



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

CODICE C.U.P. E81B08000060009

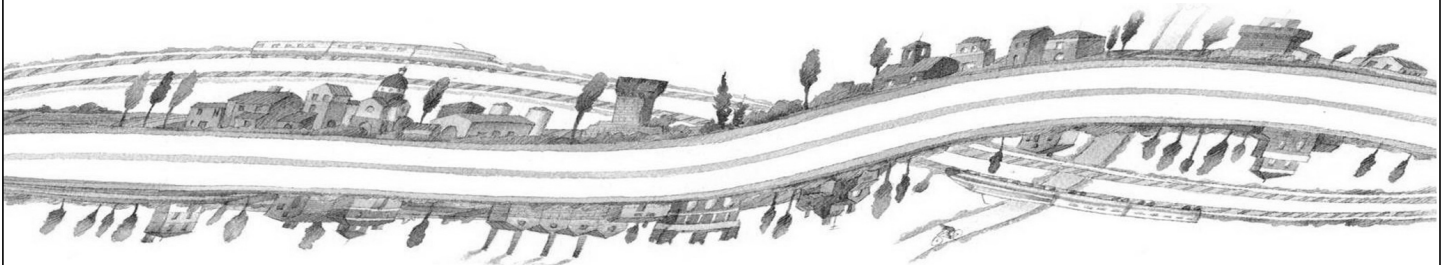
## PROGETTO DEFINITIVO

**ASSE AUTOSTRADALE (COMPRESIVO DEGLI INTERVENTI LOCALI DI COLLEGAMENTO VIARIO AL SISTEMA AUTOSTRADALE)**  
GEOLOGIA, IDROGEOLOGIA, SISMICA E GEOTECNICA

GEOTECNICA

INTERCONNESSIONE A13

RELAZIONE GEOTECNICA GALLERIA ARTIFICIALE E MURI AD U RAMPA OVEST-NORD



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: <b>MAGGIO 2012</b>
NUM. Progr.	FASE	LOTTO	GRUPPO	CODICE OPERA WBS	TRATTO OPERA	AMBITO	TIPO ELABORATO	PROGRESSIVO	REV.	SCALA: _
0426	PD	0	102	IGA06	0	GT	RB	01	A	



## INDICE

<b>1. PREMESSA</b> .....	<b>3</b>
<b>2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO</b> .....	<b>4</b>
2.1. NORMATIVE .....	4
2.2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	4
<b>3. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA</b> .....	<b>5</b>
<b>4. VERIFICA DI CAPACITÀ PORTANTE E SCORRIMENTO MEDIANTE I DIAGRAMMI DI INTERAZIONE PER LE FONDAZIONI SUPERFICIALI</b> .....	<b>8</b>
4.1. FONDAZIONE DI LARGHEZZA B = 14.40 M E APPROFONDIMENTO D = 2.30 M.....	10
4.1.1. Carico limite finalizzato alla determinazione dei domini.....	10
4.1.2. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Drenata.....	11
4.1.3. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Non Drenata .....	12
4.1.4. Diagrammi di interazione in Condizione Sismica.....	13
4.2. FONDAZIONE DI LARGHEZZA B = 15.50 M E APPROFONDIMENTO D = 2.60 M.....	14
4.2.1. Carico limite finalizzato alla determinazione dei domini.....	14
4.2.2. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Drenata.....	15
4.2.3. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Non Drenata .....	16
4.2.4. Diagrammi di interazione in Condizione Sismica.....	17
4.3. FONDAZIONE DI LARGHEZZA B = 13.90 M E APPROFONDIMENTO D = 2.80 M.....	18
4.3.1. Carico limite finalizzato alla determinazione dei domini.....	18
4.3.2. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Drenata.....	19
4.3.3. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Non Drenata .....	20
4.3.4. Diagrammi di interazione in Condizione Sismica.....	21
<b>5. COSTANTE DI SOTTOFONDO</b> .....	<b>22</b>
<b>6. CAPACITÀ PORTANTE DEL PALO SINGOLO SOGGETTO A CARICHI ASSIALI</b> .....	<b>23</b>
<b>7. CAPACITÀ PORTANTE DEI PALI IN GRUPPO SOGGETTI A CARICHI ASSIALI</b> .....	<b>30</b>
7.1. TERRENI COESIVI .....	30
7.1.1. Pali con interasse superiore a 3 diametri.....	30
7.1.2. Pali con interasse inferiore a 3 diametri.....	31
7.2. TERRENI INCOERENTI.....	33
7.2.1. Sabbia sciolta .....	33
7.2.2. Sabbia densa .....	33



<b>8. COMPORTAMENTO DEI PALI IN ESERCIZIO.....</b>	<b>34</b>
8.1. CEDIMENTO DEL PALO SINGOLO SOGGETTO A CARICHI ASSIALI .....	34
8.2. CEDIMENTO DEI PALI IN GRUPPO SOGGETTI A CARICO ASSIALE.....	34
8.3. RIGIDENZE ASSIALI .....	35

## 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 il calcolo della capacità portante per l'opera IGA06 – Galleria artificiale Rampa Ovest-Nord e gli aspetti relativi al calcolo dei muri adiacenti.

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 per le 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.

## 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<sup>d</sup> ICSMFE*, vol. 1, pp. 440-445.

### 3. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

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

<b>OPERA:</b>	<b>GALLERIA ARTIFICIALE RAMPA OVEST-NORD</b>
---------------	--

<b>Q<sub>rif</sub> = 9.00 m s.l.m.</b>
--

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
BH428	Imprefond - 2011	9.126	50.0	TA(4-6)
BH434	Imprefond - 2011	9.094	50.0	C(18)
CPTU458	Imprefond - 2011	9.120	40.0	-

C (....) = cella piezometrica Casagrande (quota cella);  
TA (....) = piezometro a tubo aperto (tratto filtrante).  
CH (....) = cross-hole (profondità)

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 <sub>r</sub> <50%
4	Sabbia con 50%<D <sub>r</sub> <70%
5	Sabbia con D <sub>r</sub> >70%
6	Torba/Argilla organica

TABELLA 3-3: CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICO – GEOTECNICA GALLERIA

Profondità (m da p.c.) ( $Q_{ref}$ 9.00 m s.l.m.)	Unità -	$z_w$ (m)	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\varphi' (*)$ (°)	$c' (*)$ (kPa)	$c_u (*)$ (kPa)	$E'$ (MPa)	$M$ (MPa)
0.0÷19.0	1	0.5	18.5	23-25	3-7	30-60	3.3-5.4	4.5-7.2
19.0÷22.0	2		18.8	28-30	0	-	11.7	-
Da 22.0	1		18.5	23-25	3-7	>80	>6.7	>9.0

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

$z_w$  = profondità falda di progetto;

$\gamma_n$  = peso di volume naturale (kN/m<sup>3</sup>);

(\*) = 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.

$\varphi'$  = 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 (MPa);

$M$  = valore del modulo edometrico.



TABELLA 3-4: CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICO – GEOTECNICA

Profondità (m da p.c.) ( $Q_{ref}$ 9.00 m s.l.m.)	Unità -	$z_w$ (m)	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\varphi'$ (*) (°)	$c'$ (*) (kPa)	$c_u$ (*) (kPa)	$E'$ (kPa)	M (kPa)
0.0÷1.0	2	2.0	18.8	28-29	0	25	-	-
1.0÷36.0	1	2.0	18.5	23-25	3-7	25-70	2600-7000	3500-9000
36.0÷38.0	2	2.0	18.8	28-30	0	-	16190	-
Da 38.0	1	2.0	18.5	23-25	3-7	>70	>9078	>12240

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

$z_w$  = profondità falda di progetto;

$\gamma_n$  = peso di volume naturale (kN/m<sup>3</sup>);

(\*) = 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.

$\varphi'$  = 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 (MPa);

M = valore del modulo edometrico.

La categoria di sottosuolo che è possibile assumere per le elaborazioni è **D**.

Sulla base delle risultanze delle analisi chimiche condotte su acque e terreni, per quanto concerne le classi di esposizione del calcestruzzo non si riscontrano criticità in merito all'attacco chimico nel suolo naturale e nell'acqua del terreno.

Al fine di valutare i fattori di correlazione  $\xi$  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.

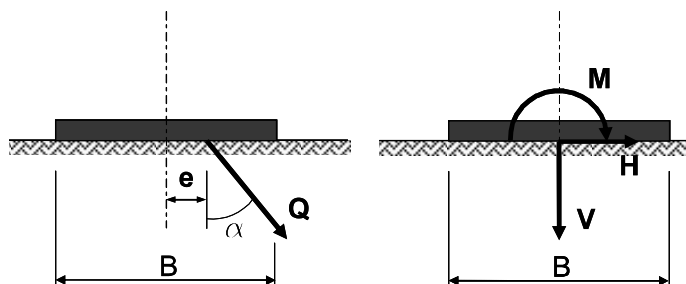


FIGURA 4-1: DEFINIZIONE DELLE COMPONENTI DI CARICO

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  $\gamma_M$  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]
IGA06	2.3	14.4
Muro Sud	2.6	15.5
Muro Nord	2.8	13.9

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  $\gamma_A$ ,  $\gamma_M$  e  $\gamma_R$  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:

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

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

- 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  $\gamma_R$  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  $\gamma_R$  relativi alle verifiche di capacità portante

( $V_{ED}; H_{ED} \cdot \gamma_R; M_{ED}$ ) adottando i coefficienti  $\gamma_R$  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 = 14.40 M E APPROFONDIMENTO D = 2.30 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
$V_{max,M1}$	9023	4156	4156
$H_{max,M1}$	-	648	648
$M_{max,M1}$	-	5972	5972
$V_{max,M2}$	5078	3144	3144
$H_{max,M2}$	-	463	463
$M_{max,M2}$	-	4266	4266

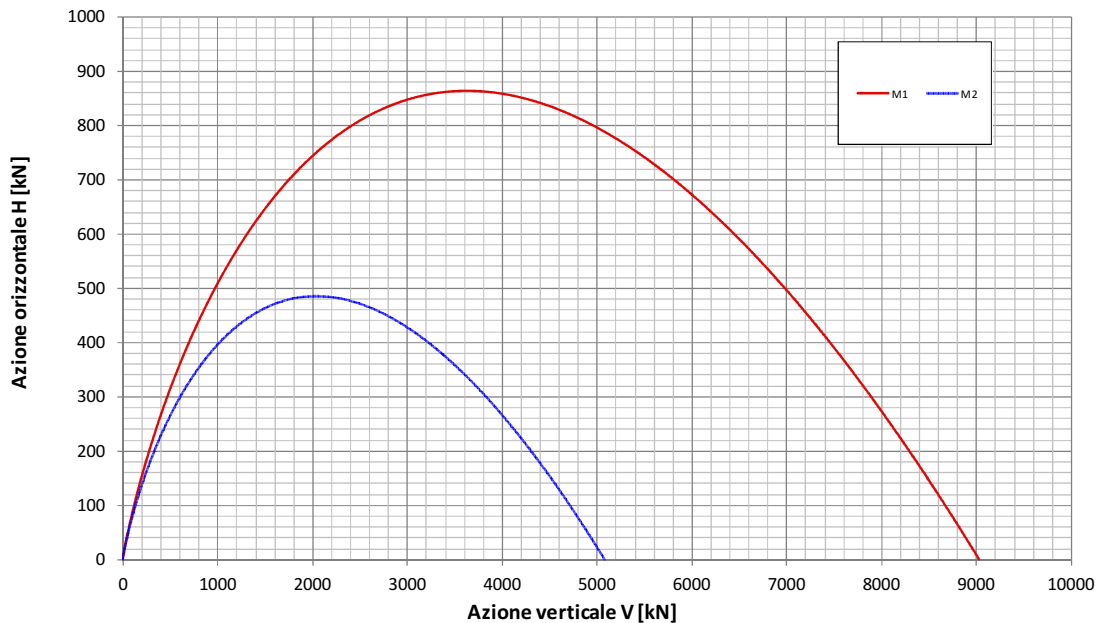
Nel caso in esame trattandosi di fondazioni nastriformi tutti i carichi indicati sono riferiti a un metro lineare di struttura.

## 4.1.2. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Drenata

**Fondazione B=14.4m - Approfondimento D=2.3m**

**Condizione Statica Drenata**

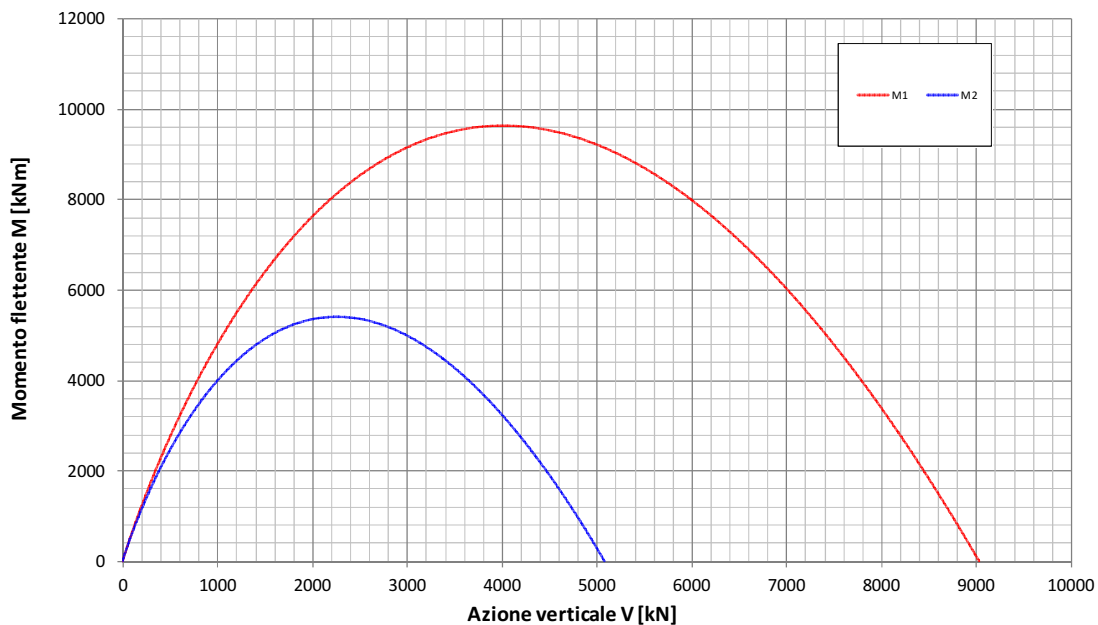
**Domínio di interazione nel piano V-H (Brinch Hansen, 1970)**



**Fondazione B=14.4m - Approfondimento D=2.3m**

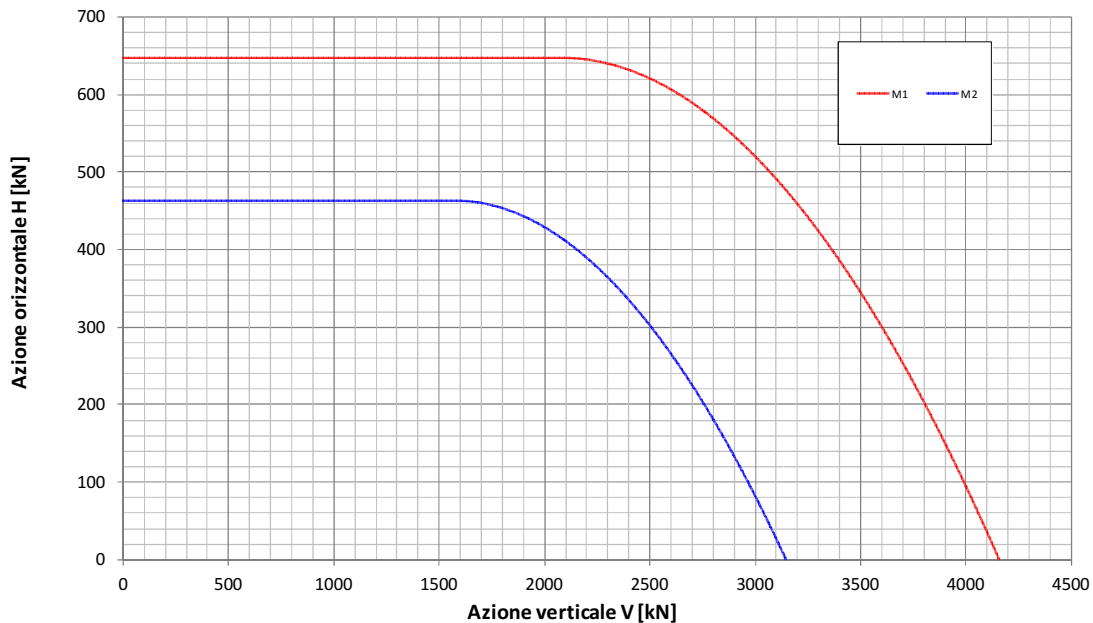
**Condizione Statica Drenata**

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

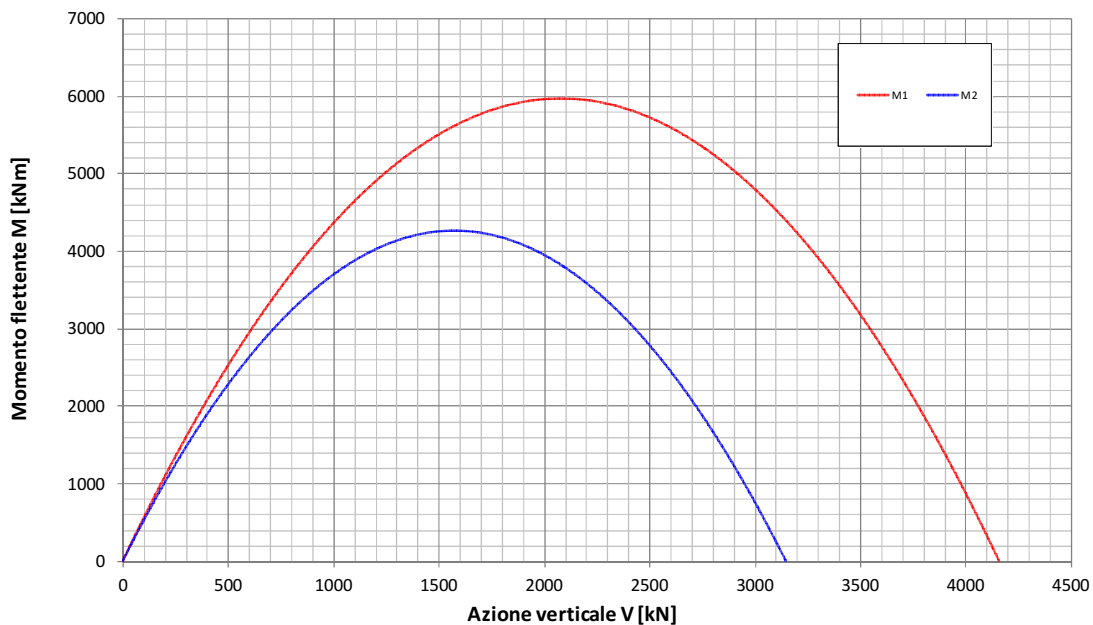


### 4.1.3. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Non Drenata

Fondazione B=14.4m - Approfondimento D=2.3m  
**Condizione Statica Non Drenata**  
 Dominio di interazione nel piano V-H (*Gourvenec, 2007*)



Fondazione B=14.4m - Approfondimento D=2.3m  
**Condizione Statica Non Drenata**  
 Dominio di interazione nel piano V-M (*Gourvenec, 2007*)

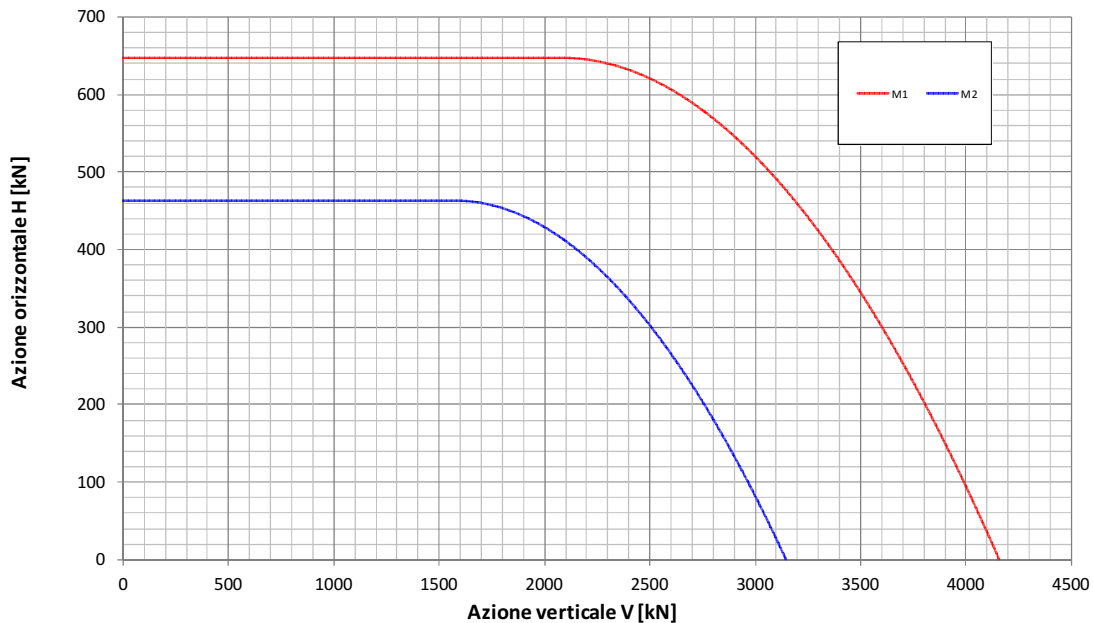


#### 4.1.4. Diagrammi di interazione in Condizione Sismica

Fondazione B=14.4m - Approfondimento D=2.3m

Condizione Sismica Non Drenata

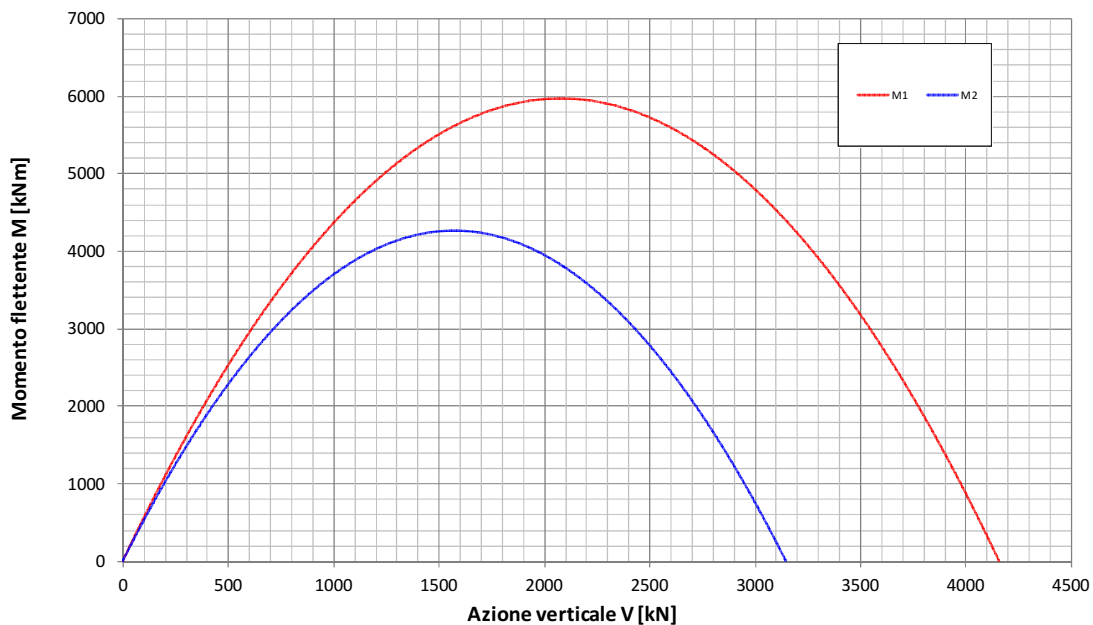
Dominio di interazione nel piano V-H (*Gourvenec, 2007*)



Fondazione B=14.4m - Approfondimento D=2.3m

Condizione Sismica Non Drenata

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



## 4.2. FONDAZIONE DI LARGHEZZA $B = 15.50$ M E APPROFONDIMENTO $D = 2.60$ M

### 4.2.1. 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 4-2: CARICHI LIMITE FINALIZZATI ALLA DETERMINAZIONE DEI DOMINI

	Stat-D	Stat-U	Sisma
$V_{max,M1}$	10406	4146	4146
$H_{max,M1}$	-	620	620
$M_{max,M1}$	-	6150	6150
$V_{max,M2}$	5865	3175	3175
$H_{max,M2}$	-	443	443
$M_{max,M2}$	-	4393	4393

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

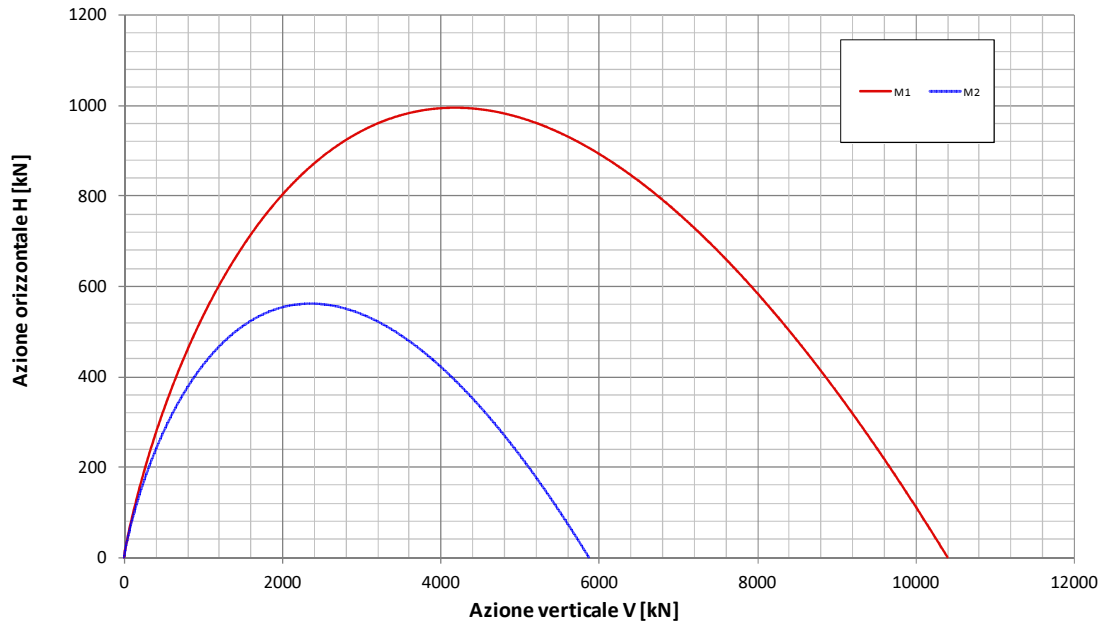


## 4.2.2. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Drenata

Fondazione B=15.5m - Approfondimento D=2.6m

Condizione Statica Drenata

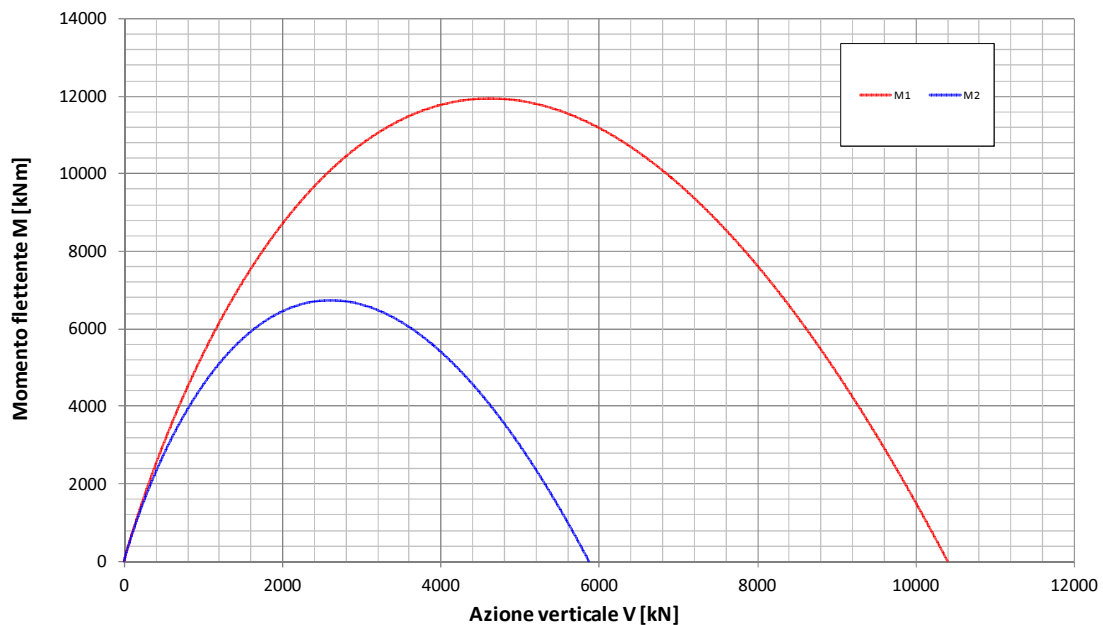
Dominio di interazione nel piano V-H (*Brinch Hansen, 1970*)



Fondazione B=15.5m - Approfondimento D=2.6m

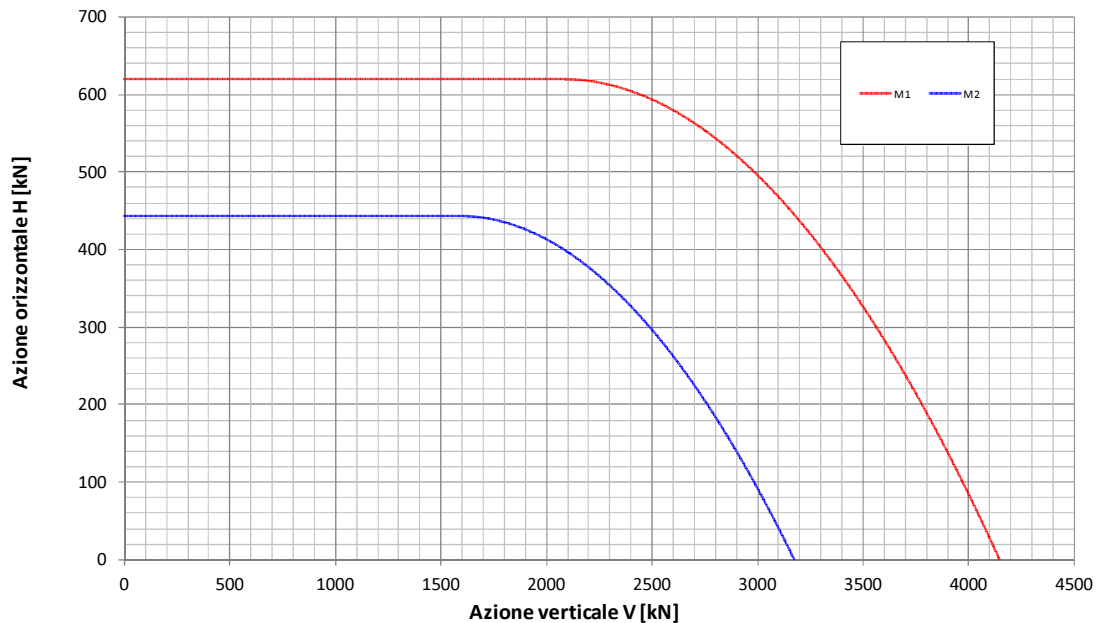
Condizione Statica Drenata

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

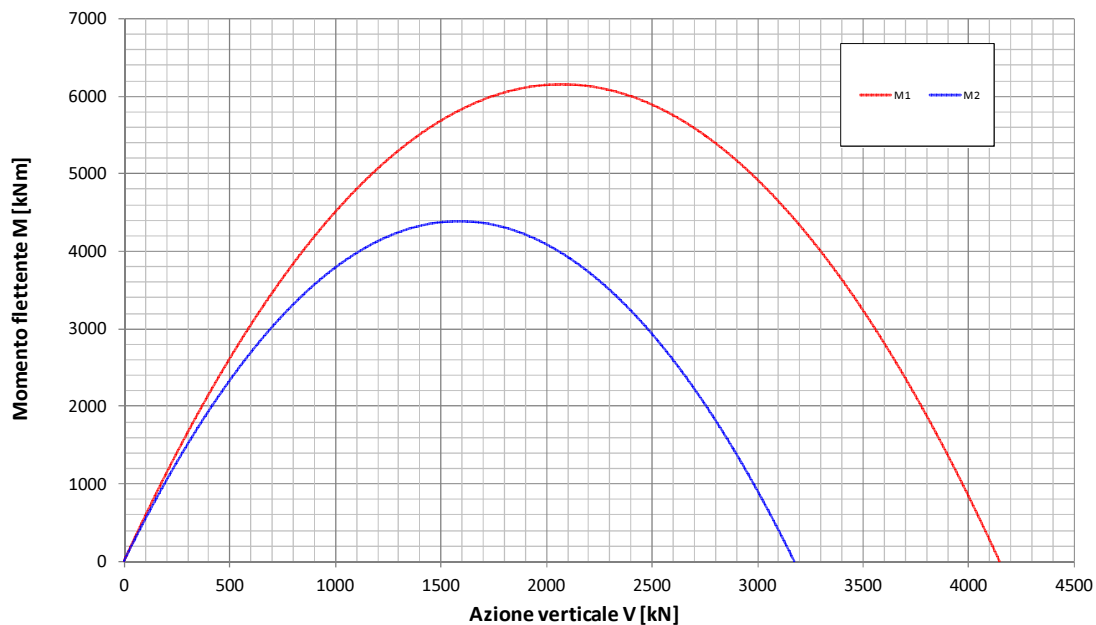


## 4.2.3. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Non Drenata

**Fondazione B=15.5m - Approfondimento D=2.6m**  
**Condizione Statica Non Drenata**  
**Dominio di interazione nel piano V-H (Gourvenec, 2007)**

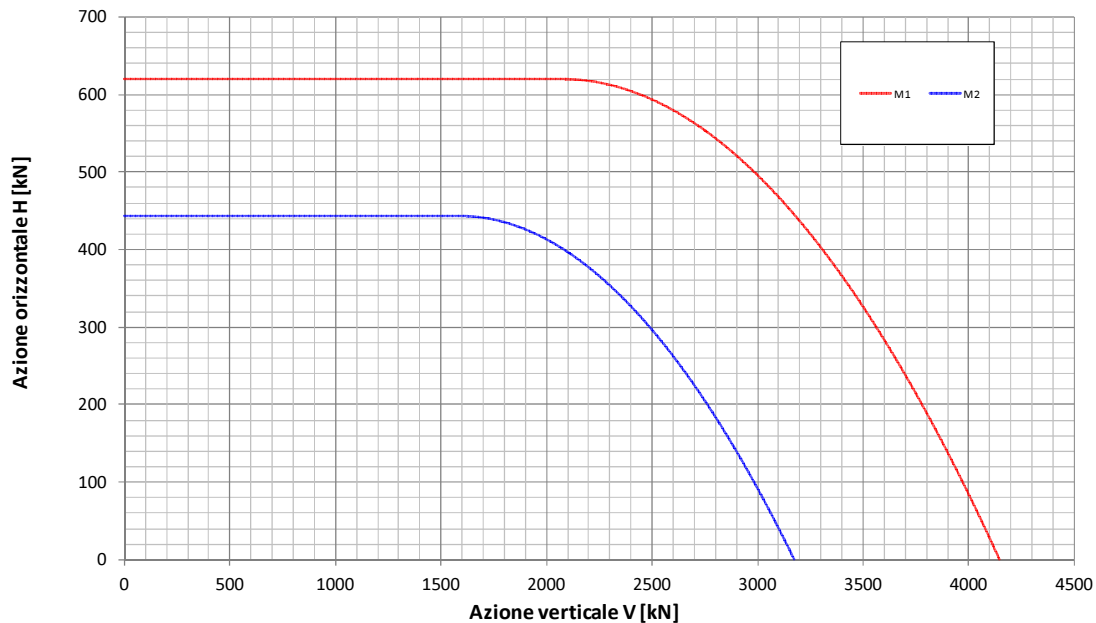


**Fondazione B=15.5m - Approfondimento D=2.6m**  
**Condizione Statica Non Drenata**  
**Dominio di interazione nel piano V-M (Gourvenec, 2007)**

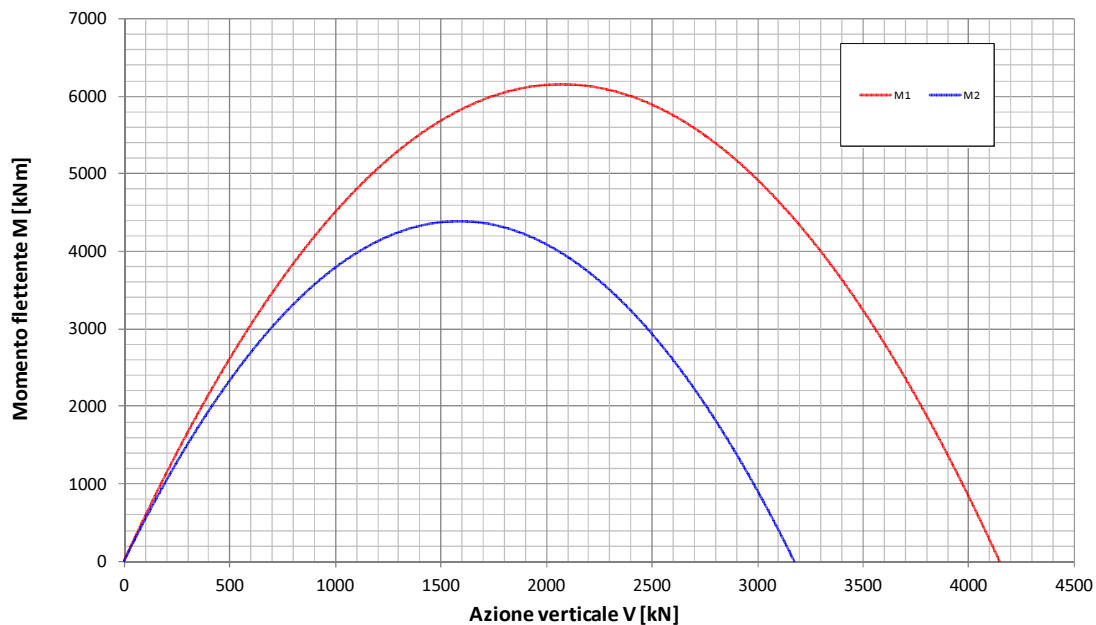


## 4.2.4. Diagrammi di interazione in Condizione Sismica

**Fondazione B=15.5m - Approfondimento D=2.6m**  
**Condizione Sismica Non Drenata**  
**Dominio di interazione nel piano V-H (Gourvenec, 2007)**



**Fondazione B=15.5m - Approfondimento D=2.6m**  
**Condizione Sismica Non Drenata**  
**Dominio di interazione nel piano V-M (Gourvenec, 2007)**



### 4.3. FONDAZIONE DI LARGHEZZA $B = 13.90$ M E APPROFONDIMENTO $D = 2.80$ M

#### 4.3.1. 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 4-3: CARICHI LIMITE FINALIZZATI ALLA DETERMINAZIONE DEI DOMINI

	Stat-D	Stat-U	Sisma
$V_{max,M1}$	9263	3808	3808
$H_{max,M1}$	-	556	556
$M_{max,M1}$	-	4946	4946
$V_{max,M2}$	5274	2926	2926
$H_{max,M2}$	-	397	397
$M_{max,M2}$	-	3533	3533

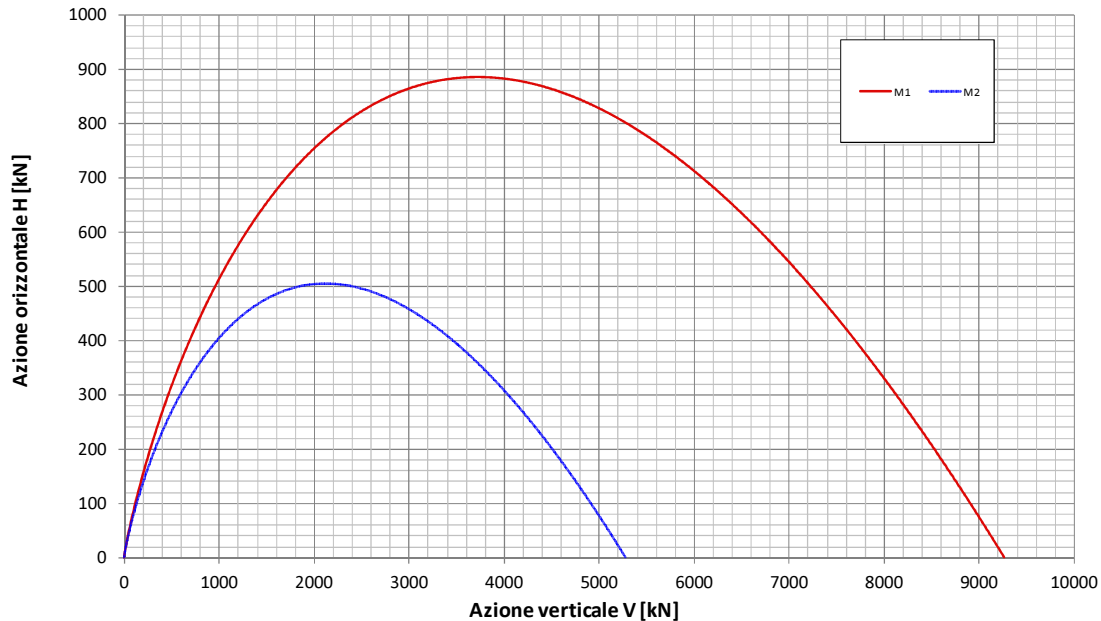
Nel caso in esame trattandosi di fondazioni nastriformi tutti i carichi indicati sono riferiti a un metro lineare di struttura.

### 4.3.2. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Drenata

**Fondazione B=13.9m - Approfondimento D=2.8m**

**Condizione Statica Drenata**

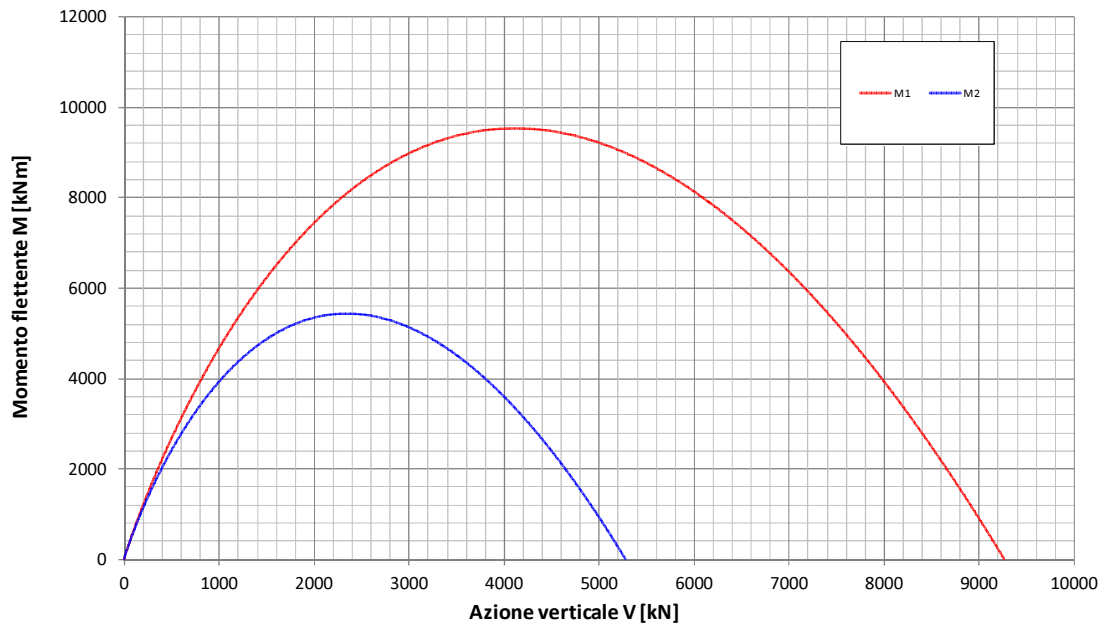
**Dominio di interazione nel piano V-H (Brinch Hansen, 1970)**



**Fondazione B=13.9m - Approfondimento D=2.8m**

**Condizione Statica Drenata**

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

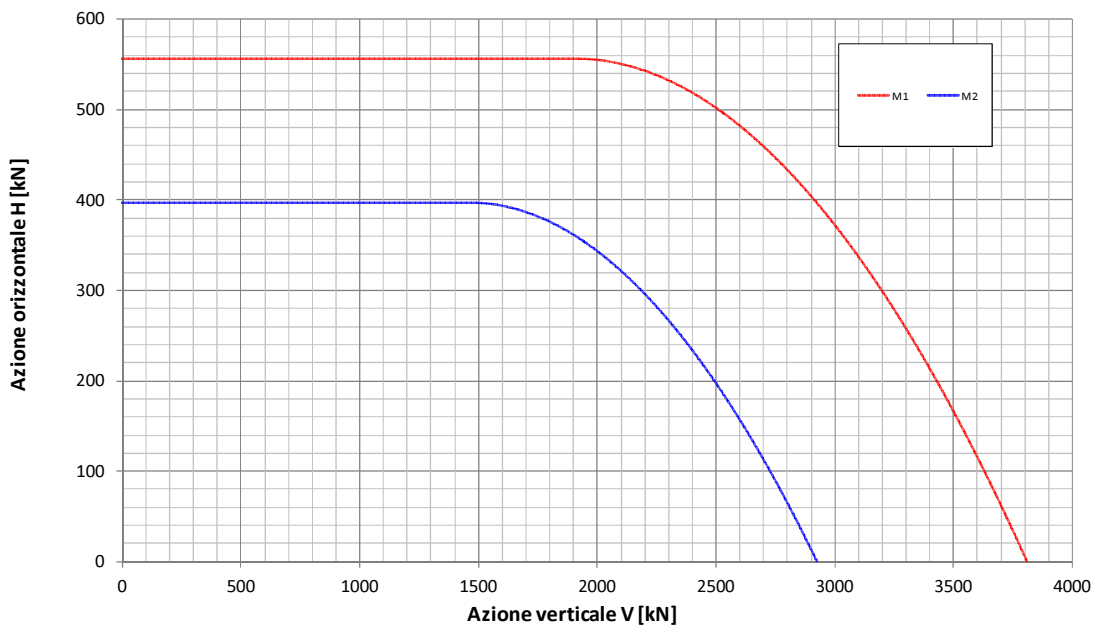


### 4.3.3. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Non Drenata

Fondazione B=13.9m - Approfondimento D=2.8m

Condizione Statica Non Drenata

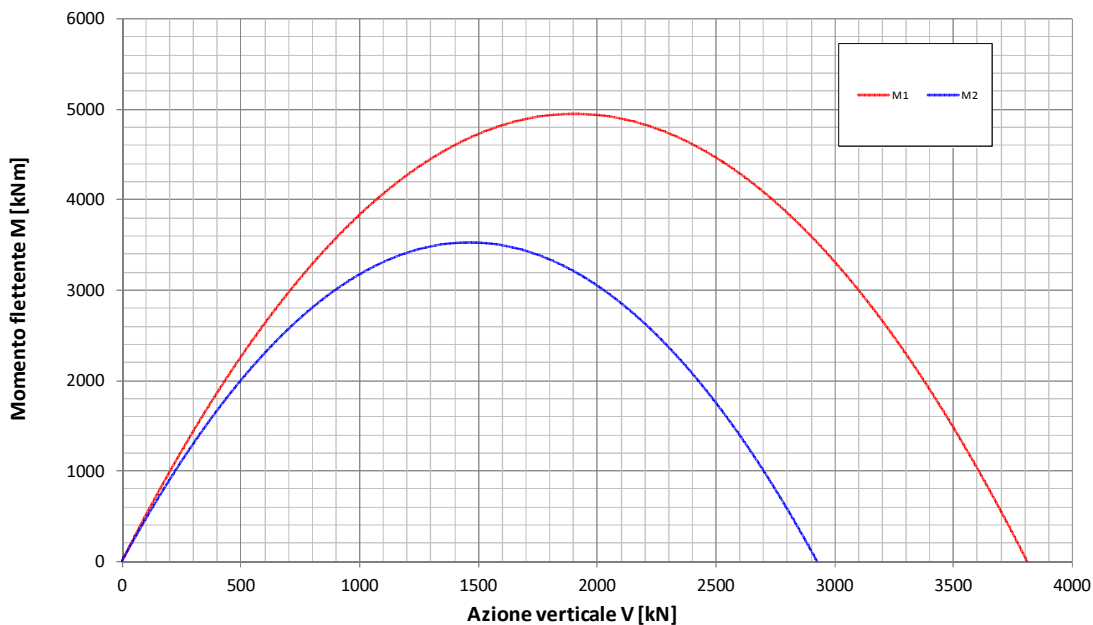
Dominio di interazione nel piano V-H (*Gourvenec, 2007*)



Fondazione B=13.9m - Approfondimento D=2.8m

Condizione Statica Non Drenata

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

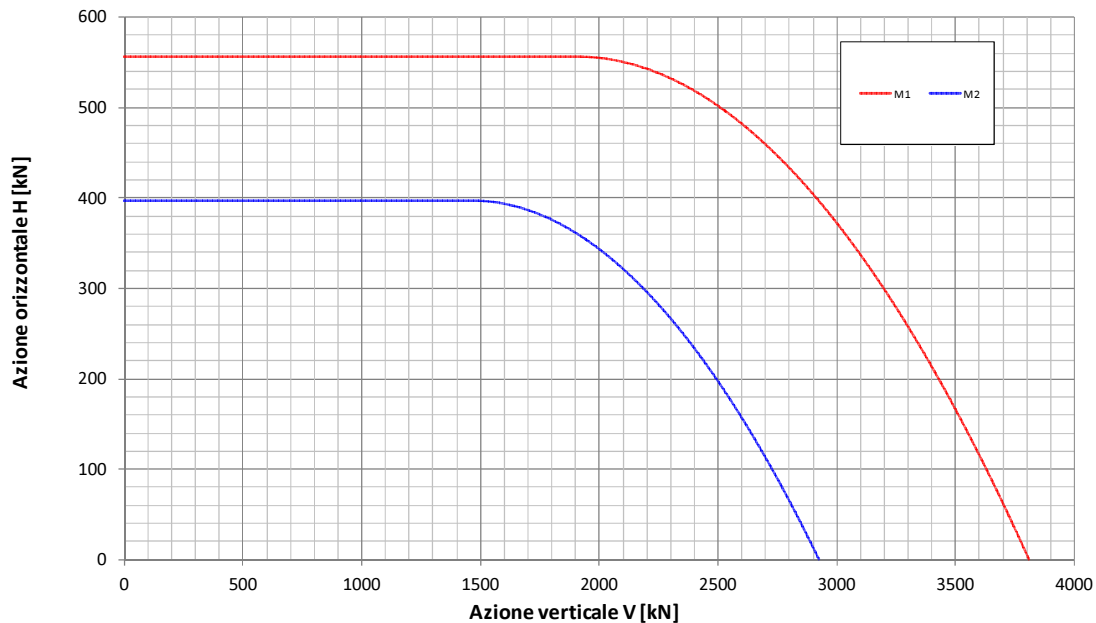


### 4.3.4. Diagrammi di interazione in Condizione Sismica

Fondazione B=13.9m - Approfondimento D=2.8m

Condizione Sismica Non Drenata

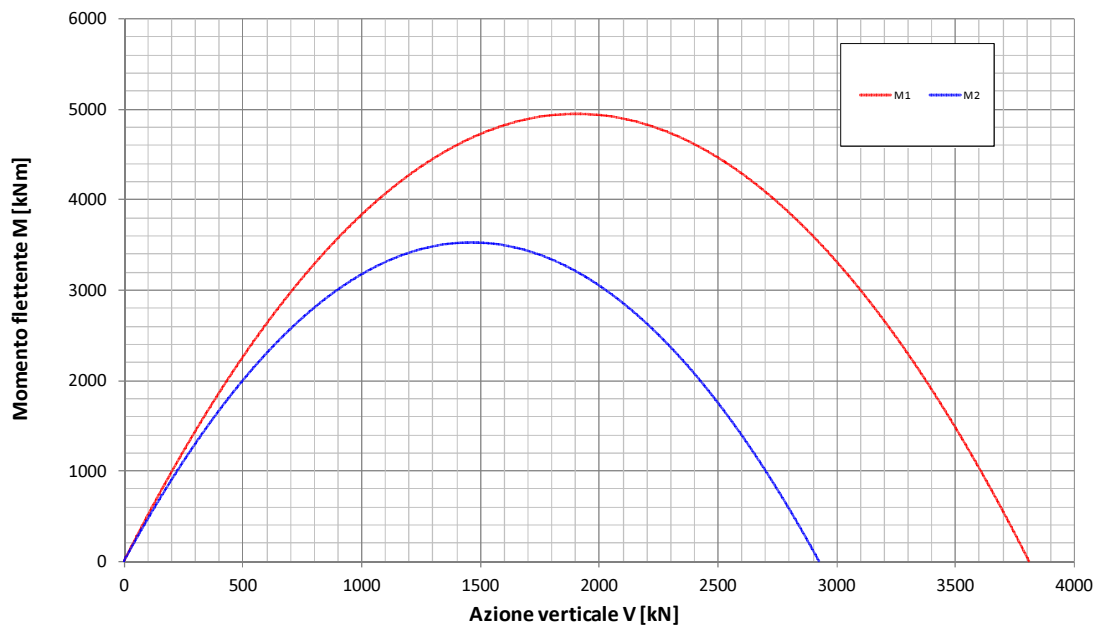
Dominio di interazione nel piano V-H (*Gourvenec, 2007*)



Fondazione B=13.9m - Approfondimento D=2.8m

Condizione Sismica Non Drenata

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



## 5. COSTANTE DI SOTTOFONDO

---

Il terreno di fondazione può essere schematizzato secondo il modello di Winkler che prevede una relazione lineare fra il cedimento in un punto della superficie e la pressione agente nello stesso punto.

Con riferimento a quanto riportato in "VIGGIANI C. – Fondazioni – Hevelius Edizioni", la determinazione della costante di sottofondo del terreno al fine di una schematizzazione del piano di posa della struttura mediante molle può avvenire mediante la seguente formula:

$$k = \frac{M}{B}$$

dove:

- M: modulo edometrico del terreno di fondazione;
- B: larghezza della fondazione inerente alla modellazione adottata.



## 6. 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  $\phi$  600 e  $\phi$  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;

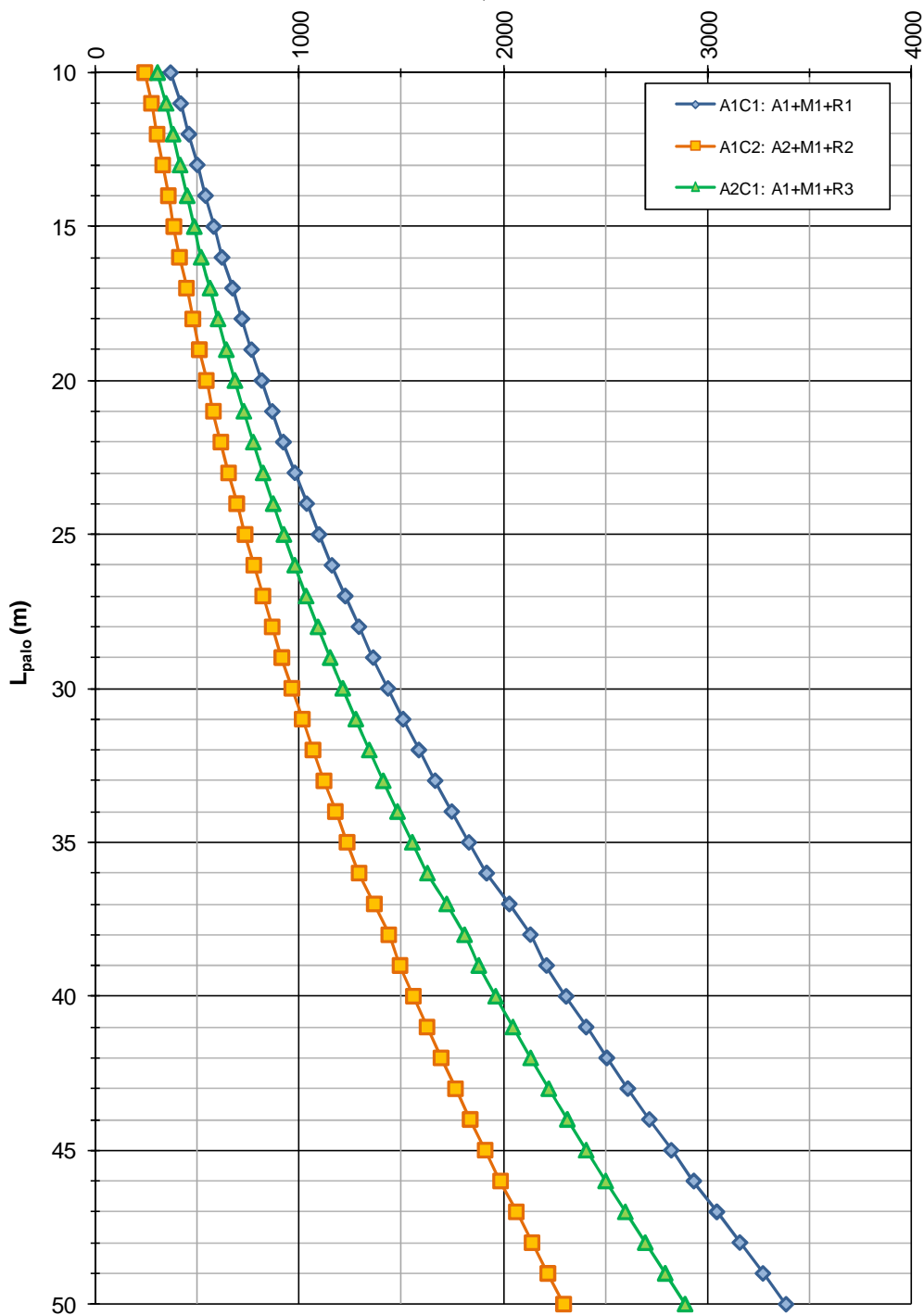
e con riferimento alla seguente bibliografia:

- 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.

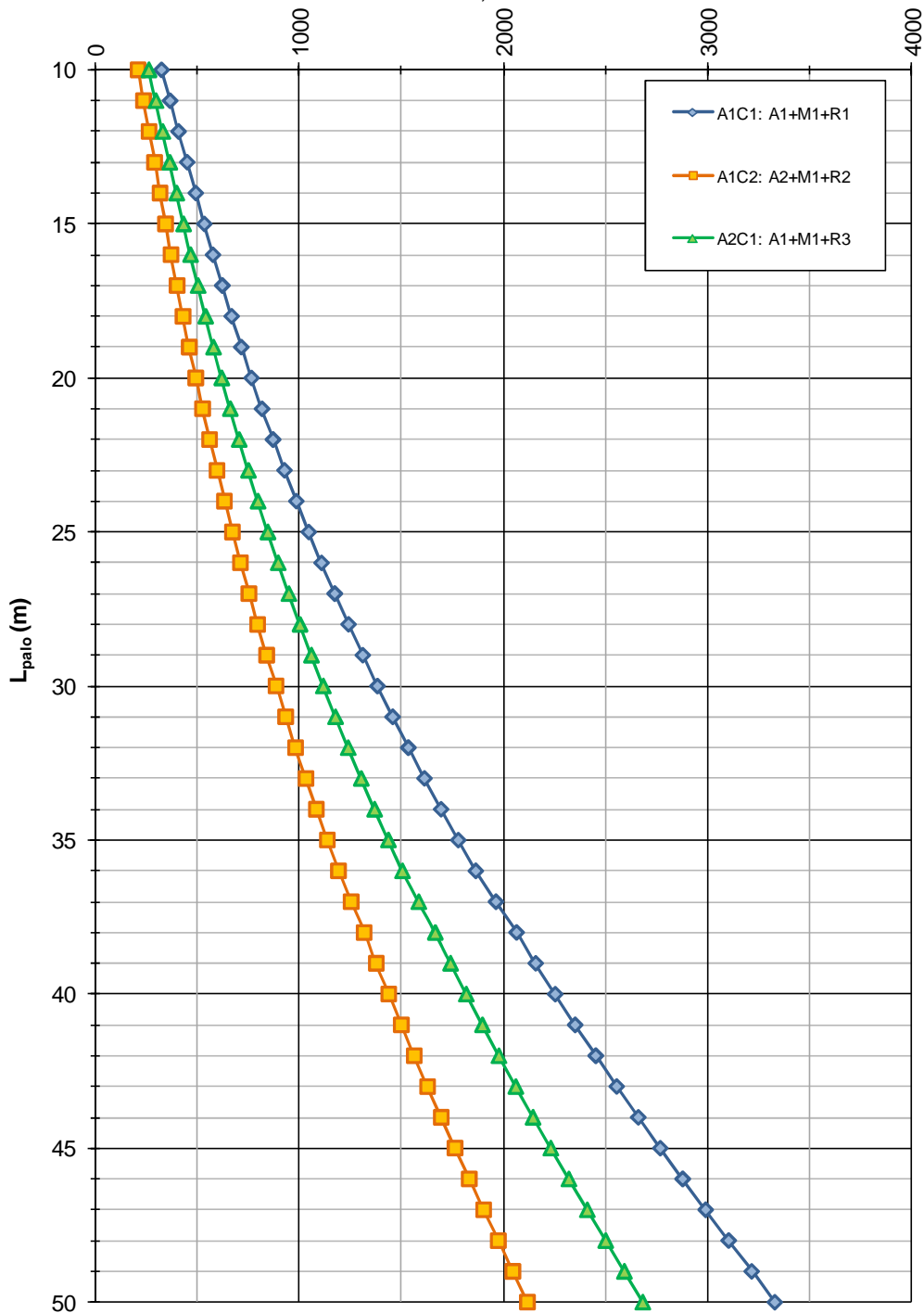
A seguire si riportano i tabulati di derivazione dei grafici stessi.

**Muri ad U - ZO F**  
**NTC del 14/01/2008**  
**Capacità portante a compressione - Pali trivellati  $\phi$  600mm**  
 $R_{c,d}$  (KN)



**FIGURA 6-1: CAPACITÀ PORTANTE A COMPRESSIONE – PALI TRIVELLATI  $\phi$  600**

**Muri ad U - ZO F**  
**NTC del 14/01/2008**  
**Capacità portante a trazione - Pali trivellati  $\phi$  600mm**  
 $R_{t,d}$  (KN)



**FIGURA 6-2: CAPACITÀ PORTANTE A TRAZIONE – PALI TRIVELLATI  $\phi$  600**

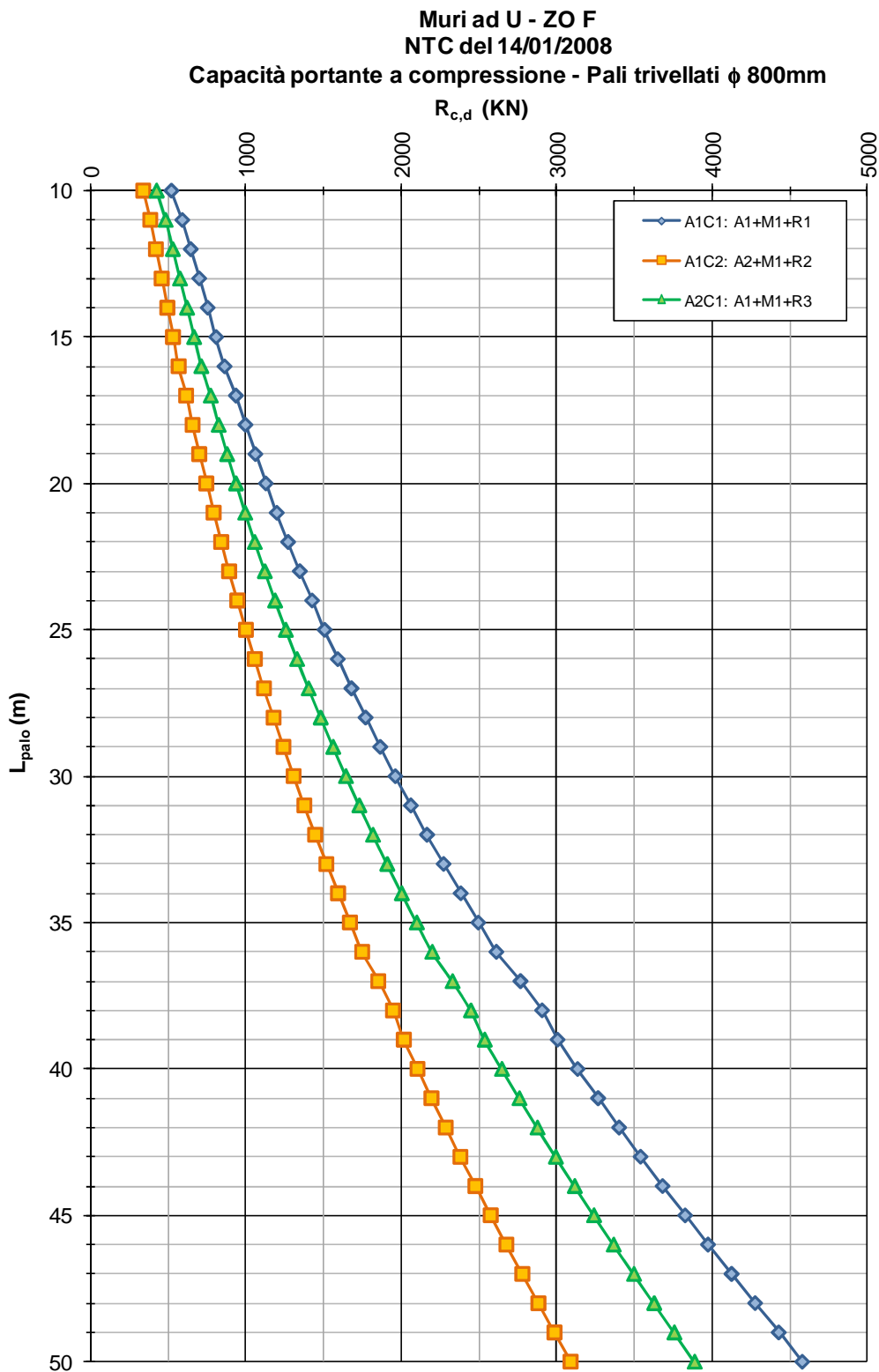


FIGURA 6-3: CAPACITÀ PORTANTE A COMPRESSIONE – PALI TRIVELLATI  $\phi$  800

Muri ad U - ZO F  
NTC del 14/01/2008  
Capacità portante a trazione - Pali trivellati  $\phi$  800mm  
 $R_{t,d}$  (KN)

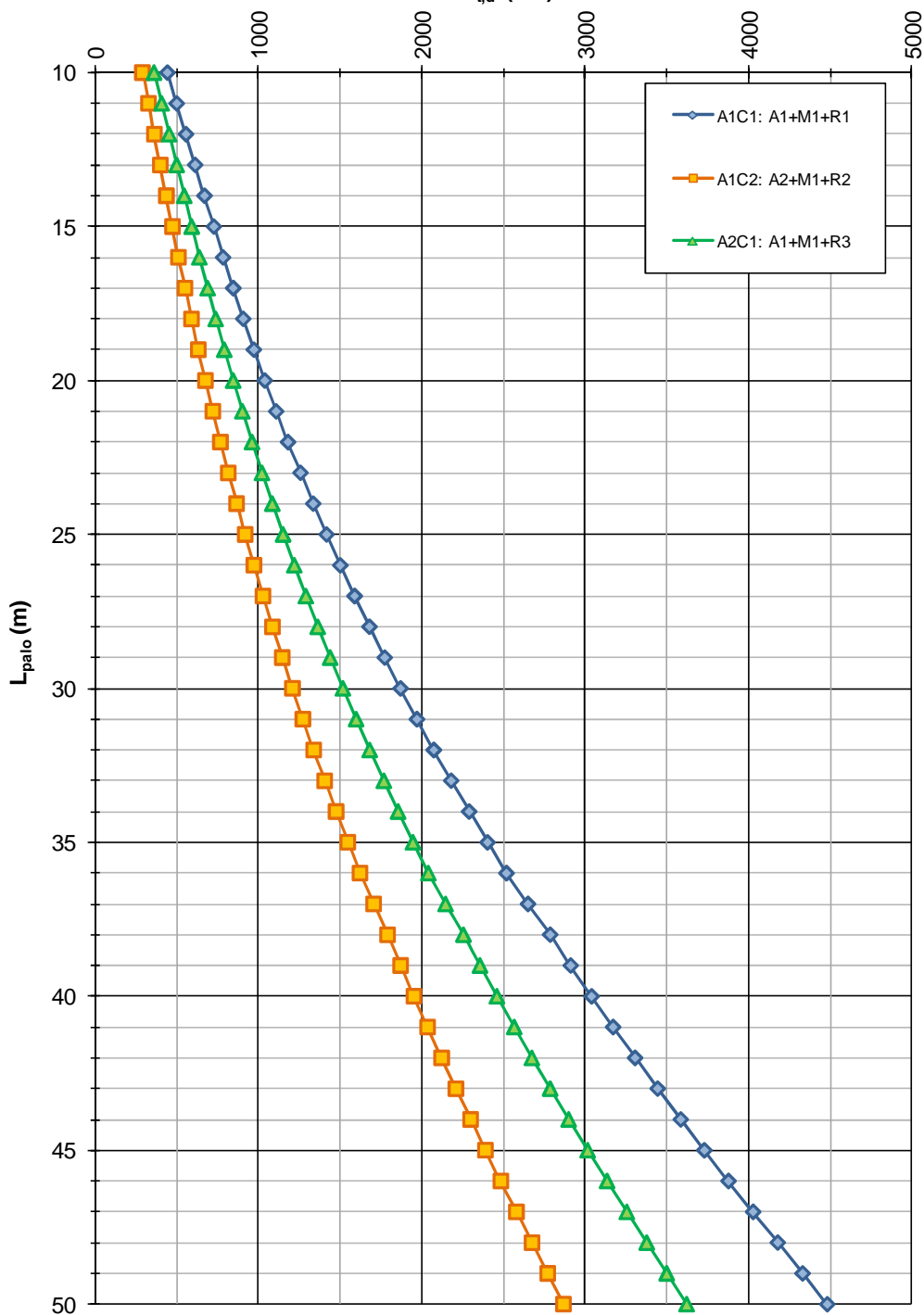


FIGURA 6-4: CAPACITÀ PORTANTE A TRAZIONE – PALI TRIVELLATI  $\phi$  800

Pali trivellati  $\phi$  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	62.92	39.08	49.16	26.93	17.57	21.94	4241.15
2.00	133.33	84.08	105.79	68.82	44.50	55.85	11026.99
3.00	173.80	111.47	140.24	110.72	71.43	89.76	17812.83
4.00	169.12	110.59	139.08	135.81	87.85	110.23	21742.59
5.00	197.89	129.59	162.95	162.81	105.47	132.23	25995.05
6.00	228.56	149.89	188.47	191.70	124.27	155.74	30570.21
7.00	261.13	171.51	215.64	222.49	144.25	180.76	35468.08
8.00	295.60	194.43	244.46	255.18	165.42	207.31	40688.65
9.00	331.96	218.66	274.93	289.77	187.78	235.37	46231.93
10.00	370.23	244.20	307.05	326.25	211.33	264.96	52097.91
11.00	419.83	276.96	348.27	368.15	238.26	298.87	58883.75
12.00	460.30	304.35	382.72	410.04	265.18	332.78	65669.59
13.00	500.77	331.74	417.17	451.94	292.11	366.70	72455.43
14.00	541.24	359.13	451.63	493.83	319.04	400.61	79241.27
15.00	581.71	386.52	486.08	535.73	345.96	434.52	86027.11
16.00	622.18	413.91	520.53	577.63	372.89	468.43	92812.95
17.00	674.16	448.50	564.07	623.81	402.50	505.77	100327.14
18.00	719.60	479.16	602.64	669.18	431.60	542.47	107704.62
19.00	767.20	511.32	643.11	716.73	462.06	580.90	115451.08
20.00	816.91	544.94	685.41	766.42	493.86	621.05	123562.28
21.00	868.74	580.02	729.56	818.23	526.98	662.90	132033.98
22.00	922.70	616.56	775.55	872.17	561.43	706.44	140866.17
23.00	978.78	654.56	823.39	928.22	597.21	751.68	150058.86
24.00	1036.97	694.03	873.07	986.40	634.31	798.62	159612.05
25.00	1097.29	734.96	924.59	1046.69	672.74	847.25	169525.74
26.00	1160.02	777.53	978.19	1109.23	712.57	897.68	179821.13
27.00	1225.11	821.74	1033.86	1174.14	753.88	950.00	190519.44
28.00	1292.58	867.59	1091.58	1241.42	796.67	1004.22	201620.65
29.00	1362.42	915.07	1151.36	1311.07	840.94	1060.34	213124.77
30.00	1434.63	964.18	1213.20	1383.09	886.70	1118.35	225031.79
31.00	1509.21	1014.93	1277.11	1457.48	933.94	1178.26	237341.73
32.00	1586.16	1067.31	1343.07	1534.24	982.65	1240.06	250054.58
33.00	1665.48	1121.33	1411.10	1613.37	1032.85	1303.76	263170.34
34.00	1747.16	1176.98	1481.19	1694.88	1084.53	1369.36	276689.00
35.00	1831.22	1234.27	1553.34	1778.75	1137.69	1436.85	290610.58
36.00	1917.65	1293.19	1627.55	1864.99	1192.34	1506.24	304935.06
37.00	2028.97	1367.96	1721.74	1963.22	1254.48	1585.23	321298.83
38.00	2131.61	1437.90	1809.84	2064.09	1318.26	1666.32	338110.28
39.00	2210.67	1493.21	1879.51	2157.44	1377.35	1741.39	353643.49
40.00	2306.58	1558.67	1961.96	2253.17	1437.92	1818.37	369579.61
41.00	2404.86	1625.77	2046.48	2351.26	1499.97	1897.24	385918.65
42.00	2505.51	1694.49	2133.05	2451.72	1563.50	1978.00	402660.59
43.00	2608.53	1764.86	2221.69	2554.55	1628.51	2060.66	419805.43
44.00	2713.92	1836.85	2312.38	2659.75	1695.00	2145.22	437353.19
45.00	2821.68	1910.48	2405.14	2767.32	1762.98	2231.67	455303.86
46.00	2931.81	1985.75	2499.96	2877.26	1832.43	2320.02	473657.44
47.00	3044.31	2062.65	2596.84	2989.58	1903.37	2410.26	492413.92
48.00	3157.35	2139.93	2694.19	3102.43	1974.65	2500.95	511263.48
49.00	3270.40	2217.21	2791.55	3215.29	2045.93	2591.63	530113.04
50.00	3383.45	2294.48	2888.90	3328.15	2117.20	2682.31	548962.59

Pali trivellati  $\phi$  800

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	100.78	61.83	77.75	36.78	24.31	30.13	5654.87
2.00	208.21	129.59	163.00	93.52	61.09	76.23	14702.65
3.00	262.41	166.05	208.82	150.26	97.87	122.32	23750.44
4.00	243.82	157.41	197.83	184.60	120.66	150.50	28990.11
5.00	283.85	183.51	230.59	221.48	145.02	180.70	34660.06
6.00	326.41	211.36	265.56	260.88	170.97	212.92	40760.28
7.00	371.51	240.95	302.73	302.81	198.49	247.17	47290.77
8.00	419.13	272.29	342.09	347.28	227.60	283.45	54251.54
9.00	469.29	305.38	383.66	394.27	258.29	321.75	61642.57
10.00	521.97	340.21	427.43	443.80	290.57	362.07	69463.88
11.00	592.41	386.21	485.28	500.54	327.35	408.17	78511.67
12.00	646.62	422.67	531.10	557.28	364.13	454.27	87559.45
13.00	700.83	459.12	576.92	614.02	400.92	500.36	96607.24
14.00	755.03	495.58	622.75	670.76	437.70	546.46	105655.03
15.00	809.24	532.04	668.57	727.50	474.48	592.56	114702.82
16.00	863.45	568.49	714.39	784.24	511.26	638.65	123750.60
17.00	936.22	616.45	774.71	846.70	551.62	689.32	133769.52
18.00	997.70	657.65	826.51	908.08	591.30	739.13	143606.16
19.00	1062.07	700.85	880.84	972.35	632.79	791.25	153934.77
20.00	1129.25	745.99	937.61	1039.49	676.07	845.66	164749.71
21.00	1199.25	793.08	996.83	1109.45	721.12	902.34	176045.30
22.00	1272.08	842.12	1058.52	1182.24	767.93	961.28	187821.56
23.00	1347.73	893.11	1122.66	1257.86	816.51	1022.47	200078.49
24.00	1426.22	946.05	1189.27	1336.31	866.86	1085.93	212816.07
25.00	1507.53	1000.93	1258.33	1417.58	918.97	1151.66	226034.32
26.00	1592.13	1058.06	1330.21	1501.85	972.96	1219.77	239761.51
27.00	1679.89	1117.37	1404.84	1589.27	1028.92	1290.42	254025.91
28.00	1770.81	1178.85	1482.22	1679.86	1086.86	1363.59	268827.53
29.00	1864.89	1242.52	1562.35	1773.61	1146.77	1439.29	284166.35
30.00	1962.13	1308.36	1645.23	1870.51	1208.65	1517.52	300042.39
31.00	2062.54	1376.39	1730.85	1970.58	1272.52	1598.28	316455.64
32.00	2166.10	1446.59	1819.22	2073.81	1338.35	1681.56	333406.11
33.00	2272.82	1518.97	1910.34	2180.19	1406.16	1767.38	350893.78
34.00	2382.70	1593.53	2004.21	2289.74	1475.95	1855.72	368918.67
35.00	2495.74	1670.27	2100.82	2402.45	1547.71	1946.59	387480.77
36.00	2611.94	1749.19	2200.18	2518.32	1621.45	2039.99	406580.08
37.00	2767.06	1852.63	2330.44	2650.18	1705.18	2146.18	428398.44
38.00	2905.58	1946.65	2448.84	2785.55	1791.11	2255.18	450813.71
39.00	3005.53	2016.98	2537.38	2910.90	1870.77	2356.16	471524.66
40.00	3134.37	2104.61	2647.74	3039.41	1952.41	2459.67	492772.82
41.00	3266.37	2194.43	2760.84	3171.07	2036.02	2565.71	514558.19
42.00	3401.53	2286.43	2876.69	3305.90	2121.61	2674.28	536880.78
43.00	3539.86	2380.60	2995.29	3443.89	2209.17	2785.37	559740.58
44.00	3681.34	2476.96	3116.63	3585.04	2298.71	2898.99	583137.59
45.00	3825.98	2575.49	3240.73	3729.35	2390.22	3015.14	607071.81
46.00	3973.78	2676.21	3367.57	3876.82	2483.71	3133.82	631543.25
47.00	4124.75	2779.10	3497.16	4027.44	2579.17	3255.03	656551.90
48.00	4276.44	2882.50	3627.38	4178.80	2675.09	3376.82	681684.64
49.00	4428.13	2985.89	3757.61	4330.16	2771.00	3498.61	706817.38
50.00	4579.82	3089.29	3887.83	4481.52	2866.92	3620.40	731950.12

## 7. 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.

### 7.1. TERRENI COESIVI

#### 7.1.1. 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.

### 7.1.2. 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 7-1);

$\tau_i$  = 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 7-1);

$C_u$  = coesione alla base del blocco;

$N_c$  = fattore di capacità portante adimensionale desunto dalla Tabella 7-1 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.

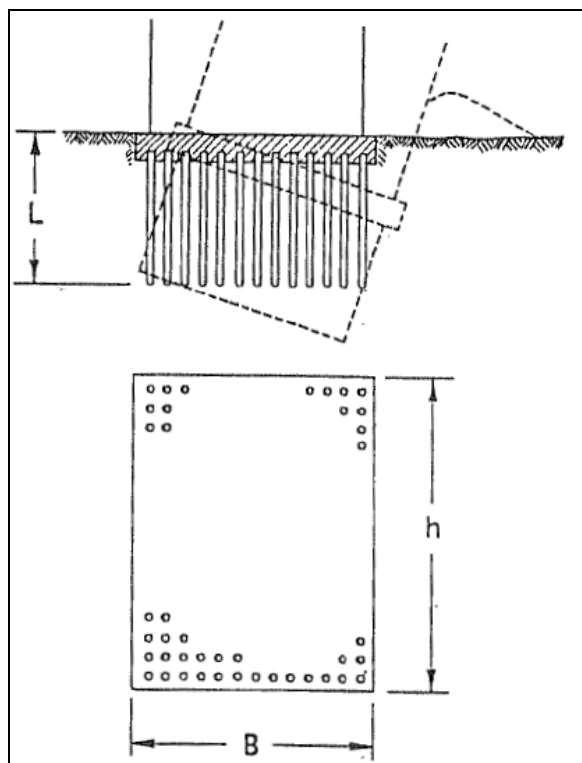


FIGURA 7-1: SCHEMA DI ROTTURA DEL TERRENO PER EFFETTO DELLA PALIFICATA QUALE BLOCCO IN TERRENI COESIVI (TERZAGHI & PECK, 1967)

TABELLA 7-1: COEFFICIENTE  $N_c$  PER DETERMINAZIONE PORTANZA DEL GRUPPO (AGI, 1984)

L/B	$N_c$	
	$h/B=1$	$h/B \geq 10$
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
$\geq 4$	9.0	7.5

## 7.2. 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.

### 7.2.1. 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  $E_v = 1$ .

### 7.2.2. 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.

## 8. COMPORTAMENTO DEI PALI IN ESERCIZIO

### 8.1. 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.

### 8.2. 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 8-1) 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:

$$E_G = R_G n$$

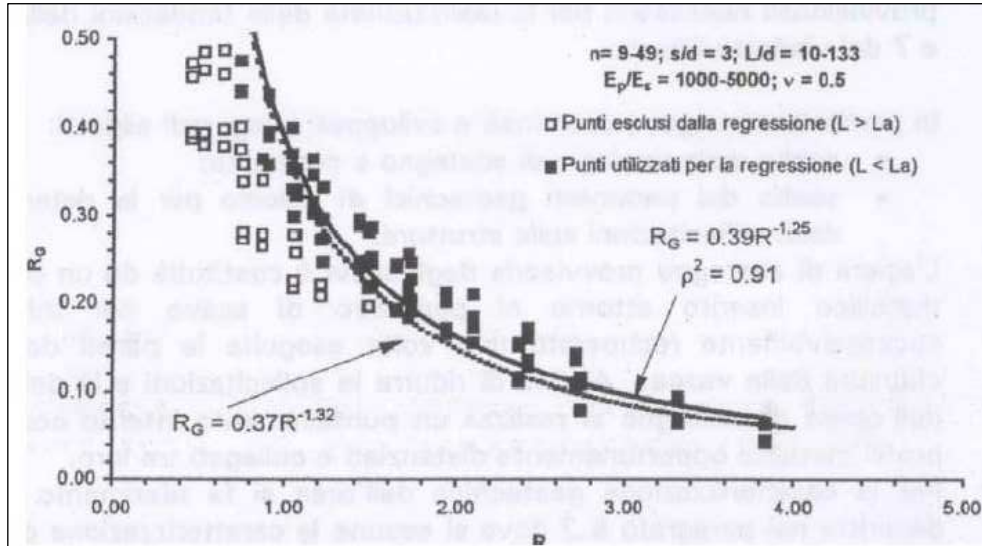


FIGURA 8-1: AMPLIFICAZIONE DEL CEDIMENTO PER EFFETTO GRUPPO

Ad esempio:

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

### 8.3. RIGIDENZE ASSIALI

Alla luce delle considerazioni esposte al § 8.1, 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 § 6 congiuntamente ai tabulati di capacità portante verticale.

**Muri ad U - ZO F**  
**NTC del 14/01/2008**  
**Rigidezza assiale - Pali trivellati  $\phi$  600mm**  
 **$K_{VV}$  (KN/m)**

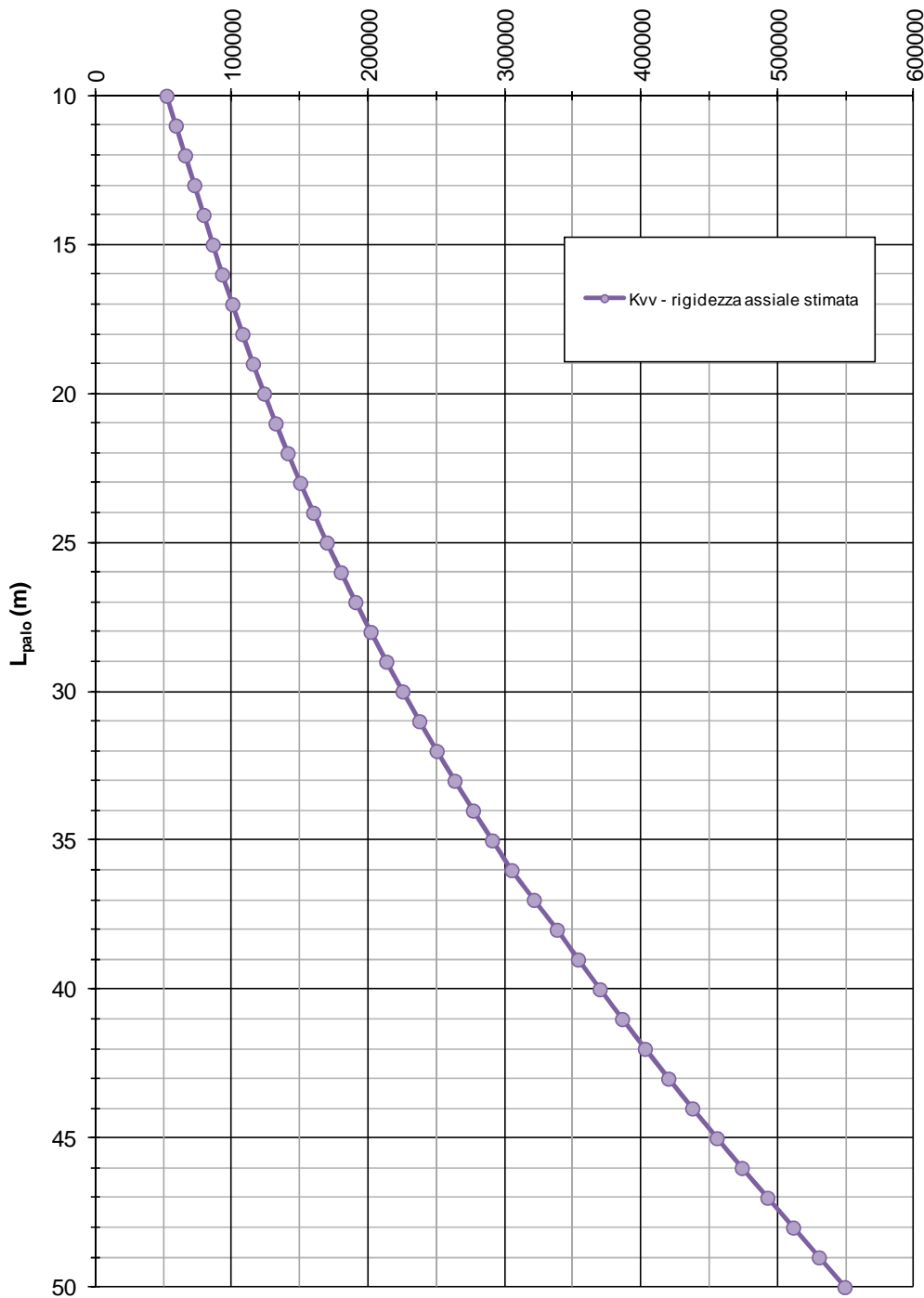


FIGURA 8-2: RIGIDEZZA VERTICALE – PALI TRIVELLATI  $\phi$  600

**Muri ad U - ZO F**  
**NTC del 14/01/2008**  
**Rigidezza assiale - Pali trivellati  $\phi$  800mm**  
 **$K_{VV}$  (KN/m)**

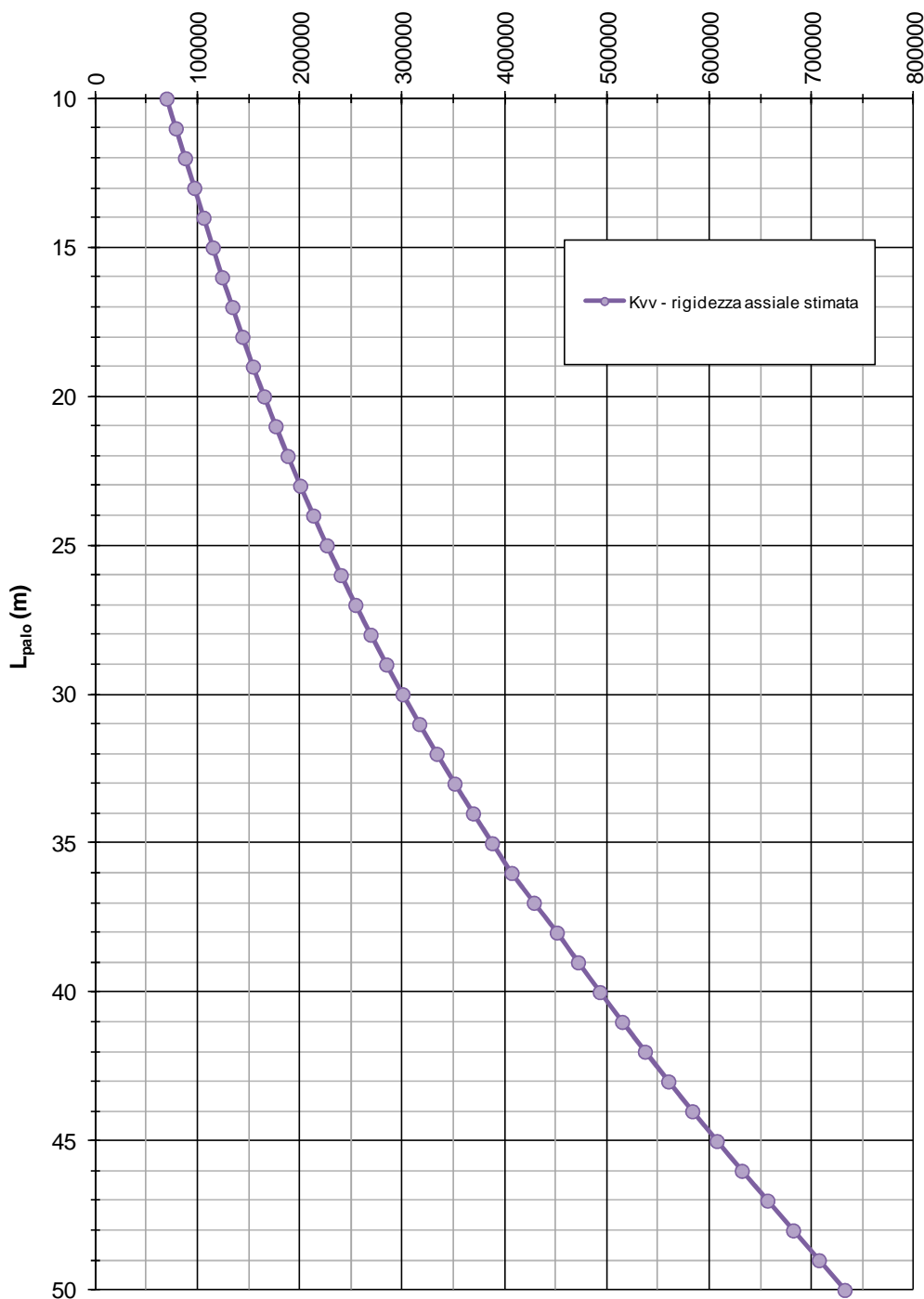


FIGURA 8-3: RIGIDEZZA VERTICALE – PALI TRIVELLATI  $\phi$  800