



AUTOSTRADA REGIONALE CISPADANA DAL CASELLO DI REGGIOLO-ROLO SULLA A22 AL CASELLO DI FERRARA SUD SULLA A13

CODICE C.U.P. E81B08000060009

PROGETTO DEFINITIVO

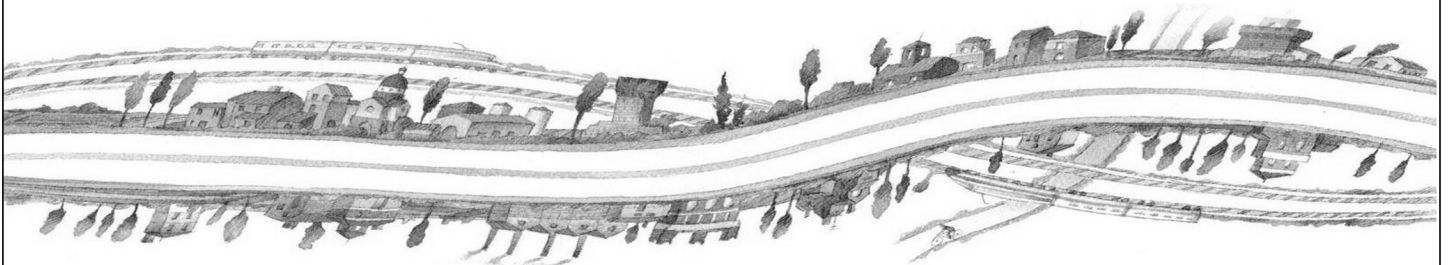
ASSE AUTOSTRADALE (COMPRESIVO DEGLI INTERVENTI LOCALI DI COLLEGAMENTO VIARIO AL SISTEMA AUTOSTRADALE)

GEOLOGIA, IDROGEOLOGIA, SISMICA E GEOTECNICA

GEOTECNICA

GALLERIE E TRINCEE CONFINATE AUTOSTRADALI

RELAZIONE GEOTECNICA TRINCEA CONFINATA SAN GIACOMO RONCOLE



IL PROGETTISTA

Ing. Gianfranco Marchi
Albo Ing. Ravenna n°342

RESPONSABILE INTEGRAZIONE
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

Ing. Emilio Salsi
Albo Ing. Reggio Emilia n° 945



IL CONCESSIONARIO

Autostrada Regionale
Cispadana S.p.A.
IL PRESIDENTE
Graziano Pattuzzi

G										
F										
E										
D										
C										
B										
A	17.04.2012	EMISSIONE				A. Boschi	G. Marchi	E. Salsi		
REV.	DATA	DESCRIZIONE				REDAZIONE	CONTROLLO	APPROVAZIONE		
IDENTIFICAZIONE ELABORATO										DATA: MAGGIO 2012
NUM. PROGR.	FASE	LOTTO	GRUPPO	CODICE OPERA WBS	TRATTO OPERA	AMBITO	TIPO ELABORATO	PROGRESSIVO	REV.	SCALA: _
0457	PD	0	A57	AMU04	0	GT	RB	02	A	

INDICE

1. PREMESSA.....	2
2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	3
2.1. NORMATIVE	3
2.2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	3
3. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	4
4. VERIFICA DI CAPACITÀ PORTANTE E SCORRIMENTO MEDIANTE I DIAGRAMMI DI INTERAZIONE PER LE FONDAZIONI SUPERFICIALI.....	6
4.1. FONDAZIONE DI LARGHEZZA $B = 38.50$ M E APPROFONDIMENTO $D = 3.90$ M.....	8
4.1.1. Carico limite finalizzato alla determinazione dei domini.....	8
4.1.2. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Drenata.....	9
4.1.3. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Non Drenata.....	10
4.1.4. Diagrammi di interazione in Condizione Sismica.....	11
5. CAPACITÀ PORTANTE DEL PALO SINGOLO SOGGETTO A CARICHI ASSIALI.....	12
6. CAPACITÀ PORTANTE DEL PALO SINGOLO SOGGETTO A CARICHI TRASVERSALI.....	19
7. ANDAMENTO DELLE SOLLECITAZIONI NEL PALO SINGOLO SOGGETTO A CARICHI ORIZZONTALI.....	22
8. CAPACITÀ PORTANTE DEI PALI IN GRUPPO SOGGETTI A CARICHI ASSIALI	35
8.1. TERRENI COESIVI	35
8.1.1. Pali con interasse superiore a 3 diametri.....	35
8.1.2. Pali con interasse inferiore a 3 diametri.....	36
8.2. TERRENI INCOERENTI.....	38
8.2.1. Sabbia sciolta	38
8.2.2. Sabbia densa	38
9. CAPACITÀ PORTANTE DEI PALI IN GRUPPO SOGGETTI A CARICHI TRASVERSALI.....	39
10. ANDAMENTO DELLE SOLLECITAZIONI NEI PALI IN GRUPPO SOGGETTI A CARICHI TRASVERSALI.....	40
11. COMPORTAMENTO DEI PALI IN ESERCIZIO.....	41
11.1. CEDIMENTO DEL PALO SINGOLO SOGGETTO A CARICHI ASSIALI	41
11.2. CEDIMENTO DEI PALI IN GRUPPO SOGGETTI A CARICO ASSIALE.....	41
11.3. RIGIDENZE ASSIALI	42

1. PREMESSA

Nell'ambito delle attività di progettazione previste per la redazione del Progetto Definitivo di Autostrada Regionale Cispadana dal casello di Reggiolo-Rolo su A22 al casello di Ferrara Sud su A13, il presente documento illustra gli aspetti geotecnici inerenti l'opera di linea AMU04 – Trincee confinata San Giacomo Roncole.

Per ulteriori chiarimenti in merito ai criteri generali adottati per l'esecuzione delle verifiche geotecniche si rimanda al documento PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_02 "Criteri generali verifiche geotecniche".

Nel seguito dell'elaborato verranno descritte ed approfondite le seguenti tematiche con particolare riferimento all'opera in oggetto:

- normativa di riferimento per le verifiche geotecniche;
- caratterizzazione geotecnica, indicazione del livello di falda, della categoria di sottosuolo e delle condizioni ambientali per l'individuazione dell'ambiente chimico;
- verifica di capacità portante mediante i diagrammi di interazione per le fondazioni superficiali (§ 6.4.2. del DM 14/01/2008);
- criteri per la determinazione della costante di sottofondo.
- capacità portante del palo singolo soggetto a carichi assiali;
- capacità portante del palo singolo soggetto a carichi trasversali;
- andamento delle sollecitazioni lungo il palo singolo soggetto a carichi trasversali;
- capacità portante dei pali in gruppo soggetti a carichi assiali;
- capacità portante dei pali in gruppo soggetti a carichi trasversali;
- andamento delle sollecitazioni nei pali in gruppo soggetto a carichi trasversali;
- comportamento dei pali in esercizio.

2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1. NORMATIVE

Le normative di riferimento sono riportate nell'elaborato:

- PD_0_000_00000_0_GE_KT_01, "Elenco delle Normative di riferimento".

2.2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- FRANK R., "Calcul des fondations superficielles et profondes", Techniques de l'Ingénieur (TI), Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées ;
- JOSEPH E. BOWLES (1992) – "Fondazioni – Progetto e analisi", McGraw-Hill, Giugno 1992;
- LANCELLOTTA R. (1993) – "Geotecnica", Seconda edizione, ed. Zanichelli, Bologna;
- VIGGIANI C. – Fondazioni – Hevelius Edizioni;
- Gourvenec S., Steinepreis M. (2007); "Undrained limit states of shallow foundations acting in consort"; *International Journal of Geomechanics*, ASCE, 7(3): 194-205;
- Brinch Hansen J. (1970); "A revised and extended formula for bearing capacity"; *Danish Geotechnical Institute*, Copenhagen, Denmark, 98: 5-11;
- Meyerof, G.G. (1953); "The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads"; *3^d ICSMFE*, vol. 1, pp. 440-445.
- AGI, "Raccomandazioni sui pali di fondazione", dicembre 1984;
- Associazione Geotecnica Italiana (2005) "Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica", Patron Editore, Bologna;
- POULOS H.G., DAVIS E.H. – Analisi e progettazione di fondazioni su pali – Libreria Dario Flaccovio Editrice;
- POULOS H.G., DAVIS E.H. (1974) – "Elastic solutions for soil and rock mechanics", ed. John Wiley & Sons, Inc. ;
- U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration – "Drilled shafts: Construction procedures and design methods" – Publication No. FHWA-IF-99-025.

3. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Di seguito si riporta la scheda di caratterizzazione geotecnica per l'opera in oggetto.

OPERA:	TRINCEA CONFINATA SAN GIACOMO RONCOLE
---------------	--

Q_{rif} =	19.00 m s.l.m.
--------------------------	-----------------------

TABELLA 3-1: INDAGINI GEOGNOSTICHE DI RIFERIMENTO PER STRATIGRAFIA E CARATTERIZZAZIONE

sigla indagine	campagna di indagine	quota p.c. (m s.l.m.)	lunghezza (m)	strumentazione installata
BH50	Geoservice - 2011	19.349	40.0	C(12)
BH51	Geoservice - 2011	19.162	40.0	-
BH52	Geoservice - 2011	19.059	40.0	C(35)
BH352	Geoservice - 2011	19.455	40.5	-
CPTU108	Geoservice - 2011	18.874	35.7	-
CPTU109	Geoservice - 2011	19.242	30.4	-
CPTU110	Geoservice - 2011	18.979	33.3	-
CPTU111	Geoservice - 2011	19.023	30.7	-
CPTU112	Geoservice - 2011	19.547	28.5	-
CPTU312	Geoservice - 2011	19.455	40.5	-

C (...) = cella piezometrica Casagrande (quota cella);
TA (...) = piezometro a tubo aperto (tratto filtrante).

TABELLA 3-2: UNITÀ LITOSTRATIGRAFICHE INDIVIDUATE LUNGO IL TRACCIATO

Unità	Descrizione
R/V	Terreno di riporto e terreno vegetale
1	Argilla limosa/Limo argilloso
2	Sabbia limosa/Limo sabbioso
3	Sabbia con $D_r < 50\%$
4	Sabbia con $50\% < D_r < 70\%$
5	Sabbia con $D_r > 70\%$
6	Torba/Argilla organica

TABELLA 3-3: CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICO – GEOTECNICA

Profondità (m da p.c.) (Q_{ref} 19.00 m s.l.m.)	Unità -	z_w (m)	γ_n (kN/m ³)	φ' (*) (°)	c' (*) (kPa)	c_u (*) (kPa)	E' (kPa)	M (kPa)
0.0÷1.0	2	1.50	18.5	30-32	0	-	15000	-
1.0÷13.0	1		18.6	22-24	4-6	60-80	3715-7430	5000-10000
13.0÷16.0	3		18.5	30-32	0	-	25000	-
16.0÷18.0	5		19.5	31-34	0	-	64273	-
18.0÷29.0	1		18.6	22-24	4-6	80	7430	10000
Da 29.0	5		19.5	31-34	0	-	>86091	-

Q_{ref} = quota assoluta inizio caratterizzazione (m s.l.m.);

z_w = profondità di falda di progetto da p.c. (m);

γ_n = peso di volume naturale (kN/m³);

(*) = Il valore caratteristico di tale parametro viene determinato come segue:

- valori prossimi al valore medio dovranno essere assunti per verifiche che coinvolgono un volume di terreno tale da compensare eventuali eterogeneità e/o quando la struttura a contatto con il terreno presenta una rigidità tale da consentire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti;
- valori prossimi al valore minimo di tale parametro dovranno essere adottati per verifiche che coinvolgono modesti volumi di terreno e/o quando la struttura a contatto con il terreno non è in grado di garantire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti a causa della sua scarsa rigidità.

φ' = valore dell'angolo di resistenza al taglio (°);

c' = valore della coesione efficace (kPa);

C_u = valore della coesione non drenata (kPa);

E' = modulo di Young (kPa);

M = valore del modulo edometrico.

Con riferimento ai primi 30.0 m da piano campagna, la prova CH 54 eseguita nelle vicinanze indica $V_{s,30} = 303$ m/s; di conseguenza, la categoria di sottosuolo che è possibile assumere per le elaborazioni è C.

Al fine di valutare i fattori di correlazione ξ per la determinazione della resistenza caratteristica si considerano, quali verticali indagate, le prove indicate in Tabella 3-1.

4. VERIFICA DI CAPACITÀ PORTANTE E SCORRIMENTO MEDIANTE I DIAGRAMMI DI INTERAZIONE PER LE FONDAZIONI SUPERFICIALI

Lo studio della capacità portante di una fondazione superficiale nastriforme di larghezza B può essere affrontato tramite la costruzione del relativo diagramma di interazione nello spazio tridimensionale delle componenti di carico, che delimita le combinazioni ammissibili, al suo interno, da quelle semplicemente inammissibili, al suo esterno.

La risultante dei carichi applicati Q può essere infatti scomposta nelle sue componenti staticamente equivalenti che, nel caso piano, sono costituite dalla componente verticale V , orizzontale H e dal momento M , così definite (Figura 4-1):

$$V = Q \cdot \cos \alpha \quad H = Q \cdot \sin \alpha \quad M = Q \cdot e \cdot \cos \alpha$$

ed il problema della capacità portante può essere così risolto verificando che le diverse possibili combinazioni delle componenti di carico (V, M, H) ricadano all'interno del diagramma di interazione di riferimento.

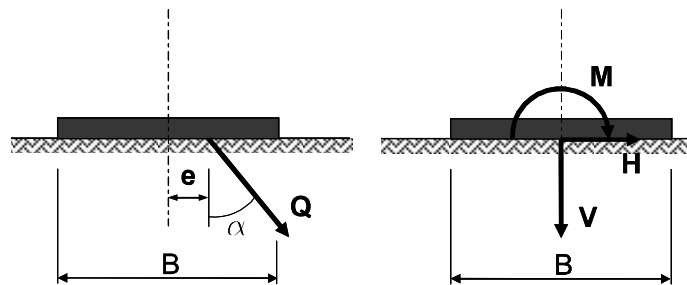


FIGURA 4-1: DEFINIZIONE DELLE COMPONENTI DI CARICO

I luoghi di rottura (o diagrammi di interazione) di una fondazione, opportunamente adimensionalizzati, possono essere definiti mediante le formulazioni di **Brinch-Hansen (1970)** e **Meyerhof (1953)** per condizioni drenate e di **Gourvenec (2007)** per condizioni non drenate riportate in dettaglio nel documento PD-0-A00-A0000-0-GT-RB-02-A "Criteri generali per le verifiche geotecniche".

Il calcolo dei diagrammi di interazione è stato condotto, in riferimento al DM 14/01/2008, utilizzando i parametri del terreno fattorizzati con i coefficienti γ_M riportati in Tab. 6.2.11 e decreto sopracitato; nelle seguenti condizioni di calcolo:

- Condizione statica a breve termine (calcolo in termini di parametri non drenati delle unità coesive);
- Condizione statica a lungo termine (calcolo in termini di parametri drenati dei terreni);
- Condizione sismica (calcolo in termini di parametri non drenati delle unità coesive).

Nel calcolo sono state considerate le seguenti condizioni geometriche:

	Approfondimento D [m]	Larghezza fondazione B [m]
AMU04	3.9	38.5

Nei seguenti paragrafi sono riportati i diagrammi di interazione per le condizioni precedentemente descritte.

Per la verifica della capacità portante della fondazione, per ciascuna combinazione di carico analizzata, il progettista dovrà seguire la seguente procedura coerentemente con le combinazioni di fattori γ_A , γ_M e γ_R contemplate da normativa:

- 1) si determina la terna delle azioni sollecitanti di progetto agenti in fondazione (V_{ED} , H_{ED} , M_{ED});
- 2) si verifica che il valore dell'azione verticale sollecitante di progetto V_{ED} sia inferiore al valore di $V_{max} = V_{RD}$ fornito (vedi paragrafi seguenti);
- 3) dal dominio di interazione nel piano V-H, si determina il valore dell'azione orizzontale H_{RD} corrispondente al valore dell'azione verticale sollecitante di progetto V_{ED} per la quale si fornisce l'equazione:

$$H_{RD} = \frac{10}{7} \cdot V_{ED} \left(1 - \left(\frac{V_{ED}}{V_{max}} \right)^{1/5} \right) \text{ in condizioni drenate;}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{RD} = 4 \cdot H_{max} \cdot \left[\frac{V_{ED}}{V_{max}} - \left(\frac{V_{ED}}{V_{max}} \right)^2 \right] \Leftrightarrow 0.5 \leq \frac{V_{ED}}{V_{max}} \leq 1 \\ H_{RD} = H_{max} \Leftrightarrow 0 \leq \frac{V_{ED}}{V_{max}} < 0.5 \end{array} \right. \text{ in condizioni non drenate (H}_{max} \text{ indicato nel seguito)}$$

- 4) dal dominio di interazione nel piano V-M, si determina il valore del momento flettente M_{RD} corrispondente al valore dell'azione verticale sollecitante di progetto V_{ED} per il quale si fornisce l'equazione:

$$M_{RD} = 0.5 \cdot B \cdot V_{ED} \left(1 - \sqrt{\frac{V_{ED}}{V_{max}}} \right) \text{ in condizioni drenate;}$$

$$M_{RD} = 4 \cdot M_{max} \cdot \left[\frac{V_{ED}}{V_{max}} - \left(\frac{V_{ED}}{V_{max}} \right)^2 \right] \text{ in condizioni non drenate;}$$

- 5) Come primo requisito è necessario che la terna delle azioni sollecitanti di progetto agenti in fondazione (V_{ED}, M_{ED}, H_{ED}) analizzata soddisfi la seguente disuguaglianza:

$$\left(\frac{H_{ED}}{H_{RD}}\right)^2 + \left(\frac{M_{ED}}{M_{RD}}\right)^2 < 1;$$

- 6) Per garantire inoltre che siano rispettati i margini di sicurezza imposti da normativa attraverso i coefficienti γ_R riportati in tabella Tab. 6.4.I del DM 14/01/2008, si richiede di verificare come illustrato ai punti 2, 3, 4 e 5 del presente elenco anche le terne di sollecitazione così composte: $(V_{ED} \cdot \gamma_R; H_{ED}; M_{ED})$ adottando i coefficienti γ_R relativi alle verifiche di capacità portante $(V_{ED}; H_{ED} \cdot \gamma_R; M_{ED})$ adottando i coefficienti γ_R relativi alle verifiche di scorrimento.

La verifica della fondazione può considerarsi soddisfatta ove siano contemporaneamente soddisfatti i requisiti riportati al punto 5 ed al punto 6.

4.1. FONDAZIONE DI LARGHEZZA B = 38.50 M E APPROFONDIMENTO D = 3.90 M

4.1.1. Carico limite finalizzato alla determinazione dei domini

Nella seguente tabella si riportano i valori di V_{max} , H_{max} , M_{max} di riferimento per le combinazioni di calcolo analizzate, parametri fondamentali per la costruzione dei domini di interazione. V_{max} rappresenta la capacità portante limite per condizioni di carico verticale centrato, H_{max} è il carico orizzontale limite in assenza di carico verticale e momento flettente (determinabile esclusivamente in condizioni non drenate), infine M_{max} rappresenta il momento flettente limite il corrispondenza di un carico verticale pari a $0.5 \cdot V_{max}$.

TABELLA 4-1: CARICHI LIMITE FINALIZZATI ALLA DETERMINAZIONE DEI DOMINI

	Stat-D	Stat-U	Sisma
$V_{max,M1}$	37984	15147	15147
$H_{max,M1}$	-	2310	2310
$M_{max,M1}$	-	56918	56918
$V_{max,M2}$	21137	11617	11617
$H_{max,M2}$	-	1650	1650
$M_{max,M2}$	-	40656	40656

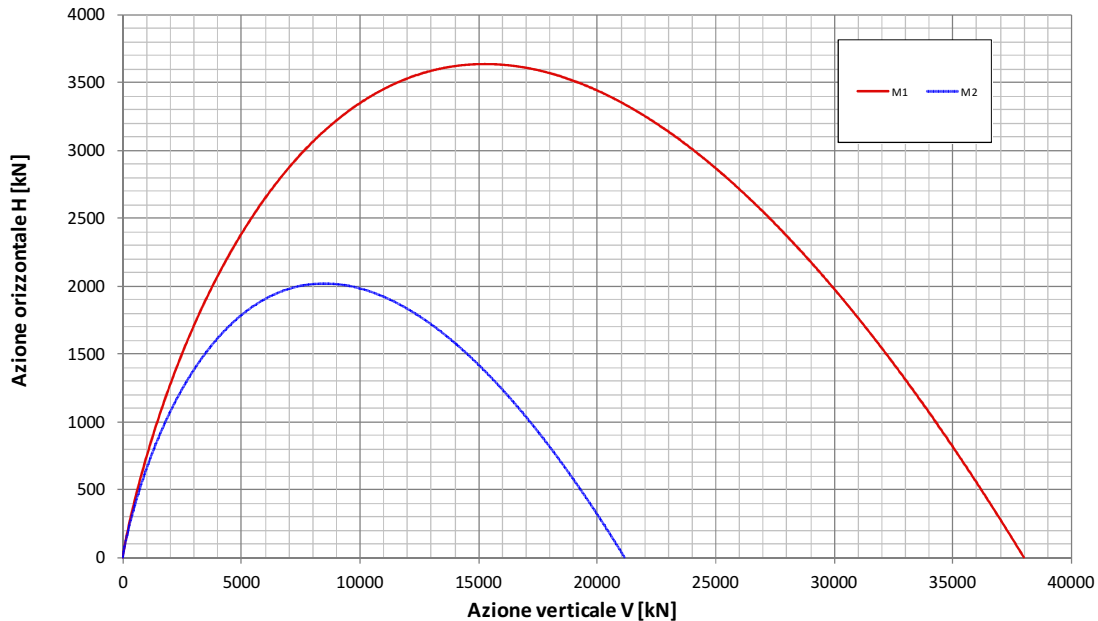
Nel caso in esame trattandosi di fondazioni nastriformi tutti i carichi indicati sono riferiti a un metro lineare di struttura.

4.1.2. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Drenata

Fondazione B=38.5m - Approfondimento D=3.9m

Condizione Statica Drenata

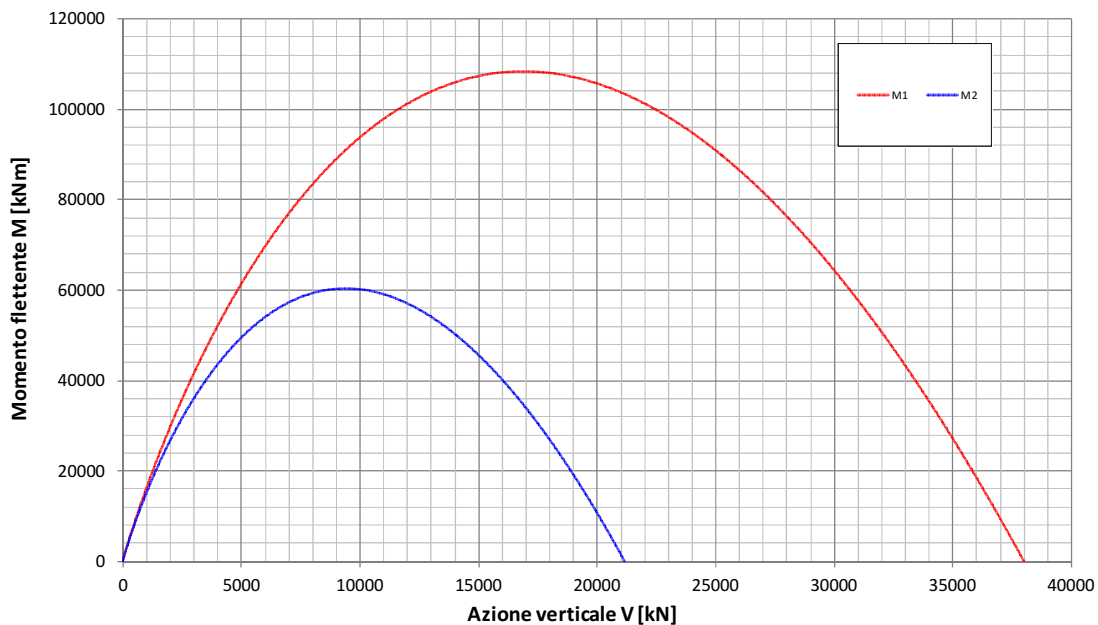
Domínio di interazione nel piano V-H (Brinch Hansen, 1970)



Fondazione B=38.5m - Approfondimento D=3.9m

Condizione Statica Drenata

Domínio di interazione nel piano V-M (Meyerhof, 1953)

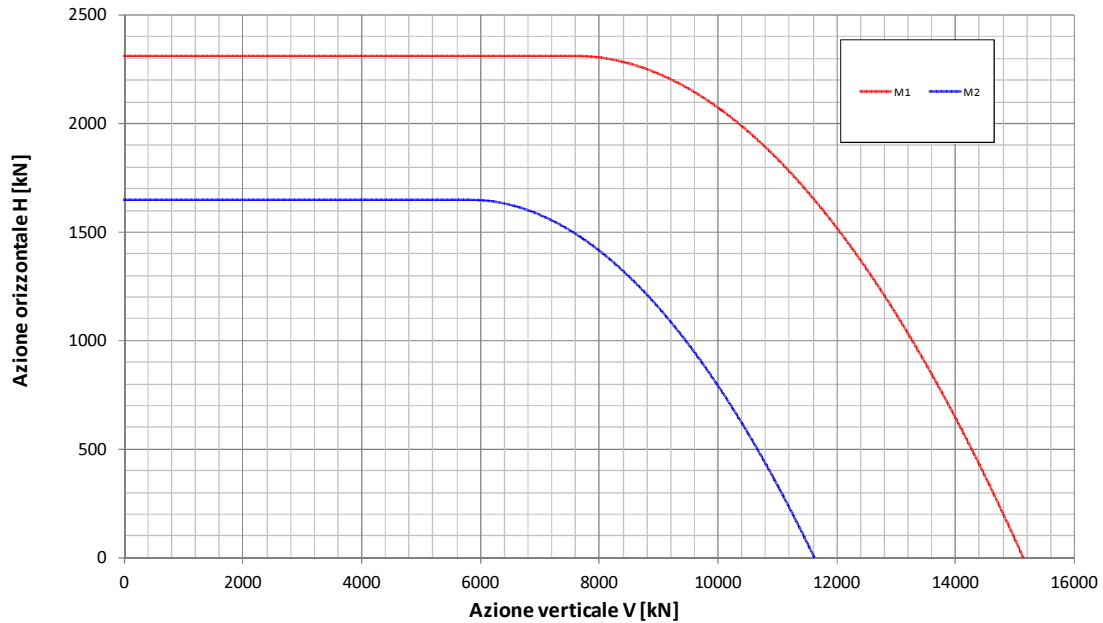


4.1.3. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Non Drenata

Fondazione B=38.5m - Approfondimento D=3.9m

Condizione Statica Non Drenata

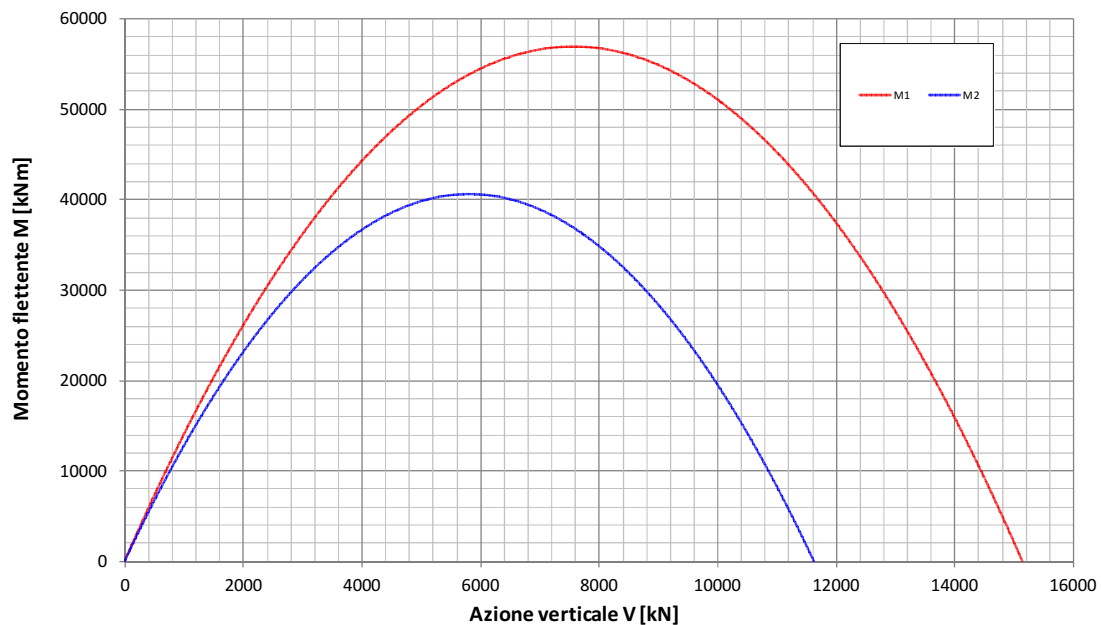
Dominio di interazione nel piano V-H (Gourvenec, 2007)



Fondazione B=38.5m - Approfondimento D=3.9m

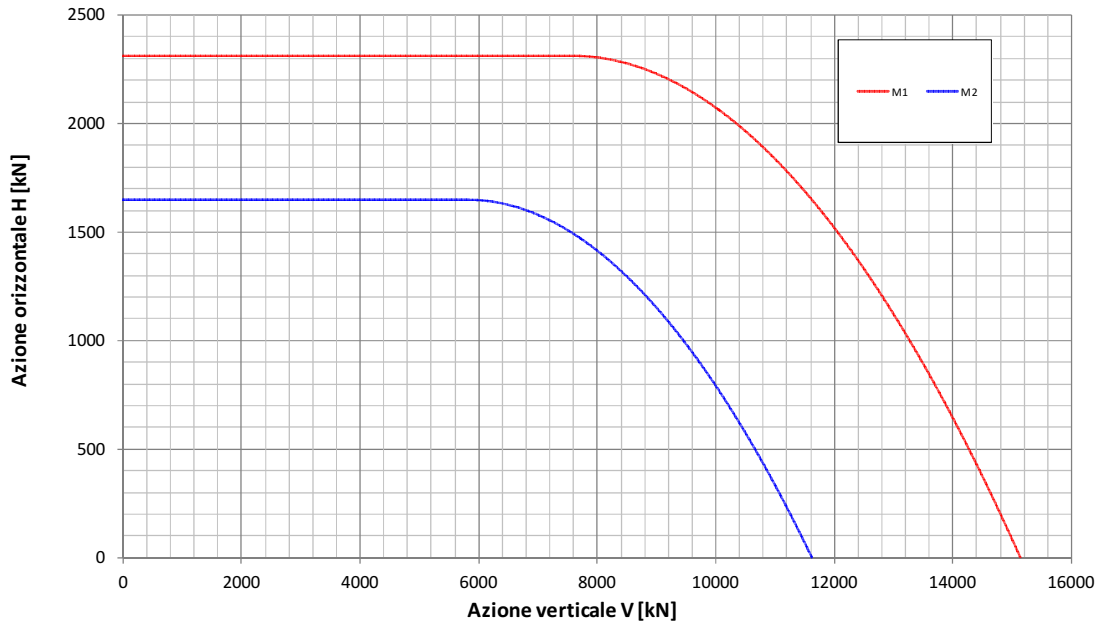
Condizione Statica Non Drenata

Dominio di interazione nel piano V-M (Gourvenec, 2007)

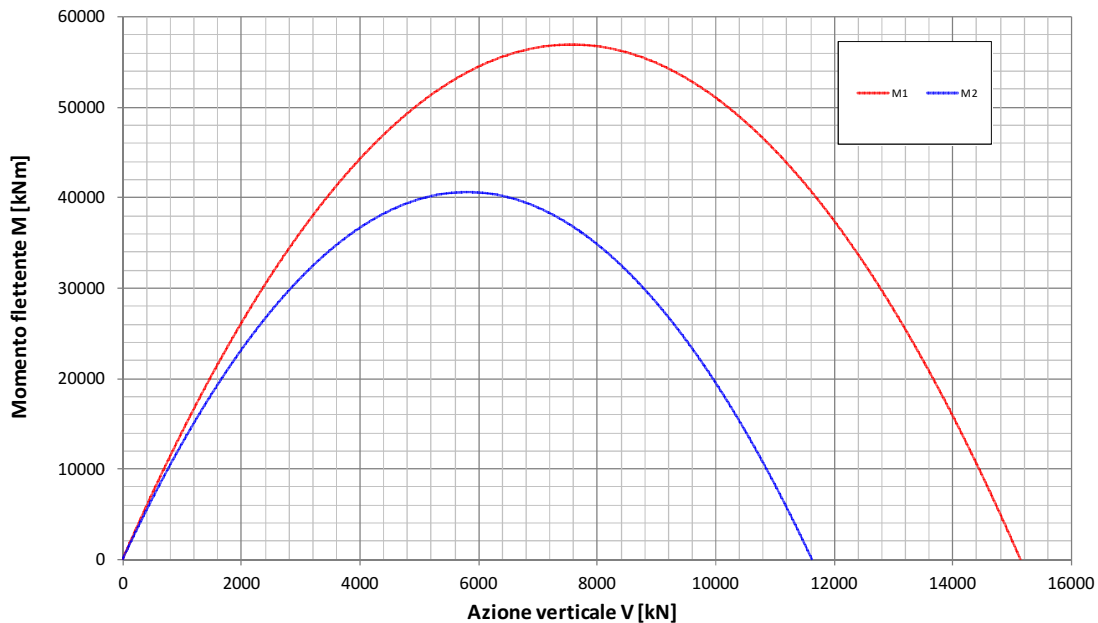


4.1.4. Diagrammi di interazione in Condizione Sismica

Fondazione B=38.5m - Approfondimento D=3.9m
Condizione Sismica Non Drenata
 Dominio di interazione nel piano V-H (Gourvenec, 2007)



Fondazione B=38.5m - Approfondimento D=3.9m
Condizione Sismica Non Drenata
 Dominio di interazione nel piano V-M (Gourvenec, 2007)



5. CAPACITÀ PORTANTE DEL PALO SINGOLO SOGGETTO A CARICHI ASSIALI

Nel seguito si riportano i calcoli di capacità portante del singolo palo di fondazione soggetto a carichi assiali di compressione e di trazione, con riferimento a pali trivellati ϕ 600 e ϕ 800.

Il calcolo viene condotto secondo i seguenti approcci con riferimento al DM 14/01/2008 Par.6.4.3:

- Approccio 1: combinazioni A1+M1+R1 e A2+M1+R2;
- Approccio 2: combinazione A1+M1+R3;

e con riferimento alla seguente bibliografia:

- AGI – Raccomandazioni sui pali di fondazione (1984);
- Poulos, Davis – Analisi e progettazione di fondazioni su pali.

I grafici sottostanti riportano le resistenze di progetto dei pali in compressione ed in trazione in funzione della lunghezza degli stessi, i calcoli sono stati svolti considerando la testa del palo alla quota di riferimento.

A seguire si riportano i tabulati di derivazione dei grafici stessi.

AMU04 - Trincee fra muri Variante San Giacomo Roncole - ZO8
NTC del 14/01/2008
Capacità portante a compressione - Pali trivellati ϕ 600mm

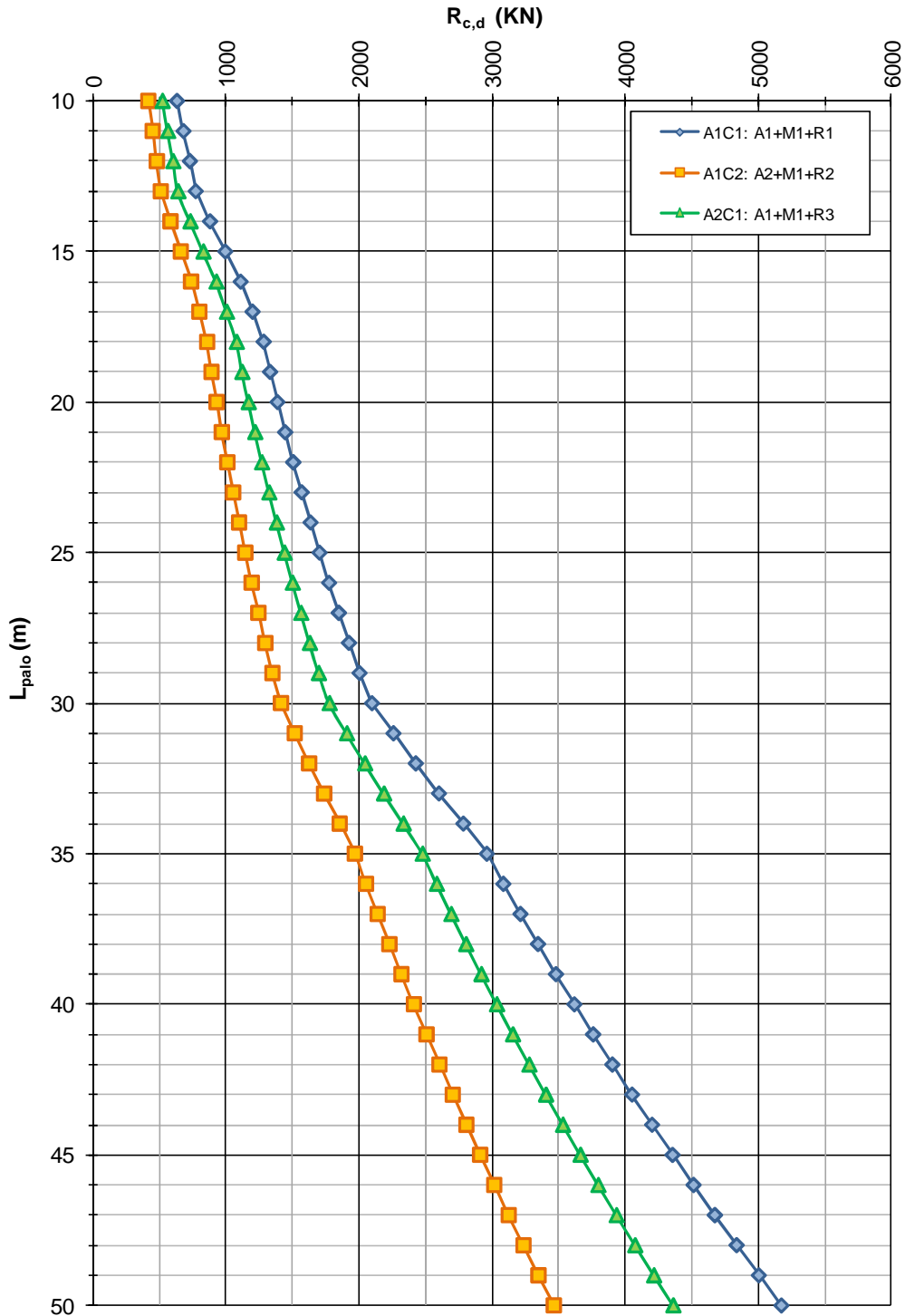


FIGURA 5-1: CAPACITÀ PORTANTE A COMPRESSIONE – PALI TRIVELLATI ϕ 600

AMU04 - Trincee fra muri Variante San Giacomo Roncole - ZO8

NTC del 14/01/2008

Capacità portante a trazione - Pali trivellati ϕ 600mm

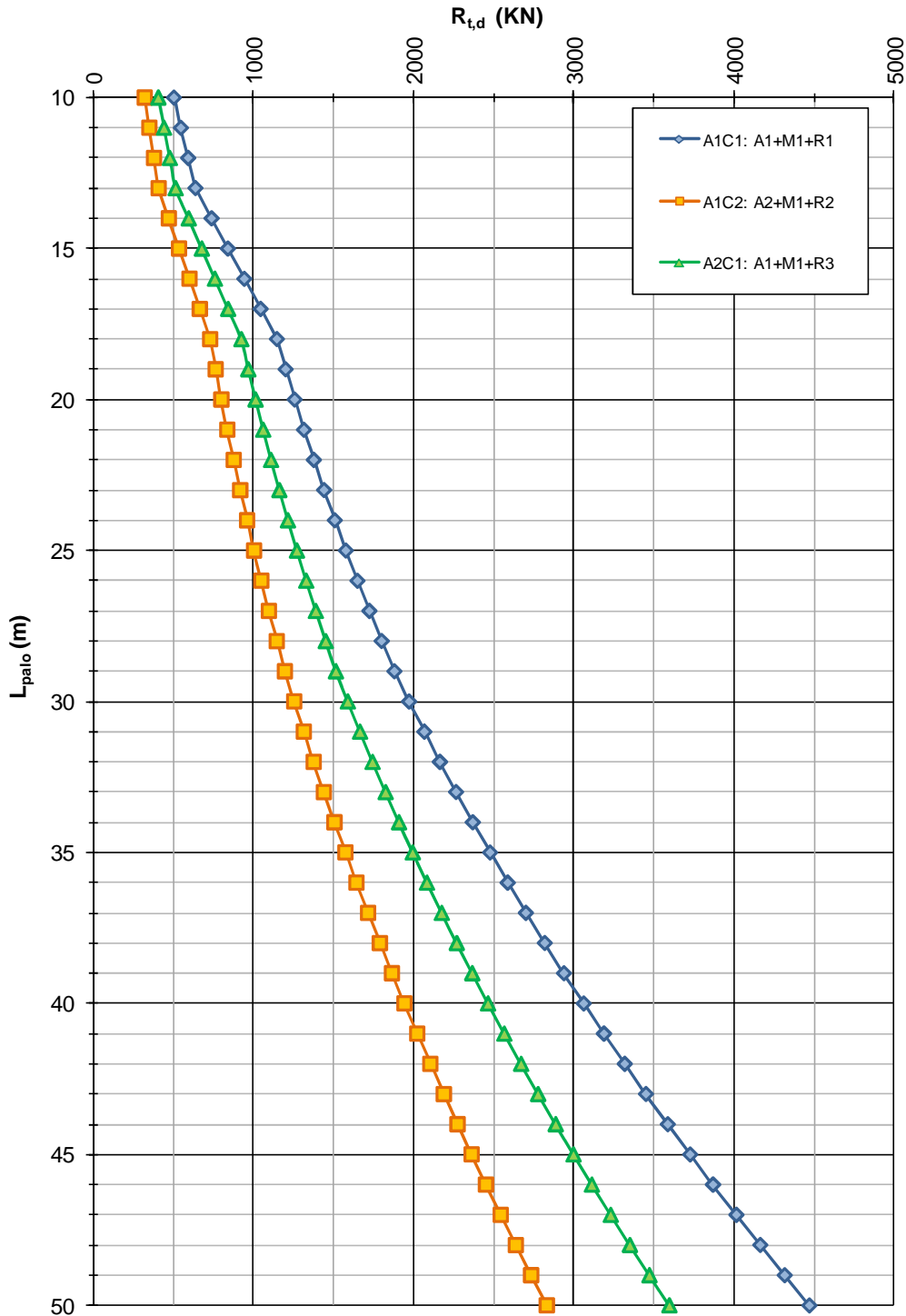


FIGURA 5-2: CAPACITÀ PORTANTE A TRAZIONE – PALI TRIVELLATI ϕ 600

AMU04 - Trincee fra muri Variante San Giacomo Roncole - ZO8

NTC del 14/01/2008

Capacità portante a compressione - Pali trivellati ϕ 800mm

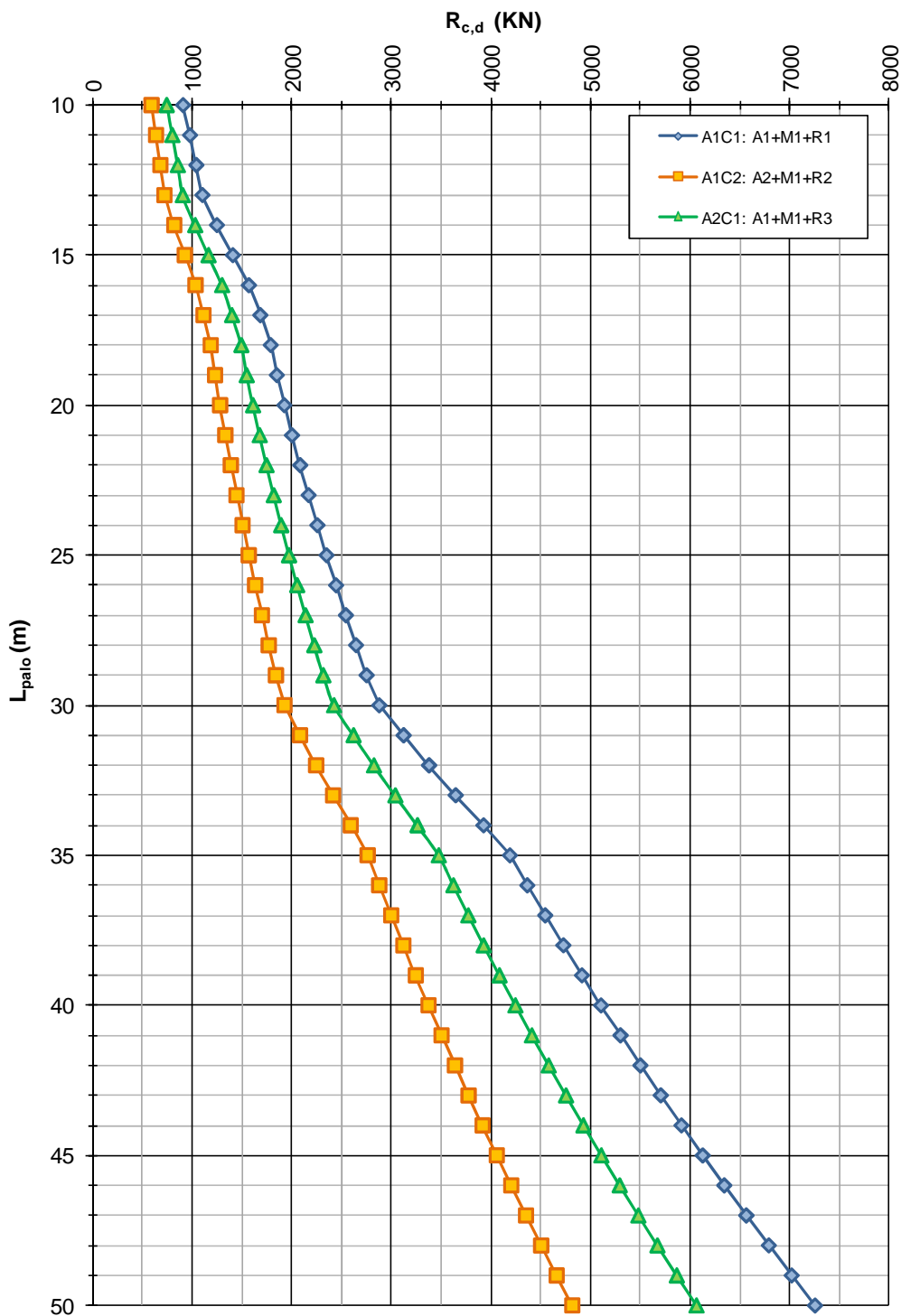


FIGURA 5-3: CAPACITÀ PORTANTE A COMPRESSIONE – PALI TRIVELLATI ϕ 800

AMU04 - Trincee fra muri Variante San Giacomo Roncole - ZO8

NTC del 14/01/2008

Capacità portante a trazione - Pali trivellati ϕ 800mm

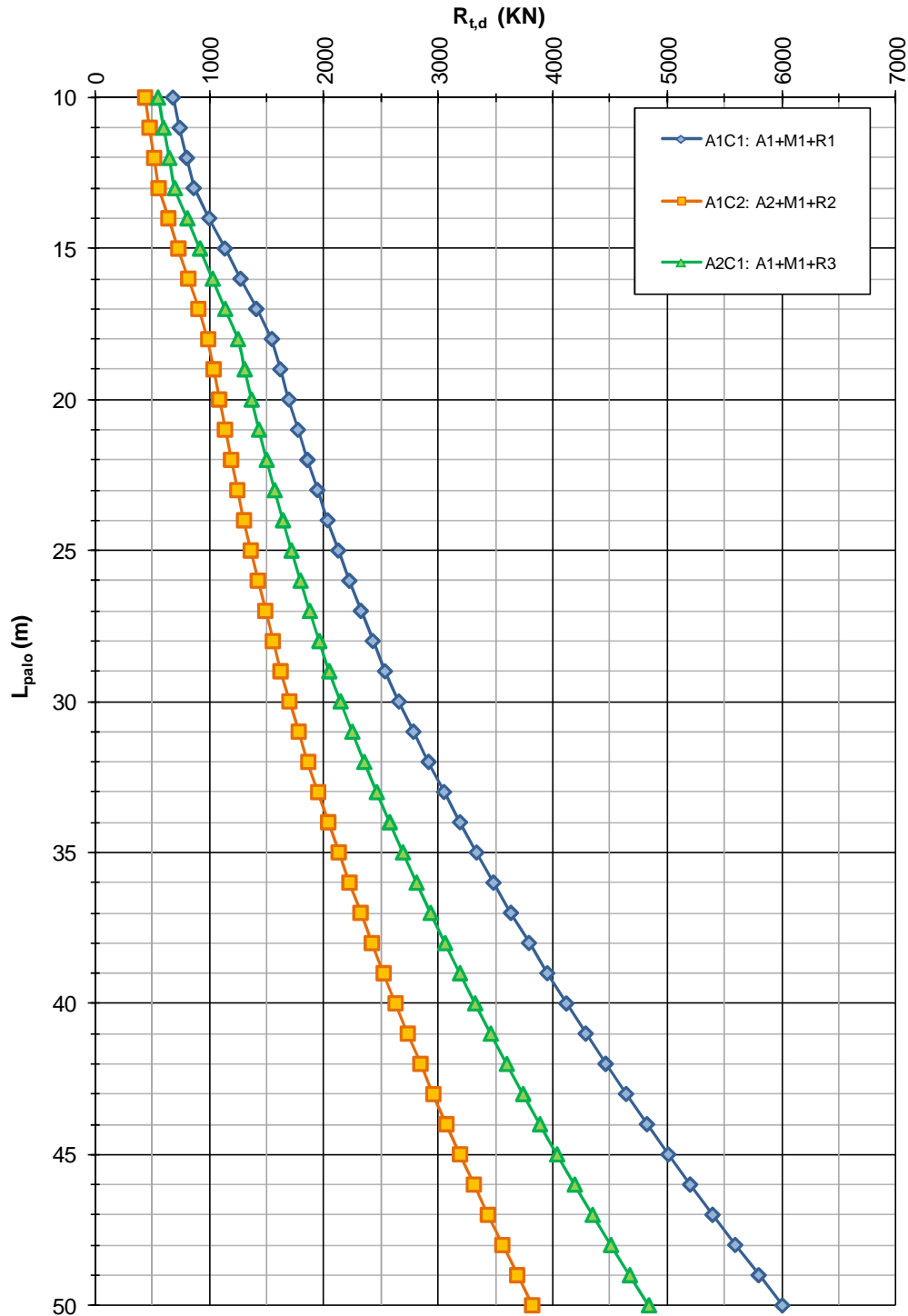


FIGURA 5-4: CAPACITÀ PORTANTE A TRAZIONE – PALI TRIVELLATI ϕ 800

Pali trivellati ϕ 600

Profondità [m]	Capacità Portante di Progetto a Compressione $R_{c,d}$ [kN]			Capacità Portante di Progetto a Trazione $R_{t,d}$ [kN]			Rigidezza assiale K_w [kN/m]
	A1C1: A1+M1+R1	A1C2: A2+M1+R2	A2C1: A1+M1+R3	A1C1: A1+M1+R1	A1C2: A2+M1+R2	A2C1: A1+M1+R3	
1.00	44.13	27.01	33.95	16.92	11.32	13.94	2092.30
2.00	174.82	108.34	136.33	67.37	43.59	54.69	8878.14
3.00	224.47	141.99	178.69	117.82	75.87	95.45	15663.98
4.00	274.13	175.65	221.05	168.27	108.14	136.20	22449.82
5.00	323.78	209.31	263.40	218.72	140.41	176.96	29235.66
6.00	377.75	245.64	309.13	270.50	173.52	218.78	36207.55
7.00	437.48	285.63	359.47	324.97	208.30	262.75	43556.05
8.00	499.90	327.48	412.14	382.13	244.77	308.87	51281.16
9.00	565.00	371.18	467.16	441.98	282.92	357.14	59382.89
10.00	632.80	416.74	524.51	504.52	322.74	407.57	67861.23
11.00	682.20	449.61	565.87	548.66	351.08	443.28	73764.53
12.00	729.57	481.38	605.84	593.72	379.98	479.73	79796.39
13.00	773.83	511.32	643.52	638.79	408.89	516.18	85828.25
14.00	881.05	583.96	735.01	739.68	472.69	597.29	99676.24
15.00	995.72	661.06	832.14	841.43	537.02	679.08	113643.38
16.00	1111.21	738.68	929.91	943.49	601.56	761.12	127655.00
17.00	1200.37	800.83	1008.20	1045.68	666.17	843.27	141684.93
18.00	1284.01	859.71	1082.38	1147.77	730.72	925.34	155700.76
19.00	1331.98	892.70	1123.90	1201.40	764.98	968.64	162931.92
20.00	1387.42	930.35	1171.29	1257.64	800.87	1014.03	170527.82
21.00	1445.46	969.80	1220.95	1316.48	838.39	1061.50	178488.46
22.00	1506.11	1011.04	1272.87	1377.93	877.53	1111.05	186813.83
23.00	1569.37	1054.08	1327.05	1441.98	918.31	1162.69	195503.95
24.00	1635.23	1098.91	1383.50	1508.64	960.71	1216.41	204558.81
25.00	1703.70	1145.54	1442.22	1577.90	1004.74	1272.21	213978.40
26.00	1774.77	1193.97	1503.20	1649.76	1050.40	1330.10	223762.73
27.00	1848.45	1244.20	1566.45	1724.24	1097.69	1390.08	233911.81
28.00	1924.73	1296.22	1631.96	1801.31	1146.60	1452.14	244425.62
29.00	2003.62	1350.04	1699.74	1881.00	1197.15	1516.28	255304.17
30.00	2097.83	1414.06	1780.37	1972.36	1254.99	1589.76	267817.92
31.00	2258.26	1517.36	1910.47	2066.92	1314.83	1665.81	280779.34
32.00	2426.05	1625.31	2046.43	2164.68	1376.68	1744.41	294188.44
33.00	2601.20	1737.90	2188.25	2265.64	1440.52	1825.57	308045.22
34.00	2783.70	1855.15	2335.93	2369.79	1506.35	1909.29	322349.68
35.00	2959.64	1968.87	2479.17	2477.14	1574.19	1995.57	337101.82
36.00	3084.83	2053.06	2585.22	2587.69	1644.03	2084.40	352301.63
37.00	3213.21	2139.44	2694.05	2701.44	1715.86	2175.80	367949.11
38.00	3344.79	2228.04	2805.66	2818.38	1789.69	2269.75	384044.28
39.00	3479.56	2318.84	2920.05	2938.53	1865.52	2366.26	400587.12
40.00	3617.54	2411.84	3037.22	3061.87	1943.35	2465.33	417577.64
41.00	3758.71	2507.05	3157.17	3188.40	2023.18	2566.95	435015.83
42.00	3903.08	2604.46	3279.90	3318.14	2105.01	2671.14	452901.71
43.00	4050.65	2704.08	3405.41	3451.07	2188.83	2777.88	471235.26
44.00	4201.41	2805.91	3533.71	3587.20	2274.66	2887.18	490016.48
45.00	4355.37	2909.94	3664.78	3726.53	2362.48	2999.04	509245.38
46.00	4512.53	3016.17	3798.63	3869.06	2452.30	3113.45	528921.96
47.00	4672.89	3124.62	3935.27	4014.78	2544.12	3230.43	549046.22
48.00	4836.45	3235.26	4074.68	4163.70	2637.94	3349.96	569618.16
49.00	5003.20	3348.11	4216.88	4315.82	2733.76	3472.05	590637.77
50.00	5173.15	3463.17	4361.85	4471.14	2831.57	3596.70	612105.06

Pali trivellati ϕ 800

Profondità [m]	Capacità Portante di Progetto a Compressione $R_{c,d}$ [kN]			Capacità Portante di Progetto a Trazione $R_{t,d}$ [kN]			Rigidità assiale K_w [kN/m]
	A1C1: A1+M1+R1	A1C2: A2+M1+R2	A2C1: A1+M1+R3	A1C1: A1+M1+R1	A1C2: A2+M1+R2	A2C1: A1+M1+R3	
1.00	71.81	43.44	54.57	23.45	15.97	19.46	2789.73
2.00	282.61	173.16	217.86	91.59	59.88	74.68	11837.52
3.00	349.34	218.14	274.43	159.74	103.79	129.90	20885.31
4.00	416.07	263.12	331.00	227.88	147.70	185.12	29933.09
5.00	482.80	308.10	387.57	296.03	191.61	240.34	38980.88
6.00	556.62	357.43	449.62	365.95	236.63	296.98	48276.73
7.00	639.47	412.43	518.82	439.45	283.89	356.49	58074.73
8.00	725.91	469.91	591.14	516.54	333.39	418.86	68374.88
9.00	815.93	529.87	666.58	597.22	385.14	484.11	79177.18
10.00	909.54	592.29	745.13	681.48	439.12	552.22	90481.64
11.00	978.63	637.80	802.36	741.22	477.78	600.72	98352.71
12.00	1043.69	681.07	856.77	802.19	517.20	650.20	106395.19
13.00	1103.24	721.10	907.10	863.15	556.62	699.67	114437.66
14.00	1249.89	819.91	1031.53	998.56	642.57	808.70	132901.65
15.00	1409.40	926.41	1165.64	1135.10	729.23	918.63	151524.50
16.00	1570.22	1033.72	1300.77	1272.06	816.15	1028.91	170206.67
17.00	1684.20	1113.49	1401.23	1409.20	903.18	1139.32	188913.24
18.00	1788.40	1187.49	1494.42	1546.20	990.12	1249.63	207601.01
19.00	1850.72	1230.30	1548.27	1618.59	1036.69	1308.24	217242.56
20.00	1925.16	1280.61	1611.55	1694.45	1085.42	1369.63	227370.42
21.00	2003.08	1333.30	1677.85	1773.78	1136.32	1433.80	237984.61
22.00	2084.48	1388.39	1747.17	1856.59	1189.40	1500.75	249085.11
23.00	2169.34	1445.88	1819.51	1942.87	1244.64	1570.48	260671.93
24.00	2257.69	1505.76	1894.87	2032.63	1302.06	1642.99	272745.08
25.00	2349.50	1568.04	1973.25	2125.85	1361.65	1718.28	285304.53
26.00	2444.79	1632.72	2054.66	2222.56	1423.40	1796.34	298350.31
27.00	2543.55	1699.79	2139.08	2322.73	1487.33	1877.19	311882.41
28.00	2645.79	1769.25	2226.52	2426.38	1553.43	1960.81	325900.82
29.00	2751.49	1841.12	2316.99	2533.51	1621.71	2047.21	340405.56
30.00	2879.25	1927.53	2425.79	2656.20	1699.71	2146.07	357090.55
31.00	3123.32	2082.79	2621.30	2783.17	1780.38	2248.35	374372.46
32.00	3379.05	2245.34	2825.99	2914.39	1863.72	2354.03	392251.26
33.00	3646.43	2415.18	3039.86	3049.88	1949.72	2463.12	410726.97
34.00	3925.46	2592.30	3262.92	3189.63	2038.38	2575.63	429799.58
35.00	4191.42	2762.18	3476.84	3333.64	2129.71	2691.55	449469.09
36.00	4365.72	2878.55	3623.41	3481.92	2223.70	2810.87	469735.50
37.00	4544.28	2997.88	3773.69	3634.46	2320.36	2933.61	490598.82
38.00	4727.10	3120.14	3927.67	3791.27	2419.68	3059.76	512059.04
39.00	4914.18	3245.34	4085.37	3952.34	2521.67	3189.32	534116.16
40.00	5105.53	3373.48	4246.77	4117.67	2626.32	3322.29	556770.18
41.00	5301.15	3504.56	4411.87	4287.27	2733.64	3458.67	580021.11
42.00	5501.02	3638.58	4580.69	4461.13	2843.62	3598.46	603868.94
43.00	5705.16	3775.55	4753.21	4639.25	2956.27	3741.66	628313.67
44.00	5913.57	3915.45	4929.44	4821.64	3071.58	3888.28	653355.31
45.00	6126.23	4058.29	5109.38	5008.29	3189.56	4038.30	678993.85
46.00	6343.16	4204.08	5293.02	5199.21	3310.20	4191.74	705229.29
47.00	6564.36	4352.80	5480.37	5394.39	3433.51	4348.58	732061.63
48.00	6789.82	4504.47	5671.43	5593.83	3559.48	4508.84	759490.87
49.00	7019.54	4659.07	5866.20	5797.53	3688.11	4672.51	787517.02
50.00	7253.52	4816.62	6064.68	6005.50	3819.41	4839.59	816140.07

6. CAPACITÀ PORTANTE DEL PALO SINGOLO SOGGETTO A CARICHI TRASVERSALI

Nel seguito si riportano i calcoli di capacità portante del singolo palo di fondazione soggetto a carichi trasversali, con riferimento a pali trivellati ϕ 600 e ϕ 800.

Il calcolo viene condotto secondo i seguenti approcci con riferimento al DM 14/01/2008 Par.6.4.3:

- Approccio 1: combinazioni A1+M1+R1 e A2+M1+R2;
- Approccio 2: combinazione A1+M1+R3;

e con riferimento alla seguente bibliografia:

- AGI – Raccomandazioni sui pali di fondazione (1984);
- Viggiani C. – Fondazioni – Hevelius Edizioni
- Frank R. - Calcul des fondations superficielles et profondes – Techniques de l'ingénieur (IT) – Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées
- Poulus H.G., Davis E.H. – Analisi e progettazione di fondazioni su pali – Libreria Dario Flaccovio Editrice.

I grafici sottostanti riportano le resistenze di progetto dei pali in funzione del momento resistente della sezione, i calcoli sono stati svolti considerando la testa del palo libera di ruotare alla quota di riferimento.

Le campiture del grafico e la relativa lunghezza di palo indicano la lunghezza minima necessaria per poter esplicitare i valori di capacità portante orizzontali propri del campo.

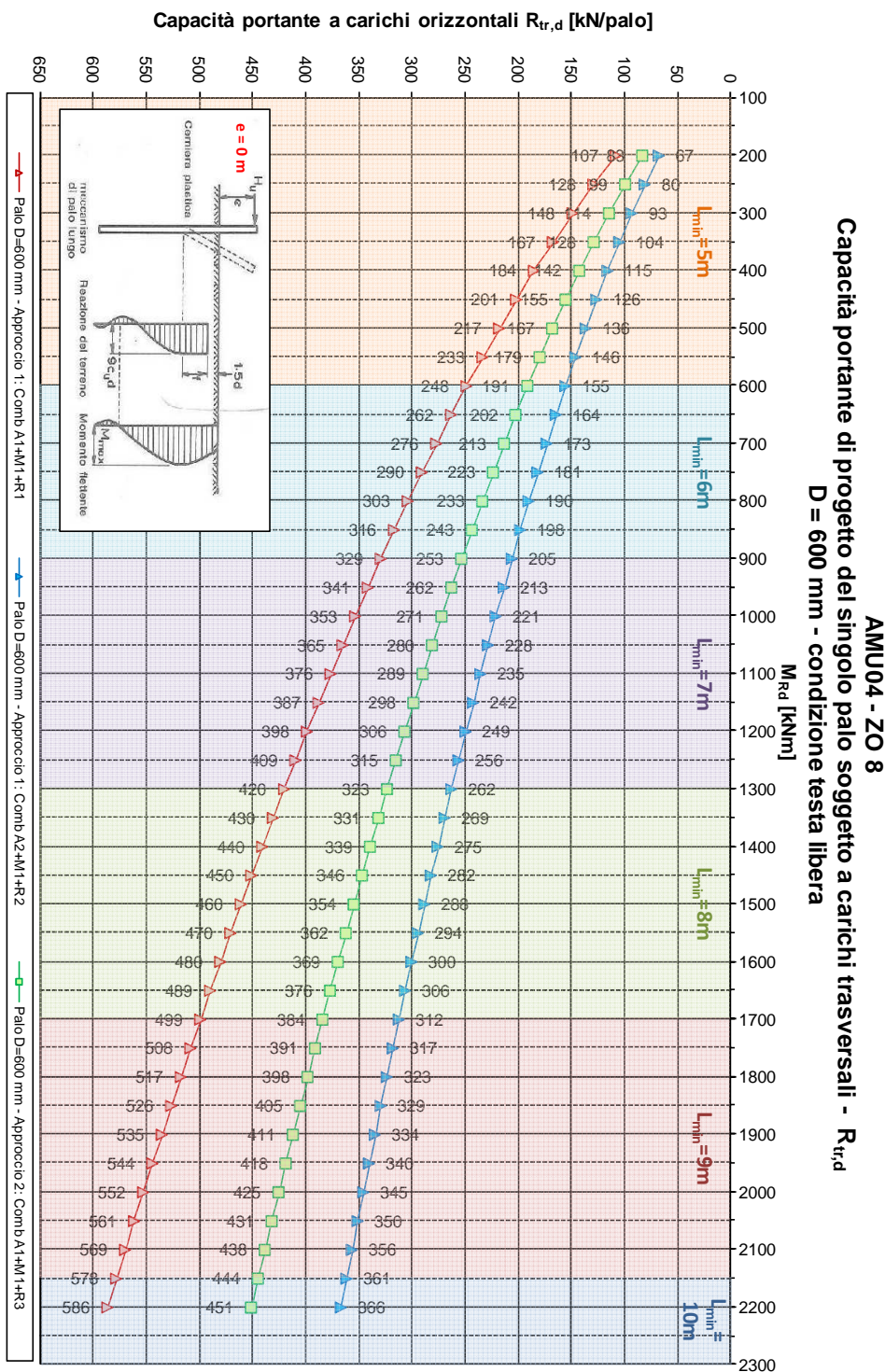


FIGURA 6-1: CAPACITÀ PORTANTE ORIZZONTALE – PALI TRIVELLATI ϕ 600

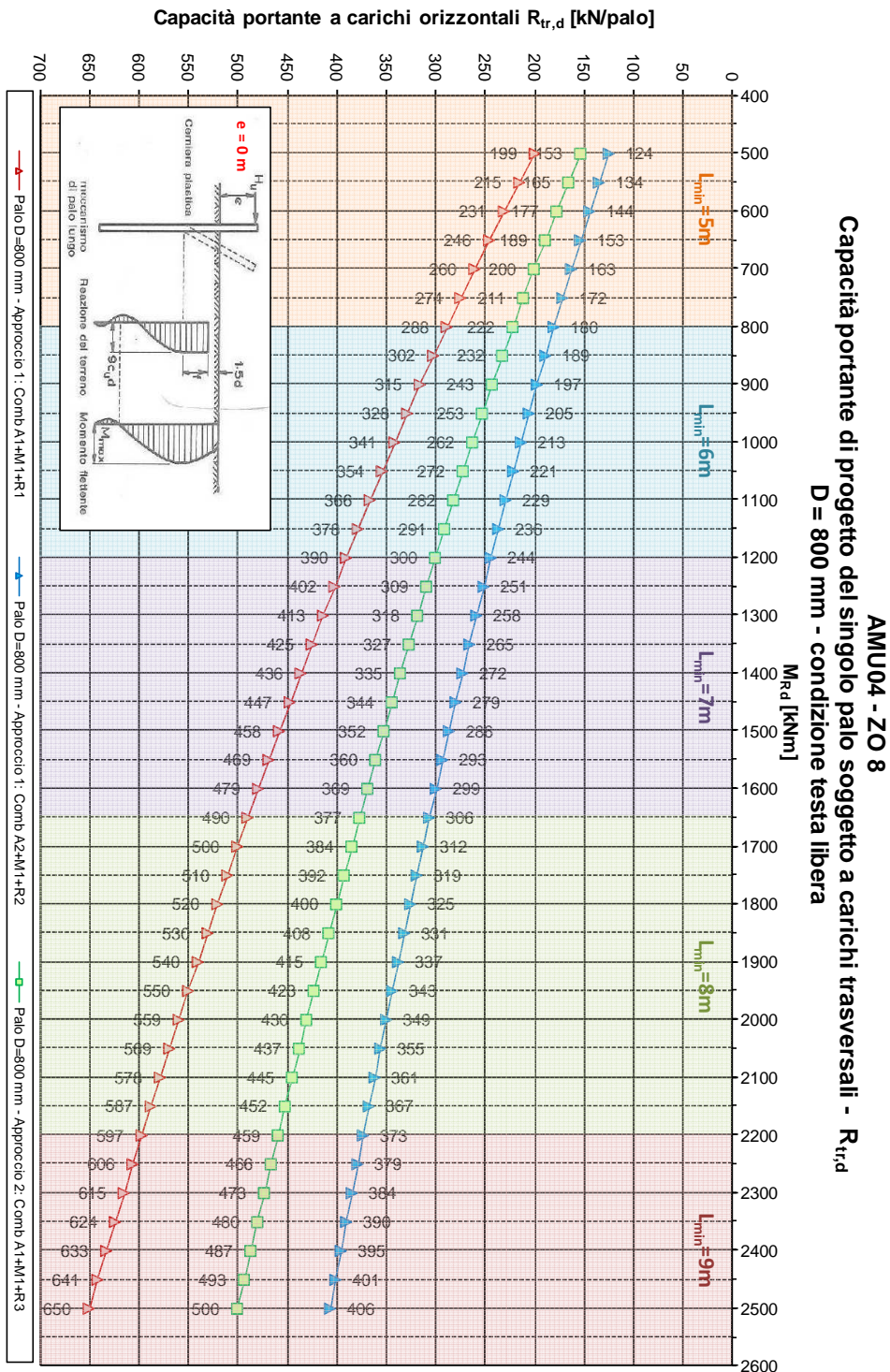


FIGURA 6-2: CAPACITÀ PORTANTE ORIZZONTALE – PALI TRIVELLATI ϕ 800

7. ANDAMENTO DELLE SOLLECITAZIONI NEL PALO SINGOLO SOGGETTO A CARICHI ORIZZONTALI

Il comportamento del palo soggetto ai carichi trasversali al proprio asse (forze orizzontali e momenti flettenti) può essere rappresentato dalla teoria elastica di Matlock e Reese (1960).

Il calcolo viene condotto con riferimento alla seguente bibliografia:

- Viggiani C. – Fondazioni – Hevelius Edizioni
- Poulos H.G., Davis E.H. – Analisi e progettazione di fondazioni su pali – Libreria Dario Flaccovio Editrice.

La valutazione delle sollecitazioni lungo il palo singolo caricato da una forza orizzontale (H) e da un momento in testa (M) viene effettuata secondo la teoria sopracitata per un modulo unitario (1000 kN).

Le grandezze così calcolate, in ragione della linearità del metodo, potranno essere combinate linearmente a seconda delle azioni di progetto.

Di seguito si riportano i grafici di momento flettente, taglio, spostamento e rotazione per i pali trivellati ϕ 600 e ϕ 8000. A seguire si riportano i tabulati di derivazione dei grafici stessi.

Pali di fondazione da p.c. - AMU04 - ZO 8
Diagrammi di sollecitazione flettente e tagliante per un'azione orizzontale di 500kN
D = 600 mm - libero in testa

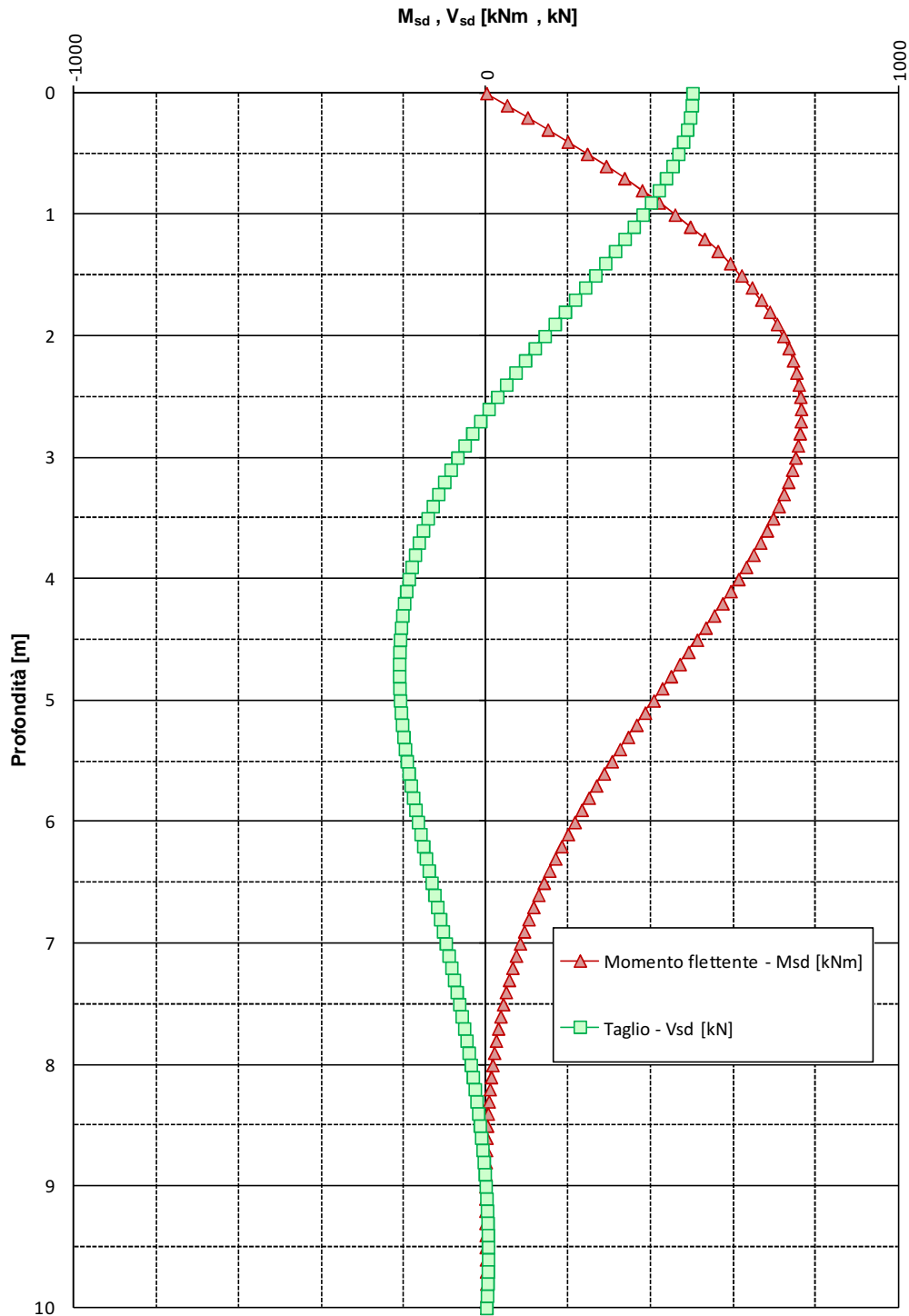


FIGURA 7-1: ANDAMENTO DELLE SOLLECITAZIONI FLETTENTE E TAGLIANTE – PALI TRIVELLATI ϕ 600 (TAGLIO IN TESTA)

Pali di fondazione da p.c. - AMU04 - ZO 8
Diagrammi di spostamento e rotazione per un'azione orizzontale di 500kN
D = 600 mm - libero in testa

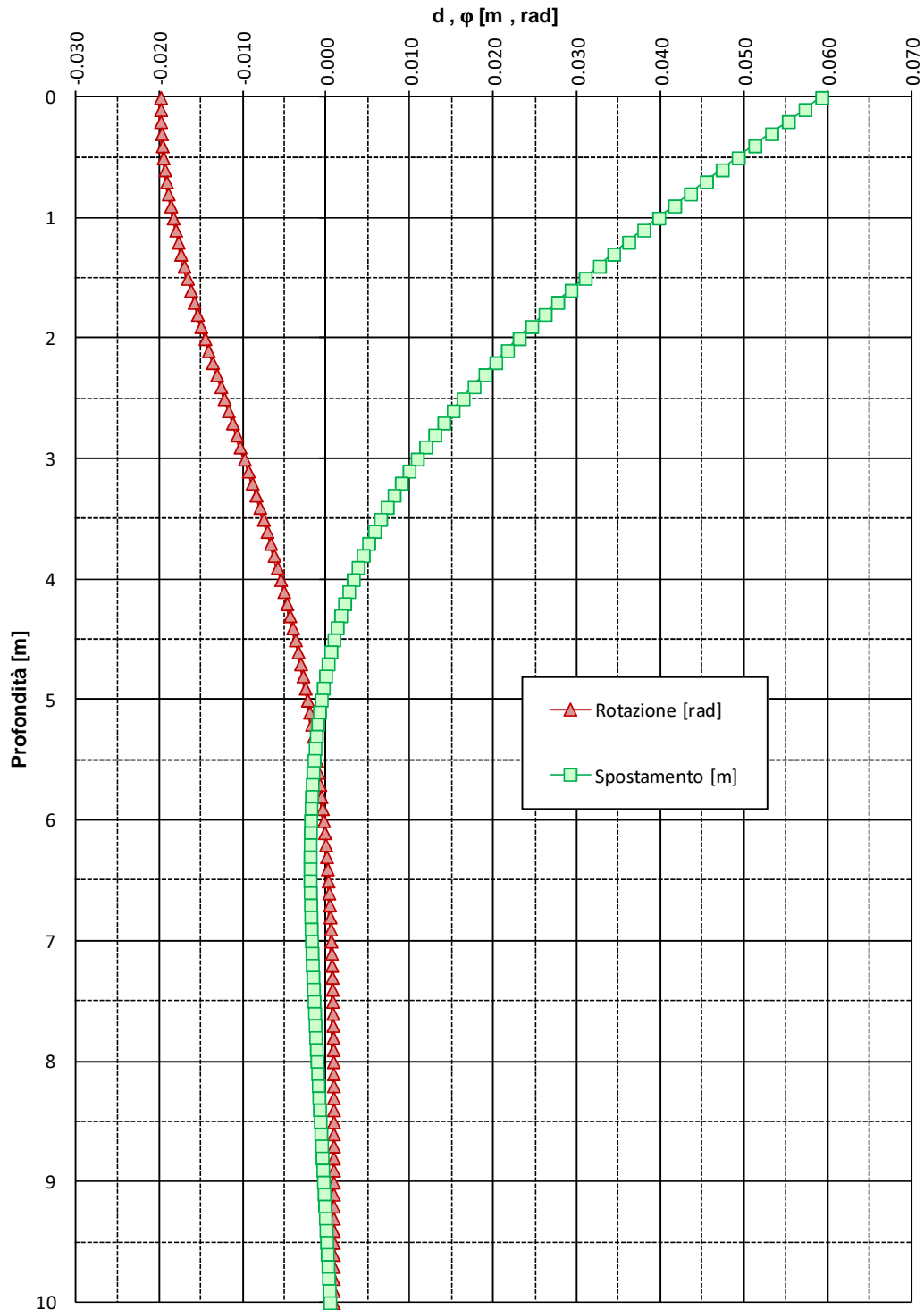


FIGURA 7-2: SPOSTAMENTI E ROTAZIONI – PALI TRIVELLATI ϕ 600 (TAGLIO IN TESTA)

Pali di fondazione da p.c. - AMU04 - ZO 8
Diagrammi di sollecitazione flettente e tagliante per un momento in testa di 500kN
D = 600 mm - libero in testa

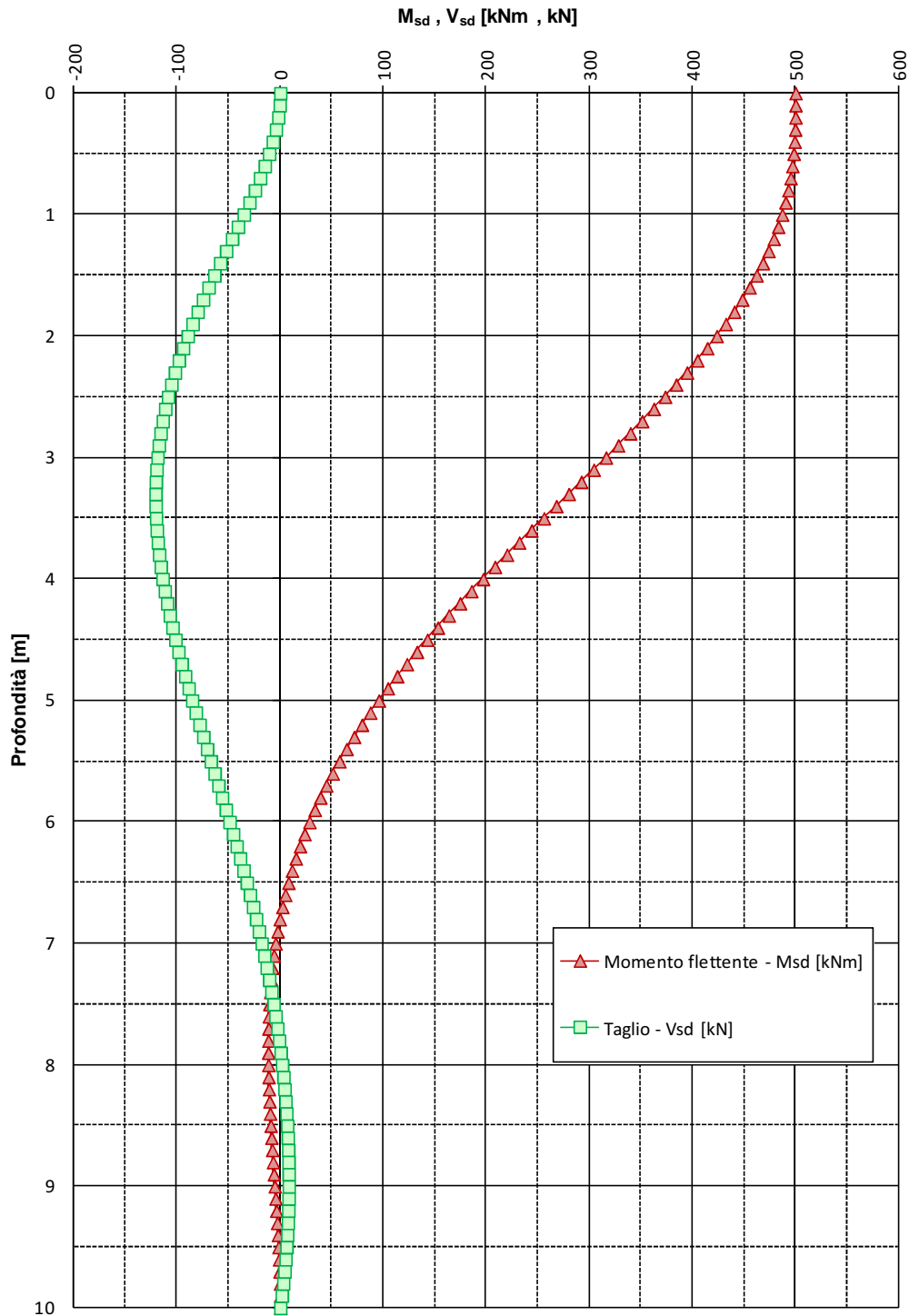


FIGURA 7-3: ANDAMENTO DELLE SOLLECITAZIONI FLETTENTE E TAGLIANTE – PALI TRIVELLATI ϕ 600 (MOMENTO IN TESTA)

Pali di fondazione da p.c. - AMU04 - ZO 8
Diagrammi di spostamento e rotazione per un momento in testa di 500kN
D = 600 mm - libero in testa

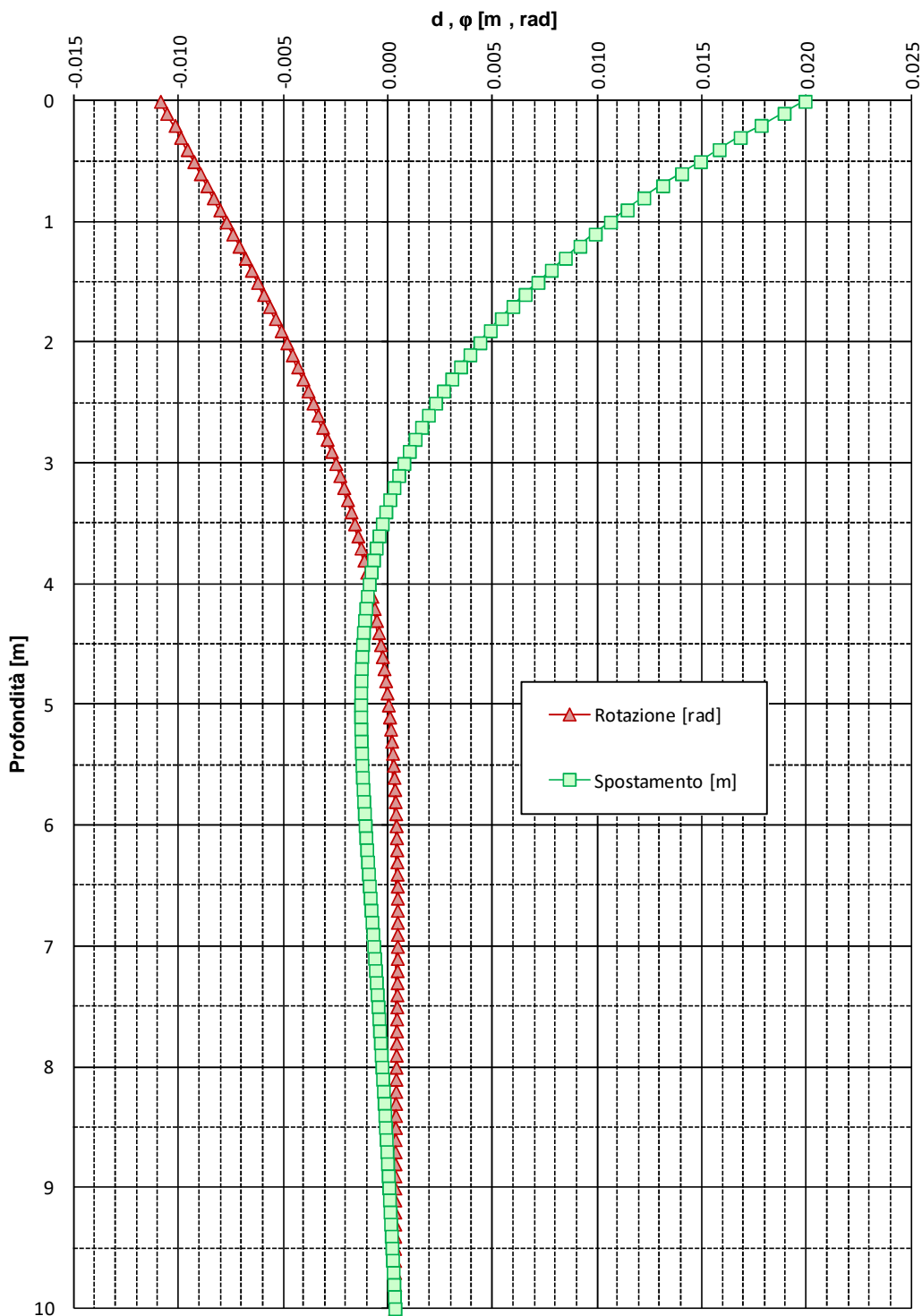


FIGURA 7-4: SPOSTAMENTI E ROTAZIONI – PALI TRIVELLATI ϕ 600 (MOMENTO IN TESTA)

Pali di fondazione da p.c. - AMU04 - ZO 8
Diagrammi di sollecitazione flettente e tagliante per un'azione orizzontale di 500kN
D = 800 mm - libero in testa

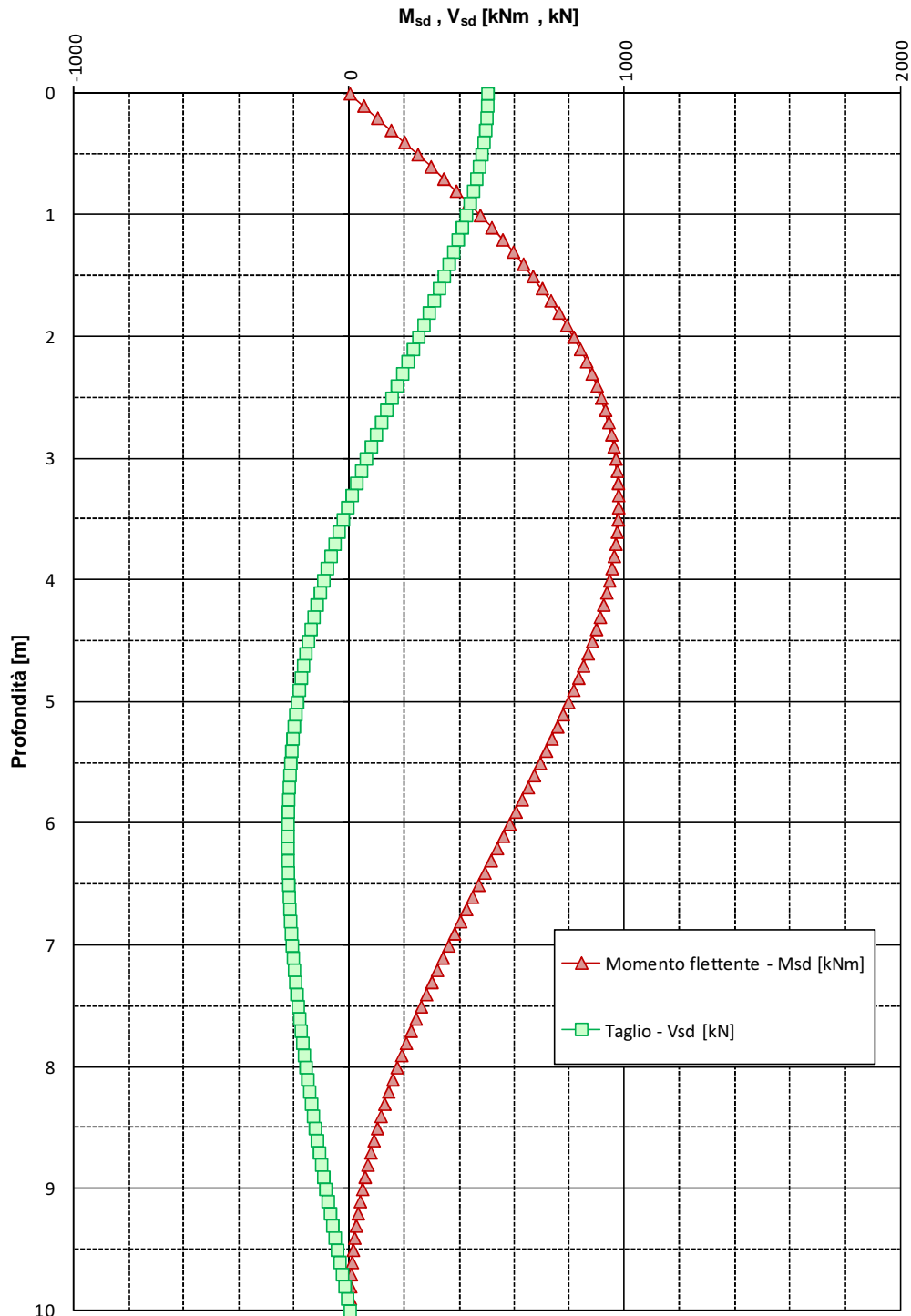


FIGURA 7-5: ANDAMENTO DELLE SOLLECITAZIONI FLETTENTE E TAGLIANTE – PALI TRIVELLATI ϕ 800 (TAGLIO IN TESTA)

Pali di fondazione da p.c. - AMU04 - ZO 8
 Diagrammi di spostamento e rotazione per un'azione orizzontale di 500kN
D = 800 mm - libero in testa

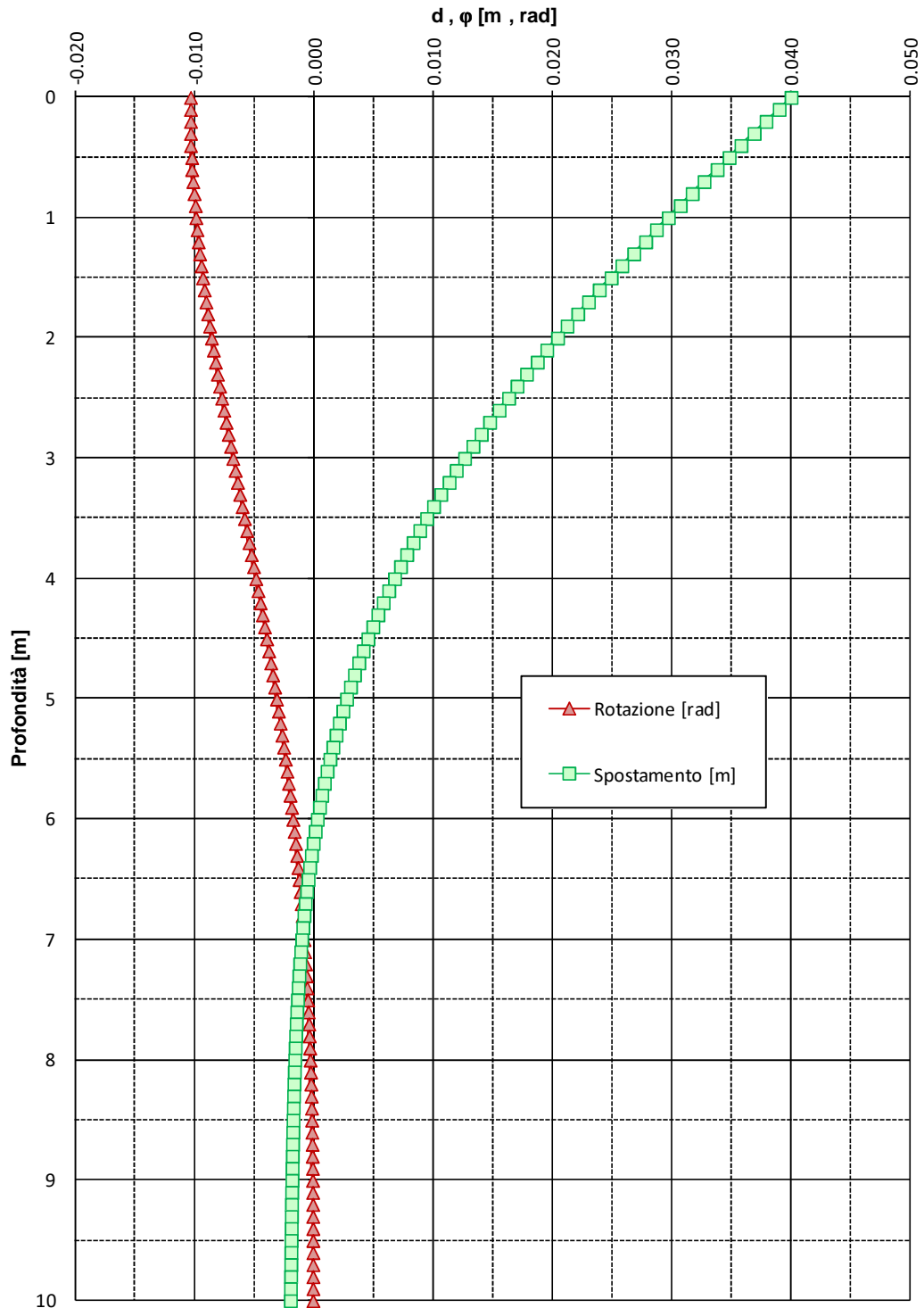


FIGURA 7-6: SPOSTAMENTI E ROTAZIONI – PALI TRIVELLATI φ 800 (TAGLIO IN TESTA)

Pali di fondazione da p.c. - AMU04 - ZO 8
Diagrammi di sollecitazione flettente e tagliante per un momento in testa di 500kN
D = 800 mm - libero in testa

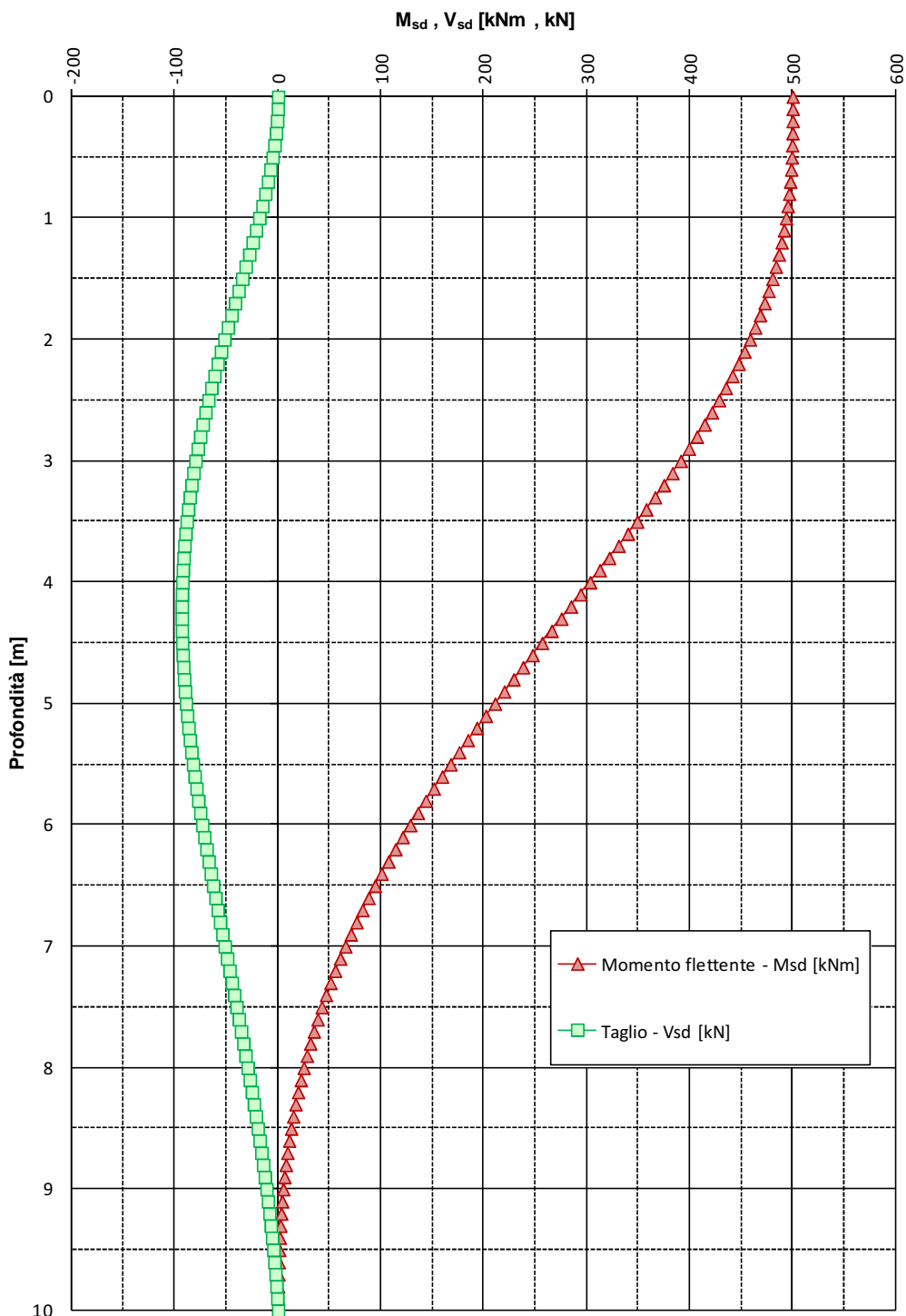


FIGURA 7-7: ANDAMENTO DELLE SOLLECITAZIONI FLETTENTE E TAGLIANTE – PALI TRIVELLATI ϕ 800 (MOMENTO IN TESTA)

Pali di fondazione da p.c. - AMU04 - ZO 8
 Diagrammi di spostamento e rotazione per un momento in testa di 500kN
D = 800 mm - libero in testa
 d, φ [m , rad]

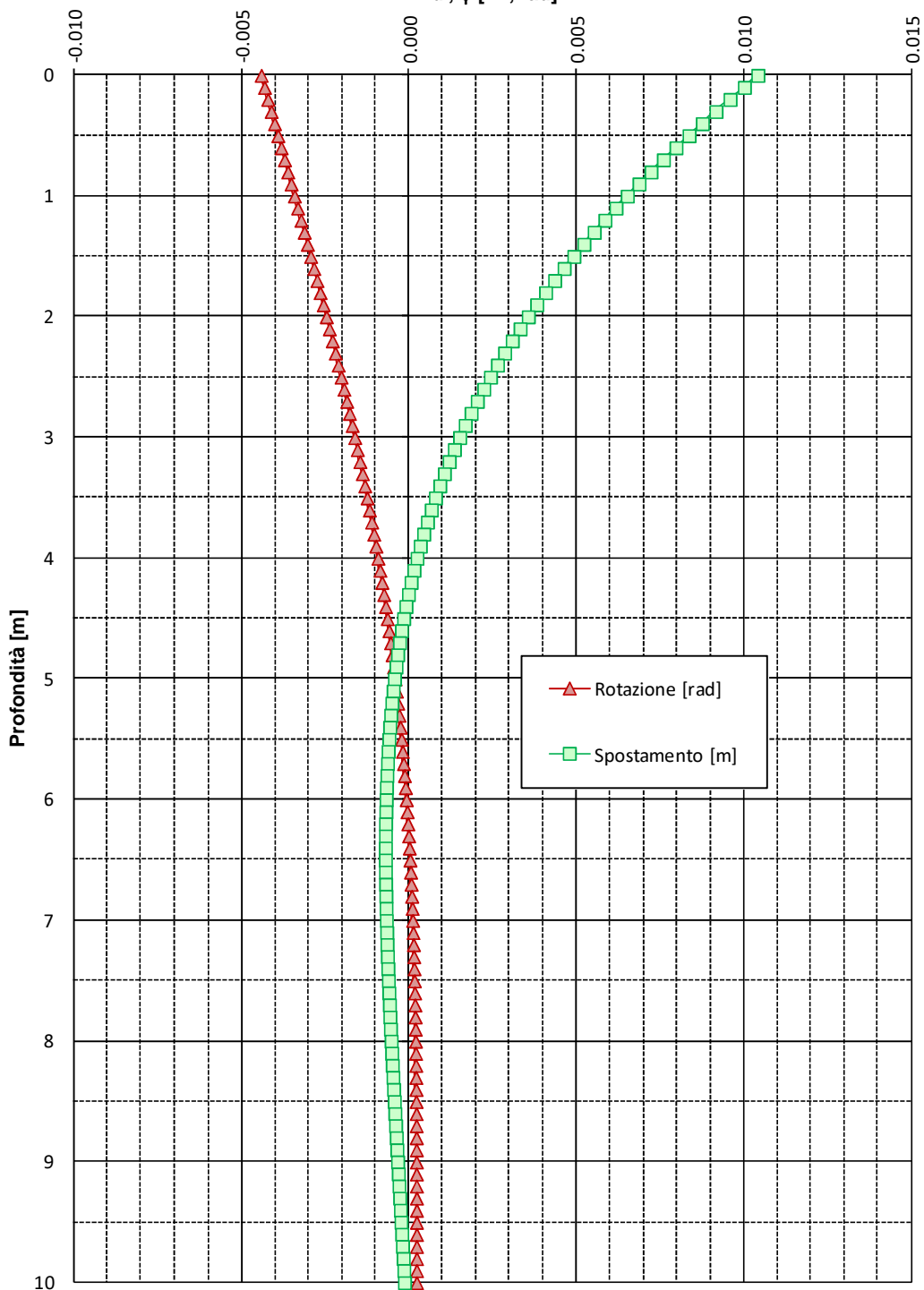


FIGURA 7-8: SPOSTAMENTI E ROTAZIONI – PALI TRIVELLATI φ 800 (MOMENTO IN TESTA)

Pali trivellati ϕ 600 (TAGLIO IN TESTA)

Profondità	Spostamento	Rotazione	Momento	Taglio	Profondità	Spostamento	Rotazione	Momento	Taglio
0.00	0.06	-0.02	0.00	500.00	5.10	0.00	0.00	384.64	-207.26
0.10	0.06	-0.02	50.00	498.50	5.20	0.00	0.00	364.04	-204.53
0.20	0.06	-0.02	99.70	494.09	5.30	0.00	0.00	343.74	-201.24
0.30	0.05	-0.02	148.82	487.00	5.40	0.00	0.00	323.79	-197.43
0.40	0.05	-0.02	197.10	477.42	5.50	0.00	0.00	304.25	-193.14
0.50	0.05	-0.02	244.30	465.56	5.60	0.00	0.00	285.17	-188.41
0.60	0.05	-0.02	290.21	451.62	5.70	0.00	0.00	266.57	-183.29
0.70	0.05	-0.02	334.63	435.81	5.80	0.00	0.00	248.51	-177.82
0.80	0.04	-0.02	377.37	418.32	5.90	0.00	0.00	231.01	-172.04
0.90	0.04	-0.02	418.29	399.34	6.00	0.00	0.00	214.10	-165.99
1.00	0.04	-0.02	457.24	379.06	6.10	0.00	0.00	197.81	-159.70
1.10	0.04	-0.02	494.10	357.66	6.20	0.00	0.00	182.16	-153.23
1.20	0.04	-0.02	528.77	335.32	6.30	0.00	0.00	167.16	-146.59
1.30	0.03	-0.02	561.17	312.20	6.40	0.00	0.00	152.84	-139.83
1.40	0.03	-0.02	591.21	288.47	6.50	0.00	0.00	139.20	-132.98
1.50	0.03	-0.02	618.86	264.29	6.60	0.00	0.00	126.24	-126.07
1.60	0.03	-0.02	644.07	239.80	6.70	0.00	0.00	113.98	-119.13
1.70	0.03	-0.02	666.82	215.15	6.80	0.00	0.00	102.42	-112.20
1.80	0.03	-0.02	687.10	190.47	6.90	0.00	0.00	91.55	-105.29
1.90	0.02	-0.02	704.91	165.88	7.00	0.00	0.00	81.36	-98.44
2.00	0.02	-0.01	720.28	141.51	7.10	0.00	0.00	71.86	-91.67
2.10	0.02	-0.01	733.21	117.46	7.20	0.00	0.00	63.03	-85.01
2.20	0.02	-0.01	743.77	93.83	7.30	0.00	0.00	54.86	-78.47
2.30	0.02	-0.01	751.98	70.73	7.40	0.00	0.00	47.33	-72.08
2.40	0.02	-0.01	757.91	48.23	7.50	0.00	0.00	40.44	-65.85
2.50	0.02	-0.01	761.63	26.42	7.60	0.00	0.00	34.16	-59.80
2.60	0.02	-0.01	763.20	5.36	7.70	0.00	0.00	28.48	-53.95
2.70	0.01	-0.01	762.70	-14.88	7.80	0.00	0.00	23.37	-48.32
2.80	0.01	-0.01	760.22	-34.25	7.90	0.00	0.00	18.82	-42.91
2.90	0.01	-0.01	755.85	-52.71	8.00	0.00	0.00	14.79	-37.75
3.00	0.01	-0.01	749.68	-70.20	8.10	0.00	0.00	11.27	-32.83
3.10	0.01	-0.01	741.81	-86.71	8.20	0.00	0.00	8.22	-28.19
3.20	0.01	-0.01	732.34	-102.20	8.30	0.00	0.00	5.63	-23.82
3.30	0.01	-0.01	721.37	-116.65	8.40	0.00	0.00	3.46	-19.74
3.40	0.01	-0.01	709.01	-130.04	8.50	0.00	0.00	1.68	-15.95
3.50	0.01	-0.01	695.36	-142.39	8.60	0.00	0.00	0.27	-12.46
3.60	0.01	-0.01	680.53	-153.66	8.70	0.00	0.00	-0.81	-9.29
3.70	0.00	-0.01	664.63	-163.89	8.80	0.00	0.00	-1.59	-6.44
3.80	0.00	-0.01	647.75	-173.08	8.90	0.00	0.00	-2.10	-3.92
3.90	0.00	-0.01	630.02	-181.19	9.00	0.00	0.00	-2.37	-1.73
4.00	0.00	-0.01	611.52	-188.31	9.10	0.00	0.00	-2.44	0.11
4.10	0.00	-0.01	592.35	-194.42	9.20	0.00	0.00	-2.35	1.60
4.20	0.00	0.00	572.63	-199.56	9.30	0.00	0.00	-2.12	2.73
4.30	0.00	0.00	552.44	-203.75	9.40	0.00	0.00	-1.80	3.50
4.40	0.00	0.00	531.88	-207.02	9.50	0.00	0.00	-1.42	3.90
4.50	0.00	0.00	511.04	-209.41	9.60	0.00	0.00	-1.02	3.91
4.60	0.00	0.00	490.00	-210.95	9.70	0.00	0.00	-0.64	3.53
4.70	0.00	0.00	468.85	-211.68	9.80	0.00	0.00	-0.32	2.76
4.80	0.00	0.00	447.66	-211.63	9.90	0.00	0.00	-0.09	1.59
4.90	0.00	0.00	426.52	-210.85	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	0.00	0.00	405.49	-209.38					

Pali trivellati ϕ 600 (MOMENTO IN TESTA)

Profondità	Spostamento	Rotazione	Momento	Taglio	Profondità	Spostamento	Rotazione	Momento	Taglio
[m]	[cm]	[rad]	[kNm]	[kN]	[m]	[cm]	[rad]	[kNm]	[kN]
0.00	0.02	-0.01	500.00	0.00	5.10	0.00	0.00	87.31	-81.94
0.10	0.02	-0.01	500.00	-0.50	5.20	0.00	0.00	79.29	-78.34
0.20	0.02	-0.01	499.90	-1.93	5.30	0.00	0.00	71.64	-74.71
0.30	0.02	-0.01	499.61	-4.19	5.40	0.00	0.00	64.35	-71.05
0.40	0.02	-0.01	499.06	-7.19	5.50	0.00	0.00	57.43	-67.38
0.50	0.01	-0.01	498.18	-10.81	5.60	0.00	0.00	50.88	-63.71
0.60	0.01	-0.01	496.90	-14.98	5.70	0.00	0.00	44.69	-60.04
0.70	0.01	-0.01	495.18	-19.60	5.80	0.00	0.00	38.87	-56.41
0.80	0.01	-0.01	492.98	-24.58	5.90	0.00	0.00	33.41	-52.81
0.90	0.01	-0.01	490.26	-29.86	6.00	0.00	0.00	28.31	-49.25
1.00	0.01	-0.01	487.01	-35.36	6.10	0.00	0.00	23.56	-45.75
1.10	0.01	-0.01	483.19	-41.02	6.20	0.00	0.00	19.16	-42.32
1.20	0.01	-0.01	478.80	-46.76	6.30	0.00	0.00	15.09	-38.95
1.30	0.01	-0.01	473.84	-52.53	6.40	0.00	0.00	11.37	-35.67
1.40	0.01	-0.01	468.30	-58.28	6.50	0.00	0.00	7.96	-32.48
1.50	0.01	-0.01	462.18	-63.96	6.60	0.00	0.00	4.87	-29.38
1.60	0.01	-0.01	455.51	-69.52	6.70	0.00	0.00	2.08	-26.38
1.70	0.01	-0.01	448.28	-74.92	6.80	0.00	0.00	-0.41	-23.49
1.80	0.01	-0.01	440.52	-80.13	6.90	0.00	0.00	-2.61	-20.70
1.90	0.00	-0.01	432.25	-85.11	7.00	0.00	0.00	-4.55	-18.03
2.00	0.00	0.00	423.50	-89.83	7.10	0.00	0.00	-6.22	-15.48
2.10	0.00	0.00	414.29	-94.27	7.20	0.00	0.00	-7.64	-13.05
2.20	0.00	0.00	404.65	-98.41	7.30	0.00	0.00	-8.83	-10.74
2.30	0.00	0.00	394.61	-102.23	7.40	0.00	0.00	-9.79	-8.56
2.40	0.00	0.00	384.20	-105.71	7.50	0.00	0.00	-10.54	-6.51
2.50	0.00	0.00	373.47	-108.85	7.60	0.00	0.00	-11.09	-4.58
2.60	0.00	0.00	362.43	-111.63	7.70	0.00	0.00	-11.46	-2.79
2.70	0.00	0.00	351.14	-114.05	7.80	0.00	0.00	-11.65	-1.13
2.80	0.00	0.00	339.62	-116.10	7.90	0.00	0.00	-11.69	0.40
2.90	0.00	0.00	327.92	-117.79	8.00	0.00	0.00	-11.57	1.79
3.00	0.00	0.00	316.06	-119.12	8.10	0.00	0.00	-11.33	3.05
3.10	0.00	0.00	304.10	-120.09	8.20	0.00	0.00	-10.96	4.17
3.20	0.00	0.00	292.05	-120.71	8.30	0.00	0.00	-10.49	5.16
3.30	0.00	0.00	279.95	-120.98	8.40	0.00	0.00	-9.93	6.01
3.40	0.00	0.00	267.85	-120.91	8.50	0.00	0.00	-9.29	6.72
3.50	0.00	0.00	255.77	-120.52	8.60	0.00	0.00	-8.59	7.29
3.60	0.00	0.00	243.75	-119.81	8.70	0.00	0.00	-7.83	7.73
3.70	0.00	0.00	231.81	-118.81	8.80	0.00	0.00	-7.04	8.02
3.80	0.00	0.00	219.99	-117.51	8.90	0.00	0.00	-6.23	8.17
3.90	0.00	0.00	208.31	-115.94	9.00	0.00	0.00	-5.41	8.18
4.00	0.00	0.00	196.80	-114.12	9.10	0.00	0.00	-4.59	8.05
4.10	0.00	0.00	185.48	-112.06	9.20	0.00	0.00	-3.80	7.77
4.20	0.00	0.00	174.39	-109.77	9.30	0.00	0.00	-3.04	7.34
4.30	0.00	0.00	163.53	-107.28	9.40	0.00	0.00	-2.33	6.76
4.40	0.00	0.00	152.93	-104.59	9.50	0.00	0.00	-1.69	6.03
4.50	0.00	0.00	142.61	-101.74	9.60	0.00	0.00	-1.13	5.14
4.60	0.00	0.00	132.58	-98.73	9.70	0.00	0.00	-0.66	4.10
4.70	0.00	0.00	122.86	-95.58	9.80	0.00	0.00	-0.31	2.90
4.80	0.00	0.00	113.47	-92.31	9.90	0.00	0.00	-0.08	1.53
4.90	0.00	0.00	104.40	-88.93	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	0.00	0.00	405.49	-209.38					

Pali trivellati ϕ 800 (TAGLIO IN TESTA)

Profondità	Spostamento	Rotazione	Momento	Taglio	Profondità	Spostamento	Rotazione	Momento	Taglio
[m]	[cm]	[rad]	[kNm]	[kN]	[m]	[cm]	[rad]	[kNm]	[kN]
0.00	0.04	-0.01	0.00	500.00	5.10	0.00	0.00	773.59	-197.50
0.10	0.04	-0.01	50.00	499.08	5.20	0.00	0.00	753.56	-202.95
0.20	0.04	-0.01	99.82	496.37	5.30	0.00	0.00	733.01	-207.78
0.30	0.04	-0.01	149.27	491.96	5.40	0.00	0.00	712.00	-212.03
0.40	0.04	-0.01	198.21	485.96	5.50	0.00	0.00	690.60	-215.68
0.50	0.03	-0.01	246.46	478.46	5.60	0.00	0.00	668.86	-218.77
0.60	0.03	-0.01	293.90	469.56	5.70	0.00	0.00	646.85	-221.29
0.70	0.03	-0.01	340.38	459.35	5.80	0.00	0.00	624.60	-223.27
0.80	0.03	-0.01	385.77	447.93	5.90	0.00	0.00	602.19	-224.72
0.90	0.03	-0.01	429.96	435.40	6.00	0.00	0.00	579.66	-225.65
1.00	0.03	-0.01	472.85	421.84	6.10	0.00	0.00	557.06	-226.08
1.10	0.03	-0.01	514.33	407.34	6.20	0.00	0.00	534.45	-226.02
1.20	0.03	-0.01	554.32	392.00	6.30	0.00	0.00	511.86	-225.50
1.30	0.03	-0.01	592.73	375.90	6.40	0.00	0.00	489.35	-224.52
1.40	0.03	-0.01	629.50	359.12	6.50	0.00	0.00	466.95	-223.10
1.50	0.02	-0.01	664.55	341.75	6.60	0.00	0.00	444.73	-221.26
1.60	0.02	-0.01	697.85	323.88	6.70	0.00	0.00	422.70	-219.02
1.70	0.02	-0.01	729.33	305.56	6.80	0.00	0.00	400.92	-216.39
1.80	0.02	-0.01	758.96	286.90	6.90	0.00	0.00	379.42	-213.39
1.90	0.02	-0.01	786.71	267.94	7.00	0.00	0.00	358.24	-210.03
2.00	0.02	-0.01	812.55	248.77	7.10	0.00	0.00	337.42	-206.34
2.10	0.02	-0.01	836.46	229.46	7.20	0.00	0.00	316.98	-202.31
2.20	0.02	-0.01	858.44	210.07	7.30	0.00	0.00	296.95	-197.98
2.30	0.02	-0.01	878.48	190.65	7.40	0.00	0.00	277.38	-193.35
2.40	0.02	-0.01	896.57	171.28	7.50	0.00	0.00	258.28	-188.43
2.50	0.02	-0.01	912.73	152.01	7.60	0.00	0.00	239.69	-183.25
2.60	0.02	-0.01	926.97	132.88	7.70	0.00	0.00	221.64	-177.81
2.70	0.01	-0.01	939.31	113.96	7.80	0.00	0.00	204.13	-172.12
2.80	0.01	-0.01	949.76	95.28	7.90	0.00	0.00	187.21	-166.20
2.90	0.01	-0.01	958.37	76.90	8.00	0.00	0.00	170.89	-160.05
3.00	0.01	-0.01	965.14	58.86	8.10	0.00	0.00	155.20	-153.69
3.10	0.01	-0.01	970.14	41.19	8.20	0.00	0.00	140.16	-147.12
3.20	0.01	-0.01	973.38	23.93	8.30	0.00	0.00	125.78	-140.36
3.30	0.01	-0.01	974.92	7.11	8.40	0.00	0.00	112.08	-133.41
3.40	0.01	-0.01	974.80	-9.23	8.50	0.00	0.00	99.10	-126.28
3.50	0.01	-0.01	973.08	-25.07	8.60	0.00	0.00	86.83	-118.97
3.60	0.01	-0.01	969.79	-40.38	8.70	0.00	0.00	75.30	-111.49
3.70	0.01	-0.01	965.00	-55.15	8.80	0.00	0.00	64.53	-103.84
3.80	0.01	-0.01	958.76	-69.34	8.90	0.00	0.00	54.53	-96.03
3.90	0.01	-0.01	951.13	-82.96	9.00	0.00	0.00	45.32	-88.07
4.00	0.01	0.00	942.17	-95.97	9.10	0.00	0.00	36.92	-79.95
4.10	0.01	0.00	931.94	-108.37	9.20	0.00	0.00	29.34	-71.67
4.20	0.01	0.00	920.50	-120.14	9.30	0.00	0.00	22.59	-63.24
4.30	0.01	0.00	907.91	-131.29	9.40	0.00	0.00	16.69	-54.66
4.40	0.00	0.00	894.24	-141.80	9.50	0.00	0.00	11.65	-45.93
4.50	0.00	0.00	879.55	-151.67	9.60	0.00	0.00	7.50	-37.05
4.60	0.00	0.00	863.91	-160.90	9.70	0.00	0.00	4.24	-28.02
4.70	0.00	0.00	847.37	-169.49	9.80	0.00	0.00	1.90	-18.83
4.80	0.00	0.00	830.01	-177.44	9.90	0.00	0.00	0.48	-9.49
4.90	0.00	0.00	811.88	-184.75	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	0.00	0.00	793.06	-191.44					

Pali trivellati ϕ 800 (MOMENTO IN TESTA)

Profondità	Spostamento	Rotazione	Momento	Taglio	Profondità	Spostamento	Rotazione	Momento	Taglio
[m]	[cm]	[rad]	[kNm]	[kN]	[m]	[cm]	[rad]	[kNm]	[kN]
0.00	0.01	0.00	500.00	0.00	5.10	0.00	0.00	201.80	-88.31
0.10	0.01	0.00	500.00	-0.24	5.20	0.00	0.00	193.03	-87.07
0.20	0.01	0.00	499.95	-0.92	5.30	0.00	0.00	184.39	-85.71
0.30	0.01	0.00	499.82	-2.03	5.40	0.00	0.00	175.89	-84.26
0.40	0.01	0.00	499.55	-3.50	5.50	0.00	0.00	167.54	-82.70
0.50	0.01	0.00	499.11	-5.31	5.60	0.00	0.00	159.35	-81.05
0.60	0.01	0.00	498.48	-7.43	5.70	0.00	0.00	151.33	-79.32
0.70	0.01	0.00	497.63	-9.81	5.80	0.00	0.00	143.49	-77.50
0.80	0.01	0.00	496.52	-12.43	5.90	0.00	0.00	135.83	-75.62
0.90	0.01	0.00	495.14	-15.25	6.00	0.00	0.00	128.36	-73.66
1.00	0.01	0.00	493.47	-18.24	6.10	0.00	0.00	121.10	-71.65
1.10	0.01	0.00	491.50	-21.38	6.20	0.00	0.00	114.03	-69.58
1.20	0.01	0.00	489.20	-24.64	6.30	0.00	0.00	107.18	-67.46
1.30	0.01	0.00	486.57	-27.99	6.40	0.00	0.00	100.54	-65.30
1.40	0.01	0.00	483.60	-31.40	6.50	0.00	0.00	94.12	-63.10
1.50	0.00	0.00	480.29	-34.86	6.60	0.00	0.00	87.92	-60.88
1.60	0.00	0.00	476.63	-38.35	6.70	0.00	0.00	81.95	-58.63
1.70	0.00	0.00	472.62	-41.83	6.80	0.00	0.00	76.20	-56.36
1.80	0.00	0.00	468.26	-45.30	6.90	0.00	0.00	70.67	-54.07
1.90	0.00	0.00	463.56	-48.73	7.00	0.00	0.00	65.38	-51.78
2.00	0.00	0.00	458.51	-52.12	7.10	0.00	0.00	60.32	-49.49
2.10	0.00	0.00	453.14	-55.43	7.20	0.00	0.00	55.48	-47.20
2.20	0.00	0.00	447.43	-58.66	7.30	0.00	0.00	50.88	-44.92
2.30	0.00	0.00	441.40	-61.80	7.40	0.00	0.00	46.50	-42.65
2.40	0.00	0.00	435.07	-64.83	7.50	0.00	0.00	42.35	-40.40
2.50	0.00	0.00	428.44	-67.75	7.60	0.00	0.00	38.42	-38.17
2.60	0.00	0.00	421.52	-70.54	7.70	0.00	0.00	34.71	-35.96
2.70	0.00	0.00	414.33	-73.19	7.80	0.00	0.00	31.23	-33.79
2.80	0.00	0.00	406.88	-75.70	7.90	0.00	0.00	27.96	-31.65
2.90	0.00	0.00	399.19	-78.05	8.00	0.00	0.00	24.90	-29.54
3.00	0.00	0.00	391.27	-80.26	8.10	0.00	0.00	22.05	-27.48
3.10	0.00	0.00	383.14	-82.30	8.20	0.00	0.00	19.40	-25.46
3.20	0.00	0.00	374.81	-84.17	8.30	0.00	0.00	16.95	-23.49
3.30	0.00	0.00	366.30	-85.88	8.40	0.00	0.00	14.70	-21.57
3.40	0.00	0.00	357.63	-87.41	8.50	0.00	0.00	12.64	-19.71
3.50	0.00	0.00	348.82	-88.78	8.60	0.00	0.00	10.76	-17.90
3.60	0.00	0.00	339.88	-89.97	8.70	0.00	0.00	9.06	-16.15
3.70	0.00	0.00	330.83	-90.99	8.80	0.00	0.00	7.53	-14.47
3.80	0.00	0.00	321.68	-91.84	8.90	0.00	0.00	6.17	-12.85
3.90	0.00	0.00	312.46	-92.51	9.00	0.00	0.00	4.96	-11.30
4.00	0.00	0.00	303.18	-93.01	9.10	0.00	0.00	3.91	-9.82
4.10	0.00	0.00	293.86	-93.35	9.20	0.00	0.00	3.00	-8.41
4.20	0.00	0.00	284.51	-93.52	9.30	0.00	0.00	2.23	-7.07
4.30	0.00	0.00	275.15	-93.53	9.40	0.00	0.00	1.58	-5.81
4.40	0.00	0.00	265.80	-93.38	9.50	0.00	0.00	1.06	-4.64
4.50	0.00	0.00	256.48	-93.08	9.60	0.00	0.00	0.66	-3.54
4.60	0.00	0.00	247.19	-92.63	9.70	0.00	0.00	0.35	-2.52
4.70	0.00	0.00	237.95	-92.04	9.80	0.00	0.00	0.15	-1.60
4.80	0.00	0.00	228.78	-91.30	9.90	0.00	0.00	0.04	-0.75
4.90	0.00	0.00	219.69	-90.43	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	0.00	0.00	793.06	-191.44					

8. CAPACITÀ PORTANTE DEI PALI IN GRUPPO SOGGETTI A CARICHI ASSIALI

Il carico limite $Q_{lim,N}$ di un gruppo di N pali differisce, in generale, dal prodotto del carico limite Q_{lim} del singolo palo per il numero N dei pali del gruppo.

Si pone:

$$Q_{lim,N} = N \cdot E_v \cdot Q_{lim}$$

dove il fattore E è detto efficienza della palificata.

Tale carico limite viene confrontato in fase progettuale con l'azione verticale P totale agente sulla palificata (ipotesi di palificata soggetta a solo carico verticale e quindi distribuzione uniforme del carico P sui pali).

In realtà, l'eventuale presenza di azioni flessionali in testa palificata determina una non omogeneità degli sforzi assiali agenti sul singolo palo; di conseguenza, il soddisfacimento della verifica di capacità portante del gruppo di pali NON implica il soddisfacimento della verifica di capacità portante del singolo palo.

8.1. TERRENI COESIVI

8.1.1. Pali con interasse superiore a 3 diametri

L'efficienza per terreni coesivi è pari a:

- o $E_v=1$ per interasse dei pali di 8 diametri;
- o $E_v=0.7$ per interasse dei pali di 3 diametri;
- o $0.7 < E_v < 1$ per interasse dei pali compreso fra 3 e 8 diametri.

Per un gruppo costituito da " m " file di pali con " n " pali per ciascuna fila, si potrà adottare la formula empirica di Converse-Labarre:

$$E_v = 1 - \frac{2 \cdot \arctg(d/i)}{\pi} \cdot \left(2 - \frac{1}{m} - \frac{1}{n}\right)$$

in cui:

- d = diametro del palo;
- i = minimo interasse dei pali;
- m = numero di file di pali;
- n = numero di pali per singola fila.

8.1.2. Pali con interasse inferiore a 3 diametri

La portanza del gruppo viene calcolata in accordo al criterio proposto da Terzaghi & Peck (1967):

$$Q_B = 2 \cdot (B + h) \cdot \sum_1^n \tau_i \cdot L_i + B \cdot h \cdot N_c \cdot C_u$$

dove:

B, h = dimensioni in pianta della fondazione equivalente (Figura 8-1);

τ_i = tensione tangenziale dello strato i-esimo, in prima approssimazione è possibile assumere tale parametro costante e pari a $R_{t,d}/A_{lat}$ con $R_{t,d}$ è la resistenza a trazione (ovvero la laterale) del palo all'approccio considerato e A_{lat} è l'area laterale del palo;

L_i = altezza dello strato i-esimo (Figura 8-1);

C_u = coesione alla base del blocco;

N_c = fattore di capacità portante adimensionale desunto dalla Tabella 8-1 sulla base dei rapporti h/B e L/B

Nel caso di gruppo di pali soggetto a sforzi di trazione, la portanza di base non dovrà essere considerata.

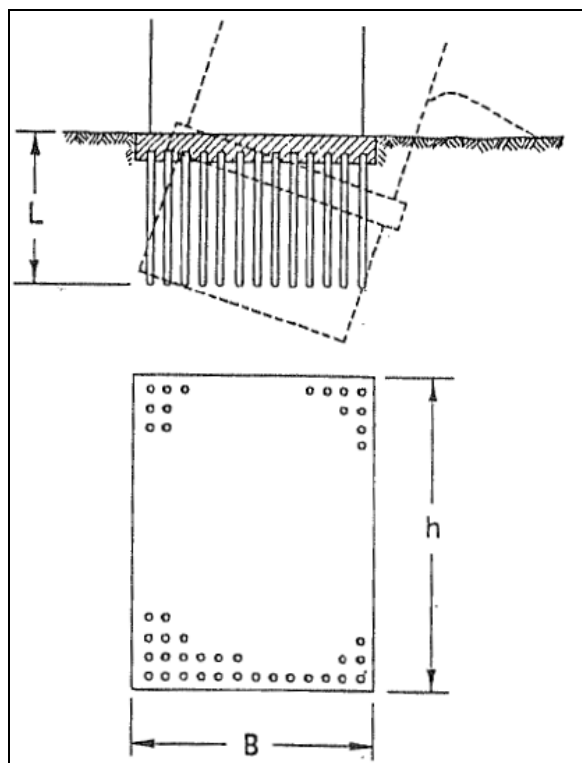


FIGURA 8-1: SCHEMA DI ROTTURA DEL TERRENO PER EFFETTO DELLA PALIFICATA QUALE BLOCCO IN TERRENI COESIVI (TERZAGHI & PECK, 1967)

TABELLA 8-1: COEFFICIENTE N_c PER DETERMINAZIONE PORTANZA DEL GRUPPO (AGI, 1984)

L/B	N_c	
	h/B=1	h/B≥10
0.25	6.7	5.6
0.50	7.1	5.9
0.75	7.4	6.2
1.00	7.7	6.4
1.50	8.1	6.8
2.00	8.4	7.0
2.50	8.6	7.2
3.00	8.8	7.4
≥4	9.0	7.5

8.2. TERRENI INCOERENTI

Per i terreni a comportamento prevalentemente incoerente, l'efficienza del gruppo di pali dipende, oltre che dall'interasse dei pali, anche dallo stato di addensamento del materiale.

8.2.1. Sabbia sciolta

In genere l'efficienza di un gruppo di pali in sabbie sciolte è superiore all'unità; in sede di progettazione verrà assunta efficienza $E_v = 1$.

8.2.2. Sabbia densa

Il coefficiente di efficienza varia fra $E_v = 0.7$ per interasse dei pali da 3 a 6 diametri a $E_v = 1.0$ per interasse pari a 8.

9. CAPACITÀ PORTANTE DEI PALI IN GRUPPO SOGGETTI A CARICHI TRASVERSALI

Per quanto riguarda il comportamento dei pali in gruppo, il carico limite orizzontale di un gruppo può essere notevolmente inferiore alla somma dei valori relativi ai singoli pali; l'efficienza di un gruppo di pali rispetto ai carichi orizzontali è sempre inferiore all'unità.

Dalle "raccomandazioni sui pali di fondazione" AGI, 1984, si riporta quanto segue:

"Sulla base dei risultati sperimentali disponibili sembra che l'efficienza tenda all'unità per un interasse fra i pali del gruppo pari a cinque volte il diametro dei pali; per interasse minore, l'efficienza diminuisce fino a 0.5.

È possibile anche affermare che risulta più vantaggioso disporre il gruppo di pali normalmente alla direzione della forza orizzontale ovvero, a parità di numero di pali di un gruppo rettangolare resiste meglio se la forza orizzontale agisce parallelamente al lato corto.

Per pali ad interasse 3 diametri si ritiene possibile considerare $E_H = 0.8$; per pali ad interasse 2.5 diametri si ritiene possibile considerare $E_H = 0.7$. Nel caso particolare invece di pali disposti in singola fila soggetti ad un'azione ortogonale all'allineamento è possibile considerare $E_H = 1.0$.

10. ANDAMENTO DELLE SOLLECITAZIONI NEI PALI IN GRUPPO SOGGETTI A CARICHI TRASVERSALI

Nel caso di gruppo di pali soggetti ad azioni orizzontali possono manifestarsi le due seguenti tipologie di interazione:

- interazione tra pali in linea, caricati in direzione parallela alla fila (Figura 10-1 - Schema A);
- interazione tra pali affiancati, caricati in direzione perpendicolare alla fila (Figura 10-2 - Schema B).

L'interazione del primo tipo si esplica in una diminuzione delle caratteristiche meccaniche del terreno retrostante il palo di testa della fila, con conseguente incremento degli spostamenti dei pali retrostanti.

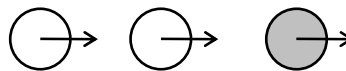


FIGURA 10-1: SCHEMA A – PALI IN LINEA

L'interazione del secondo tipo si esplica invece con un incremento degli spostamenti del palo centrale per effetto della presenza dei pali laterali.

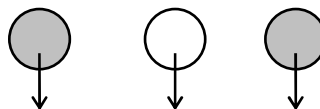


FIGURA 10-2: SCHEMA B – PALI AFFIANCATI

Con riferimento alle geometrie in genere adottate per i sistemi di fondazione profondi, gli incrementi medi delle sollecitazioni lungo i pali a causa degli effetti gruppo possono essere considerati dell'ordine del 10-20%.

Per ulteriori dettagli sulle metodologie di analisi si rimanda al documento PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_02 "Criteri generali verifiche geotecniche".

11. COMPORTAMENTO DEI PALI IN ESERCIZIO

11.1. CEDIMENTO DEL PALO SINGOLO SOGGETTO A CARICHI ASSIALI

Per quanto riguarda i presumibili cedimenti dei pali per i carichi di esercizio si osserva quanto segue:

- i carichi di esercizio sono in genere inferiori alla capacità portante limite laterale;
- la mobilitazione dell'adesione laterale limite avviene per spostamenti relativi dell'ordine di 5÷10 mm (vedi Raccomandazioni AGI);

pertanto è lecito attendersi cedimenti dei pali singoli sotto il massimo carico di esercizio dell'ordine di $\delta = 5\div 6$ mm.

11.2. CEDIMENTO DEI PALI IN GRUPPO SOGGETTI A CARICO ASSIALE

L'amplificazione del cedimento per effetto gruppo è funzione:

- del numero di pali della palificata (n);
- della configurazione geometrica del gruppo (s = interasse pali; L = lunghezza pali).

Per la determinazione del coefficiente amplificativo dei cedimenti per effetto gruppo (E_G) si fa riferimento alla correlazione suggerita da Mandolini, Russo, Viggiani, basata sul confronto parametrico di evidenze sperimentali (Figura 11_1) che definisce il parametro:

$$R_G = 0.39 R^{-1.25}$$

essendo:

$$R = \sqrt{\frac{ns}{L}} \text{ con:}$$

Il coefficiente amplificativo E_G per effetto gruppo si ottiene dalla seguente espressione:

$$E_G = R_G n$$

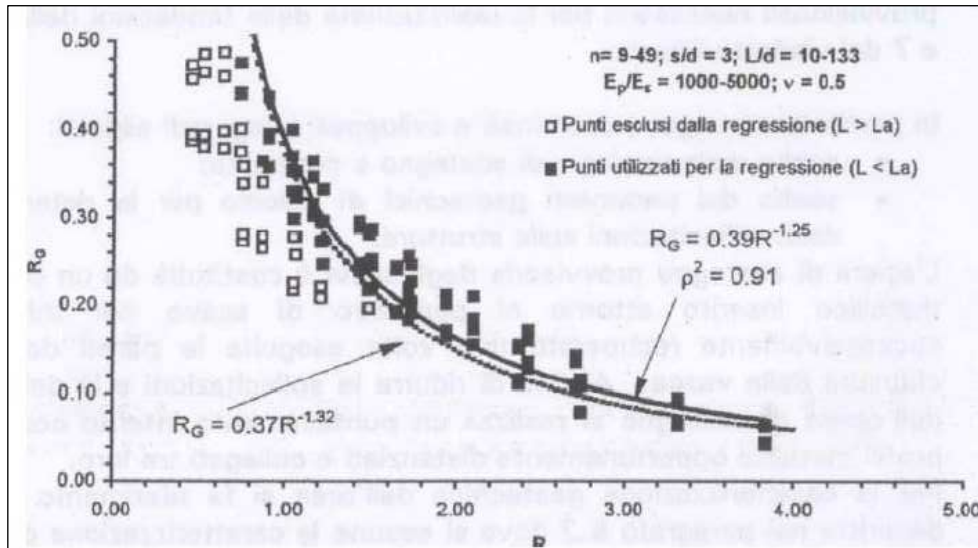


FIGURA 11_1: AMPLIFICAZIONE DEL CEDIMENTO PER EFFETTO GRUPPO

Ad esempio:

- $n = 9, s = 3.6 \text{ m}, L = 30.0 \text{ m} \Rightarrow R_G = 0.37 \Rightarrow E_G = 3.35 \Rightarrow \delta_G \cong 18.4 \text{ mm};$
- $n = 8, s = 3.6 \text{ m}, L = 30.0 \text{ m} \Rightarrow R_G = 0.40 \Rightarrow E_G = 3.20 \Rightarrow \delta_G \cong 17.6 \text{ mm}.$

11.3. RIGIDENZE ASSIALI

Alla luce delle considerazioni esposte al § 11.1, la rigidezza del palo in direzione verticale viene stimata ipotizzando che la portata limite laterale venga mobilitata per uno spostamento di 10 mm.

I grafici a seguire riportano i valori di rigidezza verticale dei pali al variare della lunghezza degli stessi. I tabulati di derivazione dei grafici sono stati riportati precedentemente al § 5 congiuntamente ai tabulati di capacità portante verticale.

**AMU04 - Trincee fra muri Variante San Giacomo Roncole - ZO8
NTC del 14/01/2008**

Rigidezza assiale - Pali trivellati ϕ 600mm

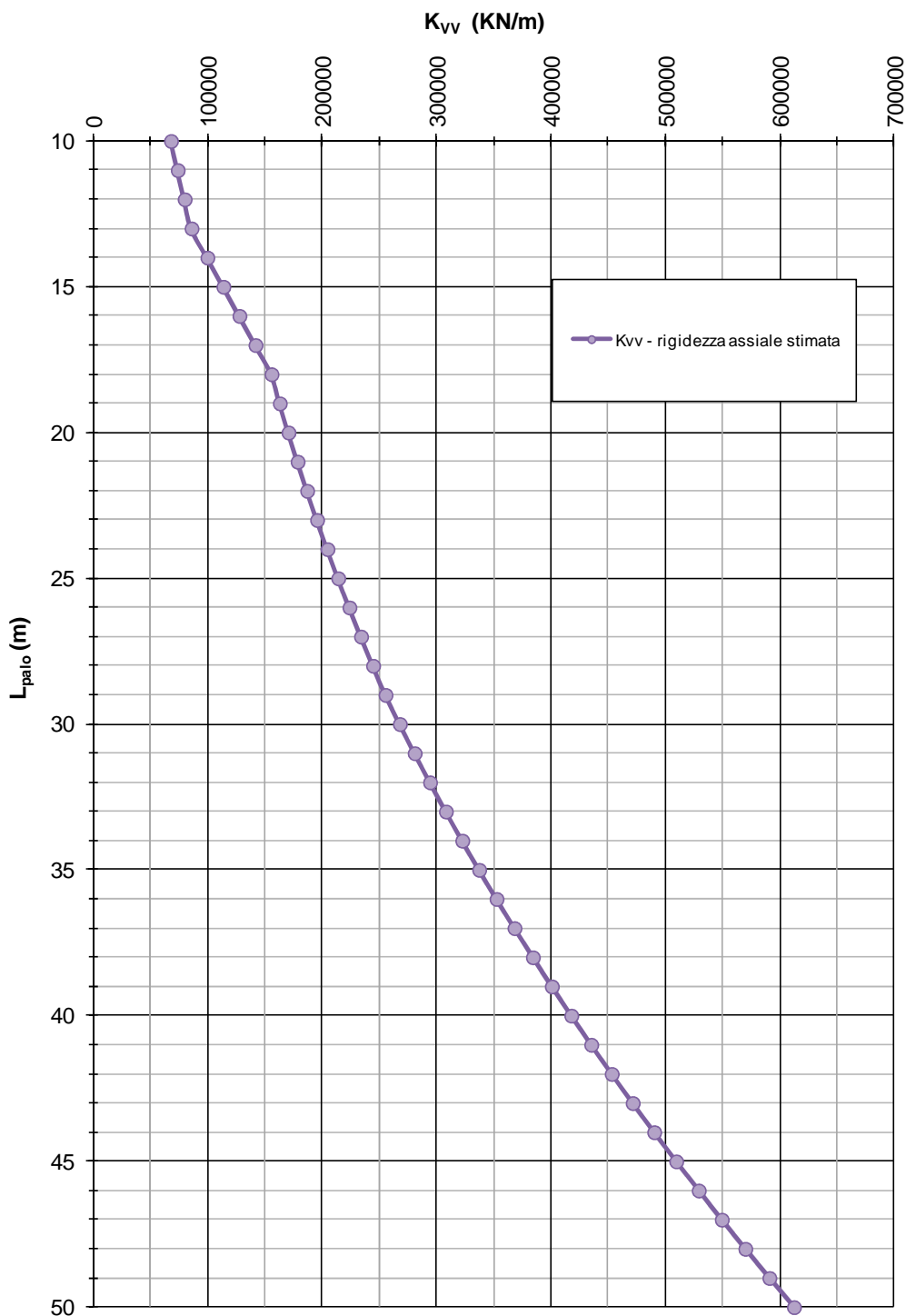


FIGURA 11_2: RIGIDEZZA VERTICALE – PALI TRIVELLATI ϕ 600

**AMU04 - Trincee fra muri Variante San Giacomo Roncole - ZO8
NTC del 14/01/2008**

Rigidezza assiale - Pali trivellati ϕ 800mm

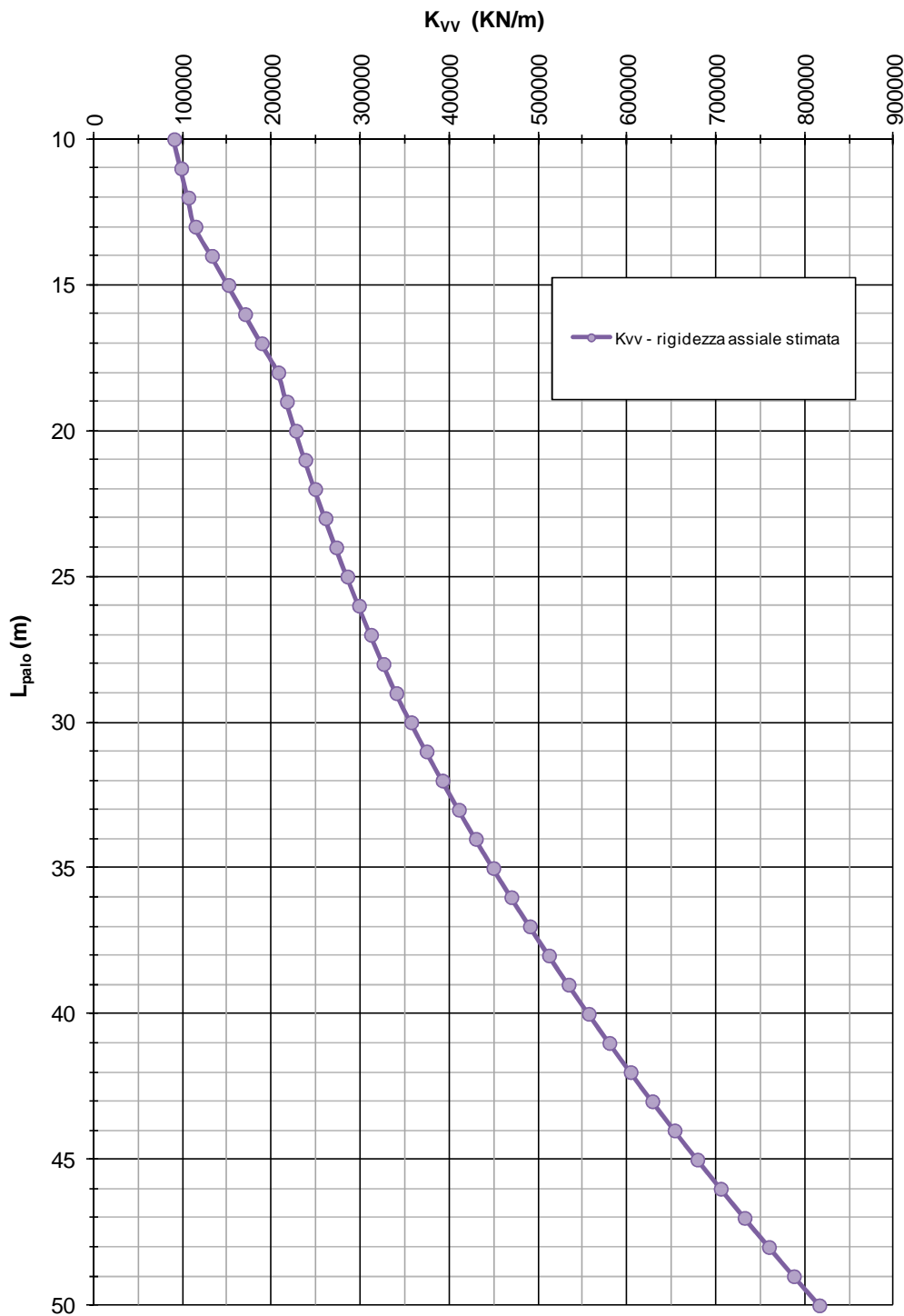


FIGURA 11_3: RIGIDEZZA VERTICALE – PALI TRIVELLATI ϕ 800

Di seguito inoltre si riportano i valori della costante di Matlock e Reese utilizzata per il calcolo della sollecitazione e gli elementi della matrice di rigidità di testa_palo calcolati secondo la formulazione fornita nell'Appendice C dell'Eurocodice 8 – Parte 5 per terreni con $E=E_s \cdot z/d$.

Pali ϕ 600

<i>Costante di Matlock e Reese</i>		
$K_{MR} =$	5 258	kN/m ³
<i>Rigidezze statiche alla testa dei pali</i>		
$K_{HH} =$	26 298	kN/m
$K_{MM} =$	125 526	kNm
$K_{HM} =$	-42 181	kN
Calcolo svolto secondo le indicazioni riportate in Appendice C dell'Eurocodice 8 - Parte 5		

Pali ϕ 800

<i>Costante di Matlock e Reese</i>		
$K_{MR} =$	4 727	kN/m ³
<i>Rigidezze statiche alla testa dei pali</i>		
$K_{HH} =$	39 448	kN/m
$K_{MM} =$	308 526	kNm
$K_{HM} =$	-80 626	kN
Calcolo svolto secondo le indicazioni riportate in Appendice C dell'Eurocodice 8 - Parte 5		