

Analisi di stabilità del pendio in terra

La procedura di analisi di stabilità di un pendio in terra attraverso la valutazione dell'equilibrio limite, consiste nella stima di un coefficiente di sicurezza alla traslazione e/o alla rotazione del volume di terra compreso fra la superficie del versante ed una superficie di taglio potenziale imposta.

La procedura di calcolo prende in considerazione tutte le forze e/o i momenti agenti lungo il piano di taglio, fornendo una valutazione della stabilità globale attraverso le equazioni d'equilibrio fornite dalla statica.

Il coefficiente di sicurezza globale del pendio viene calcolato attraverso il rapporto fra la resistenza di taglio massima disponibile lungo la superficie di rottura e gli sforzi tangenziali mobilitati lungo tale piano:

$$F_{sic} = T_{max} / T_{mob};$$

con

F_{sic} = coefficiente di sicurezza;

T_{max} = resistenza di taglio massima;

T_{mob} = sforzo tangenziale mobilitato.

All'equilibrio ($T_{max} = T_{mob}$) F_{sic} deve essere ovviamente uguale a 1.

Il pendio potrebbe essere considerato in teoria stabile, quando F_{sic} risulta maggiore di 1 ($T_{max} > T_{mob}$), instabile in caso contrario ($T_{max} < T_{mob}$). In realtà, per tener conto dell'incertezza introdotta dalle ipotesi semplificatrici nella procedura di calcolo e soprattutto dell'approssimazione con cui sono noti i parametri geotecnici del terreno, per Legge (D.M.21.1.81 e successivi) e per consuetudine pratica la stabilità può dirsi raggiunta solo nel caso in cui F_{sic} sia maggiore di **1.3**.

Vanno quindi distinti tre casi:

- a) Coefficiente di sicurezza inferiore a 1: il pendio si trova in condizioni di instabilità globale.
- b) Coefficiente di sicurezza compreso fra 1 e 1.3: il pendio si trova in condizioni prossime all'equilibrio limite; anche un piccolo incremento degli sforzi tangenziali sulla superficie potenziale di rottura può innescare il fenomeno franoso.
- c) Coefficiente di sicurezza superiore a 1.3: il pendio si trova in condizioni di stabilità globale.

Impostazione della procedura di calcolo.

Nell'applicare le equazioni della statica al problema dell'analisi di stabilità di un pendio in roccia occorre ipotizzare che siano verificate le seguenti condizioni:

- a) la verifica va eseguita prendendo in esame una striscia di versante di larghezza unitaria (solitamente di 1 metro), trascurando l'interazione laterale fra tale striscia ed il terreno contiguo;
- b) la resistenza al taglio lungo la superficie potenziale di rottura deve essere esprimibile attraverso la legge di Coulomb:

$$T_{max} = c + \gamma h \tan \phi;$$

con

T_{max} = resistenza di taglio massima del terreno;

c = coesione del terreno;

γ = peso di volume del terreno;

h = profondità della superficie di rottura;

ϕ = angolo di resistenza al taglio del terreno.

c) la precisione con cui vengono stimati in sito o in laboratorio i parametri geotecnici coesione e angolo di resistenza al taglio deve essere la stessa: in caso contrario la resistenza al taglio mobilitata dovrebbe essere espressa nel seguente modo:

$$T_{mob} = (c/F_{sic}) + (\gamma h \tan \phi / F_{sic});$$

con

F_{sic} = coefficiente di sicurezza legato a c ;

F_{sic} = coefficiente di sicurezza legato a ϕ ;

introducendo nel calcolo due coefficienti di sicurezza invece di uno, con ovvie complicazioni nella risoluzione analitica del problema;

d) deve aversi una distribuzione omogenea degli sforzi tangenziali mobilitati (T_{mob}) lungo la superficie potenziale di rottura. Questo significa che in ogni punto del piano ipotetico di scivolamento i parametri dell'equazione di Coulomb c , ϕ , γ ed h devono avere lo stesso valore.

Per limitare l'errore introdotto nel calcolo da quest'ultima ipotesi, la superficie di scivolamento viene, nella maggior parte delle procedure di calcolo note in letteratura, suddivisa in più settori (conci), all'interno dei quali si considera realizzata la condizione di omogeneità di T_{mob} . Nella pratica i limiti dei conci vengono fatti cadere dove vi sia una variazione significativa di γ , c e ϕ del terreno o in corrispondenza di variazioni significative nel profilo topografico del versante.

Questo modo d'impostare il problema conduce però all'introduzione nella risoluzione analitica di nuove incognite che esprimono il modo in cui interagiscono fra loro, lungo le superfici divisorie, i vari conci.

In definitiva nel calcolo del valore di F_{sic} intervengono le seguenti incognite (n =numero dei conci preso in considerazione):

- a) le forze normali (N) agenti sulla base del concio (n incognite);
- b) le forze tangenziali (T) agenti sulla base dei conci (n incognite);
- c) i punti, sulla base del concio, di applicazione delle forze normali e tangenziali (n incognite);
- d) le forze orizzontali agenti lungo le superfici di separazione dei conci ($n-1$ incognite);
- e) le forze verticali agenti lungo le superfici di separazione dei conci ($n-1$ incognite);
- f) i punti di applicazione, sulle superfici di separazione dei conci, delle forze d) ed e) ($n-1$ incognite);
- g) il coefficiente di sicurezza F_{sic} (1 incognita).

In totale il problema comporta l'introduzione di $6n-2$ incognite.

Per la sua risoluzione sono disponibili:

- a) $3n$ equazioni d'equilibrio;
- b) n equazioni del tipo:

$$T = (c l + N \tan \phi) / F_{sic};$$

con

l = lunghezza del concio;

che collegano fra loro, per ogni concio, le incognite N , T ed F_{sic} .

- c) n equazioni ottenute ponendo che il punto di applicazione di N e T cada a metà della base del concio.

In totale quindi sono disponibili $5n$ equazioni per la soluzione analitica del problema.

Perché si possa arrivare alla determinazione di F_{sic} occorrerebbero ovviamente tante equazioni quante sono le incognite.

In realtà perché il problema sia staticamente determinato, e quindi risolvibile, mancano ancora $n-2$ equazioni (la differenza fra il numero delle incognite, $6n-2$, ed il numero delle equazioni disponibili, $5n$).

Le equazioni mancanti possono essere ottenute introducendo nell'analisi ulteriori ipotesi semplificatrici. Tali ipotesi riguardano generalmente la distribuzione delle forze lungo le superfici di separazione dei conci.

Metodi utilizzati nell'analisi

Per l'analisi sono stati utilizzati i metodi di *Fellenius*, *Bishop (semplificato)* e *Janbu (semplificato)*. La superficie con il fattore di sicurezza minimo è stata ottenuta in tutti i casi esaminati con il metodo di Janbu semplificato, che è risultato essere il più cautelativo.

Nel metodo di Janbu semplificato si pone la condizione che le forze verticali agenti sulle superfici di separazione dei conci siano trascurabili. Di conseguenza i singoli conci interagiscono fra di loro solo attraverso forze orientate lungo l'orizzontale.

Questo metodo, a differenza di quello di Bishop, consente di verificare superfici potenziali di scivolamento di forma qualsiasi ed è un metodo basato sull'equilibrio delle forze agenti.

La resistenza al taglio massima disponibile lungo la superficie potenziale di rottura è data, per ogni concio, da:

$$T_i \max = X_i / (1 + Y_i / F_s);$$

$$\text{con } X_i = [c + (g \times h - g_w \times h_w) \times \tan \varphi] \times [1 + (\tan \varphi^2)] \times dx$$

con g_w = peso di volume dell'acqua;

h_w = altezza dell'acqua sulla base del concio;

dx = lunghezza del concio lungo l'orizzontale;

α = inclinazione del concio sull'orizzontale.

$$Y_i = \tan \alpha \times \tan \varphi$$

La resistenza al taglio mobilitabile lungo il piano di taglio è per ogni concio data da:

$$T_i \text{ mob} = Z_i$$

$$\text{con } Z_i = g \times h \times dx \times \tan \alpha$$

Il coefficiente di sicurezza del pendio viene espresso come segue:

$$F_s = \sum (i=1-n) T_i \max / \sum (i=1-n) T_i \text{ mob}$$

La procedura da adottare, è di tipo iterativo fino all'ottenimento della convergenza su un valore praticamente costante di F_s .

i passi da seguire sono:

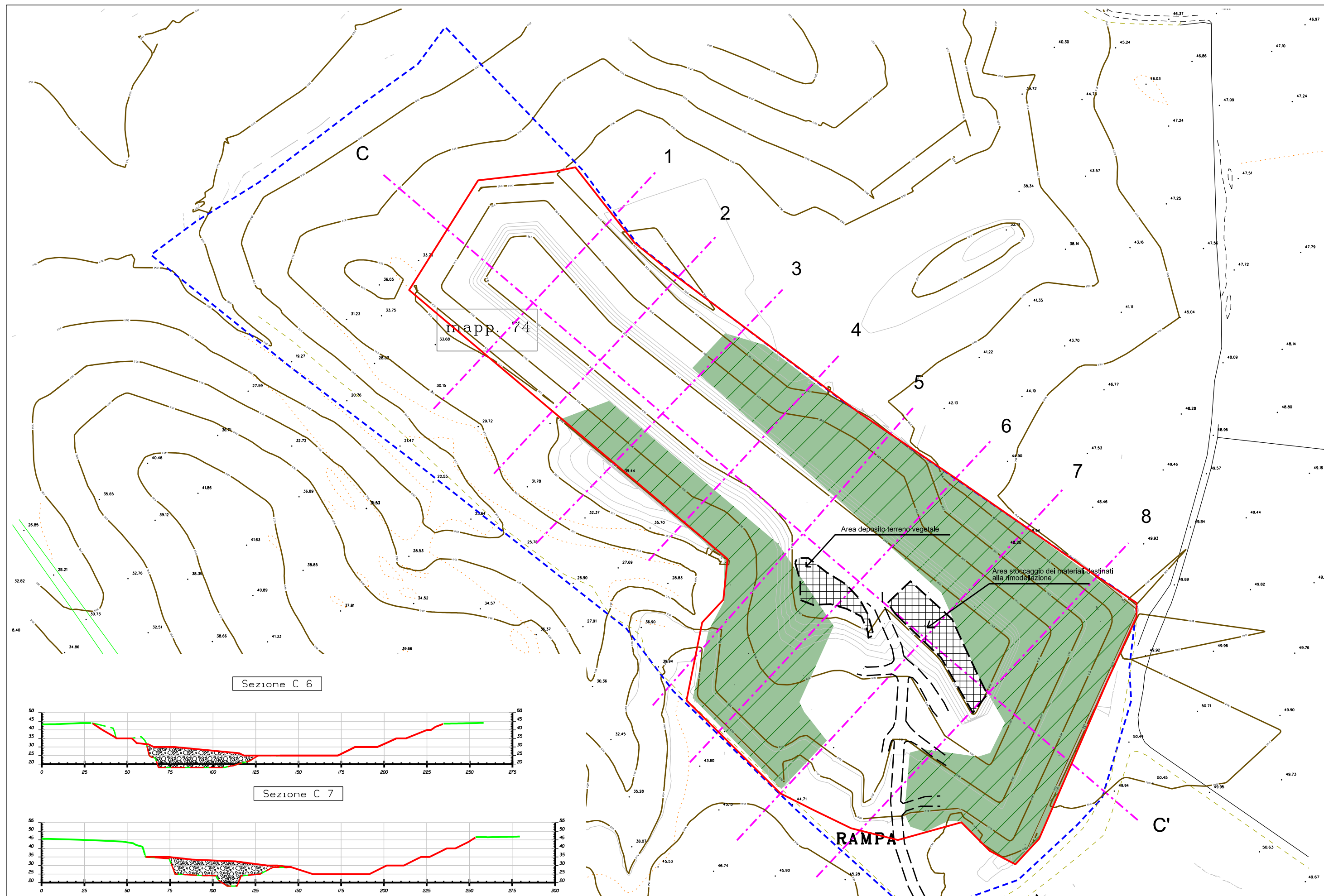
1. si introduce un valore iniziale di F_s (per es. con Fellenius) e si determina un primo valore del coefficiente di sicurezza;
2. il nuovo valore di F_s (F_s') ottenuto viene confrontato col valore di partenza;
3. se la differenza supera un limite prefissato (es. $F_s' - F_s > 0.001$), si ritorna al passo a), inserendo al posto del valore di partenza di F_s , il nuovo valore calcolato;
4. se la differenza rimane contenuta nel limite indicato, l'elaborazione va interrotta: il coefficiente di sicurezza cercato è F_s' .

Risultati della verifica

I risultati della verifica di stabilità eseguita con i metodi sopra menzionati hanno mostrato che la superficie con F_s minimo è stata ottenuta con il metodo di Janbu semplificato.

La verifica sul fronte di scavo sulla sezione tipo per la situazione a fine coltivazione ha fornito un coefficiente di sicurezza minimo pari a 3,31 sulla superficie di rottura 20 di gran lunga superiore al limite minimo accettabile per la sicurezza, pari a 1,3.

Sulla base delle caratteristiche geomeccaniche dei materiali, sulle esperienze maturate in altre cave con analoghe caratteristiche litologiche e granulometriche e sui risultati contenuti nella presente relazione di calcolo, tenuto conto anche dei valori cautelativi inseriti, si ritiene che la verifica di calcolo sia soddisfatta per la configurazione di progetto finale **(3,31)**.



Committente: Laterizi Torres S.p.A.

Località: Scala Erre

Data: Maggio 2009

Riferimenti: Verifica fronte di scavo di progetto

Parametri geotecnici degli strati

Strato n.

1

Descrizione litologica:

argille limo-ghiaiose con intercalazioni ghiaioso-sabbiose in matrice argillosa

Angolo di attrito (°):	29
Densità relativa (%):	0
Coesione(kg/cm ^q):	0,2
Peso di volume sopra falda(kg/mc):	1700
Peso di volume sotto falda(kg/mc):	2000
Modulo di Young o edometrico (terreni coesivi) (kg/cm ^q):	70
Coefficiente di Poisson:	0,4
O.C.R.:	1
Angolo di attrito residuo (°)	0
Coefficiente di pressione neutra:	0
Modulo dinamico di taglio (kg/cm ^q):	0
Comportamento meccanico:	Livello coesivo
Caratteristiche idrogeologiche:	Livello permeabile

Committente: Laterizi Torres S.p.A.

Località: Scala Erre

Data: Maggio 2009

Riferimenti: Verifica fronte di scavo di progetto

Analisi di stabilità: riepilogo delle superficie con coefficiente di sicurezza minimo

Superf.	Fs minimo	Metodo di calcolo	Concio	X base m	Y base m	Lunghez za m	Inclina zione °	Volume mc	Peso kg falda m	Altezza m	Carichi N	Carichi T	Phi (°)	C kg/cm ²
20	3,309	Janbu semplificato	1	19	0	1,61	-29,7	0,56	714	0	0	0	29	0,2
			2	20,4	-0,8	1,49	-20	1,504	2142	0	0	0	29	0,2
			3	21,8	-1,31	1,43	-10,9	2,55	4046	0	0	0	29	0,2
			4	23,2	-1,578	1,4	-2	3,722	6188	0	0	0	29	0,2
			5	24,6	-1,626	1,41	6,8	4,587	7616	0	0	0	29	0,2
			6	26	-1,458	1,46	15,8	5,141	8568	0	0	0	29	0,2
			7	27,4	-1,061	1,55	25,3	5,349	9044	0	0	0	29	0,2
			8	28,8	-0,4	1,72	35,5	5,134	8568	0	0	0	29	0,2
			9	30,2	0,6	2,07	47,4	4,314	7140	0	0	0	29	0,2
			10	31,6	2,125	3,2	64	1,86	3094	0	0	0	29	0,2

LEGENDA

Carichi N= Carichi normali (kg)

Carichi T= Carichi tangenziali (kg)

Phi= Angolo di resistenza al taglio (°)

C= Coesione (kg/cm²)

Accelerazione sismica orizzontale (g):..... 0,0

Accelerazione sismica verticale (g):..... 0,0

LEGENDA:
argille limo-ghiaiose con intercalazioni ghiaioso-sabbiose in matrice argillosa

