

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP: J47109000030009

U.O. INFRASTRUTTURE NORD

PROGETTO DEFINITIVO

POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO-GENOVA QUADRUPPLICAMENTO MILANO-ROGOREDO-PAVIA FASE 2 – QUADRUPPLICAMENTO PIEVE EMANUELE – PAVIA

ELABORATI GENERALI - GEOTECNICA

Rilevati stradali – Relazione di calcolo

SCALA:

-

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

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	CONSORZIO INTEGRATA	Novembre 2018	S. Ciuffegni N. Carella 	Novembre 2018	S. Borelli 	Novembre 2018	F. Novera 	Novembre 2018

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

INDICE

1. PREMESSA.....	3
2. ANALISI DEI CEDIMENTI DEI RILEVATI.....	5
2.1 CALCOLO DEI CEDIMENTI.....	6
2.1.1 CEDIMENTO IMMEDIATO IN ASSE AL RILEVATO.....	8
2.1.2 CEDIMENTO IMMEDIATO IN ASSE AL BORDO DEL RILEVATO.....	9
2.1.3 DECORSO DEI CEDIMENTI NEL TEMPO.....	10
3. ANALISI DI STABILITA' DELLE SCARPATE.....	11
3.1 METODO DI CALCOLO.....	11
3.1.1 CARICHI STRADALI.....	12
3.1.2 AZIONI SISMICHE PER L'ANALISI DI STABILITA'.....	12
3.2 MODELLAZIONE.....	13
3.3 RISULTATI.....	16

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.

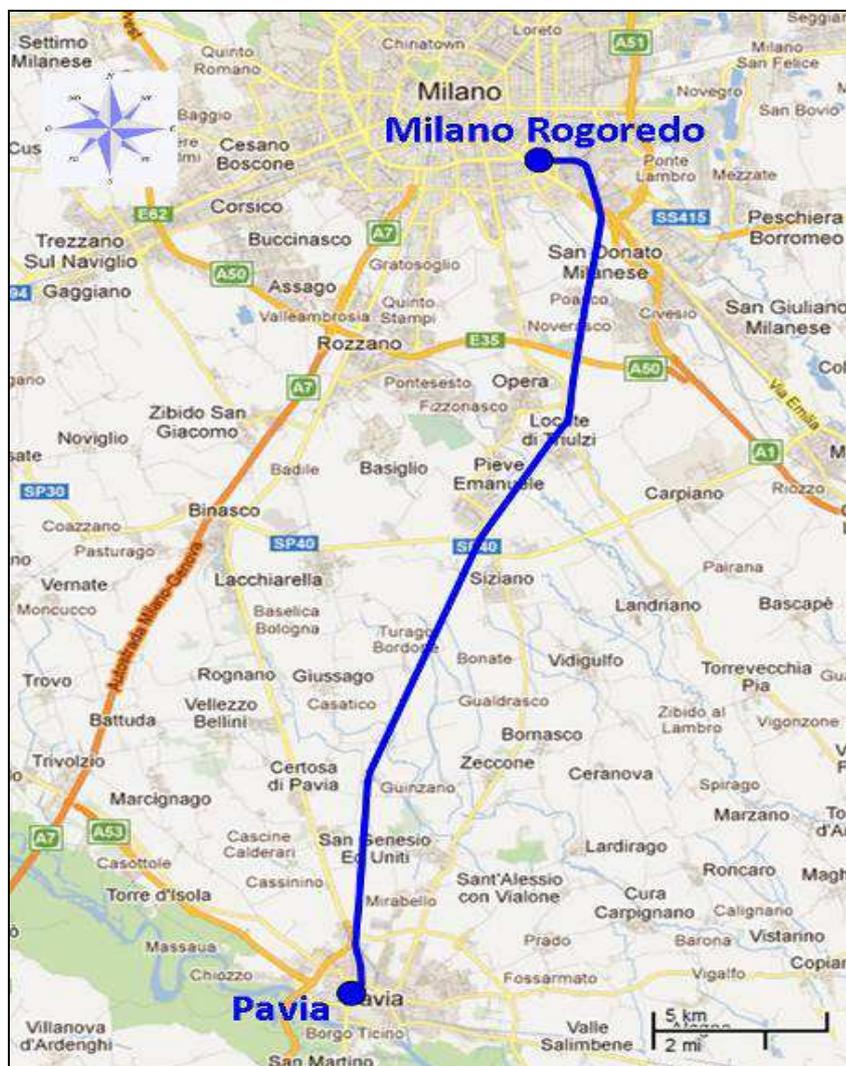


Figura 1-1 – Ubicazione del tracciato dell'opera in progetto

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 alla sezione trasversale avente massima altezza (posta alla progressiva PK 12+350 ed appartenente al nuovo cavalcavia SP40). 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**).

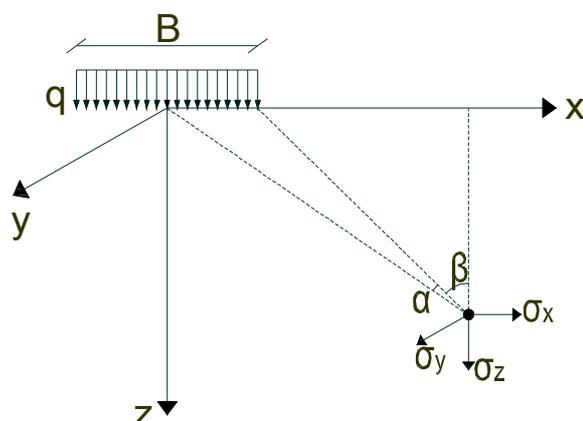


Figura 2-1 – Carico uniforme nastriforme: sistema di riferimento

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

Figura 2-2 – Carico uniforme nastroforme: 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

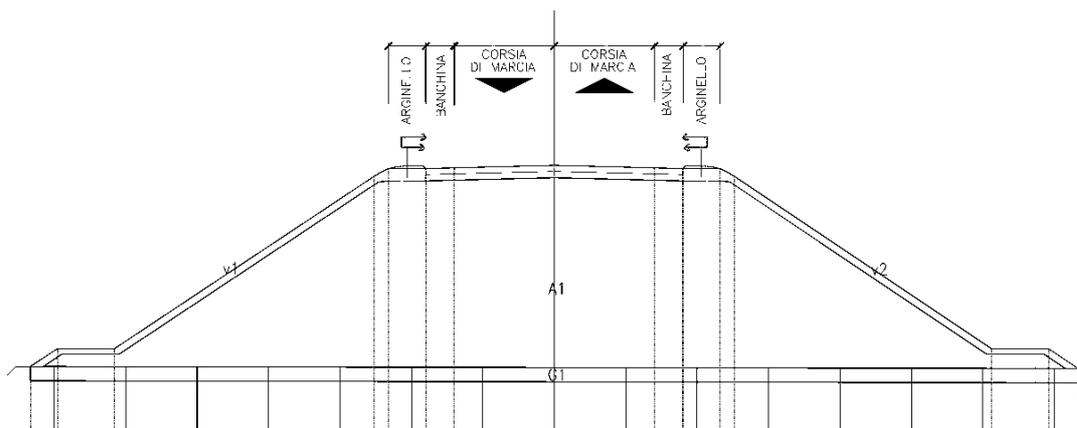


Figura 2-3 – sezione rilevato stradale con H_{max}

La sezione sottoposta a verifica, ubicata alla progressiva PK 12+350, è caratterizzata da un rilevato stradale avente un'altezza massima $H_{max}=7$ m ed una larghezza $B=36.7$ 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;
- rettangolo equivalente a parità di larghezza (v. Figura 2-5), che rende massimo il cedimento al bordo del rilevato.

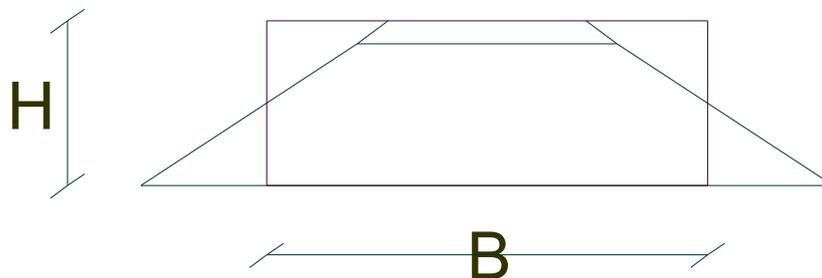


Figura 2-4 – rettangolo equivalente a parità di altezza

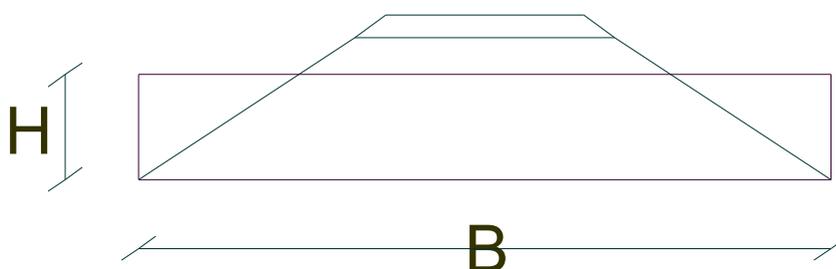


Figura 2-5 – rettangolo equivalente a parità di larghezza

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]
7	22.4	4.3	36.7

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;
2. bordo del rilavato.

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 § 3.2.6 della Relazione Geotecnica Generale- FASE 2.

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 $Q=7 \cdot 17= 119 \text{ kN/m}^2$;
- rettangolo equivalente a parità di larghezza $Q=4.3 \cdot 17= 73.1 \text{ kN/m}^2$.

2.1.1 CEDIMENTO IMMEDIATO IN ASSE AL RILEVATO

$$w_i = \sum_{i,n} (\Delta\alpha_i - \nu(\Delta\alpha_i + \Delta\alpha_y)) h_i / E_i$$

$$Q=119 \text{ kN/m}^2, B=22.4 \text{ m.}$$

$x=0$ 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 MPa
da 3m a 10m	35.3 MPa
da 10m a 20m	147.7 MPa

Tabella 2-4 –Cedimento immediato in asse al rilevato

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	-1.53	3.05	119.00	112.24	69.37	64.51	24.15	0.27
1.5	1	-1.44	2.88	118.88	98.95	65.35	69.59	24.15	0.29
2.5	1	-1.35	2.70	118.47	86.25	61.42	74.17	24.15	0.31
3.5	1	-1.27	2.54	117.62	74.49	57.63	77.99	30.57	0.26
4.5	1	-1.19	2.38	116.26	63.85	54.03	80.90	30.57	0.26
5.5	1	-1.11	2.23	114.39	54.44	50.65	82.86	30.57	0.27
6.5	1	-1.04	2.09	112.05	46.27	47.50	83.92	30.57	0.27
7.5	1	-0.98	1.96	109.32	39.27	44.58	84.17	30.57	0.28
8.5	1	-0.92	1.84	106.30	33.34	41.89	83.73	30.57	0.27
9.5	1	-0.87	1.73	103.08	28.34	39.42	82.75	30.57	0.27
10.5	1	-0.82	1.64	99.74	24.14	37.17	81.35	127.99	0.06
11.5	1	-0.77	1.54	96.36	20.63	35.10	79.64	127.99	0.06
12.5	1	-0.73	1.46	93.00	17.70	33.21	77.73	127.99	0.06
13.5	1	-0.69	1.39	89.69	15.24	31.48	75.68	127.99	0.06
14.5	1	-0.66	1.32	86.48	13.18	29.90	73.55	127.99	0.06
15.5	1	-0.63	1.25	83.37	11.44	28.44	71.40	127.99	0.06
16.5	1	-0.60	1.19	80.38	9.97	27.11	69.26	127.99	0.05
17.5	1	-0.57	1.14	77.53	8.73	25.88	67.14	127.99	0.05
18.5	1	-0.54	1.09	74.80	7.68	24.74	65.08	127.99	0.05
19.5	1	-0.52	1.04	72.22	6.78	23.70	63.07	127.99	0.05
20.5	1	-0.50	1.00	69.76	6.01	22.73	61.14	127.99	0.05
21.5	1	-0.48	0.96	67.42	5.34	21.83	59.27	127.99	0.05
22.5	1	-0.46	0.92	65.21	4.77	20.99	57.48	127.99	0.04
23.5	1	-0.44	0.89	63.12	4.27	20.22	55.77	127.99	0.04
24.5	1	-0.43	0.86	61.13	3.84	19.49	54.13	127.99	0.04
25.5									
								w_i (cm) =	3.54

In base a quanto riportato nella tabella sopra, il cedimento immediato in asse al rilevato è pari a circa **3.54** cm.

2.1.2 CEDIMENTO IMMEDIATO IN ASSE AL BORDO DEL RILEVATO

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

$$Q=73.1 \text{ kN/m}^2, B= 36.7 \text{ m}$$

x=18.35 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 al bordo del rilevato

z (m)	hi (m)	β (rad)	α (rad)	$\Delta\sigma_z$ (kPa)	$\Delta\sigma_x$ (kPa)	$\Delta\sigma_y$ (kPa)	$(\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y))h_i$	Ei (MPa)	wi (cm)
0.5	1	0.00	1.56	36.55	35.92	21.74	19.25	24.15	0.08
1.5	1	0.00	1.53	36.55	34.65	21.36	19.75	24.15	0.08
2.5	1	0.00	1.50	36.55	33.39	20.98	20.23	24.15	0.08
3.5	1	0.00	1.48	36.54	32.14	20.60	20.71	30.57	0.07
4.5	1	0.00	1.45	36.52	30.90	20.23	21.18	30.57	0.07
5.5	1	0.00	1.42	36.50	29.68	19.85	21.64	30.57	0.07
6.5	1	0.00	1.40	36.47	28.48	19.48	22.08	30.57	0.07
7.5	1	0.00	1.37	36.42	27.29	19.12	22.50	30.57	0.07
8.5	1	0.00	1.34	36.37	26.14	18.75	22.90	30.57	0.07
9.5	1	0.00	1.32	36.30	25.01	18.39	23.28	30.57	0.08
10.5	1	0.00	1.29	36.22	23.91	18.04	23.63	127.99	0.02
11.5	1	0.00	1.27	36.12	22.84	17.69	23.96	127.99	0.02
12.5	1	0.00	1.24	36.01	21.81	17.35	24.27	127.99	0.02
13.5	1	0.00	1.22	35.89	20.81	17.01	24.54	127.99	0.02
14.5	1	0.00	1.19	35.75	19.84	16.68	24.79	127.99	0.02
15.5	1	0.00	1.17	35.59	18.91	16.35	25.01	127.99	0.02
16.5	1	0.00	1.15	35.42	18.02	16.03	25.21	127.99	0.02
17.5	1	0.00	1.13	35.24	17.16	15.72	25.37	127.99	0.02
18.5	1	0.00	1.10	35.04	16.33	15.41	25.52	127.99	0.02
19.5	1	0.00	1.08	34.83	15.54	15.11	25.63	127.99	0.02
20.5	1	0.00	1.06	34.60	14.79	14.82	25.72	127.99	0.02
21.5	1	0.00	1.04	34.37	14.07	14.53	25.79	127.99	0.02
22.5	1	0.00	1.02	34.12	13.38	14.25	25.83	127.99	0.02
23.5	1	0.00	1.00	33.86	12.73	13.98	25.85	127.99	0.02
24.5	1	0.00	0.98	33.60	12.11	13.71	25.85	127.99	0.02
25.5									
								wi (cm) =	1.04

In base a quanto riportato nella tabella sopra, il cedimento immediato al bordo del rilevato è pari a circa **1.04** cm.

2.1.3 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.

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:

$\gamma_{\phi'}=1.25$ 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:

$\tan(\phi'_{calcolo}) = \tan(\phi'_k) / \gamma_{\phi'}$ 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 $H_{max}=7$ m (posta alla progressiva PK 12+350). 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]	ϕ_{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 disuguaglianza:

$$FS \geq 1.1$$

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 STRADALI

Per l'analisi di stabilità, è stato considerato il sovraccarico stradale di 20 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:

$$\gamma = \text{peso specifico del volume considerato}$$

$$k_h = \text{coefficiente sismico in direzione orizzontale}$$

$$k_v = \text{coefficiente sismico in direzione verticale}$$

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 conci 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

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

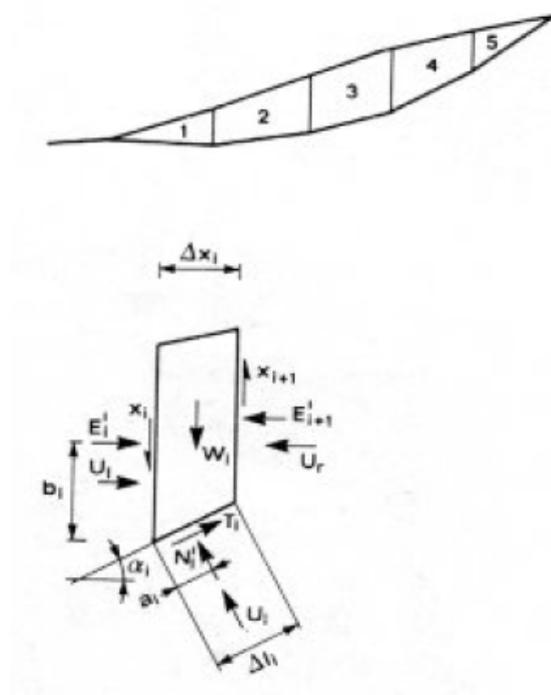


Figura 3-1 – metodo di Bishop

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).

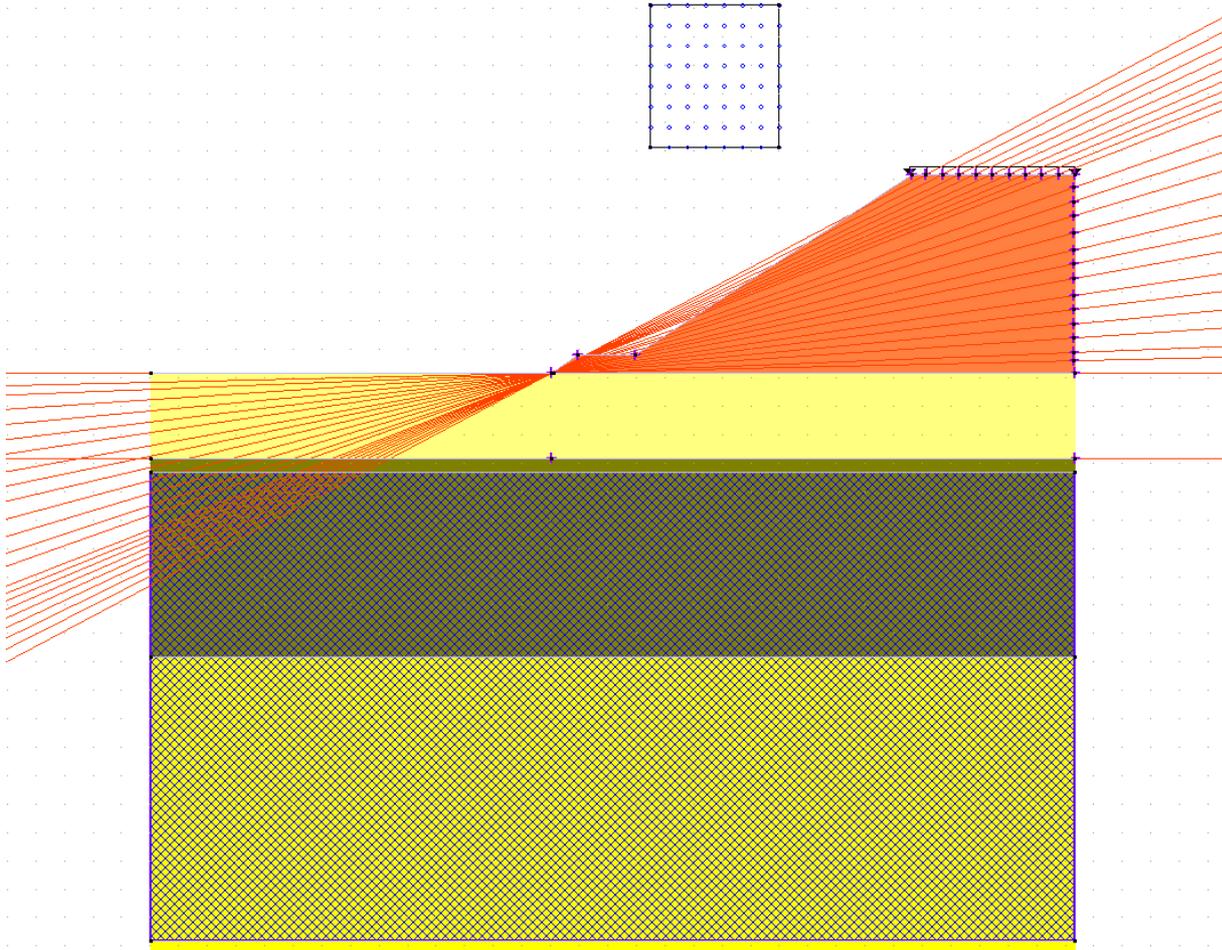


Figura 3-2 – modello di calcolo per la stabilità del rilevato

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=1.3). 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 le 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	1.3
SLV (sisma orizzontale)	1.5
SLV (sisma verticale)	1.6

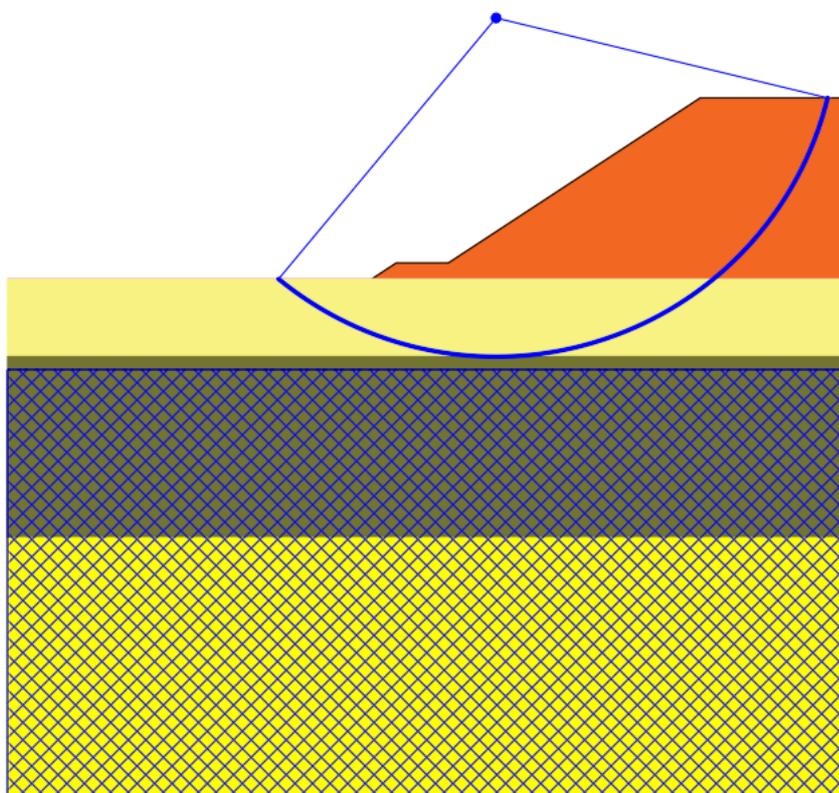


Figura 3-3 – Superficie di scorrimento critica (in blu) per SLU

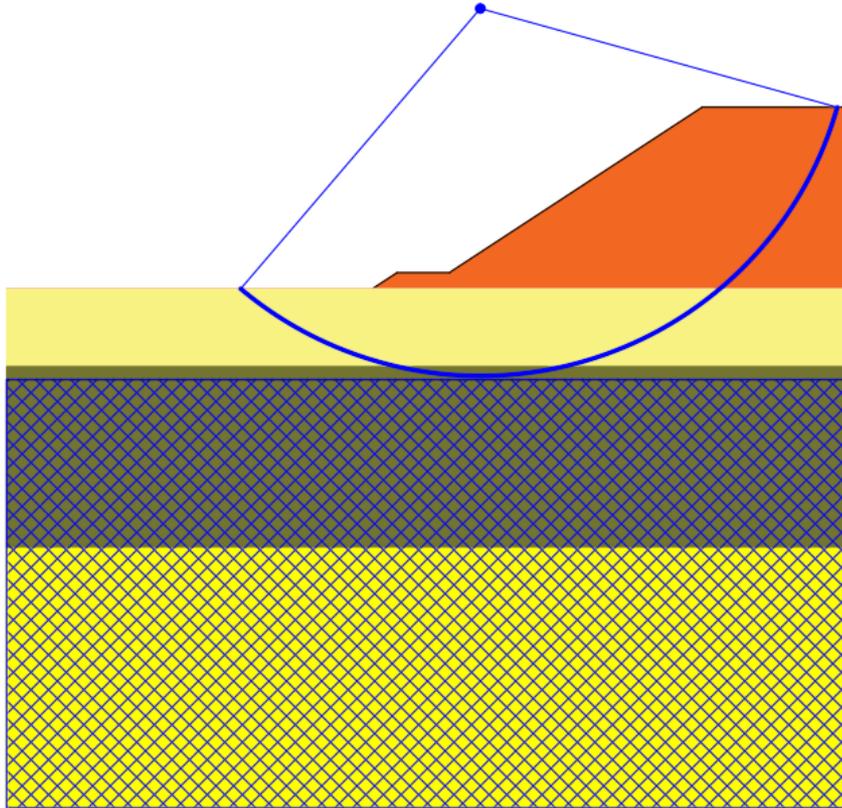


Figura 3-4 – Superficie di scorrimento critica (in blu) per SLV

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 = 15078.57

Ordinata del centro Y = 3025.71

Raggio del cerchio R = 1309 cm

Caratteristiche della massa interessata dallo scivolamento:

Volume = 947801 cmc/cm

Peso = 1373 daN/cm

Perimetro di scivolamento = 2647 cm

STABILITA' DEL PENDIO CON BISHOP

Concio	alfa	l	C	fi	Xg	Yg	b	Peso	Pvert	Press	Mstab	Mpeso
1	-38	73	0	19	14283	2002	795	1	0	0	936	-1046
2	-33.7	120	0	19	14359	1975	719	8	0	0	5151	-5691
3	-28.6	114	0	19	14455	1947	623	14	0	0	8325	-8702
4	-23.7	109	0	19	14554	1922	525	19	0	0	10468	-9903
5	-19.2	100	0	19	14652	1920	427	26	0	0	13789	-11283
6	-14.7	103	0	19	14747	1920	332	36	0	0	18097	-12029
7	-10.2	102	0	19	14846	1909	232	38	0	0	18446	-8928
8	-5.9	97	0	19	14946	1918	133	44	0	0	20328	-5865
9	-2.1	78	0	19	15032	1944	46	43	0	0	19764	-2039
10	0	16	0	19	15079	1958	0	10	0	0	4360	0
11	0.4	3	0	19	15088	1961	9	2	0	0	755	16
12	2.6	97	0	19	15138	1979	60	65	0	0	29039	3841
13	6.8	97	0	19	15235	2015	156	75	0	0	32930	11649
14	11.1	98	0	19	15331	2055	253	84	0	0	36609	21157
15	15.5	100	0	19	15428	2098	349	92	0	0	40140	32149
16	19.9	103	0	19	15524	2145	446	100	0	0	43577	44397
17	24.5	106	0	19	15621	2197	542	106	0	0	46976	57644
18	29.2	111	0	19	15717	2253	639	112	0	0	50399	71593
19	34.2	117	0	19	15814	2315	735	117	3	0	55075	87727
20	38.2	64	0	19	15887	2357	808	61	25	0	40915	69723
21	40.9	60	0.4	25	15935	2377	856	52	23	0	69880	63990
22	45.2	135	0.4	25	16004	2410	925	100	48	0	145878	136649
23	51.5	153	0.4	25	16099	2463	1020	82	48	0	143099	132836
24	58.9	185	0.4	25	16193	2531	1114	59	48	0	140208	120056
25	68.7	263	0.4	25	16280	2620	1201	27	48	0	137633	90743
26	75.4	43	0.4	25	16343	2703	1265	0	5	0	22607	7378
		2647						1373	247		1155386	886062

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 = 15014.29
Ordinata del centro Y = 3097.14
Raggio del cerchio R = 1416 cm

Caratteristiche della massa interessata dallo scivolamento:

Volume = 1039722 cm³/cm
Peso = 1474 daN/cm
Perimetro di scivolamento = 2833 cm

STABILITA' DEL PENDIO CON SISMA ORIZZONTALE (Bishop)

Concio	alfa	l	C	fi	Xg	Yg	b	Peso	Pvert.	Press.	Mstab SO	Mpeso SO
1	-40.2	5	0	19	14102	2016	913	0	0	0	4	-5
2	-37.5	126	0	19	14168	1990	846	4	0	0	3083	-3410
3	-32.6	119	0	19	14257	1960	757	11	0	0	7563	-8086
4	-27.9	113	0	19	14355	1931	659	17	0	0	10664	-10601
5	-23.4	109	0	19	14454	1908	560	22	0	0	12848	-11406
6	-19.1	106	0	19	14553	1888	461	26	0	0	14378	-10860
7	-15	97	0	19	14651	1890	363	32	0	0	17156	-10413
8	-12.9	3	0	19	14698	1898	317	1	0	0	688	-362
9	-10.9	99	0	20	14748	1893	266	40	0	0	22092	-9144
10	-6.8	101	0	20	14846	1886	168	43	0	0	22985	-5553
11	-2.8	97	0	20	14946	1898	69	48	0	0	24848	-1483
12	1.1	97	0	20	15042	1929	28	58	0	0	29858	3753
13	5	97	0	20	15138	1963	124	68	0	0	34530	10911
14	8.9	98	0	20	15235	2001	220	78	0	0	38939	19803
15	11.9	48	0	20	15306	2031	292	41	0	0	20471	13333
16	13.9	51	0	19	15354	2052	340	45	0	0	21547	16956
17	17	101	0	19	15428	2087	413	94	0	0	44836	42003
18	21.1	104	0	19	15524	2136	510	101	0	0	48659	54883
19	25.4	107	0	19	15621	2188	606	108	0	0	52460	68628
20	29.8	111	0	19	15717	2245	703	113	0	0	56298	82950
21	34.4	117	0	19	15814	2308	799	118	0	0	60449	97837
22	38.5	86	0	19	15895	2353	881	82	5	0	45973	79129
23	41	37	0.4	25	15943	2373	929	33	2	0	40788	33489
24	44.5	134	0.4	25	16004	2402	990	102	8	0	135640	111295
25	50.2	149	0.4	25	16099	2454	1085	85	8	0	131015	102861
26	56.8	174	0.4	25	16193	2518	1179	64	8	0	125197	86157
27	64.9	225	0.4	25	16284	2599	1270	36	8	0	127275	56147
28	71.9	124	0.4	25	16352	2678	1338	4	3	0	70125	9409
		2833						1474	42		1220367	818225

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
 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 = 15014.29
 Ordinata del centro Y = 3097.14
 Raggio del cerchio R = 1416 cm

Caratteristiche della massa interessata dallo scivolamento:

Volume = 1039722 cmc/cm
 Peso = 1474 daN/cm
 Perimetro di scivolamento = 2833 cm

STABILITA' DEL PENDIO CON SISMA VERTICALE (Bishop)

Concio	alfa	l	C	fi	Xg	Yg	Peso SV+	Peso SV-	Pvert.	Press.	Mstab SV+	Mpeso SV+	Mstab SV-	Mpeso SV-
1	-40.2	5	0	19	14102	2016	0	0	0	0	4	-5	4	-5
2	-37.5	126	0	19	14168	1990	4	4	0	0	3088	-3616	2990	-3501
3	-32.6	119	0	19	14257	1960	11	11	0	0	7597	-8634	7355	-8359
4	-27.9	113	0	19	14355	1931	17	17	0	0	10736	-11424	10394	-11060
5	-23.4	109	0	19	14454	1908	22	21	0	0	12959	-12443	12546	-12046
6	-19.1	106	0	19	14553	1888	26	25	0	0	14525	-12057	14062	-11672
7	-15	97	0	19	14651	1890	32	31	0	0	17357	-11850	16803	-11472
8	-12.9	3	0	19	14698	1898	1	1	0	0	697	-419	675	-406
9	-10.9	99	0	20	14748	1893	41	39	0	0	22375	-10883	21662	-10536
10	-6.8	101	0	20	14846	1886	44	42	0	0	23310	-7358	22566	-7123
11	-2.8	97	0	20	14946	1898	48	47	0	0	25220	-3386	24425	-3278
12	1.1	97	0	20	15042	1929	59	57	0	0	30351	1575	29383	1525
13	5	97	0	20	15138	1963	69	67	0	0	35139	8543	34018	8270
14	8.9	98	0	20	15235	2001	79	76	0	0	39669	17326	38404	16774
15	11.9	48	0	20	15306	2031	42	40	0	0	20871	12114	20206	11727
16	13.9	51	0	19	15354	2052	46	45	0	0	21976	15670	21275	15171
17	17	101	0	19	15428	2087	96	93	0	0	45766	39551	44307	38290
18	21.1	104	0	19	15524	2136	103	100	0	0	49723	52561	48137	50885
19	25.4	107	0	19	15621	2188	110	106	0	0	53668	66512	51957	64391
20	29.8	111	0	19	15717	2245	115	112	0	0	57665	81112	55826	78526
21	34.4	117	0	19	15814	2308	120	117	0	0	62001	96342	60024	93270
22	38.5	86	0	19	15895	2353	89	86	5	0	47213	78272	45707	75776
23	41	37	0.4	25	15943	2373	36	35	2	0	41784	33198	40989	32139
24	44.5	134	0.4	25	16004	2402	111	108	8	0	139107	110587	136550	107062
25	50.2	149	0.4	25	16099	2454	94	91	8	0	134626	102563	132329	99293
26	56.8	174	0.4	25	16193	2518	73	70	8	0	128859	86187	127025	83439
27	64.9	225	0.4	25	16284	2590	44	43	8	0	127275	56347	127275	54551
28	71.9	124	0.4	25	16352	2678	7	7	3	0	70125	9466	70125	9164
		1541					1541	1491	42		1243792	785851	1217019	760795