



Comune di
Firenze



Comune di
Marradi



Comune di
San Godenzo



Comune di
Vernio



Comune di
Palazzuolo sul
Senio

S.R.325 1°lotto Loc. Le Piena - Miglioramento e l'adeguamento della Viabilità regionale di fondovalle, mediante realizzazione di percorsi pedonali protetti. Messa in sicurezza della mobilità pedonale dal km 56+900 al km 57+200 - Comune di Vernio



PROGETTO DEFINITIVO

OGGETTO:

**RELAZIONE DI CALCOLO
DEL MURO DI SOSTEGNO**

ELABORATO

R04

SCALA - -

NOME FILE:

Data redazione elaborato:

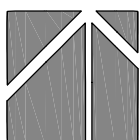
C.U.P.:

PRATICA N.

08.2022

R.U.P.: Ing. Maria Teresa Carosella

PROGETTISTA E COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:



dott. ing. Elena Barba

Via F. Pacini 46-48, 50144 Firenze (FI)
3282091810 ing.elena.barba@gmail.com elena.barba@ingpec.eu
P.IVA 05400250485- CF BRBLNE76M67D612K
iscritta all'ordine degli ingegneri della Prov. di Firenze al n° 5019

PREMESSA

Le verifiche che seguono sono condotte sul muro di sostegno che è necessario realizzare per ampliare la pertinenza stradale e realizzare il nuovo tratto di marciapiede nel secondo stralcio di intervento.

Per i parametri geotecnici e sismici si è fatto riferimento alla relazione a cura del dott. geol. Guglielmo Braccesi allegata al progetto definitivo.

Per la determinazione dei parametri k_h e k_v , tenuto conto dei dati contenuti nella relazione geologica, si è impiegato il software Geostru PS.

The screenshot displays the Geostru PS software interface. On the left, a map shows the location of Vernio, Italy, with various landmarks and a red dot indicating the project site. The top of the interface includes input fields for coordinates (Latitude: 44.03723, Longitude: 11.15534) and a search bar. The main panel is divided into several sections:

- Stati limite**: A section for defining limit states, including 'Classe Edificio' (Class of Building) set to 'II. Affollamento normale. Assenza di funz. pubbliche e sociali...', 'Vita Nominale' (Nominal Life) set to 50, and 'Interpolazione' (Interpolation) set to 'Media ponderata'. A green box highlights 'CU = 1'.
- Coefficienti sismici**: A section for seismic coefficients, including 'Tipo' (Type) set to 'Muri di sostegno NTC 2018', 'H (m)' (Height) set to 1, and 'Cat. Sottosuolo' (Subsoil Category) set to B. It also shows 'Cat. Topografica' (Topographic Category) set to T2.
- Table of Coefficients**: A table showing seismic coefficients for different limit states (SLO, SLD, SLV, SLC) and various parameters (kh, kv, Amax, Beta).

Per il dimensionamento del muro sono stati considerati i seguenti sovraccarichi:

- folla compatta sul marciapiede pari a 500 kg/mq
- spinta sul parapetto in testa al muro pari a 150 kg ad una altezza di 1 m da terra
- sovraccarico stradale di 2 ton/mq

A favore di sicurezza i suddetti carichi sono stati ipotizzati di agire contemporaneamente.

Inoltre è stata condotta la verifica del pendio riportata in apposita relazione.

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

NTC 2018 – Nuove norme tecniche per le costruzioni - D.M. 17 Gennaio 2018.

CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 - Istruzioni per l'applicazione delle 'Nuove norme tecniche per le costruzioni' di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.

MODELLAZIONE E VERIFICHE STRUTTURALI E GEOTECNICHE

Dati generali

Normativa GEO	NTC 2018
Normativa STR	NTC 2018
Spinta	Mononobe e Okabe [M.O. 1929]

Dati generali muro

Altezza muro	225,0 cm
Spessore testa muro	30,0 cm
Risega muro lato valle	0,0 cm
Risega muro lato monte	0,0 cm

Sorgenza mensola a valle	35,0 cm
Sorgenza mensola a monte	70,0 cm
Svaso mensola a valle	0,0 cm
Svaso mensola a valle	0,0 cm
Altezza estremità mensola a valle	50,0 cm
Altezza estremità mensola a monte	50,0 cm

Pali	
Sezione dei pali	22,0 cm
Lunghezza dei pali	600,0 cm
Distanza asse da estremità mensola	30,0 cm
Interasse longitudinale	80,0 cm
Disposizione in pianta	Sfalsati

CARATTERISTICHE DI RESISTENZA DEI MATERIALI IMPIEGATI

Conglomerati

Nr.	Classe Calcestruzzo	fck,cubi [Mpa]	Ec [Mpa]	fck [Mpa]	fcd [Mpa]	fctd [Mpa]	fctm [Mpa]
1	C20/25	25	30550,21	20	11,55	1,05	2,25
2	C25/30	30	32089,96	25	14,44	1,21	2,61
3	C28/35	35	32936,31	28	16,17	1,31	2,81
4	C40/50	51	35913,83	40	20,22	1,52	3,26

Acciai:

Nr.	Classe acciaio	Es [Mpa]	fyk [Mpa]	fyd [Mpa]	ftk [Mpa]	ftd [Mpa]	ep_tk	epd_ult	ß1*ß2 iniziale	ß1*ß2 finale
1	B450C	203940	458,87	399,01	550,64	399,01	.075	.0675	1	0,5
2	B450C*	203940	458,87	399,01	550,64	458,87	.075	.0675	1	0,5
3	B450C**	203940	458,87	399,01	467,33	406,35	.012	.01	1	0,5
4	S235H	214137	244,73	212,81	367,09	212,81	0,012	0,01	1	0,5
5	S275H	214137	285,52	248,3	438,47	248,3	0,012	0,01	1	0,5
6	S355H	214137	367,09	319,17	520,05	367,09	0,012	0,01	1	0,5

Materiali impiegati realizzazione muro

C28/35 B450C

Materiali impiegati realizzazione pali

C20/25 S275H

Copriferro, Elevazione	3,0 cm
Copriferro, Fondazione	3,0 cm
Copriferro, Dente di fondazione	3,0 cm

Stratigrafia

DH	Spessore strato
Eps	Inclinazione dello strato.
Gamma	Peso unità di volume
Fi	Angolo di resistenza a taglio
c	Coesione
Delta	Angolo di attrito terra muro
P.F.	Presenza di falda (Si/No)

Ns	DH (cm)	Eps (°)	Gamma (KN/m³)	Fi (°)	c (kPa)	Delta (°)	P.F.	Litologia	Descrizione
1	250	15	15,00	15	0,00	10	No		Livello 1 - riporto
2	250	15	18,00	28	0,00	20	No		Livello 2 - sabbie e ghiaie
3	200	15	19,00	34	0,00	23	No		Livello 3 - ghiaie con sabbie
4	300	0	19,50	45	0,00	30	No		Livello 4 - ghiaie

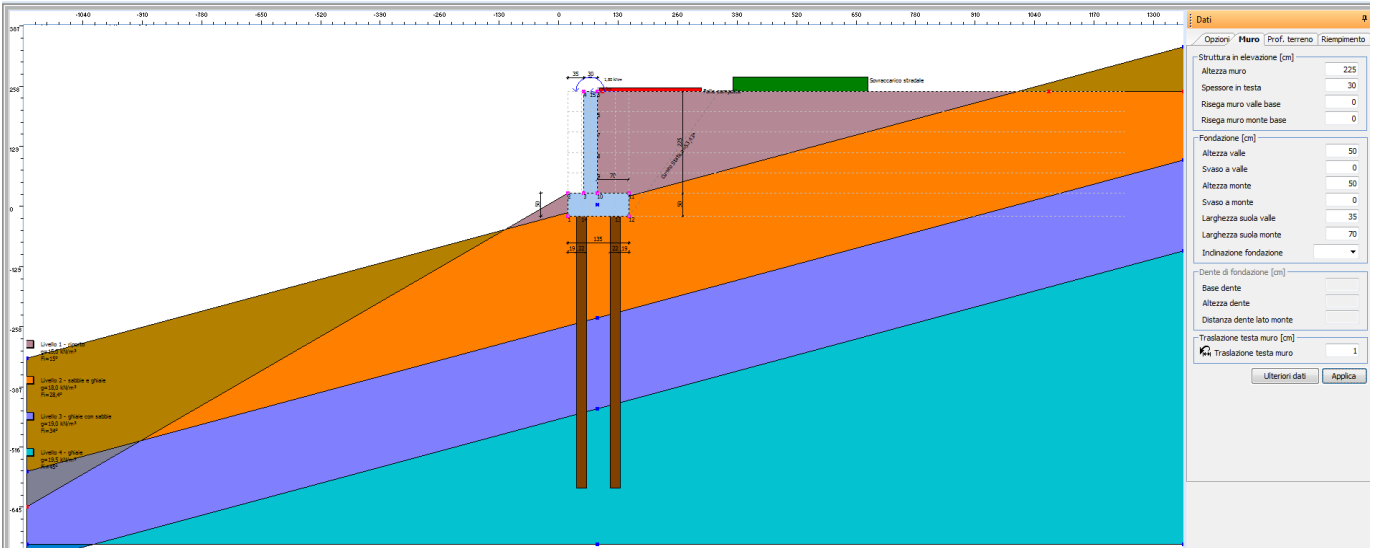
Carichi concentrati

Descrizione	Posizione x (cm)	Posizione y (cm)	Fx (kN/m)	Fy (kN/m)	Mz (kNm/m)
-------------	------------------	------------------	-----------	-----------	------------

spinta parapetto	50,0	275,0	1,5	0,0	1,5
------------------	------	-------	-----	-----	-----

Carichi distribuiti

Descrizione	Ascissa iniziale (cm)	Ascissa finale (cm)	Valore iniziale (kPa)	Valore finale (kPa)	Profondità (cm)
Folla compatta	5,0	230,0	5,0	5,0	0,0
Sovraccarico stradale	300,0	600,0	20,0	20,0	0,0



FATTORI DI COMBINAZIONE

A1+M1+R3 (NO SISMA)

Nr.	Azioni	Fattore combinazione
1	Peso muro	1,30
2	Spinta terreno	1,00
3	Peso terreno mensola	1,30
4	Spinta falda	1,00
5	Spinta sismica in x	0,00
6	Spinta sismica in y	0,00
7	spinta parapetto	1,50
8	Folla compatta	1,50
9	Sovraccarico stradale	1,50

Nr.	Parametro	Coefficienti parziali
1	Tangente angolo res. taglio	1
2	Coesione efficace	1
3	Resistenza non drenata	1
4	Peso unità volume	1

Nr.	Carico limite	Coefficienti resistenze
1	Punta	1,35
2	Laterale compressione	1,15
3	Coefficiente totale	1,3
4	Laterale (trazione)	1,25
5	Orizzontale	1,25
	Riduzione resistenza	Parziale

SISMA

Nr.	Azioni	Fattore combinazione
1	Peso muro	1,00

2	Spinta terreno	1,00
3	Peso terreno mensola	1,00
4	Spinta falda	1,00
5	Spinta sismica in x	1,00
6	Spinta sismica in y	0,00
7	spinta parapetto	0,00
8	Folla compatta	0,00
9	Sovraccarico stradale	0,00

Nr.	Parametro	Coefficienti parziali
1	Tangente angolo res. taglio	1
2	Coesione efficace	1
3	Resistenza non drenata	1
4	Peso unità volume	1

Nr.	Carico limite	Coefficienti resistenze
1	Punta	1
2	Laterale compressione	1
3	Coefficiente totale	1
4	Laterale (trazione)	1
5	Orizzontale	1
	Riduzione resistenza	Parziale

SLE

Nr.	Azioni	Fattore combinazione
1	Peso muro	1,00
2	Spinta terreno	1,00
3	Peso terreno mensola	1,00
4	Spinta falda	1,00
5	Spinta sismica in x	0,00
6	Spinta sismica in y	0,00
7	spinta parapetto	1,00
8	Folla compatta	1,00
9	Sovraccarico stradale	1,00

Nr.	Parametro	Coefficienti parziali
1	Tangente angolo res. taglio	1
2	Coesione efficace	1
3	Resistenza non drenata	1
4	Peso unità volume	1

Nr.	Carico limite	Coefficienti resistenze
1	Punta	1
2	Laterale compressione	1
3	Coefficiente totale	1
4	Laterale (trazione)	1
5	Orizzontale	1
	Riduzione resistenza	Parziale

SLD

Nr.	Azioni	Fattore combinazione
1	Peso muro	1,00
2	Spinta terreno	1,00
3	Peso terreno mensola	1,00
4	Spinta falda	1,00
5	Spinta sismica in x	1,00
6	Spinta sismica in y	0,00
7	spinta parapetto	0,00
8	Folla compatta	0,00
9	Sovraccarico stradale	0,00

Nr.	Parametro	Coefficienti parziali
1	Tangente angolo res. taglio	1
2	Coesione efficace	1
3	Resistenza non drenata	1
4	Peso unità volume	1

Nr.	Carico limite	Coefficienti resistenze
1	Punta	1
2	Laterale compressione	1
3	Coefficiente totale	1
4	Laterale (trazione)	1
5	Orizzontale	1
	Riduzione resistenza	Parziale

A1+M1+R3 (NO SISMA) [GEO+STR]

CALCOLO SPINTE

Discretizzazione terreno

Qi	Quota iniziale strato (cm);
Qf	Quota finale strato
Gamma	Peso unità di volume (KN/m³);
Eps	Inclinazione dello strato. (°);
Fi	Angolo di resistenza a taglio (°);
Delta	Angolo attrito terra muro;
c	Coesione (kPa);
β	Angolo perpendicolare al paramento lato monte (°);
Note	Nelle note viene riportata la presenza della falda

Qi	Qf	Gamma	Eps	Fi	Delta	c	β	Note
275,0	230,0	15,0	0,0	15,0	10,0	0,0	0,0	
230,0	185,0	15,0	0,0	15,0	10,0	0,0	0,0	
185,0	140,0	15,0	0,0	15,0	10,0	0,0	0,0	
140,0	95,0	15,0	0,0	15,0	10,0	0,0	0,0	
95,0	50,0	15,0	0,0	15,0	10,0	0,0	0,0	

Coefficienti di spinta ed inclinazioni

μ	Angolo di direzione della spinta.
Ka	Coefficiente di spinta attiva.
Kd	Coefficiente di spinta dinamica.
Dk	Coefficiente di incremento dinamico.
Kax, Kay	Componenti secondo x e y del coefficiente di spinta attiva.
Dkx, Dky	Componenti secondo x e y del coefficiente di incremento dinamico.

μ	Ka	Kd	Dk	Kax	Kay	Dkx	Dky
10,0	0,53	0,0	0,0	0,52	0,09	0,0	0,0
10,0	0,53	0,0	0,0	0,52	0,09	0,0	0,0
10,0	0,53	0,0	0,0	0,52	0,09	0,0	0,0
10,0	0,53	0,0	0,0	0,52	0,09	0,0	0,0
10,0	0,53	0,0	0,0	0,52	0,09	0,0	0,0

Spinte risultanti e punto di applicazione

Qi	Quota inizio strato.
----	----------------------

Qf Quota inizio strato.
Rpx, Rpy Componenti della spinta nella zona j-esima (kN);
Z(Rpx) Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);
Z(Rpy) Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);

	Qi	Qf	Rpx	Rpy	z(Rpx)	z(Rpy)
1	275,0	230,0	2,88	0,51	250,42	250,42
2	230,0	185,0	4,47	0,79	206,16	206,16
3	185,0	140,0	6,07	1,07	161,52	161,52
4	140,0	95,0	7,66	1,35	116,72	116,72
5	95,0	50,0	9,25	1,63	71,85	71,85

CARATTERISTICHE MURO (Peso, Baricentro, Inerzi a)

Py Peso del muro (kN);
Px Forza inerziale (kN);
Xp, Yp Coordinate baricentro dei pesi (cm);

	Quota	Px	Py	Xp	Yp
	230,0	0,0	4,3	50,9	252,5
	185,0	0,0	8,61	50,8	230,0
	140,0	0,0	12,91	50,7	207,5
	95,0	0,0	17,21	50,6	185,0
	50,0	0,0	21,51	50,5	162,5

Sollecitazioni sul muro

Quota Origine ordinata minima del muro (cm).
Fx Forza in direzione x (kN);
Fy Forza in direzione y (kN);
M Momento (kNm);
H Altezza sezione di calcolo (cm);

	Quota	Fx	Fy	M	H
	230,0	5,13	4,81	3,77	30,0
	185,0	9,6	9,9	6,89	30,0
	140,0	15,66	15,27	12,33	30,0
	95,0	23,32	20,93	20,81	30,0
	50,0	32,58	26,86	33,04	30,0

Armature - Verifiche sezioni (S.L.U .)

Afv Area dei ferri lato valle.
Afm Area dei ferri lato monte.
Nu Sforzo normale ultimo (kN);
Mu Momento flettente ultimo (kNm);
Vcd Resistenza a taglio conglomerato Vcd (kN);
Vwd Resistenza a taglio piegati (kN);
Sic. VT Misura Sicurezza Taglio (Vcd+Vwd)/Vsdu (Verificato se >=1).
Vsdu Taglio di calcolo (kN);

Afv	Afm	Nu	Mu	Ver.	Vcd	Vwd	Sic. VT
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	4,72	101,74	S	124,46	0,0	24,28
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	9,81	102,36	S	124,46	0,0	12,97
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	15,3	103,03	S	124,46	0,0	7,95
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	20,9	103,71	S	124,46	0,0	5,34

5Ø16 (10,05) 5Ø16 (10,05) 26,9 104,44 S 124,46 0,0 3,82

Discretizzazione terreno

Qi Quota iniziale strato (cm);
 Qf Quota finale strato
 Gamma Peso unità di volume (KN/m³);
 Eps Inclinazione dello strato. (°);
 Fi Angolo di resistenza a taglio (°);
 Delta Angolo attrito terra muro;
 c Coesione (kPa);
 β Angolo perpendicolare al paramento lato monte (°);
 Note Nelle note viene riportata la presenza della falda

Qi	Qf	Gamma	Eps	Fi	Delta	c	β	Note
275,0	230,0	15,0	0,0	15,0	15,0	0,0	0,0	
230,0	185,0	15,0	0,0	15,0	15,0	0,0	0,0	
185,0	140,0	15,0	0,0	15,0	15,0	0,0	0,0	
140,0	95,0	15,0	0,0	15,0	15,0	0,0	0,0	
95,0	50,0	15,0	0,0	15,0	15,0	0,0	0,0	
50,0	43,5	15,0	0,0	15,0	10,0	0,0	0,0	
43,5	0,0	18,0	15,0	28,4	19,9	0,0	0,0	

Coefficienti di spinta ed inclinazioni

μ Angolo di direzione della spinta.
 Ka Coefficiente di spinta attiva.
 Kd Coefficiente di spinta dinamica.
 Dk Coefficiente di incremento dinamico.
 Kax, Kay Componenti secondo x e y del coefficiente di spinta attiva.
 Dkx, Dky Componenti secondo x e y del coefficiente di incremento dinamico.

μ	Ka	Kd	Dk	Kax	Kay	Dkx	Dky
15,0	0,52	0,0	0,0	0,5	0,13	0,0	0,0
15,0	0,52	0,0	0,0	0,5	0,13	0,0	0,0
15,0	0,52	0,0	0,0	0,5	0,13	0,0	0,0
15,0	0,52	0,0	0,0	0,5	0,13	0,0	0,0
15,0	0,52	0,0	0,0	0,5	0,13	0,0	0,0
10,0	0,53	0,0	0,0	0,52	0,09	0,0	0,0
19,9	0,4	0,0	0,0	0,37	0,14	0,0	0,0

Spinte risultanti e punto di applicazione

Qi Quota inizio strato.
 Qf Quota inizio strato.
 Rpx, Rpy Componenti della spinta nella zona j-esima (kN);
 Z(Rpx) Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);
 Z(Rpy) Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);

	Qi	Qf	Rpx	Rpy	z(Rpx)	z(Rpy)
1	275,0	230,0	2,74	0,73	250,42	250,42
2	230,0	185,0	4,26	1,14	206,16	206,16
3	185,0	140,0	5,78	1,55	161,52	161,52
4	140,0	95,0	7,3	1,96	116,72	116,72
5	95,0	50,0	8,82	2,36	71,85	71,85
6	50,0	43,5	1,41	0,35	46,74	46,74
7	43,5	0,0	9,64	2,76	21,27	21,14

SPINTE IN FONDAZIONE

Discretizzazione terreno

Qi	Quota iniziale strato (cm);
Qf	Quota finale strato
Gamma	Peso unità di volume (KN/m ³);
Eps	Inclinazione dello strato. (°);
Fi	Angolo di resistenza a taglio (°);
Delta	Angolo attrito terra muro;
c	Coesione (kPa);
β	Angolo perpendicolare al paramento lato monte (°);
Note	Nelle note viene riportata la presenza della falda

Qi	Qf	Gamma	Eps	Fi	Delta	c	β	Note
50,0	0,0	18,0	195,0	28,4	19,9	0,0	180,0	

Coefficienti di spinta ed inclinazioni

μ	Angolo di direzione della spinta.
Kp	Coefficiente di resistenza passiva.
Kpx, Kpy	Componenti secondo x e y del coefficiente di resistenza passiva.

μ	Kp	Kpx	Kpy
199,9	0,78	-0,73	-0,27

Spinte risultanti e punto di applicazione

Qi	Quota inizio strato.
Qf	Quota inizio strato.
Rpx, Rpy	Componenti della spinta nella zona j-esima (kN);
Z(Rpx)	Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);
Z(Rpy)	Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);

	Qi	Qf	Rpx	Rpy	z(Rpx)	z(Rpy)
1	50,0	0,0	-1,65	-0,6	16,67	16,67

Sollecitazioni total i

Fx	Forza in direzione x (kN);
Fy	Forza in direzione y (kN);
M	Momento (kNm);

	Fx	Fy	M
Spinta terreno	39,94	10,85	27,89
Carichi esterni	2,25	0,0	8,44
Peso muro	0,0	21,51	-10,86
Peso fondazione	0,0	21,51	-14,52
Sovraccarico	0,0	6,07	-6,11
Terr. fondazione	0,0	32,04	-32,28
Spinte fondazione	-1,65	-0,6	-0,27
	40,54	91,4	-27,72

Momento stabilizzante -78,42 kNm
Momento ribaltante 50,7 kN m

Verifica palo max sollecitato

Forza orizzontale	16,88 kN
Forza verticale (P)	90,88 kN

Dati palo

Lunghezza	600,0 cm
Diametro	22,0 cm
Copriferro	2,5 cm
Palo trivellato	

Stratigrafia palo

Strato N° 1

Spessore strato	225,0 cm
Peso unità di volume	18,0 kN/m ³
Angolo di attrito	28,4 °
Coesione	0,0 kPa
Modulo di elasticità	24700,0 kPa
Modulo di reaz. orizzontale	294199,5 kN/m ³

Strato N° 2

Spessore strato	200,0 cm
Peso unità di volume	19,0 kN/m ³
Angolo di attrito	34,0 °
Coesione	0,0 kPa
Modulo di elasticità	35000,0 kPa

Strato N° 3

Spessore strato	175,0 cm
Peso unità di volume	19,5 kN/m ³
Angolo di attrito	45,0 °
Coesione	0,0 kPa
Modulo di elasticità	56200,0 kPa

Spostamenti e rotazioni in testa al palo di valle

Lunghezza d'onda	66,74 cm
Cedimento del palo	0,04 cm
Spostamento in x	0,39 cm
Rotazione in testa	0,22 °

Pressione limite orizzontale in corrispondenza della lunghezza d'onda 101,41 kPa

Carico limite verticale

Carico limite di punta (Qp)	1168,92 kN
Carico limite laterale (Qs)	33,81 kN

Coefficiente di sicurezza punta (FsP)	1,35
Coefficiente di sicurezza laterale (FsL)	1,15

$R = (Q_p/X_{i3})/F_{sP} + (Q_s/X_{i3})/F_{sL}$	895,26 kN
---	-----------

Peso palo (W)	570,2 Kg
Fattore di sicurezza $F_s=R/(P+W)$	9,28

Verifica palo in testa

Momento	0,0 kNm
Sforzo normale	90,88 kN
Taglio	16,88 kN
Sforzo normale ultimo (Nu)	414,68 kN
Momento flettente ultimo (Mu)	20,94 kNm
Stato verifica a flessione	Sezione Verificata
Resistenza a taglio tubolare (Vwd)	152,42 kN
Misura Sicurezza Taglio	Sezione Verificata

Verifica palo alla profondità di cm 53,39

Momento	8,67 kNm
Sforzo normale	91,37 kN
Taglio	-5,06 kN
Sforzo normale ultimo (Nu)	414,68 kN
Momento flettente ultimo (Mu)	20,94 kNm
Stato verifica a flessione	Sezione Verificata
Resistenza a taglio tubolare (Vwd)	152,42 kN
Misura Sicurezza Taglio	Sezione Verificata

Verifiche palo alla profondità di cm 133,48

Momento	7,1 kNm
Sforzo normale	92,12 kN
Taglio	0,0 kN
Sforzo normale ultimo (Nu)	414,68 kN
Momento flettente ultimo (Mu)	20,94 kNm
Stato verifica a flessione	Sezione Verificata
Resistenza a taglio tubolare (Vwd)	152,42 kN
Misura Sicurezza Taglio	Sezione Verificata

MENSOLA A VALLE

Xprogr.	Ascissa progressiva (cm);
Fx	Forza in direzione x (kN);
Fy	Forza in direzione y (kN);
M	Momento (kNm);
H	Altezza sezione (cm);

Xprogr.	Fx	Fy	M	H
30,0	-1,65	4,18	0,68	50,0
35,0	-22,74	-108,61	0,5	50,0

Armature - Verifiche sezioni (S.L.U.)

Afi	Area dei ferri inferiori.
Afs	Area dei ferri superiori.
Nu	Sforzo normale ultimo (kN);
Mu	Momento flettente ultimo (kNm);
Vcd	Resistenza a taglio conglomerato Vcd (kN);

Vwd Resistenza a taglio piegati (kN);
 Sic. VT Misura Sicurezza Taglio (Vcd+Vwd)/Vsdu (Verificato se >=1).
 Vsdu Taglio di calcolo (kN);

Afi	Afs	Nu	Mu	Ver.	Vcd	Vwd	Sic. VT
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	1,71	180,22	S	181,31	0,0	43,32
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	22,7	184,87	S	181,31	0,0	1,67

MENSOLA A MONTE

Xprogr. Ascissa progressiva (cm);
 Fx Forza in direzione x (kN);
 Fy Forza in direzione y (kN);
 M Momento (kNm);
 H Altezza sezione (cm);

Xprogr.	Fx	Fy	M	H
65,0	-11,46	74,58	-26,21	50,0
65,2	-11,46	74,47	-26,06	50,0
65,4	-11,46	74,33	-25,9	50,0
65,6	-11,46	74,22	-25,76	50,0
65,8	-11,46	74,1	-25,6	50,0
66,0	-11,46	73,97	-25,46	50,0
105,0	9,64	28,9	-6,35	50,0

Armature - Verifiche sezioni (S.L.U.)

Afi Area dei ferri inferiori.
 Afs Area dei ferri superiori.
 Nu Sforzo normale ultimo (kN);
 Mu Momento flettente ultimo (kNm);
 Vcd Resistenza a taglio conglomerato Vcd (kN);
 Vwd Resistenza a taglio piegati (kN);
 Sic. VT Misura Sicurezza Taglio (Vcd+Vwd)/Vsdu (Verificato se >=1).
 Vsdu Taglio di calcolo (kN);

Afi	Afs	Nu	Mu	Ver.	Vcd	Vwd	Sic. VT
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	11,44	182,38	S	181,31	0,0	2,43
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	11,44	182,38	S	181,31	0,0	2,43
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	11,44	182,38	S	181,31	0,0	2,44
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	11,44	182,38	S	181,31	0,0	2,44
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	11,44	182,38	S	181,31	0,0	2,45
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	11,44	182,38	S	181,31	0,0	2,45
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	9,66	181,98	S	181,31	0,0	6,27

SISMA [GEO+STR]

Coefficiente sismico orizzontale Kh 0,285
 Coefficiente sismico verticale Kv 0,142

CALCOLO SPINTE

Discretizzazione terreno

Qi Quota iniziale strato (cm);
 Qf Quota finale strato

Gamma	Peso unità di volume (KN/m ³);
Eps	Inclinazione dello strato. (°);
Fi	Angolo di resistenza a taglio (°);
Delta	Angolo attrito terra muro;
c	Coesione (kPa);
β	Angolo perpendicolare al paramento lato monte (°);
Note	Nelle note viene riportata la presenza della falda

Qi	Qf	Gamma	Eps	Fi	Delta	c	β	Note
275,0	230,0	15,0	0,0	15,0	10,0	0,0	0,0	
230,0	185,0	15,0	0,0	15,0	10,0	0,0	0,0	
185,0	140,0	15,0	0,0	15,0	10,0	0,0	0,0	
140,0	95,0	15,0	0,0	15,0	10,0	0,0	0,0	
95,0	50,0	15,0	0,0	15,0	10,0	0,0	0,0	

Coefficienti di spinta ed inclinazioni

μ	Angolo di direzione della spinta.
Ka	Coefficiente di spinta attiva.
Kd	Coefficiente di spinta dinamica.
Dk	Coefficiente di incremento dinamico.
Kax, Kay	Componenti secondo x e y del coefficiente di spinta attiva.
Dkx, Dky	Componenti secondo x e y del coefficiente di incremento dinamico.

μ	Ka	Kd	Dk	Kax	Kay	Dkx	Dky
10,0	0,53	1,23	0,8	0,52	0,09	0,79	0,14
10,0	0,53	1,23	0,8	0,52	0,09	0,79	0,14
10,0	0,53	1,23	0,8	0,52	0,09	0,79	0,14
10,0	0,53	1,23	0,8	0,52	0,09	0,79	0,14
10,0	0,53	1,23	0,8	0,52	0,09	0,79	0,14

Spinte risultanti e punto di applicazione

Qi	Quota inizio strato.
Qf	Quota inizio strato.
Rpx, Rpy	Componenti della spinta nella zona j-esima (kN);
Z(Rpx)	Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);
Z(Rpy)	Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);

	Qi	Qf	Rpx	Rpy	z(Rpx)	z(Rpy)
1	275,0	230,0	2,0	0,14	245,0	245,0
2	230,0	185,0	5,99	0,42	205,0	205,0
3	185,0	140,0	9,99	0,7	161,0	161,0
4	140,0	95,0	13,99	0,98	116,43	116,43
5	95,0	50,0	17,99	1,27	71,67	71,67

CARATTERISTICHE MURO (Peso, Baricentro, Inerzi a)

Py	Peso del muro (kN);
Px	Forza inerziale (kN);
Xp, Yp	Coordinate baricentro dei pesi (cm);

Quota	Px	Py	Xp	Yp
230,0	0,94	3,31	50,9	252,5
185,0	1,89	6,62	50,8	230,0
140,0	2,83	9,93	50,7	207,5

95,0	3,77	13,24	50,6	185,0
50,0	4,72	16,55	50,5	162,5

Sollecitazioni sul muro

Quota	Origine ordinata minima del muro (cm).
Fx	Forza in direzione x (kN);
Fy	Forza in direzione y (kN);
M	Momento (kNm);
H	Altezza sezione di calcolo (cm);

Quota	Fx	Fy	M	H
230,0	2,94	3,45	0,49	30,0
185,0	9,88	7,18	3,15	30,0
140,0	20,81	11,19	9,78	30,0
95,0	35,75	15,49	22,19	30,0
50,0	54,67	20,06	42,16	30,0

Armature - Verifiche sezioni (S.L.U.)

Afv	Area dei ferri lato valle.
Afm	Area dei ferri lato monte.
Nu	Sforzo normale ultimo (kN);
Mu	Momento flettente ultimo (kNm);
Vcd	Resistenza a taglio conglomerato Vcd (kN);
Vwd	Resistenza a taglio piegati (kN);
Sic. VT	Misura Sicurezza Taglio (Vcd+Vwd)/Vsdu (Verificato se >=1).
Vsdu	Taglio di calcolo (kN);

Afv	Afm	Nu	Mu	Ver.	Vcd	Vwd	Sic. VT
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	3,44	101,59	S	124,46	0,0	42,31
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	7,27	102,05	S	124,46	0,0	12,6
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	11,22	102,53	S	124,46	0,0	5,98
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	15,44	103,05	S	124,46	0,0	3,48
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	20,06	103,61	S	124,46	0,0	2,28

Discretizzazione terreno

Qi	Quota iniziale strato (cm);
Qf	Quota finale strato
Gamma	Peso unità di volume (KN/m³);
Eps	Inclinazione dello strato. (°);
Fi	Angolo di resistenza a taglio (°);
Delta	Angolo attrito terra muro;
c	Coesione (kPa);
β	Angolo perpendicolare al paramento lato monte (°);
Note	Nelle note viene riportata la presenza della falda

Qi	Qf	Gamma	Eps	Fi	Delta	c	β	Note
275,0	230,0	15,0	0,0	15,0	15,0	0,0	0,0	
230,0	185,0	15,0	0,0	15,0	15,0	0,0	0,0	
185,0	140,0	15,0	0,0	15,0	15,0	0,0	0,0	
140,0	95,0	15,0	0,0	15,0	15,0	0,0	0,0	
95,0	50,0	15,0	0,0	15,0	15,0	0,0	0,0	
50,0	43,5	15,0	0,0	15,0	10,0	0,0	0,0	
43,5	0,0	18,0	15,0	28,4	19,9	0,0	0,0	

Coefficienti di spinta ed inclinazioni

μ	Angolo di direzione della spinta.
K_a	Coefficiente di spinta attiva.
K_d	Coefficiente di spinta dinamica.
D_k	Coefficiente di incremento dinamico.
K_{ax}, K_{ay}	Componenti secondo x e y del coefficiente di spinta attiva.
D_{kx}, D_{ky}	Componenti secondo x e y del coefficiente di incremento dinamico.

μ	K_a	K_d	D_k	K_{ax}	K_{ay}	D_{kx}	D_{ky}
15,0	0,52	1,3	0,89	0,5	0,13	0,86	0,23
15,0	0,52	1,3	0,89	0,5	0,13	0,86	0,23
15,0	0,52	1,3	0,89	0,5	0,13	0,86	0,23
15,0	0,52	1,3	0,89	0,5	0,13	0,86	0,23
15,0	0,52	1,3	0,89	0,5	0,13	0,86	0,23
10,0	0,53	1,23	0,8	0,52	0,09	0,79	0,14
19,9	0,4	1,34	1,06	0,37	0,14	1,0	0,36

Spinte risultanti e punto di applicazione

Q_i	Quota inizio strato.
Q_f	Quota inizio strato.
R_{px}, R_{py}	Componenti della spinta nella zona j-esima (kN);
$Z(R_{px})$	Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);
$Z(R_{py})$	Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);

	Q_i	Q_f	R_{px}	R_{py}	$z(R_{px})$	$z(R_{py})$
1	275,0	230,0	2,07	0,2	245,0	245,0
2	230,0	185,0	6,2	0,61	205,0	205,0
3	185,0	140,0	10,33	1,02	161,0	161,0
4	140,0	95,0	14,46	1,42	116,43	116,43
5	95,0	50,0	18,59	1,83	71,67	71,67
6	50,0	43,5	3,02	0,3	46,74	46,74
7	43,5	0,0	22,85	2,24	21,01	21,0

SPINTE IN FONDAZIONE

Discretizzazione terreno

Q_i	Quota iniziale strato (cm);
Q_f	Quota finale strato
Γ	Peso unità di volume (KN/m ³);
ϵ	Inclinazione dello strato. (°);
ϕ	Angolo di resistenza a taglio (°);
δ	Angolo attrito terra muro;
c	Coesione (kPa);
β	Angolo perpendicolare al paramento lato monte (°);
Note	Nelle note viene riportata la presenza della falda

Q_i	Q_f	Γ	ϵ	ϕ	δ	c	β	Note
50,0	0,0	18,0	195,0	28,4	19,9	0,0	180,0	

Coefficienti di spinta ed inclinazioni

μ	Angolo di direzione della spinta.
K_p	Coefficiente di resistenza passiva.
K_{px}, K_{py}	Componenti secondo x e y del coefficiente di resistenza passiva.

μ	Kp	Kpx	Kpy
199,9	1,03	-0,97	-0,35

Spinte risultanti e punto di applicazione

Qi	Quota inizio strato.
Qf	Quota inizio strato.
Rpx, Rpy	Componenti della spinta nella zona j-esima (kN);
Z(Rpx)	Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);
Z(Rpy)	Ordinata punto di applicazione risultante spinta (cm);

	Qi	Qf	Rpx	Rpy	z(Rpx)	z(Rpy)
1	50,0	0,0	-2,17	-0,79	16,67	16,67

Sollecitazioni total i

Fx	Forza in direzione x (kN);
Fy	Forza in direzione y (kN);
M	Momento (kNm);

	Fx	Fy	M
Spinta terreno	77,51	7,62	60,46
Peso muro	4,72	16,55	-0,69
Peso fondazione	4,72	16,55	-9,99
Sovraccarico	0,0	0,0	0,0
Terr. fondazione	7,02	24,65	-13,8
Spinte fondazione	-2,17	-0,79	-0,36
	91,79	64,58	35,62

Momento stabilizzante	-54,65 kNm
Momento ribaltante	90,27 kN m

Verifica palo max sollecitato

Forza orizzontale	37,59 kN
Forza verticale (P)	122,43 kN

Dati palo

Lunghezza	600,0 cm
Diametro	22,0 cm
Copriferro	2,5 cm
Palo trivellato	

Stratigrafia palo

Strato N° 1

Spessore strato	225,0 cm
Peso unità di volume	18,0 kN/m³
Angolo di attrito	28,4 °
Coesione	0,0 kPa
Modulo di elasticità	24700,0 kPa
Modulo di reaz. orizzontale	294199,5 kN/m³

Strato N° 2

Spessore strato	200,0 cm
Peso unità di volume	19,0 kN/m ³
Angolo di attrito	34,0 °
Coesione	0,0 kPa
Modulo di elasticità	35000,0 kPa

Strato N° 3

Spessore strato	175,0 cm
Peso unità di volume	19,5 kN/m ³
Angolo di attrito	45,0 °
Coesione	0,0 kPa
Modulo di elasticità	56200,0 kPa

Spostamenti e rotazioni in testa al palo di valle

Lunghezza d'onda	66,74 cm
Cedimento del palo	0,05 cm
Spostamento in x	0,87 cm
Rotazione in testa	0,49 °

Pressione limite orizzontale in corrispondenza della lunghezza d'onda 101,41 kPa

Carico limite verticale

Carico limite di punta (Qp)	1168,92 kN
Carico limite laterale (Qs)	33,81 kN
Coefficiente di sicurezza punta (FsP)	1
Coefficiente di sicurezza laterale (FsL)	1
$R=(Qp/Xi3)/FsP+(Qs/Xi3)/FsL$	1202,73 kN
Peso palo (W)	570,2 Kg
Fattore di sicurezza $Fs=R/(P+W)$	9,39

Verifica palo in testa

Momento	0,0 kNm
Sforzo normale	122,43 kN
Taglio	37,59 kN
Sforzo normale ultimo (Nu)	414,68 kN
Momento flettente ultimo (Mu)	19,81 kNm
Stato verifica a flessione	Sezione Verificata
Resistenza a taglio tubolare (Vwd)	152,42 kN
Misura Sicurezza Taglio	Sezione Verificata

Verifica palo alla profondità di cm 53,39

Momento	19,31 kNm
Sforzo normale	122,93 kN
Taglio	-11,28 kN
Sforzo normale ultimo (Nu)	414,68 kN
Momento flettente ultimo (Mu)	19,81 kNm
Stato verifica a flessione	Sezione Verificata
Resistenza a taglio tubolare (Vwd)	152,42 kN
Misura Sicurezza Taglio	Sezione Verificata

Verifiche palo alla profondità di cm 133,48

Momento	15,8 kNm
Sforzo normale	123,67 kN
Taglio	0,0 kN
Sforzo normale ultimo (Nu)	414,68 kN
Momento flettente ultimo (Mu)	19,81 kNm
Stato verifica a flessione	Sezione Verificata
Resistenza a taglio tubolare (Vwd)	152,42 kN
Misura Sicurezza Taglio	Sezione Verificata

MENSOLA A VALLE

Xprogr.	Ascissa progressiva (cm);
Fx	Forza in direzione x (kN);
Fy	Forza in direzione y (kN);
M	Momento (kNm);
H	Altezza sezione (cm);

Xprogr.	Fx	Fy	M	H
30,0	-2,17	2,89	0,5	50,0
35,0	-49,16	-149,53	4,75	50,0

Armature - Verifiche sezioni (S.L.U.)

Afi	Area dei ferri inferiori.
Afs	Area dei ferri superiori.
Nu	Sforzo normale ultimo (kN);
Mu	Momento flettente ultimo (kNm);
Vcd	Resistenza a taglio conglomerato Vcd (kN);
Vwd	Resistenza a taglio piegati (kN);
Sic. VT	Misura Sicurezza Taglio (Vcd+Vwd)/Vsdu (Verificato se >=1).
Vsdu	Taglio di calcolo (kN);

Afi	Afs	Nu	Mu	Ver.	Vcd	Vwd	Sic. VT
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	2,2	180,33	S	181,31	0,0	62,72
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	49,12	190,73	S	181,31	0,0	1,21

MENSOLA A MONTE

Xprogr.	Ascissa progressiva (cm);
Fx	Forza in direzione x (kN);
Fy	Forza in direzione y (kN);
M	Momento (kNm);
H	Altezza sezione (cm);

Xprogr.	Fx	Fy	M	H
65,0	-24,13	128,69	-41,4	50,0
65,2	-24,13	128,6	-41,14	50,0
65,4	-24,13	128,48	-40,87	50,0
65,6	-24,13	128,4	-40,62	50,0
65,8	-24,13	128,3	-40,36	50,0

66,0	-24,13	128,2	-40,1	50,0
105,0	22,85	21,93	-5,37	50,0

Armature - Verifiche sezioni (S.L.U.)

Afi Area dei ferri inferiori.
Afs Area dei ferri superiori.
Nu Sforzo normale ultimo (kN);
Mu Momento flettente ultimo (kNm);
Vcd Resistenza a taglio conglomerato Vcd (kN);
Vwd Resistenza a taglio piegati (kN);
Sic. VT Misura Sicurezza Taglio (Vcd+Vwd)/Vsdu (Verificato se >=1).
Vsdu Taglio di calcolo (kN);

Afi	Afs	Nu	Mu	Ver.	Vcd	Vwd	Sic. VT
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	24,14	185,19	S	181,31	0,0	1,41
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	24,14	185,19	S	181,31	0,0	1,41
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	24,14	185,19	S	181,31	0,0	1,41
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	24,14	185,19	S	181,31	0,0	1,41
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	24,14	185,19	S	181,31	0,0	1,41
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	24,14	185,19	S	181,31	0,0	1,41
5Ø16 (10,05)	5Ø16 (10,05)	22,86	184,91	S	181,31	0,0	8,27

Verifica fessurazione

SLE [Rara]

Elevazione

Verifica fessurazione	Apertura fessure mm	Apertura fessure Limite mm	Distanza fessure mm	Area Cls efficace cm2	Verifica tensioni Normali daN/cm²	Sigma C(+compr.) daN/cm²	Sigma F(-traz.) daN/cm²	SigmaF Limite daN/cm²
Si	0,007	--	272,158	729	Si	2,51	168,00	87,58
Si	0,013	--	271,234	726	Si	4,82	168,00	165,30
Si	0,026	--	273,373	734	Si	9,08	168,00	324,47
Si	0,048	--	275,480	742	Si	15,96	168,00	594,82
Si	0,082	--	277,056	748	Si	26,15	168,00	1006,13

Fondazione valle

Verifica fessurazione	Apertura fessure mm	Apertura fessure Limite mm	Distanza fessure mm	Area Cls efficace cm2	Verifica tensioni Normali daN/cm²	Sigma C(+compr.) daN/cm²	Sigma F(-traz.) daN/cm²	SigmaF Limite daN/cm²
Si	0,000	--	277,723	750	Si	0,21	168,00	4,76
Si	--	--	--	--	Si	8,24	168,00	-86,07

Fondazione monte

Verifica fessurazione	Apertura fessure mm	Apertura fessure Limite mm	Distanza fessure mm	Area Cls efficace cm2	Verifica tensioni Normali daN/cm²	Sigma C(+compr.) daN/cm²	Sigma F(-traz.) daN/cm²	SigmaF Limite daN/cm²
Si	0,042	--	277,723	750	Si	9,72	168,00	510,86
Si	0,041	--	277,723	750	Si	9,67	168,00	507,78
Si	0,041	--	277,723	750	Si	9,61	168,00	504,41
Si	0,041	--	277,723	750	Si	9,56	168,00	501,37
Si	0,041	--	277,723	750	Si	9,50	168,00	498,18
Si	0,040	--	277,723	750	Si	9,45	168,00	495,03
Si	0,007	--	277,723	750	Si	2,36	168,00	90,22

SLD [Rara]

Elevazione

Verifica fessurazione	Apertura fessure mm	Apertura fessure Limite mm	Distanza fessure mm	Area Cls efficace cm2	Verifica tensioni Normali daN/cm ²	Sigma C(+compr.) daN/cm ²	Sigma F(-traz.) daN/cm ²	SigmaF Limite daN/cm ²
Si	--	--	--	--	Si	1,93	168,00	-8,33
Si	0,002	--	240,917	614	Si	1,49	168,00	29,85
Si	0,011	--	264,956	703	Si	4,76	168,00	144,75
Si	0,031	--	272,488	731	Si	10,84	168,00	380,55
Si	0,063	--	275,913	743	Si	20,63	168,00	775,60

Fondazione valle

Verifica fessurazione	Apertura fessure mm	Apertura fessure Limite mm	Distanza fessure mm	Area Cls efficace cm2	Verifica tensioni Normali daN/cm ²	Sigma C(+compr.) daN/cm ²	Sigma F(-traz.) daN/cm ²	SigmaF Limite daN/cm ²
Si	0,000	--	277,723	750	Si	0,20	168,00	3,95
Si	--	--	--	--	Si	11,24	168,00	-81,35

Fondazione monte

Verifica fessurazione	Apertura fessure mm	Apertura fessure Limite mm	Distanza fessure mm	Area Cls efficace cm2	Verifica tensioni Normali daN/cm ²	Sigma C(+compr.) daN/cm ²	Sigma F(-traz.) daN/cm ²	SigmaF Limite daN/cm ²
Si	0,036	--	277,723	750	Si	8,75	168,00	445,95
Si	0,036	--	277,723	750	Si	8,70	168,00	443,02
Si	0,036	--	277,723	750	Si	8,64	168,00	439,80
Si	0,036	--	277,723	750	Si	8,59	168,00	436,90
Si	0,035	--	277,723	750	Si	8,54	168,00	433,86
Si	0,035	--	277,723	750	Si	8,49	168,00	430,86
Si	0,005	--	277,723	750	Si	2,01	168,00	63,63

CENNI TEORICI

Calcolo della spinta attiva con Coulomb

Il calcolo della spinta attiva con il metodo di *Coulomb* è basato sullo studio dell'equilibrio limite globale del sistema formato dal muro e dal prisma di terreno omogeneo retrostante l'opera e coinvolto nella rottura nell'ipotesi di parete ruvida.

Per terreno omogeneo ed asciutto il diagramma delle pressioni si presenta lineare con distribuzione:

$$P_t = K_a \cdot \gamma_t \cdot z$$

La spinta S_t è applicata ad $1/3$ H di valore

$$S_t = \frac{1}{2} \gamma_t \cdot H^2 \cdot K_a$$

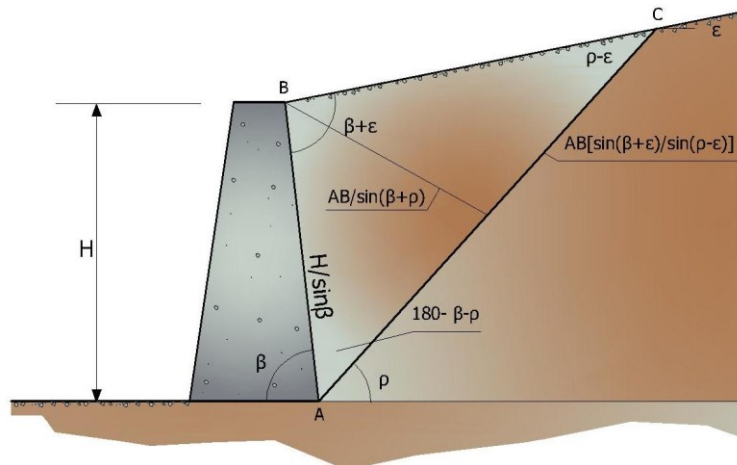
Avendo indicato con:

$$K_a = \frac{\sin^2(\beta - \varphi)}{\sin^2\beta \cdot \sin(\beta + \delta) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \varphi) \cdot \sin(\varphi - \varepsilon)}{\sin(\beta + \delta) \cdot \sin(\beta - \varepsilon)}} \right]^2}$$

Valori limite di K_a :

$d < (b - \phi - e)$ secondo Muller-Breslau

- γ_t Peso unità di volume del terreno;
- b Inclinazione della parete interna rispetto al piano orizzontale passante per il piede;
- φ Angolo di resistenza al taglio del terreno;
- δ Angolo di attrito terra-muro;
- e Inclinazione del piano campagna rispetto al piano orizzontale, positiva se antioraria;
- H Altezza della parete.



Cuneo di rottura usato per la derivazione dell'equazione di Coulomb relativa alla pressione attiva.

Calcolo della spinta attiva con Rankine

Se $e = d = 0$ e $b = 90^\circ$ (muro con parete verticale liscia e terrapieno con superficie orizzontale) la spinta S_t si semplifica nella forma:

$$S_t = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} \frac{(1 - \sin\varphi)}{(1 + \sin\varphi)} = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} \tan^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)$$

che coincide con l'equazione di Rankine per il calcolo della spinta attiva del terreno con terrapieno orizzontale.

In effetti Rankine adottò essenzialmente le stesse ipotesi fatte da Coulomb, ad eccezione del fatto che trascurò l'attrito terra-muro e la presenza di coesione. Nella sua formulazione generale l'espressione di K_a di Rankine si presenta come segue:

$$K_a = \cos\varepsilon \frac{\cos\varepsilon - \sqrt{\cos^2\varepsilon - \cos^2\varphi}}{\cos\varepsilon + \sqrt{\cos^2\varepsilon - \cos^2\varphi}}$$

Calcolo della spinta attiva con Mononobe & Okabe

Il calcolo della spinta attiva con il metodo di Mononobe & Okabe riguarda la valutazione della spinta in condizioni

sismiche con il metodo pseudo-statico. Esso è basato sullo studio dell'equilibrio limite globale del sistema formato dal muro e dal prisma di terreno omogeneo retrostante l'opera e coinvolto nella rottura in una configurazione fittizia di calcolo nella quale l'angolo α , di inclinazione del piano campagna rispetto al piano orizzontale, e l'angolo β , di inclinazione della parete interna rispetto al piano orizzontale passante per il piede, vengono aumentati di una quantità θ tale che:

$$\tan \theta = \left(\frac{k_h}{1 \pm k_h} \right)$$

con k_h coefficiente sismico orizzontale e k_v verticale.

Calcolo coefficienti sismici

Le **NTC 2008** calcolano i coefficienti k_h e k_v in dipendenza di vari fattori:

$$k_h = \beta_m \cdot \left(\frac{a_{max}}{g} \right); k_v = \pm 0.5 \cdot k_h$$

β_m coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito; per i muri che non siano in grado di subire spostamenti relativi rispetto al terreno il coefficiente β_m assume valore unitario. Per i muri liberi di traslare o ruotare intorno al piede, si può assumere che l'incremento di spinta dovuto al sisma agisca nello stesso punto di quella statica. Negli altri casi, in assenza di studi specifici, si assume che tale incremento sia applicato a metà altezza del muro.

a_{max} Accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

g Accelerazione di gravità.

Tutti i fattori presenti nelle precedenti formule dipendono dall'accelerazione massima attesa sul sito di riferimento rigido e dalle caratteristiche geomorfologiche del territorio.

$$a_{max} = S \cdot a_g = S_S \cdot S_T \cdot a_g$$

S coefficiente comprendente l'effetto di amplificazione stratigrafica S_S e di amplificazione topografica S_T .

a_g accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

Questi valori sono calcolati come funzione del punto in cui si trova il sito oggetto di analisi. Il parametro di entrata per il calcolo è il tempo di ritorno dell'evento sismico che è valutato come segue:

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - PVR)}$$

Con V_R vita di riferimento della costruzione e PVR probabilità di superamento, nella vita di riferimento, associata allo stato limite considerato. La vita di riferimento dipende dalla vita nominale della costruzione e dalla classe d'uso della costruzione (in linea con quanto previsto al punto 2.4.3 delle NTC). In ogni caso V_R dovrà essere maggiore o uguale a 35 anni.

Per l'applicazione dell'**Eurocodice 8** (progettazione geotecnica in campo sismico) il coefficiente sismico orizzontale viene così definito:

$$k_h = \frac{a_{gR} \cdot \gamma_I \cdot S}{g}$$

a_{gR} Accelerazione di picco di riferimento su suolo rigido affiorante;

γ_I Fattore di importanza;

S Soil factor e dipende dal tipo di terreno (da A ad E);

$a_g = a_{gR} \gamma_I$ è la "design ground acceleration on type A ground".

Il coefficiente sismico verticale k_v è definito in funzione di k_h , e vale:

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h$$

Effetto dovuto alla coesione

La coesione induce delle pressioni negative costanti pari a:

$$P_c = -2 \cdot c \cdot \sqrt{K_a}$$

Non essendo possibile stabilire a priori quale sia il decremento indotto nella spinta per effetto della coesione, è stata calcolata un'altezza critica Z_c come segue:

$$Z_c = \frac{2 \cdot c}{\gamma} \cdot \frac{1}{\sqrt{K_a}} - \frac{Q \cdot \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \epsilon)}}{\gamma}$$

Dove:

Q = Carico agente sul terrapieno.

Se $Z_c < 0$ è possibile sovrapporre direttamente gli effetti, con decremento pari a:

$$S_c = P_c \cdot H$$

con punto di applicazione pari a $H/2$.

Carico uniforme sul terrapieno

Un carico Q , uniformemente distribuito sul piano campagna induce delle pressioni costanti pari a:

$$P_q = K_a \cdot Q \cdot \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \epsilon)}$$

Per integrazione, una spinta pari a S_q :

$$S_q = K_a \cdot Q \cdot H \cdot \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \epsilon)}$$

Con punto di applicazione ad $H/2$, avendo indicato con K_a il coefficiente di spinta attiva secondo *Muller-Breslau*.

Spinta attiva in condizioni sismiche

In presenza di sisma la forza di calcolo esercitata dal terrapieno sul muro è data da:

$$E_d = \frac{1}{2} \gamma \cdot (1 \pm k_v) \cdot K H^2 + E_{ws} + E_{wd}$$

Dove:

H	Altezza muro;
k_v	Coefficiente sismico verticale;
g	Peso per unità di volume del terreno;
K	Coefficienti di spinta attiva totale (statico + dinamico);
E_{ws}	Spinta idrostatica dell'acqua;
E_{wd}	Spinta idrodinamica.

Per terreni impermeabili la spinta idrodinamica $E_{wd} = 0$, ma viene effettuata una correzione sulla valutazione dell'angolo ϑ della formula di Mononobe & Okabe così come di seguito:

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{\gamma_{\text{sat}}}{\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w} \frac{k_h}{1 \mp k_v}$$

Nei terreni ad elevata permeabilità in condizioni dinamiche continua a valere la correzione di cui sopra, ma la spinta idrodinamica assume la seguente espressione:

$$E_{wd} = \frac{7}{12} k_h \gamma_w H'^2$$

Con H' altezza del livello di falda misurato a partire dalla base del muro.

Spinta idrostatica

La falda con superficie distante H_w dalla base del muro induce delle pressioni idrostatiche normali alla parete che, alla profondità z , sono espresse come segue:

$$P_w(z) = \gamma_w \cdot z$$

Con risultante pari a:

$$S_w = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot H^2$$

La spinta del terreno immerso si ottiene sostituendo g_t con g'_t ($g'_t = g_{\text{saturo}} - g_w$), peso efficace del materiale immerso in acqua.

Resistenza passiva

Per terreno omogeneo il diagramma delle pressioni risulta lineare del tipo:

$$P_t = K_p \cdot \gamma_t \cdot z$$

per integrazione si ottiene la spinta passiva:

$$S_p = \frac{1}{2} \cdot \gamma_t \cdot H^2 \cdot K_p$$

Avendo indicato con:

$$K_p = \frac{\sin^2(\varphi + \beta)}{\sin^2\beta \cdot \sin(\beta - \delta) \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\delta + \varphi) \cdot \sin(\varphi + \varepsilon)}{\sin(\beta - \delta) \cdot \sin(\beta - \varepsilon)}} \right]^2}$$

(Muller-Breslau) con valori limiti di δ pari a:

$$\delta < \beta - \varphi - \varepsilon$$

L'espressione di K_p secondo la formulazione di Rankine assume la seguente forma:

$$K_p = \frac{\cos\varepsilon + \sqrt{\cos^2\varepsilon - \cos^2\varphi}}{\cos\varepsilon - \sqrt{\cos^2\varepsilon - \cos^2\varphi}}$$

Carico limite di fondazioni superficiali su terreni

VESIC - Analisi a breve termine

Affinché la fondazione di un muro possa resistere il carico di progetto con sicurezza nei riguardi della rottura generale deve essere soddisfatta la seguente disuguaglianza:

$$V_d \leq R_d$$

Dove V_d è il carico di progetto, normale alla base della fondazione, comprendente anche il peso del muro; mentre R_d è il carico limite di progetto della fondazione nei confronti di carichi normali, tenendo conto anche dell'effetto di carichi inclinati o eccentrici.

Nella valutazione analitica del carico limite di progetto R_d si devono considerare le situazioni a breve e a lungo termine nei terreni a grana fine. Il carico limite di progetto in condizioni non drenate si calcola come:

$$\frac{R}{A'} \leq (2 + \pi) \cdot c_u \cdot s_c \cdot i_c \cdot d_c + q$$

Dove:

$A' = B' \cdot L'$ area della fondazione efficace di progetto, intesa, in caso di carico eccentrico, come l'area ridotta al cui centro viene applicata la risultante del carico.

c_u Coesione non drenata;

q Pressione litostatica totale sul piano di posa;

s_c Fattore di forma;

$s_c = 0.2 \cdot \left(\frac{B'}{L'} \right)$ per fondazioni rettangolari, il valore di s_c viene assunto pari ad 1 per fondazioni nastriformi

d_c Fattore di profondità;

$d_c = 0.4 \cdot K$ con $K = \frac{D}{B}$ se $\frac{D}{B} \leq 1$ altrimenti $K = \arctan \frac{D}{B}$

i_c Fattore correttivo per l'inclinazione del carico dovuta ad un carico H ;

$$i_c = 1 - \frac{2H}{A_f \cdot c_a \cdot N_c}$$

A_f Area efficace della fondazione;

c_a Aderenza alla base, pari alla coesione o ad una sua frazione.

VESIC - Analisi a lungo termine

Per le condizioni drenate il carico limite di progetto è calcolato come segue.

$$\frac{R}{A'} \leq c' \cdot N_c \cdot s_c \cdot i_c \cdot d_c + q' \cdot N_q \cdot s_q \cdot i_q \cdot d_q + 0.5 \cdot \gamma' \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \cdot d_\gamma$$

Dove:

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi'}{2} \right)$$

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

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

Fattori di forma

$$s_q = 1 + \left(\frac{B'}{L'} \right) \cdot \tan \varphi'$$

per forma rettangolare

$$s_{\gamma} = 1 - 0.4 \cdot \left(\frac{B'}{L'} \right)$$

per forma rettangolare

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

per forma rettangolare, quadrata o circolare

Fattori inclinazione risultante dovuta ad un carico orizzontale H parallelo a B'

$$i_q = \left(1 - \frac{H}{V + A_f \cdot c_a \cot \varphi'} \right)^m$$

$$i_{\gamma} = \left(1 - \frac{H}{V + A_f \cdot c_a \cot \varphi'} \right)^{m+1}$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \cdot \tan \varphi'}$$

$$m = \frac{2 + \frac{B'}{L'}}{1 + \frac{B'}{L'}}$$

Fattori di profondità

$$d_c = 1 + 0.4K$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \varphi \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot K$$

$$\text{con } K = \frac{D}{B} \text{ se } \frac{D}{B} \leq 1 \text{ altrimenti } K = \arctan \frac{D}{B}$$

$$d_{\gamma} = 1$$

HANSEN - Analisi a breve termine

$$\frac{R}{A'} \leq (2 + \pi) \cdot c_u (1 + s_c + d_c - i_c) + q$$

Dove:

$A' = B' L'$ area della fondazione efficace di progetto, intesa, in caso di carico eccentrico, come l'area ridotta al cui centro viene applicata la risultante del carico.

c_u Coesione non drenata;

q Pressione litostatica totale sul piano di posa;

s_c Fattore di forma, $s_c = 0$ per fondazioni nastriformi;

d_c Fattore di profondità;

$$d_c = 0.4 \cdot K \text{ con } K = \frac{D}{B} \text{ se } \frac{D}{B} \leq 1 \text{ altrimenti } K = \arctan \frac{D}{B}$$

i_c Fattore correttivo di inclinazione del carico;

$$i_c = 0.5 - 0.5 \sqrt{1 - \frac{H}{A_f c_a}}$$

A_f Area efficace della fondazione;

c_a Aderenza alla base, pari alla coesione o ad una sua frazione.

HANSEN- Analisi a lungo termine

Per le condizioni drenate il carico limite di progetto è calcolato come segue.

$$\frac{R}{A'} \leq c' \cdot N_c \cdot s_c \cdot i_c \cdot d_c + q' \cdot N_q \cdot s_q \cdot i_q \cdot d_q + 0.5 \cdot \gamma' \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \cdot d_\gamma$$

Dove:

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi'}{2} \right)$$

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

$$N_\gamma = 1.5 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan \varphi'$$

Fattori di forma

$$s_q = 1 + \left(\frac{B'}{L'} \right) \cdot \tan \varphi'$$

per forma rettangolare

$$s_\gamma = 1 - 0.4 \cdot \left(\frac{B'}{L'} \right)$$

per forma rettangolare

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

per forma rettangolare, quadrata o circolare.

$$s_c = s_q = s_\gamma = 1$$

per fondazione nastriforme

Fattori inclinazione risultante dovuta ad un carico orizzontale H parallelo a B'

$$i_q = \left(1 - \frac{0.5 \cdot H}{V + A_f \cdot c_a \cot \varphi'} \right)^3$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{0.7 \cdot H}{V + A_f \cdot c_a \cot \varphi'} \right)^3$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1}$$

Fattori di profondità

$$d_c = 1 + 0.4K$$

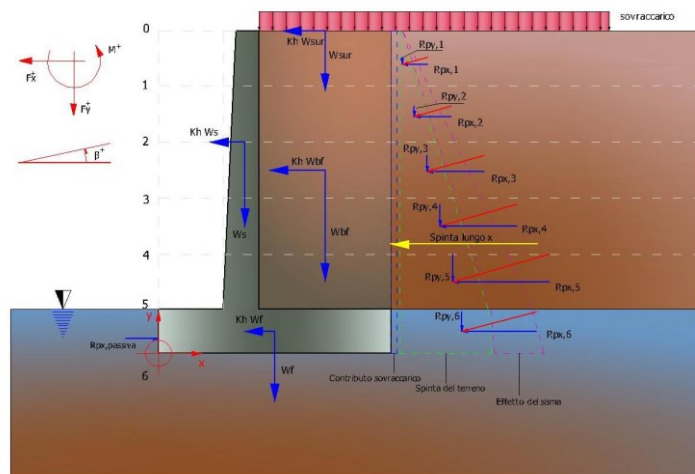
$$d_q = 1 + 2 \tan \varphi (1 - \sin \varphi) \cdot K$$

$$\text{con } K = \frac{D}{B} \text{ se } \frac{D}{B} \leq 1 \text{ altrimenti } K = \arctan \frac{D}{B}$$

$$d_\gamma = 1$$

Sollecitazioni muro

Per il calcolo delle sollecitazioni il muro è stato discretizzato in n-tratti in funzione delle sezioni significative e per ogni tratto sono state calcolate le spinte del terreno (valutate secondo un piano di rottura passante per il paramento lato monte), le risultanti delle forze orizzontali e verticali e le forze inerziali.



Schema delle forze agenti su un muro e convenzioni sui segni

Calcolo delle spinte per le verifiche globali

Le spinte sono state valutate ipotizzando un piano di rottura passante per l'estradosso della mensola di fondazione lato monte, tale piano è stato discretizzato in n -tratti.

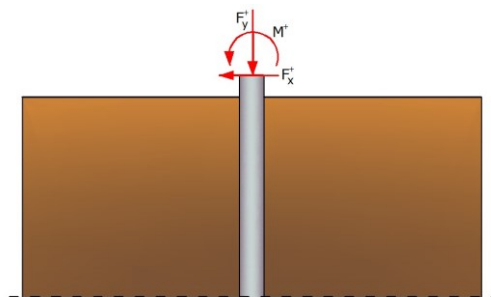
Convenzione segni

Forze verticali positive se dirette dall'alto verso il basso;
Forze orizzontali positive se dirette da monte verso valle;
Coppie positive se antiorarie;
Angoli positivi se antiorari.

CALCOLO DEI PALI DI FONDAZIONE

Convenzioni sui segni

- La forza verticale F_y , positiva se diretta verso il basso.
- La forza orizzontale F_x positiva da sinistra verso destra.
- La coppia M è positiva se produce spostamenti concordi con quelli della forza orizzontale F_x .



Convenzione sui segni

Analisi del palo in condizioni di esercizio: Modello di Winkler

Il modello di *Winkler* consente di tenere conto in modo semplice della variabilità delle proprietà meccaniche del terreno e delle stratificazioni.

In presenza di mezzo omogeneo (K costante) è stata adottata la classifica di Hetényi che distingue tre possibili comportamenti del palo su mezzo alla Winkler, in funzione del valore che assume la rigidezza relativa (I) terreno palo ossia: palo di tipo corto o rigido, palo relativamente flessibile, palo infinitamente flessibile.

Carico limite verticale

Il carico limite verticale è stato calcolato con le formule statiche, che esprimono il medesimo in funzione della geometria del palo e delle caratteristiche del terreno e dell'interfaccia palo-terreno.

Ai fini del calcolo, il carico limite Q_{lim} viene convenzionalmente suddiviso in due aliquote, la resistenza alla punta Q_p e

la resistenza laterale Q_s .

Resistenza unitaria alla punta

La resistenza unitaria q_p alla punta, per il caso di terreno dotato di attrito (j) e di coesione (c), è data dall'espressione:

$$q_p = c \cdot N_c + \gamma \cdot D \cdot N_q$$

Avendo indicato con:

g Peso unità di volume del terreno;

D Lunghezza del palo;

N_c e N_q Fattori di capacità portante già comprensivi dell'effetto forma (circolare).

Il fattore N_q è stato calcolato secondo la teoria di *Berezantzev*.

Resistenza del fusto

Il contributo alla resistenza di fusto viene calcolato utilizzando una combinazione di sforzi totali ed efficaci. Sono previsti tre procedimenti di calcolo di uso corrente. Due dei quali di validità generale per la resistenza laterale di pali collocati in terreni coesivi. Questi metodi prendono il nome di a , b e l dai coefficienti moltiplicativi usati nel termine della capacità portante laterale

Metodo utilizzato per il calcolo della capacità portante laterale metodo a , proposto da *Tomlinson (1971)*; la resistenza laterale viene calcolata nel seguente modo:

$$f_s = \alpha \cdot c + q \cdot K \cdot \tan \delta$$

c Valore medio della coesione o della resistenza a taglio in condizioni non drenate;

q Pressione verticale del terreno;

K Coefficiente di spinta orizzontale dipendente dalla tecnologia del palo e dal precedente stato di addensamento calcolato come segue:

Per pali infissi

$$K = 1 + \tan^2 \varphi$$

Per pali trivellati

$$K = 1 - \tan^2 \varphi$$

δ attrito palo-terreno, funzione della scabrezza della superficie del palo.

Per pali infissi

$$\delta = \frac{3}{4} \cdot \tan \varphi$$

Per pali trivellati

$$\delta = \tan \varphi$$

a è un coefficiente ricavato come di seguito riportato:

Coefficiente a per palo infisso

$c < 0.25$

$a = 1.00$

$0.25 < c < 0.5$

$a = 0.85$

$0.5 < c < 0.75$

$a = 0.65$

$0.75 < c < 2.4$

$a = 0.50$

$c > 2.4$

$a = 1.2 / c$

Coefficiente a per palo trivellato

$c < 0.25$	$a = 0.9$
$0.25 < c < 0.5$	$a = 0.8$
$0.5 < c < 0.75$	$a = 0.6$
$0.75 < c < 2$	$a = 0.4$
$c > 2$	$a = 0.8 / c$

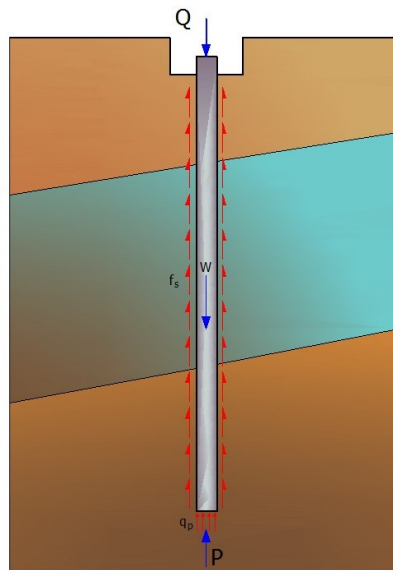
Inoltre:

Secondo le indicazioni di Okamoto in presenza di effetti sismici la resistenza laterale viene ridotta in funzione del coefficiente sismico k_h come segue:

$$C_{\text{reduct_coeff}} = 1 - k_h$$

Infine

- Per i pali trivellati sia le caratteristiche di resistenza (c , j) sia il coefficiente del modulo orizzontale del terreno sono stati ridotti del 10%.
- In caso azioni di trazione il carico alla punta è nullo mentre quello laterale è stato ridotto al 70%.
- Nel coefficiente di sicurezza verticale si è tenuto in debito conto anche del peso palo.



Schema delle aliquote di resistenza del carico limite

Cedimenti

Il cedimento verticale è stato calcolato con il metodo Davis-Poulos, secondo il quale il palo viene considerato rigido (indeformabile) immerso in un mezzo elastico, semispazio o strato di spessore finito.

Si ipotizza che l'interazione palo terreno sia costante a tratti lungo n superfici cilindriche in cui viene suddivisa la superficie laterale del palo. Il cedimento della generica superficie i per effetto del carico trasmesso dal palo al terreno lungo la superficie j esima può essere espresso:

$$W_{i,j} = \left(\frac{\tau_j}{E} \right) \cdot B \cdot I_{i,j}$$

Avendo indicato con:

- τ_j Incremento di tensione relativo al punto medio della striscia;
- E Modulo elastico del terreno;
- B Diametro del palo;
- $I_{i,j}$ Coefficiente di influenza.

Il cedimento complessivo si ottiene sommando $W_{i,j}$ per tutte le j aree.