

# PEFS 3.0

## Programma per la Verifica dei Pendii e dei Fronti di Scavo in Zona Sismica

Secondo le norme tecniche per le costruzioni D.M. 17/01/2018 e Circolare applicativa C.S.LL.PP. n.7/2019

## 1. Ipotesi di calcolo e procedure

- 1.1 Applicazioni della procedura PEFS
- 1.2 Normative di riferimento .
- 1.3 Unità di misura
- 1.4 Simbologia
- 1.5 Sistemi di riferimento
- 1.6 Metodi ed ipotesi di calcolo della procedura PEFS
- 1.5 metodo *Fellenius*
- 1.6 metodo *Bishop*
- 1.7 metodo *Janbu*
- 1.8 metodo *Espinoza unificato*

Il programma di calcolo *PEFS* esegue l'analisi di stabilità dei pendii, dei rilevati e dei fronti di scavo, considerando anche l'effetto pseudo-statico delle forze sismiche, in conformità della vigente normativa (D.M. 17 Gennaio 2018; Circ. C.S.LL.PP. n.7/2019), ed individua possibili deficienze di resistenza, da affidare poi ad eventuali opere di consolidamento (muri, pali, tiranti, ecc.).

La procedura di calcolo consente di introdurre diverse stratigrafie del terreno (anche con diversa inclinazione); qualsiasi andamento dell'eventuale falda d'acqua, e qualunque superficie di scorrimento. L'operatore può inoltre introdurre sovraccarichi esterni dovuto al peso di eventuali manufatti o da carichi di esercizio esterni.

Il programma archivia l'analisi di stabilità in un file, il cui nome è scelto dall'utente ma con estensione *.rtf*, da stampare con editore tipo Word; la stessa stampa può avvenire anche in modo diretto durante l'esecuzione del programma.

I dati di Input vengono invece salvati in modo automatico in un file con estensione *.pef*.

L'utente esperto può introdurre e modificare i dati di input anche facendo uso di un qualunque editore di testi (alla stregua di altri tipi di programmi), rispettando il formato riportato nei test di esempio del Cap.7 e salvando il file sempre con estensione *.pef*, in modo da poter essere riconosciuto dal programma.

E' possibile intervenire anche su alcuni parametri del calcolo, attualmente impostati in modo automatico, in modo da avere quella certa flessibilità d'uso opportuna a prevedere futuri aggiornamenti della normativa.

A maggior chiarezza della procedura di calcolo, si riporta al successivo Cap.7 del manuale d'uso, il diagramma di flusso operativo (flow chart), al quale è sempre bene fare riferimento.

## 1.1 Applicazioni della procedura *PEFS*

Gli algoritmi di calcolo del software permettono la verifica di stabilità alle forze sismiche con metodo pseudo-statico, applicando metodi di calcolo più cautelativi (*Fellenius*) e quelli più recenti (*Espinoza-Janbu*) validi per qualunque superficie di scorrimento.

Il programma trascura l'effetto della componente sismica verticale ( $F_v$ ), perchè ininfluenza ai fini dell'equilibrio limite, ma il suo contributo può essere comunque controllato, aumentando o diminuendo il peso specifico del materiale in modo adeguato (Cap.1).

## 1.2 Normative di riferimento

Le verifiche di stabilità dei pendii e dei fronti di scavo della procedura *PEFS*, vengono eseguiti in osservanza alle disposizioni delle vigenti leggi ed in particolare:

D.M. 17 Gennaio 2018      *Norme Tecniche per le Costruzioni*

Circ. C.S.LL.PP. n.7/2019      *Istruzioni per l'applicazione delle norme tecniche per le costruzioni*

## 1,3 Unità di misura

Se non diversamente indicato, sono adottate le seguenti unità del S.I.:

Lunghezze: *cm*

Forze : *daN* ( 1 daN = 10 N = 1,02 Kg forza del vecchio sistema MKS )

## 1.4 Simbologia

La simbologia usata per definire le grandezze fisiche nella fase di input dei dati e nella fase di output risultati è quella usuale della normativa; in particolare:

### A- Simboli

A	area (cm <sup>2</sup> )
P, W	forza peso (daN)
X, F	forze orizzontali (daN)
M	momenti (daNxcn)
N	sforzo normale (daN)
q	carico esterno verticale, ripartito uniformemente (daN/cm <sup>2</sup> )
Q	forza verticale, relativa al carico ripartito (daN)
Δx, dx	spessore misurato orizzontalmente (cm)
l	lunghezza (cm)
h	altezza (cm)
a	accelerazione (cm/s <sup>2</sup> )
g	accelerazione di gravità (981 cm/s <sup>2</sup> )
γ	peso/volume (daN/cm <sup>3</sup> )
σ	tensione normale (daN/cm <sup>2</sup> )
τ	tensione tangenziale (daN/cm <sup>2</sup> )
c'	coesione efficace (daN/cm <sup>2</sup> )
φ'	angolo di attrito interno efficace (gradi)
c <sub>u</sub>	coesione non drenata (daN/cm <sup>2</sup> )
q <sub>u</sub>	resistenza alla compressione libera (daN/cm <sup>2</sup> )

### B- Indici

i	elemento
w	acqua

### C- Simboli frequenti

C <sub>s</sub> , γ <sub>R</sub>	coefficiente di sicurezza
α	angolo di inclinazione della base della superficie di scorrimento
Σ	sommatoria

## 1.5 Sistemi di riferimento

Il profilo del pendio (o del fronte dello scavo), della superficie di scorrimento, e dell'eventuale falda d'acqua, vengono riferiti ad un sistema globale, costituito da una terna di assi cartesiani ortogonali OXYZ , aventi:

- asse Z verticale, posto in sommità e diretto positivamente verso il basso;
- asse X orizzontale, posto in sommità e diretto positivamente verso destra;
- asse Y orizzontale ed ortogonale al piano dei primi due.

Anche se l'origine degli assi è arbitraria, è comunque meglio che tutto il pendio in esame sia sempre contenuto nel quadrante positivo, nel quale:

$$X \geq 0 ; Z \geq 0$$

In fig.5.1 e fig.5.2 si riportano gli schemi generali di calcolo della procedura.



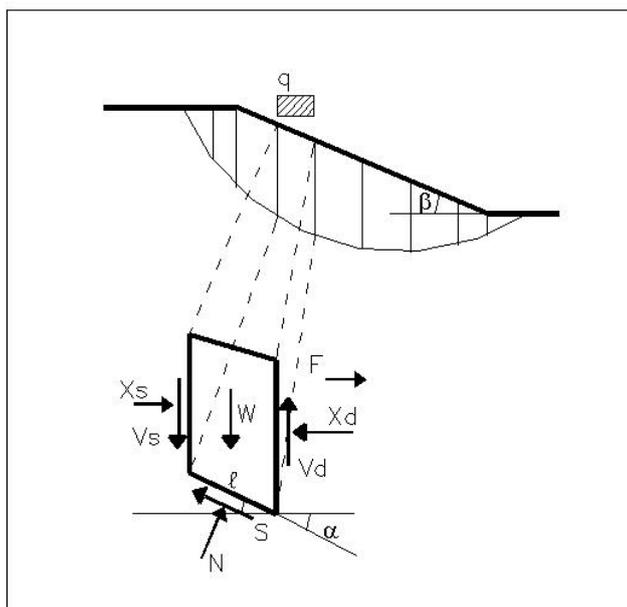
## 1.6 Metodi ed ipotesi di calcolo della procedura

La procedura *PEFS* permette la verifica di stabilità dei pendii e dei fronti di scavo in zona sismica, con il metodo Fellenius-Bishop (per superfici di potenziale scorrimento a direttrice circolare o sub-circolare) e Janbu-Espinoza (per superfici a direttrice qualsiasi).

I metodi differiscono l'uno dall'altro per le ipotesi poste a ridurre il numero delle incognite del problema statico, come già visto al Cap.4: la massa potenzialmente instabile viene così suddivisa in conci e su ogni concio vengono valutate le azioni attive di scorrimento e quelle resistenti.

Il metodo Janbu ed Espinoza sono quelli più recenti e più affidabili.

Fig. 1.3- Forze di volume e superficiali in equilibrio limite

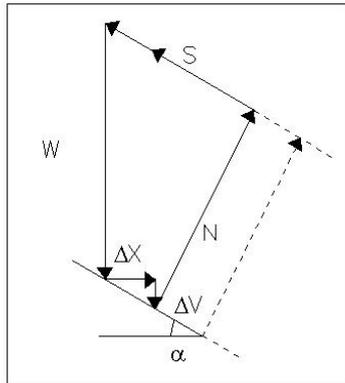


### 1.6.1 Metodo Fellenius

Con il metodo *Fellenius* (metodo dei conci-strisce, o metodo svedese) il programma esegue in modo *prudenziale* le verifiche di stabilità, considerando:

- 1) risultanti delle forze d'interconciò nulle o almeno parallele alla base dei conci, ossia:  $V_i / X_i = \tan \alpha_i$
- 2) superficie di scorrimento circolare cilindrica e quindi forza normale alla base dei conci ( $N$ ), passante per il centro di rotazione;

Fig.1.4 – Poligono Fellenius, con forze d'interconcio parallele alla base



Sotto queste ipotesi, il valore di  $N$ , non dipende dalle forze d'interconcio, e viene calcolato dall'equilibrio delle forze totali nella direzione normale alla base dei concii.

$$N_i = (W_i + S_{wi}) \cdot \cos \alpha_i - F_i \sin \alpha_i$$

dove:

$i$	numero del concio
$W_i = \gamma_i h_i dx_i + q_i dx_i$	peso del concio e dell'eventuale sovraccarico ( $q$ )
$S_{wi} = \gamma_w h_{wi} dx_i$	eventuale colonna d'acqua sopra il pendio (per scarpate sommerse)
$F_i$	forza sismica inerziale orizzontale (tende a diminuire lo sforzo normale sulla base dell'elemento)

Il coefficiente di sicurezza *Fellenius*, viene valutato prudenzialmente dalla procedura PEFS, con la seguente espressione:

$$C_s = \frac{\sum M_{resistenti}}{\sum M_{attive}} = \frac{\sum F_{resistenti}}{\sum F_{attive}} = \frac{\sum [c_i' l_i + (N_i - U_i) \tan \phi_i']}{\sum (W_i + S_{wi}) \sin \alpha_i + \sum F_i \cos \alpha_i}$$

dove:

$dx_i$	spessore orizzontale dell'elemento
$l_i = dx_i / \cos \alpha_i$	lunghezza della base del concio
$U_i = \gamma_w (u_i + h_{wi}) l_i$	sottopressione d'acqua alla base del concio
$h_{wi}$	altezza d'acqua sopra il pendio (per pendio immerso)
$u_i$	altezza di terreno immerso (dalla base del concio)
$\gamma_w$	peso specifico dell'acqua ( $0,001 \text{ daN/cm}^3$ )
$\alpha_i$	angolo d'inclinazione della base del concio
$c_i'$	coesione efficace sulla base del concio
$\phi_i'$	angolo di attrito interno efficace sulla base del concio

Come più volte ripetuto, l'azione della componente verticale della forza sismica ( $F_v$ ), è ininfluenza ai fini dell'equilibrio limite, comunque il suo effetto può essere controllato, aumentando o diminuendo il peso  $W$  in modo opportuno (ES.1).

La componente sismica orizzontale ( $F_H$ ), viene valutata prudenzialmente, su ogni elemento, secondo la normativa:

$$F_i = W_i \cdot \beta_s \cdot S_T \cdot S_S \cdot a_g / g$$

dove:

$\beta_s$  coefficiente correttivo dell'accelerazione sismica, di cui alla tabella 1.1

Tabella 1.1 – Coefficienti di sicurezza parziali e coefficienti sismici

D.M.17.01.2018/Coeff. di sicurezza parziali geotecnici e di resistenza (stabilità)													
<p><b>OPERE ARTIFICIALI MATERIALI SCIOLTE E FRONTI DI SCAVO</b>  <i>pendii artificiali, rilevati, argini, moli, muri in terre armate, scavi di fondazione, trincee, canali.</i></p> <p>&gt; IN COMBINAZIONE NON SISMICA (A2+M2+R2)</p> <p><b>Coeff. parz. di sicurezza ai materiali:</b>                      Coeff. parziale per i parametri geotecnici del terreno (<math>\sigma'k-c'k</math>). Approccio 1 - Combinazione 2:  <math>\gamma_M = 1.25</math></p> <p>Coeff. parziale per i parametri geotecnici del terreno (cu) per ver. a breve termine (<math>\sigma=0</math>):  <math>\gamma_M = 1.40</math></p> <p><b>Coeff. parz. di sicurezza alla resistenza:</b>  <math>\gamma_R \geq 1.1</math></p> <hr/> <p>&gt; IN COMBINAZIONE SISMICA</p> <p><b>Coeff. parz. di sicurezza ai materiali:</b>                      Le verifiche vanno condotte con i parametri caratteristici (<math>\sigma'k-c'k, cu</math>), e quindi si pone:  <math>\gamma_M = 1</math></p> <p><b>Coeff. parz. di sicurezza alla resistenza:</b>  <math>\gamma_R \geq 1.2</math></p> <p><b>Coeff. sismico</b>                      Per lo SLV: <math>\beta_s = 0,38</math>      Per lo SLD: <math>\beta_s = 0,47</math></p>	<p><b>PENDII NATURALI</b></p> <p>&gt; IN COMBINAZIONE NON SISMICA</p> <p><b>Coeff. parz. di sicurezza ai materiali:</b>                      Le verifiche vanno condotte con i parametri caratteristici (<math>\sigma'k-c'k</math>), e quindi si pone:  <math>\gamma_M = 1</math></p> <p><b>Coeff. parz. di sicurezza alla resistenza:</b>                      Con motivazione del progettista si può porre:  <math>\gamma_R \geq 1</math></p> <hr/> <p>&gt; IN COMBINAZIONE SISMICA</p> <p><b>Coeff. parz. di sicurezza ai materiali:</b>                      Le verifiche vanno condotte con i parametri caratteristici (<math>\sigma'k-c'k, cu</math>), e quindi si pone:  <math>\gamma_M = 1</math></p> <p><b>Coeff. parz. di sicurezza alla resistenza:</b>                      Con motivazione del progettista si può porre:  <math>\gamma_R \geq 1</math></p> <p><b>Coeff. sismico</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Accelerazione</th> <th>Sottosuolo A</th> <th>B, C, D, E</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>0,2 &lt; ag/g \leq 0,4</math></td> <td>... <math>\beta_s = 0,30</math></td> <td><math>\beta_s = 0,28</math></td> </tr> <tr> <td><math>0,1 &lt; ag/g \leq 0,2</math></td> <td>... <math>\beta_s = 0,27</math></td> <td><math>\beta_s = 0,24</math></td> </tr> <tr> <td><math>ag/g \leq 0,1</math></td> <td>... <math>\beta_s = 0,20</math></td> <td><math>\beta_s = 0,20</math></td> </tr> </tbody> </table>	Accelerazione	Sottosuolo A	B, C, D, E	$0,2 < ag/g \leq 0,4$	... $\beta_s = 0,30$	$\beta_s = 0,28$	$0,1 < ag/g \leq 0,2$	... $\beta_s = 0,27$	$\beta_s = 0,24$	$ag/g \leq 0,1$	... $\beta_s = 0,20$	$\beta_s = 0,20$
Accelerazione	Sottosuolo A	B, C, D, E											
$0,2 < ag/g \leq 0,4$	... $\beta_s = 0,30$	$\beta_s = 0,28$											
$0,1 < ag/g \leq 0,2$	... $\beta_s = 0,27$	$\beta_s = 0,24$											
$ag/g \leq 0,1$	... $\beta_s = 0,20$	$\beta_s = 0,20$											

$S_s$  fattore suolo, in funzione della tipologia litologica e del parametro  $F_0$  (fattore di amplificazione massima su suolo A), deducibili dal reticolo sismico della normativa:

Tabella 5.2 – Fattore stratigrafico

Categoria Sottosuolo	Fattore Stratigrafico $S_s$
A	1,0
B	$1,0 \leq 1,4 - 0,4 \cdot F_0 \cdot a_g \leq 1,2$
C	$1,0 \leq 1,7 - 0,6 \cdot F_0 \cdot a_g \leq 1,5$
D	$0,9 \leq 2,4 - 1,5 \cdot F_0 \cdot a_g \leq 1,8$
E	$1,0 \leq 2,0 - 1,1 \cdot F_0 \cdot a_g \leq 1,6$

$S_T$  fattore topografico:

Tabella 5.3 – Fattore topografico

Categoria Topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	Fattore Topografico $S_T$
T1 Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$	---	1,0
T2 Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2

<b>T3</b> Rilevi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
<b>T4</b> Rilevi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione $i > 30^\circ$	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

Quanto sopra significa considerare prudenzialmente il braccio della risultante delle forze sismiche pari al raggio del cerchio di scorrimento.

Si ribadisce che con le ipotesi sopra poste, il coefficiente di sicurezza alla *rotazione* rispetto al centro della circonferenza critica (raggio  $r$ ) coincide con il coefficiente di sicurezza alla *traslazione*; infatti le forze di azione e reazione d'interconcio parallele alla base, sommano in ogni caso valore nullo, ed il valore  $C_s$  si determina direttamente, senza iterazioni.

Il metodo *Fellenius* è ancora applicabile anche nei casi in cui la superficie di scorrimento si discosta poco da quella circolare; se la superficie di scorrimento è molto diversa da quella circolare, è tuttavia accettabile il valore  $C_s$  per l'equilibrio alla traslazione.

Lo stesso metodo *Fellenius*, come mostrato dalla fig.5.4, può comportare un poligono delle forze non chiuso; la procedura dà tuttavia valori del coefficiente di sicurezza  $C_s$  minori di altri metodi più rigorosi (che tengono conto delle forze d'interconcio) e quindi l'algoritmo di calcolo è a favore della sicurezza.

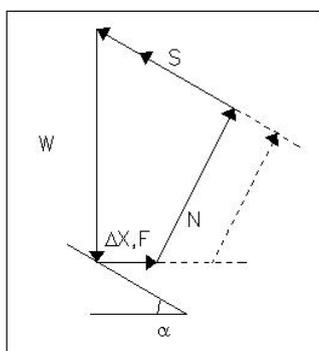
In condizioni non drenate ovviamente occorrerà sostituire al valore  $c'$  quello della coesione non drenata  $c_u$  e porre  $\phi' = 0$ ; in tal caso le azioni lungo la superficie di scorrimento non dipendono dallo sforzo normale  $N$  e quindi non sono necessarie le ipotesi relative alle azioni mutue  $X, V$  sull'interconcio.

### 1.6.2 Metodo Bishop (1955)

Con la simbologia di cui sopra, nel metodo *Bishop*, il programma considera:

- 1) forze d'interconcio orizzontali, ovvero:  $V_{si} = V_{di} = 0$
- 2) superficie di scorrimento cilindrica con direttrice circolare (forza  $N$  passante per in centro di rotazione);

Fig.1.5 – Poligono Bishop, con forze d'interconcio orizzontali



Il valore della forza  $N$  sulla base della superficie di scorrimento dipende ora dalle forze d'interconcio e si ottiene dalle condizioni di equilibrio delle forze verticali; con i simboli già noti:

$$N_i = \frac{(W_i + S_{wi}) - S_i \cdot \sin \alpha_i}{\cos \alpha_i}$$

Naturalmente il termine  $W_i$  è inclusivo dell'eventuale sovraccarico verticale permanente ( $q$ ).

La forza di taglio ( $S$ ) sulla base dell'elemento, si trova dall'equilibrio delle forze orizzontali:

$$S_i = \frac{(X_{si} - X_{di}) + F_i + N_i \sin \alpha_i}{\cos \alpha_i} = \frac{c'_i l_i + (N_i - U_i) \tan \phi'_i}{C_s}$$

dall'equilibrio delle forze verticali si può calcolare per ogni concio:

$$N_i = \frac{(W_i + S_{wi}) - \frac{c'_i l_i \sin \alpha_i + U_i \tan \phi'_i \sin \alpha_i}{C_s}}{\cos \alpha_i + \frac{\sin \alpha_i \cdot \tan \phi'_i}{C_s}}$$

Si può definire in tal caso, senza apprezzabili errori, il coefficiente di sicurezza globale alla rotazione, o alla traslazione su superficie circolare:

$$C_s = \frac{\sum M_{resistenti}}{\sum M_{attive}} = \frac{\sum F_{resistenti}}{\sum F_{attive}} = \frac{\sum [c'_i l_i + (N_i - U_i) \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i + S_{wi}) \cdot \sin \alpha_i + \sum F_i \cdot \cos \alpha_i}$$

come si vede, questa volta il valore  $C_s$  viene determinato per iterazioni dalle due precedenti equazioni, ma il procedimento è sempre rapidamente convergente.

Può sembrare che la procedura non tenga conto delle forze d'interconco e delle forze sismiche, ma esse vengono considerate nella espressione della forza di taglio alla base ( $S$ ).

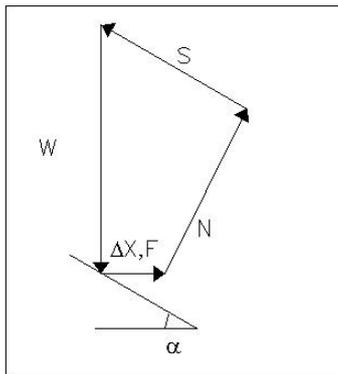
Il coefficiente di sicurezza *Bishop* è sempre più elevato di quello *Fellenius*, e quindi meno cautelativo.

### 1.6.3 Metodo Janbu (1973)

Il metodo *Janbu* semplificato deriva dal metodo *Bishop*, ma a differenza di esso viene definito un *coefficiente di sicurezza relativo all'equilibrio globale rispetto alle forze orizzontali*, anziché quello rispetto ai momenti.

In tal modo si ha una buona chiusura del poligono delle forze ed il *metodo* è applicabile a superfici di scorrimento qualsiasi.

Fig.1.6 – Poligono Janbu



Con il noto significato simbolico, la procedura considera dunque:

- 1) forze d'interconco orizzontali, ovvero:  $V_{si} = V_{di} = 0$

I valori della forza  $N$  sulla base della superficie di scorrimento sono dipendenti dalle forze d'interconco e si ottengono dalle condizioni di equilibrio delle forze verticali, come per il metodo Bishop:

$$N_i = \frac{(W_i + S_{wi}) - S_i \cdot \sin \alpha_i}{\cos \alpha_i}$$

Il termine  $W_i$  è inclusivo dell'eventuale sovraccarico verticale permanente posto sul pendio in equilibrio ( $q$ ).

Dall'equilibrio delle forze verticali si può calcolare per ogni conco:

$$N_i = \frac{(W_i + S_{wi}) - \frac{c_i' l_i \sin \alpha_i + U_i \tan \phi_i' \sin \alpha_i}{C_s}}{\cos \alpha_i + \frac{\sin \alpha_i \cdot \tan \phi_i'}{C_s}}$$

Si può definire senza apprezzabili errori il coefficiente globale alla traslazione:

$$C_s = \frac{\sum F_{resistenti}}{\sum F_{attive}} = \frac{\sum [c_i' l_i \cdot \cos \alpha_i + (N_i - U_i) \tan \phi_i' \cdot \cos \alpha_i]}{\sum (N_i \cdot \sin \alpha_i) + \sum F_i}$$

Anche ora il coefficiente di sicurezza si determina per iterazioni delle due precedenti equazioni, ma il procedimento è sempre rapidamente convergente.

#### 1.6.4 Metodo Espinoza unificato (1994)

Il software *PEFS* può eseguire la verifica di stabilità dei pendii e dei fronti di scavo usando un metodo più recente, *valido per superfici di scorrimento qualsiasi*, che è quello *Espinoza unificato (1994)*. Esso considera l'influenza delle forze d'interconco e dei fattori di equilibrio degli altri metodi ed in particolare: *Janbu*, *Sarma*, *Morgestern*, ecc.

Il coefficiente di sicurezza viene espresso, con la nota simbologia, dalla relazione unificata:

$$C_s = \frac{\sum \{[(W_i + S_{wi}) \cos \alpha_i - U_i] \tan \phi_i' + c_i' \cdot l_i\} m_{ai}}{\sum (W_i + S_{wi}) \sin \alpha_i \cdot m_{ai} + \sum (F_i) + If}$$

dove:

$$m_{ai} = \frac{1}{\cos \alpha_i \left( 1 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \phi_i'}{C_s} \right)}$$

$$If = \sum \left[ \Delta V_i \cdot \tan \left( \frac{\phi_i'}{C_s} - \alpha_i \right) \right]$$

con:  $\Delta V_i$  differenza degli sforzi tangenziali verticali d'interconcio.

Il termine  $W_i$  è inclusivo dell'eventuale sovraccarico verticale permanente posto sul pendio in equilibrio ( $q$ ).

Anche qui l'azione della componente sismica verticale ( $F_v$ ) è ininfluenza ai fini dell'equilibrio limite e comunque il suo effetto può essere controllato opportunamente, aumentando o diminuendo il peso delle masse in gioco.

Su ogni elemento si valuta invece la componente sismica orizzontale ( $F_i$ ), secondo la normativa:

$$F_i = W_i \cdot \beta_s \cdot S_T S \cdot a_g / g$$

Il calcolo *Espinoza unificato*, viene prudenzialmente semplificato, ponendo il valore  $If=0$  (*ipotesi Janbu*), in modo da cautelarsi dall'annullamento delle forze verticali d'interconcio, provocabile dalle vibrazioni sismiche.

In condizioni non drenate ovviamente occorrerà sostituire al valore  $c'$  quello della coesione non drenata  $c_u$  e porre  $\phi' = 0$ .

Il procedimento *Espinoza* è iterativo, ma la convergenza è molto rapida.