

## 8 Il modulo di stabilità dei pendii (VSP)

### 8.1 Premessa

PARATIE PLUS offre la possibilità di calcolare la stabilità complessiva del versante in cui può o meno essere presente un'opera di sostegno flessibile.

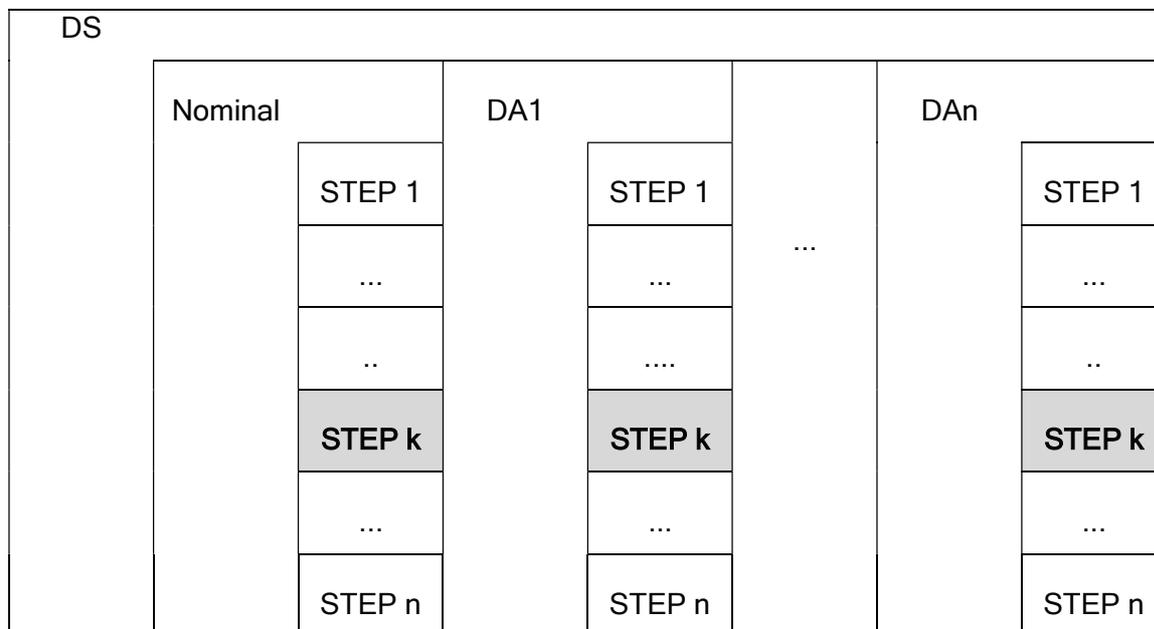
Questo tipo di verifica prende in esame la configurazione di scavo o, più in generale, del pendio, nella generica fase, prescindendo dalla sequenza costruttiva precedente. Questa tecnica, infatti, appartiene all'ambito dei metodi all'equilibrio limite che operano, di fatto, indipendentemente dal comportamento deformativo dell'opera, o meglio, che prescindono dalla successione temporale delle deformazioni reversibili o irreversibili sviluppatasi prima della configurazione esaminata.

Il fronte di scavo viene analizzato tenendo conto della maggior parte, ma non di tutti, gli elementi che concorrono alla definizione del modello più generale affrontato con PARATIE PLUS. Il raccordo, quindi, tra la procedura qui illustrata e i più generali criteri di modellazioni, va compreso il più possibile, tramite la consultazione dei paragrafi seguenti: in essi sono brevemente descritti i metodi di calcolo utilizzati, le modalità di input dei parametri per regolare il calcolo, nonché le principali assunzioni e limitazioni presenti nella procedura.

### 8.2 Costruzione del problema

PARATIE PLUS consente di eseguire il calcolo di stabilità generale, relativamente ad una generica Design Section, per un generico passo, per tutte le Design Assumptions attive.

Consideriamo il diagramma in Figura 8-1 che riassume la suddivisione logica fra passi di un calcolo, appartenenti a una o più DA (ipotesi di calcolo), a loro volta relative ad un problema (DS). Supponiamo che la verifica di stabilità venga richiesta per il passo k-esimo (celle a sfondo grigio in figura): pur operando all'interno di una generica DA, i dati relativi alla verifica di stabilità saranno estesi a tutti i passi k di tutte le altre DA. L'esecuzione del calcolo, però, dovrà essere lanciata, manualmente da parte dell'Utente, per ogni DA.



**Figura 8-1 : suddivisione schematica di un modello PARATIE PLUS**

Dalla DS vengono dedotti i dati generali del problema, quali ad esempio la stratigrafia di calcolo, la geometria nel suo complesso (posizione della o delle pareti, limiti del modello, presenza di chiodature e/o geotessili di rinforzo, ecc.).

Dalle DA vengono sostanzialmente derivati i coefficienti di sicurezza parziali (A, M e R) a loro volta assegnati sulla base delle indicazioni della normativa prescelta (vedi paragrafo 8.9)

Infine dallo STEP k, sono recuperate tutte le informazioni che consentono di descrivere univocamente il problema da sottoporre alla verifica: ad esempio, vengono attinte le informazioni che permettono di definire la geometria del versante (dello scavo), la freatica, se presente, gli elementi strutturali e i carichi di cui PARATIE PLUS terrà conto nel calcolo di stabilità globale.

In relazione allo specifico passo prescelto (in questo caso il passo k della DA), PARATIE PLUS dovrà essere istruito con le poche informazioni non ancora assegnate, e necessarie per eseguire il calcolo di stabilità, quali ad esempio la scelta metodo di calcolo (per esempio, il metodo di Bishop semplificato).

I risultati relativi a questo step non hanno legami di alcun genere con i risultati relativi a step precedenti o successivi, al contrario dei risultati prodotti dal calcolo per fasi dell'opera di sostegno flessibile.

PARATIE PLUS conserva, nella sessione di lavoro corrente, i risultati relativi a tutti i passi per i quali è stata richiesta la verifica di stabilità. In questa versione, i risultati non sono salvati nell'archivio di progetto.

Aggiungendo un passo dopo una fase per la quale sono stati definiti in modo compiuto i dati per un'analisi di stabilità, gli stessi dati vengono ereditati dal nuovo passo.

Vediamo ora più in dettaglio i vari aspetti del calcolo.

## 8.3 Metodi di calcolo

### 8.3.1 Generalità

PARATIE PLUS prevede il calcolo della stabilità per mezzo dei seguenti metodi.

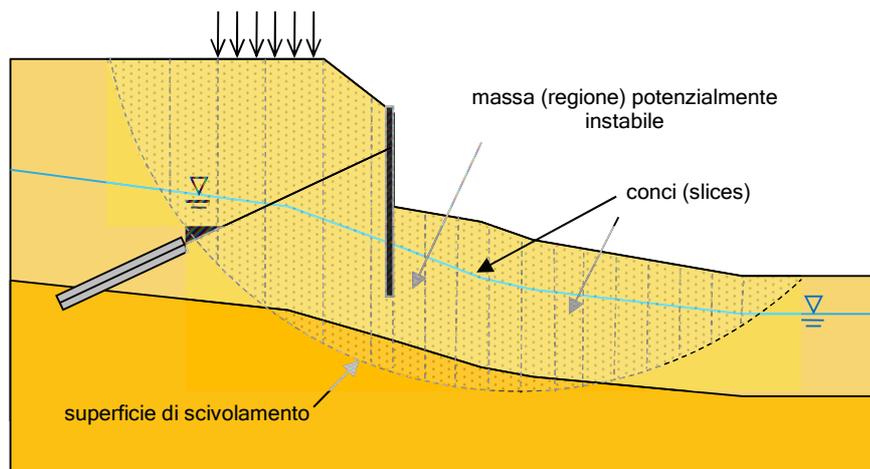
- Metodo di Bishop semplificato
- Metodo di Janbu semplificato
- Metodo di Morgenstern & Price

Tutti questi, appartenenti alla famiglia dei metodi all'equilibrio limite, si basano sull'individuare una porzione di terreno instabile mobilitata lungo di una potenziale superficie di scorrimento.

Il coefficiente di sicurezza associato ad una superficie è calcolato imponendo le condizioni di equilibrio nelle quali vengono introdotte le resistenze offerte del terreno affette da tale coefficiente di sicurezza.

Variando secondo diversi criteri la superficie di scorrimento, è possibile determinare la configurazione associata al coefficiente di sicurezza minimo.

Tutti i metodi suddividono la regione di terreno mobilitata in conci (*slices* in inglese) verticali (Figura 8-2) compresi tra la sommità del terreno e la superficie di scorrimento e istituiscono le condizioni di equilibrio generali e relative ai singoli conci. Poiché nella scrittura delle condizioni di equilibrio del singolo concio è necessario includere le azioni che esso scambia con i conci adiacenti, si ottiene un sistema risolvibile in cui le incognite (il coefficiente di sicurezza e le azioni interne fra i conci) superano le equazioni disponibili.



**Figura 8-2 : un problema di stabilità del fronte o del versante**

La differenza fra i diversi metodi risiede nel modo in cui il problema viene reso staticamente determinato: in generale vengono introdotte ulteriori ipotesi, diverse da un metodo all'altro, relativamente alle azioni di interazione fra conci adiacenti.

I vari metodi sono presentati in tutti i testi di geotecnica; i dettagli delle ipotesi e delle equazioni risolventi e i confronti tra i vari approcci possono essere reperiti, ad esempio nel testo di Abramson et al. (2002) a cui si rimanda.

In questa sede si ricorda che il metodo di Bishop assume che i vari conci si scambino azioni solo normali alle facce, vale a dire azioni orizzontali; richiede inoltre che la superficie di scivolamento sia un arco di cerchio e determina il coefficiente di sicurezza imponendo l'equilibrio alla rotazione dell'ammasso attorno al centro della circonferenza.

Il metodo di Janbu semplificato introduce le medesime ipotesi di Bishop per quel che riguarda le azioni fra i conci, ma determina il coefficiente di sicurezza imponendo l'equilibrio generale in direzione orizzontale. Questo metodo in linea di massima non richiede ipotesi particolari sulla forma della superficie di scivolamento; tuttavia, nel caso in cui la superficie avesse una pronunciata curvatura, il coefficiente di

sicurezza calcolato numericamente dovrebbe essere corretto tramite il fattore moltiplicativo  $f_0$  indicato nella Figura 8-3. PARATIE PLUS non applica tale coefficiente correttivo.

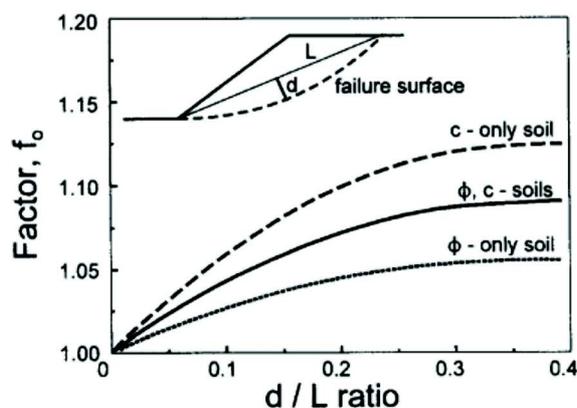


Figura 8-3 : Fattore correttivo per il metodo Janbu semplificato (da Abramson et al 2002)

Il metodo di Morgenstern & Price (M&P nel seguito), molto più elaborato e difficilmente programmabile con un foglio elettronico, ipotizza che l'inclinazione delle forze tra i conci vari con la posizione  $x$  del conco, secondo una legge  $f(x)$  nota a meno di un moltiplicatore  $\lambda$  introdotto come variabile aggiuntiva. Il coefficiente di sicurezza è ottenuto imponendo condizioni di equilibrio generali sia alla traslazione sia alla rotazione. Il metodo non richiede che la superficie di scivolamento sia un arco di cerchio. In letteratura tale metodo è frequentemente fatto coincidere con il metodo GLE (General Limit Equilibrium) (Fredlund & Krahn(1977)): in realtà, il metodo di M&P originale determina la soluzione con metodi analitici ipotizzando una serie infinita di conci di larghezza infinitesima, mentre il metodo GLE è la versione discreta, basata su un numero finito di conci.

Un pregio del metodo GLE consiste nel potere degenerare nei diversi altri metodi più semplici d'uso comune nella pratica: ad esempio, imponendo che  $\lambda \cdot f(x)$  sia identicamente nullo e trascurando il calcolo del coefficiente di sicurezza alla traslazione, si riottiene il metodo di Bishop semplificato. Viceversa, sempre con  $\lambda \cdot f(x) \equiv 0$ , ma questa volta trascurando l'equilibrio alla rotazione, si riproduce esattamente il metodo di Janbu semplificato. Infine, il metodo di Spencer, che ipotizza un rapporto costante  $\lambda$  tra le forze interne normali e tangenti alle facce tra i conci, può essere visto come un caso particolare del metodo GLE quando si assuma  $f(x)=1$ .

Nella letteratura tecnica citata è frequentemente offerto un confronto tra i diversi metodi, da cui si può osservare che, per situazioni ordinarie, i risultati ottenuti dai diversi metodi sono molto simili.

Quando possibile, si consiglia di determinare il coefficiente di sicurezza con ognuno dei metodi previsti ed adottare, come valore finale, il minimo.

Questa famiglia di metodi ingegneristici, oggi incalzati dall'emergere di approcci basati su modellazioni numeriche del continuo, costituisce pur sempre un importantissimo patrimonio tecnico-scientifico tramandatici da alcuni dei più brillanti protagonisti dell'Ingegneria Geotecnica del XX secolo. Il loro utilizzo, crediamo, sopravvivrà ancora per lunghi anni come riferimento per la comprensione dei risultati ottenuto attraverso metodi certamente più rigorosi in termini della Meccanica del Continui, ma senza dubbio assai meno semplici e controllabili.

### 8.3.2 Breve discussione delle equazioni risolventi

Consideriamo il generico concio nella Figura 8-4, dove sono evidenziate tutte le azioni agenti, ad esclusione, per ora, di eventuali carichi esterni laterali o azioni di tiranti.

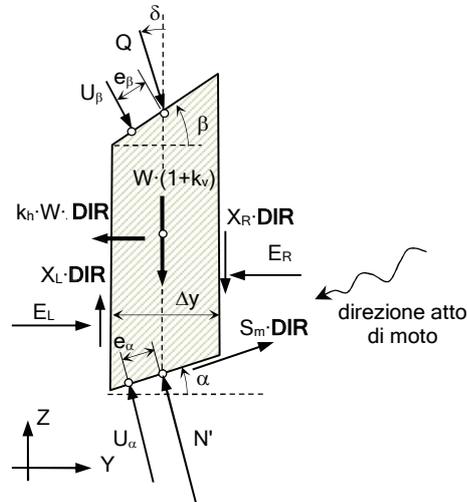


Figura 8-4 : forze sul generico concio (in assenza di tiranti o carichi esterni)

Introduciamo i seguenti simboli

DIR	parametro che assume il valore 1 o -1 a seconda dello scivolamento da destra verso sinistra o da sinistra a destra. Nella Figura 8-4, le azioni il cui verso dipende dalla direzione di scivolamento sono rappresentate per il caso DIR=1
$\Delta y$	Larghezza concio (misurata in direzione orizzontale)
$\alpha, \beta$	Inclinazione base inferiore e superiore
$N'$	Azione normale efficace a base concio
$S_m$	Azione tagliante mobilitata (resistente) a base concio
$U_\alpha$	Risultante delle pressioni interstiziali a base concio
$U_\beta$	Risultante delle pressioni interstiziali a sommità concio
$e_\alpha, e_\beta$	Eccentricità rispettivamente di $U_\alpha$ e $U_\beta$ rispetto al baricentro della faccia su cui agiscono
$W$	Peso <u>totale</u> del concio
$Q$	Risultante sovraccarico a testa concio (inclinato di un angolo $\delta$ rispetto alla verticale)
$k_h, k_v$	Componenti orizzontale e verticale (positiva se verso il basso) dell'accelerazione sismica pseudo-statica (frazione di $g$ )
$E_L, E_R$	Azioni interconco normali alla faccia con i conchi precedente e successivo
$X_L, X_R$	Azioni interconco taglianti

La resistenza  $S_m$  mobilitabile a base concio, per garantire un coefficiente di sicurezza  $F_s$  è pari a:

$$S_m = \frac{S}{F_s} = \frac{(N' \tan \phi + C)}{F_s} \geq 0 \quad (8-1)$$

$$\text{con } C = \frac{c' \cdot \Delta y}{\cos \alpha}$$

Per l'equilibrio verticale del concio, avremo:

$$N' = \frac{\left[ W \cdot (1 + k_v) - \frac{C \cdot \sin \alpha \cdot \text{DIR}}{F_s} + (X_R - X_L) \cdot \text{DIR} - (U_\alpha \cdot \cos \alpha - U_\beta \cdot \cos \beta) + Q \cdot \cos \delta \right]}{m_\alpha} \quad (8-2)$$

$$\text{con } m_\alpha = \cos \alpha \left[ 1 + \frac{(\tan \phi \cdot \tan \alpha)}{F_s} \cdot \text{DIR} \right]$$

definendo per comodità

$$KK = W \cdot (1 + k_v) - \frac{C \cdot \sin \alpha \cdot \text{DIR}}{F_s} - (U_\alpha \cdot \cos \alpha - U_\beta \cdot \cos \beta) + Q \cos \delta \quad (8-3)$$

si ha

$$N' = \frac{[KK + (X_R - X_L) \cdot \text{DIR}]}{m_\alpha} \quad (8-4)$$

È importante osservare che  $N'$  può, in particolari situazioni, assumere un valore negativo. Ciò è ammesso anche se una situazione del genere può presentare problemi di convergenza. In ogni caso, non è ammissibile un valore negativo per lo sforzo di taglio mobilitato (eq. (8-1)). PARATIE PLUS, in questa versione, limita a zero il valore del taglio mobilitato, ma prosegue in ogni caso il calcolo, al contrario di quanto non facciano altri codici di calcolo.

Imponendo ora l'equilibrio in direzione orizzontale del concio, è possibile esprimere la componente normale  $E_R$  sulla faccia destra del concio:

$$E_R = E_L - \left( \frac{s_\alpha}{m_\alpha} \right) \cdot [KK + (X_R - X_L) \cdot \text{DIR}] + XX$$

in cui si è posto, sempre per comodità di scrittura:

$$s_\alpha = \left[ \sin \alpha - \frac{(\tan \phi \cdot \cos \alpha)}{F_s} \cdot \text{DIR} \right]$$

$$XX = \text{DIR} \cdot \left[ \frac{C \cdot \sin \alpha \cdot \text{DIR}}{F_s} - k_n \cdot W \right] + (U_\beta \cdot \sin \beta - U_\alpha \cdot \sin \alpha) + Q \cdot \sin \delta \quad (8-5)$$

Ricordando che

$$X_R = \lambda \cdot f_R \cdot E_R \quad X_L = \lambda \cdot f_L \cdot E_L$$

si ottiene infine

$$E_R = \frac{E_L \cdot \left( 1 + \frac{s_\alpha}{m_\alpha} \lambda \cdot f_L \cdot \text{DIR} \right) + \left[ XX - KK \frac{s_\alpha}{m_\alpha} \right]}{\left( 1 + \frac{s_\alpha}{m_\alpha} \lambda \cdot f_R \cdot \text{DIR} \right)} \quad (8-6)$$

Grazie alla (8-6), nota  $E_L$  per il primo concio (in genere nulla), pensando noti  $\lambda$  e  $F_S$ , è possibile determinare la distribuzione delle forze interconcio e, tramite la (8-4), determinare  $N'$ , a sua volta funzione delle ipotesi relative al metodo adottato, ipotesi che si annidano in  $\lambda$ ,  $f_L$  e  $f_R$ .

Si può ora imporre l'equilibrio alla rotazione attorno ad un generico punto (O) e l'equilibrio generale alla traslazione in direzione orizzontale.

Con la prima condizione, è possibile ottenere un coefficiente di sicurezza  $F_S=F_{S,M}$ , mentre con la seconda  $F_S=F_{S,T}$ . In entrambi i casi il coefficiente di sicurezza è espresso nel seguente modo:

$$F_S = \frac{\text{Azioni globali stabilizzanti}}{\text{Azioni globali instabilizzanti}} \quad (8-7)$$

Quindi

$$F_{S,M} = \text{DIR} \cdot \frac{\sum_i M_{\text{resist},i}}{\sum_i M_{\text{instab},i}} \quad (8-8)$$

$$M_{\text{resist},i} = S_i \cdot [-\cos \alpha_i \cdot (z_{b,i} - z_O) + \sin \alpha_i \cdot (y_{b,i} - y_O)]$$

$$M_{\text{instab},i} = W_i \cdot (1+k_v) \cdot (y_{G,i} - y_O) + Q_i \cdot \cos \delta_i \cdot (y_{t,i} - y_O) - N'_i \cdot [\cos \alpha_i \cdot (y_{b,i} - y_O) + \sin \alpha_i \cdot (z_{b,i} - z_O)] + \\ + U_{\beta,i} \cdot [\cos \beta_i \cdot (y_{\beta,i} - y_O) + \sin \beta_i \cdot (z_{\beta,i} - z_O)] - U_{\alpha,i} \cdot [\cos \alpha_i \cdot (y_{\alpha,i} - y_O) + \sin \alpha_i \cdot (z_{\alpha,i} - z_O)] + \\ + Q_i \cdot \sin \delta_i \cdot (z_{t,i} - z_O) - \text{DIR} \cdot k_h \cdot W_i \cdot (z_{G,i} - z_O)$$

$$F_{S,H} = \text{DIR} \cdot \frac{\sum_i H_{\text{resist},i}}{\sum_i H_{\text{instab},i}} \quad (8-9)$$

$$H_{\text{resist},i} = S_i \cdot \cos \alpha_i$$

$$H_{\text{instab},i} = (N'_i + U_{\alpha,i}) \cdot \sin \alpha_i - U_{\beta,i} \cdot \sin \beta_i - Q_i \cdot \sin \delta_i + \text{DIR} \cdot k_h \cdot W_i$$

ove

$(y_O, z_O)$  Coordinate del polo attorno a cui si impone l'equilibrio alla rotazione

$(y_b, z_b)_i$  Coordinate del punto medio della base del concio i-esimo, dove è applicata  $N'$

$(y_t, z_t)_i$  Coordinate del punto medio della sommità del concio, dove è applicata  $Q$

$(y_G, z_G)_i$  Coordinate del baricentro del concio

$(y_\alpha, z_\alpha)_i$  Coordinate del punto d'applicazione di  $U_\alpha$

$(y_\beta, z_\beta)_i$  Coordinate del punto d'applicazione di  $U_\beta$

Si noti che la (8-8) e la (8-9) sono equazioni implicite perché l'incognita  $F_{S,M}$  (o  $F_{S,T}$ ) appare anche nei termini delle sommatorie a secondo membro.

Con il metodo di M&P, la soluzione viene raggiunta come segue:

1. all'inizio si pone  $\lambda=\lambda_0$  con  $\lambda_0$  = valore iniziale posto pari a 0 oppure ad un valore basata sulle indicazioni consigliate dagli Autori del metodo (un valore legato alla pendenza media del versante)
2. tenendo fisso  $\lambda$ , si calcolano (con un processo iterativo)  $F_{S,M}(\lambda)$  e  $F_{S,T}(\lambda)$  e quindi la differenza  $\Delta F_S(\lambda) = F_{S,M}(\lambda) - F_{S,T}(\lambda)$
3. se  $\Delta F_S(\lambda)$  è piccola, il valore di  $\lambda$  che rende sostanzialmente uguali  $F_{S,M}(\lambda)$  e  $F_{S,T}(\lambda)$  viene ritenuto il valore "esatto" cui corrisponde il coefficiente cercato. Altrimenti si modifica  $\lambda$  e si ritorna al passo 2.

Il processo risolutivo corrisponde quindi alla ricerca dello zero per l'equazione  $\Delta F_S(\lambda)=0$  tramite un algoritmo di bisezione; ad ogni iterazione, ovviamente, il calcolo della funzione  $\Delta F_S(\lambda)$  comporta un doppio calcolo iterativo sulle (8-8) e (8-9).

Assumendo, come valore iniziale,  $\lambda_0 = 0$ , alla prima iterazione su  $\lambda$ ,  $F_{S,M}(0)$  e  $F_{S,T}(0)$  corrispondono rispettivamente al coefficiente di sicurezza relativo al metodo di Bishop semplificato e al metodo di Janbu semplificato (senza coefficienti correttivi).

Va tuttavia ricordato che la soluzione di M&P può essere confrontata con quella offerta da Bishop semplificato se e solo se la superficie di scivolamento è un arco di cerchio avente centro in O.

PARATIE PLUS, in ogni caso, anche in presenza di una superficie non circolare, determina O con un criterio tale da far coincidere O con il centro del cerchio, nel caso in cui la linea fosse un arco di cerchio.

Nel caso in cui la base del generico concio i-esimo ricada in uno strato non drenato, i contributi ai vari termini delle equazioni (8-8) e (8-9) si modificano come segue:

- nel calcolo della resistenza S, nella (8-1), si pone  $\tan\phi=0$  e  $c'=S_u$  (resistenza a taglio non drenata)
- $U_\alpha$  è posto pari a 0 in tutte le relazioni sopra esposte.

## 8.4 Definizione della superficie di scivolamento

Operando nell'ambito dei metodi all'equilibrio limite, il meccanismo di collasso associato al minimo coefficiente di sicurezza, non è facilmente determinabile in modo automatico. Occorre quindi che l'utente suggerisca al programma la superficie, o le superficie, tra le quali ricercare quella avente coefficiente di sicurezza minimo.

Poiché PARATIE PLUS è in grado di calcolare solo il coefficiente di sicurezza minimo fra quelli associati alle superficie generate secondo i criteri stabiliti dall'Utente, non è certo che valore sia il minimo assoluto.

Si suggerisce quindi di utilizzare i diversi criteri disponibili.

PARATIE PLUS prevede, nella versione attuale, quattro criteri, per la cui definizione, i parametri geometrici possono essere definiti nella dialog box delle opzioni e successivamente modificati interattivamente operando con degli handler che appaiono attivando i vincoli selezionati.

### 8.4.1 Archi di cerchio aventi centro noto e raggi compresi in un intervallo

L'Utente stabilisce le coordinate del centro, raggio massimo e raggio minimo tra cui ricercare la superficie critica.

Le linee di scivolamento saranno comprese tra i due archi rossi in figura.

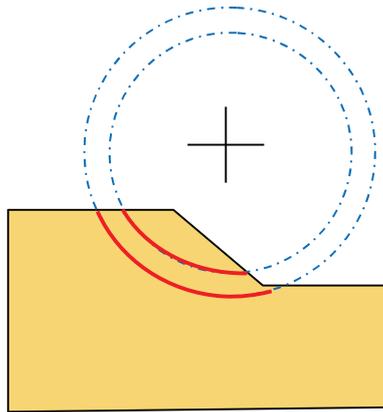


Figura 8-5 : superficie circolari concentriche

### 8.4.2 Archi di cerchio entranti e uscenti in posizioni note

In base ad un intervallo di entrata (a monte) e uno di uscita (a valle) stabiliti dall'Utente, vengono generati diversi archi di cerchio, contraddistinti ovviamente da diversi centri.

Questa è certamente una delle modalità più utili nella pratica per definire l'intervallo di ricerca. L'utente deve assegnare il raggio massimo, mentre PARATIE PLUS determina, per ogni coppia di estremi, il raggio minimo come la semi-distanza tra i due punti. Il numero di raggi compresi tra  $R_{max}$  e  $R_{min}$  va stabilito dall'Utente, tenendo presente che PARATIE PLUS, in questa versione, prende in esame raggi posti ad intervalli uguali.

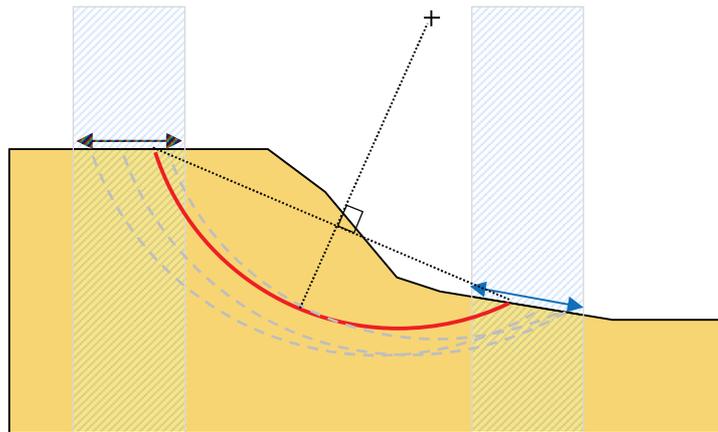


Figura 8-6 : superfici circolari isocentriche

### 8.4.3 Griglia dei centri e limiti geometrici sui raggi

Per ogni centro su una griglia quadrangolare definita dall'Utente, vengono generati diversi archi. Il raggio massimo è stabilito in modo che l'arco non interessi una zona di terreno sotto una quota stabilita  $Z_{min}$ ; il raggio minimo è stabilito facendo in modo che vi sia un approfondimento minimo  $d_{min}$  locale rispetto alla superficie del terreno. La griglia dei centri è definita dalle coordinate di quattro punti (A, B, C, D), assegnati in modo che il percorso chiuso da A ad A descriva una rotazione anti-oraria.

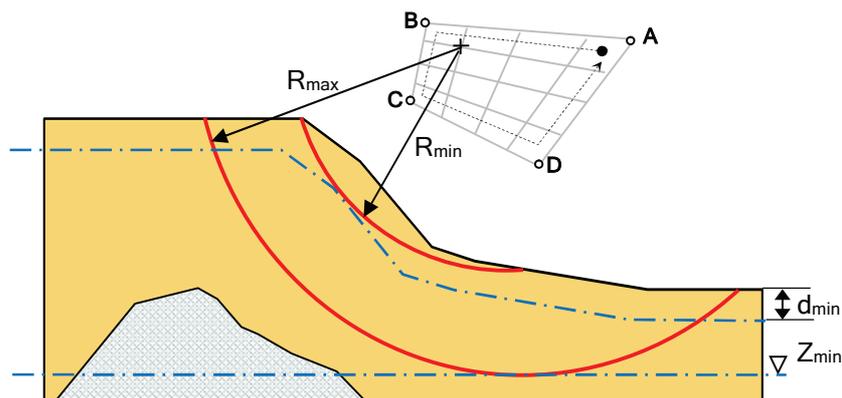
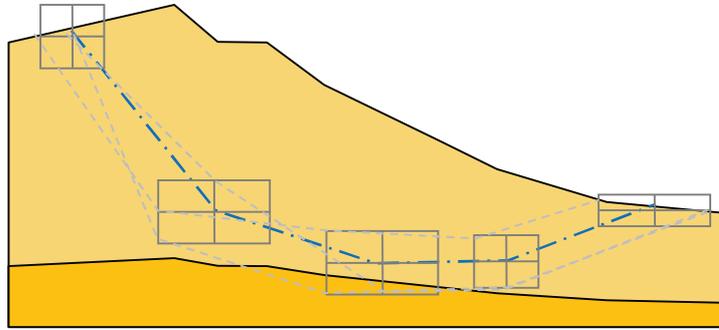


Figura 8-7 : griglia dei centri e vincoli sui raggi

Con questa modalità è possibile ricavare la classica rappresentazione delle iso-asfaliche (Nova (2002)), ossia delle curve a egual coefficiente di sicurezza nella regione corrispondente alla griglia dei centri. La griglia dei centri dovrebbe estendersi verso punti piuttosto lontani dalla superficie del terreno; occorre, nella pratica, procedere per tentativi.

#### 8.4.4 Superficie di scivolamento generica definita tramite una spezzata

Si può definire una polilinea che entra ed esce dal terreno. In corrispondenza di ogni punto è definibile una regione rettangolare modificabile, punto per punto.



**Figura 8-8 : polilinee generate partendo da una traccia base**

PARATIE PLUS genererà una serie di polilinee, nel numero definito dall'Utente, modificando in modo casuale la posizione di ogni vertice, in modo tale che ognuno ricada nella regione di appartenenza.

La prima superficie, in ogni caso, corrisponde alla linea che unisce i vari punti definiti dall'utente.

Questa modalità non è compatibile con il metodo di Bishop.

## 8.5 Definizione del problema

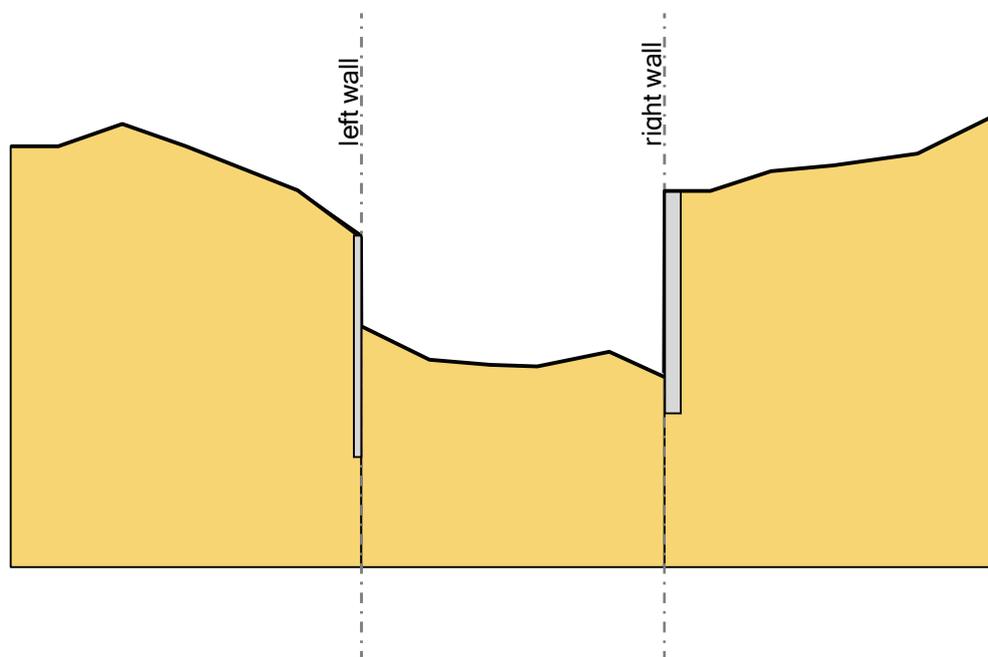
### 8.5.1 La superficie del terreno e la presenza di opere di sostegno

La geometria del problema viene ereditata dalla geometria della fase di calcolo prevista da PARATIE PLUS per la modellazione dello scavo e lo studio delle opere di sostegno.

La linea di superficie del terreno si compone, in generale, di tre linee:

- la linea della superficie a sinistra della paratia di sinistra
- la superficie tra le due paratie
- la superficie a destra della parete di destra

PARATIE PLUS costruisce una sola superficie (linea spezzata) combinando queste tre parti. In presenza di pareti di sostegno e di scavo approfondito, come è normale, rispetto alla quota del terreno di monte, si determinano due segmenti verticali.



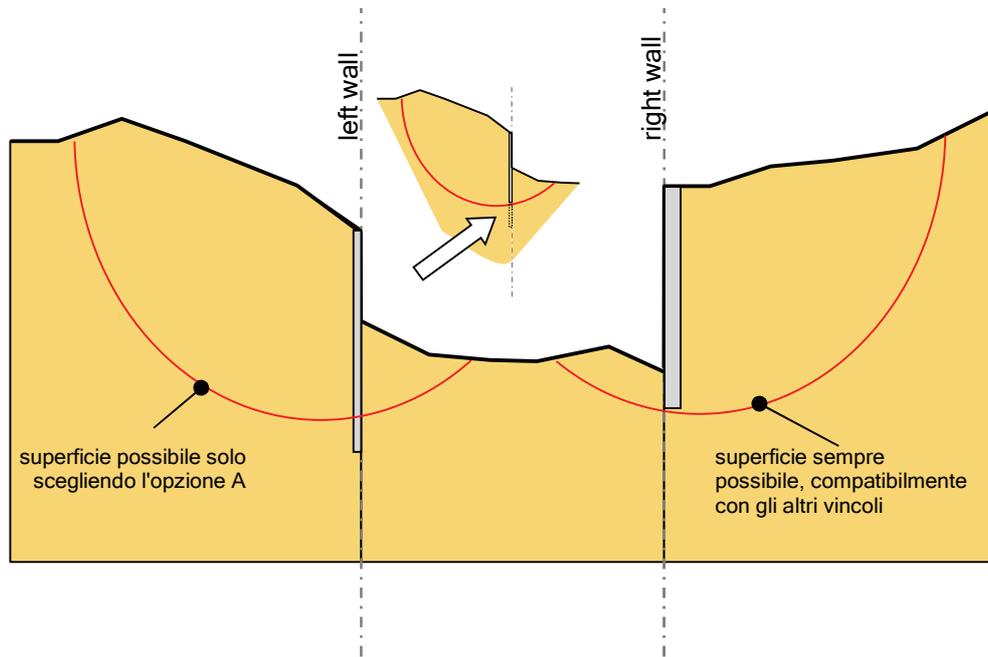
**Figura 8-9: presenza di pareti**

Le pareti vengono prese in esame nella configurazione della fase corrente: in altre parole vengono considerati tutti gli elementi WALL (Beam) attivi in questa fase.

La presenza di questi elementi può essere messa in conto, nella stabilità del pendio, nei seguenti modi:

- OPZIONE A. le pareti vengono semplicemente ignorate: una superficie le può attraversare
- OPZIONE B. le pareti non possono essere attraversate da alcuna superficie di scivolamento.

In Figura 8-10, sono esemplificate le due possibilità.



**Figura 8-10: presenza di pareti - possibili opzioni**

Nel definire la suddivisione in conci della porzione potenzialmente instabile, PARATIE PLUS assume che lo spessore delle pareti sia trascurabile.

## 8.5.2 Compatibilità con gli elementi strutturali

Nella seguente tabella sinottica è riassunta la compatibilità fra gli elementi strutturali e l'analisi di stabilità.

TIPO		Compatibilità	osservazioni
PARETE		SI	Vedi avvertenze al punto 8.5.1
ARMATURA PARETE		SI	È ignorata in quanto non condiziona in alcun modo il calcolo
PARETE COMPOSTA		SI	Vedi avvertenze al punto 8.5.1
TIRANTE		SI	Vedi punto 8.5.3
PUNTONI		NO	PARATIE PLUS ignora tali elementi, ma chiede esplicitamente conferma all'utente prima di effettuare il calcolo
PUNTELLO		NO	
SOLETTA		NO	
VINCOLO FISSO		NO	
VINCOLO ELASTOPL.		NO	
ELEMENTI CSLIP		NO	
ANELLO DI CONTRASTO		NO	

### 8.5.3 I tiranti e i carichi esterni

Un tirante può costituire un contributo ai fini della stabilità della massa potenzialmente instabile.

PARATIE PLUS include tale contributo nel seguente modo (Figura 8-11):

1. determina la resistenza di calcolo  $F_{anchor}$  disponibile, pari al minimo tra
  - a. la resistenza strutturale
  - b. la resistenza del tratto ancorato al terreno, per la sola quota-parte della fondazione esterna alla superficie di scivolamento ( $L_{B,avl}$  in figura)
2. individua il concio la cui base contiene l'intersezione tra la superficie di scivolamento e il tirante, ad esempio il concio 2 in figura;
3. nel risolvere le condizioni di equilibrio locale di quel concio, aggiunge il contributo  $F_{anchor}$
4. assembla il contributo del concio, dipendente quindi anche dalla resistenza di calcolo del tirante, nelle equazioni risolventi globali ed esegue il calcolo del coefficiente di sicurezza come di routine.

Si osservi che la resistenza di calcolo strutturale dipende dal coefficiente di sicurezza parziale  $\gamma_M$  sul materiale, a sua volta dipendente dalla DA esaminata; in modo analogo, la resistenza geotecnica (vedi anche paragrafo 8.9).

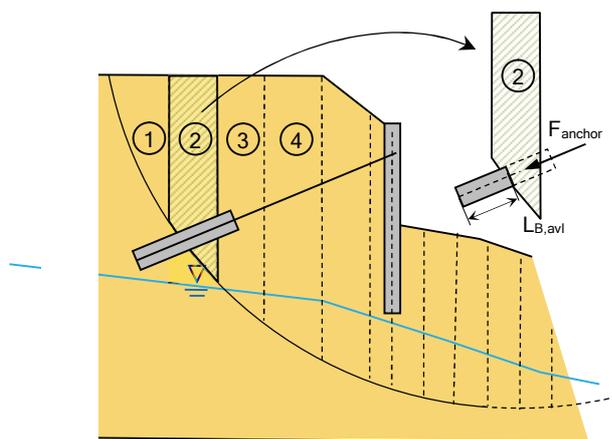


Figura 8-11 : inserimento di un tirante

Un tirante totalmente contenuto nell'ammasso instabile non produce alcun effetto stabilizzante.

Si noti poi che, per ipotesi, il tirante è in grado di ancorarsi efficacemente all'ammasso instabile: questa ipotesi è in genere implicitamente verificata se il tirante è ancorato ad un'opera di sostegno strutturale; al contrario, tale assunzione può non essere verificata se il tirante simula, ad esempio, una geo-griglia.

Il precarico assegnato al tirante non ha alcun effetto su questo tipo di calcolo.

Le equazioni descritte nel paragrafo 8.3.2 ricevono i seguenti contributi.

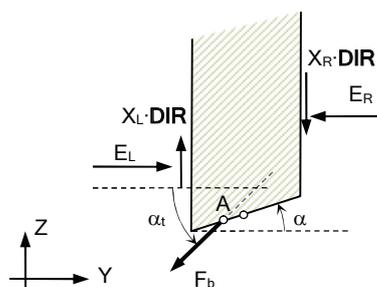


Figura 8-12 : contributo di un tirante

$$N' = N' \text{ (eq. (8-2))} + \frac{F_b \cdot \sin \alpha_t}{m_\alpha} \quad \text{da cui,}$$

$$KK = KK \text{ (eq.(8-3))} + F_b \cdot \sin \alpha_t \quad ; \quad XX = XX \text{ (eq. (8-5))} - F_b \cdot \cos \alpha_t$$

Al termine instabilizzante nell'equazione (8-8) , si deve aggiungere il seguente termine

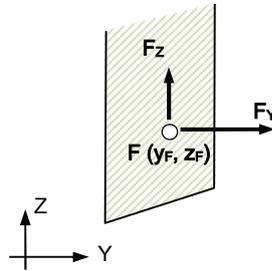
$$M_{\text{instab},i} = \dots + F_b \cdot [\sin \alpha_t \cdot (y_A - y_O) - \cos \alpha_t \cdot (z_A - z_O)]$$

Al termine instabilizzante nell'equazione (8-9), si deve aggiungere il seguente termine

$$H_{\text{instab},i} = \dots + F_b \cdot \cos \alpha_t$$

Si noti che in entrambi i casi, l'effetto del tirante si ripercuote anche (e soprattutto) sull'effetto stabilizzante, grazie all'incremento apportato a N'.

In modo analogo possono essere messi in conto carichi esterni, come segue.



**Figura 8-13 : contributo di carico esterno**

$$N' = N' \text{ (eq. (8-2))} - \frac{F_Z}{m_\alpha} \quad \text{da cui,}$$

$$KK = KK \text{ (eq.(8-3))} - F_Z \quad ; \quad XX = XX \text{ (eq. (8-5))} + F_Y$$

Al termine instabilizzante nell'equazione (8-8) , si deve aggiungere

$$M_{\text{instab},i} = \dots + [F_Y \cdot (z_F - z_O) - F_Z \cdot (y_F - y_O)]$$

Al termine instabilizzante nell'equazione (8-9), si deve aggiungere

$$H_{\text{instab},i} = \dots - F_Y$$

### 8.5.4 Compatibilità con le opzioni di carico

TIPO		Compatibilità	Osservazioni
CARICO DI SUPERFICIE AGENTE SU UNA PORZIONE LIMITATA		SI	Viene assegnato ai conchi su cui grava
CARICO LATERALE DISTRIBUITO SU UNA PARETE		SI	vedi figura
CARICO CONCENTRATO SU UNA PARETE		SI	Ignora il momento (vedi figura)
SOVRACCARICO GENERALE		SI	Considerato come carico permanente

Tutti i contributi vengono amplificati del coefficiente di sicurezza parziale  $\gamma_F$  relativo alla DA in esame.

Ogni quota parte di carico distribuito e ogni carico concentrato al di sotto della superficie di scivolamento viene ignorato (al di sotto del punto B nella figura seguente). In generale, i carichi sono comunque inclusi, anche nel caso in cui non esista una vera e propria opera di sostegno.

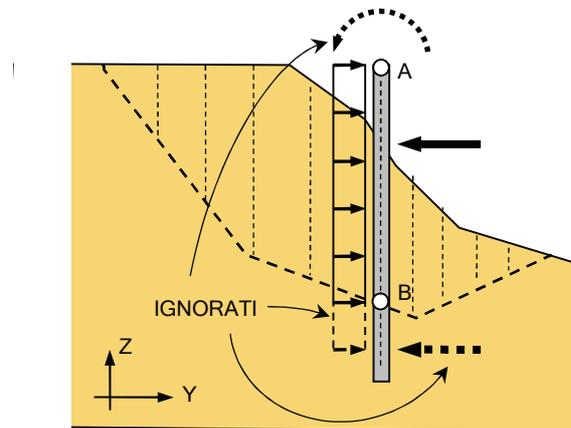


Figura 8-14: carichi laterali tenuti in conto da VSP

### 8.5.5 Compatibilità con altre opzioni di analisi

OPZIONE		Compatibilità	osservazioni
ZCUT		SI	È applicata ai soli elementi <b>parete</b> o <b>tirante</b> ed ai <b>carichi sulla parete</b>
DRED		--	Opzione ininfluyente ai fini del calcolo
MODIFICA PARAMETRI TERRENO		SI	Nel calcolo considera i parametri correnti (vedere avvertenze nel paragrafo 8.6.1)
MODIFICA MATERIALI STRUTTURALI		--	Opzione ininfluyente ai fini del calcolo

## 8.6 La stratigrafia

### 8.6.1 Aspetti generali

La stratigrafia di calcolo è quella utilizzata anche per altri tipi di analisi.

I pesi di volume sono moltiplicati per il coefficiente parziale  $\gamma_G$  della DA in esame.

Nel caso di materiali ordinari (alla Mohr Coulomb), le resistenze di calcolo sono:

$$c'_d = c' / \gamma_c \text{ e } \tan(\phi'_d) = \tan(\phi') / \gamma_\phi$$

dove  $\gamma_c$  e  $\gamma_\phi$  sono i coefficienti di sicurezza parziali (M) relativi alla DA in esame.

Nel caso di argille, vanno assegnati parametri di resistenza drenati ( $c'_{slope}$  e  $\phi'_{slope}$ ) e non drenati ( $S_{u,slope}$ ) differenti – in generale – da quelli utilizzati dal modello CLAY del solutore PARATIE: pertanto, in condizioni non drenate, la resistenza di taglio introdotta nel calcolo, sarà:

$$S_{u,d} = S_{u,slope} / \gamma_{cu}$$

Se il valore  $S_{u,slope}$  è omesso oppure è posto pari a zero, Paratie Plus calcola la resistenza a taglio non drenata sulla base dei valori  $S_{u,0}$  e  $\Delta S_u$  assegnati come parametri di resistenza per un calcolo Paratie in condizione non drenate, con approccio semplificato (ovvero come valori ridondanti della resistenza a taglio non drenata da confrontare con la resistenza regolata dal percorso degli sforzi efficaci, come discusso nel manuale delle Teoria). In quest'ultimo caso, Paratie Plus determina la resistenza a taglio locale a base del concio, come indicato nella Figura 8-15, assumendo che  $S_{u,0}$  corrisponda alla resistenza a taglio alla sommità dello strato, sulla verticale corrispondente al punto medio della base del generico concio. Naturalmente, anche in questo caso, verrà applicato il coefficiente di sicurezza  $\gamma_{cu}$ , se richiesto.

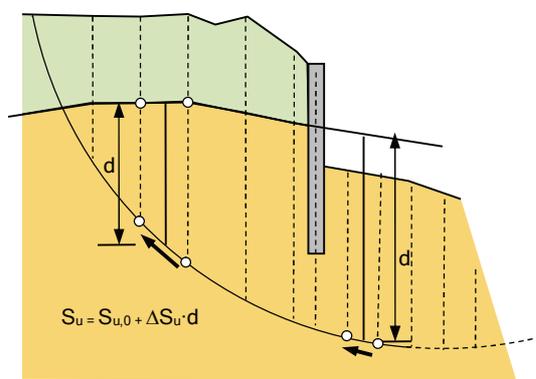


Figura 8-15 : calcolo della resistenza a taglio variabile con la profondità

Viceversa, in condizioni drenate, l'argilla è assimilata ad un generico materiale alla Mohr-Coulomb.

La resistenza alla base di ogni concio con cui è suddivisa la regione instabile viene calcolata con i parametri dello strato in cui la base si trova.

Per i materiali rocciosi è possibile definire la giacitura di un sistema (distribuito) di giunti, a cui sono attribuite resistenze diverse da quelle dell'ammasso integro.

Se la base del concio è inclinata come la possibile giacitura ( $Dip \pm Dip\_variation$ ), VSP mette in conto i parametri del giunto piuttosto che quelli dell'ammasso. L'angolo che identifica la giacitura va definito con le convezioni in Figura 8-16.



## 8.7 La presenza dell'acqua

Le condizioni idrauliche sono ereditate da quelle definite per il modello di calcolo dell'opera di sostegno. Occorre tuttavia far notare non tutte le modalità di inserimento della freatica accettabili per il calcolo PARATIE sono compatibili per questo tipo di analisi.

In particolare:

- CASO 1. falda definita attraverso freatica a monte e a valle della paratia: questa modalità, che tra l'altro è la modalità di default per il calcolo della parete di sostegno flessibile, in generale **non è ammissibile** per il calcolo di stabilità. Tuttavia PARATIE PLUS accetta di eseguire il calcolo di stabilità se e solo se le quote della falda sono le stesse nelle tre regioni, ossia se la freatica è costante.
- CASO 2. pressioni idrauliche assegnate in forma tabellare lungo la parete: anche questa modalità **non è ammissibile**.
- CASO 3. superficie freatica assegnata per punti: questa modalità è **ammissibile**.
- CASO 4. definizione del regime di flussi e pressioni conseguente ad un calcolo di filtrazione: questa modalità è **ammissibile**.

Nel CASO 3), PARATIE PLUS determina la pressione dell'acqua come indicato nella figura seguente.

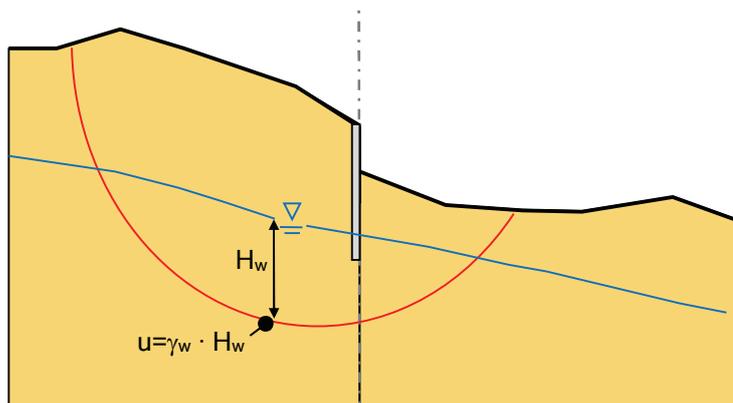


Figura 8-18: calcolo della pressione dell'acqua nel caso di freatica assegnata per punti

Una situazione come quella in Figura 8-19, viene presa in considerazione da PARATIE PLUS..

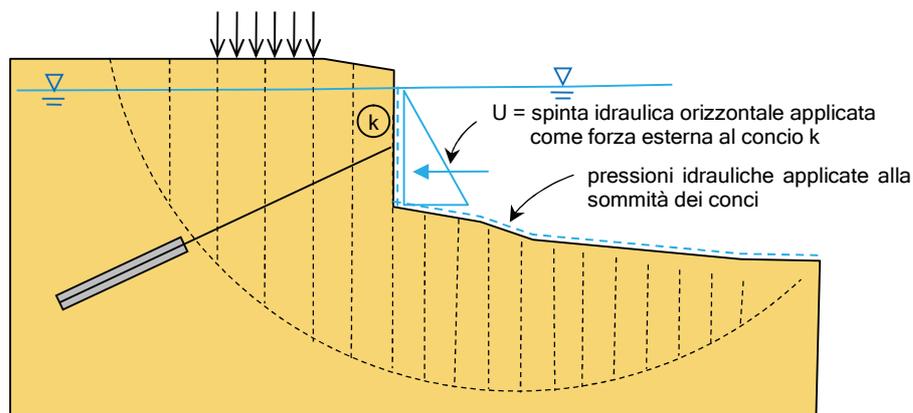


Figura 8-19: pressione dell'acqua su una faccia laterale

## 8.8 Il carico sismico

L'accelerazione di riferimento  $a_{max}$  è mutuata dal valore assegnato nella fase di analisi della parete. In questa sede viene tuttavia ridefinito il moltiplicatore  $\beta$  (secondo la simbologia della Normativa Italiana), in quanto è in generale diverso da quello utilizzato per il calcolo della parete di sostegno.

l'accelerazione pseudo-statica orizzontale è quindi pari a:

$$k_h = \beta \cdot a_{max}$$

Viene inoltre specificato il coefficiente sismico  $k_v$ , come frazione di  $k_h$ , positivo verso il basso

Il coefficiente  $R_u$  di incremento sismico delle pressioni dell'acqua viene mutuato dai dati generali dello stage.

Quando viene prescritto tale valore, nel caso in cui il piede del concio sia immerso, alla pressione statica  $u$ , viene sommato una pressione  $\Delta u$  dato da

$$\Delta u = R_u \cdot \sigma'_v$$

PARATIE PLUS lega tale incremento alla sola componente gravitazionale dello sforzo efficace, ossia al peso del concio, diminuito della pressione dell'acqua in condizioni statiche.

Nelle equazioni risolventi (sviluppate nel paragrafo 8.3.2), al termine  $U_\alpha$  viene sostituito il termine

$$U_{\alpha,E} = U_\alpha + \left( \frac{W}{\cos \alpha} - U_\alpha \right) \cdot R_u = U_\alpha \cdot (1 - R_u) + \frac{W}{\cos \alpha} \cdot R_u$$

dove  $U_\alpha$  è la risultante delle pressioni dell'acqua alla base in condizioni non sismiche.

Anche in presenza di acqua libera (ad esempio un lago), le sovrappressioni idrodinamiche non vengono incluse.

## 8.9 Compatibilità con le Design Assumption

Vengono utilizzati i seguenti coefficienti

	coeff. parziale		
A (Azioni)	$\gamma_G$	permanenti <b>sfavorevoli</b>	Moltiplica tutti i pesi ed i carichi permanenti
	$\gamma_Q$	variabili <b>sfavorevoli</b>	Moltiplica tutti i carichi variabili (fondazioni nastriformi ecc)
M (parametri terreno)	$\gamma_{c'}$	coesione efficace	Tramite questi coefficienti vengono modificati i parametri geomeccanici relativi ai diversi strati
	$\gamma_\phi$	tangente angolo attrito	
	$\gamma_{cu}$	coesione non drenata	
R (resistenze)	$\gamma_R$	Il coefficiente indicato dalle Norme non modifica le resistenze durante il calcolo, ma deve essere utilizzato come valore del coefficiente di sicurezza minimo richiesto	

Alla luce di tali assunzioni, occorre tenere presente quanto segue:

- Un calcolo che si riferisce ad una DA a cui sono associati coefficienti di sicurezza unitari (tipicamente la DA "Nominal" (di default, sempre presente) o una DA associata ad uno stato limite di servizio) coincide con un calcolo tradizionale, per il quale in genere si richiede un coefficiente di sicurezza almeno pari a 1.30 (secondo la normativa italiana previgente).
- Un calcolo per una DA di tipo GEO, alla luce di EC7 o della norma italiana, corrisponde di regola ad adottare l'Approccio 1, combinazione 2. In tal caso il coefficiente di sicurezza da garantire è definito dalle Norme: per NTC2008 è pari a 1.1.
- Richiedere la verifica di stabilità nell'ambito di una DA di tipo STRU è consentito da PARATIE PLUS ma non è coerente né con le Norme in genere né con la logica. Tuttavia questa valutazione è lasciata all'Utente.
- Nel caso in cui la stabilità riceva un contributo da parte di tiranti, la resistenza di calcolo offerta da questi elementi è calcolata in base ai criteri generali, che prevedono la riduzione delle resistenze per mezzo dei relativi coefficienti parziali (coefficienti  $\gamma_{Ra}$  e fattori di correlazione  $\xi$  indicati dalla Norma ed implementati in PARATIE PLUS). A sua volta, il contributo di ogni tirante sarà ulteriormente ridotto dal coefficiente di sicurezza globale calcolato con il metodo prescelto.
- Se sono presenti chiodature queste vengono trattate esattamente come i tiranti, mentre nel caso di geotessili di rinforzo attualmente si assume  $\gamma_R = 1$  per qualunque Design Assumption
- Le pressioni interstiziali sono sempre introdotte con moltiplicatore unitario.
- Gli eventuali carichi variabili come, in particolare, i sovraccarichi nastriformi, sono sempre considerati sfavorevoli, anche se tale ipotesi può non essere corretta (vedi Figura 8-20). Si raccomanda pertanto di non disporre carichi localizzati in corrispondenza della parte stabilizzante dell'ammasso instabile.

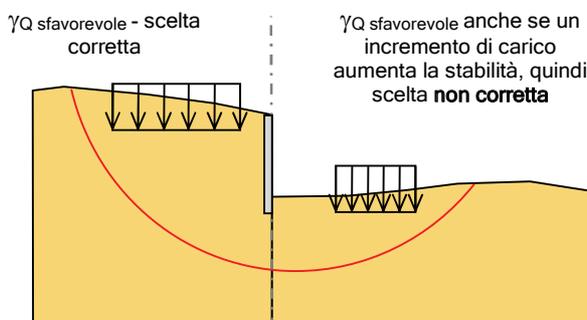


Figura 8-20: attribuzione dei coefficienti di sicurezza sulle azioni variabili

## 8.10 L'esame dei risultati

L'esame dei risultati può essere condotto tramite i semplici strumenti grafici qui riassunti.



Mostra la superficie critica, rappresentando anche la suddivisione in concii.

Con un doppio clic sui concii, si apre una tabella che riassume le grandezze salienti relativi ad ogni concio



Tabella riassuntiva dei coefficienti di sicurezza calcolati per tutte le superfici generate



Traccia di tutte le superfici analizzate



Contour dei coefficienti di sicurezza sovrapposto alla griglia dei centri



Grafico che rappresenta lo sforzo efficace normale a base concio (positivo se di compressione)



Grafico della resistenza a taglio unitaria mobilitata a base concio



Grafico delle azioni orizzontali E tra i concii (normali alle facce tra concii adiacenti). Sono positive le azioni di compressione.



Grafico che rappresenta le azioni taglienti X (verticali) tra i concii.

Il dettaglio delle azioni sui concii può fornire valide indicazioni sulla bontà e, soprattutto, sulla attendibilità della soluzione ottenuta. Si ricorda, a questo proposito, che questi metodi di verifica, per quanto ampiamente utilizzati e riconosciuti come strumenti validi nelle situazioni normali, contengono tuttavia drastiche approssimazioni che, talora, possono comprometterne la validità.

In particolare si sottolinea che:

- il criterio di resistenza è imposto solo alla base dei concii, ossia lungo la superficie di rottura;
- le azioni fra i concii (E e X) sono un risultato legato alle ipotesi introdotte dal singolo metodo;
- non tutte le condizioni di equilibrio globali sono automaticamente soddisfatte.

L'esame delle forze relative ai singoli concii, una volta determinato il coefficiente di sicurezza, può aiutare a comprendere se la soluzione ottenuta sia effettivamente accettabile.

Diagrammando gli sforzi efficaci a base concio, possono essere messi in evidenza, ad esempio, azioni di trazione locali o generali. Tale circostanza può verificarsi, tipicamente, in presenza di strati con elevata resistenza (soprattutto coesione) interposti a strati deboli. Paratie Plus accetta queste situazioni che, se circoscritte, in genere non condizionano eccessivamente il valore del coefficiente di sicurezza complessivo; tuttavia, nel caso in cui le trazioni a base concio riguardassero un'ampia parte della superficie di scorrimento, la soluzione ottenuta dovrebbe essere scartata.

Analogamente, l'esame delle azioni E, normali fra i concii, fornisce utili indizi sulla ragionevolezza della soluzione. In questo caso occorre tenere presente che le azioni interconcio dovrebbero essere tutte preferibilmente di compressione (positive secondo la convenzione adottata da Paratie Plus). Tuttavia possono essere tollerate, localmente, azioni di trazione, pur in contrasto con la fisica che non ammette, in genere, trazione in materiali di questa natura: se circoscritte a pochi concii, tali trazioni non compromettono eccessivamente la soluzione. Diversamente, quando il calcolo evidenzia la presenza di diffuse trazione, significa che lo schema ipotizzato, ovvero la superficie di rottura assunta, non è fisicamente accettabile: vanno quindi presi in considerazioni diversi meccanismi di rottura o differenti approcci di calcolo.

Sempre con riferimento alle azioni normali E, occorre far notare che queste, nel caso di soluzione con il metodo di Bishop, non soddisfano almeno una condizione di equilibrio alla traslazione dell'intera massa

instabile. Le modalità secondo cui tale metodo è stato implementato in Paratie Plus producono un'azione orizzontale E non nulla in corrispondenza della faccia terminale dell'ultimo concio, risultato in evidente contrasto con la fisica ma, di fatto ininfluenza, nei riguardi del coefficiente di sicurezza. La spiegazione di questa apparente contraddizione consiste nel fatto che il metodo di Bishop determina il coefficiente di sicurezza imponendo il solo equilibrio alla rotazione attorno al centro della superficie circolare e ciò fa sì che tale valore non sia condizionato dall'entità delle azioni E.

Al contrario, secondo i metodi di Janbu e M&P, che impongono l'equilibrio anche alla traslazione, la distribuzione delle azioni interconco E risulta in accordo con la fisica. Non è dimostrabile rigorosamente, tuttavia, specie con riferimento al metodo Janbu che trascura gli equilibri alla rotazione, che la soluzione prodotta da tali metodi sia migliore di quella offerta dal metodo di Bishop.

In sintesi, anche alla luce di queste brevi considerazioni, si raccomanda di esaminare con attenzione, con tutti i mezzi offerti da Paratie Plus, i risultati prodotti da questa tipologia di calcolo, prima di accettarne le conclusioni.

## 8.11 Un esempio passo dopo passo

Per familiarizzare con la procedura, consideriamo il semplice esempio proposto da Abramson et al (2005) (paragrafo 6.9.6, Figura 6.25). Si tratta di un versante d'altezza pari a 20 m e pendenza 2H:1V in terreno omogeneo ed in assenza di falda.

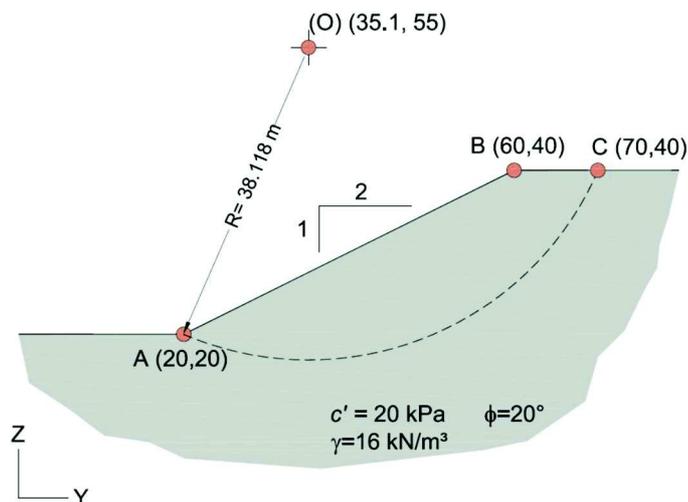


Figura 8-21: esempio (da Abramson et al 2002)

Il coefficiente di sicurezza è valutato per la superficie circolare prestabilita indicata nella Figura 8-21 in cui sono riportati anche i parametri del terreno.

Partiamo con un nuovo modello di default proposto da PARATIE PLUS.

Estendiamo i limiti del modello, adattandoci alla geometria di Figura 8-21. I limiti minimo e massimo per le coordinate orizzontali possono essere 0 e 100, mentre per le quote possiamo prevedere, ad esempio, limiti compresi tra -20 e 60. Per ridefinire tali limiti possiamo aggiustare le proprietà della DS corrente

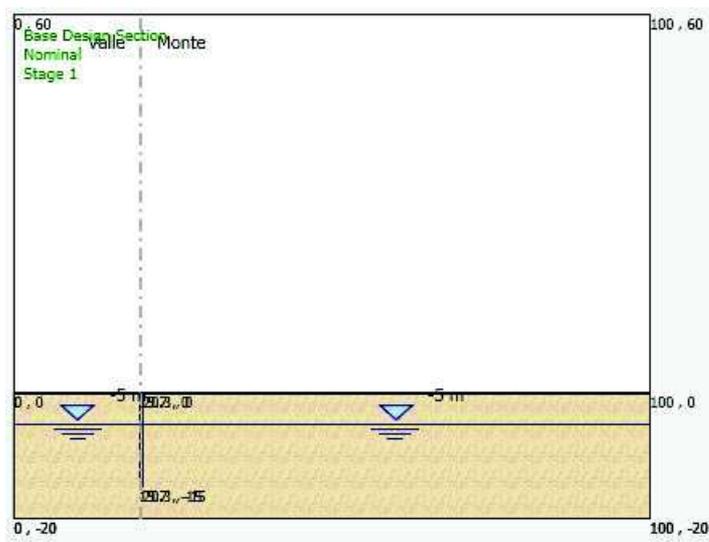


Ora, anche se non strettamente necessario, facciamo in modo che il monte sia a destra, utilizzando

l'opzione .

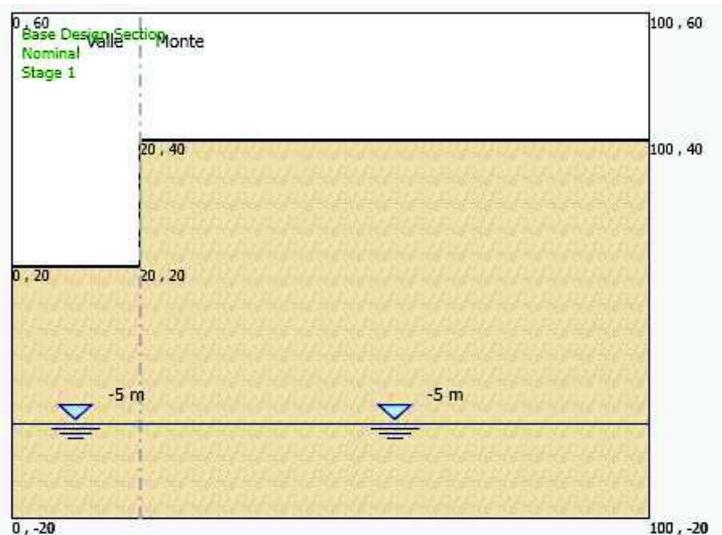
Poniamo inoltre l'ordinata della parete a +20, cliccando sulla traccia della parete stessa e attivando la dialog box che ne permette la ridefinizione della coordinata.

Per chiarezza, attiviamo l'opzione Mostra Punti del menu Vista: otterremo il seguente modello.



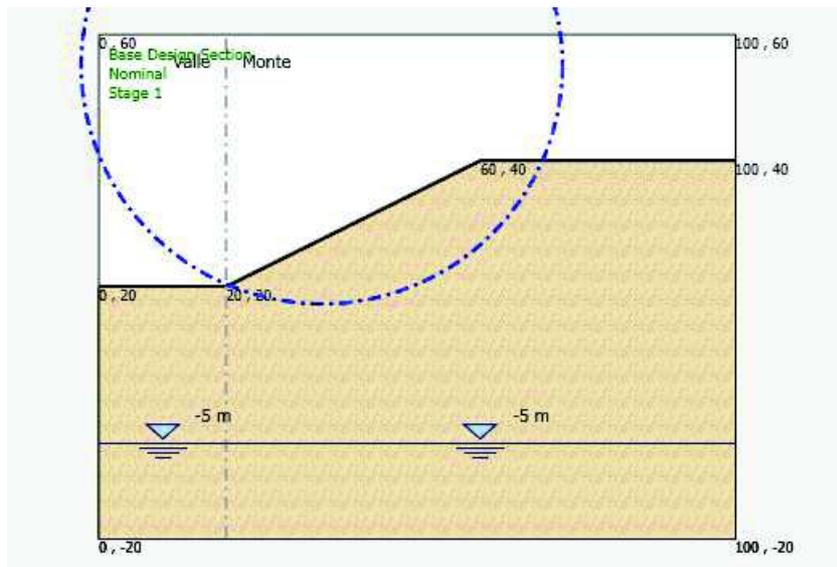
Ora la parete vera è propria può anche essere rimossa (ciò non è tuttavia strettamente necessario). Portiamo il piano campagna a quota +20 a sinistra e a +40 a destra. PARATIE PLUS ci avverte che il terreno è posto al di sopra della massima quota (+0) al di sotto della quale è definita la stratigrafia.

Sarà quindi necessario innalzare la quota sommitale dell'unico strato presente, trascinando verso l'alto l'handler della quota sommitale. Dovremmo ottenere più o meno la seguente rappresentazione:

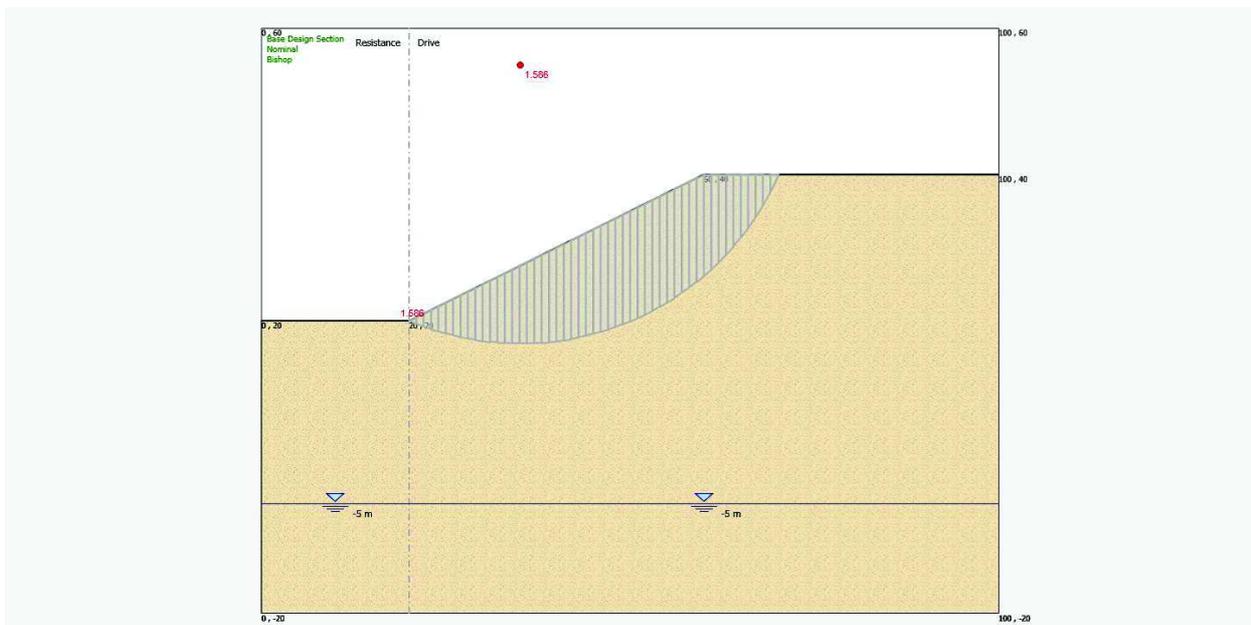


Non ci resta che modellare la superficie del pendio: selezioniamo la linea del piano campagna di destra, quindi, con il tasto destro del mouse, chiediamo di aggiungere un punto. Possiamo ora aggiustare la posizione dei punti della linea di superficie.

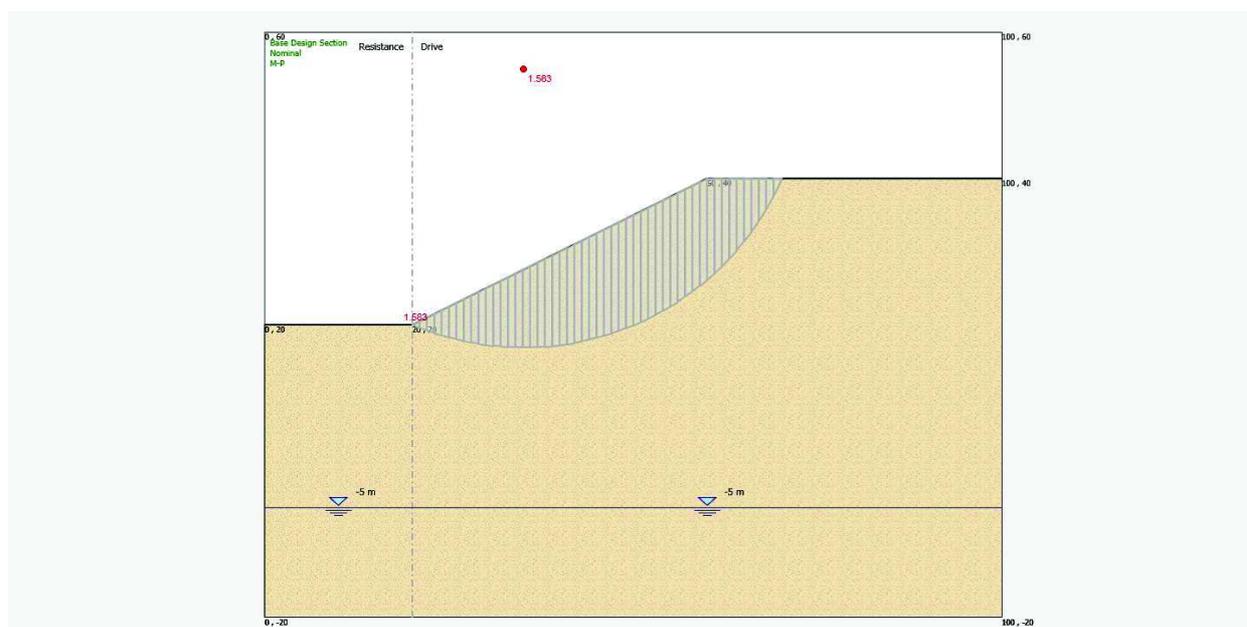




Possiamo ora eseguire il calcolo, con il comando , quindi rappresentare il coefficiente di sicurezza e la suddivisione in conci con il comando . Si ottiene il seguente risultato.



Possiamo ora, dalla dialog box delle proprietà del modello, cambiare il metodo di calcolo, vale a dire passare dal metodo di Bishop a M&P, scegliendo una funzione di forma  $f(x)$  costante. Dopo avere rieseguito l'analisi, si ottengono i seguenti risultati.



Per conoscere, oltre a  $F_s$ , il valore del parametro  $\lambda$ , è necessario attivare la tabella di dettaglio dei conci, nella cui intestazione si riporta il valore di  $\lambda=0.301$ .

Nella seguente tabella, i risultati in termini di  $F_s$  forniti da PARATIE PLUS sono confrontati con quelli riportati da Abramson et al (2002).

	Abramson et al (2002)	PARATIE PLUS
Bishop semplificato	1.544	1.586
M&P $f(x)$ costante	1.589	1.583
M&P $f(x)$ sinuoidale	1.588	
Janbu semplificato	1.373 (*)	1.424(*)

(\*) senza coeff. correttivo di Figura 8-3 ( $f_0 \approx 1.07$ )

Le soluzioni di Bishop e Janbu indicate da Abramson et al (2002) si riferiscono a calcolo manuali basato sulla suddivisione in 10 conci della larghezza di 5 m e sull'introduzione di alcune approssimazioni non del tutto trascurabili riguardanti, ad esempio, l'altezza del generico conco.

Sempre con riferimento all'esempio di letteratura, i risultati riguardanti il metodo di M&P si riferiscono a coefficienti di sicurezza calcolati con il codice XSTABL (per i riferimenti si veda testo citato) (suddivisione con 11 conci).

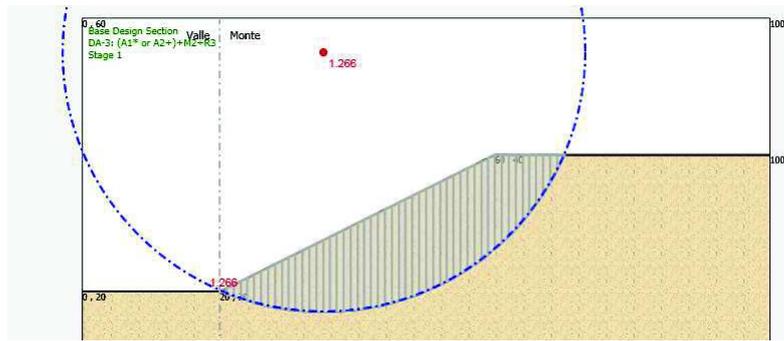
Nel complesso il confronto è molto buono. Per questo tipo particolare di superficie di scivolamento, si può apprezzare come le differenze tra il classico metodo Bishop e quello di M&P siano molto piccole.

acConsideriamo ora la verifica di stabilità in rapporto ad un calcolo agli stati limite. Con la procedura usuale, definiamo una serie di Design Assumptions (DA), recuperando, ad esempio, quelle precodificate secondo le indicazioni degli Eurocodici.

Selezioniamo una DA di tipo A2+M2, per la quale sono previsti i seguenti coefficienti di sicurezza parziali:

$$\gamma_{fr} = \gamma_{c'} = 1.25$$

Dopo avere eseguito il calcolo (con M&P, funzione di forma costante), si ottiene il seguente risultato:



Il valore di  $F_s=1.266$  è coerente con i coefficienti parziali assunti in questo calcolo. Infatti, il coefficiente di sicurezza riferito a un calcolo con parametri caratteristici, sarebbe pari a  $1.266 \cdot 1.25=1.5825$ , in completo accordo con il valore 1.583 prodotto da PARATIE PLUS.

Secondo la Normativa Italiana, il fattore di sicurezza prodotto considerando i valori d'angolo d'attrito e coesioni abbattuti tramite i coefficienti parziali, deve di regola essere pari a 1.1, ossia pari al coefficiente  $\gamma_R$  indicato dalla Norma stessa.

## 8.12 Un esempio con l'inserimento di un tirante

Consideriamo l'esempio in Figura 8-22, riguardante uno scavo in condizioni non drenate in argilla sovraconsolidata, la cui resistenza è espressa in termini di una resistenza a taglio non drenata  $S_u=100$  kPa costante per l'altezza d'interesse.

Per il sostegno dello scavo si prevede una parete, le cui caratteristiche, tuttavia, non vengono prese in conto al fine della stabilità del fronte.

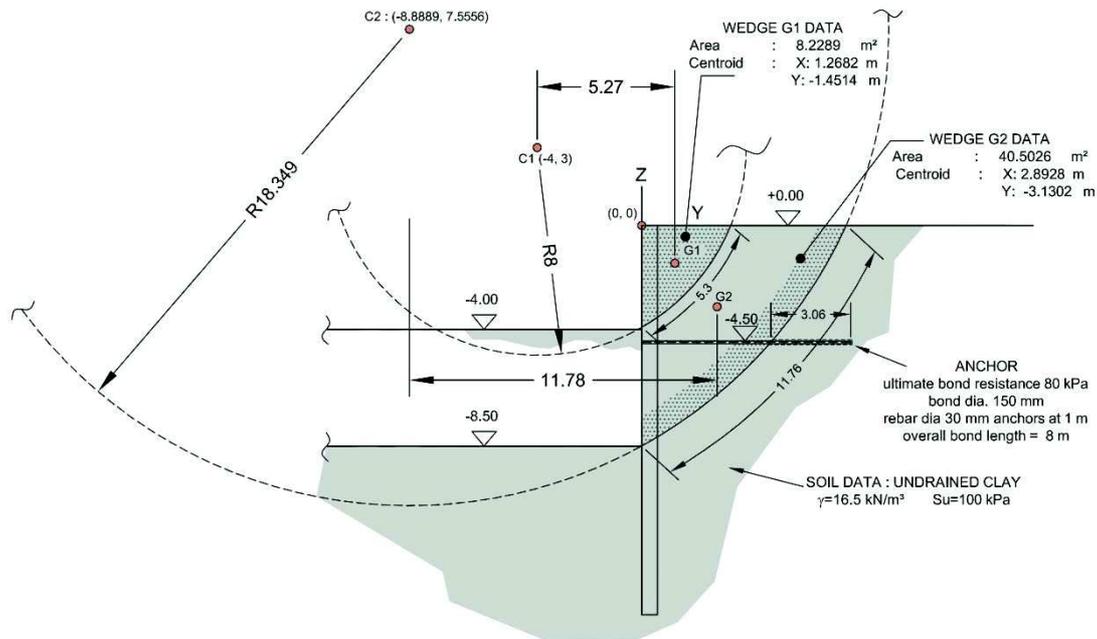


Figura 8-22: scavo non drenato in argilla con inserimento di un tirante

Consideriamo tre situazioni

1. altezza di scavo di 4 m, senza alcun tirante
2. altezza di scavo di 8.5 m, senza tirante
3. inserimento tirante passivo a quota -4.50 m.

Se partiamo, come al solito, dal modello di default, abbiamo una parete (infissa 15 m) posta alla coordinata orizzontale  $X=0$ . Facciamo in modo che il terreno di monte sia a destra: dobbiamo cambiare la scelta di default, per prevedere il monte a sinistra (comando )

Definiamo i parametri dell'unico strato che chiameremo "Clay", ricordando che, nel caso di un'argilla, sia i parametri drenati sia quelli non drenati vanno distinti da quelli utilizzati dal modello CLAY di PARATIE. In questo caso, assegniamo (nella tab resistenza) i seguenti valori, assicurandoci che sia attivo il comportamento non drenato.

For Slope Stability Analysis	
$\phi'$ slope	20 °
$c'$ slope	10 kN/m <sup>2</sup>
$c_u$ slope	100 kN/m <sup>2</sup>

Default Clay Behaviour	
<input type="radio"/>	Drained
<input checked="" type="radio"/>	Undrained
TSP not in use in current DS	

Facciamo inoltre in modo che la falda non interferisca con lo scavo; assegniamo inoltre a entrambi i pesi specifici il valore del peso totale  $\gamma=16.5$  kN/m<sup>3</sup>. Nel caso di materiale completamente non drenato, in linea di massima, gli effetti dell'acqua non entrerebbero mai in gioco, a meno che non si determini una zona di acqua libera (un lago). Quindi, in un caso del genere, sarebbe possibile, in linea di principio, assegnare a monte una quota della freatica diversa da valle, anche senza dover eseguire un calcolo di filtrazione:

tuttavia ciò non è consentito, nella versione attuale di PARATIE PLUS, al fine di evitare situazioni dubbie (vedi paragrafo 8.7).

Definiamo una fase nella quale, a sinistra, abbassiamo lo scavo a quota -4.00 e ricerchiamo il coefficiente di sicurezza minimo associato a diverse superfici circolari con centri in una griglia. Utilizzando un passo di conci pari a 25 cm, e selezionando il metodo di M&P, otteniamo il seguente risultato.

Con la griglia ipotizzata, il coefficiente di sicurezza minimo è associato a un arco di circonferenza di raggio circa pari a 8 m e centro nel punto C1 e quindi alla porzione G1 in Figura 8-22. È immediato ricalcolare il coefficiente di sicurezza imponendo l'equilibrio alla rotazione attorno a C1

Si ha

$$M_{stab,C1} = S_u \cdot L_{arc} \cdot R = (100kPa) \cdot (5.30m) \cdot (8m) = 4240 \cdot kNm/m$$

$$M_{instab,C1} = W_{G1} \cdot (x_{G1} - x_{C1}) = (8.2289m^2 \cdot 16.5kN/m^3) \cdot (5.27m) = 715.5 \cdot kNm/m$$

da cui

$$F_s = \frac{M_{stab,C1}}{M_{instab,C1}} = \frac{4240}{715.5} = 5.926$$

Tra PARATIE PLUS e il risultato atteso si ha una differenza trascurabile, legata anche a una leggera differenza tra il valore del raggio introdotto nel calcolo manuale rispetto al valore preso in considerazione da PARATIE PLUS. Nella pratica, ovviamente, dovrebbero essere analizzate anche altre possibili situazioni, oltre a differenti superfici di scivolamento, comprese superfici non circolari. Alla luce dei fini dimostrativi di questo manuale, ci limitiamo tuttavia a quest'analisi.

Come l'utente potrà verificare, il medesimo coefficiente di sicurezza può essere ottenuto con il metodo di Bishop, mentre, per questa superficie, la soluzione con il metodo di Janbu non converge.

Passiamo ora alla configurazione con un'altezza di scavo di 8.5 m, senza l'applicazione di alcun tirante.

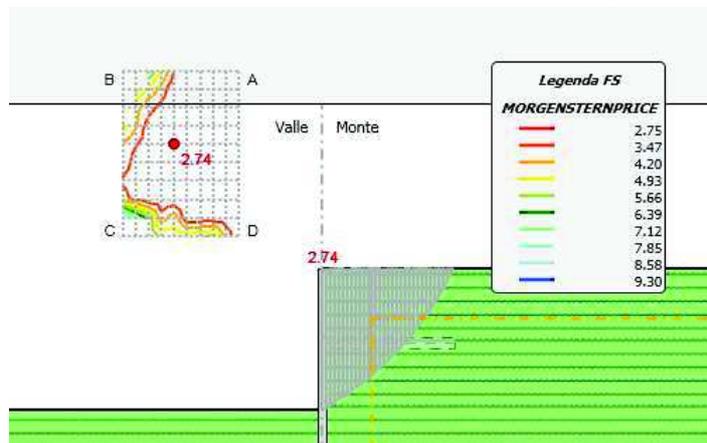
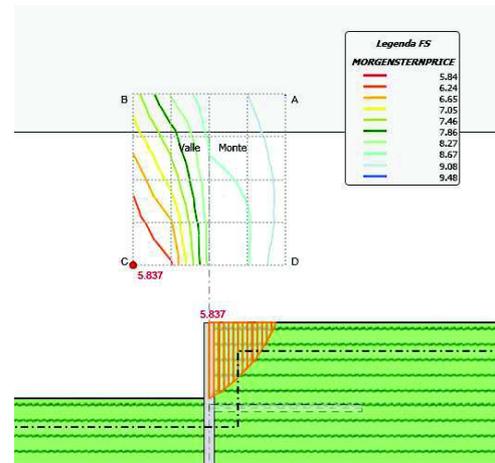
Con il medesimo approccio, ma con una griglia dei centri spostata a sinistra otteniamo i risultati a lato, associati al centro C2 e quindi alla porzione G2 in Figura 8-22.

Si ha

$$M_{stab,C2} = S_u \cdot L_{arc} \cdot R = (100kPa) \cdot (11.76m) \cdot (18.349m) = 21578 \cdot kNm/m$$

$$M_{instab,C2} = W_{G2} \cdot (x_{G2} - x_{C2}) = (40.5m^2 \cdot 16.5kN/m^3) \cdot (11.78m) = 7872 \cdot kNm/m$$

da cui



$$F_s = \frac{M_{stab,C1}}{M_{instab,C1}} = \frac{21578}{7872} = 2.741$$

Ancora lo stesso risultato fornito da PARATIE PLUS. Consideriamo ora il tirante passivo e valutiamone il contributo alla resistenza, basandoci, per il momento, sulla medesima superficie di scorrimento C2, G2.

La resistenza disponibile messa in conto da PARATIE PLUS corrisponde a quella offerta dalla quota-parte di bulbo (di lunghezza  $L_{B,Avl}$ , definita in Figura 8-11) esterna alla superficie di scivolamento, pari in questo caso a 3.06 m.

Con i dati in Figura 8-22, ed assumendo un coefficiente di sicurezza sulla resistenza a sfilamento  $FS=2$ , la resistenza disponibile, per metro di parete è pari a

$$F_{avl} = \left( \pi \cdot D \cdot \frac{q_s}{FS} \cdot L_{B,Avl} \right) \cdot \frac{1}{step} = \left( \pi \cdot (0.15m) \cdot \frac{80kPa}{2} \cdot (3.06m) \right) \frac{1}{1m} = 57.67 \text{ kN/m}$$

quindi

$$M_{instab,C2} = W_{G2} \cdot (x_{G2} - x_{C2}) - F_{avl} \cdot (z_F - z_{C2}) = 7872 - 57.67 \cdot (7.5556 + 4.50) = 7176 \cdot \text{kNm/m}$$

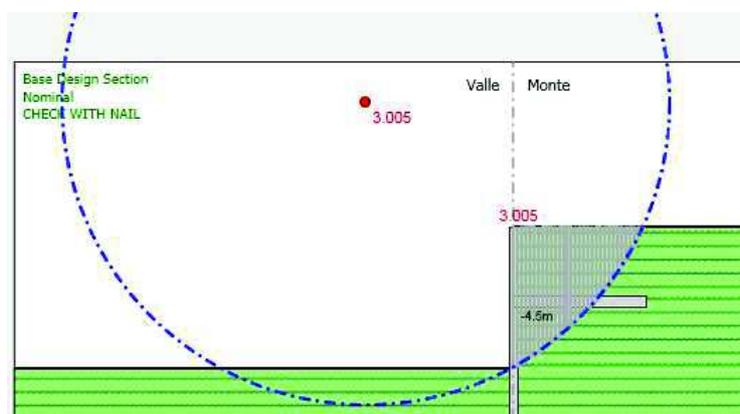
$$F_s = \frac{M_{stab,C1}}{M_{instab,C1}} = \frac{21578}{7176} = 3.007$$

È possibile riprodurre questo calcolo, imponendo una superficie ben precisa, di raggio e centro noti. Possiamo attivare il tirante e rieseguire l'analisi, dopo avere definito, per la resistenza dei tiranti, il coefficiente di sicurezza, nel Menu Verifiche --> Proprietà verifiche, come segue.



Si ottiene il seguente risultato, che conferma le attese.

Tramite l'esame dei risultati riguardanti i singoli conci, è possibile individuare l'azione del tirante considerata da PARATIE PLUS, che coincide con il valore predeterminato sopra.



## 8.13 La stabilità di un argine in presenza di filtrazione

Consideriamo ora un esempio più complesso. In Figura 8-23 si riporta un problema assimilabile a un argine che contiene, sulla destra, un corpo d'acqua. Si studia dapprima, con il modulo SEEPAGE, il regime di filtrazione per determinare la portata da prelevare tramite una schiera di well points posti in prossimità dell'unghia di valle dell'argine, affinché l'area a valle dell'argine sia all'asciutto.

Successivamente sarà possibile studiare la sicurezza dell'argine, nei riguardi della stabilità.

Per una valutazione della qualità dei risultati forniti da PARATIE-PLUS, lo stesso modello sarà studiato con un metodo di calcolo alternativo, tramite una modellazione numerica con FLAC 7.00 (Itasca (2015)).

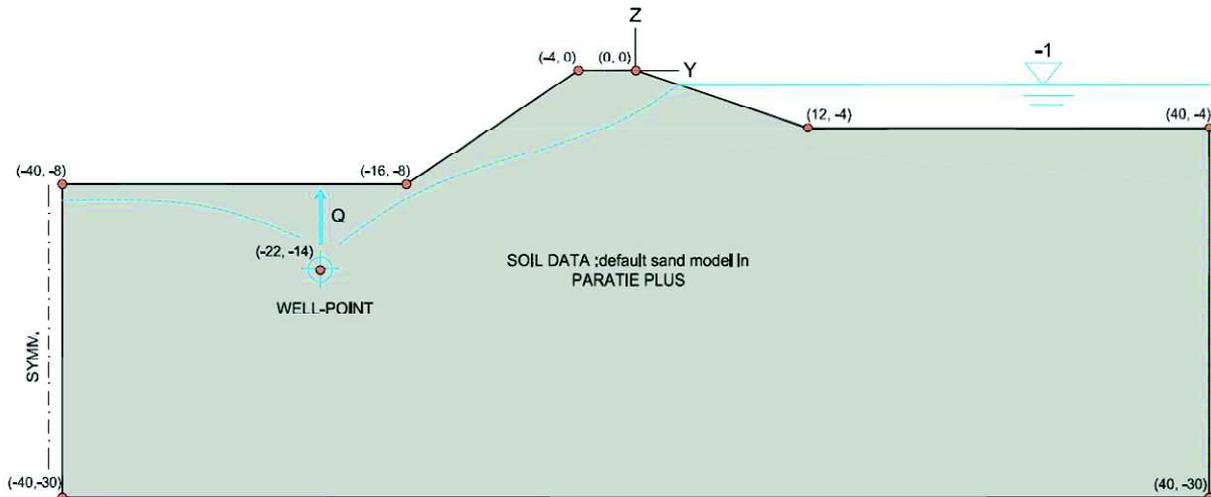


Figura 8-23: dyke - stabilità di un argine

### 8.13.1 Calcolo della portata dei well points

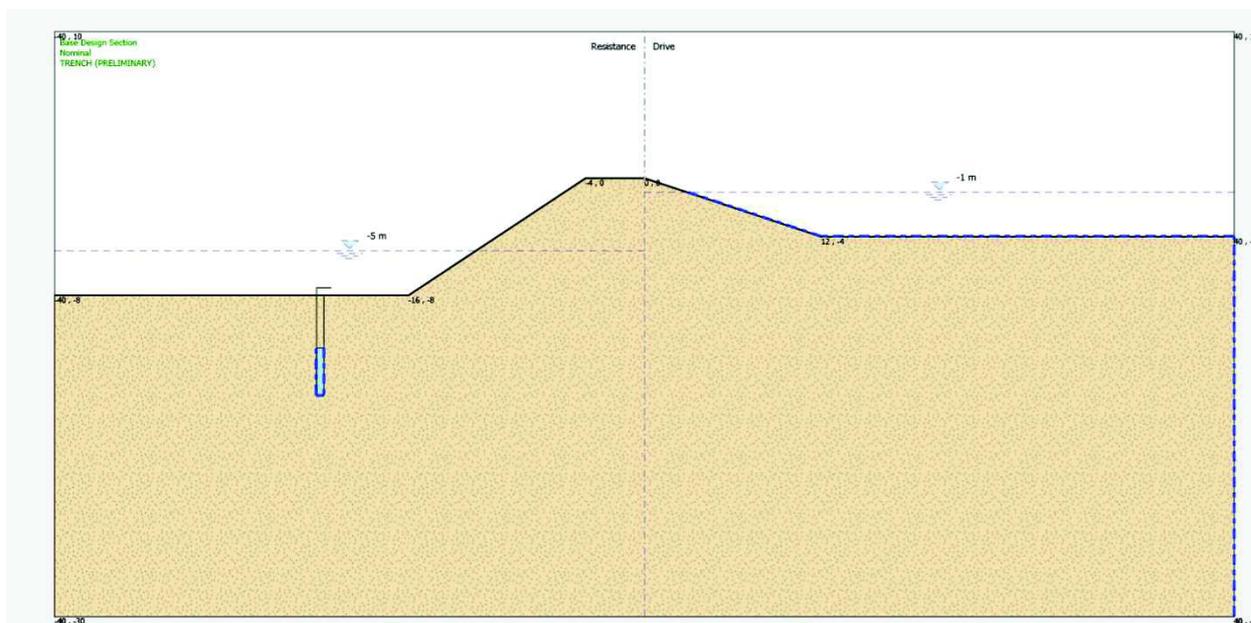
Una volta definita la geometria del problema, assegniamo le condizioni al contorno idrauliche che, per questo caso, possono essere le seguenti:

- sulla frontiera verticale di sinistra, si può ipotizzare una condizione di flusso nullo: in altre parole, si ipotizza che tale frontiera sia la traccia un piano di simmetria;
- sulla frontiera verticale di destra, è possibile assumere una distribuzione di pressioni idrostatiche regolate dal battente di destra: questo simula una sorta di invaso di estensione infinita;
- sulle superfici superiori da entrambi i lati non è necessario specificare alcuna condizione particolare: le freatiche devono essere lasciate libere di muoversi; a destra, quando la superficie si trova al di sotto della freatica, PARATIE PLUS assegna comunque una condizione di pressione nota.

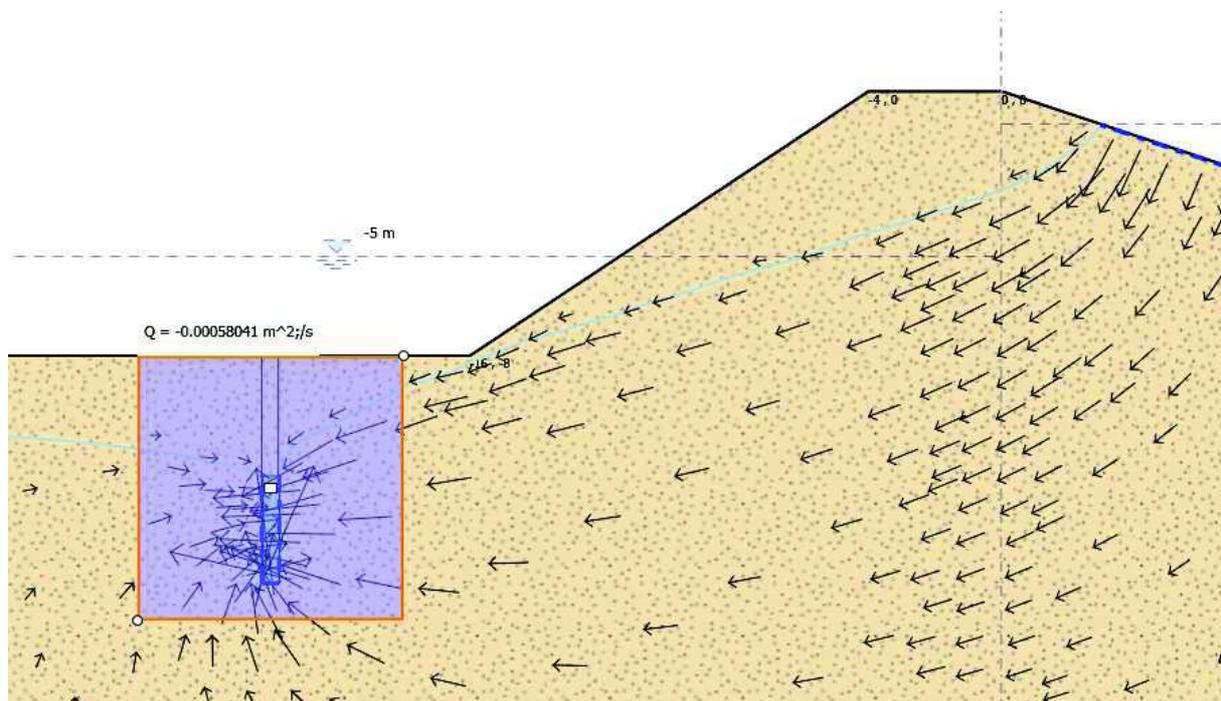
Per valutare la portata da emungere con la schiera di well-points potremmo operare in via iterativa aumentando progressivamente il flusso assegnato al well-point fino a raggiungere una condizione soddisfacente, una freatica che si collochi sufficientemente al di sotto del piano di fondo scavo.

Un modo più semplice per stimare tale quantità, che dipende dalla geometria del problema e dal coefficiente di permeabilità dell'acquifero, consiste nell'utilizzare lo strumento delle trincee drenanti: invece che assegnare una condizione di flusso noto, possiamo porre una trincea drenante in prossimità della regione ove saranno installati i well-points, con la quale è possibile imporre che la freatica nell'acquifero passi per una posizione ben precisa. Nota la soluzione, possiamo facilmente dedurre la risultante dei flussi uscenti da tale trincea, per mezzo dello strumento *flow inspector*, infine possiamo sostituire, alla trincea drenante, un wellpoint al quale assegnare la portata così predefinita.

Il modello con trincea drenate è il seguente: dobbiamo sottolineare che anche il posizionamento della trincea drenante richiede qualche tentativo, al fine di riprodurre una freatica mobile che non interferisca con la superficie del terreno.



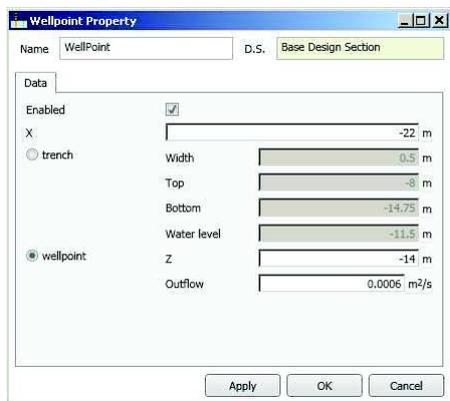
Per mezzo di uno strumento flow inspector che abbracci la trincea drenante si può facilmente stimare un flusso totale uscente (negativo) pari a  $5.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (circa 35 litri/minuto per metro di trincea). L'utente può verificare che il flusso totale entrante dall'invaso di monte e dalla frontiera verticale a destra coincide, a meno di una piccola tolleranza numerica, con il flusso uscente.



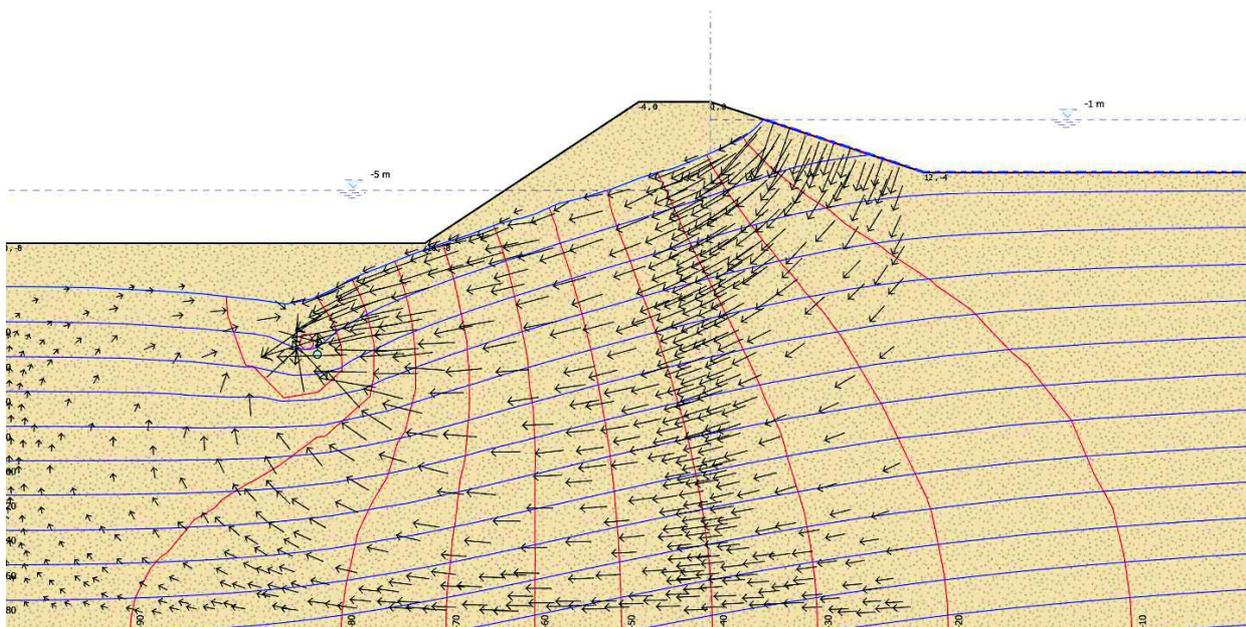
Possiamo ora modificare la condizione d'innescò, passando a un well-point di portata nota.

### 8.13.2 Calcolo filtrazione con well points

Con un doppio click sulla la trincea drenante, appare una finestra, tramite la quale possiamo trasformare la trincea in un well-point a cui assegniamo un prelievo pari a  $6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  come segue.



La nuova soluzione è la seguente, molto simile nel complesso alla precedente.

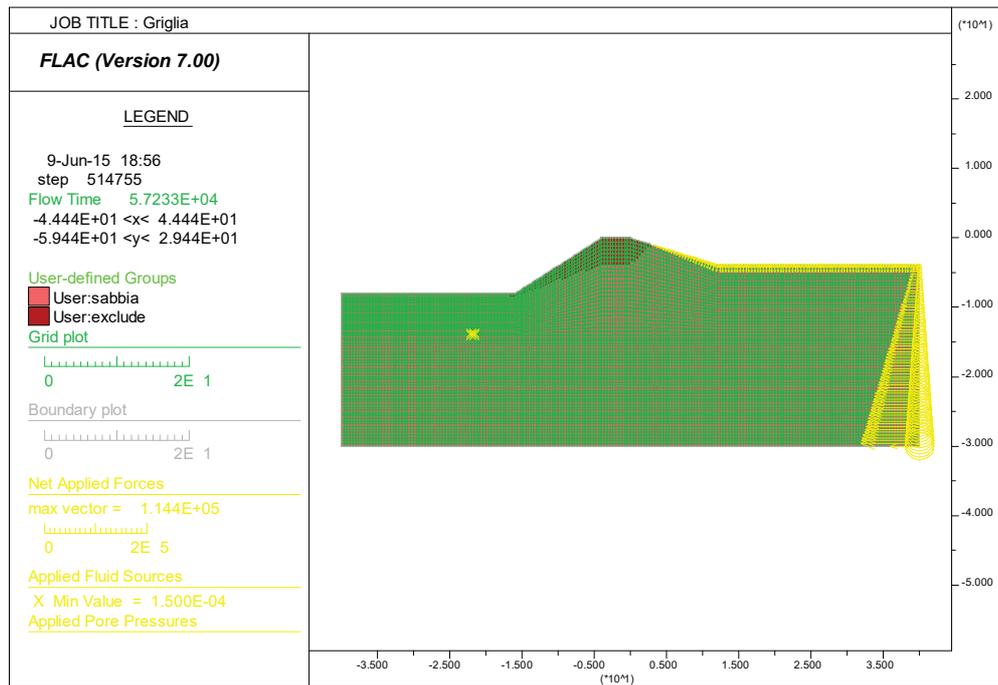


### 8.13.3 Verifica della soluzione

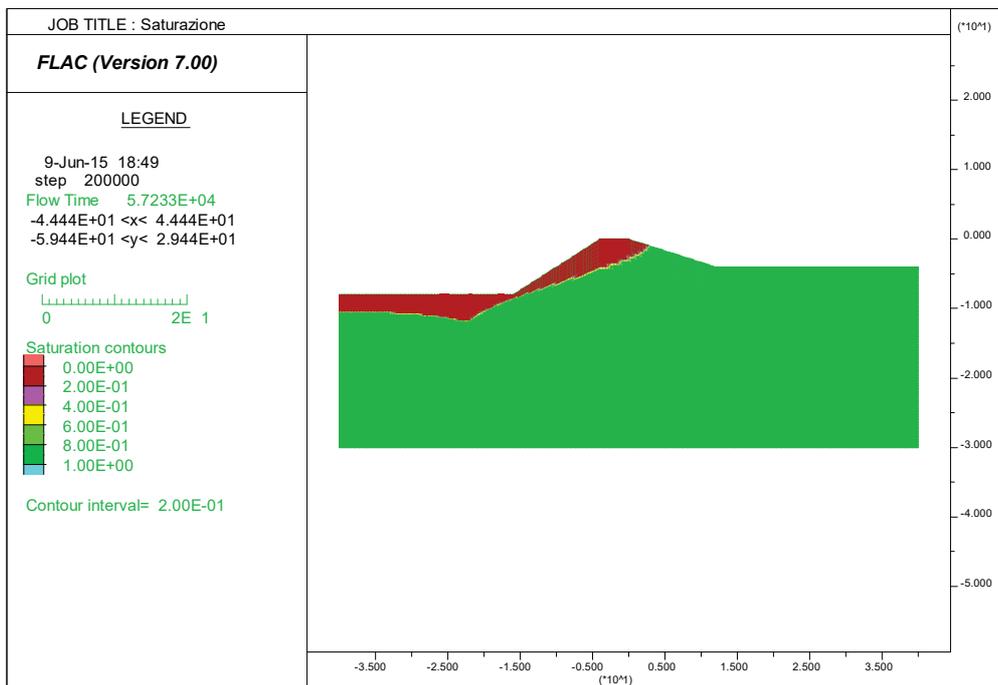
Per verificare la qualità dei risultati di PARATIE PLUS, possiamo riprodurre il medesimo esempio con un altro codice di calcolo. Utilizzeremo, in questo caso, in particolare, le opzioni di filtrazione del codice di calcolo FLAC 7.00 (Itasca (2015)) (i dati FLAC sono contenuti in Appendice A).

Il modello è riportato nella seguente figura, in cui sono riassunte le condizioni al contorno idrauliche imposte, corrispondenti con quelle prima discusse. Il prelievo dalla falda è ottenuto per mezzo di una condizione di flusso estratto, in una posizione ben precisa e di entità complessiva pari a quella assegnata a PARATIE PLUS.

Benché FLAC consenta un'analisi completamente accoppiata tra comportamento dello scheletro solido e idraulico dell'acqua nei pori, in questo caso è stata attivata la sola componente idraulica. FLAC, pur con una tecnica numerica differente da PARATIE PLUS, consente di modellare una freatica mobile, la cui posizione è individuata al confine tra le zone a saturazione totale e quella a saturazione nulla.



La freatica determinata da FLAC è la seguente, da cui si può osservare una corrispondenza molto soddisfacente con il risultato di PARATIE PLUS.



Le due freatiche sono meglio evidenziate nella figura che segue.

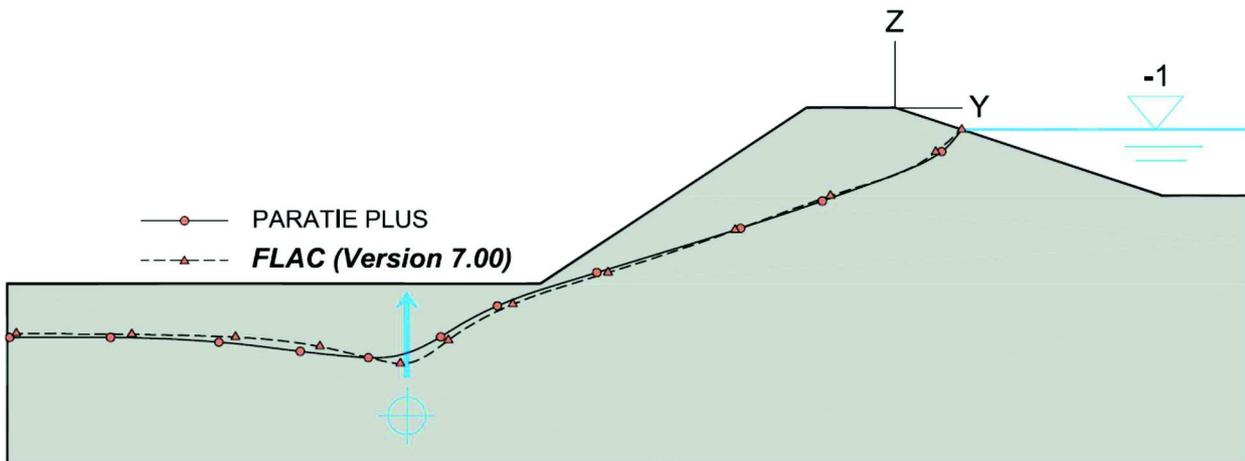


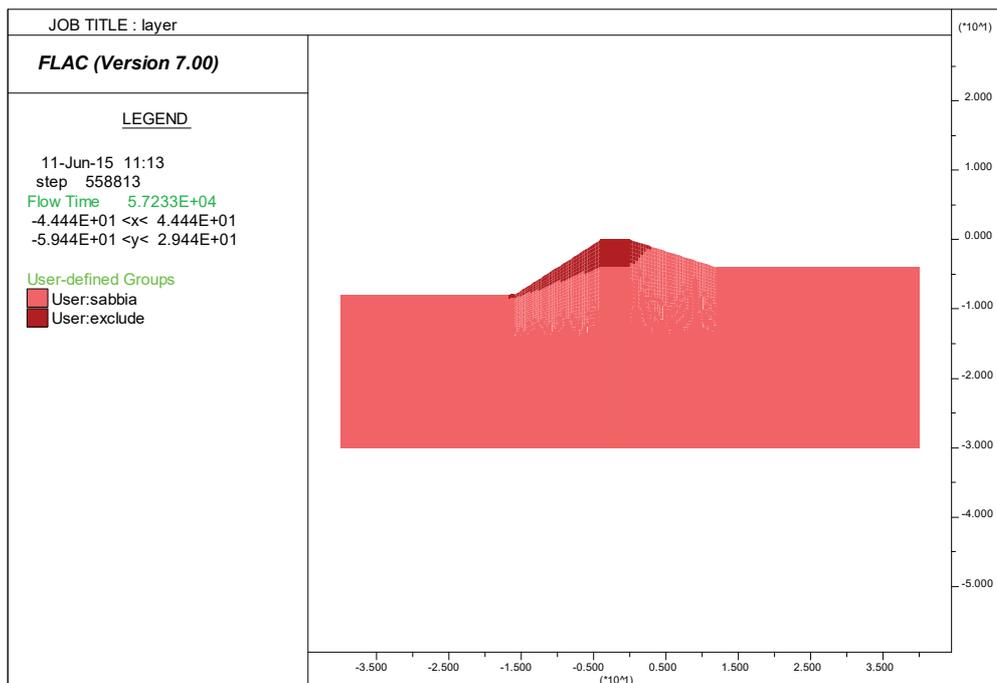
Figura 8-24: Dyke - confronto freatica PARATIE-PLUS - FLAC 7.00

### 8.13.4 Stabilità dell'argine

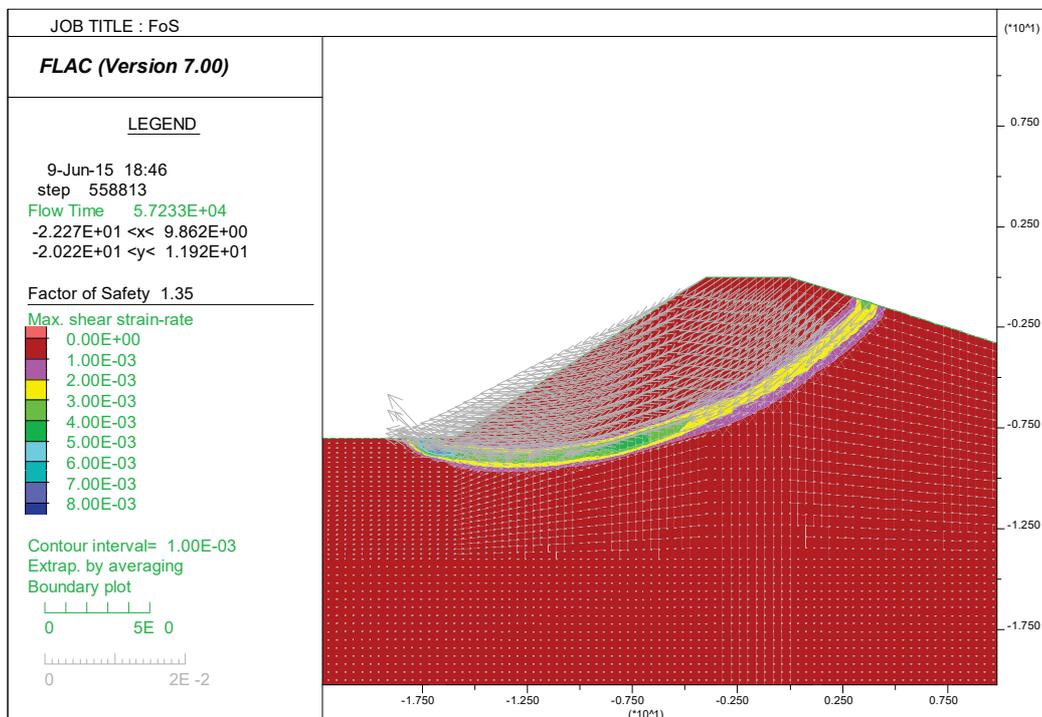
Consideriamo ora la stabilità dell'argine, nella parte riguardante il solo lato opposto all'invaso. Per valutare l'effetto delle pressioni interstiziali sulla stabilità, esaminiamo una porzione di argine individuata da una linea di scivolamento abbastanza profonda: escludiamo, in altre parole, che si possano formare meccanismi instabili superficiali.

Consideriamo, per prima cosa, il modello FLAC: con questo codice di calcolo, è possibile calcolare il coefficiente di sicurezza, inteso in senso classico, attraverso una procedura iterativa di progressiva riduzione dei parametri geotecnici, fino al raggiungimento di condizioni prossime alla formazione di un cinematismo nell'ammasso di terreno. Nella letteratura tecnica, oltre che nei manuali di FLAC, è possibile trovare molteplici confronti tra questa tecnica e i classici metodi implementati in PARATIE PLUS.

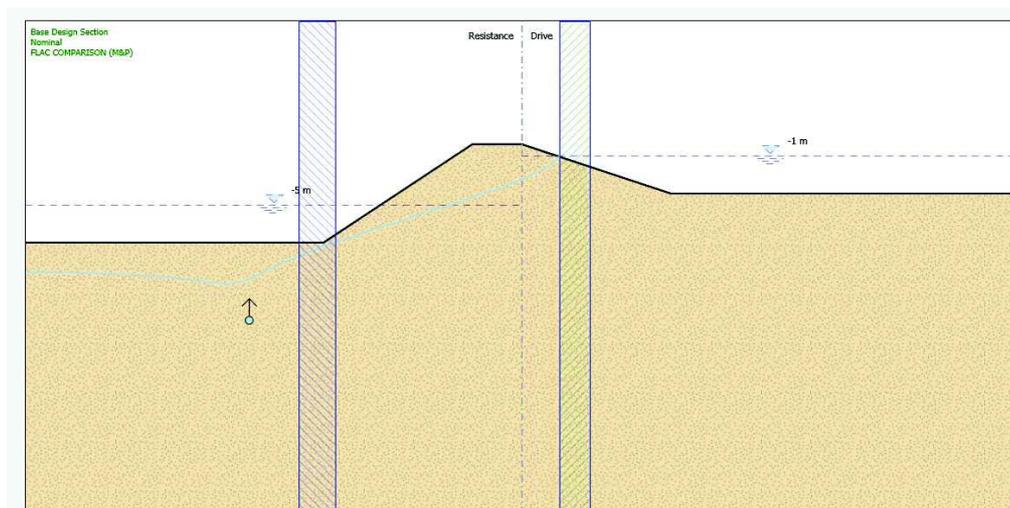
Per impedire la formazione di superfici di scivolamento superficiali, alla regione sommitale dell'argine (scura in figura) è attribuita una coesione fittizia molto elevata.



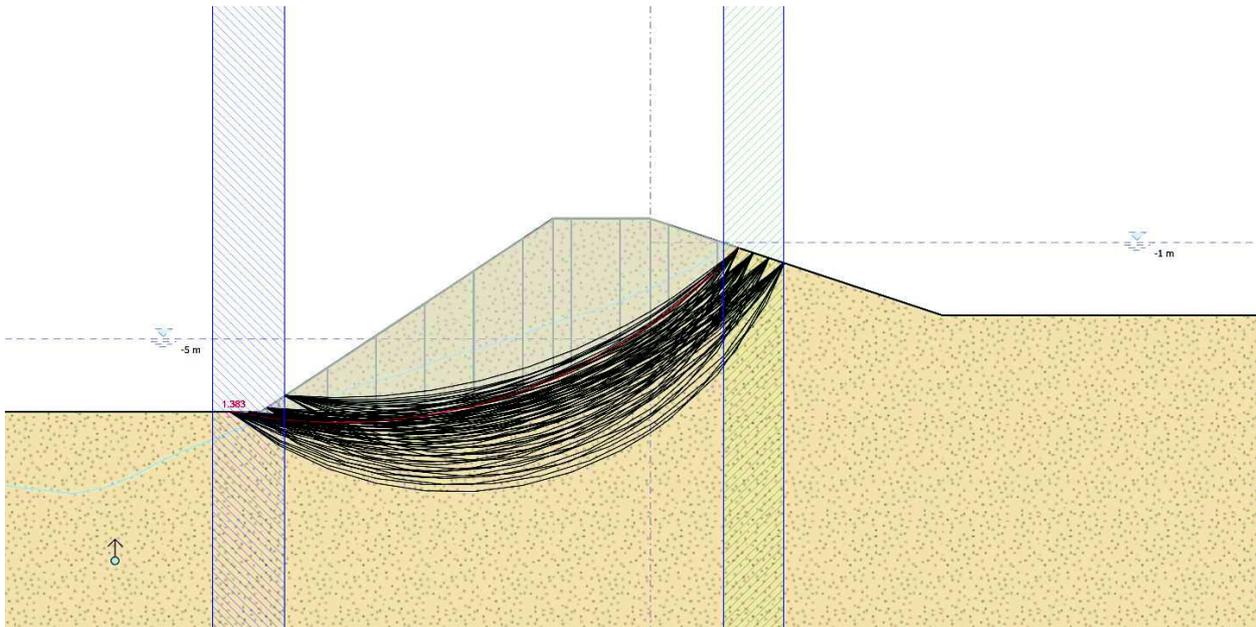
Il coefficiente di sicurezza è pari a 1.35, associato al meccanismo rappresentato nella figura seguente. È importante notare che, con questo metodo, al contrario dei metodi implementati in PARATIE PLUS, non è necessario prestabilire il meccanismo di collasso.



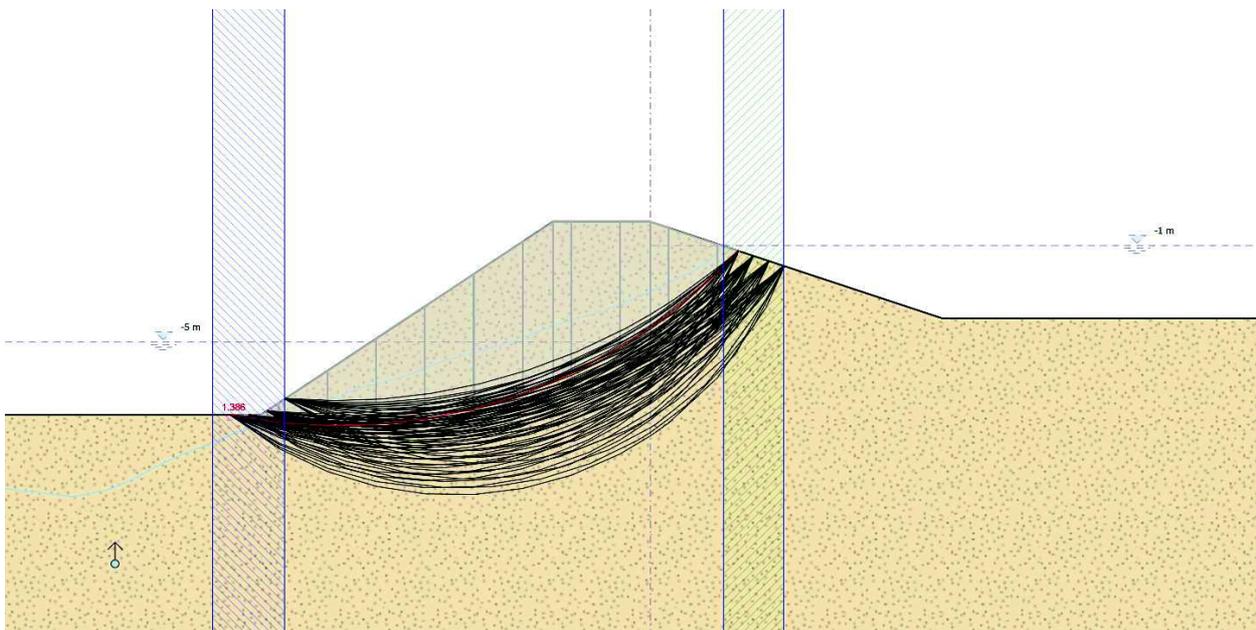
Possiamo ora calcolare, con PARATIE PLUS, il coefficiente di sicurezza associato a linee di scivolamento approssimate da archi di cerchio entranti e uscenti dall'argine in prossimità dei punti indicati dall'analisi FLAC: nella figura seguente sono rappresentate, in tratteggio, le zone di possibile intersezione tra superficie di scivolamento e piano campagna.



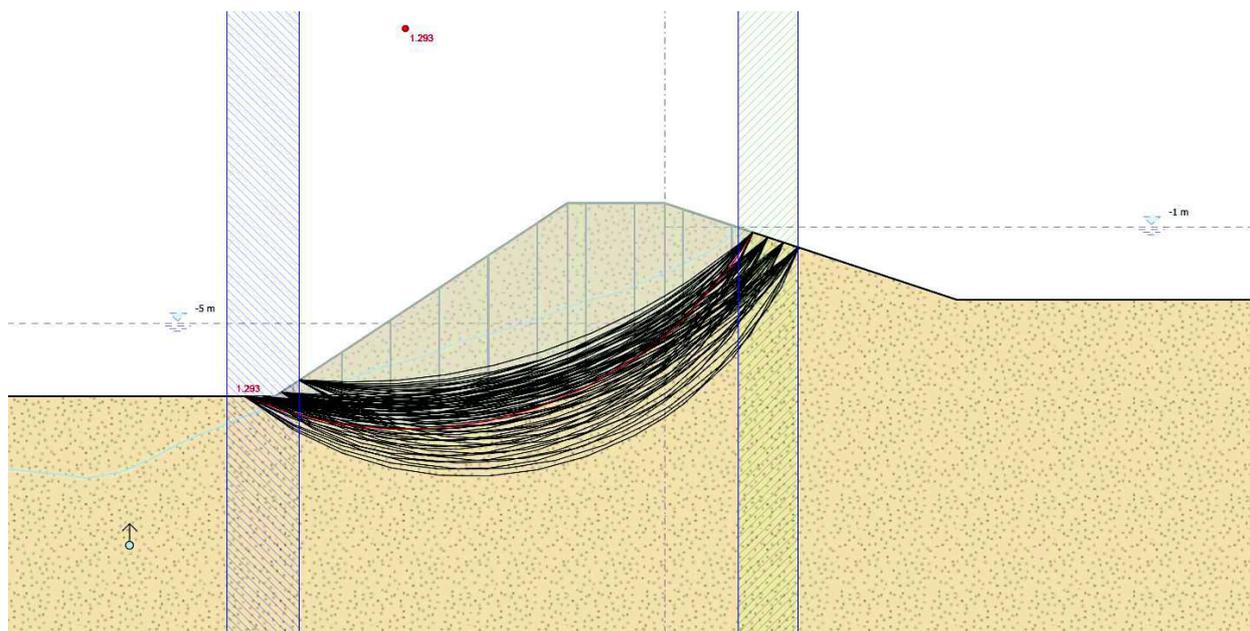
La soluzione può essere ottenuta con i tre metodi implementati, vale a dire con il metodo di Bishop...



con il metodo di M&P (funzione di forma lineare)...



e con il metodo di JANBU.

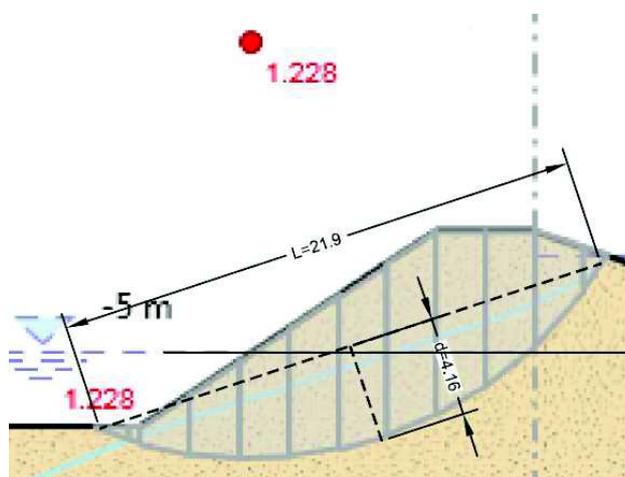


Compressivamente, abbiamo i seguenti risultati:

Metodo	PARATIE PLUS	FLAC
$c-\phi'$ reduction	--	1.35
Bishop semplificato	1.324	--
M&P $f(x)$ costante	1.328	--
Janbu semplificato	1.228 (*)	--
	1.277 (**)	--

(\*) senza coeff. correttivo di Figura 8-3

(\*\*) con coeff. correttivo  $f_0 \approx 1.04$ , assumendo  $d/L = 0.19$  (vedi figura qui di seguito)



Le differenze tra i diversi approcci sono da ritenersi trascurabili e, comunque, comprese nell'intervallo di variabilità segnalato nella letteratura tecnica.

## 8.14 Conclusione

Gli esempi qui discussi riguardano l'uso di alcune delle procedure tipiche previste da PARATIE PLUS. Pur riferendosi a situazioni simili a quelle riscontrabili nella pratica, tali esempi non vanno intesi come indicazioni esaurienti per procedere nella realtà: nelle usuali situazioni reali è necessario, ad esempio, condurre un numero ben maggiore di verifiche, ipotizzando un numero ben più ampio di scenari riguardanti differenti superfici di scivolamento; è talora consigliabile condurre un'analisi di sensibilità del problema ai quei parametri affetti da maggiore incertezza, i parametri geotecnici, le condizioni della falda ecc.

Infine, si ritiene opportuno, talora, consigliare il ricorso a diversi approcci, per risolvere il medesimo problema considerando PARATIE PLUS come solo uno dei possibili modi per ottenere la soluzione al problema in esame.

## 9 Riferimenti

- Abramson L. W., Lee T. S., Sharma S., Boyce G. M. (2002) "*Slope Stability and Stabilization Methods*", , 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc.
- Bustamante M., Doix B. (1985) Une méthode pour le calcul des tirants et des micropiux injectés. *Bull. Liaison Lab. Pontes et Chaussées*, 140, pp 75-95.
- Fredlund D.G., Krahn J., (1977) Comparison of slope stability methods of analysis, *Can. Geotech. J.*, Vol. 14, No. 3, pp 429-439.
- Itasca (2015) FLAC version 7.00
- Lambe T.W., Whitman R.V. (1969) "*Soil Mechanics*", John Wiley & Sons, Inc.
- Nova R. (2002) , *Fondamenti di meccanica delle terre*, McGraw-Hill
- Viggiani C. (1999) *Fondazioni*, 2<sup>a</sup> ed., Hevelius.