}$$

La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 9.2.6 COMBINAZIONE CARATTERISTICA – AZIONE NORMALE MINIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 1.274,16$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = 161,33$  kNm.

The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. Key sections include:

- Sezione circolare cava:** Raggio esterno: 60 [cm], Raggio interno: 0 [cm], N° barre uguali: 16, Diametro barre: 2,4 [cm], Copriferro (baric.): 8,4 [cm].
- Sollecitazioni:** Metodo n,  $N_{Ed}$ : 1247,16 kN,  $M_{xEd}$ : 161,33 kNm,  $M_{yEd}$ : 0.
- Materiali:** B450C and C25/30. Properties include  $\epsilon_{su}$  (67,5 ‰),  $f_{yd}$  (391,3 N/mm²),  $E_s$  (200.000 N/mm²),  $\epsilon_{c2}$  (2 ‰),  $\epsilon_{cu}$  (3,5 ‰),  $f_{cd}$  (14,17),  $E_s/E_c$  (15),  $\epsilon_{syd}$  (1,957 ‰),  $\sigma_{c,adm}$  (255 N/mm²),  $\tau_{co}$  (0,6), and  $\tau_{c1}$  (1,829).
- Calcolo:** Metodo di calcolo: Metodo n. Risultati:  $\sigma_c = -1,845$  N/mm²,  $\epsilon_s = -0,02169$  ‰.
- Altri parametri:** Vertici: 52, N° iterazioni: 0, Precompresso: .

Le tensioni sui materiali risultano pari a:

$$\sigma_c = 1,84 \text{ N/mm}^2 < 0,60 f_{ck} = 14,94 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = - \text{N/mm}^2 \text{ (sezione interamente compressa)}$$

La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 9.3 VERIFICA ALLO STATO LIMITE DI FESSURAZIONE

Poiché le sezioni in esercizio risultano sempre interamente compresse, la verifica allo Stato Limite di Fessurazione risulta implicitamente soddisfatta.

### 9.4 VERIFICA ALLO STATO LIMITE ULTIMO PER PRESSOFLESSIONE

#### 9.4.1 CONDIZIONE STATICA – AZIONE NORMALE MASSIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{sd} = 3.450,61$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{sd} = 238,29$  kNm.

**Sezione circolare cava**

- Raggio esterno: 60 [cm]
- Raggio interno: 0 [cm]
- N° barre uguali: 16
- Diametro barre: 2,4 [cm]
- Copriferro (baric.): 8,4 [cm]

**Materiali**

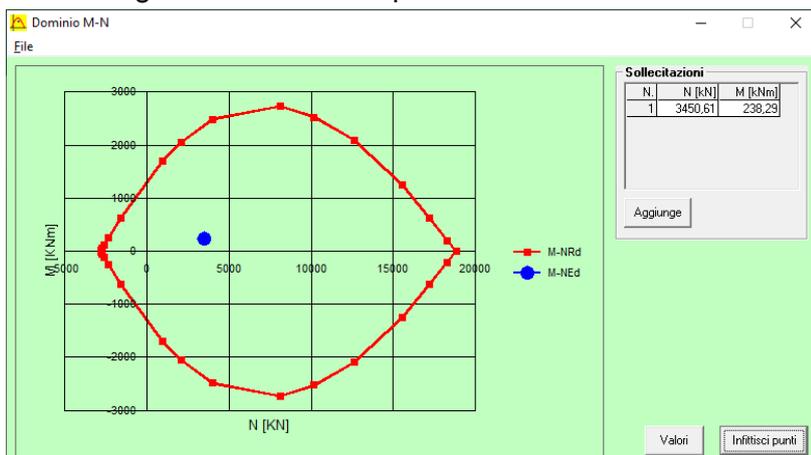
- B450C:  $\epsilon_{su} = 67,5$  ‰,  $f_{yd} = 391,3$  N/mm<sup>2</sup>,  $E_s = 200.000$  N/mm<sup>2</sup>,  $\epsilon_{s,adm} = 1,957$  ‰,  $\sigma_{s,adm} = 255$  N/mm<sup>2</sup>
- C25/30:  $\epsilon_{c2} = 2$  ‰,  $\epsilon_{cu} = 3,5$  ‰,  $f_{cd} = 14,17$  N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_{c,adm} = 9,75$  N/mm<sup>2</sup>,  $\tau_{co} = 0,6$ ,  $\tau_{c1} = 1,829$

**Calcoli**

- $M_{Rd} = 2.378$  kNm
- $\sigma_c = -14,17$  N/mm<sup>2</sup>
- $\epsilon_c = 3,5$  ‰
- $\epsilon_s = 5,327$  ‰
- $d = 111,6$  cm
- $x = 44,25$ ,  $x/d = 0,3965$ ,  $\delta = 0,9356$

Il momento resistente risulta pari a:  
 $M_{Rd} = 2.378,00$  kNm >  $M_{sd} = 238,29$  kNm

Nell'immagine successiva è riportato il dominio di resistenza della sezione:



La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 9.4.2 CONDIZIONE STATICA – AZIONE NORMALE MINIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 1.786,66$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = 238,29$  kNm.

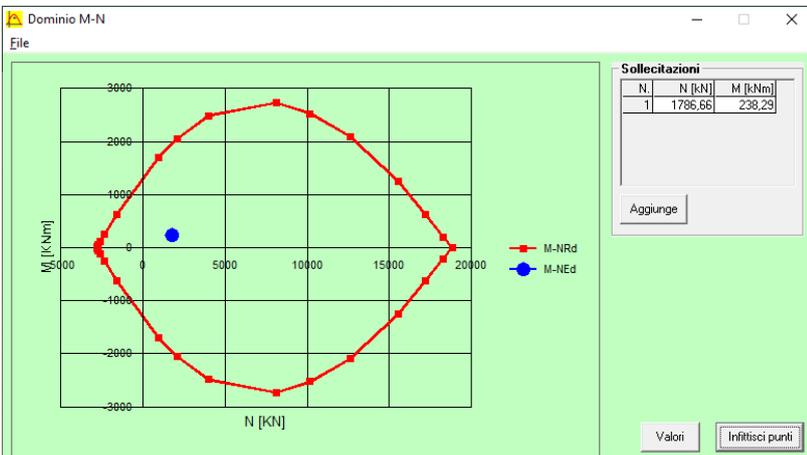
The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. Key parameters are as follows:

- Sezione circolare cava:** Raggio esterno 60 [cm], Raggio interno 0 [cm], N° barre uguali 16, Diametro barre 2,4 [cm], Copriferro (baric.) 8,4 [cm].
- Sollecitazioni:**  $N_{Ed} = 1786,66$  kN,  $M_{xEd} = 238,29$  kNm,  $M_{yEd} = 0$  kNm.
- Materiali:** B450C (E<sub>su</sub> 67,5 ‰, f<sub>yd</sub> 391,3 N/mm<sup>2</sup>, E<sub>s</sub> 200.000 N/mm<sup>2</sup>, E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15, ε<sub>syd</sub> 1,957 ‰, σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm<sup>2</sup>), C25/30 (ε<sub>c2</sub> 2 ‰, ε<sub>cu</sub> 3,5 ‰, f<sub>cd</sub> 14,17 N/mm<sup>2</sup>, f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0,8, σ<sub>c,adm</sub> 9,75 N/mm<sup>2</sup>, τ<sub>co</sub> 0,6, τ<sub>c1</sub> 1,829).
- Calcolo:** Metodo di calcolo S.L.U.+, Metodo n, Tipo flessione Retta.
- Geometria:** Vertici 52, N° rett. 100, L<sub>0</sub> 0 cm.
- Stato:** Tipo rottura Lato calcestruzzo - Acciaio snervato, σ<sub>c</sub> -14,17 N/mm<sup>2</sup>, ε<sub>c</sub> 3,5 ‰, ε<sub>s</sub> 8,026 ‰, d 111,6 cm, x 33,89, x/d 0,3037, δ 0,8196.

Il momento resistente risulta pari a:

$M_{Rd} = 1.964,00$  kNm >  $M_{Sd} = 238,29$  kNm

Nell'immagine successiva è riportato il dominio di resistenza della sezione:



La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 9.4.3 CONDIZIONE SISMICA – AZIONE NORMALE MASSIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 1.753,89$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = 419,95$  kNm.

**Sezione circolare cava**

- Raggio esterno: 60 [cm]
- Raggio interno: 0 [cm]
- N° barre uguali: 16
- Diametro barre: 2,4 [cm]
- Copriferro (baric.): 8,4 [cm]

**Sollecitazioni**

S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub>: 1753,89 kN  
 M<sub>xEd</sub>: 419,95 kNm  
 M<sub>yEd</sub>: 0 kNm

**Materiali**

B450C C25/30

ε<sub>su</sub>: 67,5 ‰ ε<sub>c2</sub>: 2 ‰  
 f<sub>yd</sub>: 391,3 N/mm<sup>2</sup> ε<sub>cu</sub>: 3,5 ‰  
 E<sub>s</sub>: 200.000 N/mm<sup>2</sup> f<sub>cd</sub>: 14,17 N/mm<sup>2</sup>  
 E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub>: 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub>: 0,8  
 ε<sub>syd</sub>: 1,957 ‰ σ<sub>c,adm</sub>: 9,75 N/mm<sup>2</sup>  
 σ<sub>s,adm</sub>: 255 N/mm<sup>2</sup> τ<sub>co</sub>: 0,6  
 τ<sub>c1</sub>: 1,829

**P.to applicazione N**

Centro Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN: 0 yN: 0

**Metodo di calcolo**

S.L.U.+ S.L.U.-  
 Metodo n

**Tipo flessione**

Retta Deviata

Vertici: 52 N° rett.: 100

Calcola MRd Dominio M-N

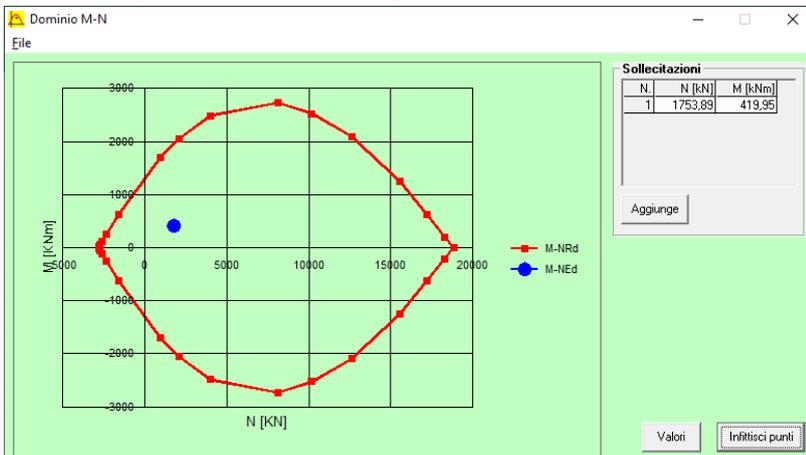
L<sub>0</sub>: 0 cm Col. modello

Precompresso

Il momento resistente risulta pari a:

$M_{Rd} = 1.954,00$  kNm >  $M_{Sd} = 419,95$  kNm

Nell'immagine successiva è riportato il dominio di resistenza della sezione:



La verifica risulta pertanto soddisfatta.

### 9.4.4 CONDIZIONE SISMICA – AZIONE NORMALE MINIMA

L'azione normale di calcolo è assunta pari a  $N_{Sd} = 1.066,09$  kN.

Il momento flettente di calcolo è assunto pari a  $M_{Sd} = 368,07$  kNm.

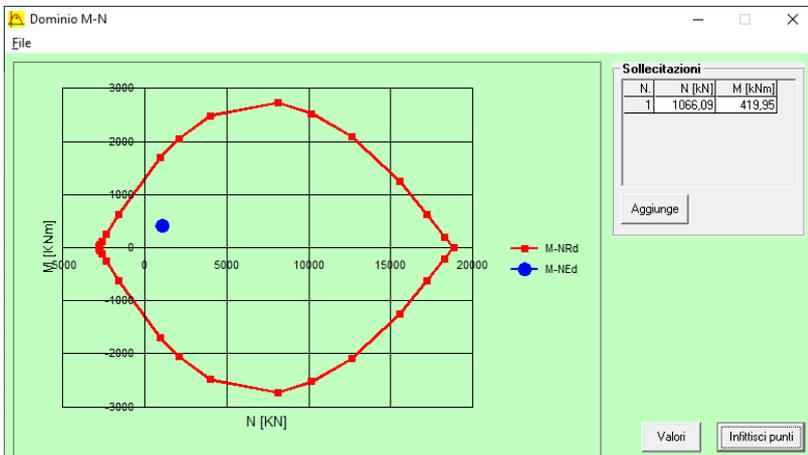
The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. The main window is titled 'Verifica C.A. S.L.U. - File'. The interface is divided into several panels:

- Sezione circolare cava:** Raggio esterno: 60 [cm], Raggio interno: 0 [cm], N° barre uguali: 16, Diametro barre: 2,4 [cm], Copriferro (baric.): 8,4 [cm].
- Sollecitazioni:** S.L.U. Metodo n. N<sub>Ed</sub>: 1066,09 kN, M<sub>xEd</sub>: 419,95 kNm, M<sub>yEd</sub>: 0.
- P.to applicazione N:** Centro (selected), Baricentro cls, Coord.[cm].
- Materiali:** B450C, C25/30. Properties include  $\epsilon_{su}$  (67,5 ‰),  $\epsilon_{c2}$  (2 ‰),  $f_{yd}$  (391,3 N/mm<sup>2</sup>),  $\epsilon_{cu}$  (3,5 ‰),  $E_s$  (200.000 N/mm<sup>2</sup>),  $f_{cd}$  (14,17),  $E_s/E_c$  (15),  $f_{cc}/f_{cd}$  (0,8),  $\epsilon_{syd}$  (1,957 ‰),  $\sigma_{c,adm}$  (9,75),  $\sigma_{s,adm}$  (255 N/mm<sup>2</sup>),  $\tau_{co}$  (0,6),  $\tau_{c1}$  (1,829).
- Metodo di calcolo:** S.L.U.+ (selected), S.L.U.-, Metodo n.
- Tipo flessione:** Retta (selected), Deviata.
- Vertici:** 52, N° rett.: 100.
- Calcola MRd:** Dominio M-N.
- L<sub>0</sub>:** 0 cm, Col. modello.
- Precompresso:**

Il momento resistente risulta pari a:

$M_{Rd} = 1.737,00$  kNm >  $M_{Sd} = 419,95$  kNm

Nell'immagine successiva è riportato il dominio di resistenza della sezione:



La verifica risulta pertanto soddisfatta.

## 9.5 VERIFICA ALLO STATO LIMITE ULTIMO PER TAGLIO

L'azione tagliante di calcolo è assunta pari a  $V_{Sd} = 104,12$  kN.

A favore di sicurezza non viene considerato il contributo dell'azione normale.

La verifica viene condotta su una sezione quadrata equivalente di lato pari a **106,35 cm** (equivalenza d'area).

### VERIFICA ALLO STATO LIMITE ULTIMO PER TAGLIO - ELEMENTI CON ARMATURE TRASVERSALI RESISTENTI AL TAGLIO

D.M. 17.01.2018 - CAPITOLO 4.1.2.3.5.2

#### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE

Base della sezione trasversale:	b	106,35	[cm]
Altezza della sezione trasversale:	h	106,35	[cm]
Copriferro netto:	c	6,00	[cm]
Altezza utile della sezione:	d	100,35	[cm]

#### CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Classe di resistenza del calcestruzzo:		C25/30	
Resistenza caratteristica cubica a compressione:	$R_{ck}$	30,00	[N/mm <sup>2</sup> ]
Resistenza caratteristica cilindrica a compressione:	$f_{ck}$	24,90	[N/mm <sup>2</sup> ]
Resistenza di calcolo a compressione:	$f_{cd}$	14,11	[N/mm <sup>2</sup> ]
Tipologia dell'acciaio da armatura:		B450C	
Tensione caratteristica di rottura:	$f_{ik}$	540,00	[N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione caratteristica di snervamento:	$f_{yk}$	450,00	[N/mm <sup>2</sup> ]
Resistenza di calcolo:	$f_{yd}$	391,30	[N/mm <sup>2</sup> ]

#### AZIONI SOLLECITANTI DI CALCOLO

Azione tagliante di calcolo:	$V_{S,d}$	104,12	[kN]
Azione normale di calcolo:	$N_{S,d}$	0,00	[kN]

#### ARMATURA TRASVERSALE

Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo:	$\theta$	45,00	[°]
Cotangente dell'angolo $\theta$ :	$\cot(\theta)$	1,00	
Inclinazione dell'armatura trasversale rispetto all'asse della trave:	$\alpha$	90,00	[°]
Numero di bracci dell'armatura trasversale:	n	2,00	
Passo longitudinale delle armature trasversali:	s	20,00	[cm]
Diametro dell'armatura trasversale:	$\varnothing_{trav}$	12,00	[mm]
Area della singola barra:	$A_{barra}$	1,13	[cm <sup>2</sup> ]
Area totale dell'armatura trasversale:	$A_{tot}$	11,30	[cm <sup>2</sup> /m]

#### VERIFICA ALLO S.L.U. PER TAGLIO

La resistenza di calcolo a "taglio trazione" viene valutata mediante la seguente relazione - D.M. 17.01.2018 [4.1.27]:

$$V_{Rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot [\cot(\alpha) + \cot(\theta)] \cdot \sin(\alpha)$$

La resistenza di calcolo a "taglio compressione" viene valutata mediante la seguente relazione - D.M. 17.01.2018 [4.1.28]:

$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}' \cdot \frac{[\cot(\alpha) + \cot(\theta)]}{[1 + \cot^2(\theta)]}$$

Larghezza minima della sezione:	$b_w$	106,35	[cm]
Resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo:	$f_{yd}$	7,06	[N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione media di compressione nella sezione:	$\sigma_{cp}$	0,00	[N/mm <sup>2</sup> ]
Coefficiente maggiorativo $\alpha_c$ :	$\alpha_c$	1,00	
RESISTENZA DI CALCOLO A "TAGLIO TRAZIONE"	$V_{Rsd}$	399,35	[kN]
RESISTENZA DI CALCOLO A "TAGLIO COMPRESSIONE"	$V_{Rcd}$	3388,16	[kN]
AZIONE TAGLIANTE RESISTENTE DELLA SEZIONE:	$V_{R,d}$	399,35	[kN]
COEFFICIENTE DI SICUREZZA:	$F_s = V_{R,d} / V_{S,d}$	3,84	

LA VERIFICA RISULTA POSITIVA.

## 10 PALI DI FONDAZIONE DELLE PILE – VERIFICHE GEOTECNICHE

### 10.1 FORMULAZIONI ADOTTATE PER LA VERIFICA DEL CARICO LIMITE ULTIMO

La stima della capacità portante per carico verticale di un palo isolato  $Q_{LIM}$  mediante formule statiche è ottenuta valutando i massimi mobilizzabili, in condizioni di equilibrio limite, della resistenza laterale  $Q_S$  e di quella di punta  $Q_P$ :

$$Q_{LIM} + W_P = Q_S + Q_P$$

essendo  $W_P$  il peso proprio del palo.

Si fanno le seguenti ipotesi:

- il carico limite del sistema palo – terreno è condizionato dalla resistenza del terreno e non da quella del palo;
- il palo è un corpo cilindrico rigido;
- i termini di capacità portante per attrito e/o aderenza laterale  $Q_S$  e di capacità portante di punta  $Q_P$  non si influenzano reciprocamente e possono essere determinati separatamente.

#### 10.1.1 PALO IN TERRENO COESIVO SATURO

##### Stima della capacità portante laterale $Q_S$

La capacità portante per aderenza e/o per attrito laterale  $Q_S$  per un palo di diametro  $D$  e lunghezza  $L$  è per definizione:

$$Q_S = \pi \cdot D \cdot \int_0^L \tau_s \cdot dz$$

Si assume che le tensioni tangenziali limite siano una quota parte della resistenza a taglio non drenata originaria del terreno indisturbato:

$$\tau_s = \alpha \cdot c_u$$

In cui  $\alpha$  è un 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 e dal cedimento del palo.

Per la valutazione del coefficiente  $\alpha$  per i pali trivellati si assume la seguente formulazione con  $c_u$  espresso in [kPa] (Viggiani, 1999):

- $c_u < 25 \rightarrow \alpha = 0,70$
- $25 < c_u < 70 \rightarrow \alpha = 0,70 - 0,08 \cdot (c_u - 25)$
- $70 < c_u \rightarrow \alpha = 0,35$

##### Stima della capacità portante di punta $Q_P$

Per la stima della capacità portante di punta  $Q_P$  si esegue un'analisi in condizioni non drenate, in termini di tensioni totali. L'equazione di riferimento è formalmente identica a quella della capacità portante di fondazioni superficiali su terreno coesivo in condizioni non drenate:

$$Q_P = A_P \cdot q_P = A_P \cdot (c_u \cdot N_c + \sigma_{v0,P})$$

in cui:

- $A_P$  è l'area di base del palo;
- $q_P$  è la capacità portante unitaria;
- $c_u$  è la resistenza al taglio in condizioni non drenate del terreno alla profondità della base del palo;
- $\sigma_{v0,P}$  è la tensione verticale totale alla punta;
- $N_c$  è il fattore di capacità portante, il cui valore è assunto pari a **9,00**.

### 10.1.2 PALO IN TERRENO INCOERENTE

Nel caso di pali in terreni incoerenti, e quindi a elevata permeabilità, l'analisi è svolta sempre con riferimento alle condizioni drenate e quindi in termini di tensioni efficaci.

#### Stima della capacità portante laterale $Q_s$

La capacità portante per aderenza e/o per attrito laterale per un palo di diametro  $D$  e lunghezza  $L$  è per definizione:

$$Q_s = \pi \cdot D \cdot \int_0^L \tau_s \cdot dz$$

Si assume che le sovrappressioni interstiziali che si generano durante la messa in opera del palo si siano dissipate al momento di applicazione del carico e che pertanto la tensione tangenziale limite possa essere valutata, con riferimento alle tensioni efficaci, nel modo seguente:

$$\tau_s = \sigma'_h \cdot \tan \delta = K \cdot \sigma'_{v0} \cdot \tan \delta$$

in cui:

- $\sigma'_h$  è la tensione efficace orizzontale nel terreno a contatto con il palo;
- $\sigma'_{v0}$  è la tensione efficace verticale iniziale prima della messa in opera del palo;
- $K$  è un coefficiente di spinta, rapporto fra  $\sigma'_h$  e  $\sigma'_{v0} \rightarrow K = 1 - \text{sen}(\varphi')$
- $\tan \delta$  è il coefficiente di attrito palo – terreno  $\rightarrow \mu = \tan \delta = \tan(\varphi')$

#### Stima della capacità portante di punta $Q_P$

Per la stima della capacità portante di punta  $Q_P$  dei pali in terreni incoerenti è stimata con l'equazione:

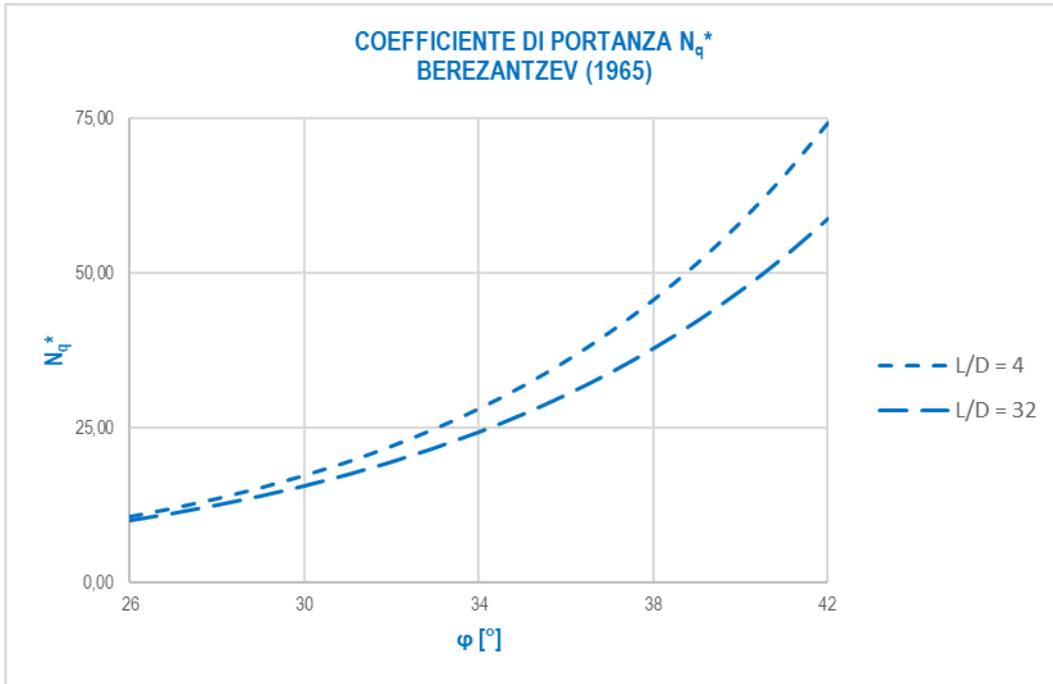
$$Q_P = A_P \cdot q_P = A_P \cdot \sigma'_{v0,P} \cdot N_q$$

in cui:

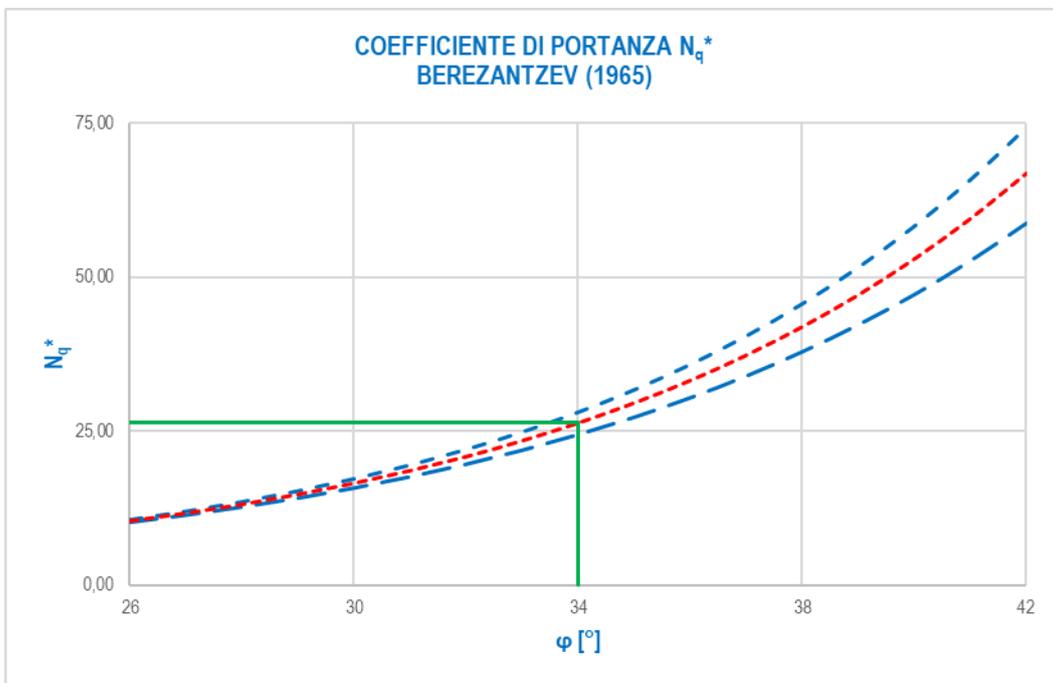
- $A_P$  è l'area di base del palo;
- $q_P$  è la capacità portante unitaria;
- $\sigma'_{v0,P}$  è la tensione verticale efficace alla punta;
- $N_q$  è il fattore di capacità portante.

## 10.2 VALUTAZIONE DEL COEFFICIENTE DI CAPACITÀ PORTANTE ALLA PUNTA $N_q$

Il fattore di capacità portante  $N_q$  è definito mediante il metodo di Berezantzev “ridotto” (1965), in funzione al valore dell’angolo di attrito del terreno in corrispondenza della base del palo e del rapporto tra lunghezza del palo  $L$  e diametro del palo  $D$ . Il valore di  $N_q^*$  è estrapolabile dal seguente abaco (per valori intermedi si procede mediante interpolazione lineare):



Considerato un terreno alla base con angolo di attrito pari a  $34,0^\circ$  e un rapporto  $L/D = 21,00/1,20 = 17,50$ , è stato determinato un valore del coefficiente di portanza alla punta pari a  $N_q^* = 25,80$ .



Considerato l’utilizzo del metodo di Berezantzev “ridotto” per i pali di grande diametro (cautelativo), non è stata presa in considerazione la correlazione di Kishida per i pali trivellati.

### 10.3 VERIFICHE DI PORTANZA VERTICALE (CARICO LIMITE ULTIMO) E LATERALE DEL PALO

Le verifiche geotecniche di carico limite ultimo e portanza laterale sono state condotte mediante il software CARL 12.0 (Aztec Informatica).

Considerato il piano di posa della zattera di fondazione posto a quota **-1,50 m** dal piano di campagna (pari allo spessore della zattera), si considera una pressione iniziale in corrispondenza di tale piano (testa palo) pari al peso del terreno originario rimosso:

$$p = 18,50 \times 1,50 = 27,75 \text{ kN/m}^2 = 0,2775 \text{ kg/cm}^2$$

Le verifiche sono state condotte per le combinazioni allo Stato Limite Ultimo statiche e sismiche maggiormente gravose, considerando i seguenti carichi:

COMBINAZIONE	N <sub>Sd</sub> [kN]	V <sub>Sd</sub> [kN]
SLU - STR	3.450,61	59,08
SLV	1.753,89	104,12

Il peso proprio del palo è tenuto in conto in maniera automatica dal software di calcolo.

#### Richiami teorici

##### Determinazione della capacità portante

Il carico verticale che grava sul palo va confrontato con il valore di calcolo della resistenza verticale del palo stesso. Il problema che si pone, quindi, è quello di determinare la capacità portante del palo. Determinata la capacità portante, la resistenza di calcolo verticale del palo si ottiene applicando degli opportuni coefficienti di sicurezza.

La capacità portante di un palo viene valutata come somma di due contributi: portanza di base (o di punta) e portanza per attrito laterale lungo il fusto. Cioè si assume valida l'espressione:

$$Q_T = Q_P + Q_L - W_P$$

dove:

- Q<sub>T</sub> Portanza totale del palo;
- Q<sub>P</sub> Portanza di base del palo;
- Q<sub>L</sub> Portanza per attrito laterale del palo;
- W<sub>P</sub> Peso proprio del palo.

Le due componenti Q<sub>P</sub> e Q<sub>L</sub> sono calcolate in modo indipendente fra loro. Risulta molto difficoltoso, tranne che in poche situazioni, stabilire quanta parte del carico viene assorbita per attrito laterale e quanta per resistenza alla base.

Nel caso di pali soggetti a trazione la resistenza allo sfilamento vale:

$$Q_T = Q_L + W_P$$

Dalla capacità portante del palo si ricava il carico ammissibile del palo Q<sub>A</sub> applicando degli opportuni coefficienti di sicurezza rispettivamente γ<sub>b</sub> e γ<sub>s</sub>.

I coefficienti γ<sub>b</sub> e γ<sub>s</sub> rappresentano rispettivamente i valori del coefficiente di sicurezza per la portanza di punta e quello per la portanza laterale.

Quindi nel caso di pali compressi abbiamo la seguente relazione:

$$Q_A = Q_P/\gamma_b + Q_L/\gamma_s - W_P$$

Nel caso invece di pali soggetti a sforzi di trazione abbiamo la seguente relazione:

$$Q_A = Q_L/\gamma_s + W_P$$

##### *Capacità portante di punta*

In generale la capacità portante di punta viene calcolata tramite l'espressione:

$$Q_P = A_P (c N_c + q_b N_q)$$

dove A<sub>P</sub> è l'area portante efficace della punta del palo, c è la coesione, q<sub>b</sub> è la pressione del terreno alla quota della punta del palo ed i coefficienti N<sub>c</sub> e N<sub>q</sub> sono i coefficienti delle formule della capacità portante corretti per tener conto degli effetti di profondità. N<sub>c</sub> ed N<sub>q</sub> dipendono sia dalla geometria del palo che dalle caratteristiche del terreno angolo di attrito e coesione (φ e c).

### Capacità portante per attrito laterale

La portanza laterale è data dall'integrale esteso a tutta la superficie laterale del palo delle tensioni tangenziali palo-terreno in condizioni limiti:

$$Q_L = \text{Int}(\tau_a) dS$$

dove  $\tau_a$  è dato dalla nota relazione di Coulomb:

$$\tau_a = c_a + \sigma_h \text{tg } \delta$$

dove  $c_a$  è l'adesione palo-terreno,  $\delta$  è l'angolo di attrito palo-terreno, e  $\sigma_h$  è la tensione orizzontale alla generica profondità  $z$ . La tensione orizzontale  $\sigma_h$  è legata alla pressione verticale  $\sigma_v$  tramite il coefficiente di spinta  $K_s$

$$\sigma_h = K_s \sigma_v$$

Indicando con  $C$  il perimetro e con  $L$  la lunghezza del palo abbiamo:

$$\text{Int}^L (C(c_a + K_s \sigma_v \text{tg } \delta) dz)$$

### Analisi del palo soggetto a forze orizzontali (Portanza trasversale)

La resistenza limite laterale di un palo è determinata dal minimo valore fra il carico orizzontale necessario per produrre il collasso del terreno lungo il fusto del palo ed il carico orizzontale necessario per produrre la plasticizzazione del palo. Il primo meccanismo (plasticizzazione del terreno) si verifica nel caso di pali molto rigidi in terreni poco resistenti (meccanismo di palo corto) mentre il secondo meccanismo si verifica nel caso di pali aventi rigidezze non eccessive rispetto al terreno di infissione (meccanismo di palo lungo o intermedio). Nel modello di terreno alla Winkler il terreno viene schematizzato come una serie di molle elastiche indipendenti fra di loro. Le molle che schematizzano il terreno vengono caratterizzate tramite una costante di rigidezza elastica,  $K_h$ , espressa in Kg/cm<sup>2</sup>/cm che rappresenta la pressione (in Kg/cm<sup>2</sup>) che bisogna applicare per ottenere lo spostamento di 1 cm. La determinazione di questa costante può essere fatta o tramite prove di carico su piastra o mediante metodi analitici (convenzionali). La variazione della costante di Winkler con la profondità dipende dal tipo di terreno in cui il palo è immerso. Ad esempio nel caso di terreni coesivi in condizioni non drenate  $K_h$  assume un valore costante con la profondità mentre nel caso di terreni incoerenti la variazione di  $K_h$  è di tipo lineare (crescente con la profondità). In generale l'espressione di  $K_h$  assume una forma binomia del tipo:

$$K_h(z) = A + B z^n$$

Per l'analisi di pali caricati trasversalmente si utilizza il modello di Winkler. Il palo viene suddiviso in un determinato numero (100) di elementi tipo trave aventi area ed inerzia pari a quella della sezione trasversale del palo. In corrispondenza di ogni nodo di separazione fra i vari elementi viene inserita una molla orizzontale di opportuna rigidezza che schematizza il terreno. Il comportamento delle molle che schematizzano il terreno non è infinitamente elastico ma è di tipo elastoplastico. La singola molla reagisce fino ad un valore limite di spostamento o di reazione; una volta che è stato superato tale limite la molle non offre ulteriori incrementi di resistenza (diagramma tipo elastoplastico perfetto). Indicando con  $d_{ye}$  la lunghezza del tratto di influenza della molla, con  $D$  il diametro del palo la molla avrà una rigidezza pari a:

$$K_m = d_{ye} D K_k$$

La resistenza limite del terreno rappresenta il valore limite di resistenza che il terreno può esplicare quando il palo è soggetto ad un carico orizzontale. La resistenza limite  $p_u = p_u(z)$  dipende dalle caratteristiche del terreno e dalla geometria del palo. In terreni puramente coesivi ( $c=c_u$ ,  $\phi=0$ ) la resistenza cresce dal valore 0 in sommità fino ad un valore limite in corrispondenza di una profondità pari a circa 3 diametri. Il valore limite in tal caso è variabile fra 8 e 12  $c_u$ . Nel caso di terreni dotati di attrito e coesione la resistenza limite ad una generica profondità  $z$  è rappresentata dalla relazione (Brinch Hansen):

$$P_u = q K_{pq} + c K_{pc}$$

dove:

$D$  diametro del palo

$q$  pressione geostatica alla profondità  $z$

$c$  coesione alla profondità  $z$

$K_{pq}$ ,  $K_{pc}$  coefficienti funzione dell'angolo di attrito del terreno  $\phi$  e del rapporto  $z/D$ .

Broms ha eseguito l'analisi considerando il caso sia di palo vincolato in testa che di palo libero immerso in un mezzo omogeneo. Nel caso di terreni coesivi Broms assume in questo caso un diagramma di resistenza nullo fino ad una profondità pari a  $1,5D$  e poi valore costante pari a  $9c_u D$ .

Nel caso di terreni incoerenti Broms assume che la resistenza laterale sia variabile con la profondità dal valore 0 (in testa) fino al valore  $3\sigma_v K_p D$  (alla base) essendo  $K_p$  il coefficiente di resistenza passiva espresso da  $K_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2)$ .

## Dati

### Geometria della fondazione

#### Simbologia adottata

<i>Descr</i>	Descrizione del palo
<i>Frm</i>	Forma del palo ((C)=Costante, (R)=Rastremato)
<i>X</i>	Ascissa del baricentro del palo espressa in [m]
<i>Y</i>	Ordinata del baricentro del palo espressa in [m]
<i>D</i>	Diametro del palo espresso in [cm]
<i>L</i>	Lunghezza del palo espressa in [m]

Descr	Frm	X	Y	D	L
		[m]	[m]	[m]	[m]
Palo 120	(C)	0,00	0,00	120,00	21,00

### Materiali palo

#### Calcestruzzo

Tipo	Rck 250	
Resistenza caratteristica a compressione $R_{ck}$	250,00	[kg/cm <sup>2</sup> ]
Peso specifico	2500,00	[kg/m <sup>3</sup> ]
Modulo elastico	306658,85	[kg/cm <sup>2</sup> ]
Coeff. di omogeneizzazione	15,00	

#### Acciaio

Tipo	B450C	
Tensione caratteristica di snervamento	4588,65	[kg/cm <sup>2</sup> ]

#### Coefficienti di sicurezza sui materiali

Coefficiente di sicurezza calcestruzzo	1.50
Fattore riduzione da resistenza cubica a cilindrica	0.83
Fattore di riduzione per carichi di lungo periodo	0.85
Coefficiente di sicurezza acciaio	1.15
Coefficiente di sicurezza sezione	1.00

### Caratteristiche pali

Pali in c.a.

Armatura con ferri longitudinali e staffe

Vincolo in testa di tipo CERNIERA

Tipo di palo TRIVELLATO

Contributo sia della portanza laterale sia della portanza di punta

### Descrizione terreni e falda

#### Simbologia adottata

<i>Descrizione</i>	Descrizione terreno
$\gamma$	Peso di volume del terreno espresso in [kg/m <sup>3</sup> ]
$\gamma_{sat}$	Peso di volume saturo del terreno espresso in [kg/m <sup>3</sup> ]
$\phi$	Angolo di attrito interno del terreno espresso in gradi
$\delta$	Angolo di attrito palo-terreno espresso in gradi
$c$	Coesione del terreno espressa in [kg/cm <sup>2</sup> ]
$ca$	Adesione del terreno espressa in [kg/cm <sup>2</sup> ]
$\phi_{min}, \phi_{med}$	Angolo di attrito interno del terreno minimo e medio espresso in gradi
$\delta_{min}, \delta_{med}$	Angolo di attrito palo-terreno minimo e medio espresso in gradi
$c_{min}, c_{med}$	Coesione del terreno minima e media espressa in [kg/cm <sup>2</sup> ]
$ca_{min}, ca_{med}$	Adesione del terreno minima e media espressa in [kg/cm <sup>2</sup> ]

### Parametri caratteristici

Descrizione	$\gamma$	$\gamma_{sat}$	$\phi$	$\delta$	$c$	$ca$
	[kg/mc]	[kg/mc]	[°]	[°]	[kg/cm <sup>q</sup> ]	[kg/cm <sup>q</sup> ]
G3	1850,0	1850,0	35,00	35,00	0,000	0,000
S1/S2	1900,0	1900,0	34,00	34,00	0,000	0,000

### Parametri minimi

Descrizione	$\phi_{min}$	$\delta_{min}$	$C_{min}$	$Ca_{min}$
	[°]	[°]	[kg/cm <sup>q</sup> ]	[kg/cm <sup>q</sup> ]
G3	34,99	34,99	0,000	0,000
S1/S2	33,99	33,99	0,000	0,000

### Parametri medi

Descrizione	$\phi_{med}$	$\delta_{med}$	$C_{med}$	$Ca_{med}$
	[°]	[°]	[kg/cm <sup>q</sup> ]	[kg/cm <sup>q</sup> ]
G3	35,00	35,00	0,000	0,000
S1/S2	34,00	34,00	0,000	0,000

### Falda

Profondità dal piano di posa 0,00 [m]

### Descrizione stratigrafia

#### Simbologia adottata

- N Identificativo strato
- Z1 Quota dello strato in corrispondenza del punto di sondaggio n°1 espressa in [m]
- Z2 Quota dello strato in corrispondenza del punto di sondaggio n°2 espressa in [m]
- Z3 Quota dello strato in corrispondenza del punto di sondaggio n°3 espressa in [m]
- Terreno Terreno dello strato
- Kw Costante di Winkler espressa in Kg/cm<sup>2</sup>/cm
- Ks Coefficiente di spinta
- $\alpha$  Coefficiente di espansione laterale

n°	Z1	Z2	Z3	Terreno	Kw	Ks	$\alpha$
	[m]	[m]	[m]		[kg/cm <sup>q</sup> /cm]		
1	-4,0	-4,0	-4,0	G3	0.63	0.43	1.00
2	-35,0	-35,0	-35,0	S1/S2	4.17	0.44	1.00

### Normativa

N.T.C. 2008 - Approccio 2

#### Simbologia adottata

- $\gamma_{Gsfav}$  Coefficiente parziale sfavorevole sulle azioni permanenti
- $\gamma_{Gfav}$  Coefficiente parziale favorevole sulle azioni permanenti
- $\gamma_{Qsfav}$  Coefficiente parziale sfavorevole sulle azioni variabili
- $\gamma_{Qfav}$  Coefficiente parziale favorevole sulle azioni variabili
- $\gamma'_{tan\phi}$  Coefficiente parziale di riduzione dell'angolo di attrito drenato
- $\gamma'_c$  Coefficiente parziale di riduzione della coesione drenata
- $\gamma'_{cu}$  Coefficiente parziale di riduzione della coesione non drenata
- $\gamma'_{qu}$  Coefficiente parziale di riduzione del carico ultimo
- $\gamma'_\gamma$  Coefficiente parziale di riduzione della resistenza a compressione uniassiale delle rocce

### Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni:

Carichi	Effetto		Statici		Sismici	
			A1	A2	A1	A2
Permanenti	Favorevole	$\gamma_{Gfav}$	1.00	1.00	1.00	1.00
Permanenti	Sfavorevole	$\gamma_{Gsfav}$	1.30	1.00	1.00	1.00
Variabili	Favorevole	$\gamma_{Qfav}$	0.00	0.00	0.00	0.00
Variabili	Sfavorevole	$\gamma_{Qsfav}$	1.50	1.30	1.00	1.00

### Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno:

Parametri		Statici		Sismici	
		M1	M2	M1	M2
Tangente dell'angolo di attrito	$\gamma'_{tan\phi}$	1.00	1.25	1.00	1.25
Coesione efficace	$\gamma'_c$	1.00	1.25	1.00	1.25
Resistenza non drenata	$\gamma'_{cu}$	1.00	1.40	1.00	1.40
Resistenza a compressione uniassiale	$\gamma'_{qu}$	1.00	1.60	1.00	1.60
Peso dell'unità di volume	$\gamma'_\gamma$	1.00	1.00	1.00	1.00

## **PALI DI FONDAZIONE**

CARICHI VERTICALI. Coefficienti parziali  $\gamma_R$  per le verifiche dei pali

### **Pali trivellati**

		<b>R3</b>
Punta	$\gamma_b$	1.35
Laterale compressione	$\gamma_s$	1.15
Totale compressione	$\gamma_t$	1.30
Laterale trazione	$\gamma_{st}$	1.25

CARICHI TRASVERSALI. Coefficienti parziali  $\gamma_T$  per le verifiche dei pali.

		<b>R3</b>
	$\gamma_T$	1.30

Coefficienti di riduzione  $\xi$  per la determinazione della resistenza caratteristica dei pali

Numero di verticali indagate 1  $\xi_3=1.70$   $\xi_4=1.70$

## **Condizioni di carico**

### *Simbologia e convenzioni di segno adottate*

Carichi verticali positivi verso il basso.

Carichi orizzontali positivi verso sinistra.

Momento positivo senso antiorario.

$f_{nd}$  Indice della fondazione

$N_{TOT}$  Sforzo normale totale espressa in [kg]

$M_{YTOT}$  Momento in direzione Y espresso in [kgm]

$T_{TOT}$  Forza di taglio espressa in [kg]

### **Condizione n° 1 - Condizione n° 1 - VARIABILE**

<b>Fondazione</b>	<b><math>N_{TOT}</math></b>	<b><math>M_{YTOT}</math></b>	<b><math>T_{TOT}</math></b>
	[kg]	[kgm]	[kg]
Palo 120	345061,0	0,0	5908,0

### **Condizione n° 2 - Condizione n° 2 - PERMANENTE**

<b>Fondazione</b>	<b><math>N_{TOT}</math></b>	<b><math>M_{YTOT}</math></b>	<b><math>T_{TOT}</math></b>
	[kg]	[kgm]	[kg]
Palo 120	175389,0	0,0	10412,0

## **Descrizione combinazioni di carico**

### *Simbologia adottata*

$\gamma$  Coefficiente di partecipazione della condizione

$\psi$  Coefficiente di combinazione della condizione

### **Combinazione n° 1 - STR - A1-M1-R3**

<b>Cond</b>	<b><math>\gamma</math></b>	<b><math>\Psi</math></b>
Condizione n° 1	1.00	1.00

### **Combinazione n° 2 - STR - A1-M1-R3**

<b>Cond</b>	<b><math>\gamma</math></b>	<b><math>\Psi</math></b>
Condizione n° 2	1.00	1.00

## **Opzioni di calcolo**

### **Analisi in condizioni drenate**

#### *Verifica della portanza assiale*

Il metodo utilizzato per il calcolo della portanza verticale è: Berezantzev ridotto.

E' stata impostata una pressione a piano campagna pari a 0,28 [kg/cmq]  
 L'andamento della pressione verticale  $\sigma_v$  con la profondità, per il calcolo della portanza di punta, è stata definita come: Pressione geostatica.

### Verifica della portanza trasversale

Costante di Winkler orizzontale definita da STRATO  
 Criterio di rottura palo-terreno: Pressione limite (Pressione passiva con moltiplicatore = 3.00)

## Risultati

### Verifica della portanza assiale

#### Simbologia adottata

cmb Identificativo della combinazione  
 Nc, Nq Fattori di capacità portante  
 P<sub>lmin</sub>, P<sub>lmed</sub> Portanza laterale minima e media espressa in [kg]  
 P<sub>pmin</sub>, P<sub>pmed</sub> Portanza di punta minima e media espressa in [kg]  
 Pd Portanza di progetto espressa in [kg]  
 N Scarico verticale in testa al palo espresso in [kg]  
 η Coeff. di sicurezza per carichi verticali

cmb	Nc	Nq
1	36.77	25.80
2	36.77	25.80

cmb	P <sub>lmed</sub>	P <sub>pmed</sub>	P <sub>lmin</sub>	P <sub>pmin</sub>	Wp	Pd	N	η
	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	
1	283684	626693	283577	625975	59376	358432	345061	1.039
2	283684	626693	283577	625975	59376	358432	175389	2.044

### Verifica della portanza trasversale

#### Simbologia adottata

cmb Identificativo della combinazione  
 Tu Taglio resistente ultimo in testa al palo, espresso in [kg]  
 Tx Taglio agente in testa al palo, espresso in [kg]  
 η=T<sub>u</sub>/T<sub>x</sub> Coeff. di sicurezza per carichi orizzontali

cmb	Tu	T	η
	[kg]	[kg]	
1	45355	5908	7,677
2	45355	10412	4,356

### Spostamenti e pressioni

#### Simbologia adottata

Nr. Identificativo sezione palo  
 Y ordinata palo espressa in [cm]  
 Ue spostamento espresso in [cm]  
 Pe pressione espressa in [kg/cmqa]

#### Combinazione n° 1

n°	Y	Ue	Pe	n°	Y	Ue	Pe	n°	Y	Ue	Pe
	[m]	[cm]	[kg/cmqa]		[m]	[cm]	[kg/cmqa]		[m]	[cm]	[kg/cmqa]
1	0,00	0,1912	0,120	2	0,21	0,1836	0,116	3	0,42	0,1760	0,111
4	0,63	0,1685	0,106	5	0,84	0,1610	0,101	6	1,05	0,1535	0,097
7	1,26	0,1462	0,092	8	1,47	0,1389	0,087	9	1,68	0,1317	0,083
10	1,89	0,1246	0,079	11	2,10	0,1177	0,074	12	2,31	0,1109	0,070
13	2,52	0,1042	0,066	14	2,73	0,0977	0,062	15	2,94	0,0914	0,058
16	3,15	0,0852	0,054	17	3,36	0,0793	0,050	18	3,57	0,0735	0,046
19	3,78	0,0679	0,043	20	3,99	0,0625	0,039	21	4,20	0,0573	0,239
22	4,41	0,0523	0,218	23	4,62	0,0476	0,198	24	4,83	0,0431	0,179
25	5,04	0,0388	0,162	26	5,25	0,0347	0,145	27	5,46	0,0308	0,129
28	5,67	0,0272	0,113	29	5,88	0,0238	0,099	30	6,09	0,0206	0,086
31	6,30	0,0176	0,073	32	6,51	0,0149	0,062	33	6,72	0,0123	0,051
34	6,93	0,0099	0,041	35	7,14	0,0077	0,032	36	7,35	0,0057	0,024
37	7,56	0,0038	0,016	38	7,77	0,0021	0,009	39	7,98	0,0006	0,003
40	8,19	-0,0008	-0,003	41	8,40	-0,0020	-0,008	42	8,61	-0,0031	-0,013
43	8,82	-0,0041	-0,017	44	9,03	-0,0050	-0,021	45	9,24	-0,0057	-0,024

RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE

n°	Y	Ue	Pe	n°	Y	Ue	Pe	n°	Y	Ue	Pe
	[m]	[cm]	[kg/cmq]		[m]	[cm]	[kg/cmq]		[m]	[cm]	[kg/cmq]
46	9,45	-0,0064	-0,027	47	9,66	-0,0069	-0,029	48	9,87	-0,0074	-0,031
49	10,08	-0,0077	-0,032	50	10,29	-0,0080	-0,034	51	10,50	-0,0083	-0,034
52	10,71	-0,0084	-0,035	53	10,92	-0,0085	-0,036	54	11,13	-0,0086	-0,036
55	11,34	-0,0086	-0,036	56	11,55	-0,0085	-0,036	57	11,76	-0,0085	-0,035
58	11,97	-0,0083	-0,035	59	12,18	-0,0082	-0,034	60	12,39	-0,0080	-0,033
61	12,60	-0,0078	-0,033	62	12,81	-0,0076	-0,032	63	13,02	-0,0074	-0,031
64	13,23	-0,0071	-0,030	65	13,44	-0,0068	-0,029	66	13,65	-0,0066	-0,027
67	13,86	-0,0063	-0,026	68	14,07	-0,0060	-0,025	69	14,28	-0,0057	-0,024
70	14,49	-0,0054	-0,023	71	14,70	-0,0051	-0,021	72	14,91	-0,0048	-0,020
73	15,12	-0,0045	-0,019	74	15,33	-0,0042	-0,018	75	15,54	-0,0039	-0,016
76	15,75	-0,0037	-0,015	77	15,96	-0,0034	-0,014	78	16,17	-0,0031	-0,013
79	16,38	-0,0028	-0,012	80	16,59	-0,0026	-0,011	81	16,80	-0,0023	-0,010
82	17,01	-0,0020	-0,009	83	17,22	-0,0018	-0,007	84	17,43	-0,0015	-0,006
85	17,64	-0,0013	-0,005	86	17,85	-0,0011	-0,004	87	18,06	-0,0008	-0,003
88	18,27	-0,0006	-0,002	89	18,48	-0,0004	-0,002	90	18,69	-0,0001	-0,001
91	18,90	0,0001	0,000	92	19,11	0,0003	0,001	93	19,32	0,0005	0,002
94	19,53	0,0007	0,003	95	19,74	0,0009	0,004	96	19,95	0,0012	0,005
97	20,16	0,0014	0,006	98	20,37	0,0016	0,007	99	20,58	0,0018	0,008
100	20,79	0,0020	0,008	101	21,00	0,0022	0,009	102			

Combinazione n° 2

n°	Y	Ue	Pe	n°	Y	Ue	Pe	n°	Y	Ue	Pe
	[m]	[cm]	[kg/cmq]		[m]	[cm]	[kg/cmq]		[m]	[cm]	[kg/cmq]
1	0,00	0,3370	0,212	2	0,21	0,3236	0,204	3	0,42	0,3102	0,195
4	0,63	0,2969	0,187	5	0,84	0,2837	0,179	6	1,05	0,2706	0,170
7	1,26	0,2576	0,162	8	1,47	0,2447	0,154	9	1,68	0,2321	0,146
10	1,89	0,2196	0,138	11	2,10	0,2074	0,131	12	2,31	0,1954	0,123
13	2,52	0,1837	0,116	14	2,73	0,1723	0,109	15	2,94	0,1611	0,101
16	3,15	0,1502	0,095	17	3,36	0,1397	0,088	18	3,57	0,1295	0,082
19	3,78	0,1196	0,075	20	3,99	0,1101	0,069	21	4,20	0,1010	0,421
22	4,41	0,0922	0,384	23	4,62	0,0839	0,349	24	4,83	0,0759	0,316
25	5,04	0,0683	0,285	26	5,25	0,0611	0,255	27	5,46	0,0544	0,226
28	5,67	0,0480	0,200	29	5,88	0,0420	0,175	30	6,09	0,0363	0,151
31	6,30	0,0311	0,129	32	6,51	0,0262	0,109	33	6,72	0,0216	0,090
34	6,93	0,0174	0,073	35	7,14	0,0135	0,056	36	7,35	0,0100	0,042
37	7,56	0,0067	0,028	38	7,77	0,0038	0,016	39	7,98	0,0011	0,004
40	8,19	-0,0014	-0,006	41	8,40	-0,0036	-0,015	42	8,61	-0,0055	-0,023
43	8,82	-0,0072	-0,030	44	9,03	-0,0088	-0,036	45	9,24	-0,0101	-0,042
46	9,45	-0,0112	-0,047	47	9,66	-0,0122	-0,051	48	9,87	-0,0130	-0,054
49	10,08	-0,0137	-0,057	50	10,29	-0,0142	-0,059	51	10,50	-0,0146	-0,061
52	10,71	-0,0149	-0,062	53	10,92	-0,0151	-0,063	54	11,13	-0,0151	-0,063
55	11,34	-0,0151	-0,063	56	11,55	-0,0151	-0,063	57	11,76	-0,0149	-0,062
58	11,97	-0,0147	-0,061	59	12,18	-0,0144	-0,060	60	12,39	-0,0141	-0,059
61	12,60	-0,0138	-0,057	62	12,81	-0,0134	-0,056	63	13,02	-0,0130	-0,054
64	13,23	-0,0125	-0,052	65	13,44	-0,0121	-0,050	66	13,65	-0,0116	-0,048
67	13,86	-0,0111	-0,046	68	14,07	-0,0106	-0,044	69	14,28	-0,0101	-0,042
70	14,49	-0,0095	-0,040	71	14,70	-0,0090	-0,038	72	14,91	-0,0085	-0,035
73	15,12	-0,0080	-0,033	74	15,33	-0,0075	-0,031	75	15,54	-0,0070	-0,029
76	15,75	-0,0065	-0,027	77	15,96	-0,0060	-0,025	78	16,17	-0,0055	-0,023
79	16,38	-0,0050	-0,021	80	16,59	-0,0045	-0,019	81	16,80	-0,0041	-0,017
82	17,01	-0,0036	-0,015	83	17,22	-0,0032	-0,013	84	17,43	-0,0027	-0,011
85	17,64	-0,0023	-0,010	86	17,85	-0,0019	-0,008	87	18,06	-0,0015	-0,006
88	18,27	-0,0010	-0,004	89	18,48	-0,0006	-0,003	90	18,69	-0,0002	-0,001
91	18,90	0,0001	0,001	92	19,11	0,0005	0,002	93	19,32	0,0009	0,004
94	19,53	0,0013	0,005	95	19,74	0,0017	0,007	96	19,95	0,0020	0,009
97	20,16	0,0024	0,010	98	20,37	0,0028	0,012	99	20,58	0,0032	0,013
100	20,79	0,0035	0,015	101	21,00	0,0039	0,016	102			

Spostamenti e pressioni limiti

Simbologia adottata

Nr. Identificativo sezione palo  
Y ordinata palo espressa in [cm]  
Ur spostamento limite espressa in [cm]  
Pr pressione limite espressa in [kg/cmq]

n°	Y	Ur	Pr	n°	Y	Ur	Pr	n°	Y	Ur	Pr
	[m]	[cm]	[kg/cmq]		[m]	[cm]	[kg/cmq]		[m]	[cm]	[kg/cmq]
1	0,00	2,5564	1,611	2	0,21	2,4547	1,546	3	0,42	2,3532	1,483
4	0,63	2,2522	1,419	5	0,84	2,1518	1,356	6	1,05	2,0522	1,293
7	1,26	1,9537	1,231	8	1,47	1,8564	1,170	9	1,68	1,7605	1,109
10	1,89	1,6661	1,050	11	2,10	1,5733	0,991	12	2,31	1,4824	0,934
13	2,52	1,3934	0,878	14	2,73	1,3066	0,823	15	2,94	1,2219	0,770

n°	Y	Ur	Pr	n°	Y	Ur	Pr	n°	Y	Ur	Pr
	[m]	[cm]	[kg/cmq]		[m]	[cm]	[kg/cmq]		[m]	[cm]	[kg/cmq]
16	3,15	1,1395	0,718	17	3,36	1,0595	0,668	18	3,57	0,9821	0,619
19	3,78	0,9073	0,572	20	3,99	0,8352	0,526	21	4,20	0,7659	3,192
22	4,41	0,6995	2,915	23	4,62	0,6361	2,651	24	4,83	0,5756	2,399
25	5,04	0,5182	2,159	26	5,25	0,4637	1,932	27	5,46	0,4123	1,718
28	5,67	0,3638	1,516	29	5,88	0,3182	1,326	30	6,09	0,2756	1,148
31	6,30	0,2357	0,982	32	6,51	0,1986	0,827	33	6,72	0,1641	0,684
34	6,93	0,1322	0,551	35	7,14	0,1028	0,428	36	7,35	0,0757	0,316
37	7,56	0,0510	0,213	38	7,77	0,0285	0,119	39	7,98	0,0080	0,033
40	8,19	-0,0104	-0,043	41	8,40	-0,0270	-0,112	42	8,61	-0,0418	-0,174
43	8,82	-0,0549	-0,229	44	9,03	-0,0664	-0,277	45	9,24	-0,0764	-0,318
46	9,45	-0,0850	-0,354	47	9,66	-0,0924	-0,385	48	9,87	-0,0985	-0,411
49	10,08	-0,1036	-0,432	50	10,29	-0,1076	-0,448	51	10,50	-0,1106	-0,461
52	10,71	-0,1128	-0,470	53	10,92	-0,1142	-0,476	54	11,13	-0,1148	-0,478
55	11,34	-0,1148	-0,479	56	11,55	-0,1143	-0,476	57	11,76	-0,1132	-0,472
58	11,97	-0,1116	-0,465	59	12,18	-0,1096	-0,457	60	12,39	-0,1072	-0,447
61	12,60	-0,1046	-0,436	62	12,81	-0,1016	-0,423	63	13,02	-0,0984	-0,410
64	13,23	-0,0950	-0,396	65	13,44	-0,0915	-0,381	66	13,65	-0,0878	-0,366
67	13,86	-0,0841	-0,350	68	14,07	-0,0802	-0,334	69	14,28	-0,0763	-0,318
70	14,49	-0,0724	-0,302	71	14,70	-0,0684	-0,285	72	14,91	-0,0645	-0,269
73	15,12	-0,0606	-0,252	74	15,33	-0,0567	-0,236	75	15,54	-0,0528	-0,220
76	15,75	-0,0490	-0,204	77	15,96	-0,0452	-0,188	78	16,17	-0,0415	-0,173
79	16,38	-0,0379	-0,158	80	16,59	-0,0343	-0,143	81	16,80	-0,0308	-0,128
82	17,01	-0,0273	-0,114	83	17,22	-0,0240	-0,100	84	17,43	-0,0206	-0,086
85	17,64	-0,0174	-0,072	86	17,85	-0,0142	-0,059	87	18,06	-0,0110	-0,046
88	18,27	-0,0079	-0,033	89	18,48	-0,0049	-0,020	90	18,69	-0,0019	-0,008
91	18,90	0,0011	0,004	92	19,11	0,0040	0,017	93	19,32	0,0069	0,029
94	19,53	0,0098	0,041	95	19,74	0,0127	0,053	96	19,95	0,0155	0,065
97	20,16	0,0184	0,077	98	20,37	0,0212	0,088	99	20,58	0,0241	0,100
100	20,79	0,0269	0,112	101	21,00	0,0297	0,124	102			

Di seguito sono riepilogati i coefficienti di sicurezza delle verifiche geotecniche desunti dal software di calcolo relativamente alle diverse combinazioni di carico considerate:

COMBINAZIONE	CARICO LIMITE	PORTANZA LATERALE
SLU - STR	1,039	7,677
SLV	2,044	4,356

#### 10.4 VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA DEI PALI IN GRUPPO

Poiché l'interasse tra i pali di fondazione è inferiore pari a 3 volte il diametro dei pali stessi ( $i = 3,60$  m =  $3 \cdot d = 3,60$  m) si può considerare un'efficienza unitaria dei pali in gruppo.

## 10.5 VALIDAZIONE MANUALE DEI RISULTATI DEL SOFTWARE

Nella tabella successiva è riportata la determinazione della portanza laterale caratteristica del palo di fondazione:

Diametro del palo	1,20	[m]
Lunghezza del palo	21,00	[m]
Quota di falda	0,00	[m]
Pressione al piano di posa della zattera di fondazione	27,75	[kN/m <sup>2</sup> ]

z [m]	v [kN/m <sup>3</sup> ]	v' [kN/m <sup>3</sup> ]	v <sub>w</sub> [kN/m <sup>3</sup> ]	σ <sub>v</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	σ <sub>w</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	σ' <sub>v</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	φ [°]	K = 1-sen(φ)	μ=tan(δ)=tan(φ)	T <sub>s</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	T <sub>s,media</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	R <sub>L,k</sub> [kN]
0,00	18,50	8,50	10,00	27,75	0,00	27,75	35,00	0,426	0,700	8,29	0,00	0,00
1,00	18,50	8,50	10,00	46,25	10,00	36,25	35,00	0,426	0,700	10,82	9,55	36,02
2,00	18,50	8,50	10,00	64,75	20,00	44,75	35,00	0,426	0,700	13,36	12,09	81,61
3,00	18,50	8,50	10,00	83,25	30,00	53,25	35,00	0,426	0,700	15,90	14,63	136,77
4,00	18,50	8,50	10,00	101,75	40,00	61,75	35,00	0,426	0,700	18,44	17,17	201,49
5,00	19,00	9,00	10,00	120,75	50,00	70,75	34,00	0,441	0,675	21,04	19,74	275,90
6,00	19,00	9,00	10,00	139,75	60,00	79,75	34,00	0,441	0,675	23,71	22,37	360,24
7,00	19,00	9,00	10,00	158,75	70,00	88,75	34,00	0,441	0,675	26,39	25,05	454,68
8,00	19,00	9,00	10,00	177,75	80,00	97,75	34,00	0,441	0,675	29,06	27,73	559,20
9,00	19,00	9,00	10,00	196,75	90,00	106,75	34,00	0,441	0,675	31,74	30,40	673,82
10,00	19,00	9,00	10,00	215,75	100,00	115,75	34,00	0,441	0,675	34,42	33,08	798,52
11,00	19,00	9,00	10,00	234,75	110,00	124,75	34,00	0,441	0,675	37,09	35,75	933,30
12,00	19,00	9,00	10,00	253,75	120,00	133,75	34,00	0,441	0,675	39,77	38,43	1.078,18
13,00	19,00	9,00	10,00	272,75	130,00	142,75	34,00	0,441	0,675	42,44	41,11	1.233,14
14,00	19,00	9,00	10,00	291,75	140,00	151,75	34,00	0,441	0,675	45,12	43,78	1.398,20
15,00	19,00	9,00	10,00	310,75	150,00	160,75	34,00	0,441	0,675	47,80	46,46	1.573,34
16,00	19,00	9,00	10,00	329,75	160,00	169,75	34,00	0,441	0,675	50,47	49,13	1.758,57
17,00	19,00	9,00	10,00	348,75	170,00	178,75	34,00	0,441	0,675	53,15	51,81	1.953,88
18,00	19,00	9,00	10,00	367,75	180,00	187,75	34,00	0,441	0,675	55,82	54,49	2.159,29
19,00	19,00	9,00	10,00	386,75	190,00	196,75	34,00	0,441	0,675	58,50	57,16	2.374,78
20,00	19,00	9,00	10,00	405,75	200,00	205,75	34,00	0,441	0,675	61,18	59,84	2.600,36
21,00	19,00	9,00	10,00	424,75	210,00	214,75	34,00	0,441	0,675	63,85	62,51	2.836,03

Il valore caratteristico della portanza laterale è risultato pari a  $R_{L,k} = 2.836,03$  kN.

Considerato:

- Coefficiente di portanza alla punta  $N^*_q = 25,80$
- Pressione verticale efficace alla base  $\sigma'_{v,v} = 214,75$  kN/m<sup>2</sup>

il valore caratteristico della portanza di punta risulta pari a:

$$R_{P,k} = \pi \times 1,20^2 / 4 \times 25,80 \times 214,75 = 6.266,21 \text{ kN}$$

Di seguito è riportato il form di output del software di calcolo recante la determinazione dei valori caratteristici della portanza laterale e di punta:

Dettagli risultati palo [comb 1] SLU - Approccio 2

**Geometria palo**  
 L = 21,00 m    D = 120,00 cm

**Portanza verticale**  
 Pp min = 625975 kg    Pp med = 626693 kg  
 Pl min = 283577 kg    Pl med = 283684 kg  
 Wp = 59376 kg  
 Pd = 358432 kg    N = 345061 kg    η = 1,04

**Coefficienti di capacità portante**  
 Nc = 36,77    Nq = 25,80  
 N'c = 36,77    N'q = 25,80

**Portanza trasversale**  
 Tu = 78977 kg    T = 5908 kg    η = 13,37  
 Mu = 0 kgm

**Armatura palo (primo tratto)**  
 Armatura: 58 φ16    A = 116,62 cmq    MuSez = 213238 kgm

**Armatura palo (secondo tratto) - y =**  
 Armatura: φ    A =    MuSez =

**Cedimenti**  
 w = 0,766 cm    u = 0,191 cm

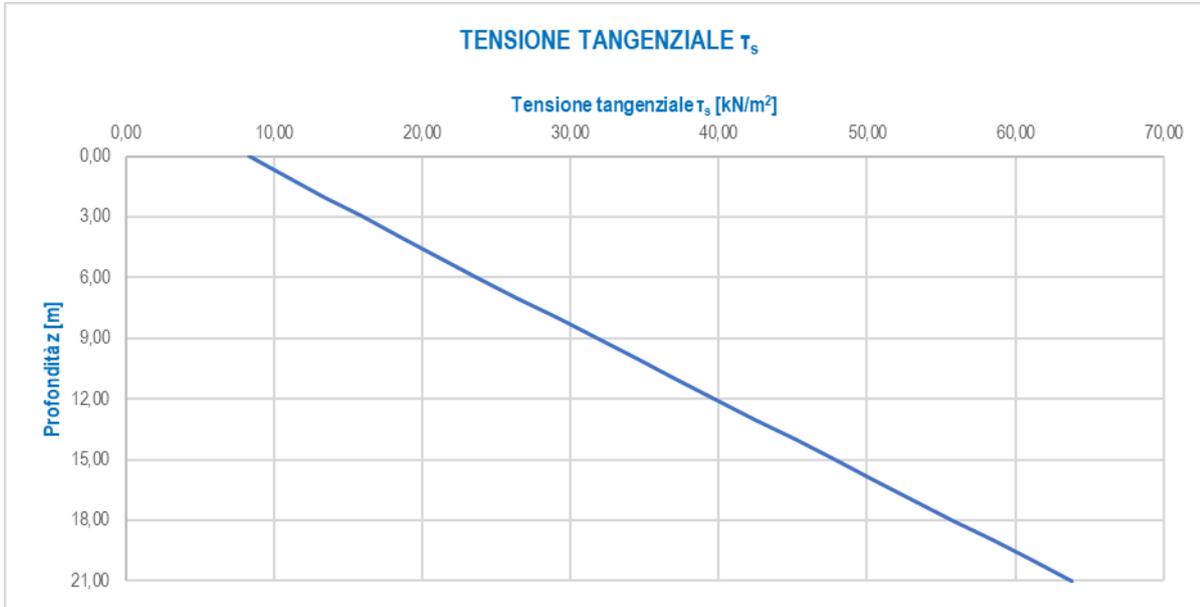
<< 1 >> Help

Risulta pertanto:

PORTANZA	SOFTWARE	VALIDAZIONE
di punta [kN]	6.266,93	6.266,21
laterale [kN]	2.836,84	2.836,03

I risultati risultano perfettamente confrontabili.

Nel diagramma successivo è riportato l'andamento della tensione tangenziale con la profondità:



La tensione tangenziale risulta sempre inferiore a **100,00 kPa**, nel rispetto dell'assunzione presente nel progetto definitivo.

## 10.6 CALCOLO DEI CEDIMENTI VERTICALI ALLO STATO LIMITE DI ESERCIZIO – COMBINAZIONE CARATTERISTICA

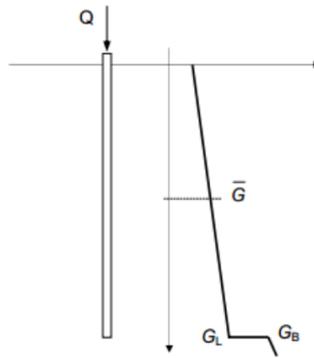
Il cedimento del palo per la combinazione maggiormente gravosa allo Stato Limite di Esercizio – Combinazione Caratteristica viene determinato mediante il metodo di Randolph e Worth di seguito descritto.

Il cedimento del singolo palo è determinato mediante la seguente relazione:

$$\frac{Q}{G_L \cdot r_0 \cdot w} = \left[ \frac{4}{\eta \cdot (1-\nu)} + \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot L \cdot \tanh(\mu \cdot L)}{\zeta \cdot r_0 \cdot \mu \cdot L} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{4}{\eta \cdot (1-\nu)} + \frac{1}{\pi \cdot L} \cdot \frac{L \cdot \tanh(\mu \cdot L)}{r_0 \cdot \mu \cdot L} \right]^{-1}$$

dove:

- Q = carico sul palo
- $r_0$  = raggio del palo
- w = cedimento del palo
- $E_p$  = modulo elastico del calcestruzzo costituente il palo



- $G_m$  = modulo di rigidezza trasversale media del terreno lungo lo sviluppo del palo
- $G_L$  = modulo di rigidezza trasversale del terreno alla lunghezza L
- $G_b$  = modulo di rigidezza trasversale del terreno in corrispondenza della base del palo
- $\nu$  = coefficiente di Poisson del terreno
- $r_b$  = raggio del palo alla base

- $\rho = \frac{G_m}{G_L}$

- $\lambda = \frac{E_p}{G_L}$

- $\xi = \frac{G_L}{G_b}$

- $\eta = \frac{r_b}{r_0}$

- $r_m = L \cdot \left\{ \frac{L}{4} + \left[ 2 \cdot \rho \cdot (1 - \nu) - \frac{L}{4} \right] \cdot \xi \right\}$

- $\zeta = \ln \left( \frac{r_m}{r_0} \right)$

- $\mu = \frac{\sqrt{\frac{2}{\zeta \cdot \lambda}}}{r_0}$

Il carico massimo sul singolo palo determinato per lo Stato Limite di Esercizio – Combinazione caratteristica è risultato pari a:

**Q = 2.496,30 kN**

A tale carico, trasmesso dalla pila, viene sommato il peso proprio del palo, che risulta pari a:

**P<sub>palo</sub> =  $\pi \times 1,20^2 / 4 \times 25,00 = 593,76$  kN**

Viene infine sottratto il peso del terreno rimosso durante la trivellazione del palo:

**P<sub>t</sub> =  $\pi \times 1,20^2 / 4 \times (4,00 \times 18,50 + 17,00 \times 19,00) = 449,00$  kN**

Il carico massimo in condizioni di esercizio utilizzato per la stima del cedimento verticale risulta dunque pari a:

$$Q = 2.496,30 + 593,76 - 449,00 = 2.641,06 \text{ kN}$$

Sulla base della caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione si assumono i seguenti valori del modulo elastico:

- Strato 1 (Unità Ug1) →  $E = 32,00 \text{ Mpa} = 32.000,00 \text{ kN/m}^2$
- Strato 2 (Unità Ug2) →  $E = 34,00 \text{ Mpa} = 34.000,00 \text{ kN/m}^2$

Il valore medio del modulo elastico lungo lo sviluppo del palo è valutato mediante la seguente media ponderata:

$$E_m = (4,00 \times 32.000,00 + 17,00 \times 34.000,00) / (4,00 + 17,00) = 33.619,05 \text{ kN/m}^2$$

Considerato un coefficiente di Poisson del terreno pari a  $\nu = 0,30$ , si ottengono i seguenti valori del modulo di rigidezza trasversale:

- $G_m = 12.930,40 \text{ kN/m}^2$
- $G_L = 13.076,92 \text{ kN/m}^2$
- $G_b = 13.076,92 \text{ kN/m}^2$

Di seguito è riportata la valutazione del cedimento massimo verticale in esercizio riferito al singolo palo:

Q	2.641,06	[kN]
L	21,00	[m]
$r_0$	0,60	[m]
$r_b$	0,60	[m]
$E_p$	31.220.185,78	[kN/m <sup>2</sup> ]
$E_m$	33.619,05	[kN/m <sup>2</sup> ]
$E_L$	34.000,00	[kN/m <sup>2</sup> ]
$E_b$	34.000,00	[kN/m <sup>2</sup> ]
$G_m$	12.930,40	[kN/m <sup>2</sup> ]
$G_L$	13.076,92	[kN/m <sup>2</sup> ]
$G_b$	13.076,92	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\nu$	0,30	[-]
$r_m$	29,07	[m]
$\zeta$	3,88	[-]
$\eta$	1,00	[-]
$\xi$	1,00	[-]
$\rho$	0,99	[-]
$\mu$	0,0245	[-]
$\lambda$	2.387,43	[-]
$\mu L$	0,51	[m]
w	6,02	[mm]

Il cedimento calcolato risulta compatibile con la funzionalità in esercizio dell'opera, considerando anche che il cedimento indotto dal peso del palo, dal peso delle sottostrutture e dell'impalcato metallico viene comunque scontato in fase di esecuzione e che dunque non ingenera azioni parassite sulla sovrastruttura.