



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

CODICE C.U.P. E81B08000060009

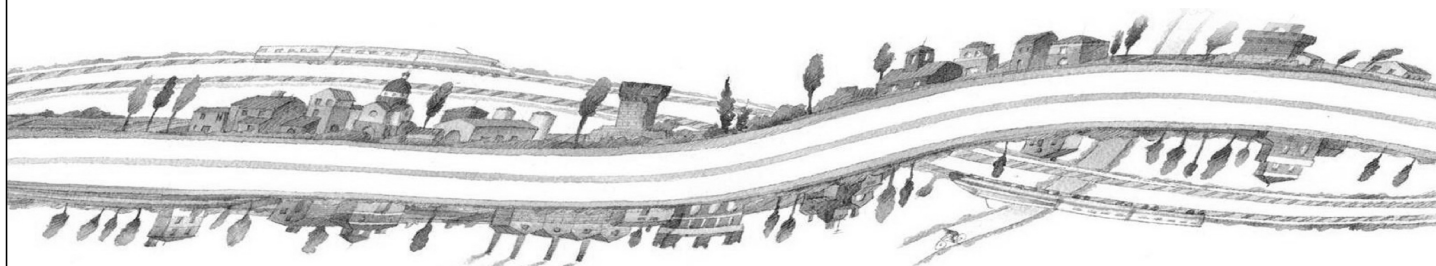
PROGETTO DEFINITIVO

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

GEOTECNICA

VIABILITA' INTERFERITE

RELAZIONE GEOTECNICA VARIANTE ALLA S.P. 468 - SOTTOPASSO SC "SALDE ENTRA"



IL PROGETTISTA

Ing. Gianfranco Marchi
Albo Ing. Ravenna n°342

Gianfranco Marchi

**RESPONSABILE INTEGRAZIONE
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE**

Ing. Antonio Anania
Albo Ing. Perugia n° A2574

Dott. Ing. Antonio Anania
IMPRESA PIZZAROTTI & C. S.p.A.
Iscritto ordine Ingegneri di Perugia n° A2574

IL CONCESSIONARIO

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

Graziano Pattuzzi

G					
F					
E					
D					
C					
B	01.08.2019	EMISSIONE PER OTTEMPERANZA DECRETO VIA DEL 25.07.2017	BOSCHI	MARCHI	ANANIA
A	17.04.2012	EMISSIONE	BOSCHI	MARCHI	SALSI
REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDAZIONE	CONTROLLO	APPROVAZIONE

IDENTIFICAZIONE ELABORATO										DATA: AGOSTO 2019	
NUM. PROGR.	FASE	LOTTO	GRUPPO	CODICE OPERA WBS	TRATTO OPERA	AMBITO	TIPO ELABORATO	PROGRESSIVO	REV.	SCALA:	
0572	PD	0	V27	V0000	0	GT	RB	01	B	-	

INDICE

1. PREMESSA.....	3
2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	4
2.1. NORMATIVE	4
2.2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	4
2.3. ELABORATI DI PROGETTO DEFINITIVO	4
3. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	5
4. VERIFICA DI CAPACITÀ PORTANTE E SCORRIMENTO MEDIANTE I DIAGRAMMI DI INTERAZIONE PER LE FONDAZIONI SUPERFICIALI.....	7
4.1. FONDAZIONE DI LARGHEZZA $B = 12.90$ M E APPROFONDIMENTO $D = 1.60$ M.....	9
4.1.1. Carico limite finalizzato alla determinazione dei domini.....	9
4.1.2. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Drenata.....	10
4.1.3. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Non Drenata	11
4.1.4. Diagrammi di interazione in Condizione Sismica.....	12
4.2. FONDAZIONE DI LARGHEZZA $B = 2.00$ M E APPROFONDIMENTO $D = 1.60$ M.....	13
4.2.1. Carico limite finalizzato alla determinazione dei domini.....	13
4.2.2. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Drenata.....	14
4.2.3. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Non Drenata	15
4.2.4. Diagrammi di interazione in Condizione Sismica.....	16
4.3. FONDAZIONE DI LARGHEZZA $B = 6.00$ M E APPROFONDIMENTO $D = 1.20$ M.....	17
4.3.1. Carico limite finalizzato alla determinazione dei domini.....	17
4.3.2. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Drenata.....	18
4.3.3. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Non Drenata	19
4.3.4. Diagrammi di interazione in Condizione Sismica.....	20
5. COSTANTE DI SOTTOFONDO	21
6. CONSIDERAZIONI IN MERITO ALLE VERIFICHE DI STABILITÀ DEI RILEVATI	22
7. STIMA DEI CEDIMENTI E LORO EVOLUZIONE NEL TEMPO	23
8. STIMA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE ED INDIVIDUAZIONE DELLE AREE LIQUEFACIBILI CON PGA DA APPROCCIO SEMPLIFICATO DA NTC 2008 (PD 2012)	24
8.1. VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE	24
8.2. RISULTATI DELLE VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE	27
8.3. INDIVIDUAZIONE AREE LIQUEFACIBILI	30

9. VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI POST-SISMICI IN TERRENI COESIVI.....	31
10. TRATTAMENTO DEL PIANO DI POSA DEI RILEVATI	32
10.1. CRITERI PER LA DEFINIZIONE DEGLI SPESSORI DI BONIFICA AL DI SOTTO DEI RILEVATI.....	32
10.2. SCHEMA GENERALE DELLE BONIFICHE	32
10.3. LIVELLO PRESTAZIONALE PIANO DI POSA DEI RILEVATI	33
10.4. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI	33
10.5. EFFETTI DELLA VARIAZIONE DELLO SPESSORE DI BONIFICA E DEL RELATIVO MODULO ELASTICO	35
10.6. STUDIO DELLA STABILIZZAZIONE DELLE TERRE CON CALCE	39

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 la viabilità interferita V27 e il calcolo della capacità portante per le opere VST16 – Sottopasso S.C. “Salde Entra” e VST27 – Sottopasso Pista Ciclabile Madonna della Neve.

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;
- considerazioni in merito alla stabilità dei rilevati;
- considerazioni in merito alla valutazione dei cedimenti dei rilevati;
- verifiche di stabilità nei confronti dei fenomeni di liquefazione;
- valutazione dei cedimenti post-sismici in terreni coesivi;
- determinazione del trattamento del piano di posa dei rilevati.

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"; *3rd ICSMFE*, vol. 1, pp. 440-445.

2.3. ELABORATI DI PROGETTO DEFINITIVO

I principali elaborati di progetto definitivo di riferimento per il presente elaborato sono i seguenti:

- PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_01 "Relazione geotecnica generale"
- PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_02 "Criteri generali per le verifiche geotecniche"
- PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_08 "Relazione di verifiche geotecniche - addendum per liquefazione".

3. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

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

OPERA: SOTTOPASSO S.C. "SALDE ENTRA"

Q_{rif} = 12.70 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
CH219	Imprefond - 2011	13.696	50.0	-
CPTU232	Imprefond - 2011	13.451	25.4	-
CPTU233	Geoservice - 2011	13.381	35.0	-

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 $D_r < 50\%$
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} 12.70 m s.l.m.)	Unità -	z _w (m)	γ _n (kN/m ³)	φ' (*) (°)	c' (*) (kPa)	c _u (*) (kPa)	E' (MPa)	M (MPa)
Da 0.0	1		19.5	21-23	3-6	35-90	2.2-8.2	3.0-11.0
Q_{ref} = quota assoluta inizio caratterizzazione (m s.l.m.); z_w = profondità media di falda di progetto; 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 (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 sono emerse criticità in merito all'attacco chimico nel suolo naturale e nell'acqua del terreno, ai sensi della UNI EN 206-1 e della UNI 11104. Le condizioni ambientali risultano aggressive con classe di esposizione XA1.

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.

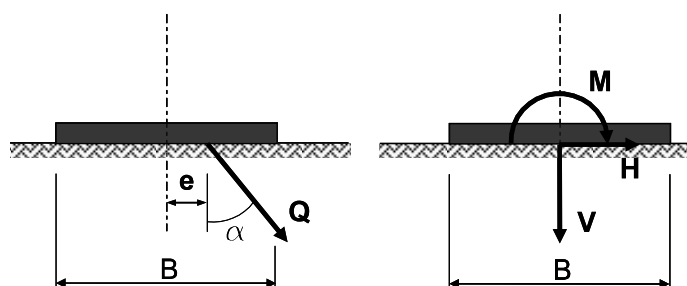


FIGURA 4-1: DEFINIZIONE DELLE COMPONENTI DI CARICO

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 "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.II 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]
VST16	1.6	12.9
	1.6	2.0
VST27	1.2	6.0

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:

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

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

- 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 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 $B = 12.90$ M E APPROFONDIMENTO $D = 1.60$ 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
$V_{max,M1}$	5753	3534	3534
$H_{max,M1}$	-	581	581
$M_{max,M1}$	-	4793	4793
$V_{max,M2}$	3334	2639	2639
$H_{max,M2}$	-	415	415
$M_{max,M2}$	-	3423	3423

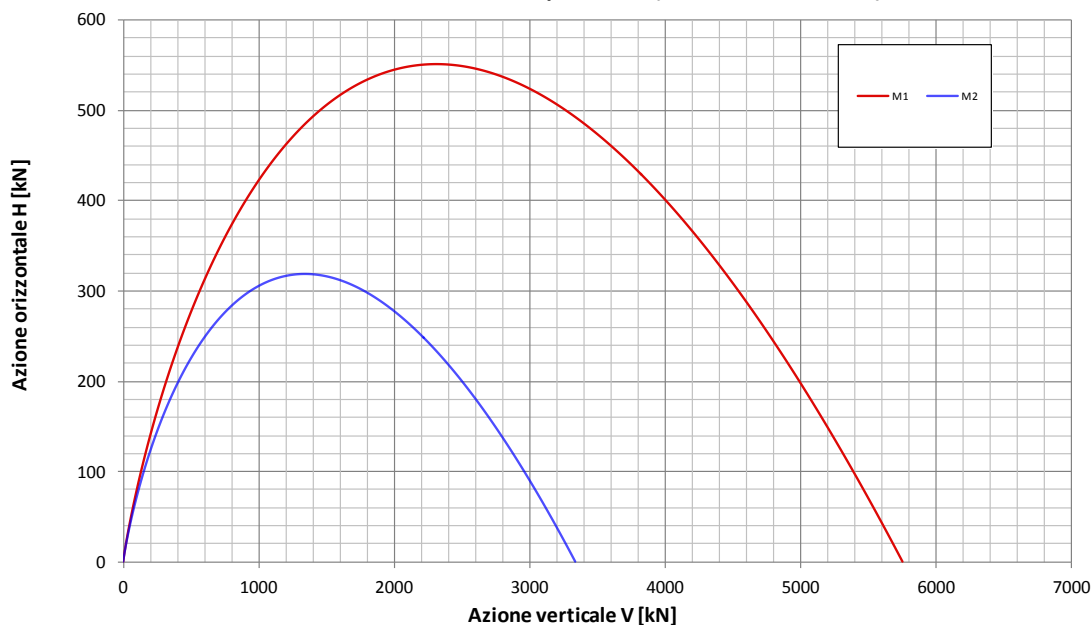
Nel caso in esame trattandosi di fondazioni nastriformi tutti i carichi indicati sono riferiti a un metro lineare di struttura.

4.1.2. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Drenata

Fondazione B=12.9m - Approfondimento D=1.6m

Condizione Statica Drenata

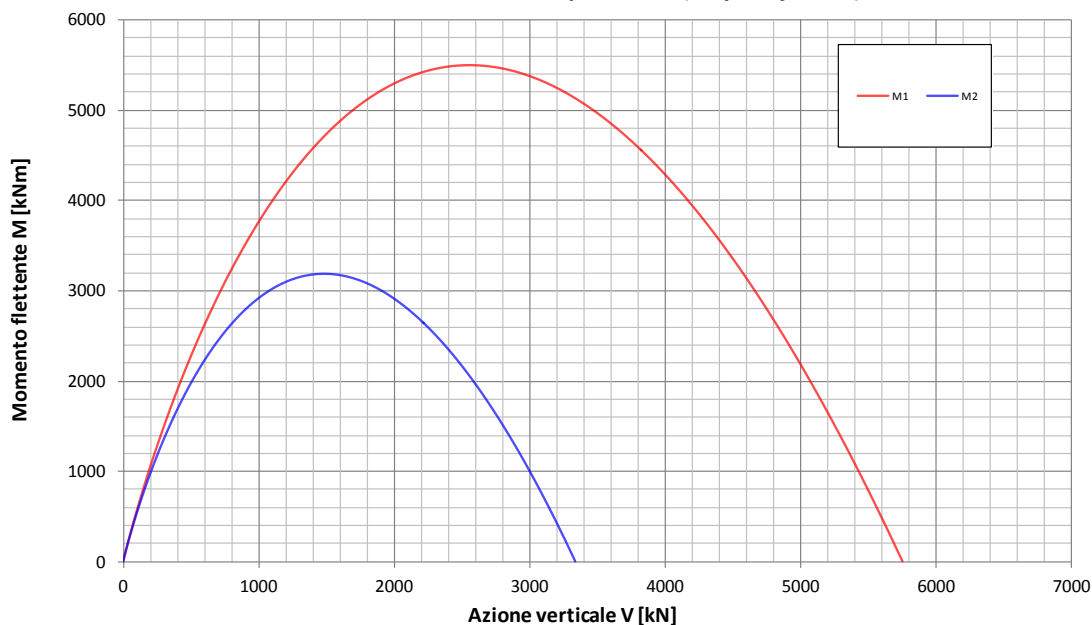
Dominio di interazione nel piano V-H (Brinch Hansen, 1970)



Fondazione B=12.9m - Approfondimento D=1.6m

Condizione Statica Drenata

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

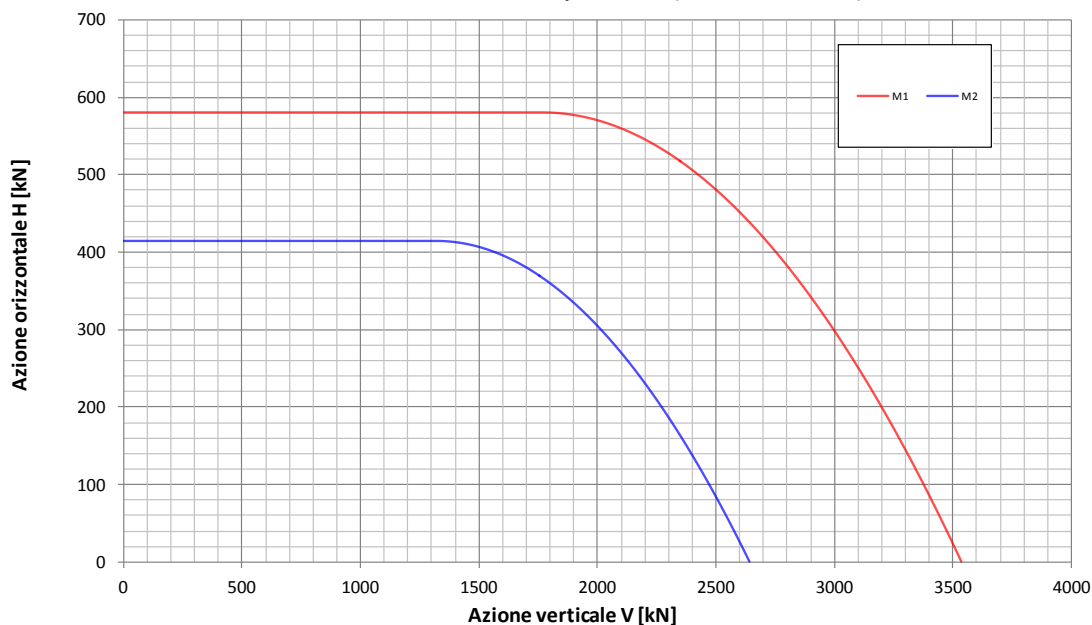


4.1.3. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Non Drenata

Fondazione B=12.9m - Approfondimento D=1.6m

Condizione Statica Non Drenata

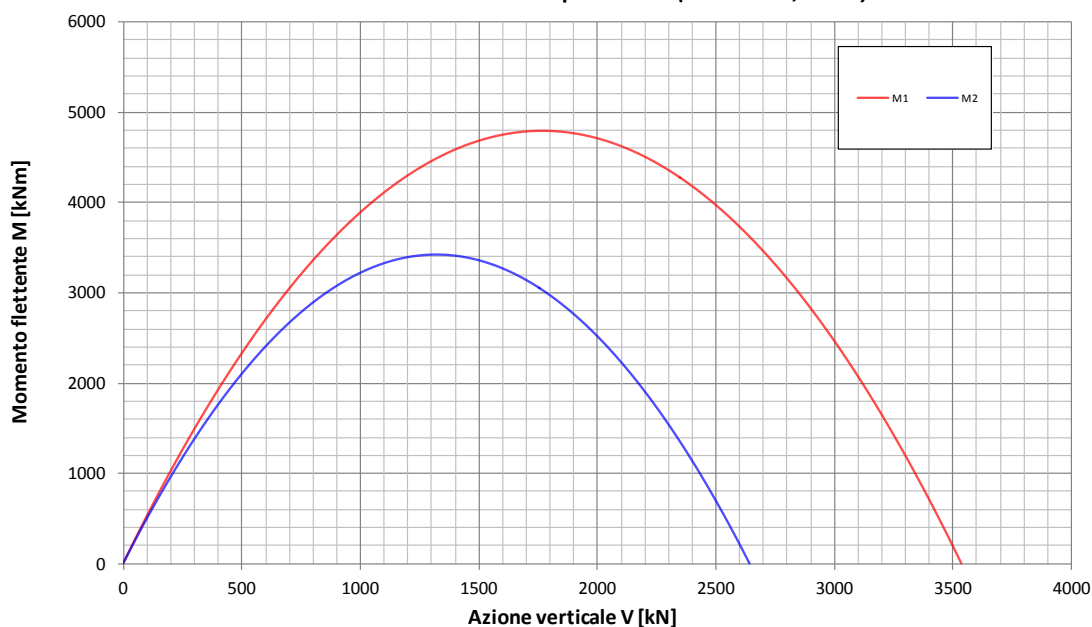
Dominio di interazione nel piano V-H (Gourvenec, 2007)



Fondazione B=12.9m - Approfondimento D=1.6m

Condizione Statica Non Drenata

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

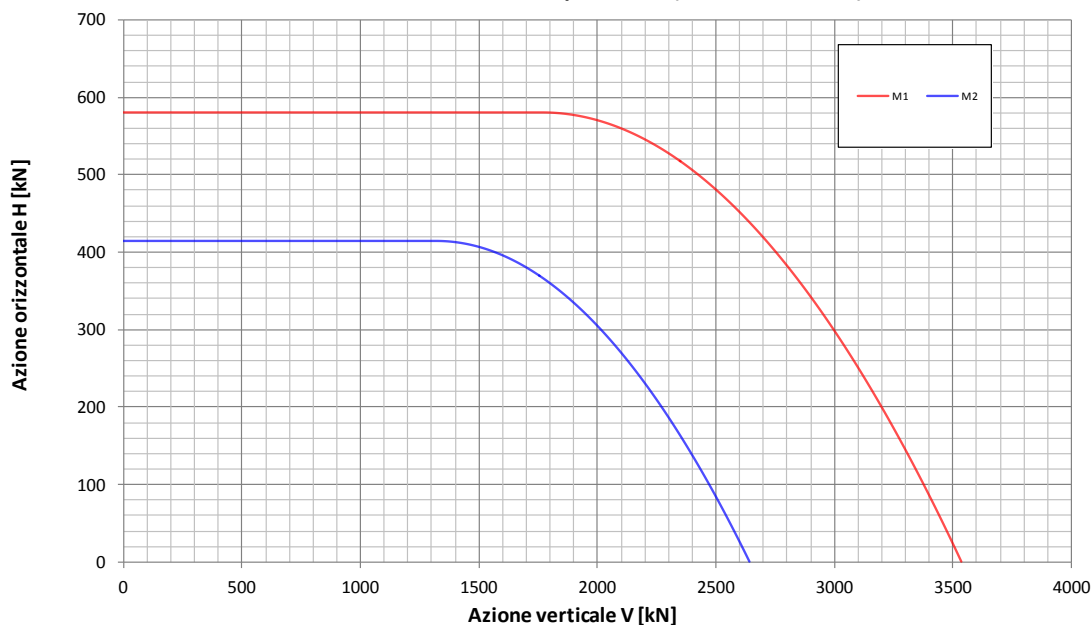


4.1.4. Diagrammi di interazione in Condizione Sismica

Fondazione B=12.9m - Approfondimento D=1.6m

Condizione Sismica Non Drenata

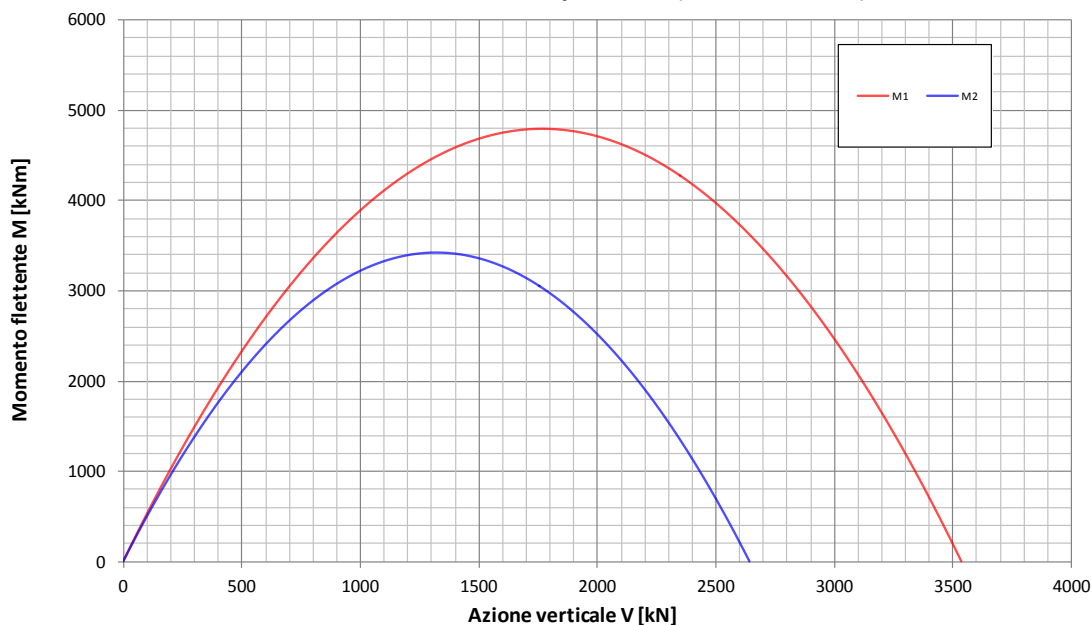
Dominio di interazione nel piano V-H (Gourvenec, 2007)



Fondazione B=12.9m - Approfondimento D=1.6m

Condizione Sismica Non Drenata

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



4.2. FONDAZIONE DI LARGHEZZA $B = 2.00$ M E APPROFONDIMENTO $D = 1.60$ 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
$V_{max,M1}$	675	673	673
$H_{max,M1}$	-	90	90
$M_{max,M1}$	-	115	115
$V_{max,M2}$	425	499	499
$H_{max,M2}$	-	64	64
$M_{max,M2}$	-	82	82

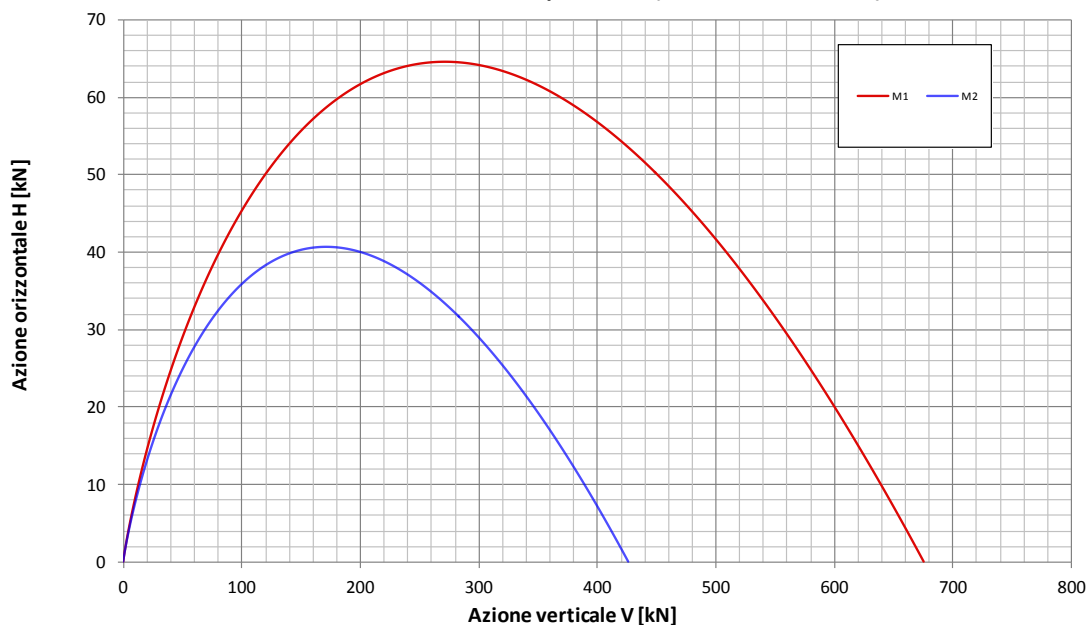
Nel caso in esame trattandosi di fondazioni nastroformi tutti i carichi indicati sono riferiti a un metro lineare di struttura.

4.2.2. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Drenata

Fondazione B=2.0m - Approfondimento D=1.6m

Condizione Statica Drenata

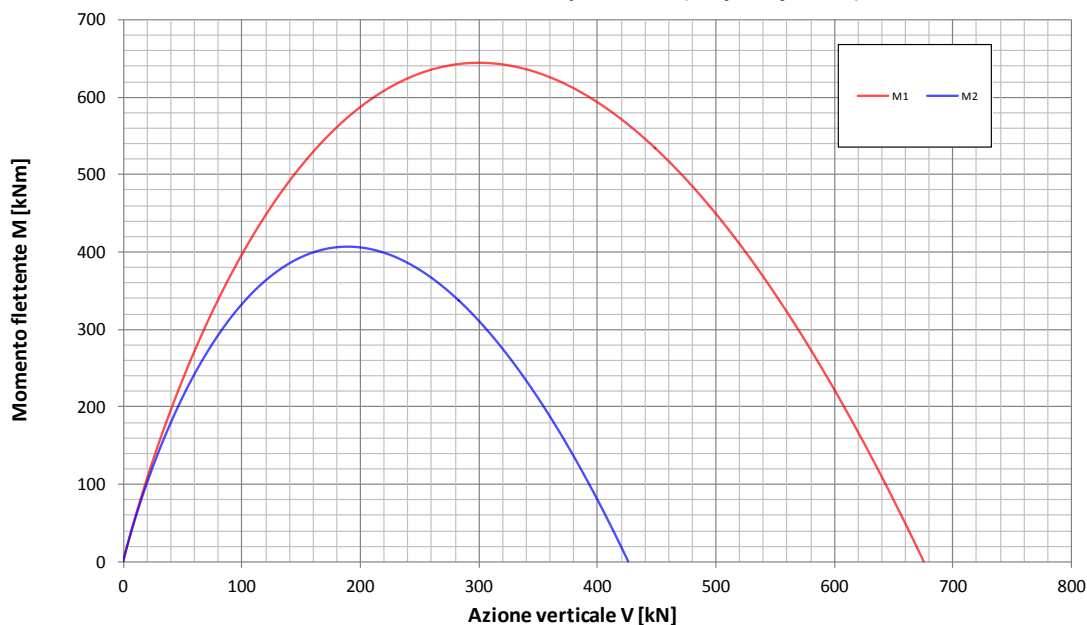
Dominio di interazione nel piano V-H (Brinch Hansen, 1970)



Fondazione B=2.0m - Approfondimento D=1.6m

Condizione Statica Drenata

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

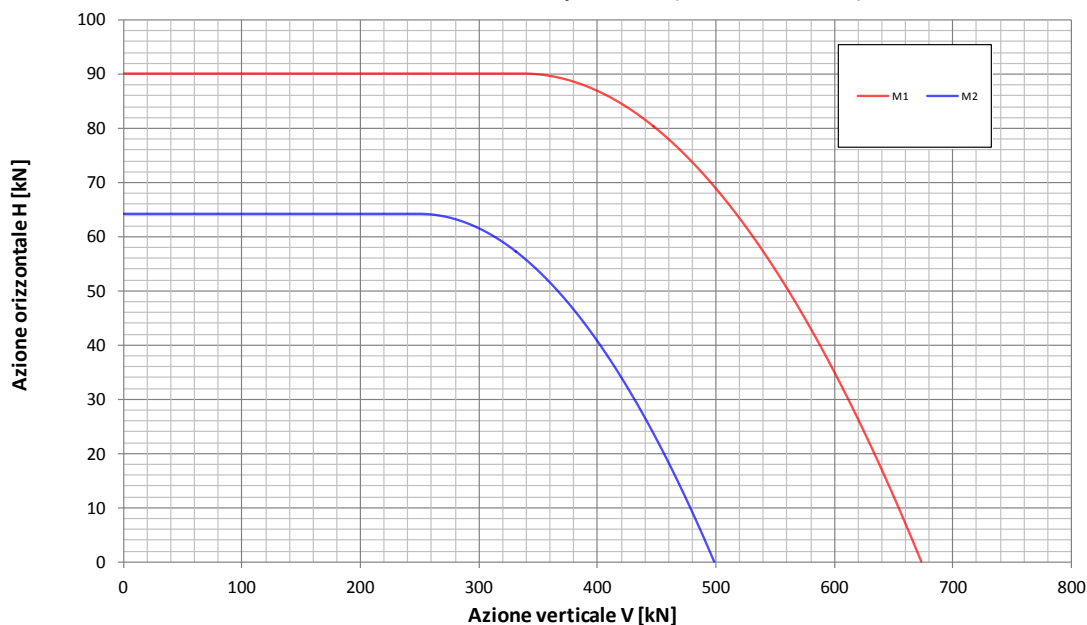


4.2.3. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Non Drenata

Fondazione B=2.0m - Approfondimento D=1.6m

Condizione Statica Non Drenata

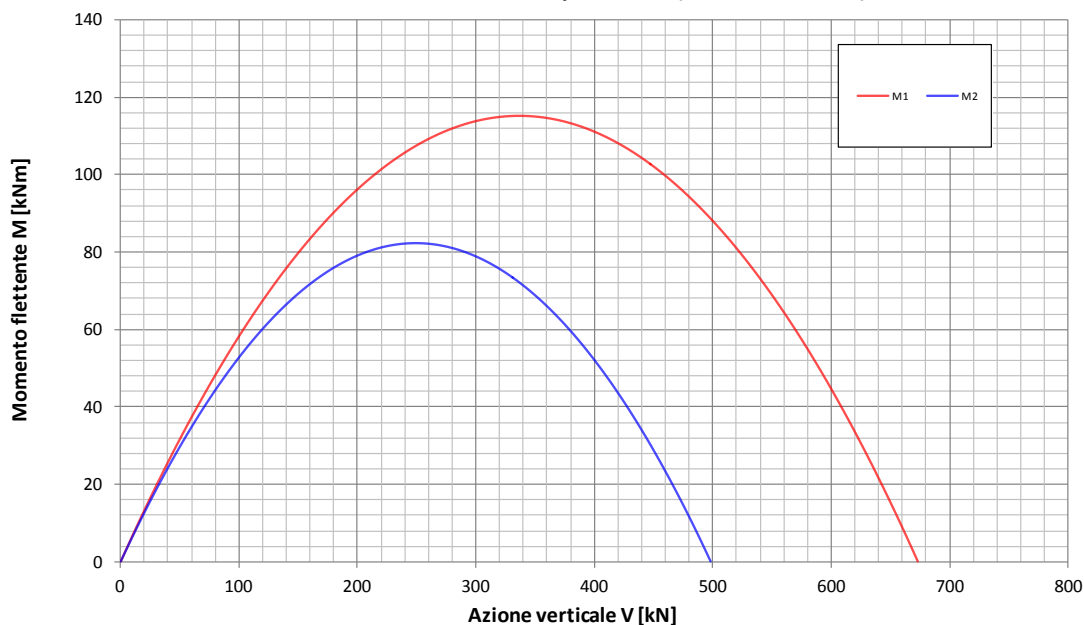
Dominio di interazione nel piano V-H (Gourvenec, 2007)



Fondazione B=2.0m - Approfondimento D=1.6m

Condizione Statica Non Drenata

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

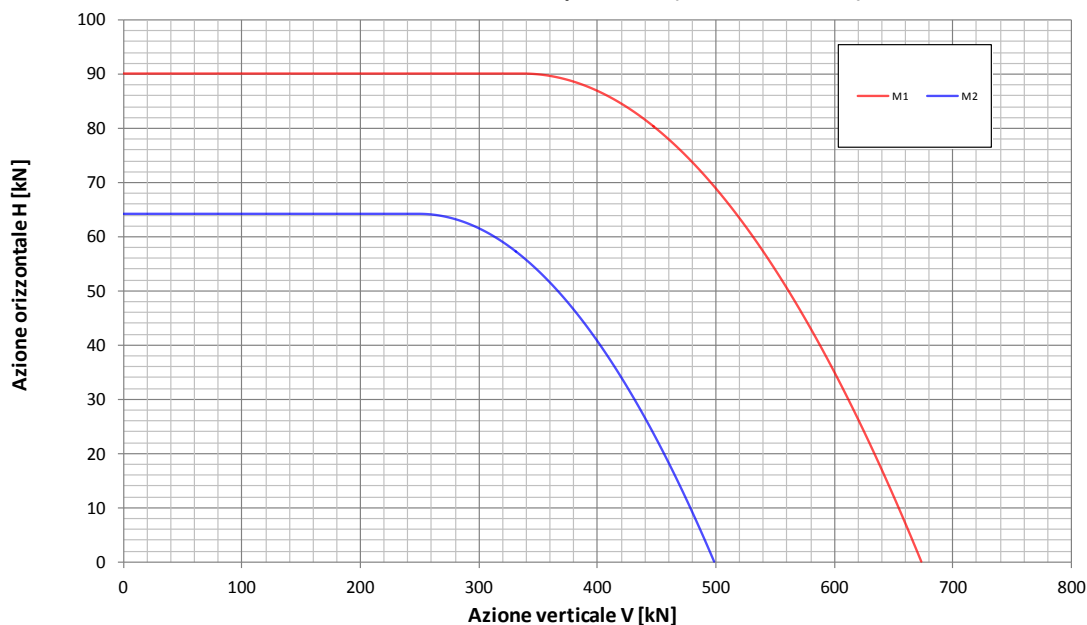


4.2.4. Diagrammi di interazione in Condizione Sismica

Fondazione B=2.0m - Approfondimento D=1.6m

Condizione Sismica Non Drenata

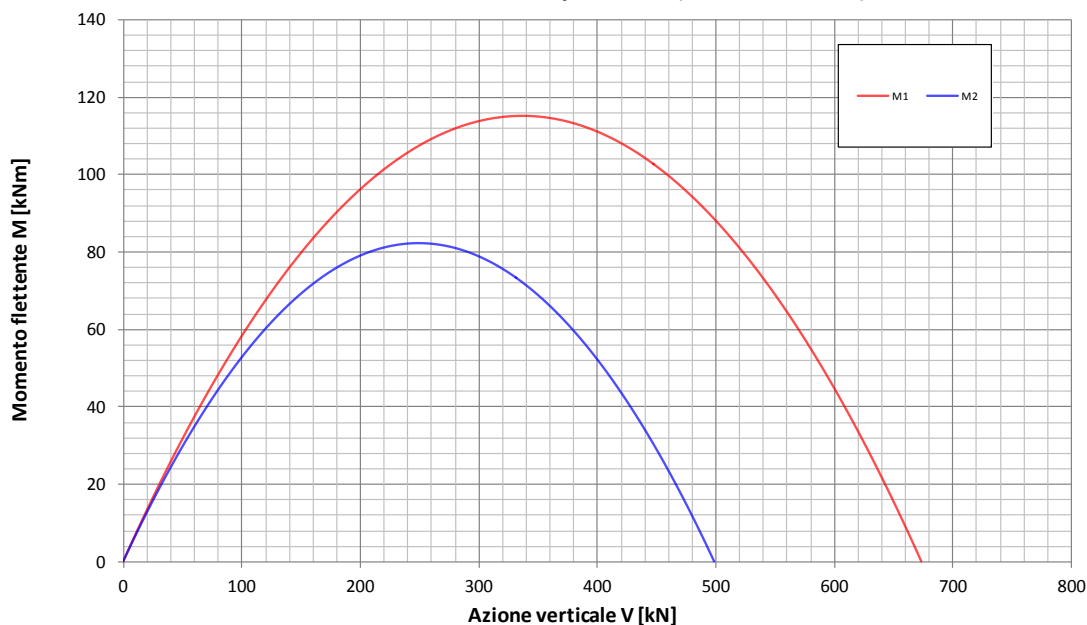
Dominio di interazione nel piano V-H (Gourvenec, 2007)



Fondazione B=2.0m - Approfondimento D=1.6m

Condizione Sismica Non Drenata

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



4.3. FONDAZIONE DI LARGHEZZA $B = 6.00$ M E APPROFONDIMENTO $D = 1.20$ 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
$V_{max,M1}$ [kN]	1933	2139	2139
$H_{max,M1}$ [kN]	-	360	360
$M_{max,M1}$ [kNm]	-	1382	1382
$V_{max,M2}$ [kN]	1156	1568	1568
$H_{max,M2}$ [kN]	-	257	257
$M_{max,M2}$ [kNm]	-	987	987

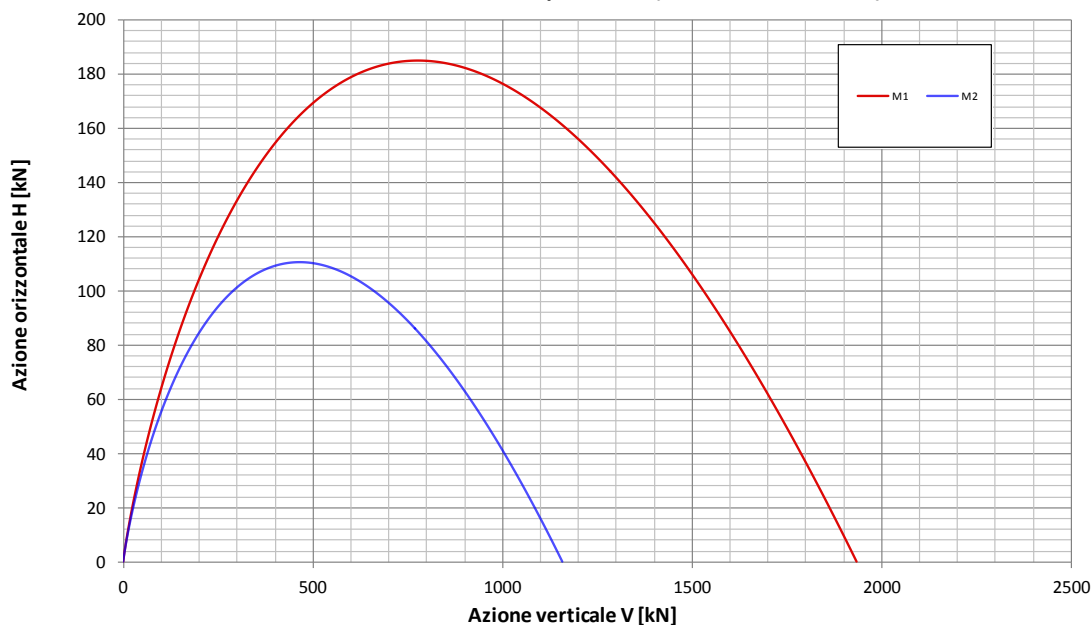
Nel caso in esame trattandosi di fondazioni nastriformi tutti i carichi indicati sono riferiti a un metro lineare di struttura.

4.3.2. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Drenata

Fondazione B=6.0m - Approfondimento D=1.2m

Condizione Statica Drenata

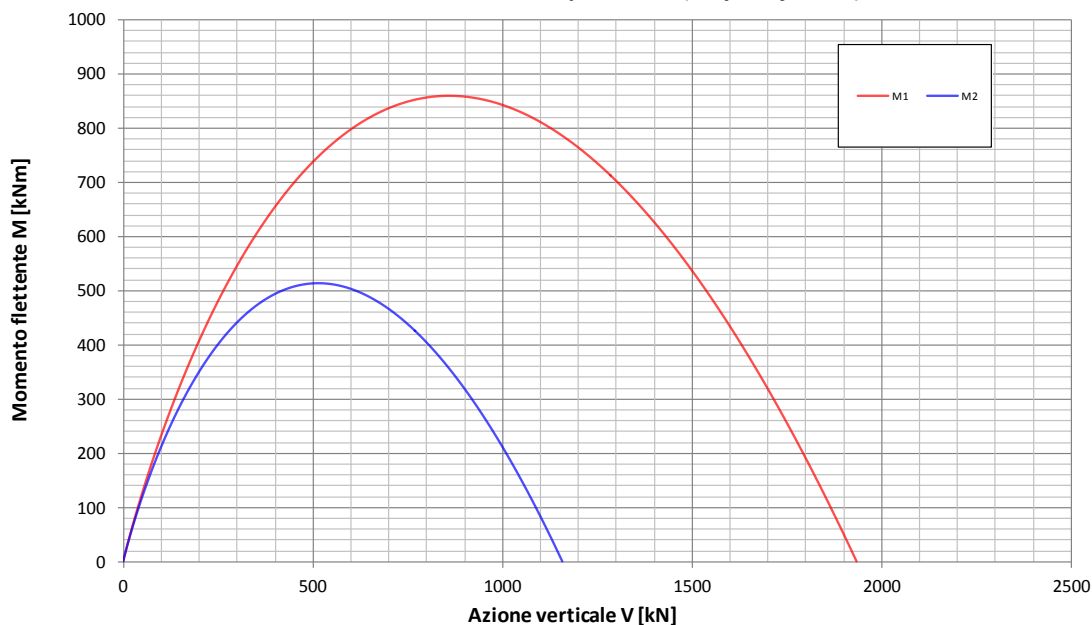
Dominio di interazione nel piano V-H (Brinch Hansen, 1970)



Fondazione B=6.0m - Approfondimento D=1.2m

Condizione Statica Drenata

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

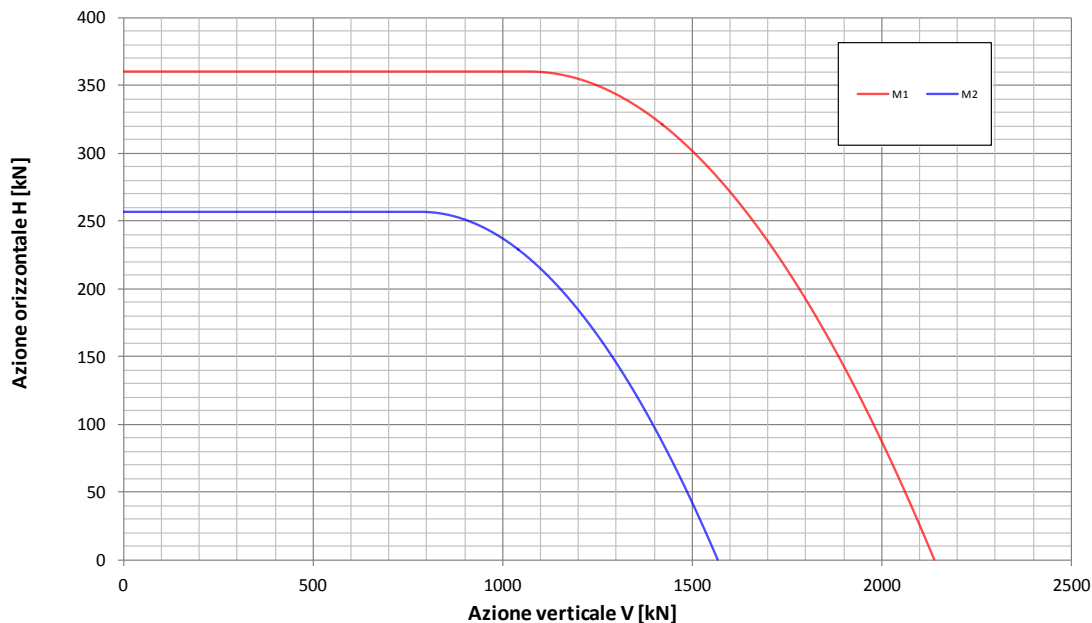


4.3.3. Diagrammi di interazione in Condizione Statica – Non Drenata

Fondazione B=6.0m - Approfondimento D=1.2m

Condizione Statica Non Drenata

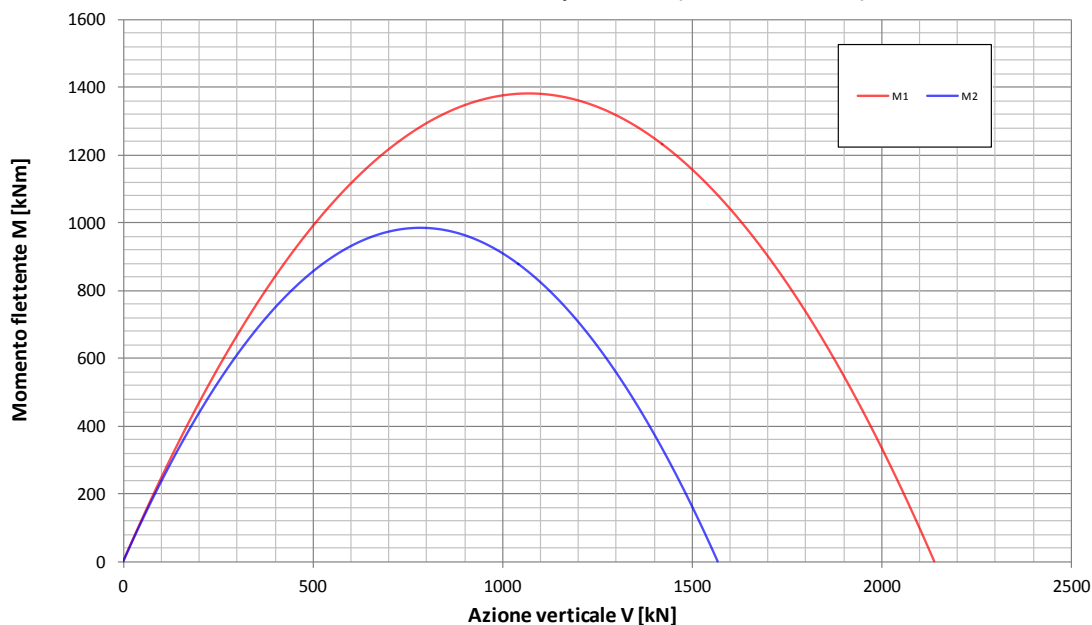
Dominio di interazione nel piano V-H (Gourvenec, 2007)



Fondazione B=6.0m - Approfondimento D=1.2m

Condizione Statica Non Drenata

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

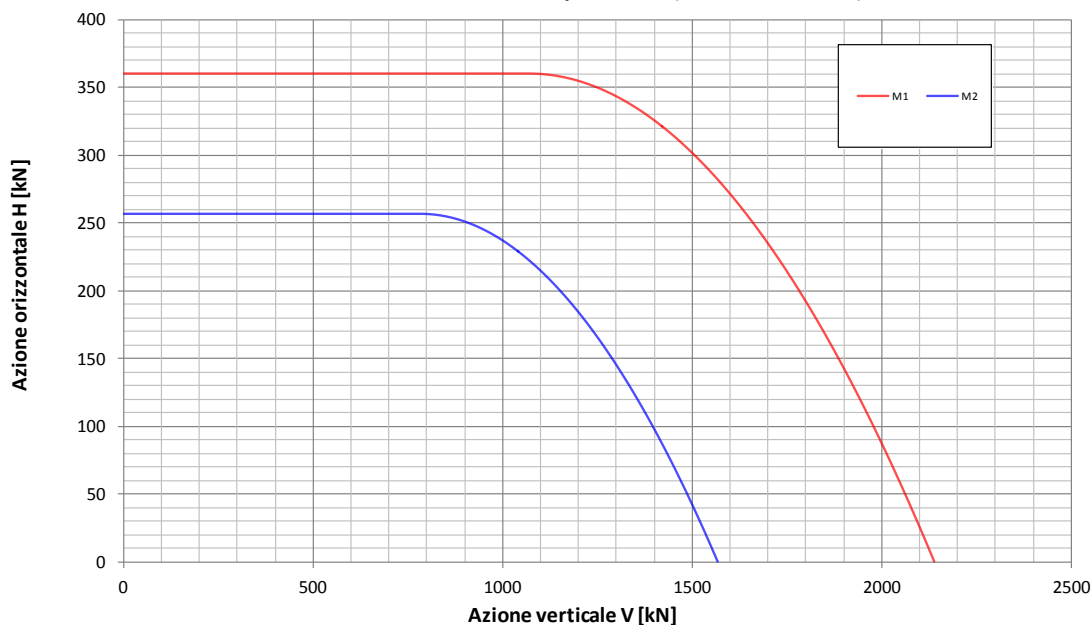


4.3.4. Diagrammi di interazione in Condizione Sismica

Fondazione B=6.0m - Approfondimento D=1.2m

Condizione Sismica Non Drenata

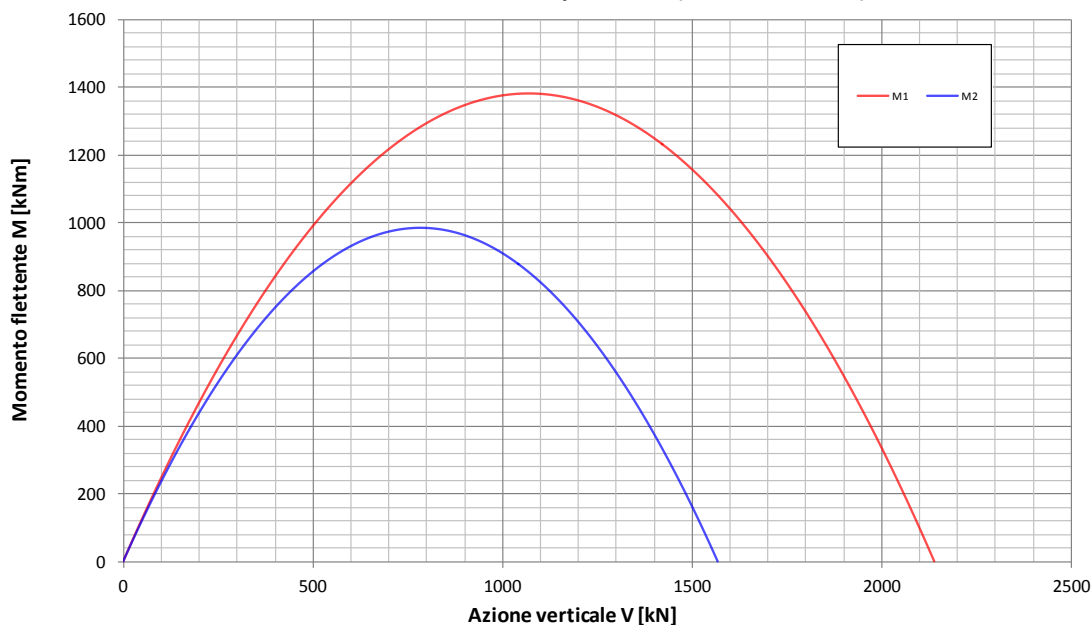
Dominio di interazione nel piano V-H (*Gourvenec, 2007*)



Fondazione B=6.0m - Approfondimento D=1.2m

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. CONSIDERAZIONI IN MERITO ALLE VERIFICHE DI STABILITÀ DEI RILEVATI

Con riferimento al tracciato piano altimetrico della viabilità oggetto della presente relazione è possibile affermare che, con riferimento all'asse principale denominato "V27 – Asse A":

- fino a pk 0+642.47 la viabilità si mantiene prossima al piano campagna (rispetto all'asse autostradale si mantiene in zona omogenea 13);
- da pk 0+642.47 a fine viabilità il rilevato raggiunge altezze massime dell'ordine di 5.0 m. Tra tali progressive l'asse della viabilità V27 si mantiene in affiancamento all'asse autostradale in corrispondenza della zona omogenea 14 ove non sono previste geogriglie di rinforzo alla base del rilevato fino a rilevati di altezza 10.0 m.

Quindi, tenuto conto che per la viabilità interferita oggetto della presente trattazione:

- la geometria assunta per il corpo rilevato risulta analoga alla geometria dei rilevati autostradali in termini di pendenza delle scarpate e inserimento di banche intermedie;
- la larghezza della piattaforma risulta inferiore rispetto a quella dell'asse autostradale;
- il valore del periodo di riferimento per la determinazione dell'azione sismica, $V_R = 75$ anni, risulta inferiore rispetto a quello adottato per l'asse autostradale

si ritiene che le verifiche di stabilità sia del corpo rilevato sia globali siano soddisfatte in quanto risultano tali le verifiche di stabilità dell'asse autostradale. Per tali verifiche geotecniche si rimanda al documento PD_0_A00_00000_0_GT_RB_03 "Relazione di verifiche geotecniche".

7. STIMA DEI CEDIMENTI E LORO EVOLUZIONE NEL TEMPO

Il tratto di viabilità che presenta rilevati di altezza superiore è posto in affiancamento al rilevato autostradale.

Di conseguenza, per gli interventi previsti al fine di accelerare l'evoluzione dei cedimenti nel tempo e per la valutazione dei cedimenti si rimanda all'elaborato PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_03 "Relazione di verifiche geotecniche".

8. STIMA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE ED INDIVIDUAZIONE DELLE AREE LIQUEFACIBILI CON PGA DA APPROCCIO SEMPLIFICATO DA NTC 2008 (PD 2012)

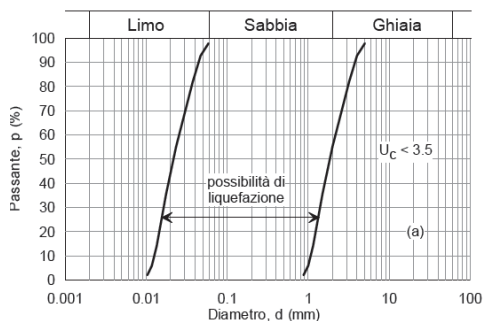
8.1. VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

In terreni saturi sabbiosi sollecitati in condizioni non drenate da azioni cicliche dinamiche, il termine liquefazione comprende una serie di fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio o ad accumulo di deformazioni plastiche.

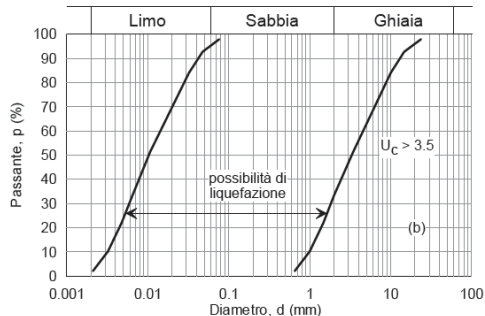
L'avvenuta liquefazione si manifesta, in presenza di manufatti, attraverso la perdita di capacità portante e/o lo sviluppo di elevati cedimenti e rotazioni.

In base alle NTC2008 di cui al D.M. 14-01-2008 la verifica di liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

1. eventi sismici attesi di magnitudo M inferiore a 5;
2. accelerazione massime attese al piano campagna in assenza di manufatti minori di 0.1 g;
3. profondità media stagionale della falda superiore a 15.0 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
4. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ dove $(N1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (SPT) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (CPT) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
5. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nel grafico a), nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3.5$, e nel grafico b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3.5$.



a)



b)

Nel caso in esame, non essendo nelle condizioni sopra elencate, verrà valutato il coefficiente di sicurezza alla liquefazione (F) alle profondità in cui sono presenti i terreni potenzialmente liquefacibili, adottando metodi di analisi semplificata in termini di tensioni totali.

Tali metodi sono basati sulle prove penetrometriche statiche disponibili e sulla valutazione, ad ogni profondità z del deposito compreso nei primi 20 m, del coefficiente di sicurezza:

$$F_L = \frac{CRR}{CSR}$$

dove:

- $CRR = \frac{\tau_{ult}}{\sigma'_v}$, è la resistenza normalizzata alla pressione verticale efficace iniziale;
- $CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_v} = \frac{0,65 \times \tau_{max}}{\sigma'_v}$ è la tensione normalizzata indotta dal terremoto.

I risultati delle analisi saranno presentati riportando l'andamento con la profondità del fattore di sicurezza alla liquefazione per ciascuna delle verticali indagate e determinando anche l'indice del potenziale di liquefazione I_L definito dalla seguente relazione:

$$I_L = \int_0^{20} F(z) \cdot w(z) \cdot dz$$

in cui:

- z è la profondità dal piano campagna, variabile tra 0 e 20 metri; l'analisi di liquefazione considera i terreni presenti nei primi 20 m di profondità, in accordo alle indicazioni di letteratura tecnica secondo la quale, oltre questa profondità, sono poco probabili fenomeni di liquefazione significativi;
- $w(z) = 10 - 0,5z$;
- $F = 1 - F_L$ se $F_L \leq 1$ ovvero $F = 0$ se $F_L > 1$

Il potenziale di liquefazione I_L fornisce una valutazione "integrale" degli effetti della liquefazione.

Il rischio di liquefazione può essere così stimato:

- $I_L = 0$ il rischio di liquefazione è molto basso
- $0 < I_L \leq 5$ il rischio di liquefazione è basso
- $5 < I_L \leq 15$ il rischio di liquefazione è elevato
- $I_L > 15$ il rischio di liquefazione è estremamente elevato.

Operativamente, le analisi di liquefazione sono state sviluppate con il programma di calcolo LiquefyPro della CivilTech Software, Washington State (USA).

In accordo alla prescrizione n. 30 del Decreto VIA, nell'aggiornamento del 2019 del Progetto Definitivo sono state:

- analizzate tutte le prove penetrometriche CPTU disponibili a corredo del Progetto Definitivo e relative integrazioni;
- interpretate le medesime prove per individuare la presenza di orizzonti potenzialmente liquefacibili nei primi 20 m da piano campagna.

Il potenziale di liquefazione è stato calcolato considerando come PGA di input quella da approccio semplificato e assumendo i seguenti parametri:

- Comune di Finale Emilia;
- Vita Nominale: 50 anni;
- Classe d'uso: III;
- Periodo di riferimento: 75 anni;

- Categoria di sottosuolo: D;
- Categoria topografica: T1.

Per il calcolo della PGA è stato utilizzato il foglio elettronico di calcolo *Spettri-NTC ver 1.0.3* messo a disposizione dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

La magnitudo momento di riferimento è stata assunta pari a $M_w = 5.5$ per tutte le viabilità oggetto di analisi, come descritto nell'elaborato PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_02: Criteri generali verifiche geotecniche.

8.2. RISULTATI DELLE VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE

Viene analizzata solo la prova CPTUL-046 che presenta potenziale di liquefazione massimo come si evince dai risultati esposti nell'elaborato PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_08 "Relazione di verifiche geotecniche - addendum per liquefazione"; in tale elaborato le verifiche a liquefazione sono state condotte con i parametri sismici propri dell'asse autostradale.

Di seguito si riportano, in forma tabellare, i risultati delle verifiche di liquefazione per ciascuna verticale di indagine in termini di:

- IL, potenziale di liquefazione;
- Cedimenti post sismici, per verticale di indagine caratterizzata da IL >5.

TABELLA 8-1: RIEPILOGO STIMA POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE IL E CEDIMENTI POST-SISMICI VIABILITÀ INTERFERITA V27

n° CPTU	Vita Nominale [anni]	Classe d'uso	Categoria di sottosuolo	Comune	Falda m da p.c.	Magnitudo	a_{max}/g	Potenziale di liquefazione (IL)	Cedimenti post-sismici [cm]	IL>5?
CPTUL-046	50	III	D	Finale Emilia (MO)	1	5.50	0.303	4.02		NO

Si riportano, inoltre, i risultati in forma grafica delle verifiche di liquefazione in termini di:

- IL, potenziale di liquefazione;
- FS, fattore di sicurezza espresso come rapporto tra rapporto di resistenza ciclica CRR e rapporto di tensione ciclica CSR (per la cui descrizione dettagliata si rimanda all'elaborato PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_02: Criteri generali verifiche geotecniche).

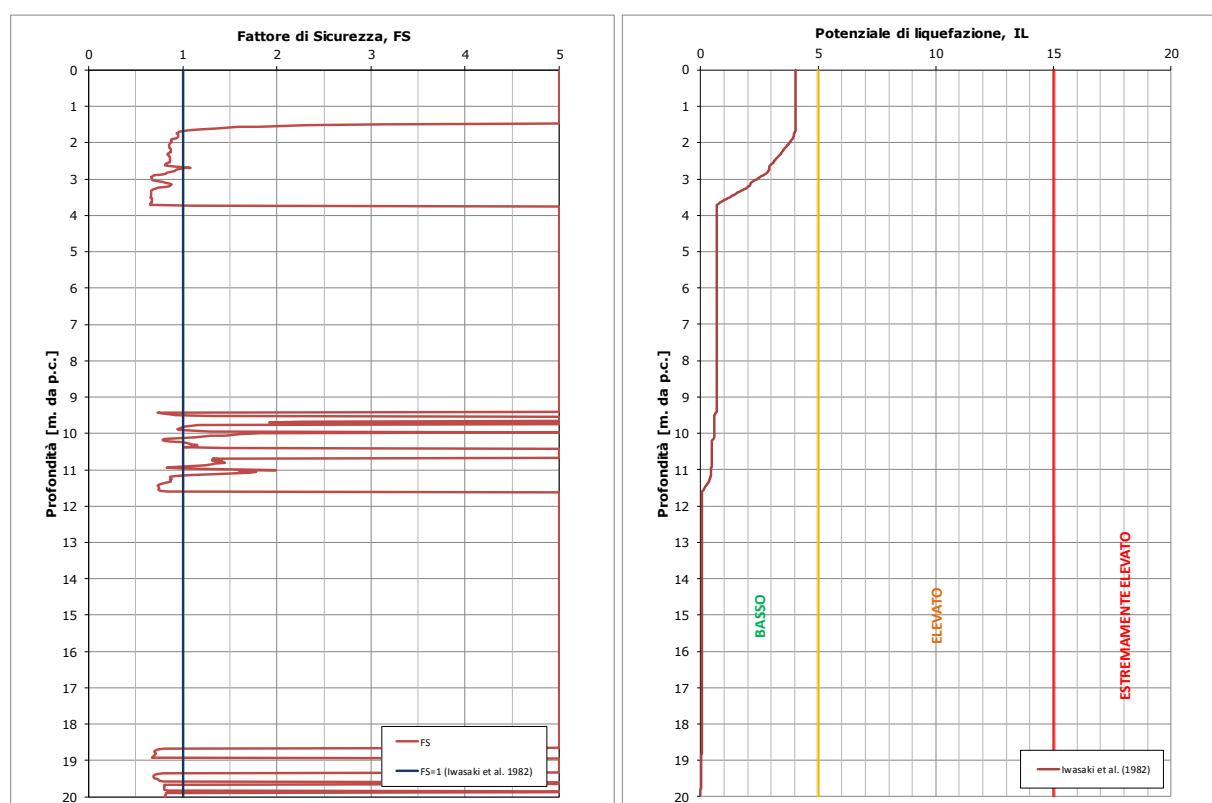
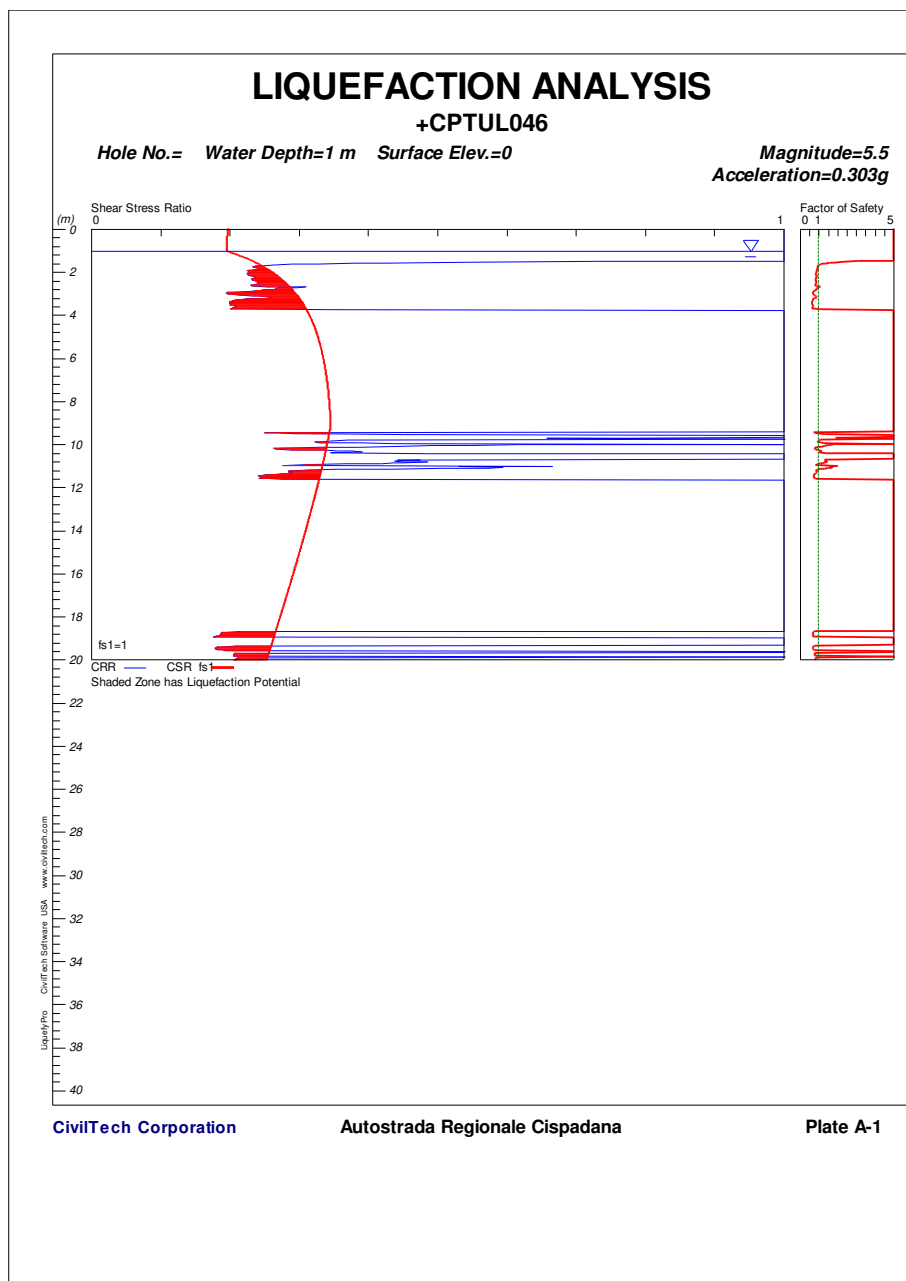


FIGURA 8-1: OUTPUT DI CALCOLO DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE PER LA CPTUL046 CON ACCELERAZIONE DA APPROCCIO SEMPLIFICATO

Gli Output del software LiquefyPro sono riportati nella figura seguente.



8.3. INDIVIDUAZIONE AREE LIQUEFACIBILI

In accordo alla prescrizione n. 33 del Decreto VIA, nell'aggiornamento del 2019 del Progetto Definitivo si identifica "zona liquefacibile" un'area ove il potenziale di liquefazione $IL > 5$. Per maggiori dettagli si faccia riferimento al documento PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_02: Criteri generali verifiche geotecniche.

La Tabella 8-1 evidenzia che in nessun caso si verifica la condizione $IL > 5$, pertanto la viabilità interferita V27 non presenta aree liquefacibili ai sensi del Decreto VIA.

9. VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI POST-SISMICI IN TERRENI COESIVI

Per quanto concerne la valutazione dei cedimenti post-sismici in terreni coesivi si rimanda al documento PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_03.

10. TRATTAMENTO DEL PIANO DI POSA DEI RILEVATI

10.1. CRITERI PER LA DEFINIZIONE DEGLI SPESSORI DI BONIFICA AL DI SOTTO DEI RILEVATI

Per quanto concerne i criteri per la definizione del piano di posa dei rilevati/trincee si rimanda all'elaborato PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_02 "Criteri generali verifiche geotecniche".

10.2. SCHEMA GENERALE DELLE BONIFICHE

Lo schema generale delle bonifiche effettuate al piano di posa dei rilevati è riportato nella figura seguente.

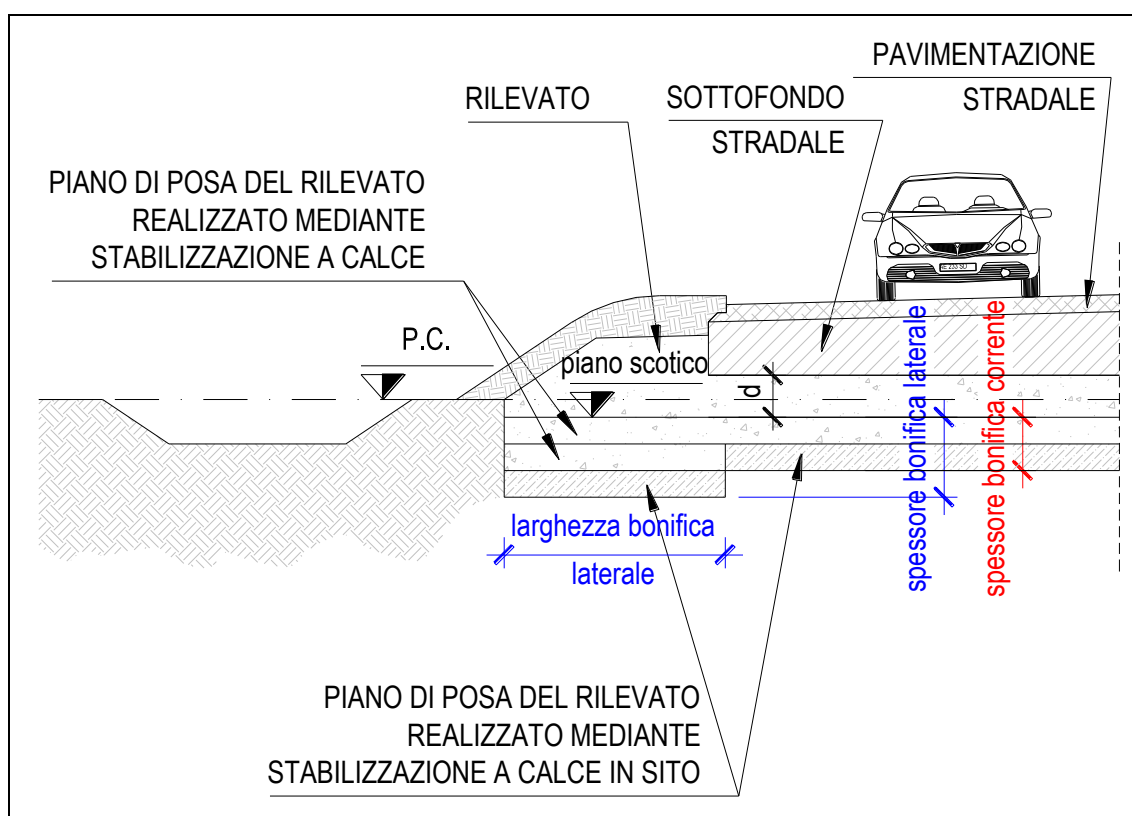


FIGURA 10-1: SCHEMA GENERALE BONIFICHE.

10.3. LIVELLO PRESTAZIONALE PIANO DI POSA DEI RILEVATI

Nella tabella seguente sono riportati, per il singolo tratto individuato sulla base della distanza prevalente intradosso fondazione/sottofondo stradale – piano di posa rilevato:

- le pk di inizio e fine;
- il livello prestazionale in termini di valore del modulo di deformazione su piastra M_d richiesto in funzione della distanza "d" considerata.

TABELLA 10-1: LIVELLI PRESTAZIONALI MINIMI DEL PIANO DI POSA DEI RILEVATI/TRINCEE.

Asse	Tratto	pk inizio [km]	pk fine [km]	d [m]	$M_{d\text{-richiesto}}$ [MPa]
V27-A	1	0+000	0+275	0.5	35
	2	0+275	0+900	0.1	47
	3	0+900	1+125	2.0	15
	4	1+125	fine	0.2	44
V27-B	/	/	/	0.0	50
V27-C	/	/	/	0.0	50
V27	ROTATORIA	/	/	0.5	35
V27-E	1	0+000	0+100	0.0	50
	2	0+100	Rotatoria	0.5	35
V27-F	1	0+000	0+100	0.5	35
	2	0+100	Rotatoria	0.0	50

10.4. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI

Per quanto riguarda le caratteristiche del materiale utilizzato per lo strato di bonifica vengono ipotizzati valori del modulo elastico variabili nell'intervallo $E_1 = 30.0 \div 75.0$ MPa.

Pozzetti esplorativi di riferimento: PZ 214, 218, 220, 221 e 222 (vedi elaborato PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_01 "Relazione geotecnica generale").

Per la determinazione del modulo elastico E_0 attribuito al terreno di sottofondo nelle elaborazioni numeriche atte a simulare la prova di carico su piastra all'estradosso dello strato di bonifica con il criterio di Burmister, si è fatto principalmente riferimento ai risultati delle prove di carico su piastra in termini di modulo di deformazione M_d condotte nella campagna di indagine di progetto definitivo in corrispondenza della viabilità oggetto del presente documento.

Tale modulo $E_0 = E_{PLT}$ è ricavato sulla base del modulo di deformazione su piastra dei pozzetti di riferimento secondo quanto riportato nell'elaborato PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_02 "Criteri generali verifiche geotecniche".

Nella tabella seguente è riportato, per il singolo tratto individuato sulla base della distanza prevalente intradosso fondazione/sottofondo stradale – piano di posa rilevato (vedi Tabella 10-1):

- il modulo elastico $E_0 = E_{PLT}$ assunto nelle elaborazioni.

TABELLA 10-2: TERRENO NATURALE – MODULO ELASTICO ASSUNTO NELLE ELABORAZIONI.

Asse	Tratto	$E_{PLT} = E_0$ [MPa]
V27-A	1	4.1
	2	4.1
	3	2.0
	4	2.7
V27-B	/	2.7
V27-C	/	2.7
V27	ROTATORIA	4.1
V27-E	1	4.1
	2	4.1
V27-F	1	4.1
	2	4.1

10.5. EFFETTI DELLA VARIAZIONE DELLO SPESSORE DI BONIFICA E DEL RELATIVO MODULO ELASTICO

Al variare dello spessore di bonifica "s" e del relativo modulo elastico (da 30.0 MPa a 75 MPa) sono state ricavate le curve corrispondenti al valore del modulo su piastra equivalente M_d misurato all'estradosso della bonifica, ovvero al piano di posa del rilevato, definite secondo il criterio di Burmister.

Tale range di modulo elastico della bonifica si ritiene compatibile con terreno stabilizzato a calce.

I risultati delle analisi vengono riassunti nella tabella seguente in termini di:

- spessore corrente dello strato di bonifica;

da assumere al fine di raggiungere il livello prestazionale richiesto per il piano di posa del rilevato; per ogni tratto è inoltre indicato il riferimento alla figura che mostra l'analisi condotta con il criterio di Burmister.

Viene inoltre indicato:

- lo spessore di bonifica ai lati del piano di posa del rilevato che risulta, in genere, approfondito rispetto alla bonifica corrente e la relativa larghezza (vedi schema riportato in Figura 10-1).

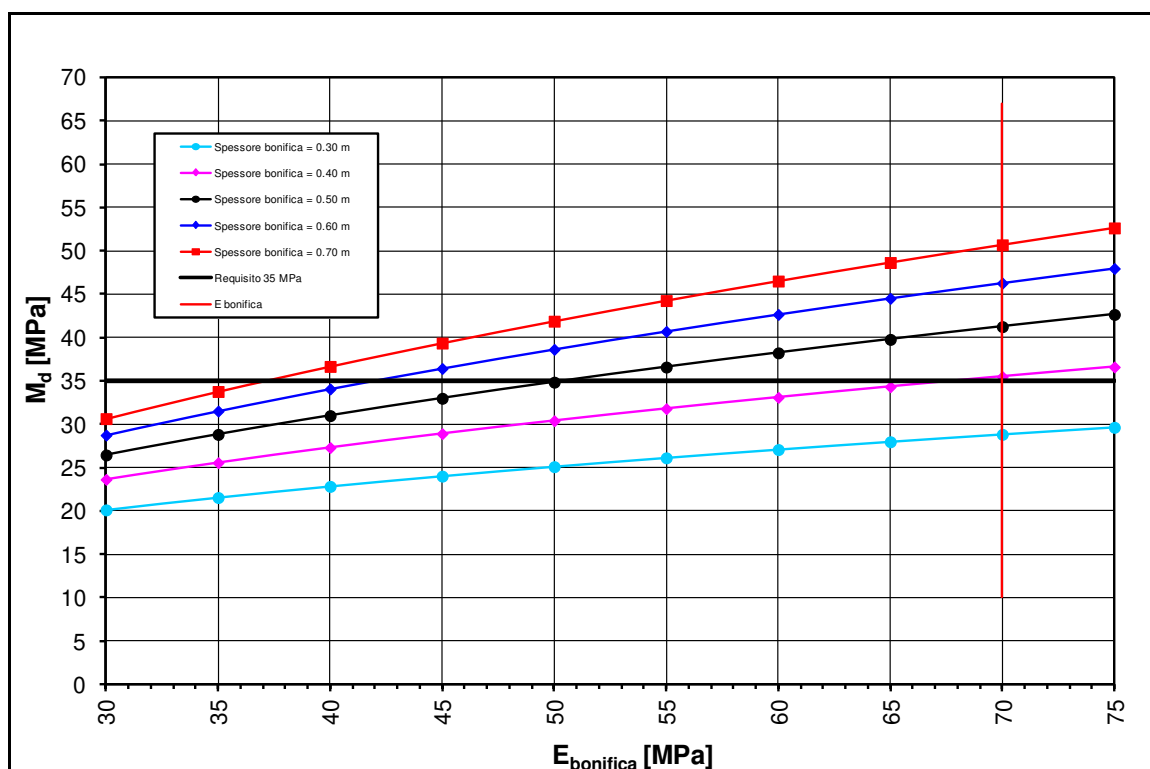
Il modulo elastico della bonifica indicato nelle analisi è quello necessario a garantire il livello prestazionale richiesto; i valori indicati si ritengono compatibili con terreno stabilizzato a calce.

TABELLA 10-3: SPESSORI DI BONIFICA LUNGO IL TRACCIATO.

Asse	Tratto	Spessore bonifica corrente [m]	Spessore bonifica laterale [m]	Larghezza bonifica laterale [m]	Analisi di Burmister
V27-A	1	0.4	0.6	2.5	Figura 10-2
	2	0.6	0.6	0.0	Figura 10-3
	3	0.3	0.6	2.5	Figura 10-4
	4	0.9	0.9	0.0	Figura 10-5
V27-B	/	0.9	0.9	0.0	Figura 10-6
V27-C	/	0.9	0.9	0.0	Figura 10-6
V27	ROTATORIA	0.4	0.6	2.5	Figura 10-2
V27-E	1	0.9	0.9	0.0	Figura 10-6
	2	0.4	0.6	2.5	Figura 10-2

Asse	Tratto	Spessore bonifica corrente [m]	Spessore bonifica laterale [m]	Larghezza bonifica laterale [m]	Analisi di Burmister
V27-F	1	0.4	0.6	2.5	Figura 10-2
	2	0.9	0.9	0.0	Figura 10-6

Nei tratti in cui il piano di posa del rilevato della viabilità in oggetto è in continuità con quello del rilevato dell'asse autostradale, l'approfondimento laterale della bonifica viene effettuato solo alle estremità del piano di posa.



**FIGURA 10-2: ASSE V27-A, TRATTO 1; ASSE V27-ROTATORIA; ASSE V27-E, TRATTO 2; ASSE V27-F, TRATTO 1–
DETERMINAZIONE SPESSORE DI BONIFICA.**

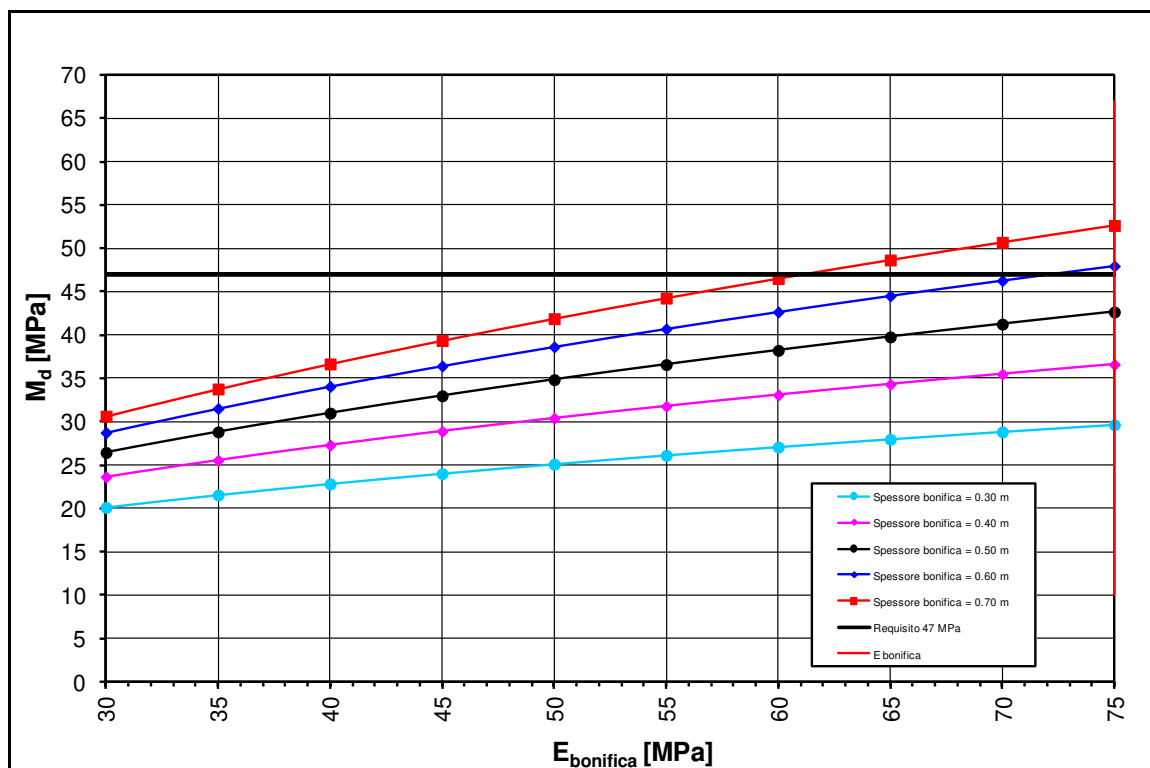


FIGURA 10-3: ASSE V27-A, TRATTO 2 – DETERMINAZIONE SPESSORE DI BONIFICA.

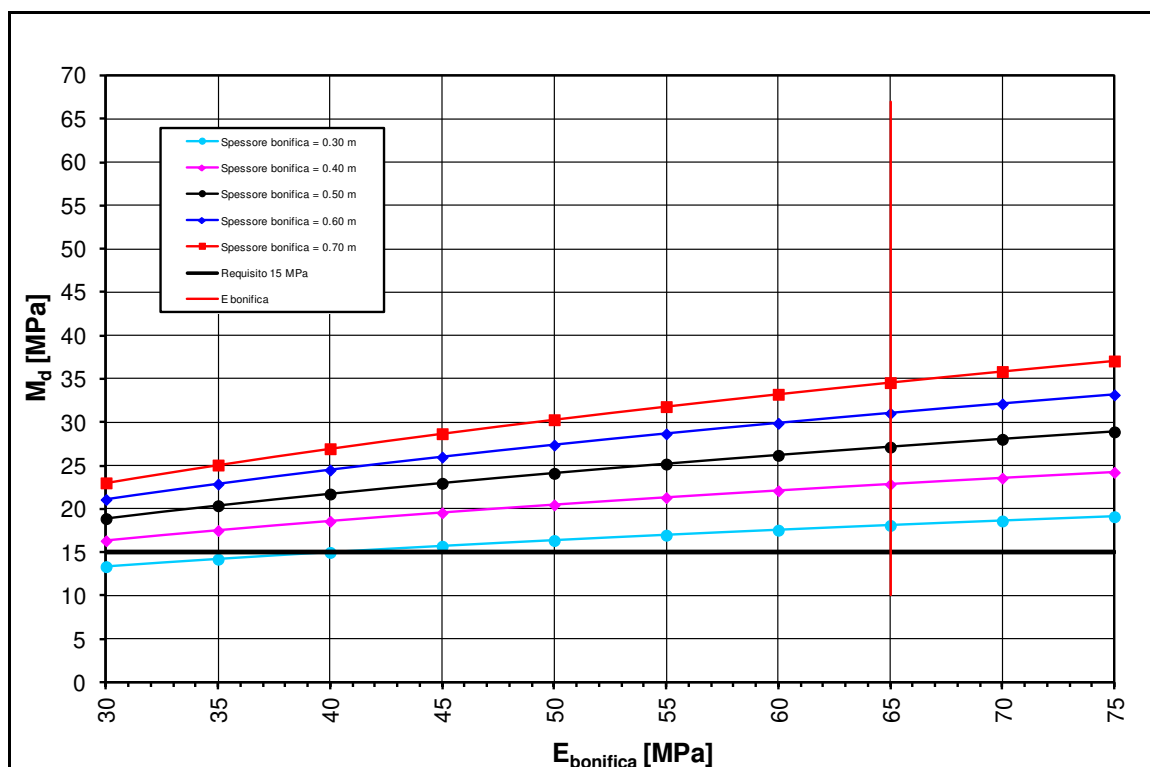


FIGURA 10-4: ASSE V27-A, TRATTO 3 – DETERMINAZIONE SPESSORE DI BONIFICA.

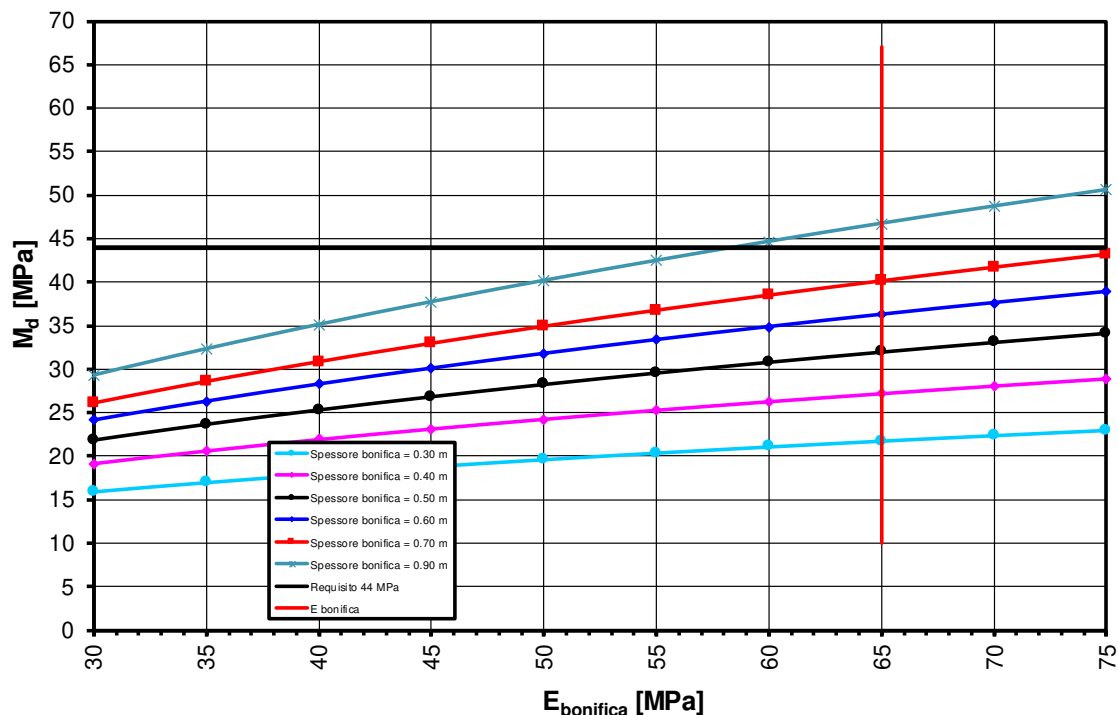


FIGURA 10-5: ASSE V27-A, TRATTO 4 – DETERMINAZIONE SPESSORE DI BONIFICA.

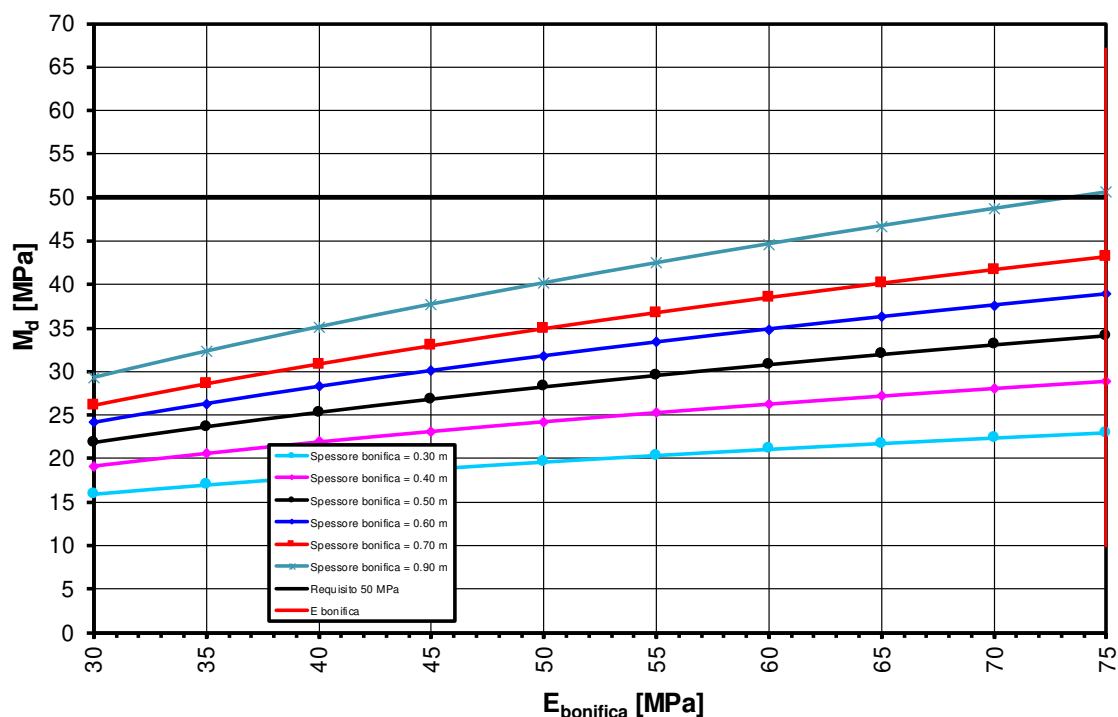


FIGURA 10-6: ASSE V27-B; ASSE V27-C – DETERMINAZIONE SPESSORE DI BONIFICA.

10.6. STUDIO DELLA STABILIZZAZIONE DELLE TERRE CON CALCE

A seguito dell'analisi dei certificati di laboratorio inerenti lo studio delle miscele terreno naturale + calce (CaO) (vedi elaborati inerenti le indagini di laboratorio riportati nell'elaborato PD_0_A00_A0000_0_GT_RB_01 "Relazione geotecnica generale"), è stata verificata la sostanziale idoneità dei terreni presenti al piano di posa dei rilevati ad essere stabilizzati a calce.

Nella tabella seguente sono riportati:

- la percentuale di calce da adottare nelle miscele terreno naturale + calce (CaO) per la formazione del piano di posa dei rilevati/trincee (bonifiche);
- le pk di inizio e fine di riferimento per la singola percentuale di calce.

TABELLA 10-4: INDICAZIONI IN MERITO ALLA %CAO DA ADOTTARE NELLA STABILIZZAZIONE.

Asse	Tratto	pk inizio [km]	pk fine [km]	% calce viva (CaO) per stabilizzazione
V27-A	1	0+000	0+450	3.0
	2	0+450	0+875	3.5
	3	0+875	1+150	3.5
	4	1+150	fine	5.5
V27-B	/	/	/	5.5
V27-C	/	/	/	5.5
V27	ROTATORIA	/	/	3.0
V27-E	1	0+000	0+100	3.0
	2	0+100	Rotatoria	3.0
V27-F	1	0+000	0+100	3.0
	2	0+100	fine	3.0