

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP: J47109000030009

U.O. INFRASTRUTTURE NORD

PROGETTO DEFINITIVO

**POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO-GENOVA
 QUADRUPPLICAMENTO MILANO-ROGOREDO-PAVIA
 FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE
 ELABORATI GENERALI - GEOTECNICA**

Rilevati ferroviari – Relazione di calcolo

SCALA:

-

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.
N M 0 Z	1 0	D	2 6	C L	R I 0 0 0 0	0 0 1	A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	CONSORZIO INTEGRA	Novembre 2018	S.Ciufegni N. Carella 	Novembre 2018	S. Borelli 	Novembre 2018	F. ... Novembre 2018	...

ITALFERR - UO INFRASTRUTTURE NORD
 Dott. Ing. Francesco ...
 Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
 n. 23172 Sez. A

File: NM0Z10D26CLR1000001A

n. Elab.:

INDICE

1.	PREMESSA	1
2.	ANALISI DEI CEDIMENTI DEI RILEVATI	3
2.1	CALCOLO DEI CEDIMENTI.....	4
2.1.1	<i>CEDIMENTO IMMEDIATO IN ASSE AL RILEVATO NUOVO</i>	6
2.1.2	<i>CEDIMENTO IMMEDIATO IN ASSE AL BINARIO ESISTENTE</i>	7
2.1.1	<i>DECORSO DEI CEDIMENTI NEL TEMPO</i>	8
3.	ANALISI DI STABILITA' DELLE SCARPATE	9
3.1	METODO DI CALCOLO	9
3.1.1	<i>CARICHI FERROVIARI</i>	10
3.1.2	<i>AZIONI SISMICHE PER L'ANALISI DI STABILITA'</i>	10
3.2	MODELLAZIONE	11
3.3	RISULTATI	14

1. PREMESSA

Nell’ambito degli interventi di potenziamento della linea Milano – Genova, si prevede il quadruplicamento della linea ferroviaria nella tratta Milano Rogoredo-Pavia. In una prima fase, il quadruplicamento interesserà il tratto di linea compreso fra le stazioni di Milano Rogoredo e Pieve Emanuele, per essere esteso in una fase successiva fino a Pavia.

Lo scopo del presente documento è il calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari.

Il quadruplicamento in oggetto, a partire dall’uscita della stazione Milano Rogoredo, prosegue in affiancamento alla linea storica e su una nuova sede e si sviluppa a sud di Milano, estendendosi per circa 30 km lungo l’attuale linea ferroviaria tra i nodi di Milano Rogoredo e Pavia.

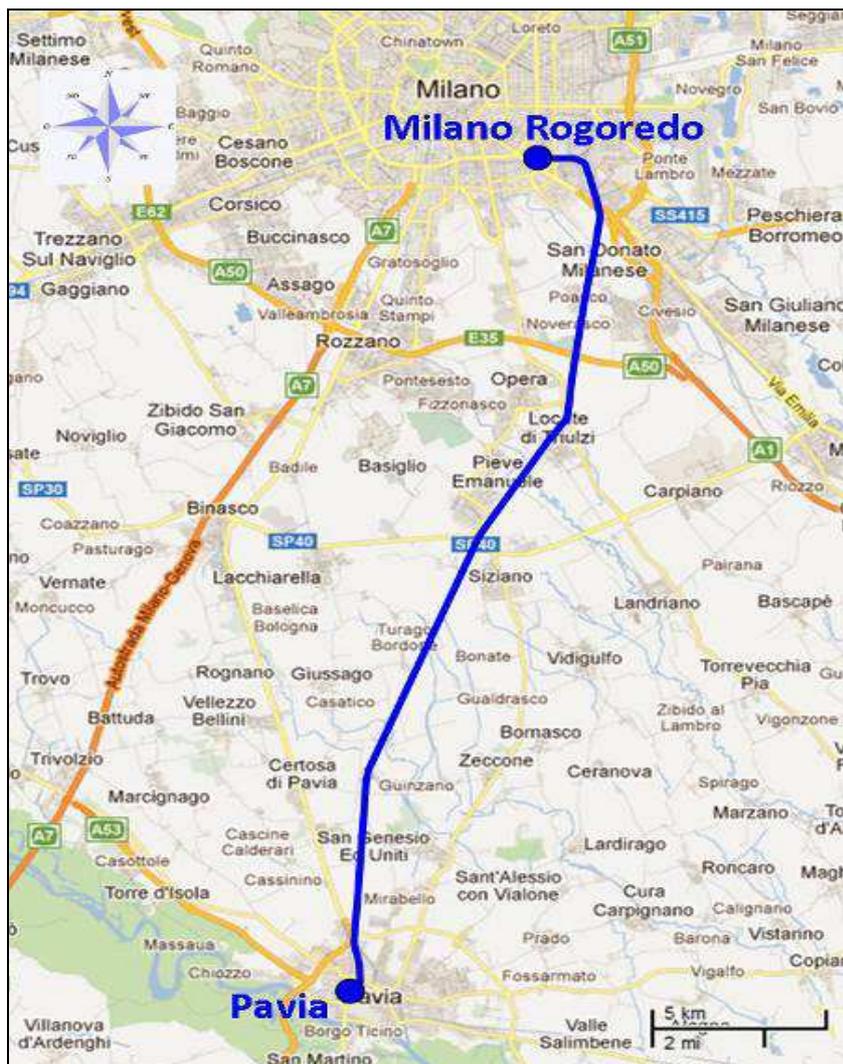


Figura 1-1 – Ubicazione del tracciato dell’opera in progetto



PROGETTO DEFINITIVO
POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO - GENOVA
QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO - PAVIA
FASE 1 - QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO - PIEVE EMANUELE

RILEVATI FERROVIARI- RELAZIONE DI CALCOLO

COMMESSA	LOTTO	FASE-ENTE	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM0Z	10	D 26	CLRI0000 001	A	2 di 20

Con riferimento alla Carta Tecnica Regionale della Regione Lombardia, l'area dell'opera in progetto è individuabile nelle sezioni B6b3, B6b5, B6c3, B6c4, B6c5, B7b1, B7b2, B7b3 e B7b4 alla scala scala 1:10.000.

La linea ferroviaria esistente, lungo la quale si sviluppa il progetto in esame, attraversa un'area pianeggiante o debolmente inclinata verso sud. Le quote vanno da 115 m s.l.m. presso il nodo di Milano Rogoredo a 75 m s.l.m. in coincidenza della stazione di Pavia.

Generalmente il tracciato si svilupperà in rilevato, dovranno essere previste delle opere (generalmente ponti) adatte al superamento dei numerosi corsi d'acqua, sia artificiali che naturali.

Per quanto concerne le interferenze territoriali, l'opera attraversa il fiume Lambro Meridionale, a sud dei centri abitati di Pieve Emanuele e Locale di Triulzi, ed i seguenti canali artificiali: il Cavo Vettabbia presso Chiavalle Milanese, la Roggia Carona ed il Cavo Borromeo a NW di Turago Burdone, la Roggia Barona a nord di Moriago e Novedo, ed il Naviglio Vecchio a Pavia.

2. ANALISI DEI CEDIMENTI DEI RILEVATI

Le verifiche effettuate si riferiscono al rilevato avente sezione trasversale con massima altezza (posta alle progressive PK 9+900 e PK 10+100) ed alla condizione in cui la distanza tra asse del rilevato ed asse del binario esistente è minima (6.5m). Inoltre, la sezione avente massima altezza viene idealmente associata alla stratigrafia della zona 13, che interessa le progressive dalla PK 20+345 alla PK 21+100, essendo quella che rende massima la stima dei cedimenti (condizione più sfavorevole).

Data la stratigrafia dell'area in esame, il cedimento è costituito dalla sola componente immediata ed è calcolabile attraverso la seguente espressione:

$$w_i = \sum_{i,n} (\Delta\sigma_{zi} - \nu(\Delta\sigma_{xi} + \Delta\sigma_{yi})) h_i / E_i$$

essendo:

- w_i = somma dei cedimenti i-esimi;
- $\Delta\sigma_{zi}$, $\Delta\sigma_{xi}$, $\Delta\sigma_{yi}$ = incremento di tensione verticale ed orizzontale indotto dal carico di rilevato nello strato i-esimo, calcolato con la teoria di Boussinesq;
- h_i = spessore dello strato i-esimo;
- E_i modulo di elasticità dello strato i-esimo per terreni non coesivi: $E_i = 2 \cdot G \cdot (1 + \nu)$ con $G = G_0/3$;
- ν = coefficiente di Poisson = 0.3;
- n = numero di strati sabbioso-ghiaiosi presenti nella zona "compressibile" di spessore H.

Gli incrementi di tensione verticale e orizzontale sono stati valutati sulla base della teoria della elasticità, facendo riferimento ad aree di carico infinitamente flessibili (v. **Figura 2-1** e **Figura 2-2**).

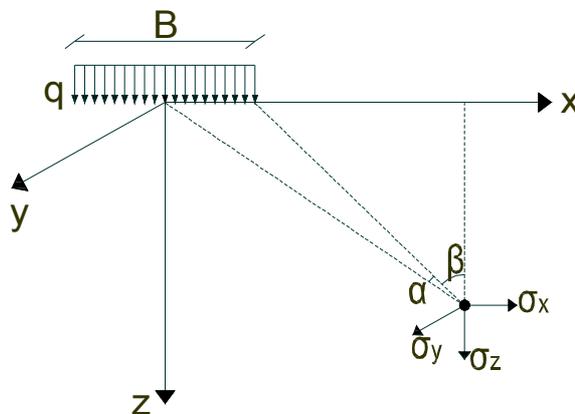


Figura 2-1 – Carico uniforme nastriforme: sistema di riferimento

$$\begin{cases} \sigma_z = \frac{q}{\pi} \cdot [\alpha + \operatorname{sen}\alpha \cdot \cos(\alpha + 2\beta)] \\ \sigma_x = \frac{q}{\pi} \cdot [\alpha - \operatorname{sen}\alpha \cdot \cos(\alpha + 2\beta)] \\ \sigma_y = \frac{2q}{\pi} \cdot u \cdot \alpha \end{cases}$$

Figura 2-2 – Carico uniforme nastriforme: incrementi di tensione

Lo spessore della zona compressibile H è stato stabilito sulla base dell'ipotesi che a profondità dove l'incremento delle tensioni medie risulta inferiore al 15% delle tensioni efficaci medie litostatiche, il contributo al cedimento è trascurabile e/o non attendibile.

2.1 CALCOLO DEI CEDIMENTI

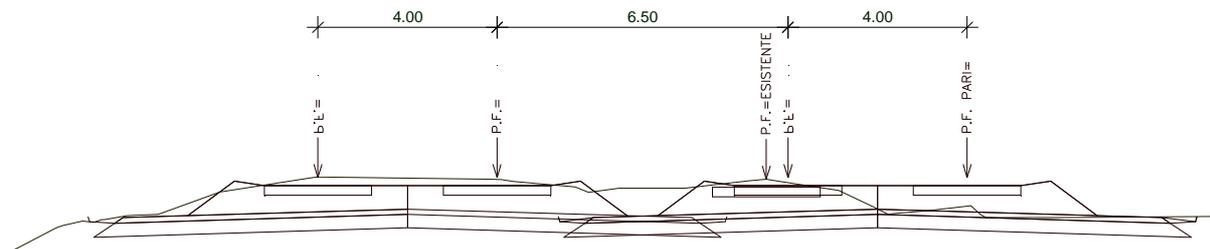


Figura 2-3 – rilevato ferroviario esistente (dx) e nuovo (sx)

La sezione sottoposta a verifica, ubicata alle progressive PK 9+900 e PK 10+100, è caratterizzata da un rilevato ferroviario avente un'altezza massima $H_{\max}=6.2$ m ed una larghezza $B=25.66$ m. Il materiale costituente il rilevato ha un peso specifico pari a 17 kN/m^3 .

Geometria del rilevato

Ai fini del calcolo, il rilevato rappresentato nella precedente figura viene schematizzato come una **striscia di carico rettangolare**, secondo due schemi differenti, come indicato di seguito:

- rettangolo equivalente a parità di altezza (v. Figura 2-4), che rende massimo il cedimento in asse al rilevato nuovo;
- rettangolo equivalente a parità di larghezza (v. Figura 2-5), che rende massimo il cedimento in asse al binario esistente.

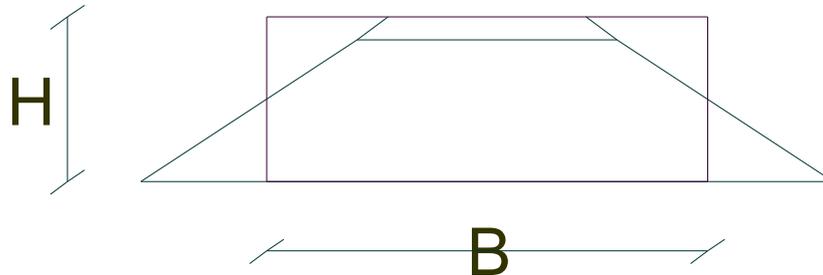


Figura 2-4 – rettangolo equivalente a parità di altezza

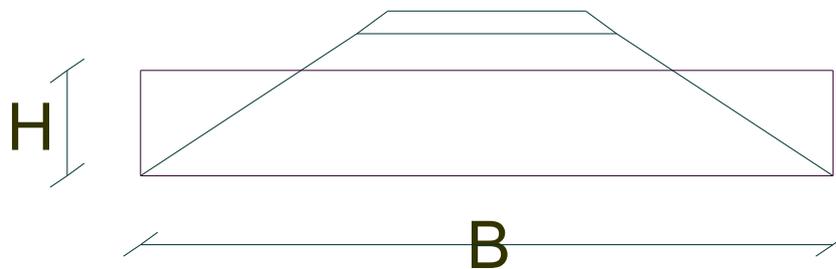


Figura 2-5 – rettangolo equivalente a parità di larghezza

In sintesi, dalla due differenti schematizzazioni, risulta:

Tabella 2-1 Schematizzazione del carico uniforme nastriforme mediante rettangolo equivalente

RETTANGOLO EQUIVALENTE			
parità di altezza		parità di larghezza	
H[m]	B[m]	H[m]	B[m]
6.2	16.36	3.96	25.66

Si analizzano i cedimenti dovuti alla realizzazione del nuovo rilevato. Il calcolo dei cedimenti è svolto in corrispondenza delle seguenti verticali:

1. asse del rilevato nuovo;
2. asse del più vicino binario esistente (minima distanza tra asse binario nuovo/asse binario esistente pari a 6.5m v. Figura 2-3);

Stratigrafia e caratteristiche meccaniche dei terreni

La stratigrafia e le caratteristiche meccaniche dei terreni sono quelle della Zona 13 (sondaggio PNNMOZF08), di cui si ripropone la tabella dei parametri geotecnici caratteristici presente al § 3.2.10 della Relazione Geotecnica Generale- FASE 1.



PROGETTO DEFINITIVO
POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO - GENOVA
QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO - PAVIA
FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE

RILEVATI FERROVIARI- RELAZIONE DI CALCOLO

COMMESSA	LOTTO	FASE-ENTE	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM0Z	10	D 26	CLRI0000 001	A	6 di 20

Tabella 2-2 Zona omogenea 13: parametri geotecnici di riferimento

ZONA	SONDAGGIO DI RIFERIMENTO	PROFONDITA'	UNITA' TERRENO	γ_{sat} [kN/m ³]	γ_d [kN/m ³]	Φ [°]		E'_{op} [MPa]		V_s [m/s]		G_0 [MPa]	
						max	min	max	min	max	min	max	min
13	PNNMOZF08	da 0 a 3m	S	16	10	23	23	5	5	130	130	28	28
		da 3m a 10m	Sg	16	10	30	25	24	6	168	120	47	24
		da 10m a 20m	S	16	10	30	30	50	28	323	195	173	123

Analisi dei carichi

In base al §3.8.1.3.4.2 del “Manuale di Progettazione delle Opere Civili Parte II- Sezione 3 Corpo Stradale”, il calcolo dei cedimenti deve essere svolto tenendo conto esclusivamente dei carichi permanenti.

La pressione Q dovuta al carico permanente è pari a:

- rettangolo equivalente a parità di altezza $Q=6.2 \cdot 17= 105.4 \text{ kN/m}^2$;
- rettangolo equivalente a parità di larghezza $Q=3.96 \cdot 17= 67.32 \text{ kN/m}^2$.

2.1.1 CEDIMENTO IMMEDIATO IN ASSE AL RILEVATO NUOVO

$$w_i = \sum_{i,n} (\Delta\alpha_{xi} - \nu(\Delta\alpha_{xi} + \Delta\alpha_{yi})) h_i / E_i$$

$$Q=105.4 \text{ kN/m}^2, B=16.36 \text{ m.}$$

$x=0$ m distanza tra asse rilevato e asse di calcolo dei cedimenti.

I valori di progetto di G_0 sono riassunti in **Tabella 2-3**.

Tabella 2-3 –Valori di progetto di G_0

PROFONDITÀ	VALORE DI PROGETTO DI G_0 [MPa]
da 0 a 3m	27.9
da 3m a 10m	35.3
da 10m a 20m	147.7



PROGETTO DEFINITIVO
POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO - GENOVA
QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO - PAVIA
FASE 1 - QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO - PIEVE EMANUELE

RILEVATI FERROVIARI- RELAZIONE DI CALCOLO

COMMESSA LOTTO FASE-ENTE DOCUMENTO REV. FOGLIO
 NM0Z 10 D 26 CLRI0000 001 A 7 di 20

Tabella 2-4 – Cedimento immediato in asse al rilevato nuovo

z (m)	h _i (m)	β (rad)	α (rad)	Δσ _{zi} (kPa)	Δσ _{xi} (kPa)	Δσ _{yi} (kPa)	(Δσ _{zi} - ν(Δσ _{xi} + Δσ _{yi}))h _i	E _i (MPa)	w _i (cm)
0.5	1	-1.51	3.02	105.39	97.22	60.78	57.99	24.15	0.24
1.5	1	-1.39	2.78	105.13	81.33	55.94	63.96	24.15	0.26
2.5	1	-1.27	2.55	104.25	66.74	51.30	68.84	24.15	0.29
3.5	1	-1.17	2.33	102.54	54.00	46.96	72.25	30.57	0.24
4.5	1	-1.07	2.14	99.99	43.32	42.99	74.10	30.57	0.24
5.5	1	-0.98	1.96	96.75	34.61	39.41	74.54	30.57	0.24
6.5	1	-0.90	1.80	93.03	27.66	36.21	73.87	30.57	0.24
7.5	1	-0.83	1.66	89.03	22.18	33.36	72.37	30.57	0.24
8.5	1	-0.77	1.53	84.94	17.89	30.85	70.32	30.57	0.23
9.5	1	-0.71	1.42	80.88	14.52	28.62	67.94	30.57	0.22
10.5	1	-0.66	1.32	76.94	11.88	26.65	65.38	127.99	0.05
11.5	1	-0.62	1.24	73.18	9.79	24.89	62.77	127.99	0.05
12.5	1	-0.58	1.16	69.63	8.14	23.33	60.19	127.99	0.05
13.5	1	-0.54	1.09	66.29	6.81	21.93	57.67	127.99	0.05
14.5	1	-0.51	1.03	63.18	5.75	20.68	55.25	127.99	0.04
15.5	1	-0.49	0.97	60.28	4.89	19.55	52.95	127.99	0.04
16.5	1	-0.46	0.92	57.58	4.18	18.53	50.77	127.99	0.04
17.5	1	-0.44	0.87	55.08	3.60	17.60	48.72	127.99	0.04
18.5	1	-0.42	0.83	52.75	3.12	16.76	46.79	127.99	0.04
19.5	1	-0.40	0.79	50.59	2.72	15.99	44.97	127.99	0.04
20.5	1	-0.38	0.76	48.57	2.38	15.29	43.27	127.99	0.03
21.5	1	-0.36	0.73	46.70	2.09	14.64	41.68	127.99	0.03
22.5	1	-0.35	0.70	44.94	1.85	14.04	40.18	127.99	0.03
23.5	1	-0.33	0.67	43.31	1.64	13.49	38.77	127.99	0.03
24.5	1	-0.32	0.64	41.78	1.47	12.97	37.45	127.99	0.03
25.5									
w_i (cm) =									3.03

In base a quanto riportato nella tabella sopra, il cedimento immediato in asse al rilevato nuovo è pari a circa **3.03** cm.

2.1.2 CEDIMENTO IMMEDIATO IN ASSE AL BINARIO ESISTENTE

$$w_i = \sum_{i,n} (\Delta\sigma_{zi} - \nu(\Delta\sigma_{xi} + \Delta\sigma_{yi})) h_i / E_i$$

$$Q=67.32 \text{ kN/m}^2, B=25.66 \text{ m}$$

x=8.5 (6.5+2) m distanza tra asse rilevato e asse di calcolo dei cedimenti.

Valori di progetto di G₀ sono riassunti in **Tabella 2-3**.

Tabella 2-5 – Cedimento immediato in asse al binario esistente

z (m)	h _i (m)	β (rad)	α (rad)	Δσ _z (kPa)	Δσ _x (kPa)	Δσ _y (kPa)	(Δσ _z - v(Δσ _x + Δσ _y))h _i	E _i (MPa)	w _i (cm)
0.5	1	-1.46	3.00	67.30	61.41	38.61	37.29	24.15	0.15
1.5	1	-1.24	2.74	66.80	50.54	35.20	41.07	24.15	0.17
2.5	1	-1.05	2.50	65.36	41.84	32.16	43.16	24.15	0.18
3.5	1	-0.89	2.30	63.17	35.37	29.56	43.69	30.57	0.14
4.5	1	-0.77	2.13	60.66	30.59	27.37	43.27	30.57	0.14
5.5	1	-0.67	1.99	58.14	26.95	25.53	42.40	30.57	0.14
6.5	1	-0.59	1.86	55.78	24.05	23.95	41.38	30.57	0.14
7.5	1	-0.52	1.76	53.62	21.65	22.58	40.35	30.57	0.13
8.5	1	-0.47	1.66	51.67	19.59	21.38	39.37	30.57	0.13
9.5	1	-0.43	1.58	49.90	17.79	20.31	38.47	30.57	0.13
10.5	1	-0.39	1.50	48.28	16.20	19.34	37.62	127.99	0.03
11.5	1	-0.36	1.44	46.80	14.76	18.47	36.83	127.99	0.03
12.5	1	-0.33	1.37	45.42	13.47	17.67	36.08	127.99	0.03
13.5	1	-0.31	1.32	44.13	12.30	16.93	35.36	127.99	0.03
14.5	1	-0.29	1.26	42.92	11.25	16.25	34.67	127.99	0.03
15.5	1	-0.27	1.21	41.77	10.29	15.62	34.00	127.99	0.03
16.5	1	-0.26	1.17	40.68	9.42	15.03	33.35	127.99	0.03
17.5	1	-0.24	1.13	39.64	8.63	14.48	32.71	127.99	0.03
18.5	1	-0.23	1.09	38.64	7.92	13.97	32.07	127.99	0.03
19.5	1	-0.22	1.05	37.68	7.27	13.48	31.45	127.99	0.02
20.5	1	-0.21	1.01	36.75	6.68	13.03	30.84	127.99	0.02
21.5	1	-0.20	0.98	35.86	6.14	12.60	30.24	127.99	0.02
22.5	1	-0.19	0.95	35.01	5.66	12.20	29.65	127.99	0.02
23.5	1	-0.18	0.92	34.18	5.22	11.82	29.07	127.99	0.02
24.5	1	-0.17	0.89	33.38	4.81	11.46	28.50	127.99	0.02
25.5									
								w _i (cm) =	1.83

In base a quanto riportato nella tabella sopra, il cedimento immediato in asse al binario esistente è pari a circa **1.83** cm.

2.1.1 DECORSO DEI CEDIMENTI NEL TEMPO

Data la natura dei terreni presenti nell'area oggetto di interesse (terreni sabbiosi), è possibile affermare che i cedimenti sono esclusivamente di natura immediata e che, pertanto, si può ritenere che saranno completamente espletati al termine della realizzazione del rilevato.



PROGETTO DEFINITIVO
POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO - GENOVA
QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO -
PAVIA
FASE 1 - QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO - PIEVE
EMANUELE

RILEVATI FERROVIARI- RELAZIONE DI
CALCOLO

COMMESSA	LOTTO	FASE-ENTE	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM0Z	10	D 26	CLRI0000 001	A	9 di 20

3. ANALISI DI STABILITA' DELLE SCARPATE

Nel presente paragrafo si riportano i risultati delle verifiche di stabilità delle scarpate dei rilevati. Dette verifiche sono state svolte sia in condizioni statiche che in condizioni sismiche con le metodologie ed i parametri geotecnici indicati di seguito.

3.1 METODO DI CALCOLO

L'analisi delle condizioni di stabilità è stata condotta avvalendosi degli usuali metodi dell'equilibrio limite. Per la valutazione dei fattori di sicurezza nei confronti della stabilità globale è stato impiegato il codice di calcolo SlopeCAD, dove è possibile tracciare una molteplicità di superfici di potenziale scivolamento generando la maglia dei centri, scegliendo una serie di punti di passaggio ed un fascio di tangenti. Il metodo di analisi è quello di Bishop, il quale prevede la generazione di superfici di scorrimento circolari.

Il coefficiente di sicurezza FS a rottura lungo la superficie di scorrimento viene definito come il rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie S e quella effettivamente mobilitata lungo detta superficie:

$$FS = \frac{\int_S \tau_{disp}}{\int_S \tau_{mob}}$$

In accordo alle NTC 2008, per rilevati in materiali sciolti e fronti scavo, le analisi di stabilità vengono condotte secondo la combinazione (A2+M2+R2), in base alla quale i parametri di resistenza del terreno devono essere abbattuti mediante i coefficienti parziali di seguito riportati:

$\gamma_{\varphi'}=1.25$ coefficiente parziale per l'angolo di resistenza al taglio

$\gamma_{c'}=1.25$ coefficiente parziale per la coesione drenata

L'analisi viene, quindi, condotta con i seguenti parametri geotecnici di calcolo:

$\tan(\varphi'_{calcolo})= \tan(\varphi'_k)/\gamma_{\varphi'}$ coefficiente parziale per l'angolo di resistenza al taglio

$c'_{calcolo}= c'_k/\gamma_{c'}$ coefficiente parziale per la coesione drenata

Le verifiche effettuate si riferiscono alla sezione trasversale avente massima altezza $H_{max}=6.2$ m (posta alle progressive PK 9+900 e PK 10+100). Detta sezione viene idealmente associata alla stratigrafia della Zona 13, che interessa le progressive dalla PK 20+345 alla PK 21+100, essendo quella che rende minimo il coefficiente di sicurezza (condizione più sfavorevole).

Per la stratigrafia di riferimento (Zona 13), considerando anche il terreno stabilizzato a calce utilizzato per la realizzazione del rilevato, si ha:

Tabella 3-1 – Valori di progetto dell'angolo d'attrito e della coesione drenata

Terreno	parametri caratteristici		parametri di calcolo	
	ϕ_k [°]	c'_k [kPa]	$\phi_{calcolo}$ [°]	$c'_{calcolo}$ [kPa]
Stabilizzato	30	50	25	40
S	23	0	19	0
Sg	25	0	20	0
S	30	0	25	0

In accordo al §6.8.2 delle NTC 2008, il coefficiente di sicurezza minimo per le verifiche di stabilità di opere in materiali sciolti e fronti scavo deve essere pari a 1.1 (γ_R), ossia deve essere verificata la seguente disequaglianza:

$$FS \geq 1.1$$

In accordo al §7.11 delle NTC 2008, anche l'analisi in presenza di sisma deve essere condotta considerando i parametri del terreno abbattuti con i coefficienti parziali precedentemente riportati ed il coefficiente minimo di sicurezza è pari a 1.1.

3.1.1 CARICHI FERROVIARI

Per l'analisi di stabilità, è stato considerato il sovraccarico ferroviario di 40 kN/m² che deve essere fattorizzato con $\gamma_Q=1.25$ (v. Tabella 5.2.V NTC 2008). In condizioni sismiche, al carico accidentale è stato applicato un coefficiente di combinazione $\psi_2=0.2$ (v. Tabella 5.2.V NTC 2008).

3.1.2 AZIONI SISMICHE PER L'ANALISI DI STABILITA'

In base al metodo pseudo-statico, l'azione sismica viene modellata considerando, in luogo delle azioni dinamiche, le azioni statiche equivalenti ovvero forze statiche orizzontali f_h e verticali f_v per unità di volume, di intensità pari al prodotto tra il peso specifico del corpo γ sottoposto all'azione dinamica ed il coefficiente sismico:

$$f_h = \gamma \cdot k_h \quad \text{forza orizzontale per unità di volume}$$

$$f_v = \gamma \cdot k_v \quad \text{forza verticale per unità di volume}$$

dove:



PROGETTO DEFINITIVO
POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO - GENOVA
QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO -
PAVIA
FASE 1 - QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO - PIEVE
EMANUELE

RILEVATI FERROVIARI- RELAZIONE DI
CALCOLO

COMMESSA	LOTTO	FASE-ENTE	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NM0Z	10	D 26	CLRI0000 001	A	11 di 20

γ = peso specifico del volume considerato

k_h coefficiente sismico in direzione orizzontale

k_v coefficiente sismico in direzione verticale

In base §7.11.3.5.2 delle NTC 2008, i coefficienti sismici sono definiti in funzione dell'accelerazione orizzontale massima attesa al sito (a_{max}), mediante le seguenti espressioni:

$$k_h = \beta_s \cdot a_{max} / g = 0.032$$

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h = \pm 0.016$$

dove:

$a_{max} = 0.135$ [g] accelerazione orizzontale massima attesa al sito

$\beta_s = 0.24$ coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito (v. Tabella 7.11.I NTC 2008, categoria del suolo C)

3.2 MODELLAZIONE

Il modello di calcolo elaborato fa riferimento al metodo di analisi di Bishop. Detto metodo si fonda sull'ipotesi che la superficie di scivolamento sia assimilabile ad un arco di circonferenza. Se si considera la massa interessata dallo scivolamento suddivisa in n conci, il fattore di sicurezza può essere espresso in termini di momenti generati dalle forze agenti su singoli conci rispetto al centro della circonferenza stessa:

$$FS = \frac{M_S}{M_R}$$

In cui M_R è il momento delle forze ribaltanti pari a

$$M_R = r \cdot \sum_{i=1}^n W_i \cdot \sin \alpha_i$$

M_S è il momento stabilizzante dato da

$$M_S = \sum_{i=1}^n (c + \sigma_i \cdot \tan \varphi_i) \cdot \Delta l_i$$

dove r e Δl_i sono rispettivamente il raggio e la lunghezza della base del concio considerato (v. Figura 3-1).

Nel metodo di Bishop si assume che le azioni agenti all'interfaccia dei concii abbiano risultante orizzontale, perciò, se si esprime la resistenza mobilitata T_i come un'aliquota della resistenza al taglio, tramite il fattore di sicurezza FS (assunto uguale a quello dell'equazione generale), e si ricava N_i dall'equilibrio alla traslazione verticale, si ha:

$$N_i = \frac{W_i - u_i \cdot \Delta x_i - (1/FS) \cdot c \cdot \Delta x_i \cdot \tan \alpha_i}{\cos \alpha_i \cdot [1 + (\tan \alpha_i \cdot \tan \varphi_i)/FS]}$$

ottenendo:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c \cdot \Delta x_i + (W_i - u_i \cdot \Delta x_i) \cdot \tan \varphi_i] \cdot [1/M_i(\alpha)]}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \sin \alpha_i} \quad [1]$$

con

$$M_i(\alpha) = \cos \alpha_i \cdot \left(1 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \varphi_i}{FS} \right) \quad [2]$$

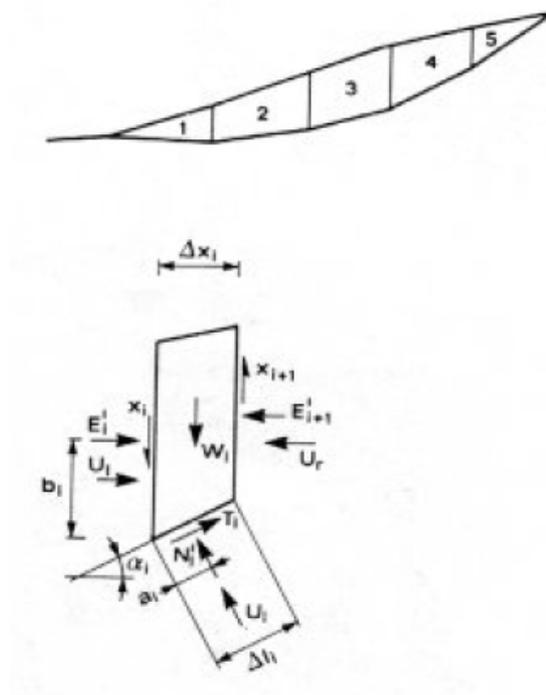


Figura 3-1 – metodo di Bishop

Poiché il coefficiente di sicurezza FS compare in [1] sia al primo membro, sia al secondo (per la presenza di $M_i(\alpha)$), è necessaria una procedura iterativa: si introduce un valore di tentativo in [2] e se ne calcola uno nuovo mediante la [1], continuando fino a convergenza (grado di approssimazione pari a 0.001).

In conclusione, il metodo di Bishop trascura l'equilibrio alla traslazione orizzontale del singolo concio, pertanto il risultato è necessariamente approssimato. Tuttavia, il confronto con le procedure rigorose dimostra che l'errore commesso è di pochi punti percentuali e, quindi, accettabile.

In Figura 3-2 è rappresentato il modello di calcolo, ove sono visibili gli elementi caratterizzanti le superfici di scivolamento: maglia dei centri, punti di passaggio imposti (crocette viola) e piani di tangenza (linee rosse).

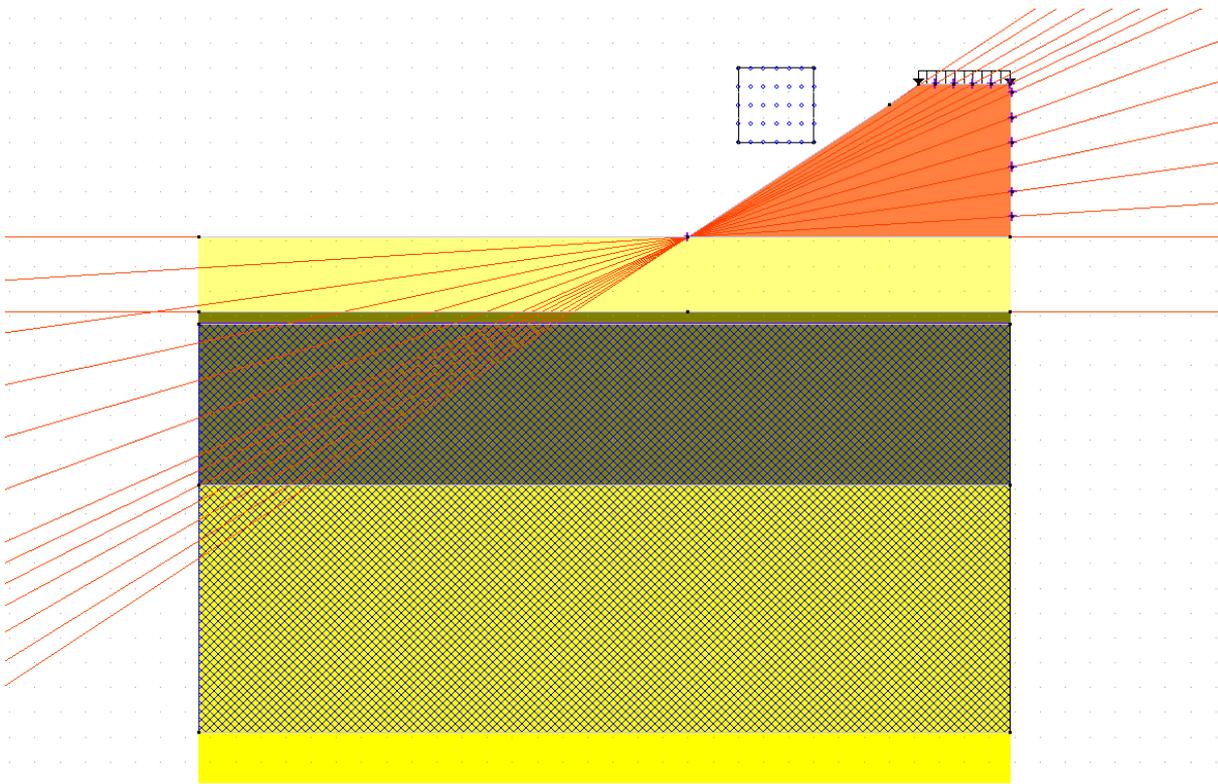


Figura 3-2 – modello di calcolo per la stabilità del rilevato

3.3 RISULTATI

I risultati delle verifiche di stabilità delle scarpate dei rilevati vengono riassunti in **Tabella 3-2**. L’analisi allo SLU ha fornito il coefficiente di sicurezza minimo (FS=1.1). In presenza di sisma, i coefficienti di sicurezza sono risultati superiori al valore ottenuto allo SLU, dunque la verifica di stabilità risulta soddisfatta. In **Tabella 3-3**, **Tabella 3-4** e **Tabella 3-5** sono presenti gli output di calcolo forniti dal software. In Figura 3-3 e Figura 3-4 sono rappresentate la superfici di scorrimento critiche, per le condizioni di SLU e SLV, rispettivamente.

Tabella 3-2 –Coefficienti di sicurezza nei confronti delle verifiche di stabilità

Combinazione azioni	Coefficiente di sicurezza
SLU	1.1
SLV (sisma orizzontale)	1.5
SLV (sisma verticale)	1.6

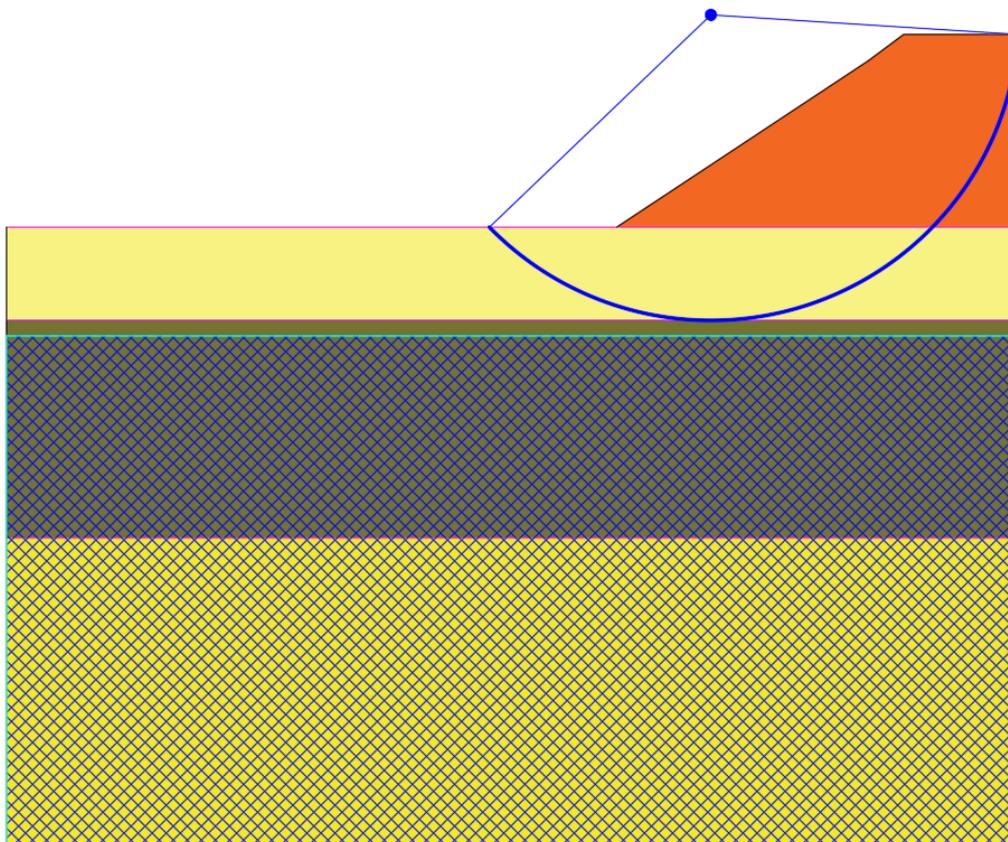


Figura 3-3 – Superficie di scorrimento critica (in blu) per SLU

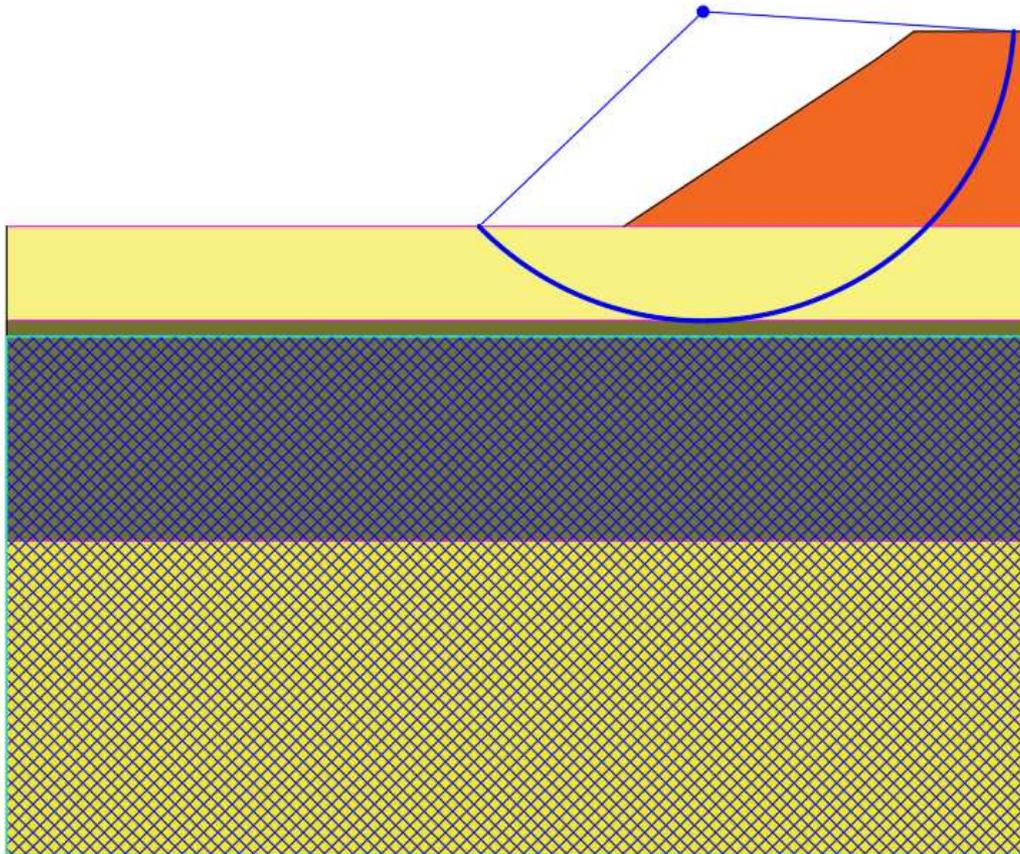


Figura 3-4 – Superficie di scorrimento critica (in blu) per SLV



PROGETTO DEFINITIVO
POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO - GENOVA
QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO - PAVIA
FASE 1 - QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO - PIEVE EMANUELE

RILEVATI FERROVIARI- RELAZIONE DI CALCOLO

COMMESSA LOTTO FASE-ENTE DOCUMENTO REV. FOGLIO
 NM0Z 10 D 26 CLRI0000 001 A 16 di 20

Tabella 3-3 – Tabulato di calcolo inerente alla verifica di stabilità (SLU)

Stabilità pendio

Simboli usati nella tabella dei risultati:

- alfa = angolo alla base del concio in gradi
- l = lunghezza della base del concio
- C = coesione alla base del concio
- fi = angolo d'attrito alla base del concio in gradi
- Xg = ascissa del baricentro del concio
- Yg = ordinata del baricentro del concio
- b = braccio relativo al peso del concio
- Peso = peso complessivo alla base
- Peso S+ = peso complessivo alla base con sisma positivo (verso il basso)
- Peso S- = peso complessivo alla base con sisma negativo (verso l'alto)
- Pvert = carico verticale complessivo agente sul concio
- Press. = pressione di falda
- Mstab = momento stabilizzante (attrito + coesione) in assenza di sisma
- Mstab SV+ = momento stabilizzante (attrito + coesione) con sisma positivo (verso l'alto)
- Mstab SV- = momento stabilizzante (attrito + coesione) con sisma negativo (verso il basso)
- Mstab SO = momento stabilizzante (attrito + coesione) con solo sisma orizzontale
- Mpeso = momento dovuto al peso in assenza di sisma
- Mpeso SV+ = momento dovuto al peso con sisma positivo (verso l'alto)
- Mpeso SV- = momento dovuto al peso con sisma negativo (verso il basso)
- Mpeso SO = momento dovuto al peso con solo sisma orizzontale

Unità di misura utilizzate nella tabella dei risultati: daN.cm

Caratteristiche del cerchio che comporta il minimo coefficiente di sicurezza:

Ascissa del centro X = 4500

Ordinata del centro Y = 2700

Raggio del cerchio R = 983 cm

Caratteristiche della massa interessata dallo scivolamento:

Volume = 732563 cm³/cm

Peso = 1043 daN/cm

Perimetro di scivolamento = 2260 cm

STABILITA' DEL PENDIO CON BISHOP

Concio	alfa	l	C	fi	Xg	Yg	b	Peso	Pvert	Press.	Mstab	Mpeso
1	-42.1	133	0	19	3859	1987	641	4	0	0	2783	-2887
2	-34.6	125	0	19	3948	1953	552	13	0	0	6683	-7121
3	-27.6	116	0	19	4048	1923	452	19	0	0	8730	-8715
4	-21	110	0	19	4149	1900	351	24	0	0	9847	-8432
5	-14.8	104	0	19	4252	1901	248	32	0	0	12351	-8132
6	-8.8	101	0	19	4351	1924	149	46	0	0	16514	-6919
7	-3.1	94	0	19	4447	1951	53	54	0	0	18661	-2908
8	0.2	7	0	20	4503	1968	3	5	0	0	1641	15
9	3.1	93	0	19	4554	1987	54	65	0	0	21711	3484
10	8.8	101	0	19	4651	2024	151	80	0	0	26165	12037
11	14.8	104	0	19	4751	2068	251	89	0	0	28908	22407
12	20.9	107	0	19	4851	2118	351	98	0	0	31576	34244
13	27.3	113	0	19	4951	2174	451	104	0	0	34259	47147
14	34.7	139	0	19	5058	2244	558	126	0	0	42654	70472
15	42.3	124	0	19	5160	2306	660	101	92	0	68588	127350
16	46	0	0	19	5207	2327	707	0	0	0	188	361
17	50.2	143	0.4	25	5251	2354	751	88	92	0	122525	135413
18	59.6	181	0.4	25	5342	2419	842	67	92	0	125316	134958
19	75.6	365	0.4	25	5421	2519	921	27	90	0	143653	111455
		2260						1043	365		722753	654229

Tabella 3-4 – Tabulato di calcolo inerente alla verifica di stabilità (SLV sisma orizzontale)

Stabilità pendio

Simboli usati nella tabella dei risultati:

- alfa = angolo alla base del concio in gradi
- l = lunghezza della base del concio
- C = coesione alla base del concio
- fi = angolo d'attrito alla base del concio in gradi
- Xg = ascissa del baricentro del concio
- Yg = ordinata del baricentro del concio
- b = braccio relativo al peso del concio
- Peso = peso complessivo alla base
- Peso S+ = peso complessivo alla base con sisma positivo (verso il basso)
- Peso S- = peso complessivo alla base con sisma negativo (verso l'alto)
- Pvert = carico verticale complessivo agente sul concio
- Press. = pressione di falda
- Mstab = momento stabilizzante (attrito + coesione) in assenza di sisma
- Mstab SV+ = momento stabilizzante (attrito + coesione) con sisma positivo (verso l'alto)
- Mstab SV- = momento stabilizzante (attrito + coesione) con sisma negativo (verso il basso)
- Mstab SO = momento stabilizzante (attrito + coesione) con solo sisma orizzontale
- Mpeso = momento dovuto al peso in assenza di sisma
- Mpeso SV+ = momento dovuto al peso con sisma positivo (verso l'alto)
- Mpeso SV- = momento dovuto al peso con sisma negativo (verso il basso)
- Mpeso SO = momento dovuto al peso con solo sisma orizzontale

Unità di misura utilizzate nella tabella dei risultati: daN,cm

Caratteristiche del cerchio che comporta il minimo coefficiente di sicurezza:

Ascissa del centro X = 4450
Ordinata del centro Y = 2700
Raggio del cerchio R = 983 cm

Caratteristiche della massa interessata dallo scivolamento:

Volume = 707538 cmc/cm
Peso = 999 daN/cm
Perimetro di scivolamento = 2268 cm

STABILITA' DEL PENDIO CON SISMA ORIZZONTALE (Bishop)

Concio	alfa	l	C	fi	Xg	Yg	b	Peso	Pvert	Press.	Mstab SO	Mpeso SO
1	-44.1	64	0	19	3774	2002	676	1	0	0	620	-676
2	-38.4	131	0	19	3848	1971	602	9	0	0	4617	-5133
3	-31.1	120	0	19	3946	1938	504	16	0	0	7384	-7777
4	-24.4	113	0	19	4047	1911	403	22	0	0	8973	-8220
5	-17.9	108	0	19	4149	1891	301	26	0	0	9885	-7112
6	-11.8	102	0	19	4251	1895	199	34	0	0	12190	-5876
7	-5.9	101	0	19	4351	1921	99	47	0	0	16215	-3513
8	-1.7	44	0	19	4422	1942	28	24	0	0	8203	-99
9	0	14	0	19	4450	1951	0	8	0	0	2719	195
10	1.7	43	0	19	4479	1961	29	26	0	0	8888	1381
11	5.8	101	0	19	4551	1988	101	69	0	0	23047	8533
12	11.8	102	0	19	4651	2029	201	79	0	0	26121	17586
13	17.8	105	0	19	4751	2075	301	88	0	0	29103	28220
14	24.1	110	0	19	4851	2128	401	95	0	0	32090	40062
15	30.7	117	0	19	4951	2187	501	102	0	0	35195	52667
16	38.3	145	0	19	5058	2263	608	122	0	0	44452	75937
17	44.3	59	0	19	5136	2317	686	45	7	0	20027	36226
18	48.2	75	0.4	25	5181	2341	731	50	8	0	51374	43190
19	55	160	0.4	25	5251	2386	801	78	15	0	94745	75427
20	66.4	229	0.4	25	5339	2467	889	51	15	0	96649	59869
21	79.7	228	0.4	25	5404	2562	954	8	7	0	89455	13868
		2268						999	51		621953	414757

Tabella 3-5 – Tabulato di calcolo inerente alla verifica di stabilità (SLV sisma verticale)

Stabilità pendio

Simboli usati nella tabella dei risultati:

- alfa = angolo alla base del concio in gradi
- l = lunghezza della base del concio
- C = coesione alla base del concio
- fi = angolo d'attrito alla base del concio in gradi
- X_g = ascissa del baricentro del concio
- Y_g = ordinata del baricentro del concio
- b = braccio relativo al peso del concio
- Peso = peso complessivo alla base
- Peso S+ = peso complessivo alla base con sisma positivo (verso il basso)
- Peso S- = peso complessivo alla base con sisma negativo (verso l'alto)
- P_{vert} = carico verticale complessivo agente sul concio
- Press. = pressione di falda
- M_{stab} = momento stabilizzante (attrito + coesione) in assenza di sisma
- M_{stab} SV+ = momento stabilizzante (attrito + coesione) con sisma positivo (verso l'alto)
- M_{stab} SV- = momento stabilizzante (attrito + coesione) con sisma negativo (verso il basso)
- M_{stab} SO = momento stabilizzante (attrito + coesione) con solo sisma orizzontale
- M_{peso} = momento dovuto al peso in assenza di sisma
- M_{peso} SV+ = momento dovuto al peso con sisma positivo (verso l'alto)
- M_{peso} SV- = momento dovuto al peso con sisma negativo (verso il basso)
- M_{peso} SO = momento dovuto al peso con solo sisma orizzontale

Unità di misura utilizzate nella tabella dei risultati: **daN/cm**.

Caratteristiche del cerchio che comporta il minimo coefficiente di sicurezza:

Ascissa del centro X = 4450

Ordinata del centro Y = 2700

Raggio del cerchio R = 983 cm

Caratteristiche della massa interessata dallo scivolamento:

Volume = 707538 cm³/cm

Peso = 999 daN/cm

Perimetro di scivolamento = 2268 cm

STABILITA' DEL PENDIO CON SISMA VERTICALE (Bishop)

Concio	alfa	l	C	fi	X _g	Y _g	Peso SV+	Peso SV-	P _{vert}	Press.	M _{stab} SV+	M _{peso} SV+	M _{stab} SV-	M _{peso} SV-
1	-44.1	64	0	19	3774	2002	1	1	0	0	619	-710	600	-688
2	-38.4	131	0	19	3848	1971	9	9	0	0	4632	-5426	4484	-5253
3	-31.1	120	0	19	3946	1938	16	16	0	0	7434	-8307	7197	-8042
4	-24.4	113	0	19	4047	1911	22	21	0	0	9056	-8915	8768	-8631
5	-17.9	108	0	19	4149	1891	26	25	0	0	9998	-7912	9679	-7659
6	-11.8	102	0	19	4251	1895	34	33	0	0	12351	-6860	11957	-6641
7	-5.9	101	0	19	4351	1921	47	46	0	0	16454	-4764	15930	-4612
8	-1.7	44	0	19	4422	1942	24	24	0	0	8332	-702	8067	-679
9	0	14	0	19	4450	1951	8	8	0	0	2763	0	2675	0
10	1.7	43	0	19	4479	1961	27	26	0	0	9035	760	8747	736
11	5.8	101	0	19	4551	1988	70	68	0	0	23452	7045	22704	6821
12	11.8	102	0	19	4651	2029	80	78	0	0	26616	16121	25767	15607
13	17.8	105	0	19	4751	2075	89	86	0	0	29694	26869	28748	26013
14	24.1	110	0	19	4851	2128	97	94	0	0	32789	38914	31743	37673
15	30.7	117	0	19	4951	2187	103	100	0	0	36018	51806	34870	50154
16	38.3	145	0	19	5058	2263	124	120	0	0	45583	75415	44129	73010
17	44.3	59	0	19	5136	2317	53	51	7	0	20572	36159	19916	35006
18	48.2	75	0.4	25	5181	2341	59	57	8	0	52649	43203	51675	41826
19	55	160	0.4	25	5251	2386	94	91	15	0	97328	75693	95639	73280
20	66.4	229	0.4	25	5339	2467	67	65	15	0	99790	60334	98327	58410
21	79.7	228	0.4	25	5404	2562	15	14	7	0	89455	14028	89455	13581
		1067					1067	1033	51		634620	402752	621076	389911