



DIREZIONE INFRASTRUTTURE E MOBILITA'  
SERVIZIO PONTI, VIE D'ACQUA ED INFRASTRUTTURE

CITTA' DI TORINO

LAVORI DI RIPRISTINO E CONSOLIDAMENTO  
SPONDA SINISTRA DEL FIUME PO  
TRATTA D'ALVEO PROSPICIENTE  
IL MUSEO DELL'AUTOMOBILE

codice servizio: IF-PVA  
codice lavoro: NU-IDR

PROGETTO ESECUTIVO

codice elaborato: CALC.STRU

RELAZIONE CALCOLO STRUTTURE

DATA:  
ottobre 2017

REVISIONE:

SCALA: varie

UFFICIO DI PROGETTAZIONE

ing. Lorenzo Peretti: progettista

ing. Antonio Mollo: collaboratore

geom. Diego Alume: collaboratore

geom. Giorgio Gilli: coordinatore per la sicurezza in fase di progettazione

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:

Ing. Giorgio Marengo



LAVORI DI RIPRISTINO E CONSOLIDAMENTO  
SPONDA SINISTRA DEL FIUME PO  
TRATTA D'ALVEO PROSPICIENTE IL MUSEO DELL'AUTOMOBILE

RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE

**Verifiche di stabilità.**

*Considerazioni geotecniche preliminari*

Il terreno che costituisce la scarpata si assume di tipo sabbioso e presenta, quindi, una coesione apparente dovuta all'attrazione esercitata dai menischi dell'acqua sui granuli; quando il terreno risulta saturo non vi sono più spazi aeriformi tra porzioni di liquido, quindi non risultano più menischi; conseguentemente viene meno la coesione, che, pertanto, per i terreni incoerenti risulta solo *apparente*; in caso di piena la coesione è quindi da considerare nulla.

Il sondaggio effettuato in sponda sinistra in prossimità della passerella "Maratona di Torino", per lo strato più superficiale presentava nella prova SPT la sequenza 7-9-11, quindi  $N_{SPT}=20$ ; utilizzando le formule di Bazaraa (1967), Skempton (1986), Yoshida & Kokusho (1988), si ottiene un valore di densità relativa variabile tra 50%÷60%.

Si applica quindi la formula di Schmertmann (1977)

1) sabbia fine uniforme	$\varphi^{\circ} = 28,0^{\circ} + 14,0 \text{ Dr}$
2) sabbia media uniforme o sabbia fine ben assortita	$\varphi^{\circ} = 31,5^{\circ} + 11,5 \text{ Dr}$
3) sabbia grossa uniforme o sabbia media ben assortita	$\varphi^{\circ} = 34,5^{\circ} + 10,0 \text{ Dr}$
4) ghiaia media e fine o sabbia e ghiaia poco limosa	$\varphi^{\circ} = 38,0^{\circ} + 8,0 \text{ Dr}$

la descrizione litologica del sondaggio riporta "riporto sabbioso ghiaioso", tuttavia, per qualsiasi tipologia prevista nell'abaco di Schmertmann si ottiene un valore di  $\varphi^{\circ} > 35^{\circ}$ .

In ogni caso, il profilo della sezione conseguente alla frana, che presenta tratti molto ripidi, deve essere modificato per ottenere una pendenza compatibile con la sicurezza delle maestranze durante i lavori; la superficie di potenziale distacco interessa quindi in modo significativo un materiale non attualmente presente, del quale si può solo ipotizzare il comportamento geotecnico; utilizzando il materiale con presenza di sabbia e ghiaia si può assumere, anche per ridotta Dr,  $\varphi^{\circ} = 35^{\circ}$ .

Su tutta la scarpata si assume quindi:  $\varphi = 35^{\circ}$ ,  $c = 0$ ,  $\gamma = 1,8 \text{ t/m}^3$  (valori caratteristici).

La falda viene ricaricata in fase di piena e, in fase di esaurimento della piena, risulta a livello maggiore rispetto al livello del pelo libero. Per quanto esista una componente verticale della velocità del moto di filtrazione, per i calcoli di stabilità si calcola, con approssimazione in eccesso, la pressione come data dalla colonna d'acqua sovrastante il punto considerato.

### Stabilità della scarpata

In condizione di moto di filtrazione parallelo al pendio, il fattore di sicurezza nei confronti dello scivolamento del terreno è

$$F_s = \frac{\gamma' \operatorname{tg} \varphi}{\gamma \operatorname{tg} \alpha}$$

dove  $\varphi$  è l'angolo di resistenza al taglio del terreno,  $\alpha$  la pendenza del pendio,  $\gamma' = \gamma - \gamma_w$ .

Secondo la configurazione adottata ( $\alpha = 15^\circ$ ) si ottiene  $F_s = 1,16$ ; tale valore si considera accettabile in considerazione che:

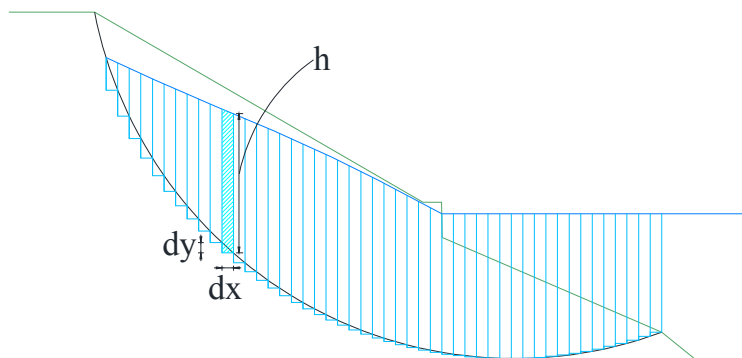
- a) la filtrazione parallela al pendio, estesa per tutto il pendio, costituisce una posizione estrema, quindi eccezionale;
- b) la radicazione costituisce, dopo breve tempo, un'efficace stabilizzazione del terreno.

### Stabilità globale del blocco di frana potenziale

Scelta una superficie di potenziale scorrimento si determinano:

- 1) la massa del terreno in potenziale rotazione e il suo baricentro;
  - 2) la risultante della pressione dell'acqua del fiume
  - 3) la risultante della pressione idrostatica della falda sulla superficie di potenziale scorrimento;
- la componente verticale delle pressioni è

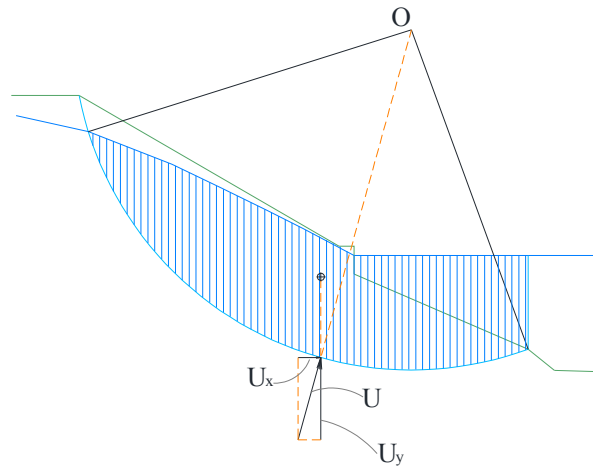
$$U_y = \int (\gamma_w h) dx = \gamma_w \int h dx = \gamma_w A$$



cioè è data dall'area compresa tra la falda e la superficie di scorrimento moltiplicata per il peso specifico dell'acqua.

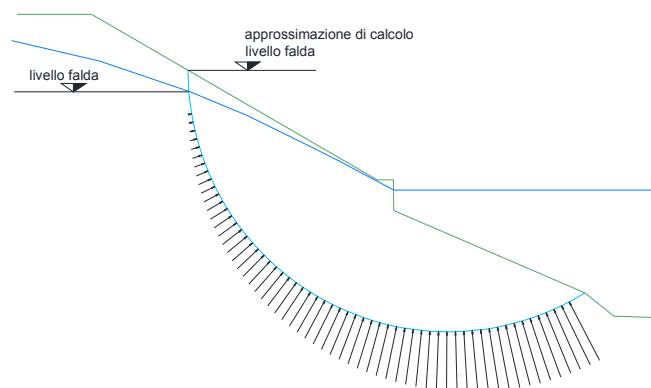
Si determina agevolmente anche il baricentro di tale massa, che individua la giacitura della componente verticale della spinta della falda; si determina, conseguentemente, il punto di applicazione della spinta della falda sulla superficie di potenziale distacco.

Essendo, inoltre, la pressione perpendicolare alla superficie in ogni punto, le componenti di pressione sono tutte rivolte verso il centro ed hanno momento nullo rispetto a tale punto; conseguentemente, la risultante della pressione idrostatica passa per il centro.



Per i calcoli di stabilità, quale involucro dei potenziali profili della falda, si assume che il livello della falda stessa segua, al di sopra del livello del fiume, il profilo del terreno.

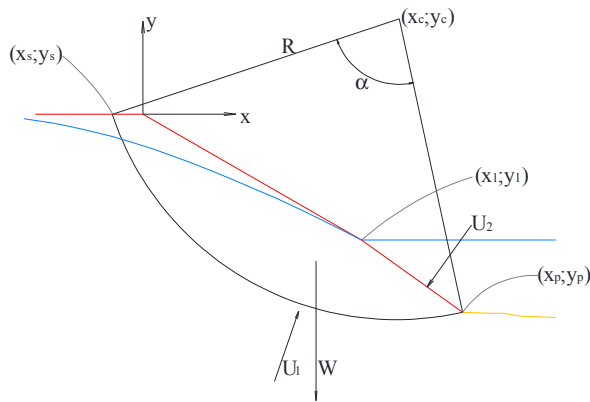
Tale posizione risulta molto cautelativa e non risponde alle condizioni che hanno causato l'instabilità della scarpata. Infatti, tale assunzione porta ad una superficie di potenziale scorrimento piuttosto profonda, mentre, per quanto osservabile dalla documentazione fotografica, ove erano presenti degli alberi gli apparati radicali hanno dato un contributo rilevante al contenimento degli spostamenti, osservazione che induce a pensare ad una superficie di scorrimento effettiva più superficiale. Tuttavia, non risulta possibile determinare il profilo della falda nel transitorio, per cui si deve assumere, come già indicato, un profilo di involucro teoricamente non superabile.



Si determina quindi  $\Pi$ , risultante di tutte le forze note (nota quindi in modulo e direzione).

Secondo il metodo di Taylor, a tal punto, verrebbe definita la posizione della risultante delle tensioni di coesione e, conseguentemente, il punto per cui deve passare la risultante tra tutte le forze note e tale forza di coesione; per quanto sopra indicato, si assume, per il caso specifico,  $c = 0$ .

Nota, invece, la direzione del tiro dei tiranti, si determina, analogamente, il punto per cui deve passare la risultante tra tutte le forze note e il tiro stesso; per tale punto deve passare anche la risultante delle forze di attrito (ultima forza del censimento delle forze).

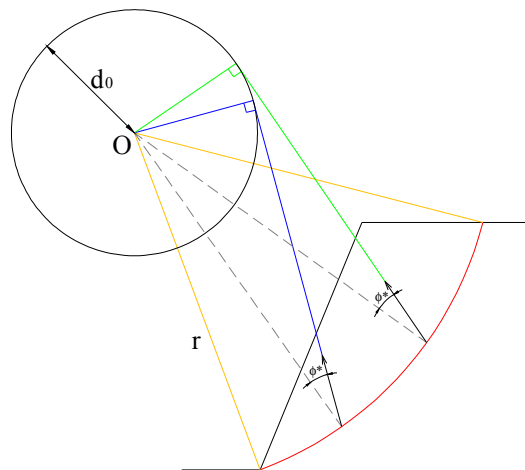


In merito alla risultante delle forze di attrito si osserva quanto segue.

Indicato con  $\phi^*$  l'angolo di attrito corretto, tramite l'applicazione del coefficiente di sicurezza, essendo  $\vec{u}_R$  e  $\vec{u}_\varphi$  rispettivamente il versore radiale e il versore tangenziale, lungo la superficie di scorrimento tutte le forze:

$$d\vec{F} = (\sigma \vec{u}_R + \tau \vec{u}_\varphi) ds$$

sono inclinate dello stesso angolo  $\phi^*$  rispetto al raggio, essendo  $\tau/\sigma = \text{tg}\phi^* = \text{cost}$



Le rette d'azione di  $d\vec{F}$  sono quindi tutte tangenti alla circonferenza con centro O e raggio

$$d_0 = r \sin \phi^*$$

$$\vec{M} = \int \vec{r} \wedge d\vec{F}$$

$$M = \Sigma(r \sin \phi^* \|\Delta\vec{F}\|) = r \sin \phi^* \Sigma \|\Delta\vec{F}\|$$

Il momento può, altresì, essere calcolato tramite la risultante

$$\vec{F} = \Sigma \Delta\vec{F}$$

da cui

$$M = d_0 \|\Sigma \Delta \vec{F}\|$$

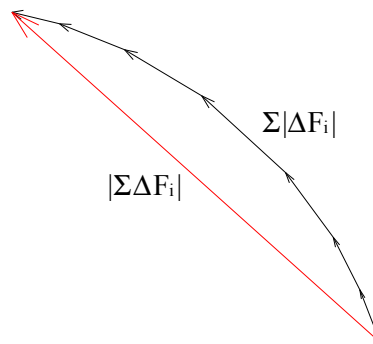
per confronto

$$r \sin \phi^* \Sigma \|\Delta \vec{F}\| = d_0 \|\Sigma \Delta \vec{F}\| \quad d_0 = r \sin \phi^* \frac{\Sigma \|\Delta \vec{F}\|}{\|\Sigma \Delta \vec{F}\|}$$

ovvero la risultante delle forze mobilitate sulla superficie di scorrimento  $\|\vec{F}\|$  (tale che  $M = d \|\vec{F}\|$ ) è tangente ad una circonferenza con centro in O e raggio

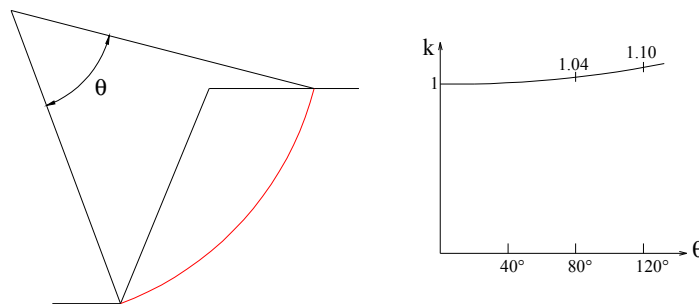
$$d_0 = k r \sin \phi^*$$

dove il coefficiente  $k$  dipende dalla distribuzione delle tensioni sulla superficie di rottura ed è il rapporto tra la lunghezza del poligono delle forze  $\Delta \|\vec{F}\|$  e la loro risultante



Per una distribuzione delle tensioni normali di tipo sinusoidale (0-max-0) o, in alternativa, costante, Taylor esprime  $k$  in funzione di un unico parametro, l'angolo al centro della superficie di rottura

(NB: quindi assunzione del parametro  $k$  invariante per superfici con uguale angolo al centro).

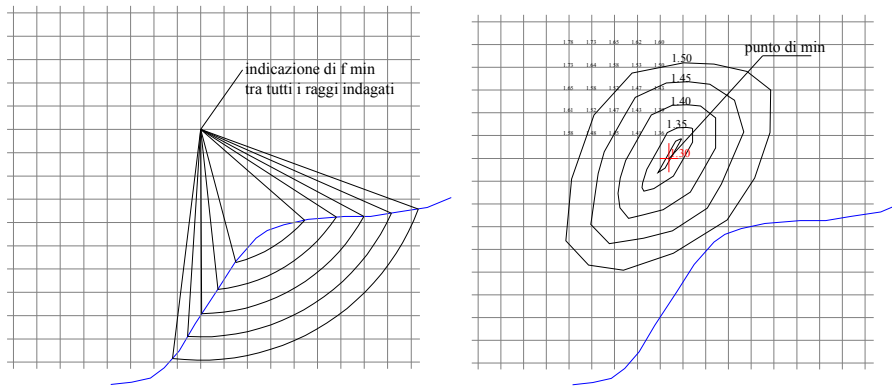


Per distribuzione delle tensioni di tipo sinusoidale  $k$  può essere approssimato con una curva del tipo

$$k = 1 + 0,02\theta + 0,015\theta^2 \quad [\theta] = rad$$

per trovare la curva maggiormente critica si dovrebbe adottare secondo la seguente procedura:

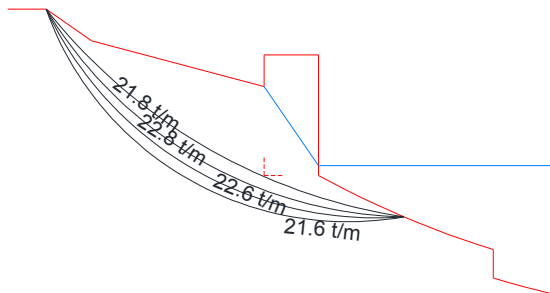
- si definisce una griglia che dà un numero finito di punti di indagine;
- per ogni punto di indagine si pone il centro di un arco di prova; al variare del raggio si calcola il minimo fattore di sicurezza relativo a tale punto;
- tramite interpolazione, si disegnano le curve di ugual coefficiente di sicurezza, determinando così il punto di minimo.



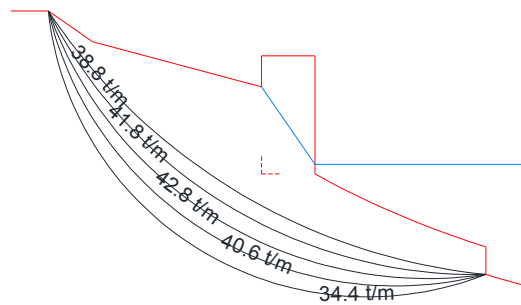
Nei calcoli che seguono si è considerato una erosione generalizzata di 1 m di tutto il fondale, tranne che per il tratto protetto, prossimo alla sponda.

Procedendo però manualmente si sono esaminate le seguenti famiglie di curve:

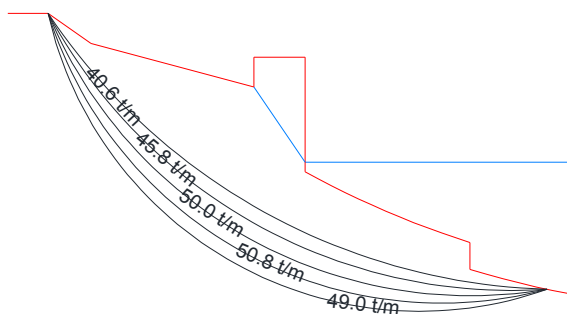
*Curve tipo 1*



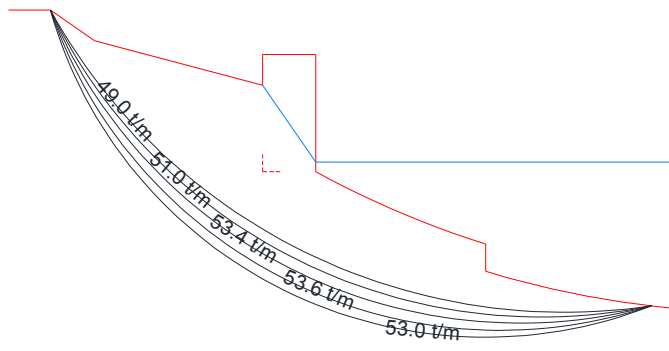
*Curve tipo 2*



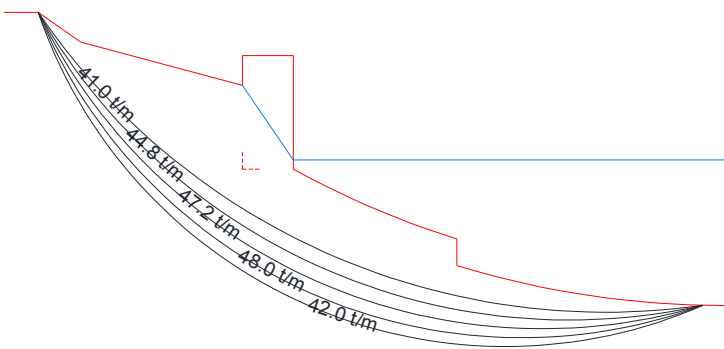
*Curve tipo 3*



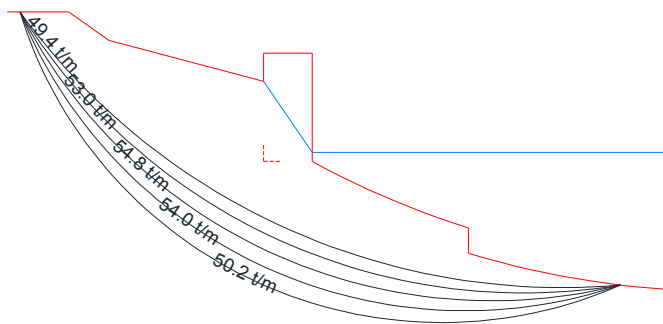
Curve tipo 4



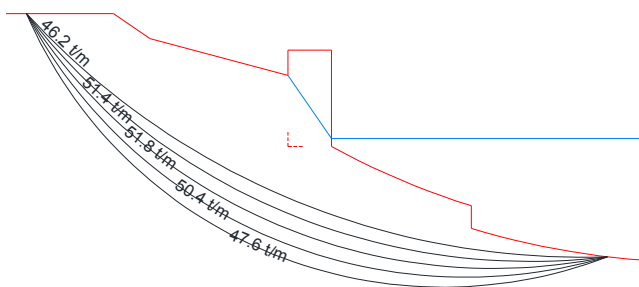
Curve tipo 5



Curve tipo 6

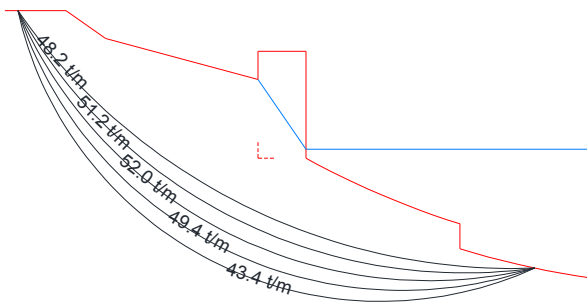


Curve tipo 7

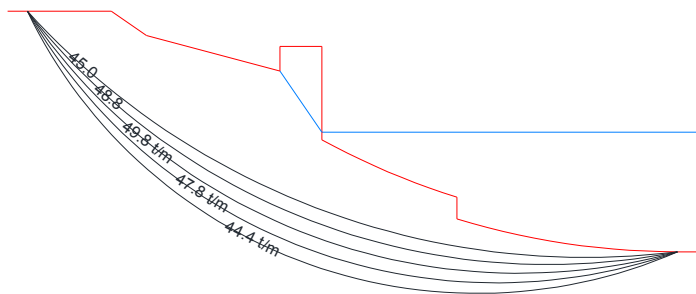




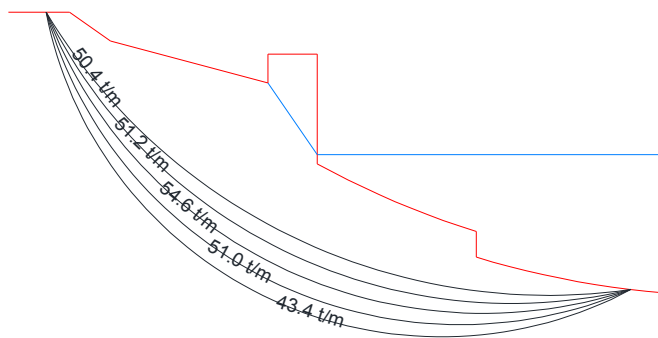
Curve tipo 8



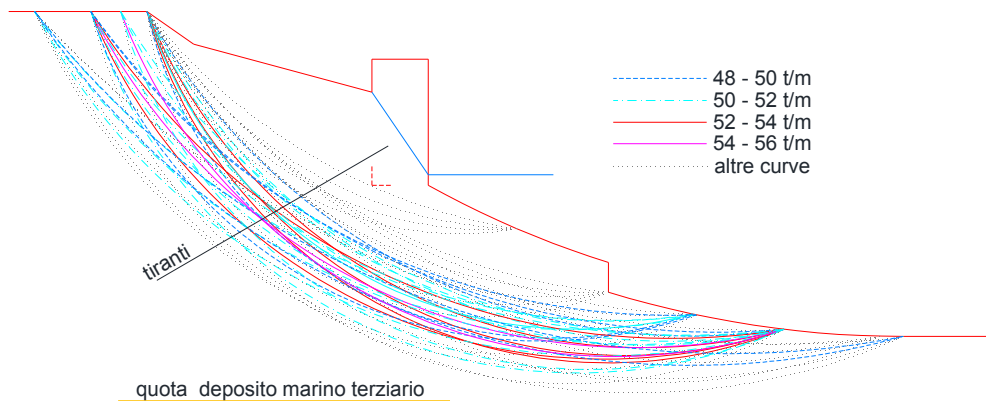
Curve tipo 9



Curve tipo 10



Sintesi delle curve esaminate



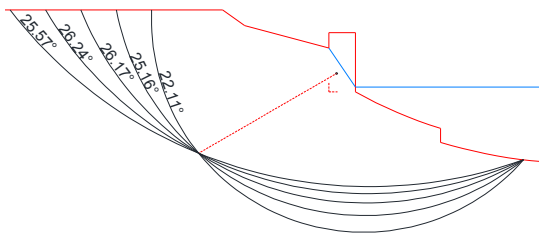
### *Determinazione della zona di ancoraggio del bulbo dei tiranti*

A seguito di alcuni tentativi preliminari, si valuta la stabilità della superficie di potenziale scorrimento che interseca la retta d'azione dei tiranti a 18 m dalla testa dei tiranti stessi; tale superficie deve risultare autonomamente stabile.

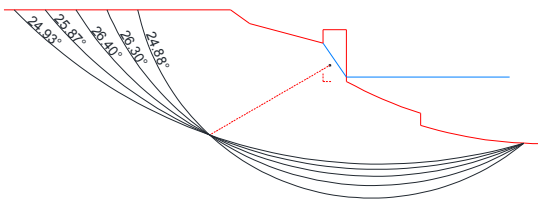
Si procede in modo analogo a come descritto precedentemente per determinare la risultante di tutte le forze note; si misura la distanza del centro della superficie di potenziale scorrimento e la retta d'azione delle forze note, quindi si determina  $\varphi^*$  nota tale distanza, il raggio e  $k$ .

Si sono esaminate le seguenti curve di potenziale scorrimento:

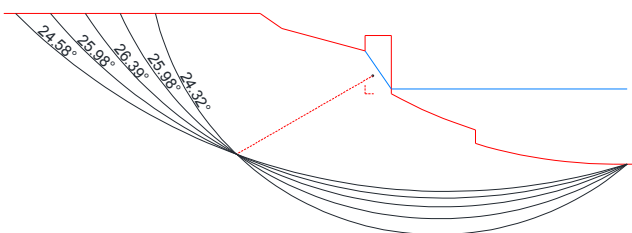
#### *Curve tipo 1*



#### *Curve tipo 2*



#### *Curve tipo 3*

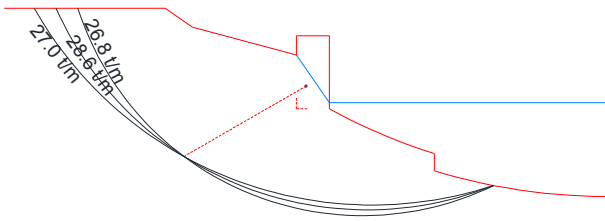


L'angolo di resistenza al taglio massimo mobilitato per la superficie più critica è  $\varphi^*=26,4^\circ$ , a cui corrisponde un coefficiente di sicurezza  $f = \text{tg} \varphi / \text{tg} \varphi^* = 1,41$ .

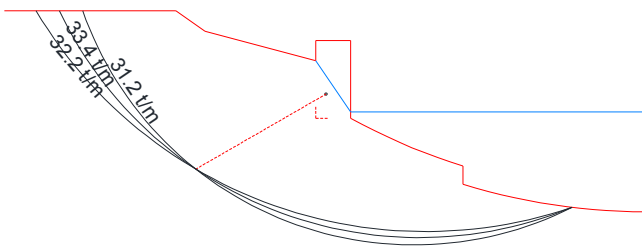
Accertato, quindi, che per la superficie più critica, posta a 8,3 m dalla testa tirante, lo sforzo nel tirante è 55 t/m e a 18m è nullo, si determina altresì il tiro per una distanza intermedia.

Si sono esaminate le seguenti curve di potenziale scorrimento:

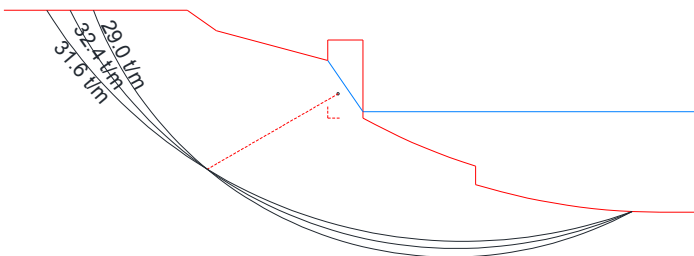
*Curve tipo 1*



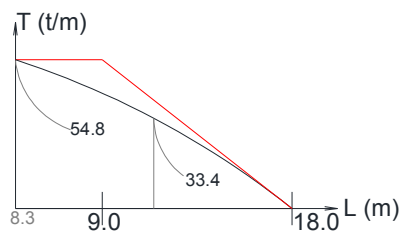
*Curve tipo 2*



*Curve tipo 3*



L'andamento della reazione del tirante in funzione dell'approfondimento della superficie di potenziale scorrimento è rappresentato nella figura sottostante, nella quale viene anche rappresentata un involucro di progetto.



Ovvero, si considera il bulbo efficace alla progressiva (misurata dalla testa tirante) di 9,0m e il bulbo si deve estendere fino ad almeno la progressiva 18,0 m.

*Dimensionamento geotecnico del tirante*

La portata laterale è

$$Q_{lim} = \pi d_s L_s s$$

dove  $d_s$  è il diametro iniettato,  $L_s$  la lunghezza iniettata e  $s$  la resistenza laterale, funzione della pressione limite di iniezione determinata con il pressimetro di Menard, (ovvero la pressione radiale che determina la plasticizzazione del terreno circostante il foro).

Il diametro di iniezione risulta corretto rispetto al diametro di perforazione come:

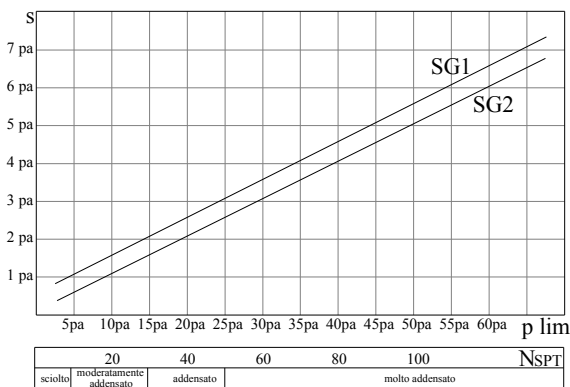
$$d_s = \alpha d$$

dove, per il caso in esame, si assume  $\alpha = 1,1$

La letteratura tecnica indica le curve di resistenza laterale, per le seguenti tipologie di terreno:

denominazione curva	IRS	IGU
da ghiaia grossa a sabbia limosa	SG1	SG2
limo e argilla	AL1	AL2
marna, calcare marnoso, calcare tenero fratturato	MC1	MC2
roccia alterata e/o fratturata	R1	R2

In considerazione della presenza della falda si considera di operare con “iniezione ripetitiva e selettiva” (IRS); pertanto risulta di interesse la curva SG1 sotto riportata



Il bulbo (minimo) si sviluppa al di sotto della quota 209, quindi verosimilmente nella “ghiaia con sabbia poco consistente marrone” con  $N_{SPT} = 39$ ; si assume, pertanto,  $s=2,5$  p.a (p.a.=pressione atmosferica di riferimento).

Determinata la massima resistenza a rottura si determina la resistenza di calcolo secondo le disposizioni delle N.T.C; la resistenza caratteristica del tirante, calcolata da parametri geotecnici risulta:

$$R_{ak} = \min \{R_{Cmedio}/\xi_{a3}; R_{Cmin}/\xi_{a4}\}$$

N° verticali	1	2	3	4	≥5
$\xi_{a3}$	1,80	1,75	1,70	1,65	1,60
$\xi_{a4}$	1,80	1,70	1,65	1,60	1,55

Si determina quindi la resistenza di calcolo come

$$R_{ad} = R_{ak} / \gamma_R$$

$$\gamma_R = 1,2 \quad \text{per tiranti definitivi}$$

*Verifica scorrimento bulbo - terreno*

Si utilizza 1 tirante / 1,5m, con diametro di perforazione 16cm e lunghezza efficace di 13m; la resistenza a rottura risulta

$$T_r = 3,1416 * (16\text{cm} * 1,1) * 1300\text{cm} * 2,5(\text{kg}/\text{cm}^2) = 179,7 \text{ t}$$

la resistenza di calcolo risulta

$$T_{sd} = T_r / 1,8 / 1,2 = 165,8 \text{ t} / 1,8 / 1,2 = 83,2 \text{ t} \quad T_{rd} = 55 \text{ t}/\text{m} * 1,5\text{m} = 82,5 \text{ t}$$

*Verifica resistenza armatura*

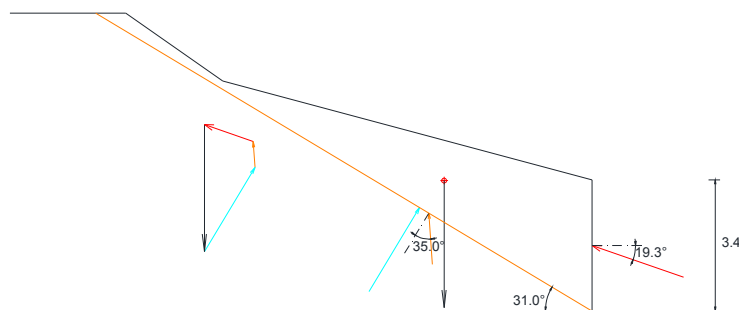
Si adotta una barra tipo Dywidag D36mm ( $A=1018 \text{ mm}^2$ ;  $f_y = 950\text{MPa}$ ); risulta

$$f_{yd} = 950\text{MPa} / 1,15 = 826 \text{ MPa}$$

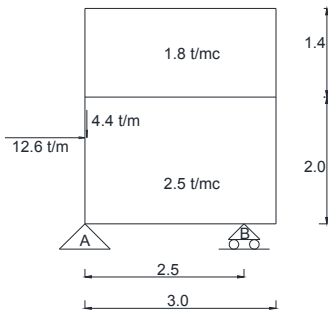
$$T_{rd} = 84,1 \text{ t}$$

*Verifica micropali*

La spinta sulla scogliera si ricava ricercando il massimo della spinta al variare dell'inclinazione del piano di potenziale scivolamento; la spinta dell'acqua è calcolata secondo uno schema delle pressioni lineare variabile tra il punto di sommità della superficie stessa, con pressione nulla, e la base con pressione  $p=1\text{t}/\text{m}^3 * 3,4\text{m}$ ; si considera  $\text{tg} \delta = 0,5 \text{tg} \varphi$ ; il massimo si ottiene per una inclinazione di  $31^\circ$  rispetto all'orizzontale, con  $S = 13,3 \text{ t}/\text{m}$



Si considera la spinta applicata al 40% dell'altezza



Secondo lo schema rappresentato in figura sottostante, si calcola  $V_B = 20,4 \text{ t/m}$ ;  $V_A = 6,6 \text{ t/m}$

$V_A$  è l'effetto combinato della reazione data dal palo (verso l'alto) e la componente verticale del tirante (verso il basso); lo sforzo normale nel palo è quindi

$$V_A = 6,6 \text{ t/m} + 12,6 \text{ t/m} \sin 19,3^\circ = 10,8 \text{ t/m}.$$

Per quanto la condizione di carico corrisponda ad un evento eccezionale, al fine di ridurre le condizioni di carico, si applica ugualmente il coefficiente moltiplicativo dei carichi  $\gamma = 1,3$ .

La resistenza geotecnica dei micropali si calcola in modo analogo a quella dei tiranti; fila anteriore: si adotta 1 palo D20 cm /2,0m;

$$N_{sd} = (20,4 \text{ t/m} * 2,0\text{m}) * 1,3 = 53 \text{ t}$$

Si considera lo strato più superficiale notevolmente disturbato, quindi non efficace; la resistenza a rottura, per una lunghezza efficace di 7m risulta

$$N_r = 3,1416 * (20\text{cm} * 1,1) * 700\text{cm} * 2,5(\text{kg}/\text{cm}^2) = 121 \text{ t}$$

la resistenza di calcolo risulta

$$T_{sd} = T_r / 1,8 / 1,2 = 121 \text{ t} / 1,8 / 1,2 = 56 \text{ t}.$$

### **Valutazioni sull'azione sismica**

L'area oggetto di intervento (si è assunto come centroide il monumento all'autiere) ha coordinate (45.031272; 7.674996); si è assunta una classe di vita nominale 2 ( $\geq 50$  anni) ed una classe d'uso II.

Risultano, pertanto, i seguenti parametri sismici, per  $T=475$ anni:

$$a_g/g = 0,0572 \quad F_0 = 2,76 \quad T_c = 0,27$$

La superficie di potenziale scorrimento più gravosa, come calcolata per le condizioni statiche con falda alta, interessa i seguenti strati:

- riporto sabbioso o ghiaioso
- sabbia medio grossolana poco consistente ( $N_{SPT} = 20$ )
- ghiaia con sabbia poco consistente ( $N_{SPT} = 39$ )

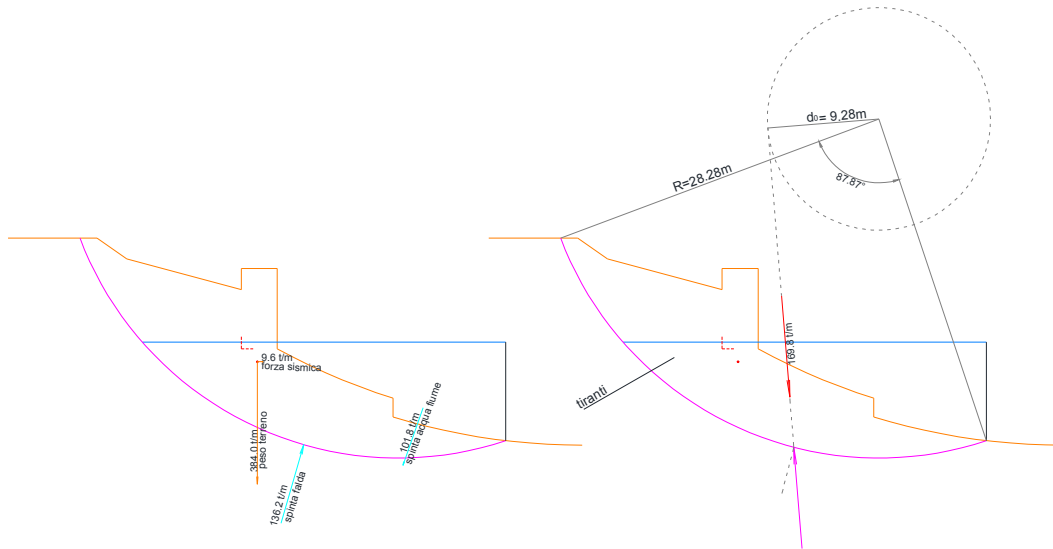
Il suolo è classificato, pertanto, di tipologia C ( $15 < N_{SPT} < 50$ ); per tale tipo di terreno il coefficiente di amplificazione stratigrafica è  $S_s = 1,5$ ; in considerazione della topografia, il terreno è classificabile come di categoria T2, per cui il coefficiente di amplificazione topografico è  $S_T = 1,2$ .

Risulta:  $a_{\max} = S_s S_T a_g = 1,5 * 1,2 * 0,0572 = 0,103g$

risulta conseguentemente  $\beta_m = 0,24$

$kh = \beta_m a_{\max} / g = 0,025g$

Al fine di verificare la consistenza del problema sismico, si esegue la verifica sulla sola superficie che risulta critica per le condizioni statiche.



Si ricava che la massa in potenziale rotazione è stabile anche senza effetto dei tiranti con coefficiente di sicurezza  $f = 2,16$ .

Per quanto sarebbe necessario esplorare tutte le superfici di potenziale scorrimento secondo la procedura già illustrata, è evidente che l'azione sismica non è vincolante nei confronti della progettazione.

