

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 ferroviari – 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	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. Borelli Novembre 2018	

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

File: NM0Z20D26CLRI0000001A

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>	<i>6</i>
2.1.2	<i>CEDIMENTO IMMEDIATO IN ASSE AL BINARIO ESISTENTE.....</i>	<i>7</i>
2.1.3	<i>DECORSO DEI CEDIMENTI NEL TEMPO.....</i>	<i>8</i>
3.	ANALISI DI STABILITA' DELLE SCARPATE	9
3.1	METODO DI CALCOLO	9
3.1.1	<i>CARICHI FERROVIARI.....</i>	<i>10</i>
3.1.2	<i>AZIONI SISMICHE PER L'ANALISI DI STABILITA'</i>	<i>10</i>
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

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 13+700) 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**).

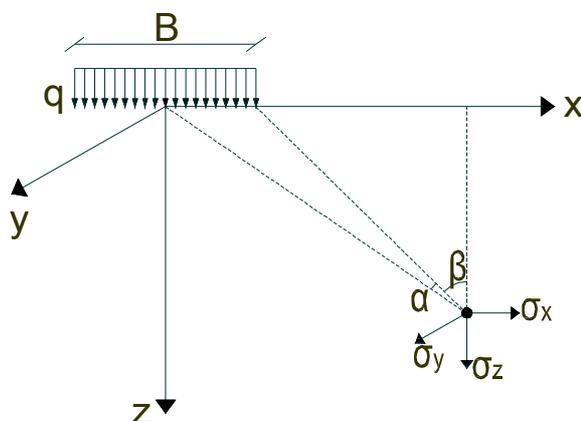


Figura 2-1 – Carico uniforme nastroiforme: sistema di riferimento

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

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

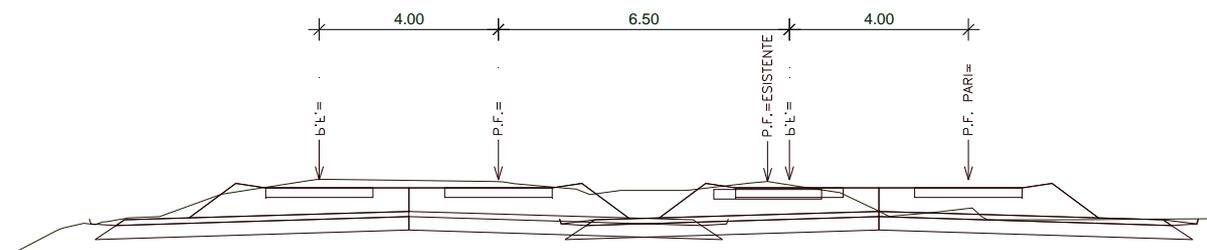


Figura 2-3 – rilevato ferroviario esistente (dx) e nuovo (sx)

La sezione sottoposta a verifica, ubicata alla progressiva PK 13+700, è caratterizzata da un rilevato ferroviario avente un'altezza massima $H_{\max}=5.3$ m ed una larghezza $B=23$ 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.

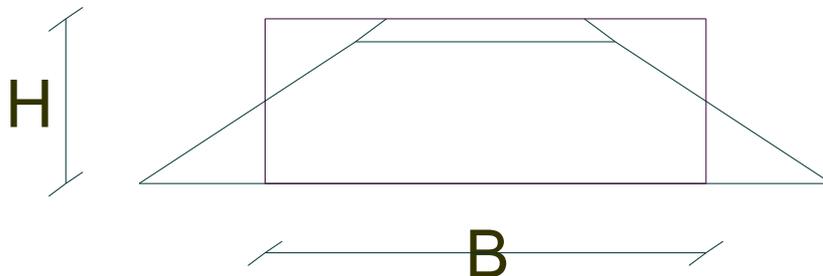


Figura 2-4 – rettangolo equivalente a parità di altezza

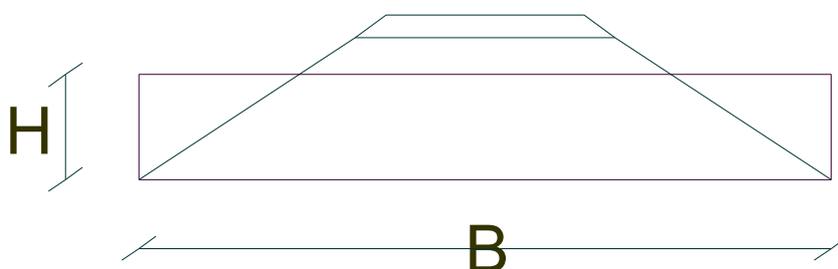


Figura 2-5 – rettangolo equivalente a parità di larghezza

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]
5.3	15.00	3.47	23.00

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 § 3.2.6 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 $Q=5.3 \cdot 17= 90.1 \text{ kN/m}^2$;
- rettangolo equivalente a parità di larghezza $Q=3.47 \cdot 17= 58.99 \text{ kN/m}^2$.

2.1.1 CEDIMENTO IMMEDIATO IN ASSE AL RILEVATO NUOVO

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

$$Q=90.1 \text{ kN/m}^2, B=15 \text{ m.}$$

$x=0$ 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 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	-1.50	3.01	90.09	82.47	51.77	49.82	24.15	0.21
1.5	1	-1.37	2.75	89.81	67.75	47.27	55.30	24.15	0.23
2.5	1	-1.25	2.50	88.85	54.44	42.99	59.63	24.15	0.25
3.5	1	-1.13	2.27	87.04	43.07	39.03	62.40	30.57	0.20
4.5	1	-1.03	2.06	84.41	33.80	35.46	63.63	30.57	0.21
5.5	1	-0.94	1.88	81.16	26.45	32.28	63.54	30.57	0.21
6.5	1	-0.86	1.71	77.53	20.75	29.48	62.46	30.57	0.20
7.5	1	-0.79	1.57	73.73	16.37	27.03	60.71	30.57	0.20
8.5	1	-0.72	1.45	69.93	13.01	24.88	58.56	30.57	0.19
9.5	1	-0.67	1.34	66.23	10.44	23.00	56.20	30.57	0.18
10.5	1	-0.62	1.24	62.71	8.45	21.35	53.77	127.99	0.04
11.5	1	-0.58	1.16	59.39	6.90	19.89	51.36	127.99	0.04
12.5	1	-0.54	1.08	56.30	5.69	18.60	49.02	127.99	0.04
13.5	1	-0.51	1.01	53.44	4.74	17.45	46.78	127.99	0.04
14.5	1	-0.48	0.95	50.79	3.97	16.43	44.67	127.99	0.03
15.5	1	-0.45	0.90	48.34	3.36	15.51	42.68	127.99	0.03
16.5	1	-0.43	0.85	46.08	2.86	14.68	40.82	127.99	0.03
17.5	1	-0.40	0.81	43.99	2.46	13.93	39.08	127.99	0.03
18.5	1	-0.39	0.77	42.06	2.12	13.26	37.45	127.99	0.03
19.5	1	-0.37	0.73	40.28	1.84	12.64	35.94	127.99	0.03
20.5	1	-0.35	0.70	38.63	1.61	12.07	34.52	127.99	0.03
21.5	1	-0.34	0.67	37.09	1.41	11.55	33.20	127.99	0.03
22.5	1	-0.32	0.64	35.66	1.25	11.07	31.97	127.99	0.02
23.5	1	-0.31	0.62	34.33	1.11	10.63	30.81	127.99	0.02
24.5	1	-0.30	0.59	33.09	0.98	10.22	29.73	127.99	0.02
25.5									
w_i (cm) =								2.55	

In base a quanto riportato nella tabella sopra, il cedimento immediato in asse al rilevato nuovo è pari a circa **2.55** cm.

2.1.2 CEDIMENTO IMMEDIATO IN ASSE AL BINARIO ESISTENTE

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

$$Q=58.99 \text{ kN/m}^2, B= 23 \text{ m}$$

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)	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	-1.41	2.95	58.93	51.91	33.25	33.39	24.15	0.14
1.5	1	-1.11	2.60	57.79	39.97	29.33	37.00	24.15	0.15
2.5	1	-0.88	2.32	55.16	32.06	26.17	37.69	24.15	0.16
3.5	1	-0.71	2.11	52.01	27.08	23.73	36.77	30.57	0.12
4.5	1	-0.59	1.94	49.07	23.69	21.83	35.41	30.57	0.12
5.5	1	-0.50	1.80	46.53	21.14	20.30	34.10	30.57	0.11
6.5	1	-0.43	1.69	44.38	19.05	19.03	32.95	30.57	0.11
7.5	1	-0.38	1.59	42.55	17.25	17.94	31.99	30.57	0.10
8.5	1	-0.34	1.51	40.97	15.67	16.99	31.17	30.57	0.10
9.5	1	-0.31	1.43	39.58	14.24	16.15	30.46	30.57	0.10
10.5	1	-0.28	1.37	38.33	12.95	15.39	29.83	127.99	0.02
11.5	1	-0.26	1.30	37.19	11.79	14.69	29.24	127.99	0.02
12.5	1	-0.24	1.25	36.13	10.73	14.06	28.69	127.99	0.02
13.5	1	-0.22	1.20	35.14	9.77	13.47	28.16	127.99	0.02
14.5	1	-0.20	1.15	34.20	8.90	12.93	27.65	127.99	0.02
15.5	1	-0.19	1.10	33.30	8.11	12.42	27.14	127.99	0.02
16.5	1	-0.18	1.06	32.44	7.40	11.95	26.64	127.99	0.02
17.5	1	-0.17	1.02	31.62	6.75	11.51	26.14	127.99	0.02
18.5	1	-0.16	0.99	30.82	6.17	11.10	25.64	127.99	0.02
19.5	1	-0.15	0.95	30.06	5.64	10.71	25.15	127.99	0.02
20.5	1	-0.15	0.92	29.32	5.17	10.35	24.67	127.99	0.02
21.5	1	-0.14	0.89	28.61	4.74	10.00	24.18	127.99	0.02
22.5	1	-0.13	0.86	27.92	4.35	9.68	23.71	127.99	0.02
23.5	1	-0.13	0.83	27.25	4.00	9.37	23.24	127.99	0.02
24.5	1	-0.12	0.81	26.61	3.68	9.09	22.78	127.99	0.02
25.5									
wi (cm) =								1.52	

In base a quanto riportato nella tabella sopra, il cedimento immediato in asse al binario esistente è pari a circa **1.52** 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 $H_{max} = 5.3$ m (posta alla progressiva PK 13+700). 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]	$\varphi_{calcolo}$ [°]	$c'_{calcolo}$ [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:

$\gamma =$ 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 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

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

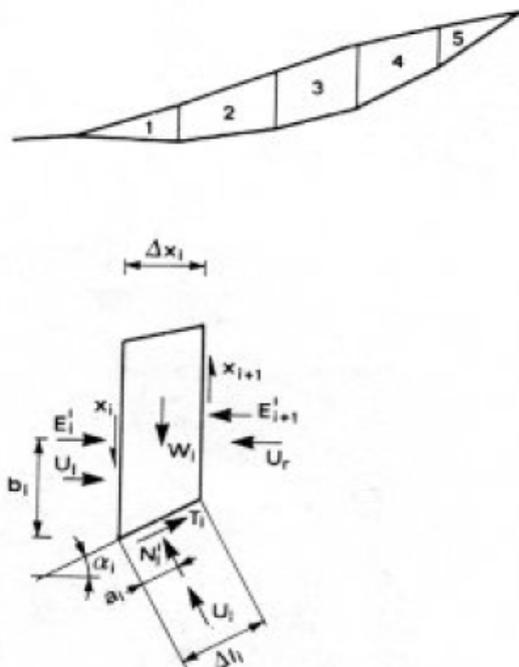


Figura 3-1 – metodo di Bishop

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 (crochette viola) e piani di tangenza (linee rosse).

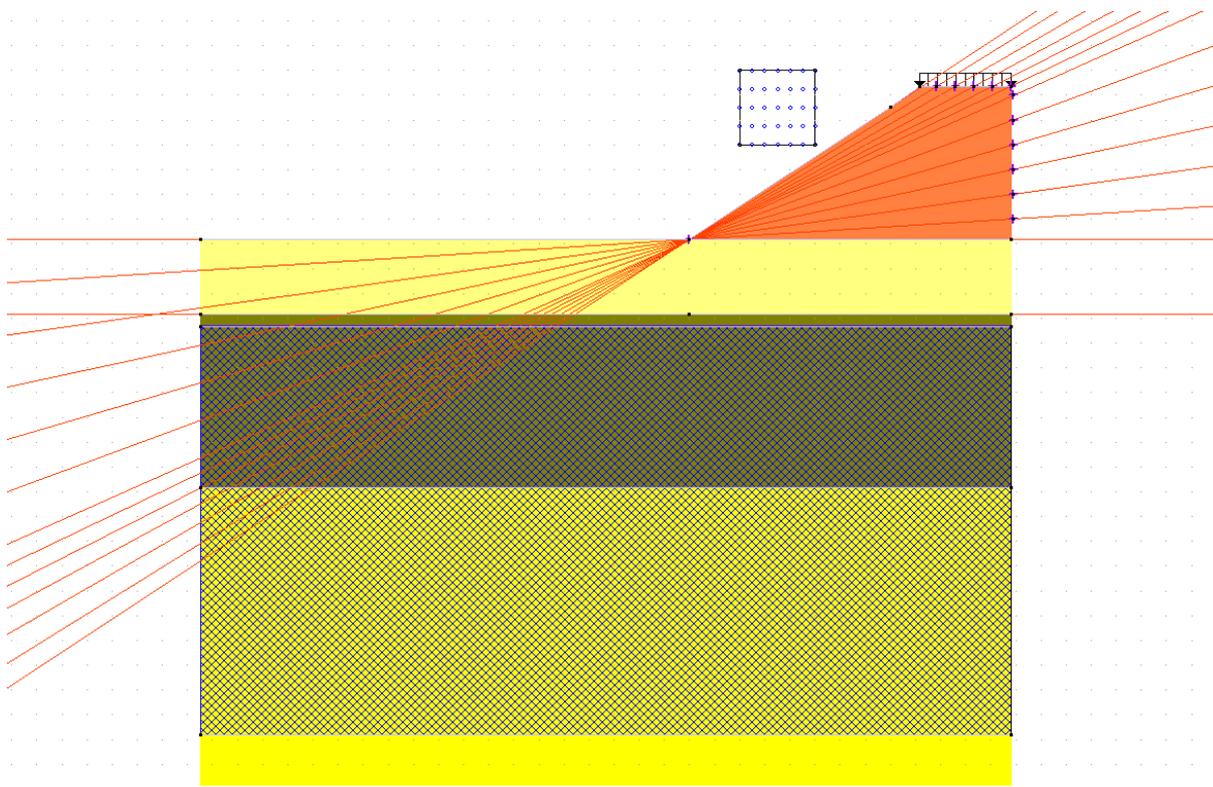


Figura 3-2 – modello di calcolo per la stabilità del rilevato

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 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	1.1
SLV (sisma orizzontale)	1.5
SLV (sisma verticale)	1.6

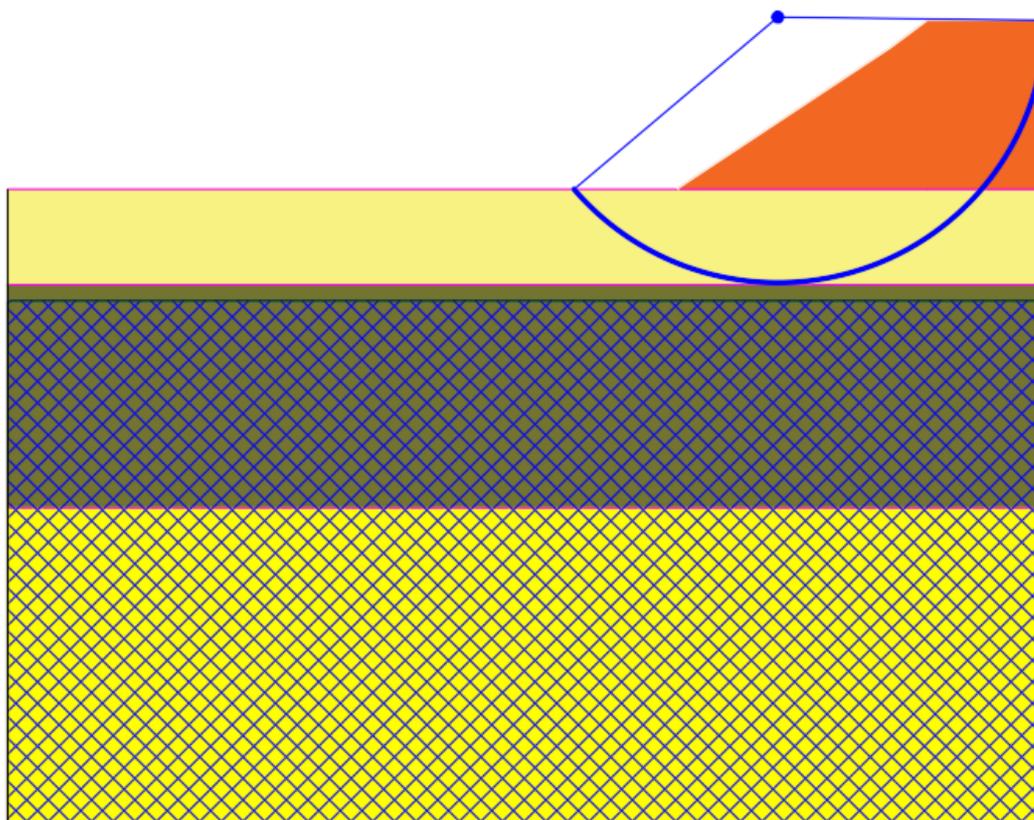


Figura 3-3 – Superficie di scorrimento critica (in blu) per SLU

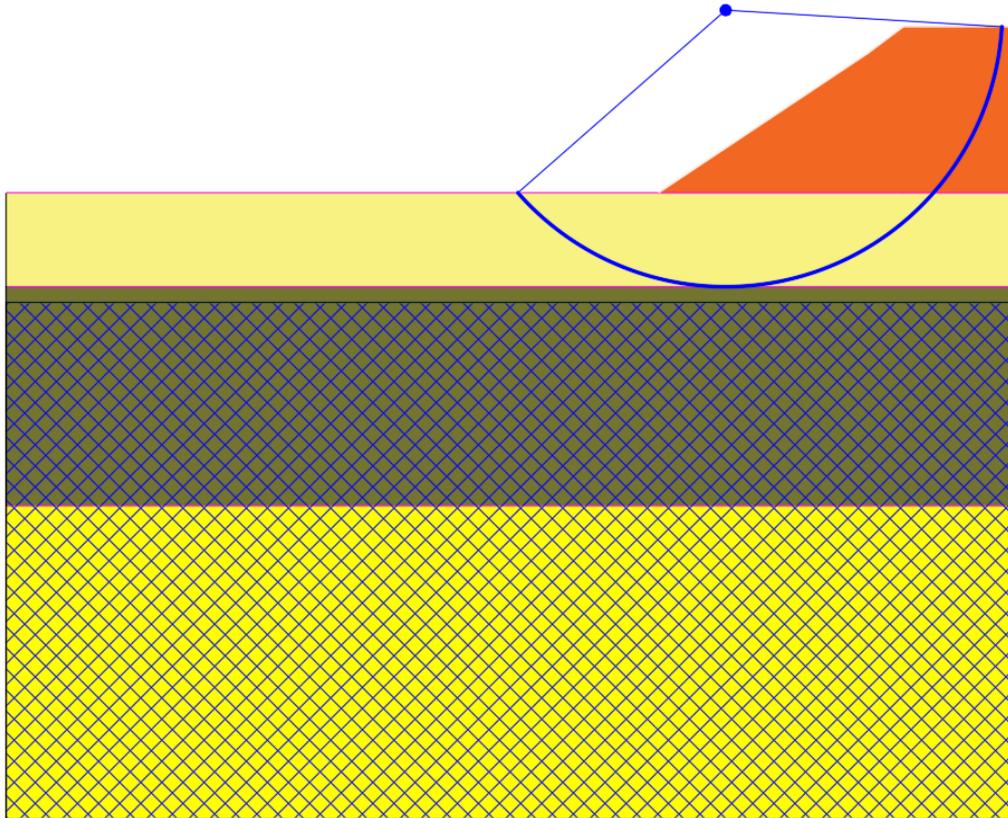


Figura 3-4 – Superficie di scorrimento critica (in blu) per SLV

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 = 4649.34
 Ordinata del centro Y = 2556.94
 Raggio del cerchio R = 833 cm

Caratteristiche della massa interessata dallo scivolamento:

Volume = 614306 cmc/cm
 Peso = 865 daN/cm
 Perimetro di scivolamento = 2014 cm

STABILITA' DEL PENDIO CON BISHOP

Concio	alfa	l	C	fi	Xg	Yg	b	Peso	Pvert.	Press.	Mstab	Mpeso
1	-48.5	32	0	19	4029	2009	620	0	0	0	165	-154
2	-42.8	135	0	19	4097	1977	552	7	0	0	3782	-3893
3	-34	120	0	19	4189	1941	460	15	0	0	6461	-6864
4	-26.1	110	0	19	4286	1913	363	20	0	0	7712	-7487
5	-18.8	101	0	19	4384	1910	265	29	0	0	9715	-7689
6	-12	97	0	19	4479	1929	171	41	0	0	13017	-7163
7	-5.3	96	0	19	4574	1953	76	53	0	0	15765	-4107
8	1.3	95	0	19	4668	1983	19	64	0	0	18165	1160
9	7.8	96	0	19	4763	2019	114	73	0	0	20552	8335
10	14.5	98	0	19	4859	2060	209	82	0	0	22423	17114
11	21.5	102	0	19	4954	2107	304	89	0	0	24466	27164
12	29.5	131	0	19	5058	2170	409	115	0	0	32267	47258
13	38	116	0	19	5160	2224	511	93	92	0	54076	94822
14	45.8	110	0	19	5244	2262	595	72	76	0	46122	88466
15	50.4	24	0.4	25	5291	2287	641	14	15	0	16981	18582
16	57	169	0.4	25	5342	2325	693	69	92	0	103277	112118
17	76.1	381	0.4	25	5421	2424	771	29	90	0	126921	95821
		2014						865	365		521665	473483

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 = 4547,85
 Ordinata del centro Y = 2600
 Raggio del cerchio R = 883 cm

Caratteristiche della massa interessata dallo scivolamento:

Volume = 603030 cmc/cm
 Peso = 833 daN/cm
 Perimetro di scivolamento = 2082 cm

STABILITA' DEL PENDIO CON SISMA ORIZZONTALE (Bishop)

Concio	alfa	l	C	fi	Xg	Yg	b	Peso	Pvert	Press.	Mstab SO	Mpeso SO
1	-46.2	76	0	19	3920	1999	628	1	0	0	826	-892
2	-39.6	129	0	19	3994	1966	554	10	0	0	4595	-5153
3	-31.6	116	0	19	4089	1932	459	17	0	0	6867	-7325
4	-24.3	109	0	19	4187	1906	361	22	0	0	8103	-7448
5	-17.4	104	0	19	4285	1888	262	26	0	0	8771	-6168
6	-10.9	97	0	19	4384	1892	164	32	0	0	10383	-4607
7	-4.6	96	0	19	4478	1917	69	44	0	0	13555	-2134
8	-1	17	0	19	4533	1933	15	9	0	0	2689	59
9	0	13	0	19	4548	1938	0	7	0	0	2148	151
10	2.6	66	0	19	4588	1952	40	38	0	0	11559	2312
11	7.8	96	0	19	4668	1983	120	64	0	0	18979	8910
12	14.1	98	0	19	4763	2024	216	72	0	0	21455	16904
13	20.6	102	0	19	4858	2071	311	80	0	0	23894	26136
14	27.4	107	0	19	4954	2124	406	86	0	0	26391	36244
15	35.4	140	0	19	5058	2194	510	110	0	0	35368	57633
16	44.1	128	0	19	5160	2257	612	87	15	0	35488	63748
17	48.5	6	0	19	5209	2281	661	4	1	0	1678	3073
18	53.5	147	0.4	25	5253	2310	705	70	14	0	78184	60385
19	65.4	220	0.4	25	5339	2386	792	49	15	0	84714	51278
20	79.6	215	0.4	25	5403	2476	855	7	6	0	76051	11576
		2082						833	50		471700	304684

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 = 4547.85
 Ordinata del centro Y = 2600
 Raggio del cerchio R = 883 cm

Caratteristiche della massa interessata dallo scivolamento:

Volume = 603030 cm³/cm
 Peso = 833 daN/cm
 Perimetro di scivolamento = 2082 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	-46.2	76	0	19	3920	1999	1	1	0	0	825	-935	798	-905
2	-39.6	129	0	19	3994	1966	10	9	0	0	4609	-5435	4462	-5262
3	-31.6	116	0	19	4089	1932	17	16	0	0	6914	-7808	6694	-7559
4	-24.3	109	0	19	4187	1906	22	21	0	0	8181	-8067	7920	-7810
5	-17.4	104	0	19	4285	1888	26	25	0	0	8874	-8868	8591	-8649
6	-10.9	97	0	19	4384	1892	33	32	0	0	10523	-5430	10188	-5257
7	-4.6	96	0	19	4478	1917	44	43	0	0	13760	-3150	13321	-3049
8	-1	17	0	19	4533	1933	9	9	0	0	2732	-133	2645	-129
9	0	13	0	19	4548	1938	7	7	0	0	2183	0	2113	0
10	2.6	66	0	19	4588	1952	39	38	0	0	11753	1531	11379	1483
11	7.8	96	0	19	4668	1983	65	63	0	0	19320	7760	18704	7513
12	14.1	98	0	19	4763	2024	73	71	0	0	21871	15808	21173	15304
13	20.6	102	0	19	4858	2071	81	78	0	0	24392	25171	23614	24369
14	27.4	107	0	19	4954	2124	87	85	0	0	26983	35484	26122	34353
15	35.4	140	0	19	5058	2194	112	108	0	0	36232	57098	35076	55277
16	44.1	128	0	19	5160	2257	104	100	15	0	36442	63630	35280	61601
17	48.5	6	0	19	5209	2281	5	5	1	0	1725	3075	1670	2977
18	53.5	147	0.4	25	5253	2310	85	83	14	0	80213	60562	78852	58631
19	65.4	220	0.4	25	5339	2386	64	62	15	0	87359	51662	86106	50015
20	79.6	215	0.4	25	5403	2476	13	13	6	0	76051	11710	76051	11337
		898					898	869	50		480941	295663	470761	286236