

## Capítol 6 ANÀLISI D'ESTABILITAT

### 6.1. METODOLOGIA

Per tractar l'estabilitat de talussos o vessants naturals s'han desenvolupat múltiples mètodes d'anàlisi: Mètodes numèrics d'elements finits, mètode de les característiques, mètodes del col·lapse plàstic, de l'equilibri límit, etc. Tots aquests mètodes intenten resoldre les equacions d'equilibri, compatibilitat, constitutives i de contorn del problema, fent hipòtesis sobre unes o altres per arribar a una solució.

Els mètodes d'elements finits compleixen en teoria totes les equacions i donen solucions dites “exactes” però requereixen molt de temps i esforç per discretitzar cada cas. En tot cas, donades les poques dades fiables de què disposem, no val la pena calcular amb mètodes “exactes” partint de dades aproximades.

El mètode de l'equilibri límit pressuposa una línia o superfície de lliscament donada. A partir d'aquí imposem les equacions d'equilibri sobre la línia, i com a equació constitutiva imposem la relació de plasticitat perfecta de Mohr-Coloumb sobre la línia i les condicions de contorn existents.

Tal com expliquen Anderson i Richards (1987), al mètode de l'equilibri límit s'assumeix que l'esllavissament és degut a una massa de sòl lliscant en una superfície de trencada. Al moment de la fallida, la resistència al tall és totalment mobilitzada al llarg de tota la superfície de trencament, i el vessant està, en la totalitat i en cada part, en equilibri estàtic. La resistència de tall del sòl ve donada pel criteri de Mohr-Coloumb :

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi \quad (28)$$

En els anàlisis de vessants estables, la resistència de tall utilitzada sota les condicions d'equilibri haurà d'ésser forçosament inferior a la resistència màxima disponible. En cas contrari el vessant no seria estable. Podem introduir doncs un Factor de Seguretat en front a la estabilitat (*FS*) com la proporció de resistència mobilitzada del total disponible:

$$FS = \frac{\text{Resistència de tall disponible}}{\text{Resistència de tall necessària per l'estabilitat}} \quad (29)$$

En el cas que  $FS$  fos menor que la unitat, voldria dir que la resistència disponible no és suficient per mantenir l'estabilitat, i que el vessant esdevindria inestable sota aquestes condicions. En els mètodes de càlcul exposats a continuació s'han desenvolupat unes o altres hipòtesis per simplificar el problema. En ells es generen un cert nombre de superfícies possibles de trencament. D'entre totes elles s'identifica la més crítica, aquella on  $FS$  és menor. En qualsevol cas, quan triem un mètode per analitzar el vessant o talús, és molt important considerar una forma factible per a la superfície de trencament i un mètode de superfície circular o no circular segons les dades que tinguem i la possibilitat que aquest tipus de trencada es produeixi o no.

Els mètodes de càlcul descrits tot seguit, i resumits a la taula 6.1 estan classificats pel tipus de forma de superfície de trencament (suposada en 2-Dimensions).

**Taula 6. 1 - Resum del diferents tipus de mètodes de càlcul basats en la teoria de l'equilibri limit (Anderson i Richards 1987)**

Mètode	Circular	No Circular	Equilibri Global de Moments	Equilibri Global de Forces	Hipòtesis de les forces intersticials
Vessant infinit		*		*	Paral·leles al vessant
Anàlisi de Falques		*		*	Definir inclinació
$\Phi_u = 0$	*		*		
Ordinari	*		*		Resultat paral·lel a la base de cada llesca
Bishop	*	(*)	*		Horitzontal
Janbu simplificat	(*)	*		*	Horitzontal
Lowe and Karafiath	*	(*)		*	Definir inclinació
Spencer	*	(*)	*		Inclinació constant
Morgenstern and Price	*	*	*		$X/E = \lambda = f(x)$
Janbu Rigorous	*	*	*		Definir línia d'empenta
Frelund and Krahn GLE	*	*	*		$X/E = \lambda = f(x)$

On:

$E$  i  $X$  són les components horitzontal i vertical, respectivament, de les forces intersticials.

#### Mètodes Lineals

Amb aquests primers mètodes es pot trobar un factor de seguretat de forma simple, mitjançant hipòtesis més o menys assumibles, resolent només una equació lineal. Són molt simples d'utilitzar ja que fins i tot de forma manual es pot trobar  $FS$ , essent aquesta la seva principal virtut. Malgrat això, les assumpcions que s'hi fan els converteixen en excessivament conservadors. Existeixen quatre tipus de mètodes lineals:

i) Anàlisi del vessant infinit

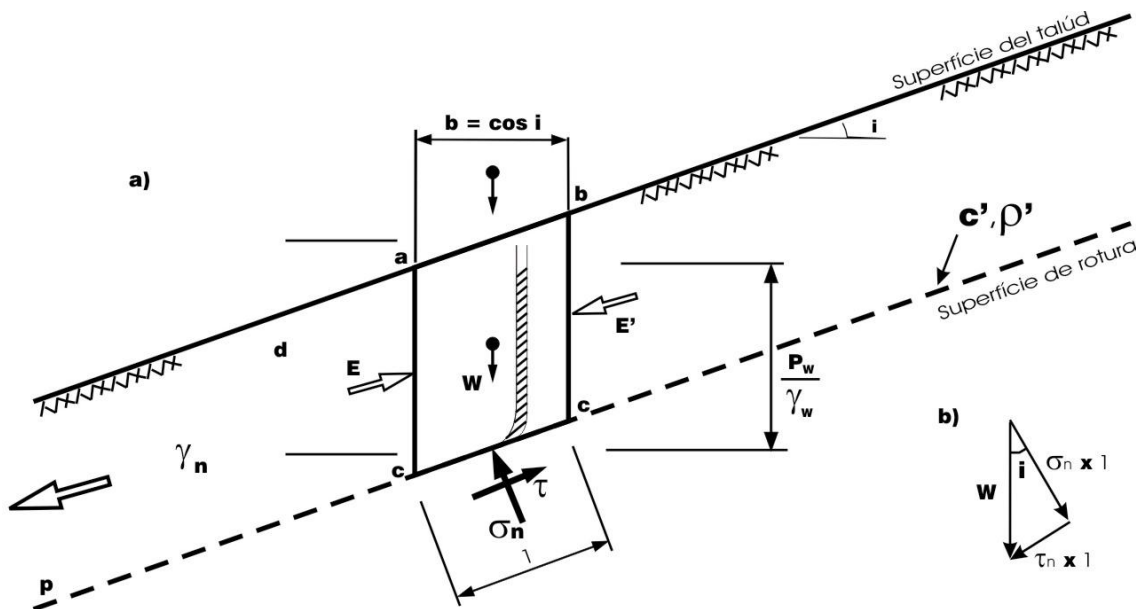
Es tracta d'un mètode especialment adequat per a esllavissaments translacionals, que mobilitzen una massa de sòl de geometria plana i amb un angle tal que es mou de forma paral·lela a la superfície (Skempton i Delory, 1957). En aquests casos se suposa que el sol llisca per una superfície plana paral·lela a la superfície, amb angle  $i$  constant, i que el vessant continua infinitament (veure Figura 6.1). El tipus de sòl i el nivell freàtic se suposen constants en tot el vessant. Fent equilibri de forces verticals i horitzontals i amb el criteri de trencada de Mohr-Coloumb s'arriba a una expressió del factor de seguretat:

$$FS = \frac{c' + [\gamma_n \cdot d \cos^2 i - u] \tan \varphi'}{\gamma \cdot d \sin i \cos i} \quad (30)$$

On:

- $c'$ : Cohesió a la zona de la superfície de trencada,
- $\varphi'$ : Angle de fregament a la superfície de trencada,
- $\gamma$  és la densitat del terreny,
- $d$  és l'altura de l'esllavissament,
- $i$  és el pendent del terreny,
- $u$  és la pressió de porus present a la superfície de trencada.

**Figura 6.1.** a) esquema per a l'anàlisi d'estabilitat d'un vessant infinit, desplaçament pla b) diagrama per a l'obtenció de tensions normal i tangencial sobre la superfície de trencament



En esllavissaments de vessants naturals i en sòls argilosos se solen donar en ocasió de gran períodes de pluja. En aquests casos el nivell freàtic pot pujar fins al nivell de la superfície, i deduir-se'n la expressió (...) que pot arribar a ser  $FS=1$  si  $i = \varphi'/2$ :

$$FS = \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma}\right) \frac{\tan \varphi'}{\tan i} \quad (31)$$

En els vessants on ja s'han produït prèviament altres esllavissaments, l'angle de fregament a utilitzar cal reduir-lo al valor residual  $\varphi_{\text{res}}$  donat que ja tenim una superfície de trencada on les propietats del sòl no són les inicials (cohesió, etc.).

### ii) Anàlisi de falques

En alguns casos la superfície d'esllavissada pot aproximar-se per dues o tres rectes. Això es dona quan el vessant està limitat inferiorment per un substrat de resistència molt diferent. Sigui molt resistent (roca mare) o un estrat poc potent i molt feble, la massa de sòl tendirà a lliscar per la superfície de contacte, (incloent eventualment la capa feble). En aquests casos cal avaluar acuradament l'estabilitat dividint la massa de sòl en diferents blocs i examinant l'estabilitat de cadascun.

### iii) Mètode $\varphi = 0$

Es tracta del més simple dels mètodes d'anàlisi d'arc circular. Se suposa una superfície de trencada circular, i que el moviment funciona com una rotació del sòl com a sòlid rígid en una superfície cilíndrica (en el pla 2D, circular), on es mobilitza la resistència de tall no drenada ( $C_u$ ).

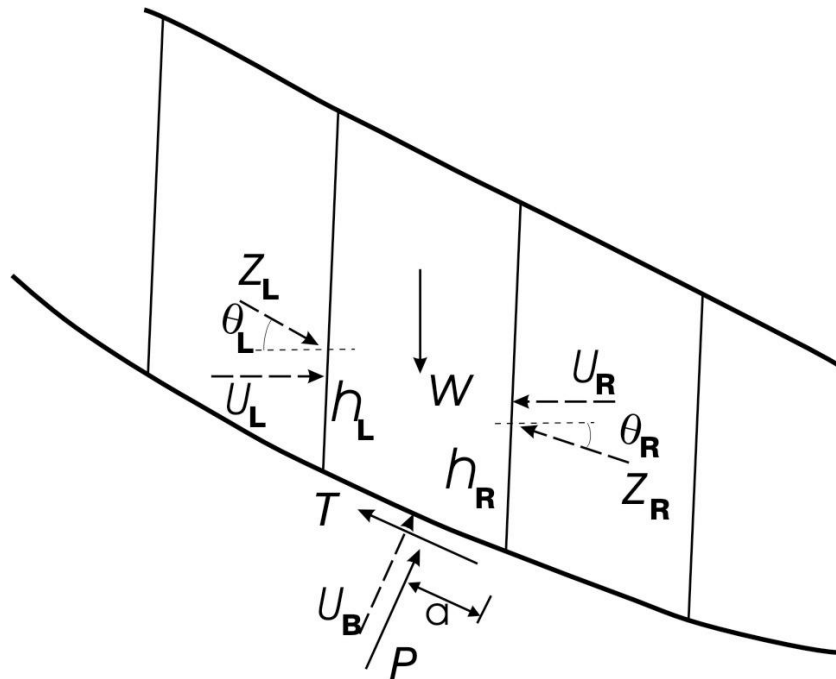
En els primers anàlisis, la resistència de tall se suposava constant per tota la superfície de trencament, però la introducció de diferents assaigs que determinaven la resistència de tall va permetre introduir una variació de  $C_u$  en el cercle.

L'ús de la resistència de tall no drenada ( $C_u$ ) en aquest anàlisi implica que la pressió de porus i la tensió efectiva al sòl no han tingut temps d'arribar a l'equilibri sota una càrrega aplicada. Això pot ser adient per unes condicions de fi d'una obra (l'estabilitat a curt terme d'un terraplè en argila, per exemple). En general però, no és gaire adequat aplicar aquest mètode en l'anàlisi de vessants naturals d'argiles excepte quan són sotmesos a un sobtat canvi de les càrregues.

### iv) Mètode Ordinari (o Mètode Suec)

En el mètode anterior, la resistència de tall no drenada mobilitzada al llarg de la superfície de trencada se suposava independent del nivell de tensions presents al sòl. En un anàlisi de tensions efectives, la resistència de tall a la superfície de lliscament està relacionada, pel criteri de ruptura de Mohr-Coloumb, amb les tensions normals efectives, que poden ser determinades. Això s'aconseguirà dividint la massa de sòl mobilitzada en un cert nombre d'elements llesques (veure figura 6.2).

**Figura 6.2.** - Forces actuant sobre un element llesca.  $Z_L$  i  $Z_R$  són les forces entre elements del costat dret i esquerre respectivament,  $P$  és la força normal,  $T$  la de tall i  $U_B$  la força produïda per les pressions de pors a la superfície de trencada. Les forces entre elements tenen una inclinació  $\theta_R$  (dreta) i  $\theta_L$  (esquerra)



El Mètode Ordinari o Suec (Fellenius 1927) és el mètode de llesques més simple d'utilitzar, ja que el càlcul pot ser fet fins i tot a mà. Com a hipòtesi del mètode, se suposa que la força normal que actua a la base de qualsevol llesca es pot determinar resolent les forces normals a la base de l'element. Per fer determinat el problema, es fa l'assumpció que les forces entre elements són paral·leles a la base de la llesca i per tant no intervenen en el càlcul de la força normal, que esdevé:

$$P = W \cdot \cos i \quad (32)$$

On:

$P$ : són les forces normals a la base de l'element llesca,

$W$ : és seu pes.

Prenent moments des del centre del cercle, es determina l'estabilitat global i s'obté el valor del Factor de Seguretat.

#### *Mètodes no lineals*

Es tracta de mètodes que utilitzen la divisió de l'esllavissament en elements llesca, però que requereixen la resolució d'un sistema d'equacions.

Per fer un anàlisi en tensions efectives del vessant, cal que siguin determinades les tensions efectives també a la zona de la superfície de trencament. En la pràctica s'aconsegueix si la massa de sol trencada es divideix en elements en forma de llesques.

S'escriuen diferents equacions per a cada element llesca ja que no s'utilitza les hipòtesis del Mètode Suec, cosa que genera un sistema d'equacions.

A la figura 6.2 es mostra un element tipus amb les forces que hi intervenen. Moltes d'aquestes forces i/o les seves línies d'acció són desconegudes a l'inici de l'anàlisi i cal fer diferents hipòtesis suplementàries que donaran lloc a diferents mètodes. Donats  $n$  elements, tenim  $5n-2$  incògnites i només  $3n$  equacions. Cal fer doncs  $2n-2$  assumpcions per resoldre el problema i fer-lo determinat. Es poden fer diferents tipus d'hipòtesis:

- Sobre la distribució de les tensions normals a la superfície de trencada
- Sobre la posició de les línies d'acció de les forces entre elements
- Sobre la inclinació de les forces entre elements

En la majoria de mètodes, la força normal ( $P$ ) se suposa actuant al centre de la base de cada element, cosa força raonable metre siguin relativament estretes. Això redueix el nombre de suposicions a fer a  $n-2$ .

Alguns mètodes suposen una inclinació de les forces entre elements, amb la qual cosa s'aporten  $n-1$  hipòtesis, esdevenint el problema sobre determinat. En aquest cas podem resoldre el problema satisfent l'equilibri de moments i el de forces horitzontals. Aquests dos càlculs donen un Factor de Seguretat cadascun, un d'equilibri de moments ( $F_m$ ) i un de forces horitzontals ( $F_f$ ). En principi aquests valors no coincideixen (hem fet hipòtesis no necessàriament certes), però si es dóna un valor constant de la inclinació ( $\theta$ ) de les forces entre elements, existeix un valor  $\theta$  pel qual  $F_m$  i  $F_f$  són idèntics. Aquesta és la base del mètode de Spencer.

Fredlund i Krahn (1977) van formular les equacions de l'equilibri de forma general, essent la mateixa tant per superfícies de trencament circulars com no circulars (encara que per a les darreres s'adopta un centre de rotació virtual). Considerant l'equilibri de Moments o de Forces Horitzontals, s'obtenen les expressions dels dos Factors de seguretat diferents  $F_m$  i  $F_f$ , i depenent sobre quin element fem les hipòtesis, es pot parlar dels diferents mètodes. Els mètodes exposats breument a continuació, malgrat no donar solucions "exactes" donen valors raonables.

#### i) Mètode de Bishop

Originalment presentat com un mètode per l'anàlisi de superfícies de lliscada circulars, el mètode de Bishop (1955) pot ser aplicat també a superfícies no circulars adoptant un centre de rotació virtual. En aquest mètode se suposa que les forces entre elements poden negligir-se, que la força normal actua al centre de la base de cada element i es troba resolent-ne les forces verticals. És un mètode adequat per als càlculs a mà i obtenir la convergència ràpidament.

Fent equilibri de moments al centre del cercle s'obté la estabilitat global i el seu Factor de Seguretat  $F_m$ . Encara que el problema esta sobredeterminat, l'equilibri horitzontal no es satisfà. Bishop ho analitzà i mostrà que el Factor de Seguretat no és especialment sensible al valor d'aquestes forces entre elements.

ii) Mètode de Janbu Simplificat

En el mètode on Janbu, Bjerrum i Kjaernsli (1956) van formular una de les primeres rutines per l'anàlisi de superfícies de trencada no circulars, se suposa que les forces entre elements són nul·les i per tant l'expressió obtinguda per la força normal a les llesques és la mateixa que per al mètode de Bishop. Però en aquest cas fem l'equilibri de les forces horitzontals donant un Factor de Seguretat de equilibri de forces sense les forces entre elements ( $F_0$ ). Per incloure l'efecte de les forces entre elements al càlcul es pot aplicar un factor de correcció ( $f_0$ ) de tal manera que el Factor de Seguretat de l'equilibri de Forces horitzontals ( $F_f$ ) s'escriu com:

$$F_f = f_0 \cdot F_0 \quad (33)$$

Per obtenir aquest factor ( $f_0$ ), van calibrar l'anàlisi amb el mètode de Janbu Rigorós i comprovaren que aquest factor només depenia de la geometria del problema i de les característiques del sòl, i es pot trobar mitjançant taules i figures.

Com en el cas anterior el problema està sobredeterminat i el moment global d'equilibri no es satisfà. Però com al mètode de Bishop, el càlcul es pot fer a mà essent també força pràctic. El Factor de Seguretat amb l'equilibri de forces ( $F_f$ ) que es troba, és més sensible a la hipòtesi realitzada que el Factor de Seguretat determinat amb equilibri de moments ( $F_m$ ) calculat al mètode de Bishop. Per això és preferible emprar mètodes que utilitzin l'equilibri de moments per trobar el Factor de Seguretat.

iii) Mètode de Spencer

Inicialment pensat per l'anàlisi de superfícies de trencament circulars, el mètode de Spencer pot ser aplicat a superfícies no circulars sempre que adoptem un centre de rotació friccional. En aquest mètode se suposa que les forces entre elements tenen una inclinació constant ( $\theta$ ) tot al llarg del vessant, de manera que:

$$X/E = \tan\theta \quad (34)$$

On:

$X$ : forces verticals,  
 $E$ : forces horitzontals

La força normal a la base de l'element serà doncs:

$$P = \frac{W(E_R - E_L) \cdot \tan\theta - \frac{1}{F}(c'l \sin i - ul \tan\phi' \sin i)}{m_i} \quad (35)$$

$$\text{on } m_i = \cos i \cdot \left( 1 + \tan i \cdot \frac{\tan\phi'}{F} \right) \quad (36)$$

On:

$F$ : factor de seguretat definit com tensió de tall mobilitzada respecte la disponible  
 $E_R$ : força horitzontal dreta entre els elements llesca

$E$ : força horitzontals esquerra entre elements llesca  
 $u$ : pressions de porus a la superfície de trencada  
 $l$ : longitud de la base de l'element llesca  
 $i$ : inclinació de la base de l'element  
 $c$ : cohesió a la superfície de trencada  
 $\varphi$ : angle de fregament a superfície de trencada

Suposant que l'angle  $\theta$  és constant per a tots els elements del vessant, es pot fer tant l'equilibri global de moments com de forces, i es troben dos valors del factor de seguretat, el de equilibri de forces ( $F_f$ ) i el de moments ( $F_m$ ), ja que s'han pres  $2n-1$  hipòtesis i el problema és sobredeterminat. Es pot trobar un valor de  $\theta$  tal que ambdós factors de seguretat coincideixin, que serà el Factor de Seguretat del vessant. Spencer va estudiar la relació entre  $F_f$  i  $F_m$  per un problema tipus. En va extreure que el factor de seguretat resultant de l'equilibri de moments  $F_m$  és relativament insensible a les forces entre elements. Aquesta conclusió és coincident amb la de Bishop, cosa que explica d'alguna manera que l'aplicació del seu mètode estigui tan estesa.

#### iv) Mètode de Morgenstern i Price

El mètode d'anàlisi desenvolupat per Morgenstern i Price (1965) pot ser aplicat tant a superfícies de trencament circulars com no circulars. Es basa en què les tensions i les forces varien contínuament a la superfície, i en resoldre les components normal i paral·lela a la base per a cada element formulant equacions d'equilibri força generals. Suposa que existeix una relació entre aquesta component vertical i normal:

$$\frac{X}{E} = \lambda \cdot f(x) \quad (37)$$

On:

$f(x)$ : funció que varia de forma contínua al llarg de la línia

$\lambda$ : factor d'escala.

Per a una funció donada  $f(x)$ , els valors de  $\lambda$  i  $F$  es troben tal que es compleixin els equilibris globals de Moment i Forces. Així  $F = F_m = F_f$ .

Morgenstern i Price afirmen que el factor de seguretat és relativament poc sensible a la funció  $f(x)$  triada, mentre la tria sigui acurada. La tria de  $f(x)$  es pot fer considerant la distribució de tensions normals als límits dels elements. En general no hi ha d'haver tensions efectives de tracció i les tensions de tall han de ser menors a les requerides per l'equilibri crític local.

#### v) Mètode Rigorós de Janbu

Janbu (1954) va descriure un mètode d'anàlisi que podia ésser aplicat tant a superfícies de lliscada circulars com a no circulars. La formulació original va ser ampliada per cobrir l'anàlisi de la capacitat portant i dels problemes de pressió de terres. Aquest va ser el primer mètode de llesques on es satisfien els equilibris globals de Moments i Forces.



Janbu formulà les equacions generals de l'equilibri resolent vertical i horitzontalment respecte la base de cada llesca. Considerant l'equilibri global de forces s'obté una expressió per al Factor de Seguretat  $F_r$ . Per que el problema esdevingui estàticament determinat, s'imposa la posició de la línia d'acció de les forces entre elements. Fent equilibri de moments des del centre de la base de cada element, l'equilibri de moments global es verifica, i les forces entre elements es poden calcular. De fet estan inserides dins l'expressió del factor de seguretat on es verifiquen tant el equilibri global de Forces com de Moments.

Sintetitzant aquest tipus de mètodes Lloret *et al.* (1984) conclouen que els mètodes que compleixen totes les equacions d'equilibri (Spencer, Bishop Rigorós, Morgenstern i Price, Fredlund, i Janbu Rigorós) proporcionen valors del coeficient de seguretat molt semblants (diferències sempre menors al 5%). El mètode de Bishop Simplificat proporciona també els mateixos resultats que els que compleixen totes les equacions quan la superfície de trencada és circular. En canvi el mètode Ordinari pot proporcionar errors alts (fins del 50%) en l'anàlisi de tensions efectives quan existeixen pressions d'aigua.

#### *Ús de software especialitzat. El programa PCSTABL 5M*

El *PCSTABL 5M* és un programa de càlcul de l'estabilitat de vessants amb el mètode d'equilibri límit en dos dimensions desenvolupat per Siegel (1975). Ha estat programat per tractar problemes amb els mètodes de Janbu Simplificat, Bishop Simplificat i el mètode d'elements llesca de Spencer. Permet considerar diferents tipus de material isòtrop, un o diverses superfícies piezomètriques, càrregues en la superfície i sol·licitacions sísmiques.

La geometria del vessant i de les diferents tipus de sòl s'introdueixen mitjançant rectes numerades en un sistema de coordenades XY positiu, definint els seus extrems d'esquerra a dreta (veure figura 6.3). Cada recta està relacionada amb un tipus de material, el que és a sota.

La superfície del nivell freàtic s'introdueix de la mateixa manera, havent d'ocupar tota l'extensió del vessant fins als dos laterals. Es pot construir superfícies piezomètriques que sobrepassin la superfície del vessant, essent possible el càlcul amb una part del vessant submergit i considerant la corresponent zona de traspuament. La pressió de porus es determina basant-se en les pressions hidrostàtiques a partir de la superfície definida.

Com a eix per calcular la profunditat dins la part saturada, s'utilitza un eix vertical i un perpendicular a la superfície piezomètrica i es fa la mitjana del resultat, ja que amb el primer es troben valors conservadors i fent la mitjana amb els segon es compensa.

El programa és capaç de generar superfícies de trencament circulars (funció *CIRCLE*), qualsevol (*RANDOM*), que passen per una zona preferent definida per l'usuari (*BLOCK*) o calcular amb una superfície imposada (*SURFAC*). Per trobar les superfícies utilitza un mètode de generació sistemàtica o aleatòria. Consisteix en generar un cert nombre de superfícies determinades per unes condicions inicials, trobar el factor de seguretat per a cadascuna d'elles i escull la més desfavorable (Lloret *et. al* 1984).

Les funcions *CIRCLE*, *CIRCL2* i *RANDOM search* generen superfícies de forma circular o irregular i són pràcticament similars a nivell d'utilització. Es generen superfícies (que en 2D són línies) potencials de trencament d'esquerra a dreta i compostes per una sèrie de segments rectilínies d'una mateixa longitud, excepte el darrer que sol ser més curt. Aquesta longitud és triada per l'usuari, però el més raonable és escollir de 1/4 a 1/3 de l'alçada del vessant per evitar que segments massa curts pugin fer, degut a l'elecció aleatòria de l'angle de la següent recta que fa el programa, recargolar les superfícies excessivament cosa que dificultaria trobar rectes vàlides (Achilleos 1988). La longitud escollida té influència directa en el temps de computació; els segments, com més curts, més detallades defineixen les superfícies, però necessiten més temps de càlcul per trobar el factor de seguretat i no canvia gaire el resultat.

Es poden generar un nombre elevat d'aquestes línies, fent que comencin en una zona o punt inicial i vagin fins una zona o punt d'acabament imposades per l'usuari. El programa generarà tantes línies de trencament potencials com combinacions possibles entre els punts d'inici i final definits. El mètode de generació és l'elecció d'un angle de forma aleatòria però fitada entre dos angles límit a cada punt d'avanç per traçar la recta fins al següent. Comença a l'extrem dret, en punts espaiats uniformement a la zona d'inici indicada i avança fins a trobar-se de nou amb la superfície del terreny, refusant tots aquells intents que no ho fan a la zona de final imposada. Segons com sigui la geometria pot no trobar cap superfície vàlida. Després de calcular el factor de seguretat de cadascuna de les vàlides, en destaca les més crítiques donant el factor de seguretat que hi és associat. La superfície potencial de trencament amb el factor de seguretat més baix es considerarà amb aquest mètode la superfície de trencament.

La diferència entre les funcions *CIRCLE* i *CIRCL2* es troba exclusivament en el mètode de càlcul de l'equilibri límit: Janbu Simplificat per *CIRCLE* i Bishop per *CIRCL2*. Com s'explica a l'apartat anterior ambdós mètodes tenen les mateixes hipòtesis però resolen les equacions fent diferents equilibris de forces. Els resultats no canvien de forma significativa si empren un mètode o altre.

La funció *SURFAC* utilitza la superfície de trencada introduïda per l'usuari punt a punt, i funciona amb el mètode de càlcul de Janbu Simplifica. És a dir directament calcula el factor de seguretat de la superfície introduïda. És el mateix procés que segueix la resta de mètodes amb cadascuna de les superfícies potencials de trencament vàlides que generen. És el mètode que requereix menys temps de càlcul.

#### *Anàlisi de sensibilitat en funció dels paràmetres que intervenen en l'estabilitat*

##### *i) Anàlisi de la sensibilitat a les propietats mecàniques del sòl*

Inicialment es parteix de la definició topogràfica de la zona del vessant, d'unes indicacions de la morfologia del vessant i indicacions d'on se situen els punts singulars del vessant (escarpaments, contrapendents, límits de masses mobilitzades etc.). Es disposa generalment del perfil topogràfic d'un tall del vessant al llarg d'una línia que segueix el moviment (pendent màxim, direcció del moviment, etc.).

En alguns casos es disposa del Model Digital del Terreny, amb dades del territori discretitzades en unitats de 30 per 30 metres, cosa que n'assegura una descripció geomètrica força precisa. Però en el nostre cas el perfil del terreny no conté prou

singularitats com per a que sigui necessari un nivell alt de precisió. En el cas del lliscament rotacional s'ha reduït el perfil en 15 punts sense perdre irregularitats destacables del terreny. En el cas del corrent d'arrossegalls només han calgut 6 punts per la topografia i 6 punts per la superfície de lliscament per sense perdre informació ni afectar negativament el càlcul d'estabilitat al *PCSTABL 5M*.

Un cop escollida una geometria, amb un perfil topogràfic i la superfície de lliscament per on suposem que trenca el sòl en una eventual mobilització del material (en el cas del corrent d'arrossegalls) i amb la qual s'aplica el mètode de l'equilibri límit, s'intenta precisar quines característiques mecàniques posseeix el material i quina és la importància que hem d'acordar a la seva bona determinació. Es vol analitzar la importància en l'estabilitat que poden provocar els canvis o imprecisions en el valor dels paràmetres mecànics: la cohesió interna i l'angle de fregament residual, o de pic segons el cas, del material.

Els pesos específics ( $\gamma_n$  i  $\gamma_{sat}$ ) correspondran als obtinguts en el laboratori tot i que es necessiten grans canvis en aquests valors per produir canvis en l'estabilitat. Tant el es específic natural com el saturat no canviaran gaire i són un paràmetre fàcilment determinable amb un error limitat.

Pel que fa a la cohesió i l'angle de fregament cal recordar prèviament quins tipus de casos estem analitzant: l'objectiu d'aquest treball és estudiar sota quines condicions es pot reactivar l'esllavissada rotacional i sota quines condicions va succeir el corrent d'arrossegalls. És a dir, en el primer cas s'analitza l'estabilitat actual i en el segon cas s'analitza l'estabilitat que hi havia llavors, el que s'anomena com un *back-analysis*.

En el cas de l'esllavissada rotacional, en produir-se, s'ha format una superfície de trencament on s'han alterat les característiques del material. A banda de l'angle de fregament, el qual disminueix fins al valor residual, el trencament de la unió entre les partícules a la franja per on llisca la massa mobilitzada fa que la cohesió desaparegui. Si bé és possible que després d'un cert temps aparegui una cementació entre les partícules i s'hagi articulat un nou sistema de cohesió, o l'aparició de blocs a la superfície de trencament pot fer que l'angle de fricció intern augmenti.

De tota manera, s'ha suposat inicialment certs els valors obtinguts al laboratori, és a dir una cohesió aparent nul·la i un angle  $\phi'_{res}$  de 24° pel moviment gran i una cohesió de 50 kPa i un angle  $\phi'_{pic}$  de 30° pel corrent d'arrossegalls. En funció dels resultats de factor de seguretat obtinguts es realitzarà un anàlisi de sensibilitat d'aquests valors.

#### ii) Anàlisi de la sensibilitat a la profunditat del nivell freàtic

La posició del nivell freàtic és la dada de la qual tenim menys informació. El màxim que es pot dir en alguns casos és que té més o menys facilitat per drenar gràcies a torrents propers o quin nivell d'infiltració és pot esperar pel tipus de material del vessant. Però és segurament el factor més important que juga en l'estabilitat. Per trobar quina és aquesta influència i de quina manera en depèn l'estabilitat, es realitza el càlcul de l'estabilitat amb una sèrie de estats de saturació del material. Es construeixen successives corbes representant el nivell freàtic, i que se situen a diferents profunditats. Aquestes formes volen representar diferents passos en la pujada del nivell freàtic que pot produir-se a causa d'una temporada de precipitacions intenses.

La forma de procedir en fer aquest augment progressiu del nivell freàtic és un dels moments més delicats de l'anàlisi ja que es desconeix la forma que pren aquesta corba en la realitat. Aquesta incertesa i l'afegit de la heterogeneïtat dels col·luvions fa que es decideixi per construir paral·leles a la superfície topogràfica a diferents profunditats. És una opció plausible ja que es pot suposar una infiltració més o menys homogènia al vessant.

El càlcul dels successius factors de seguretat per a els diferents valors de la profunditat del nivell freàtic, un cop fixades les propietats del material i la geometria, proporciona una corba que permet estimar quina és la profunditat crítica on el vessant pot començar a esdevenir inestable.

## 6.2. CÀLCUL DE L'EQUILIBRI LÍMIT

### 6.2.1. Criteris de càlcul

Es distingeixen els criteris per a utilitzar el software en funció de quin moviment estem analitzant ja que els sistemes d'anàlisi d'estabilitat son completament diferents, postanàlisis pel moviment rotacional i retroanàlisis pel corrent d'arrossegalls.

#### *Esllavissada rotacional*

Per analitzar aquest moviment, com s'ha comentat anteriorment s'ha decidit realitzar un post anàlisis, que correspondria a l'anàlisi de les condicions per a la reactivació del moviment.

En quant a la morfologia introduïda s'ha realitzat un perfil topogràfic en sentit paral·lel al barranc, és a dir SSW-NNE. D'aquest perfil s'han escollit 15 punts que representen totes les irregularitats i/o canvis de pendent més rellevants, així es redueix el cost en el càlcul per part del *STABL*.

Com que es desconeix la superfície de trencament s'ha decidit realitzar els càlculs dels factors de seguretat mitjançant un dels mètodes no lineals explicats anteriorment com és el mètode de Janbu, mitjançant la funció *CIRCLE*. Com ja s'ha comentat no existeix gaire diferència en quant al mètode utilitzat, però s'ha escollit aquest envers el mètode de Bishop perquè aquest últim només calcula superfícies de trencament purament circulars i, com que es creu que aquest moviment també té component translacional s'ha decidit utilitzar un mètode que també calculi superfícies irregulars. Una de les hipòtesis en quant a la superfície de trencada que s'assumeix en aquest càlcul és que la superfície de lliscament es produeix per complet dins del col·luvió. És necessari tenir aquesta dada en compte alhora d'interpretar els resultats. Per últim, el treball de camp realitzat ha servit per poder identificar el límit superior i inferior de la massa mobilitzada amb un error d'algun metre. És una dada que cal introduir al programa per efectuar el càlcul.

Anteriorment es comenta que per l'anàlisi de sensibilitat en quant el nivell freàtic es considera un nivell freàtic paral·lel a la superfície topogràfica. Els valors que s'han considerat son de 0 m de profunditat, és a dir just a la superfície topogràfica, el que significaria un període de pluges intens; a 10 m de profunditat, el que suposa que la major part del material esllavissat es troba saturat, a 30 m de profunditat, assimilant un

menor grau de saturació, i 60 m de profunditat respecte a la superfície topogràfica, el que vindria a significar que la massa mobilitzada es troba seca i s'estudiarà la possibilitat que l'esllavissada es reactivés en un període sense pluges.

En quant als paràmetres resistents, inicialment s'ha calculat l'estabilitat introduint una cohesió aparent de 0 kPa i un angle de fricció intern residual de 24°, ja que aquests són els valors obtinguts al laboratori mitjançant assaigs de tall anular. Els resultats obtinguts amb el *STABL* han sigut tan dolents que ens ha fet pensar que les condicions actuals no són aquestes sinó que amb el pas del temps s'ha pogut formar una cohesió a la superfície de trencada per cementació o que hi hagi blocs al bell mig d'aquesta superfície que augmenti la fricció interpartícula del material. S'ha de tenir en compte que les mostres que es van recollir pertanyen a la matriu del col·luvió, i d'aquesta matriu s'ha escollit la fracció fina pels assaigs de resistència. La qual cosa ens fa pensar que els resultats de laboratori correspondrien a la situació més pèssima en quant a estabilitat. És per això que els resultats que es presenten s'han calculat amb les condicions de pic obtingudes amb els assaigs de tall directe. És a dir, s'han fet els càlculs per  $c'$  de 25 kPa i 50 kPa amb  $\phi'_{res}$  de 30°, ampliant el rang de sensibilitat de 24° a 35°.

#### *Corrent d'arrossegalls*

En el cas del corrent d'arrossegalls s'ha decidit, com es comenta a l'apartat 6.1 un retroanàlisi o *back analysis*, amb el qual es pretén estudiar les condicions que s'haurien donat en el moment que es va produir el corrent d'arrossegalls.

La superfície de lliscament es suposa l'actual, per tant, s'ha realitzat un perfil topogràfic just pel centre del corrent d'arrossegalls (pràcticament S-N) del qual, per la seva simplicitat, s'ha pogut definir al software mitjançant 6 punts. La superfície topogràfica escollida, com s'explica en el capítol 4, s'ha realitzat fent una projecció ortogonal del lateral esquerre del corrent sobre el perfil central del moviment. D'aquest perfil també s'ha pogut reduir els punts a 6 sense perdre irregularitats importants.

El mètode de càlcul d'equilibri límit utilitzat amb el *PCSTABL 5M* és el de Janbu però en aquest cas, la funció utilitzada és la de *SURFAC*. La superfície de trencament esdevé per complet dins del col·luvió, per tant, només cal introduir un tipus de material, amb unes úniques propietats resistents.

En quant al nivell freàtic, s'ha escollit, com en el cas anterior, un nivell freàtic paral·lel a la superfície topogràfica, que, en aquest cas, és una interpretació, és a dir, que no és coneguda amb certesa. Donades les dimensions del moviment es presenten resultats amb nivells freàtics a 0 m, 2 m i 10 m de profunditat assumint, en primer terme, una saturació del 100% de la massa mobilitzada, seguit d'una saturació parcial, i, finalment, d'una situació de sòl completament sec.

Els paràmetres geomecànics escollits en aquest cas són els obtinguts amb els assaigs de laboratori. De tota manera s'ha decidit fer els càlculs assumint que els valors poden ser erronis. Per tant es presenten resultats amb  $c'$  de 0, 25kPa i 50 kPa junt amb  $\phi'_{pic}$  de 28°, 30° i 32°.

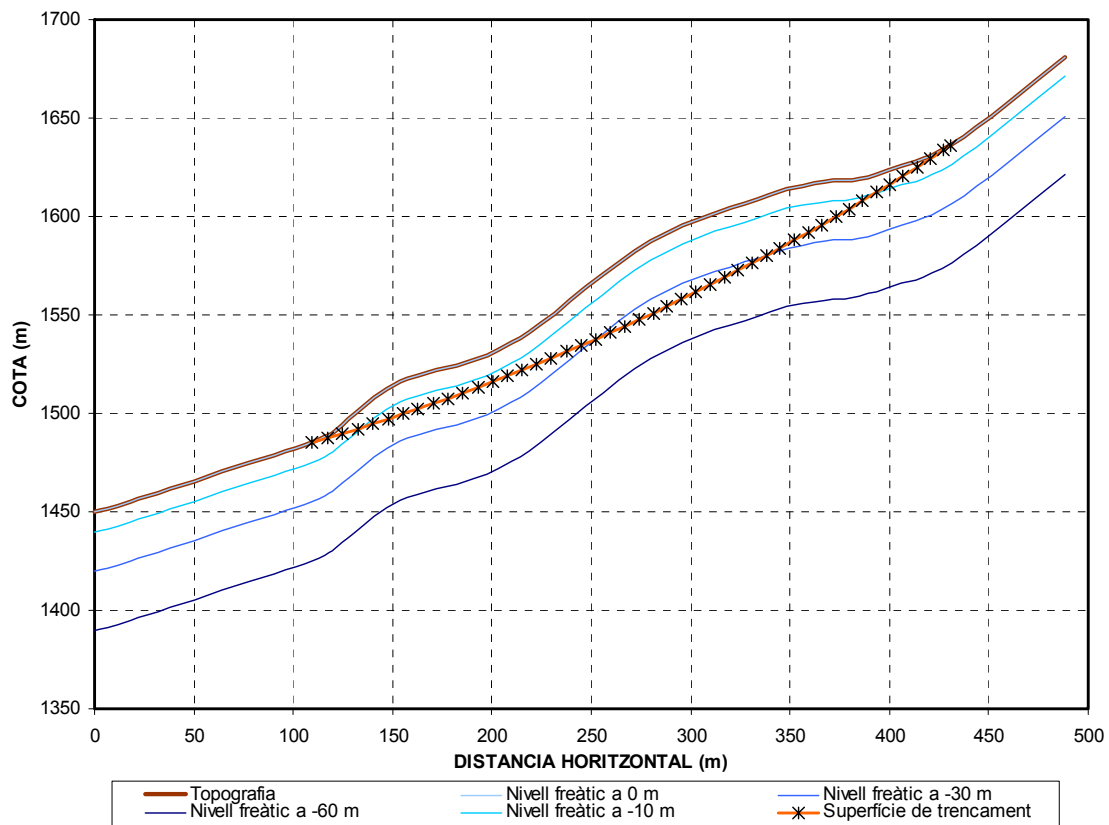
6.2.2. Resultats

*Esllavissada rotacional*

Primer de tot es presenten els diferents nivells freàtics considerats al càlcul. És el que es reflexa a la figura 6.3.

La taula 6.2. conté els factors de seguretat en front l'estabilitat en funció de la profunditat del nivell freàtic escollit, considerant els paràmetres resistents inicials obtinguts als assaigs de laboratori. Es pot observar com els valors de *FS* són pèssims. Abans, la figura 6.4 mostra la superfície de trencament més probable, obtinguda amb el mètode de Janbu.

**Figura 6.3** Superfície topogràfica i els diferents nivells freàtics considerats en el càlcul d'estabilitat de l'esllavissada rotacional. S'inclou la superfície de trencament amb la qual el factor de seguretat és menor, situació pèssima



Pel mecanisme proposat pel software aquest té aspecte de moviment rotacional amb radi enorme, de l'ordre de centenars de metres.

**Taula 6.2.** Valors del *FS* en funció de la profunditat del nivell freàtic paral·lel a la superfície topogràfica. Els paràmetres resistents corresponen als inicials, és a dir,

$$c' = 0 \text{ kPa i } \varphi'_{res} = 24^\circ$$

Nivell freàtic en superfície	Nivell freàtic a 10 m de profunditat	Nivell freàtic a 30 m de profunditat	Nivell freàtic a 60 m de profunditat
<b>0,405</b>	<b>0,551</b>	<b>0,765</b>	<b>0,945</b>

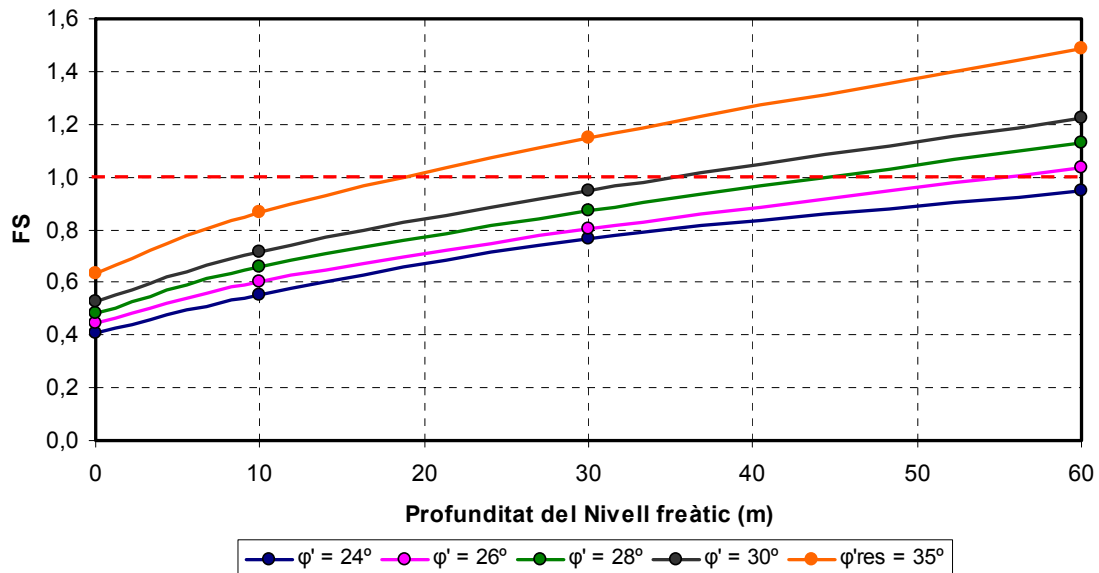
Aquests resultats són tan dolents que, com ja s'argumenta abans, s'ha de considerar que les condicions del material esllavissat actualment no són aquestes. Els resultats ens estan dient que inclòs amb el terreny sec el vessant no és estable. Això lògicament no és possible perquè s'ha comprovat que fa molt de temps que no s'ha reactivat.

Cal doncs realitzar un anàlisi de sensibilitat envers les propietats geomecàniques del material que és clar que, al menys actualment, no son les obtingudes al laboratori. Ara les condicions per les quals s'analitzarà l'estabilitat deixen de ser residuals.

**Taula 6.3.** Anàlisi de sensibilitat envers  $\varphi'$ , per  $c' = 0$ . Es presenten els FS obtinguts

	Nivell freàtic en superfície	Nivell freàtic a 10 m de profunditat	Nivell freàtic a 30 m de profunditat	Nivell freàtic a 60 m de profunditat
$\varphi' = 24^\circ$	<b>0,405</b>	<b>0,551</b>	<b>0,765</b>	<b>0,945</b>
$\varphi' = 26^\circ$	<b>0,443</b>	<b>0,604</b>	<b>0,802</b>	<b>1,035</b>
$\varphi' = 28^\circ$	<b>0,483</b>	<b>0,658</b>	<b>0,874</b>	<b>1,128</b>
$\varphi' = 30^\circ$	<b>0,525</b>	<b>0,715</b>	<b>0,949</b>	<b>1,225</b>
$\varphi' = 35^\circ$	<b>0,636</b>	<b>0,867</b>	<b>1,150</b>	<b>1,486</b>

**Figura 6.4.** Resultats de la sensibilitat envers l'angle de fricció per  $c' = 0$



Com es pot observar una cohesió aparent nul·la no assegura la estabilitat en condicions saturades del vessant ni per angles de fricció de 35°.

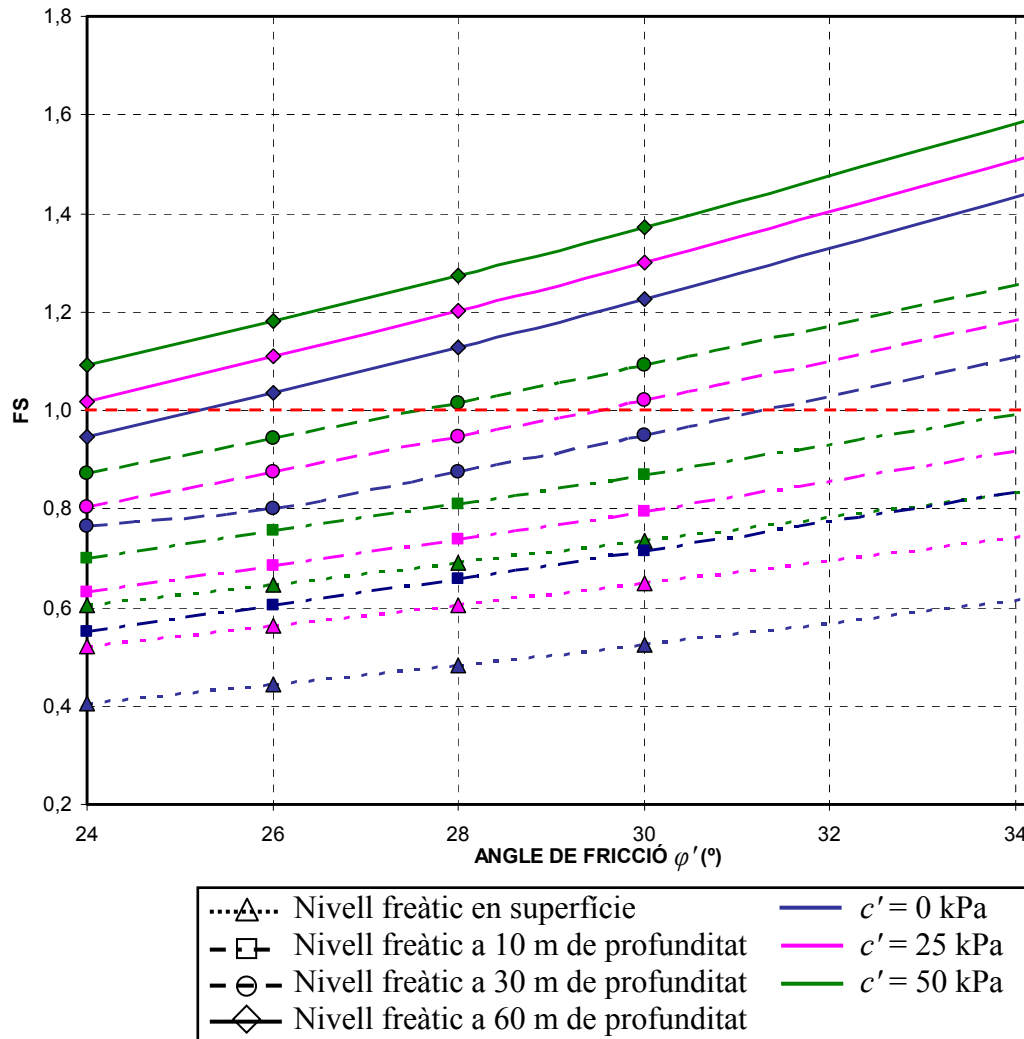
A la taula 6.4 es presenten els resultats de calcular l'equilibri limit agafant els rangs de cohesió aparent de 0 a 50 kPa i  $\varphi'$  de 24° a 35° per diferents profunditats del nivell freàtic. A la figura següent es presenten els resultats gràficament.

**Taula 6.4.** Resultats obtinguts en quant a la sensibilitat envers els paràmetres intrínsecs del terreny per diferents profunditats del NF

NF en superfície	$\varphi' = 24^\circ$	$\varphi' = 26^\circ$	$\varphi' = 28^\circ$	$\varphi' = 30^\circ$	$\varphi' = 35^\circ$
c'=0 kPa	<b>0,405</b>	<b>0,443</b>	<b>0,483</b>	<b>0,525</b>	<b>0,636</b>
c'=25 kPa	<b>0,522</b>	<b>0,562</b>	<b>0,604</b>	<b>0,648</b>	<b>0,765</b>
c'=50 kPa	<b>0,603</b>	<b>0,646</b>	<b>0,691</b>	<b>0,735</b>	<b>0,857</b>
NF a 30 m	$\varphi' = 24^\circ$	$\varphi' = 26^\circ$	$\varphi' = 28^\circ$	$\varphi' = 30^\circ$	$\varphi' = 35^\circ$
c'=0 kPa	<b>0,765</b>	<b>0,802</b>	<b>0,874</b>	<b>0,949</b>	<b>1,150</b>
c'=25 kPa	<b>0,804</b>	<b>0,874</b>	<b>0,946</b>	<b>1,021</b>	<b>1,222</b>
c'=50 kPa	<b>0,873</b>	<b>0,943</b>	<b>1,016</b>	<b>1,091</b>	<b>1,293</b>
NF a 60 m	$\varphi' = 24^\circ$	$\varphi' = 26^\circ$	$\varphi' = 28^\circ$	$\varphi' = 30^\circ$	$\varphi' = 35^\circ$
c'=0 kPa	<b>0,945</b>	<b>1,035</b>	<b>1,128</b>	<b>1,225</b>	<b>1,486</b>
c'=25 kPa	<b>1,018</b>	<b>1,109</b>	<b>1,202</b>	<b>1,299</b>	<b>1,560</b>
c'=50 kPa	<b>1,092</b>	<b>1,182</b>	<b>1,275</b>	<b>1,373</b>	<b>1,632</b>



Figura 6.5. Anàlisi de sensibilitat envers els paràmetres intrínsecs del sòl en funció de la profunditat del NF



Es demostra novament que l'augment de cohesió fa augmentar el  $FS$ , el mateix passa amb l'angle de fregament, és per això que se'ls anomena paràmetres resistents del terreny.

Analitzem els resultats per parts, és a dir, fixant un dels valors:

Com ja s'ha vist i es torna a observar a la figura 6.5 si donem per cert que la cohesió és 0 kPa el vessant no és estable en cap cas dels presentats. Ho seria per  $\varphi'$  majors de 35°.

Si fixem el valor de  $\varphi'$  i suposant l'obtingut al laboratori (24°) es veu clar que no és un valor possible ja que obligaria a que el terreny estigués sempre en condicions seques, o, si més no, el nivell freàtic hauria d'estar sempre per sota dels 60 m. Aquesta condició l'hem d'assumir impossible, ja que des de que es va produir el moviment no s'ha reactivat i aquest va succeir fa molt de temps. Els únics valors majors d'1 correspondrien a un material amb  $c'$  major de 20 kPa, però això només passa per terreny sec.

Com es pot veure, assumir que el material no pot estar saturat completament, o tenir cohesions i angles de fregament molt elevats, son condicions massa extremes com per donar com a certes. De tota manera, estimada la elevada permeabilitat d'aquest material sembla que seria molt difícil que el nivell freàtic pogués situar-se en superfície. Per tant, suposant que la cota màxima del nivell freàtic es trobi entre 30 m i 10 m, el vessant esdevindria estable de manera raonable per  $\phi'$  de l'ordre de  $35^\circ$  o majors amb  $c'$  20 kPa a 30 kPa.

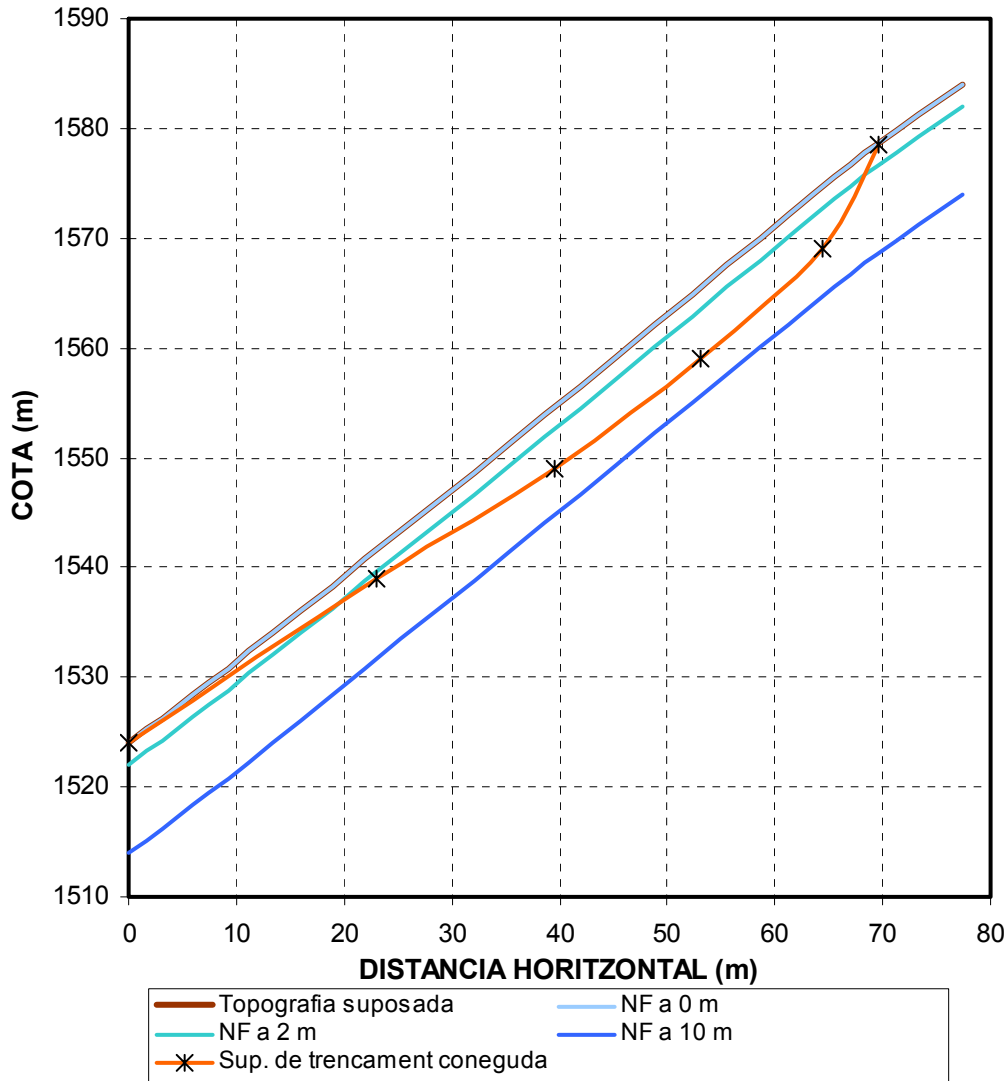
Caldria doncs conèixer millor el factor de l'aigua mitjançant col·locació de piezòmetres i així conèixer la geometria i profunditats del nivell freàtic ja que els resultats, en quant a estabilitat no son satisfactoris.

També fóra bo poder fer una campanya d'extracció de material a la zona de la superfície de trencada, situant, primerament, algun inclinòmetre per determinar la profunditat de la superfície de trencada. S'estima, però, que si ens situem a la pista forestal caldria una perforació de l'ordre de 15 a 20 m per trobar aquesta superfície de lliscament. D'aquesta manera es podria realitzar els assaigs de laboratori a mostres que no han estat exposades a l'atmosfera i a l'efecte climàtic, factors que, amb el temps, poden alterar les condicions inicials, ja sigui la granulometria, com la cohesió aparent del material.

*El corrent d'arrossegalls*

El procediment de presentació dels resultats d'estabilitat del corrent d'arrossegalls és anàleg al presentat per l'esllavissada rotacional.

**Figura 6.6.** Representació de les geometries, tant dels diferents nivells freàtics, com de la topografia i la superfície de trencament, coneguda en aquest cas



Com s'argumenta en l'apartat de criteris de càlcul, el cas del corrent d'arrossegalls és, en quant a anàlisi d'estabilitat, sensiblement diferent ja que es coneix la superfície de lliscament.

Així doncs la taula 6.5 mostra els factors de seguretat que el *PCSTABL 5M* ha calculat pels diferents nivells freàtics a 0, 2 i 10 m de profunditat.

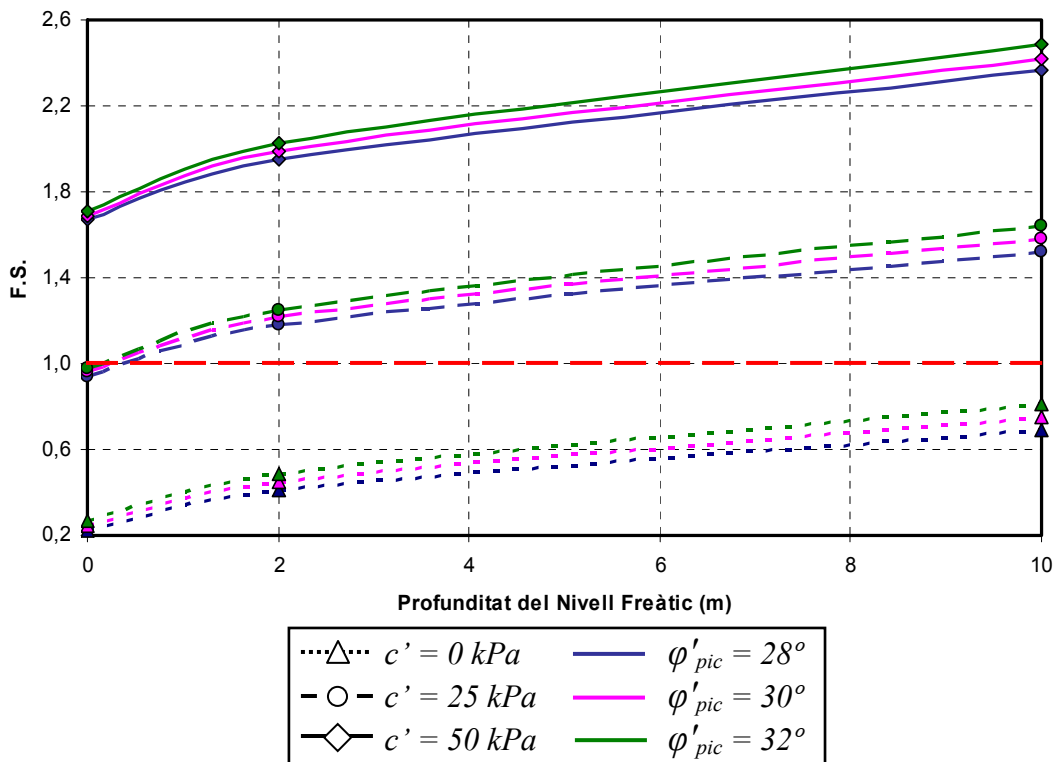
**Taula 6.5.** Valors del FS en funció de la profunditat del nivell freàtic paral·lel a la superfície topogràfica. Els paràmetres resistents corresponen als inicials, és a dir,  $c' = 50 \text{ kPa}$  i  $\phi'_{pic} = 30^\circ$

Nivell freàtic en superfície	Nivell freàtic a 30 m de profunditat	Nivell freàtic a 60 m de profunditat
<b>1,689</b>	<b>1,988</b>	<b>2,422</b>

Com es pot apreciar, aquest cas és sempre estable, el que suposa que en aquestes condicions no esdevindria mai un corrent d'arrossegalls.

Cal doncs realitzar un anàlisi de sensibilitat envers la cohesió aparent i l'angle de fricció. Aquest anàlisi es mostra a la figura 6.7.

**Figura 6.7.** Anàlisi de sensibilitat envers els paràmetres resistents en funció de la profunditat del NF



En aquest cas la influència de la cohesió és major respecte a la que ve donada pel NF, ja que el rang d'aquest últim és menor que pel cas de l'esllavissada rotacional, és a dir, la pressió dels porus a 10 m és molt menor que a 30 m.

La taula 6.6 conté els valors de factor de seguretat que es mostren de manera gràfica a la figura 6.7.

Sembla clar, observant la figura anterior que una cohesió de 50 kPa pot ésser excessiva, si el que es pretén es trobar una condició d'estabilitat precària per explicar l'esdeveniment inestable de voltants del 1992.

També s'aprecia la poca importància, en aquest cas, de l'angle de fregament, ja que es veuen les línies molt juntes. A mesura que el sòl perd aigua aquest factor guanya importància ja que el sòl no saturat permet un augment de la força interpartícula, augmentant així, la fricció del material.

Amb les condicions introduïdes i amb les hipòtesis realitzades ens decantaríem per concloure que el material ha de tenir cohesió, i aquesta ha de ser de l'ordre de 20 a 30 kPa. Que la cohesió obtinguda al laboratori sigui major pot ser deguda a la no linealitat de l'envolvent de Mohr-Coulomb. L'angle de fricció trobat al laboratori es pot acceptar com a bo tot i que ha de ser major que l'angle de fricció residual que, com ja s'ha vist ha de ser major de 24° i, de fet, proper a 30°.

**Taula 6.6.** Resultats de l'anàlisi de sensibilitat envers la cohesió i l'angle de fregament per a les diferents profunditats del NF

NF en superfície	$\varphi'_{pic} = 28^\circ$	$\varphi'_{pic} = 30^\circ$	$\varphi'_{pic} = 32^\circ$
c'=0 kPa	<b>0,226</b>	<b>0,245</b>	<b>0,265</b>
c'=25 kPa	<b>0,941</b>	<b>0,960</b>	<b>0,979</b>
c'=50 kPa	<b>1,671</b>	<b>1,689</b>	<b>1,707</b>
NF a 2 m	$\varphi'_{pic} = 28^\circ$	$\varphi'_{pic} = 30^\circ$	$\varphi'_{pic} = 32^\circ$
c'=0 kPa	<b>0,415</b>	<b>0,450</b>	<b>0,487</b>
c'=25 kPa	<b>1,181</b>	<b>1,216</b>	<b>1,252</b>
c'=50 kPa	<b>1,954</b>	<b>1,988</b>	<b>2,024</b>
NF a 10 m	$\varphi'_{pic} = 28^\circ$	$\varphi'_{pic} = 30^\circ$	$\varphi'_{pic} = 32^\circ$
c'=0 kPa	<b>0,694</b>	<b>0,753</b>	<b>0,815</b>
c'=25 kPa	<b>1,524</b>	<b>1,583</b>	<b>1,645</b>
c'=50 kPa	<b>2,363</b>	<b>2,422</b>	<b>2,484</b>

### 6.3. CONCLUSIONS

#### 6.3.1. Conclusions respecte l'anàlisi d'estabilitat de l'esllavissada rotacional (postanàlisi)

El mètode d'anàlisi utilitzat no és condicionant dels resultats, atès que els mètodes no lineals que utilitza el *PCSTABL 5M* responen amb resultats molt similars.

Els resultats obtinguts utilitzant els paràmetres intrínsecs del sòl mitjançant assaigs de laboratori, no atorguen condicions estables a l'actualitat. És a dir, els valors obtinguts al laboratori de  $c'$  i  $\varphi'_{res}$  representen una situació d'estabilitat massa pèssima.

Una cohesió aparent nul·la no assegura la estabilitat, envers la reactivació de l'esllavissada rotacional, en condicions saturades del vessant ni per angles de fricció de 35°.

En quant a  $\varphi'$ , si suposem un valor de 24°, la estabilitat no és possible si el vessant està saturat, ni tan sols si el material té una cohesió de 50 kPa.

Donat que la permeabilitat es alta, és lícit pensar que és molt difícil que el nivell freàtic pogués situar-se en superfície, saturant tot el material mobilitzat. És probable que la cota màxima superior que podria assolir el nivell freàtic estaria entre els 10 m i 30 m de profunditat. Aquesta situació proporcionaria estabilitat al vessant per  $\varphi'$  de 35° com a mínim i  $c'$  de 20 kPa a 30 kPa.

És necessari un major coneixement de la geometria del nivell freàtic i l'efecte que provoquen les pluges sobre el mateix, ja que aquest factor condicionant és el més influent i del que menys dades es tenen. Per tant, es recomana la col·locació de diferents piezòmetres.

Es recomanaria repetir els assaigs de resistència utilitzant mostres de la superfície de trencada en zones on aquesta no aflori per poder comprovar si el material en profunditat conté cohesions no observades al laboratori. Per tant, es recomana la col·locació d'inclinòmetres per situar exactament la profunditat de la superfície de trencament i l'extracció de material de la mateixa zona de trencada.

### 6.3.2 Conclusions respecte l'anàlisi d'estabilitat del corrent d'arrossegalls (*back-analysis*)

Amb les dades introduïdes del laboratori el vessant és sempre estable, el que suposa que en aquestes condicions no esdevindria mai un corrent d'arrossegalls.

Una cohesió de 50 kPa pot ésser excessiva, ja que assegura la estabilitat, inclòs per un terreny saturat.

L'angle de fregament, tal com passa també amb l'anàlisi de l'esllavissada rotacional, té menor influència en l'estabilitat que la cohesió. A mesura que el sòl perd aigua els factors resistents guanyen importància.

S'aconsegueix una estabilitat precària si, suposant que el material es troba saturat, la cohesió aparent és de l'ordre de 20 a 30 kPa i  $\varphi'_{pic}$  és de l'ordre dels 35° com a molt.

Existeix la possibilitat, amb les hipòtesis realitzades i amb les condicions introduïdes, fer coincidir els paràmetres resistents del material per aconseguir una estabilitat duradora per l'esllavissada rotacional i una estabilitat precària per a que esdevingui el corrent d'arrossegalls. Aquesta possibilitat està en que la cohesió compregui valors de entre 20 i 30 kPa i l'angle de fricció en profunditat sigui de l'ordre de 35° o 36°, un valor que hauria de ser major que el valor de pic pel qual va esdevenir el corrent d'arrossegalls. Per un angle de pic de 35° l'estabilitat del corrent també és precària. Per tant, assumirem que en profunditat actualment s'ha assolit unes condicions com les que

van produir les nombroses inestabilitats superficials, però que el major pes propi de la massa mobilitzada en l'esllavissada rotacional fa que esdevingui estable.

Semblaria que els resultats no són congruents respecte la consideració que es té de quina ha de ser la posició del nivell freàtic en ambdós casos per a que es compleixi l'estabilitat del rotacional i esdevingui el corrent d'arrossegalls. És lògic pensar que els primers metres de sòl pot arribar a saturar-se d'aigua si es dona el cas d'una pluja molt intensa, o si més no, suficient com per a que el material, donada la seva permeabilitat, ni tingui temps per a drenar l'aigua. En aquesta situació augmentaria la pressió intersticial fent disminuir la tensió efectiva fins a nivells de trencament. Aquesta condició es pot donar sigui quina sigui la posició del nivell freàtic. Per tant, es considera que per a produir-se un corrent d'arrossegalls al barranc de Tordó cal un període de pluges molt intens mentre que per a que es reactivi l'esllavissada rotacional cal que plogui durant un període llarg de temps, de manera que augmenti la posició del nivell freàtic fins a una profunditat de entre 10 m. i 30 m.