



VI CURSO DE GEOTECNIA

ILUSTRE COLEGIO OFICIAL DE GEÓLOGOS Delegación de Aragón

INTRODUCCIÓN A LA ESTABILIDAD DE TALUDES

Zaragoza, noviembre 2003

Fernando Herrera Rodríguez
Geólogo – Master en Ingeniería Geológica
Director Técnico
GEOTECNIA 2000

INDICE

1. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS.....	1
1.1. MÉTODO GENERAL DE EQUILIBRIO LÍMITE.....	5
1.1.1. FACTOR DE SEGURIDAD DE EQUILIBRIO DE MOMENTOS	5
1.1.2. FACTOR DE SEGURIDAD DE EQUILIBRIO DE FUERZAS.....	6
1.2. MÉTODOS DE CÁLCULO.....	6
2. APLICACIONES INFORMÁTICAS.....	7
2.1. SLOPE/W	7
2.2. PROBLEMA DE EJEMPLO	10
2.2.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	11
2.2.2. DEFINICIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO	11
2.2.3. DEFINICIÓN DE LA ESCALA	12
2.2.4. DEFINIR EL ESPACIADO DE LA MALLA	13
2.2.5. GRABAR EL PROBLEMA.....	14
2.2.6. BOCETO DEL PROBLEMA.....	14
2.2.7. ESPECIFICAR LA IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	15
2.2.8. ESPECIFICAR EL MÉTODO DE ANÁLISIS	16
2.2.9. ESPECIFICAR EL CONTROL DE ANÁLISIS.....	17
2.2.10. DEFINIR LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS.....	18
2.2.11. DIBUJAR LÍNEAS	19
2.2.12. DIBUJAR LÍNEAS PIEZOMÉTRICAS.....	20
2.2.13. DIBUJAR EL RADIO DE LAS SUPERFICIES DE DESLIZAMIENTO..	22
2.2.14. DIBUJAR LA MALLA DE LAS SUPERFICIES DE DESLIZAMIENTO	23
2.2.15. VER PREFERENCIAS	24
2.2.16. EJES DEL BOCETO.....	25
2.2.17. VER LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS	26
2.2.18. AÑADIR ETIQUETAS EN LOS SUELOS.....	27
2.2.19. VERIFICAR LA EXISTENCIA DE ERRORES	30
2.2.20. RESOLVER EL PROBLEMA.....	30
2.3. VER RESULTADOS DEL CÁLCULO	32
2.3.1. SUPERFICIES DE DESLIZAMIENTO.....	32
2.3.2. VER LAS FUERZAS DE LAS SUPERFICIES DE ROTURA	33
2.3.3. VER LOS CONTORNOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD	33
2.3.4. VER GRÁFICOS DE RESULTADOS	35
3. PROBLEMA	38

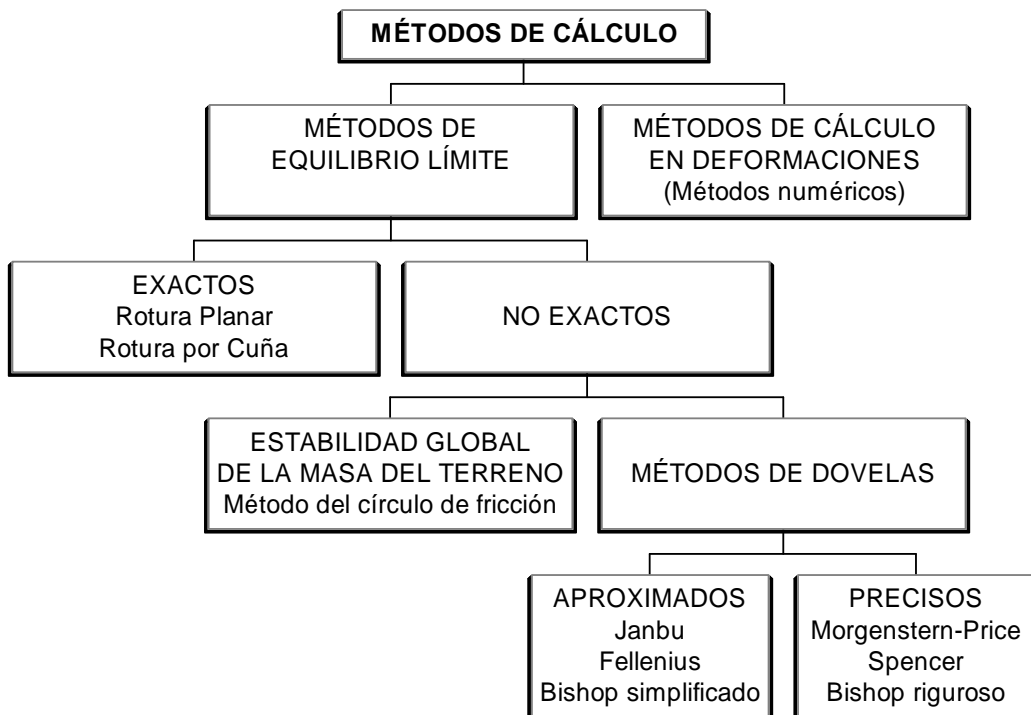
1. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS

En la mayor parte de los casos la geometría de la superficie de rotura no permite obtener una solución exacta del problema mediante la única aplicación de las leyes de la estática. El problema es “hiperestático” y ha de hacerse alguna simplificación o hipótesis previa que permita su resolución. Se pueden considerar así los métodos que consideran el equilibrio global de la masa deslizante, hoy en desuso, y los métodos de las dovelas o rebanadas, que consideran a la masa deslizante dividida en una serie de fajas verticales.

Los métodos de las dovelas o rebanas pueden clasificarse en dos grupos:

- Métodos aproximados: no cumplen todas las ecuaciones de la estática. Se pueden citar por ejemplo los métodos de *Fellenius*, *Janbu* y *Bishop simplificado*.
- Métodos precisos o completos: cumplen todas las ecuaciones de la estática. Los más conocidos son los de *Morgenstern-Price*, *Spencer* y *Bishop riguroso*.

En la siguiente figura, se muestra un gráfico en el que se recogen los diferentes métodos de cálculo.



Existen varios métodos de cálculo para establecer el factor de seguridad de un talud en suelos, estos son:

- Equilibrio límite de fuerzas.
- Equilibrio límite de momentos.

En el análisis de esfuerzos efectivos, la resistencia al corte de un suelo se define como:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' \quad (1)$$

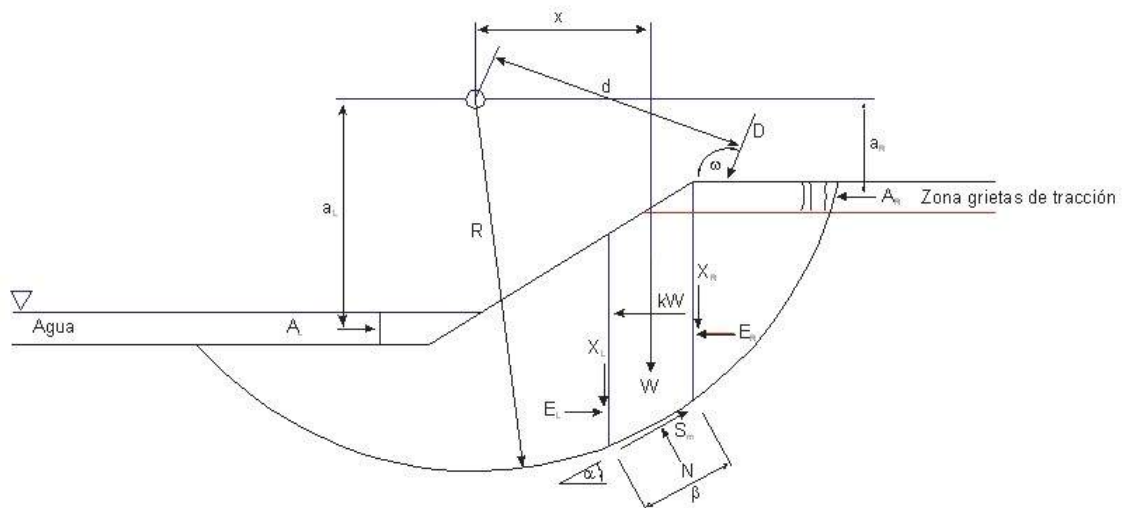
donde:

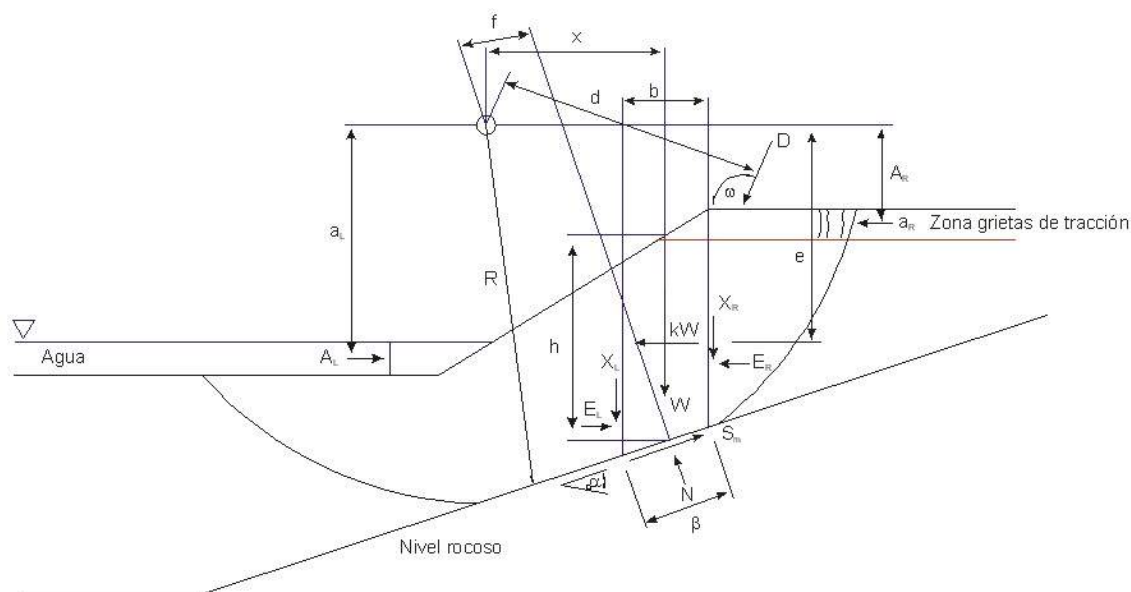
- τ = resistencia al corte.
- c' = cohesión efectiva.
- σ_n = esfuerzo normal total.
- u = presión hidrostática.
- ϕ' = ángulo friccional efectivo.

La formulación de equilibrio límite asume lo siguiente:

1. El factor de seguridad de la componente cohesiva y la parte friccional de la resistencia al corte de un suelo es la misma para todos los suelos involucrados.
2. El factor de seguridad es el mismo para todas las rebanadas.

En las figuras siguientes se muestran todas las fuerzas actuantes sobre una rotura circular y compuesta respectivamente.





Las variables definidas se describen a continuación:

- W = peso total de la rebanada, de ancho b y altura h .
- N = fuerza total normal a la base de la rebanada.
- S = fuerza de corte movilizada en la base de la rebanada.
- E = fuerza normal horizontal entre rebanadas. Subíndices D “derecha” e I “izquierda” según el lado de la rebanada en el que actúa.
- X = fuerza vertical de corte entre rebanadas. Subíndices D “derecha” e I “izquierda” según el lado de la rebanada en el que actúa.
- D = línea externa de carga.
- kW = carga sísmica horizontal aplicada en el centroide de cada rebanada.
- R = radio de la superficie de deslizamiento.
- f = perpendicular a la fuerza normal desde el centro de rotación o desde el centro de momentos.
- x = distancia horizontal desde el centro de cada rebanada al centro de rotación o centro de momentos.
- e = distancia vertical desde el centro de cada rebanada al centro de rotación o centro de momentos.
- d = distancia perpendicular desde la línea de carga al centro de rotación o centro de momentos.
- h = distancia vertical desde el centro de la base de cada rebanada a la línea más superior geoméricamente (generalmente la superficie topográfica).
- a = distancia perpendicular desde la resultante externa de la fuerza hidrostática al centro de rotación o centro de momentos. Subíndices D “derecha” e I “izquierda” según el lado del talud.
- A = resultante externa de la fuerza hidrostática. Subíndices D “derecha” e I “izquierda” según el lado del talud.
- ω = ángulo de la línea de carga con la horizontal. Este ángulo se mide según las agujas del reloj desde el eje X positivo.
- α = ángulo entre la tangente del centro de cada rebanada y la horizontal.

La magnitud de la fuerza de corte movilizada para satisfacer las condiciones de equilibrio límite son:

$$S_m = \frac{s \cdot \beta}{F} = \frac{\beta [c' + (\sigma_n - u) \tan \phi']}{F} \quad (2)$$

donde:

$\sigma_n = \frac{N}{\beta}$ esfuerzo normal medio en la base de cada rebanada.
 F = factor de seguridad.
 β = longitud de la base de cada rebanada.

Para resolver el factor de seguridad mediante el equilibrio límite se realiza el sumatorio de fuerzas en dos direcciones (horizontal y vertical) y el sumatorio de momentos.

En las tablas 1 y 2 se muestran las variables conocidas y no conocidas en el cálculo de estabilidad de taludes.

Tabla 1. Relación de variables conocidas para resolver el factor de seguridad.

Nº de variables conocidas	Descripción
n	Sumatorio de fuerzas en la horizontal
n	Sumatorio de fuerzas en la vertical
n	Sumatorio de momentos
n	Criterio de rotura de Mohr-Coulomb
4n	Nº total de ecuaciones

Tabla 2. Relación de variables desconocidas para resolver el factor de seguridad.

Nº de variables conocidas	Descripción
n	Magnitud de la fuerza normal a la base de la rebanada, N
n	Punto de aplicación de la fuerza normal en la base de la rebanada
n - 1	Magnitud de la fuerza normal a las caras entre rebanadas, E
n - 1	Punto de aplicación de la fuerza normal a las caras entre rebanadas, X
n - 1	Magnitud de la fuerza de corte en las caras entre rebanadas, X
n	Fuerza de corte en la base de cada rebanada, Sm
1	Factor de seguridad, F
1	Valor de Lambda, λ
6n - 1	Nº total de incógnitas

Como el número de incógnitas excede el número de ecuaciones, el problema es indeterminado. Asumiendo una serie de convenios: direcciones, magnitudes, puntos de aplicación de las mismas fuerzas, podemos convertir el problema en determinado.

La mayoría de los métodos asumen que el punto de aplicación de la fuerza normal en la base de la rebanada actúa a través de la línea central de la misma. Otra convenio comúnmente utilizado hace referencia a la magnitud, la dirección y el punto de aplicación de las fuerzas entre rebanadas. En general, los métodos de rebanadas se pueden clasificar en:

- Los que usan la estática para obtener el factor de seguridad.
- Los que asumen hipótesis sobre las fuerzas entre rebanadas para convertir el problema en determinado.

1.1. MÉTODO GENERAL DE EQUILIBRIO LÍMITE

El método general del equilibrio del límite (MGEL) utiliza las siguientes ecuaciones de la estática para resolver el factor de la seguridad:

1. El sumatorio de fuerzas en la dirección vertical para cada rebanada. La ecuación se resuelve para la fuerza normal en la base de la rebanada, N.
2. El sumatorio de fuerzas en la dirección horizontal para cada rebanada se utiliza para calcular la fuerza normal entre rebanadas, E.
3. El sumatorio de momentos sobre un punto común para todas las rebanadas. La ecuación se puede reordenar y calcular para el factor de seguridad del equilibrio de momentos, F_m.
4. El sumatorio de fuerzas en una dirección horizontal para todas las rebanadas, dando lugar a un factor de seguridad, F_f.

1.1.1. FACTOR DE SEGURIDAD DE EQUILIBRIO DE MOMENTOS

El sumatorio de momentos de todas las rebanadas para un único punto en común se expresa como sigue:

$$\sum W_x - \sum S_{ms} R - \sum Nf + \sum kWe \pm [Dd] \pm Aa = 0$$

Sustituyendo la ecuación anterior en la ecuación (2) y resolviendo para el factor de seguridad tenemos:

$$F_m = \frac{\sum (c'\beta R + (N - u\beta) R \tan \phi')}{\sum W_x - \sum Nf + \sum kWe \pm [Dd] \pm Aa}$$

1.1.2. FACTOR DE SEGURIDAD DE EQUILIBRIO DE FUERZAS

El sumatorio de fuerzas en la horizontal para todas las rebanadas se expresa:

$$\sum(E_L - E_R) - \sum(N \sin \alpha) + \sum(S_m \cos \alpha) - \sum(kW) + [D \cos \omega] \pm A = 0$$

Cuando el movimiento afecta a toda la masa, se asume que el primer término es igual a cero. Sustituyendo en la ecuación (2) y resolviendo para el factor de seguridad, se tiene:

$$F_f = \frac{\sum(c' \beta \cos \alpha + (N - u \beta) \tan \phi' \cos \alpha)}{\sum N \sin \alpha + \sum kW - [D \cos \omega] \pm A}$$

1.2. MÉTODOS DE CÁLCULO

En el cuadro siguiente se muestran los distintos métodos de cálculo más utilizados, en el que se ha indicado la forma de resolver y calcular el factor de seguridad:

MÉTODO	1 Dirección	2 Direcciones	Equilibrio de Momentos
Ordinario o de Fellenius	SI	NO	SI
Simplificado de Bishop	SI	NO	SI
Simplificado de Jambu	SI	SI	NO
Jambu riguroso	SI	SI	**
Spencer	SI	SI	SI
Morgenstern-Price	SI	SI	SI
Método general de equilibrio límite	SI	SI	SI

** el equilibrio de momentos es utilizado para calcular las fuerzas entre rebanadas.

2. APLICACIONES INFORMÁTICAS

Son numerosas las aplicaciones informáticas existentes en el mercado, capaces de resolver la estabilidad de un talud frente al deslizamiento, así como simular cargas externas, existencia de agua, terremotos, etc.

Un programa sencillo de manejar y bastante completo es el SLOPE/W.

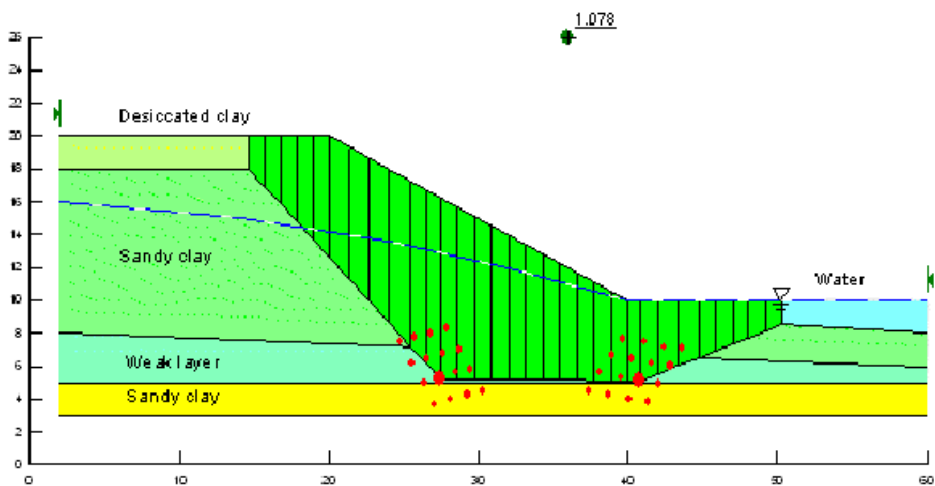
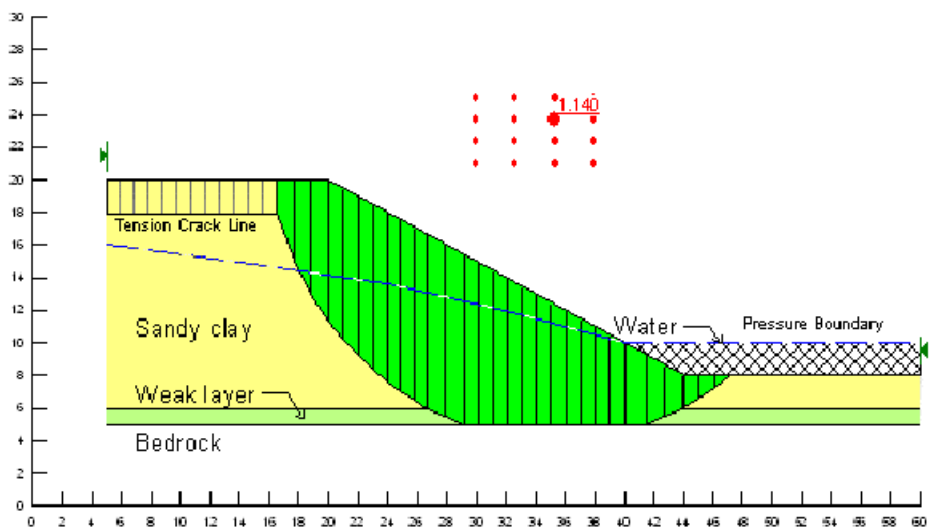
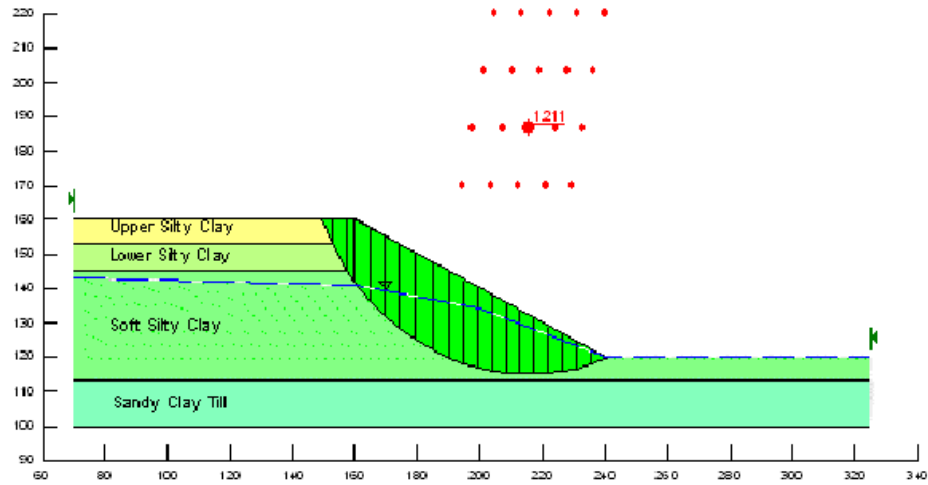
2.1. SLOPE/W

A continuación se enumeran las características principales del programa:

1. Métodos de cálculo:
 - Ordinario (Fellenius).
 - Bishop simplificado.
 - Janbu simplificado.
 - Spencer.
 - Morgentern-Price.
 - Cuerpo de Ingenieros Americanos.
 - Lowe-Karafiath.
 - Método general de equilibrio límite.

2. Geometría y estratigrafía:
 - Múltiples tipos de suelos.
 - Parcialmente sumergidos.
 - De espesor variable.
 - Estratos discontinuos.
 - Capas impenetrables.
 - Grietas de tracción secas y saturadas.

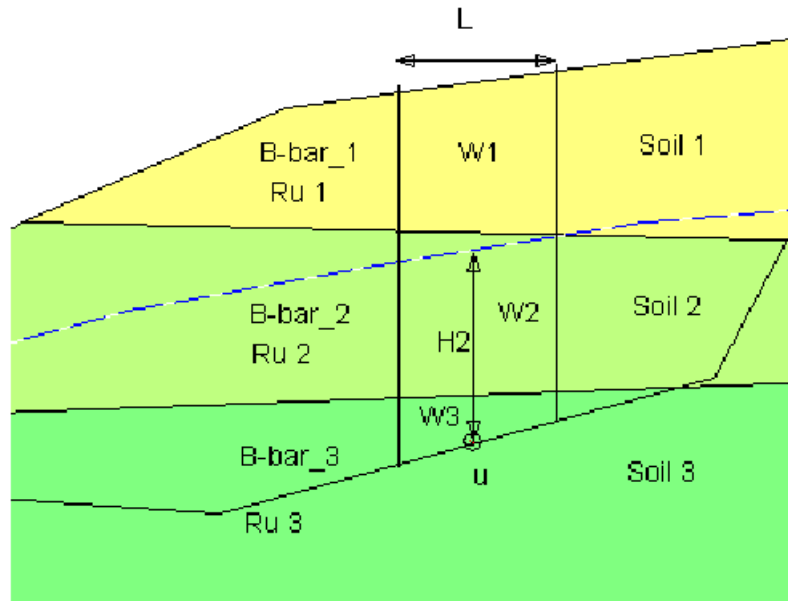
3. Superficie de deslizamiento:
 - Circular.
 - Compuesta.
 - Total de rotura.
 - Por bloques.



4. Presión hidrostática:

$$Ru = \frac{\sigma_v}{\gamma_w \cdot h_w}$$

- Coeficiente de presión de agua, Ru ($\frac{\sigma_v}{\gamma_w \cdot h_w}$).
- Superficie piezométrica.
- Presión hidrostática para cada punto.
- Contornos de presiones hidrostáticas.

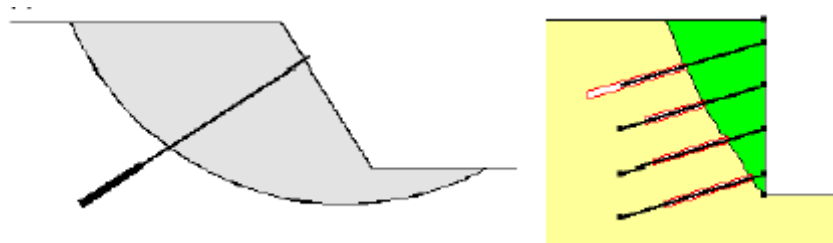


5. Propiedades de los suelos:

- Tensiones totales y efectivas (σ y σ').
- Resistencia al corte sin drenaje ($\phi = 0$), $\tau = c$.
- Resistencia al corte cero (agua, $c = 0$ y $\phi = 0$).
- Materiales impenetrables (lechos rocosos).
- Criterios de rotura bilineales.
- Incrementos de la cohesión con la profundidad.
- Resistencia al corte anisótropa.
- Criterios de rotura específicos.

6. Cargas:

- Rellenos.
- Bulones, anclajes.
- Bermas de carga al pie del talud.
- Cargas sísmicas.



2.2. PROBLEMA DE EJEMPLO

A continuación se describe paso a paso el procedimiento a seguir para obtener el factor de seguridad de un talud dado.

En la figura 1. se muestra el perfil del talud problema, así como las características geotécnicas de los materiales que lo constituyen.

El talud está excavado en dos materiales con un ángulo 2:1 (horizontal : vertical).

El nivel superior tiene 5 m de potencia y la altura del talud es de 10 m.

4 m por debajo del pie del talud aparece un substrato rocoso y el nivel piezométrico es el que se muestra en la mencionada figura.

Las características geotécnicas de los materiales son:

Nivel superior:

$$\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$$

$$c = 5 \text{ kPa}$$

$$\phi = 20^\circ$$

Nivel inferior:

$$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$$

$$c = 10 \text{ kPa}$$

$$\phi = 25^\circ$$

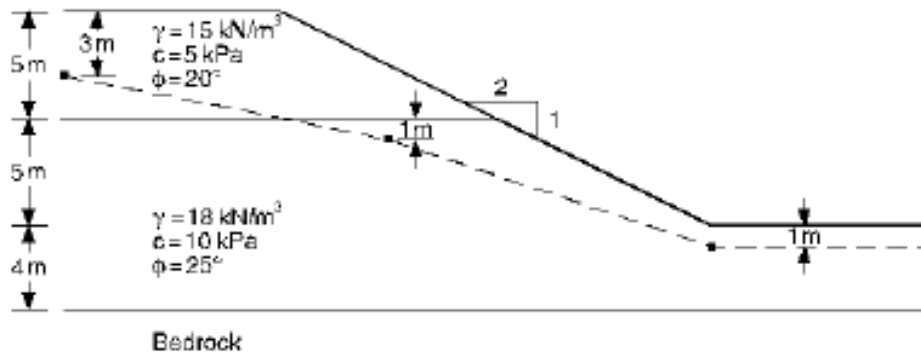


Figura 1. Perfil talud problema

2.2.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El programa SLOPE/W DEFINE se utiliza para definir el problema.

- Arrancar el programa DEFINE:

Una vez iniciado el programa, aparecerá una pantalla como la mostrada en la figura 2.

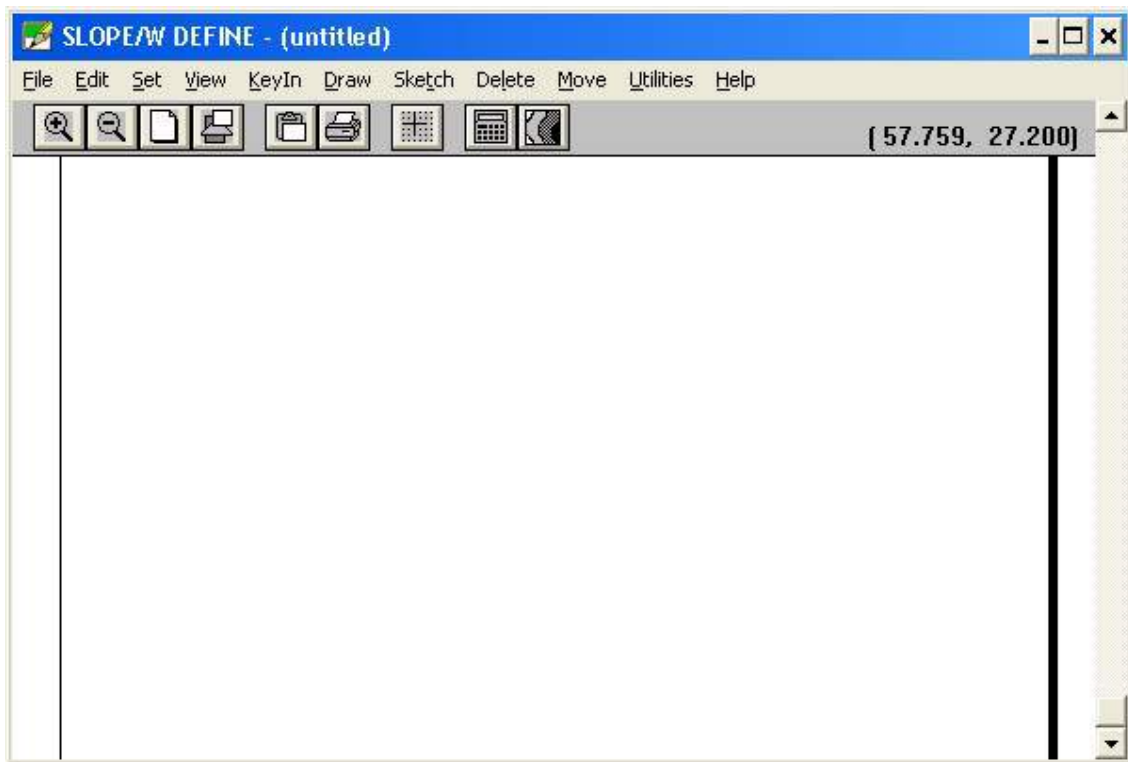


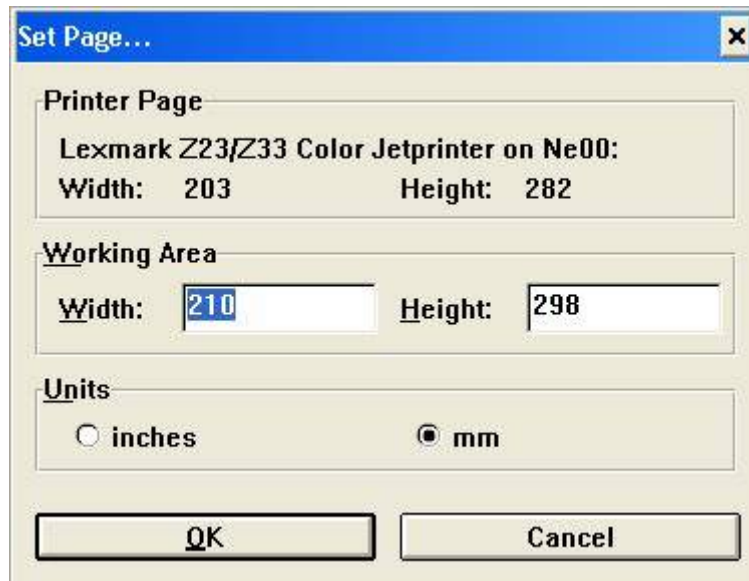
Figura 2. Aspecto de la pantalla de trabajo de SLOPE/W DEFINE.

2.2.2. DEFINICIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO

El área de trabajo, es el área establecida por el usuario para definir el problema. El área puede ser más pequeña, igual o más grande que el tamaño del papel.

Para el ejemplo, vamos a definir un área de trabajo de 260 mm de ancho x 220 mm de alto.

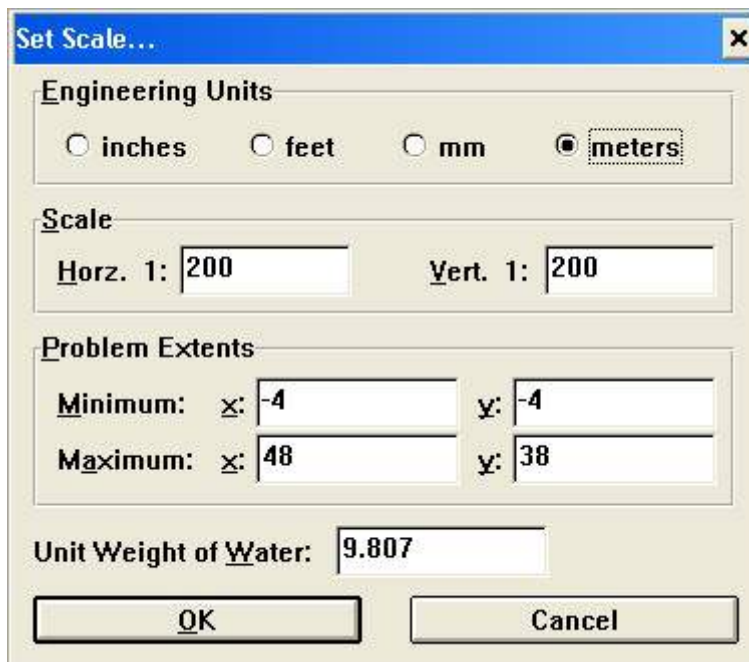
- Para definir el tamaño del área de trabajo:
 1. Seleccionamos *Page* en el desplegable *Set* y aparecerá el cuadro de diálogo siguiente:



2. Nos informa de la impresora preseleccionada y del tamaño del área de trabajo: 210 x 298.
3. Sustituimos el ancho por 260 y el alto por 200.
4. Aceptamos en OK.

2.2.3. DEFINICIÓN DE LA ESCALA

- Para definir la escala:
 1. Seleccionamos *Scale* en el desplegable *Set* y aparecerá el cuadro de diálogo siguiente:

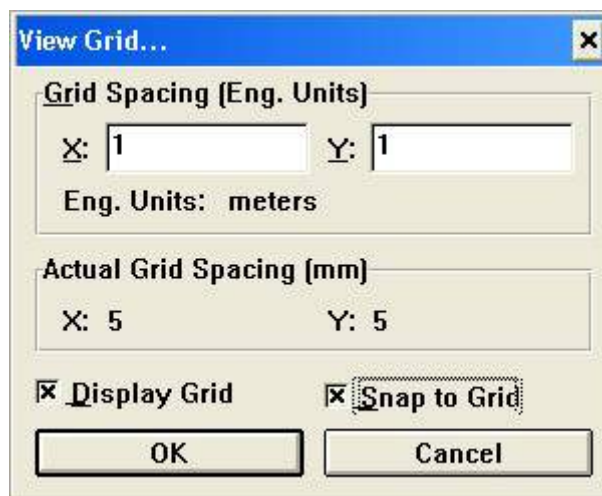


2. Establecemos los límites en -4 (mínimo de X) y 40 (máximo de X) y en -4 (mínimo de Y) y 40 (máximo de Y).
3. Automáticamente la escala horizontal cambia a 169.23 y la vertical a 209.52.
4. Redefinimos la escala horizontal y vertical a 200.
5. Automáticamente el mínimo y máximo de X cambian a -4 y 48 y para Y a -4 y 38.
6. Seleccionamos OK después de comprobar que la densidad del agua vale 9.807 KN/m³.

2.2.4. DEFINIR EL ESPACIADO DE LA MALLA

La visualización de la malla en el fondo del área de trabajo constituye una ayuda fundamental a la hora de dibujar y visualizar el perfil del talud. De tal modo que, se puede *ajustar* a la malla cualquier punto de nuestro perfil.

- Para definir la malla:
 1. Seleccionamos *Grid* en el desplegable *View* y aparecerá el cuadro de diálogo siguiente:

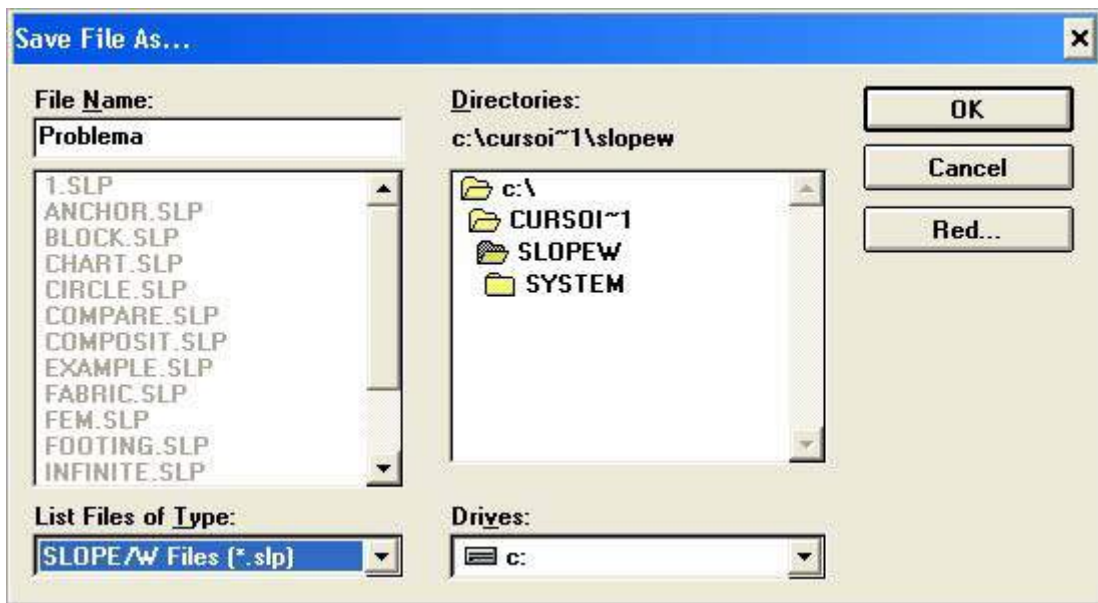


2. Anotamos 1 en el espaciado de X y 1 en el de Y, para definir el espaciado de la malla.
3. Automáticamente nos informa de que el espaciado actual de la malla es de 5 mm.
4. Seleccionamos Display Grid y Snap to Grid para mostrar y ajustar los puntos de nuestro perfil a la malla.
5. OK para aceptar y salir.

2.2.5. GRABAR EL PROBLEMA

Constituye una buena práctica grabar el problema de vez en cuando para no correr el riesgo de perder la información creada.

- Para grabar el problema:
 1. Seleccionamos *Save* en el desplegable *Menu* y aparecerá el cuadro de diálogo siguiente:



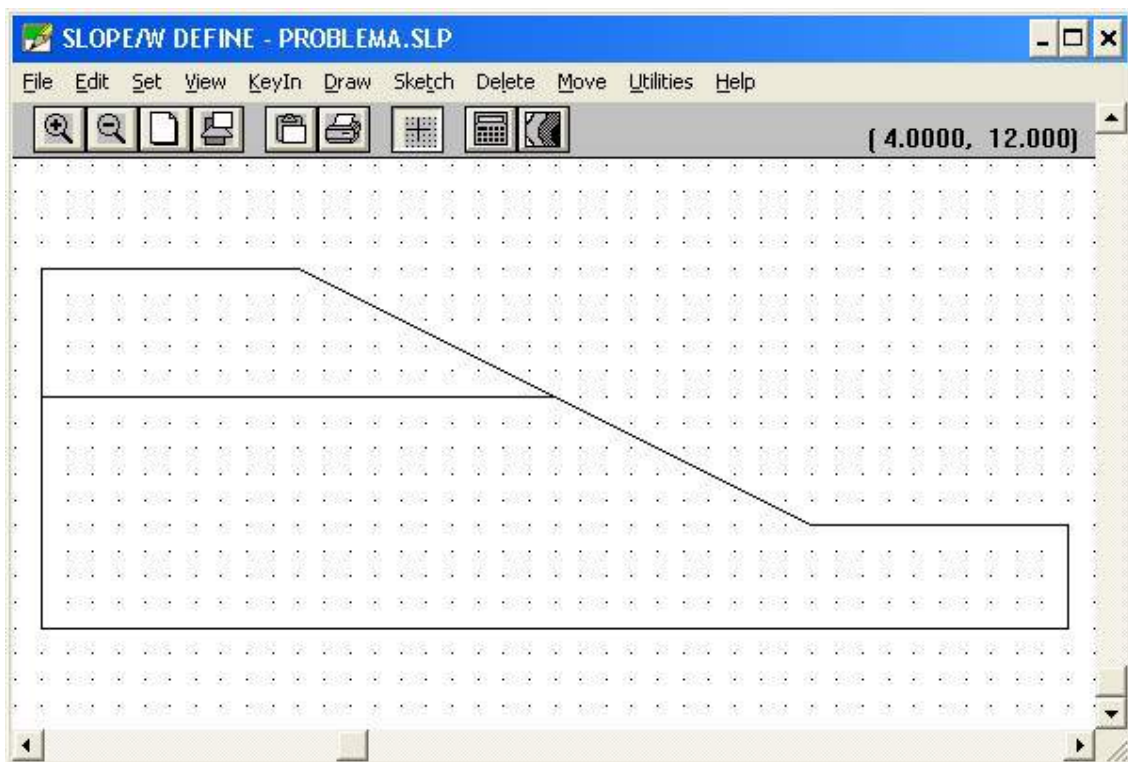
2. Seleccionamos la carpeta y asignamos un nombre cualquiera a nuestro ejercicio, por ejemplo: Problema.slp.
3. OK para aceptar y salir.
4. Utilizaremos Save As (guardar como...) para salvarlo con otro nombre.

2.2.6. BOCETO DEL PROBLEMA

Para definir el problema de estabilidad del talud, es conveniente preparar un boceto (“Sketch”) del problema, ya que constituye una guía fundamental para establecer la geometría de los distintos elementos del problema (dimensiones, geometría de los niveles, superficies piezométricas, situación de cargas, etc.).

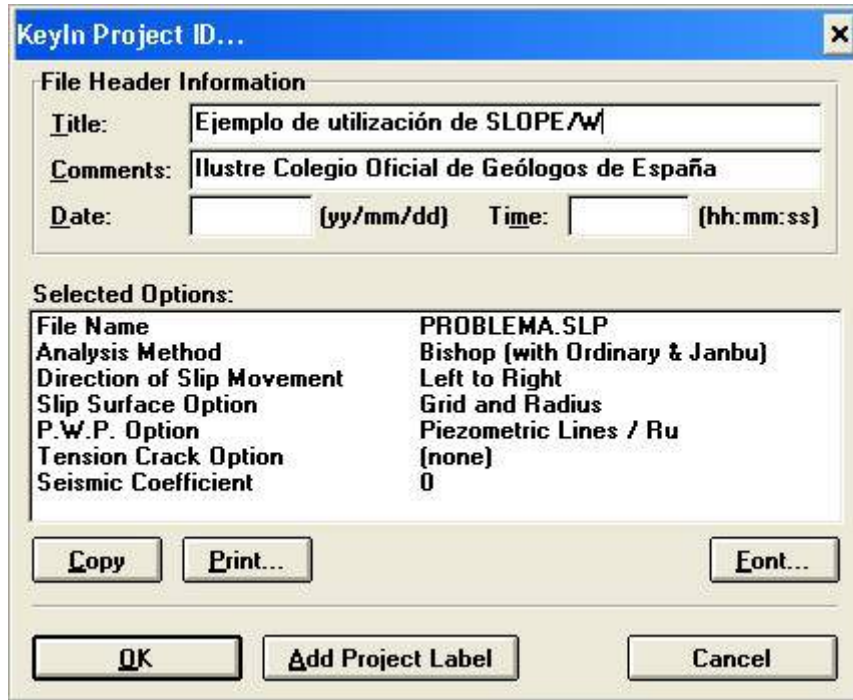
- definición del boceto del problema:
 1. En la barra de herramientas de la parte superior, presionar Zoom Página para visualizar la página completa.

2. Seleccionar Lines del menú desplegable Sketch. El cursor se convierte en una cruz y en la barra de estado aparece el mensaje <Sketch Lines>.
3. Mover el ratón hasta el punto (0,14) y presionar. El origen de la línea será este.
4. Mover nuevamente el cursor hasta el punto (10,14) y presionar (botón izquierdo).
5. Realizar la misma operación con las coordenadas: (30,4), (40,4), (40,0), (0,0) y (0,14). Para finalizar presionar el botón derecho del ratón.
6. Seleccionar nuevamente Lines y proceder como en el punto 3 en las coordenadas (0,9) y (20,9). Presionar el botón derecho.
7. Presionar Zoom Objects en la barra de herramienta para aumentar el dibujo.
8. Finalizado el esquema, en la pantalla tendremos un perfil como el que se muestra a continuación:



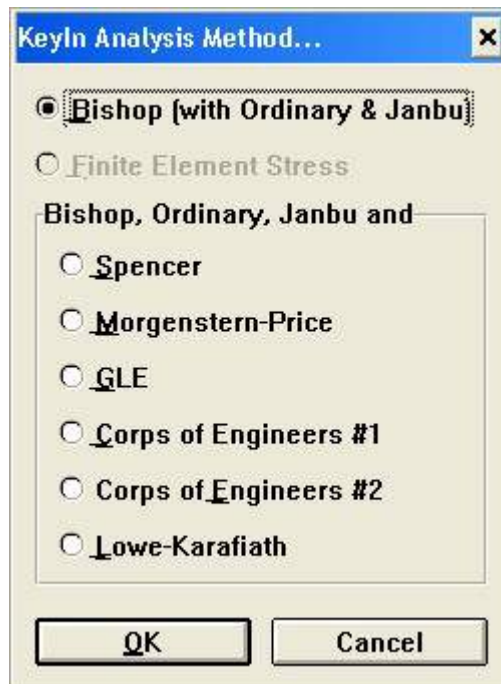
2.2.7. ESPECIFICAR LA IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

- Para especificar la identificación del problema:
 1. Seleccionar *Project ID...* en el menú desplegable KeyIn. El cuadro siguiente aparecerá:



2.2.8. ESPECIFICAR EL MÉTODO DE ANÁLISIS

- Para especificar el método de análisis:
 1. Seleccionar *Analysis Method* en el menú desplegable *KeyIn*. El cuadro de diálogo siguiente aparecerá:

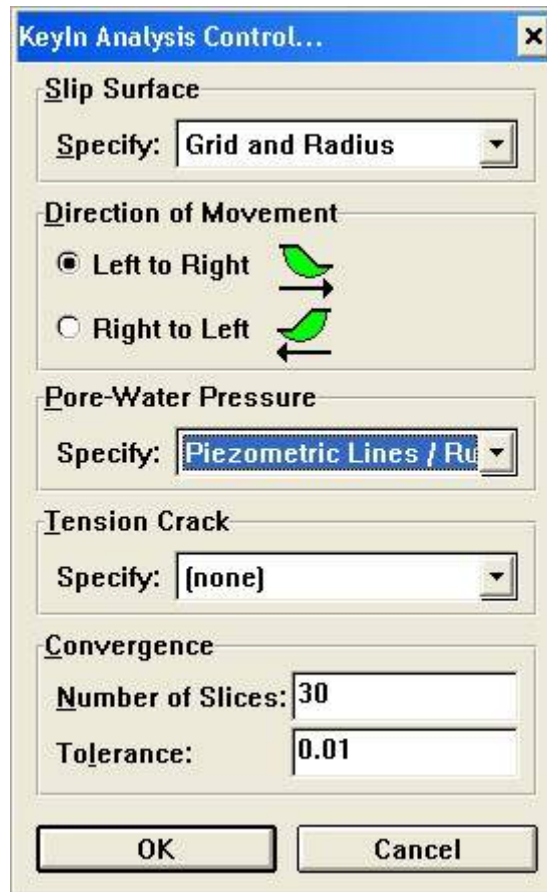


2. Seleccionar Bishop (with Ordinary & Janbu).

3. OK, para confirmar y salir.

2.2.9. ESPECIFICAR EL CONTROL DE ANÁLISIS

- Para especificar el control de análisis:
 1. Seleccionar *Analysis Control* en el menú desplegable *KeyIn*. El cuadro de diálogo siguiente aparecerá:



2. Seleccionar Grid and Radius en superficie de deslizamiento, Left to Right en la dirección de movimiento, Piezometric Lines/Ru en la presión hidrostática, none en las grietas de tracción y 30 y 0.01 en el nº de círculos de deslizamiento y tolerancia respectivamente en la convergencia de la solución.
3. OK para confirmar y salir.

2.2.10. DEFINIR LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS

Las propiedades geotécnicas del problema estaban definidas en la figura 1.

- Para definir las propiedades de los suelos:
 1. Seleccionar *Soil Properties* en el menú desplegable *KeyIn*. El cuadro de diálogo siguiente aparecerá:

#	Strength Model	Description
	Mohr-Coulomb	

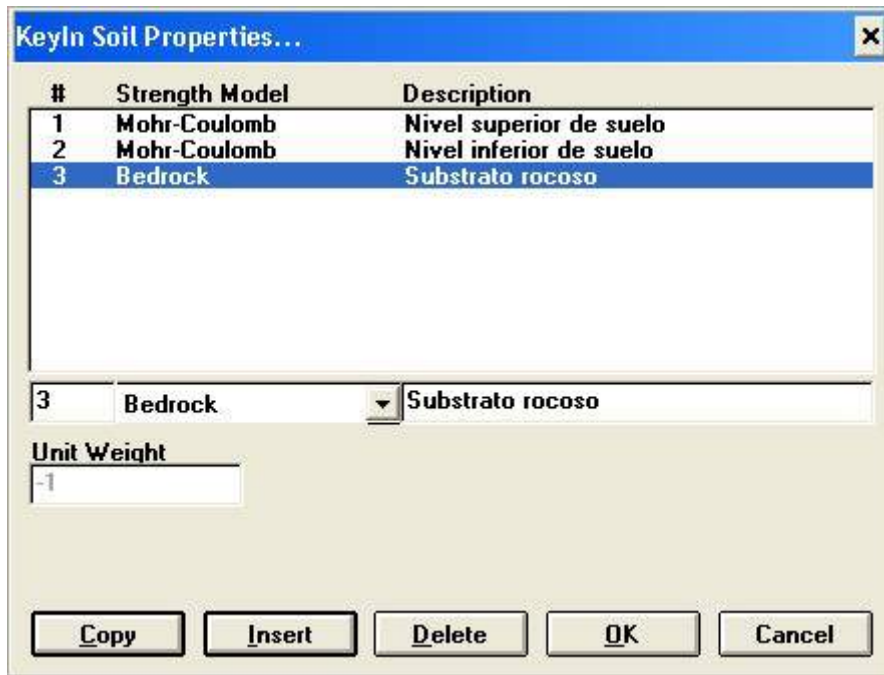
Unit Weight: 0 Phi: 0

Cohesion: 0 Unsaturated Phi B: 0

Buttons: Copy, Insert, Delete, OK, Cancel

2. En el cuadro de diálogo, escribir: 1, seleccionar Mohr-Coulomb y en la descripción Nivel superior de suelo.
3. En la unidad de peso: 15, en la cohesión: 5 y en ángulo de rozamiento interno: 20.
4. Seleccionar Copy.
5. Repetir de 2 a 4 para el Nivel de suelo inferior.
6. Repetir de 2 a 4 para el Substrato rocoso, seleccionando Bedrock.
7. OK para confirmar y salir.

La imagen siguiente muestra como quedaría el cuadro de diálogo anterior con los datos del problema:



2.2.11. DIBUJAR LÍNEAS

La geometría del talud y la estratigrafía del mismo están definidas por líneas que conectan puntos. Todas las líneas empiezan en la parte más situada a la izquierda y acaban en la parte más situada a la derecha.

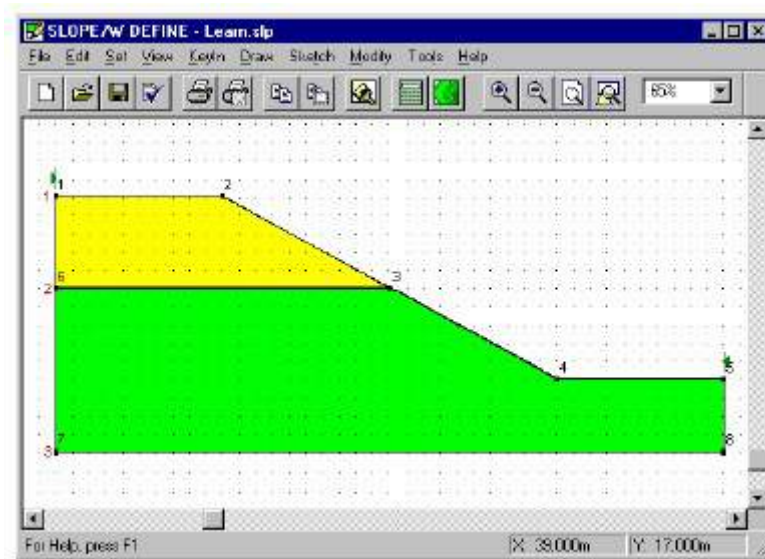
El procedimiento general es definir la línea de la parte alta primero (Suelo 1) y seguir con las demás en orden secuencial.

- Para definir líneas en la geometría:
 1. Seleccionar *Lines* en el menú desplegable *Draw*. El siguiente cuadro de diálogo aparecerá:



2. Seleccionar 1 en Line #.
3. OK, para empezar a dibujar.
4. Mover el ratón hasta el punto (0,14) y apretar el botón derecho.

5. El orden de secuencia de puntos se muestra en la siguiente figura:

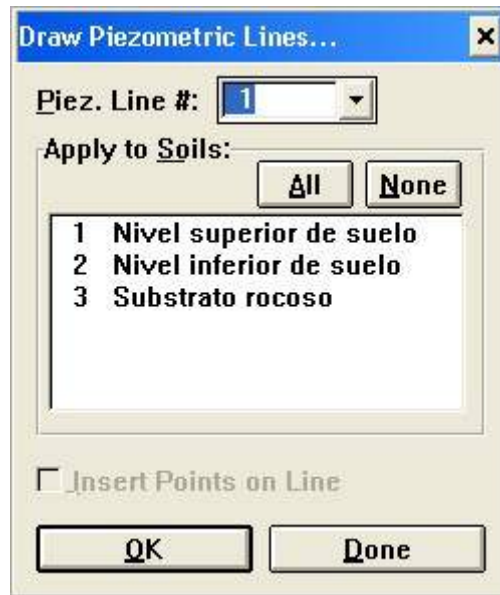


6. A medida que se va seleccionando cada punto, se va dibujando una línea roja.
7. Para finalizar la línea 1, apretar el botón derecho del ratón.
8. Para dibujar la línea 2, proceder como en 1 y seleccionar en el menú desplegable de Lines #: 2.
9. Continuar como en 4, con el punto de origen en (0,9) y finalización en (20,9). Botón derecho del ratón para finalizar.
10. Continuar como en 1, para definir la línea 3, seleccionando 3 en Lines #.
11. Continuar como en 4, desde el punto (0,0) y finalizando en (40,0) para definir el techo del substrato rocoso.
12. Botón derecho para confirmar y DONE para terminar.

2.2.12. DIBUJAR LÍNEAS PIEZOMÉTRICAS

Las condiciones hidrostáticas de los dos suelos son las mismas y están definidas por una única superficie piezométrica (ver figura 1).

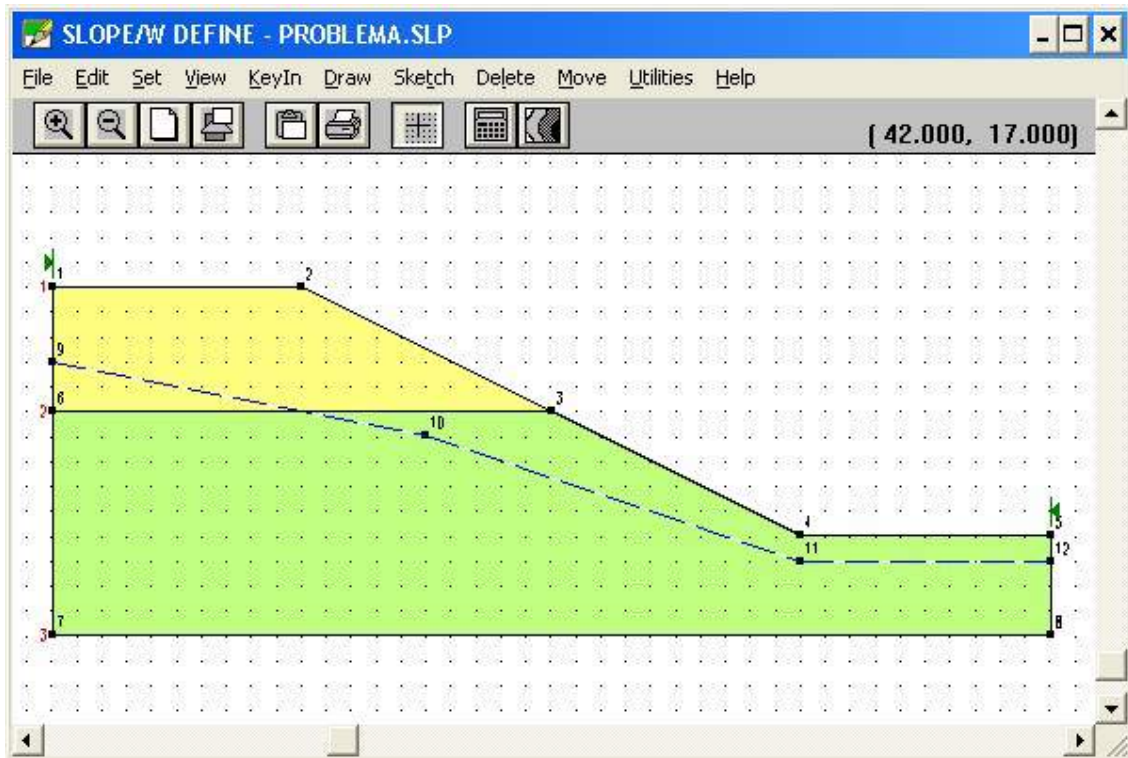
- Para dibujar la línea piezométrica:
 1. Seleccionar Pore Water Pressure en el menú desplegable Draw. El siguiente cuadro de diálogo aparecerá:



2. Seleccionar 1 en Piez. Line #.
3. Seleccionar el suelo 1 (Nivel superior de suelo) y el suelo 2 (Nivel inferior de suelo) y presionar OK. Automáticamente la flecha del ratón se convertirá en una cruz y en la barra de estado aparecerá un mensaje con la inscripción <Dra. P.W.P.>.
4. Mover el cursor cerca del punto (0,11) y apretar el botón izquierdo, después desplazarse hasta el punto (15,8) y presionar nuevamente el botón izquierdo.
5. Repetir con el punto (30,3) y (40,3).
6. Para finalizar presionar el botón derecho. El cuadro de diálogo inicial aparecerá de nuevo y presionar DONE para aceptar.

Como las superficies de deslizamiento no se extenderán dentro del nivel rocoso, no hace falta que se defina la piezometría en dicho nivel.

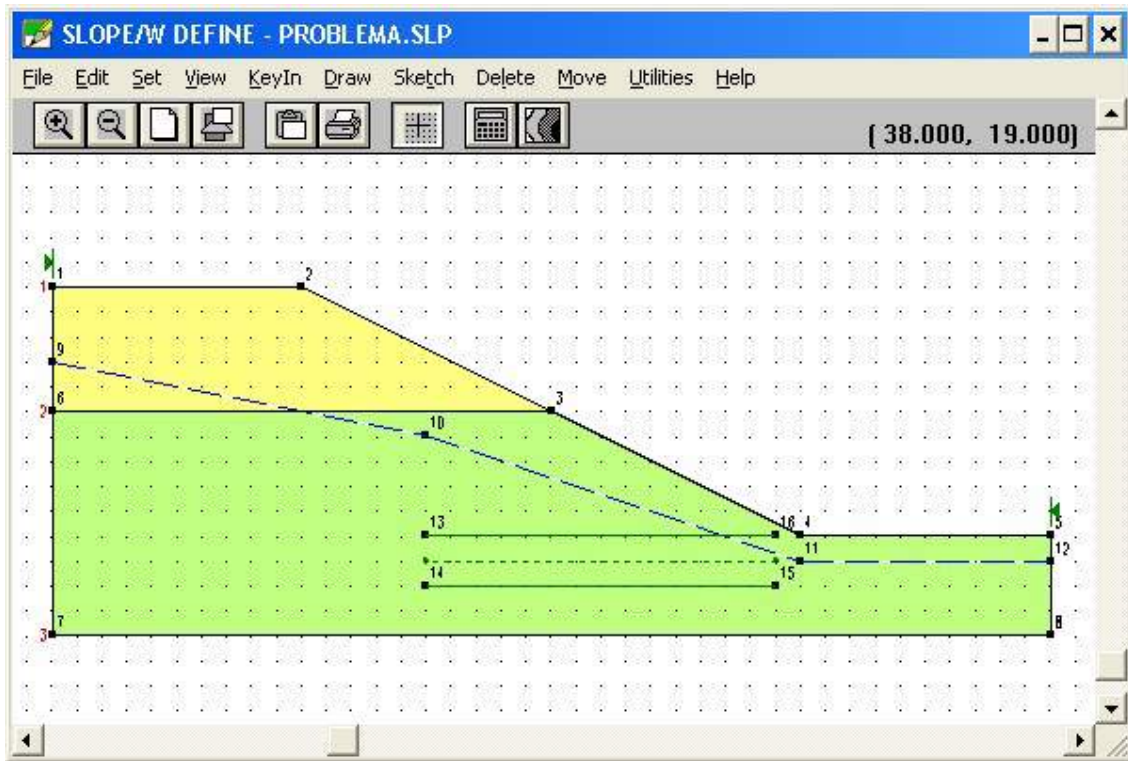
En la imagen siguiente se muestra el resultado:



2.2.13. DIBUJAR EL RADIO DE LAS SUPERFICIES DE DESLIZAMIENTO

Para el control de la localización de las superficies de deslizamiento es necesario definir líneas o puntos a partir de los cuales definir los radios de las mismas.

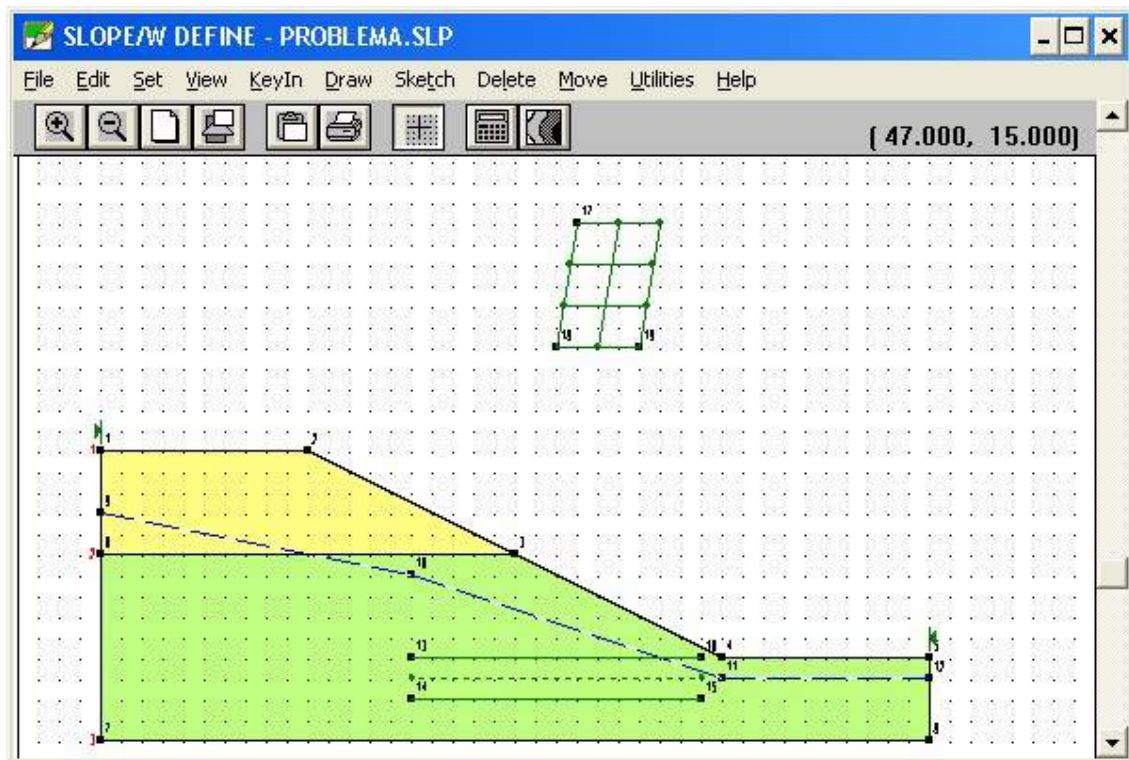
- Para definir las líneas de radios:
 1. Seleccionar Slip Surface del menú desplegable Draw. Aparece un menú desplegable. Seleccionar Radius.
 2. El cursor del ratón se convierte en una cruz y en la barra de estado aparece el mensaje: <Draw Radius>.
 3. Mover el cursor cerca del punto (15,4) y presionar el botón izquierdo del ratón, mover nuevamente el cursor al punto (15,2) y presionar el botón izquierdo del ratón.
 4. Realizar lo mismo desde el punto (29,2) y (29,4) y finalizar presionando el botón derecho.
 5. Aparecerá un cuadro de diálogo preguntando por el nº de divisiones, poner 2.
 6. Se han generado 3 líneas de radios, es decir SLOPE/W SOLVE dibujará círculos de rotura tangentes a estas líneas.
 7. Después de completar el proceso aparecerá el siguiente gráfico:



2.2.14. DIBUJAR LA MALLA DE LAS SUPERFICIES DE DESLIZAMIENTO

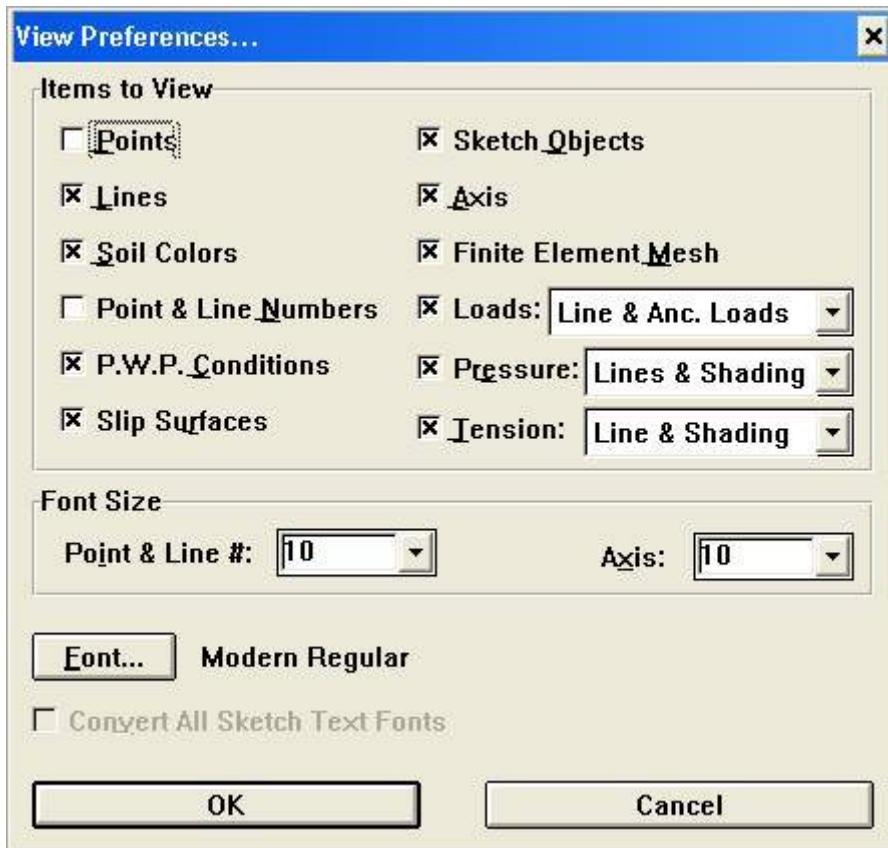
La malla de centros de rotación de los círculos de rotura es definida para tener control sobre la localización de los mismos.

- Para dibujar la malla de centros:
 1. Seleccionar Slip Surface del menú Draw.
 2. Aparecerá un menú desplegable.
 3. Seleccionar Grid.
 4. El cursor del ratón se convertirá en una cruz y en la barra de estado aparecerá el mensaje: <Draw Grid>.
 5. Mover el cursor al punto (23,25) y presionar el botón izquierdo, luego moverse al botón (22,19) y presionar el botón izquierdo.
 6. Se insinúa un paralelogramo y si nos desplazamos al punto (26,19) definimos el tercer lado del mismo.
 7. Aparece un cuadro de diálogo preguntando por el nº de divisiones en X (2) y luego en Y (3). Automáticamente aparece el paralelogramo dividido por 2 según X y por 3 según Y. Tan y como muestra la figura siguiente:



2.2.15. VER PREFERENCIAS

No es necesario que se muestren los números (1 a 19) de la ventana DEFINE, para ello, seleccionar preferentes en el menú *View* y deseleccionar *Points* y *Points & Line Numbers*.



2.2.16. EJES DEL BOCETO

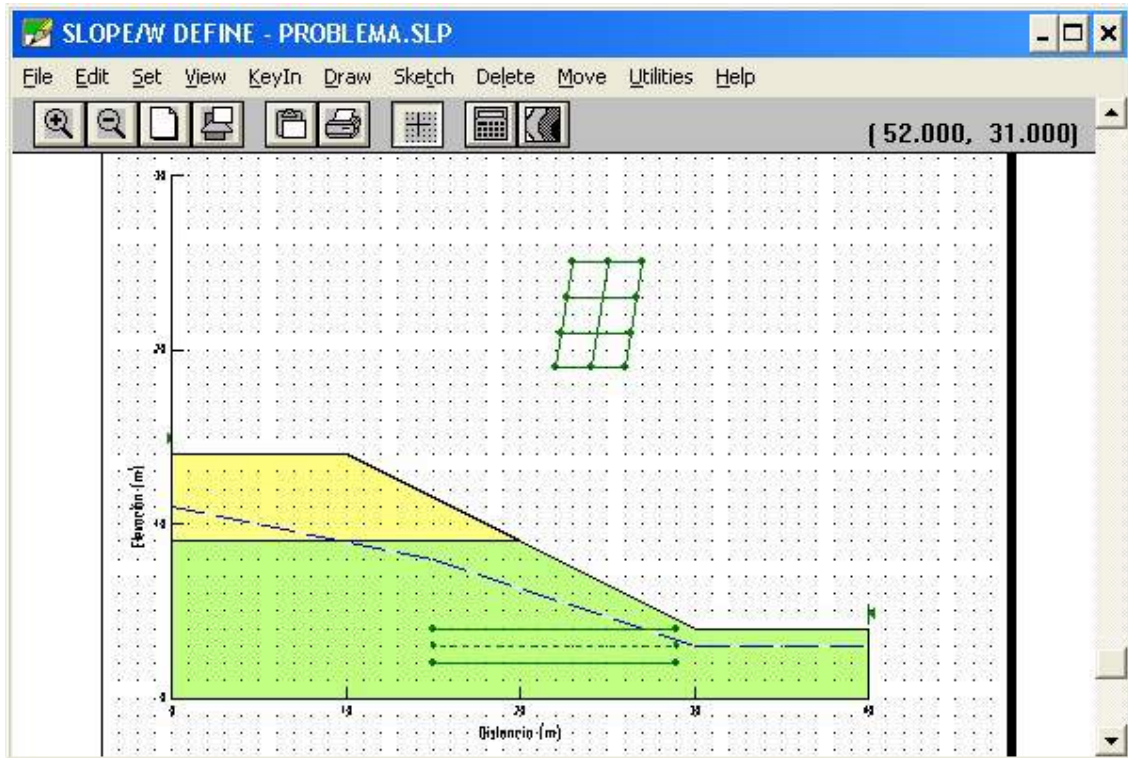
Para definir los ejes del perfil y poder interpretarlo después de ser impreso, se debe proceder como sigue:

1. Seleccionar *Axis* del menú *Sketch*. El siguiente cuadro de diálogo aparecerá:



2. Seleccionar el eje izquierdo y el inferior.

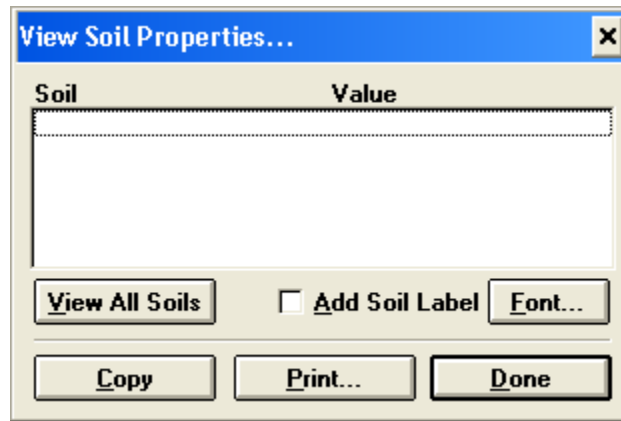
3. Escribir el título de los ejes:
 - a. Eje inferior: Distancia (m).
 - b. Eje izquierdo: Elevación (m).
4. OK para aceptar.
5. El cursor se convierte en una cruz.
6. Situarse en el punto (0,0), apretar el botón izquierdo y sin soltarlo situarse en el punto (40,25) y soltarlo.
7. Una vez realizado aparecerá la imagen siguiente:



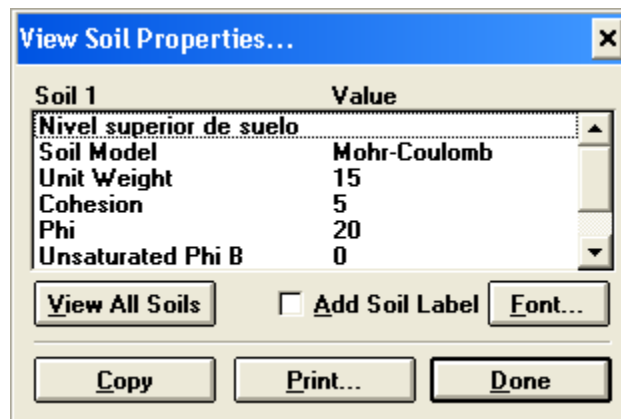
2.2.17. VER LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS

Para ver las propiedades de los suelos definidos en el boceto debe procederse como sigue:

- Seleccionar *Soil Properties* en el menú *View*. El cursor del ratón se transformará en una cruz y en la barra de estado aparecerá el mensaje <View Soil Properties>. A continuación aparecerá el cuadro de diálogo siguiente:



- Mover el cursor cerca del punto (5,11) o cualquier punto dentro del suelo 1 y presionar el botón izquierdo del botón. En ese momento aparecerá el cuadro de diálogo siguiente:

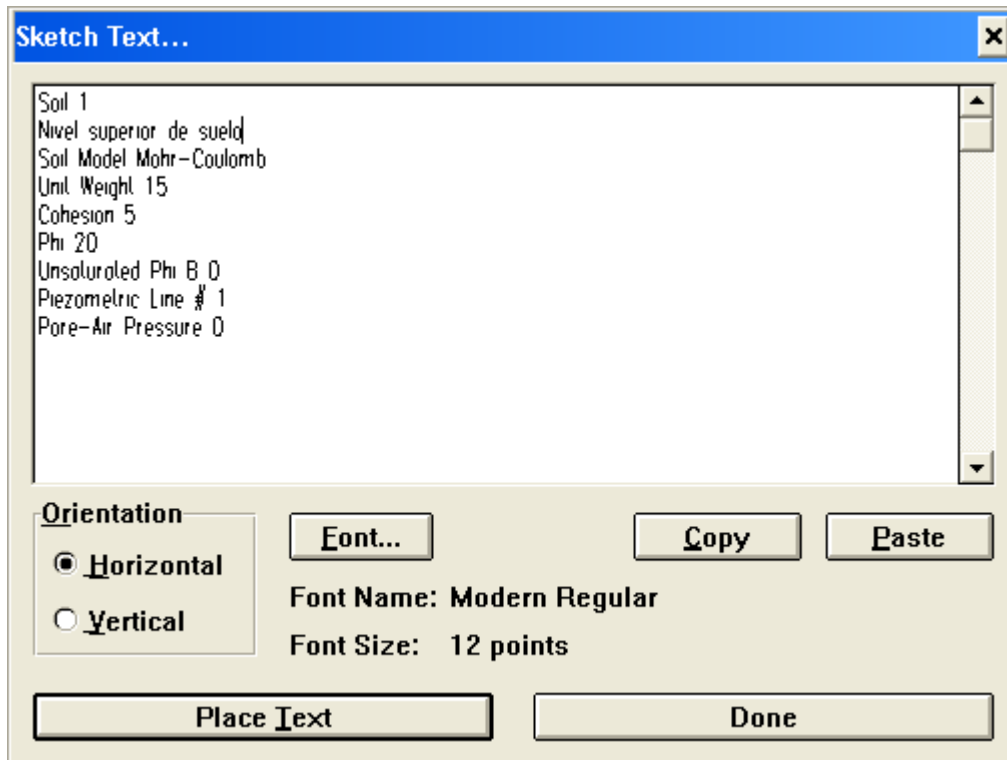


- También pueden verse todas las características de los demás suelos, presionando en *View All Soils*, añadir etiquetas (*Add Soil Label*), copiar o imprimir.

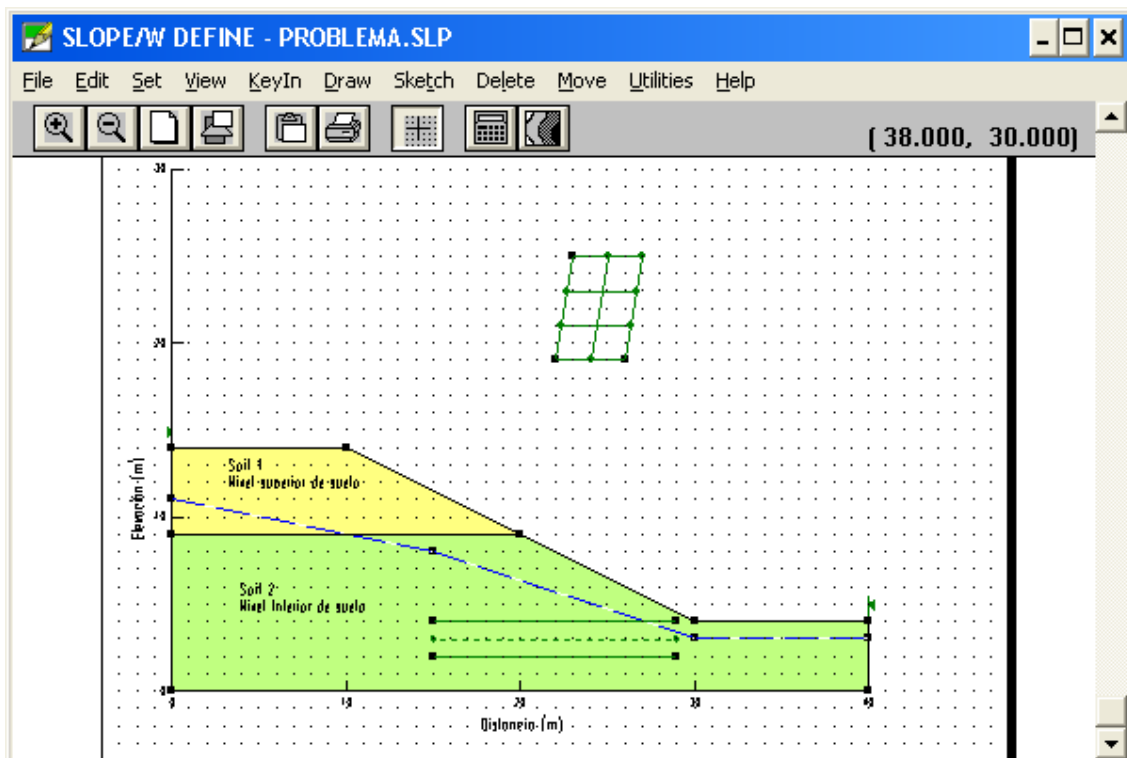
2.2.18. AÑADIR ETIQUETAS EN LOS SUELOS

Para añadir etiquetas en los suelos, debe procederse como sigue:

- Seleccionar *Text* en el menú *Sketch*. Aparecerá un cuadro de diálogo como el mostrado a continuación:

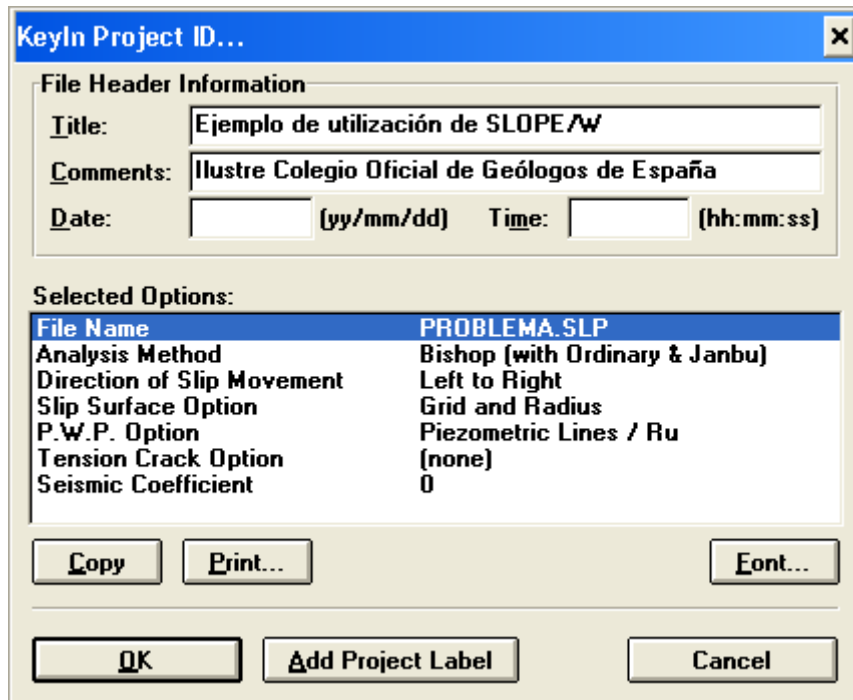


- Borrar desde la 3 línea en adelante y presionar en Place Text para indicar con el ratón donde queremos colocar la etiqueta, tal y como se muestra en la figura siguiente:

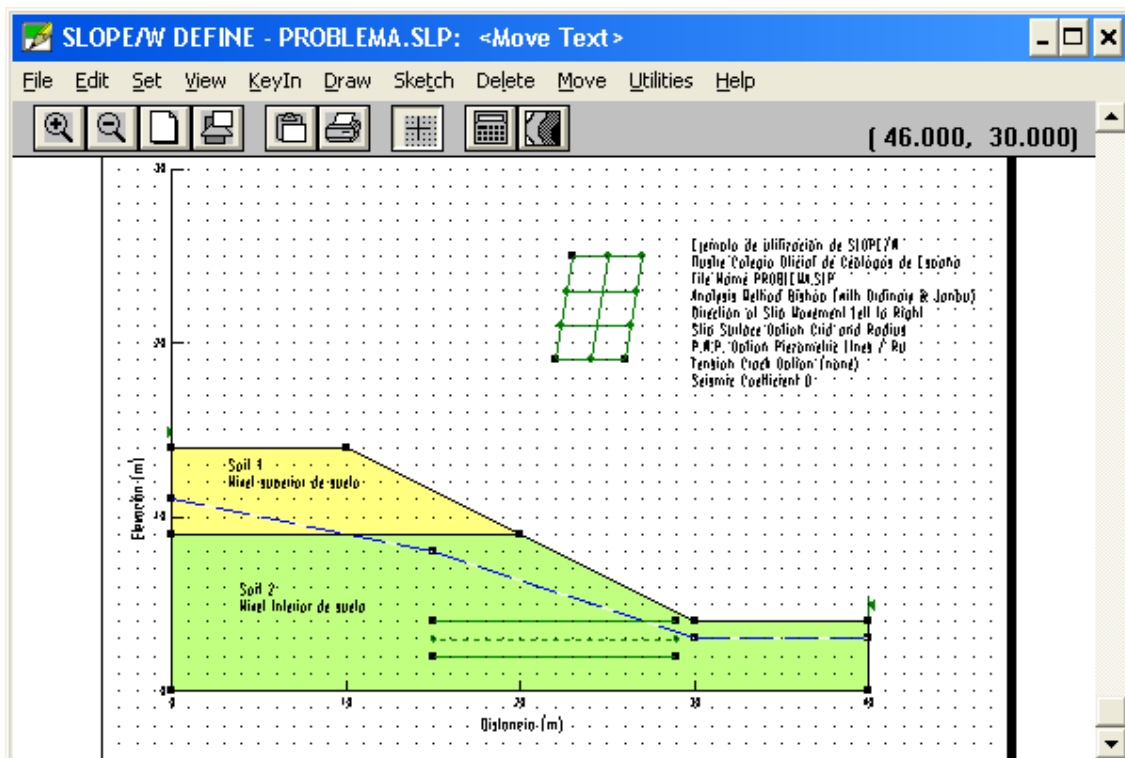


- Para poner las identificación del problema (ID) proceder de la siguiente forma:

- Seleccionar *Project ID* en el menú *KeyIn* y el cuadro de diálogo siguiente aparecerá:



- Para añadir la etiqueta de identificación del problema presionar el botón *Add Project Label*. Mover el ratón hacia la parte superior derecha y presionar el botón izquierdo. En la figura siguiente se muestra el resultado final:

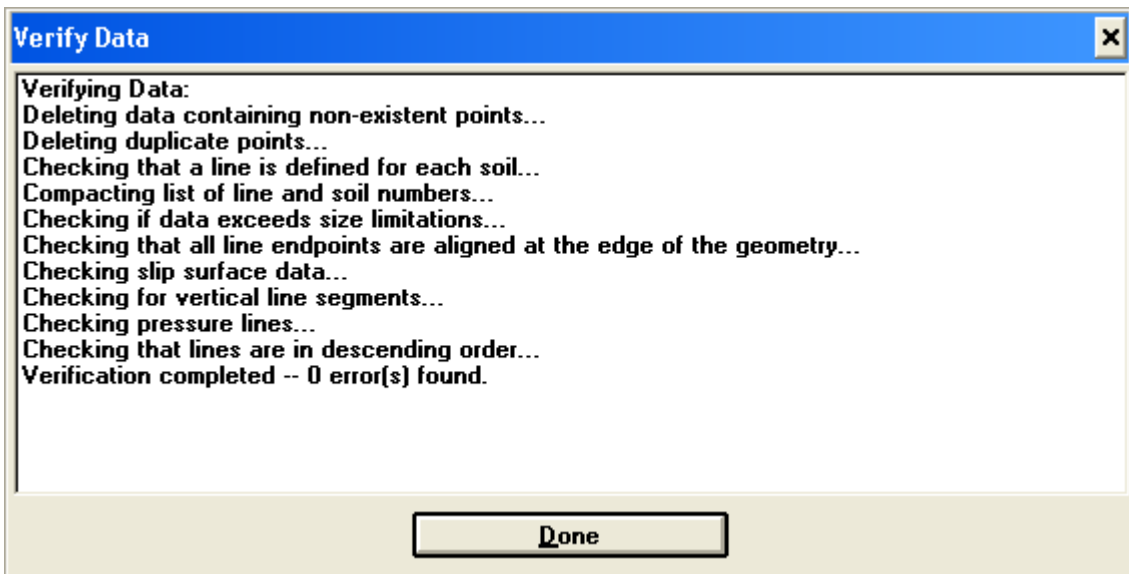


2.2.19. VERIFICAR LA EXISTENCIA DE ERRORES

Una herramienta muy útil es *Tools Verify*, que como su nombre indica es una herramienta para comprobar que no existen errores en la introducción de la geometría del perfil, niveles piezométricos, superficies de rotura, propiedades de los suelos, etc.

Para verificar algún problema o error proceder como sigue:


- Seleccionar *Verify* en el menú *Utilities*. El siguiente cuadro de diálogo aparecerá:

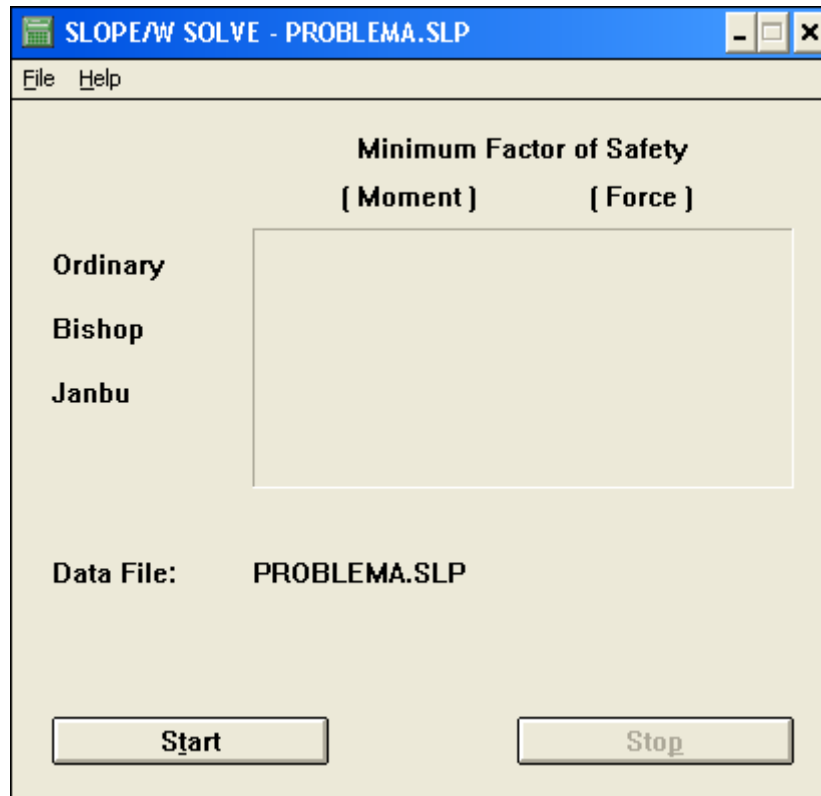


- Se puede observar que no existe ningún error.
- *Done* para salir.

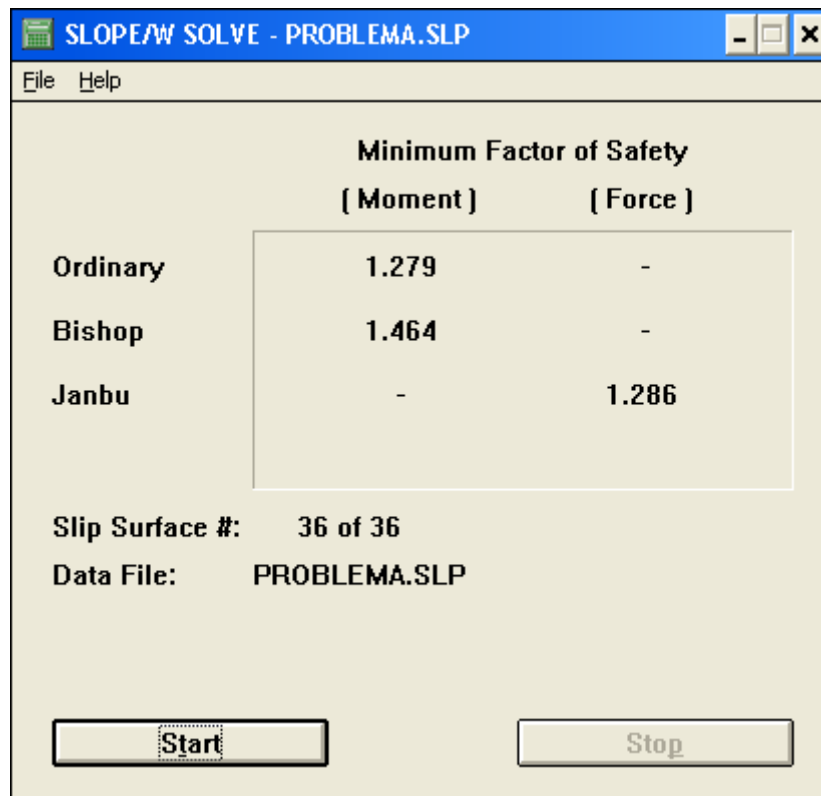
2.2.20. RESOLVER EL PROBLEMA

La segunda parte del análisis de estabilidad es utilizar SLOPE/W SOLVE para resolver el factor de seguridad del talud.

- Para arrancar el subprograma SOLVE, presionar el botón  en la barra de herramientas, en ese momento aparecerá la ventana siguiente:



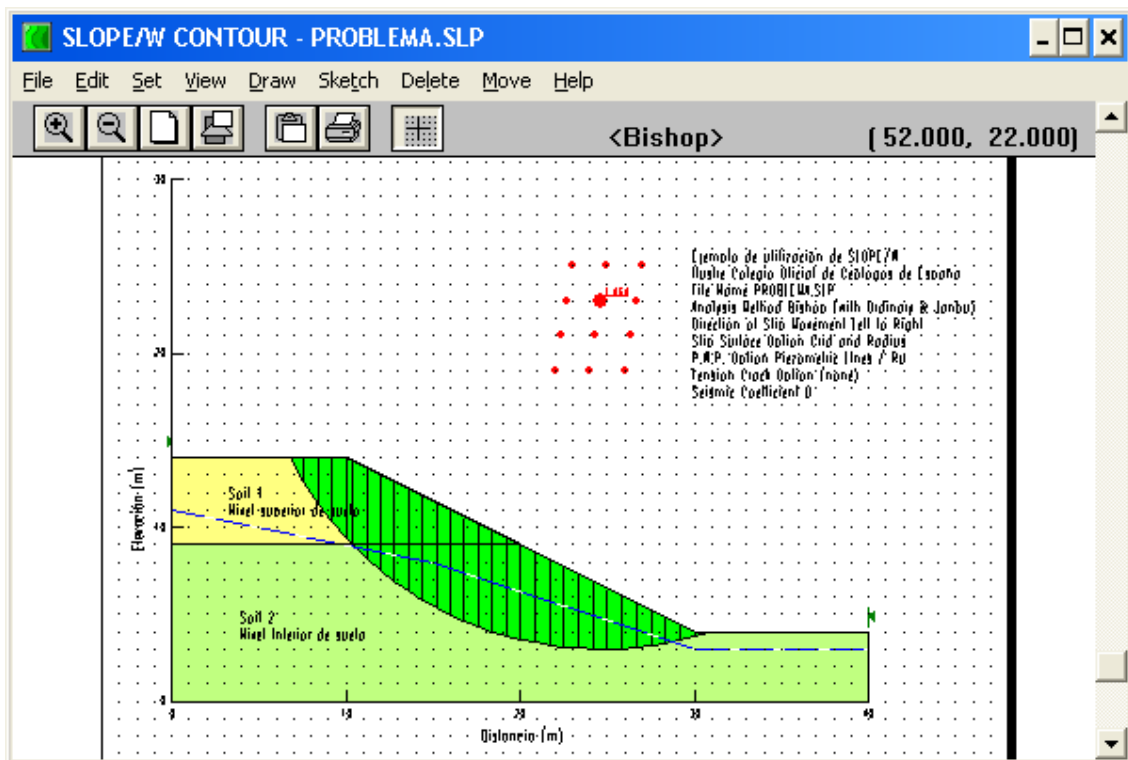
- Presionando el botón Start comenzará el proceso de cálculo, hasta que se obtengan los factores de seguridad, tan y como se muestra en la figura siguiente:



2.3. VER RESULTADOS DEL CÁLCULO

El subprograma SLOPE/W CONTOUR  permite ver los resultados del análisis de forma gráfica:

- Superficies de deslizamiento con su respectivo factor de seguridad.
- Superficies de contorno de los factores de seguridad.
- Disposición de fuerzas en cada una de las rebanadas.
- Diversos gráficos de los resultados del cálculo.



2.3.1. SUPERFICIES DE DESLIZAMIENTO

Seleccionar *Slip Surfaces* en el menú *Draw*. El siguiente cuadro de diálogo aparecerá, seleccione la nº de superficie que desee.

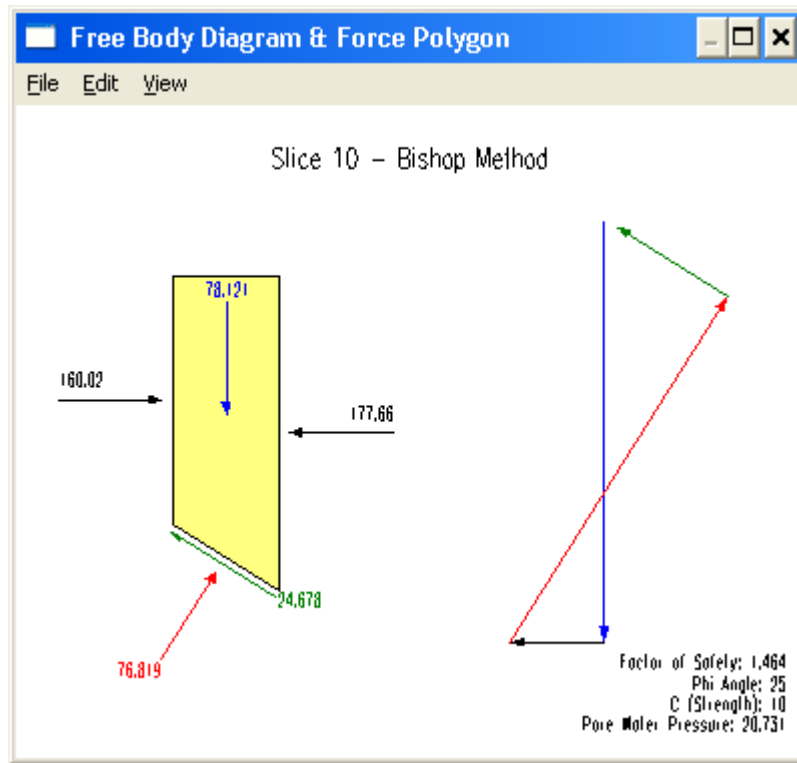
Draw Selected Slip... ✕

Slip #:

Lambda	F of S (m)	F of S (f)
0.0000	1.464	<input type="text"/>

2.3.2. VER LAS FUERZAS DE LAS SUPERFICIES DE ROTURA

- Seleccionar *Slice Forces* en el menú *Draw*.
- El cursor del ratón se convertirá en una cruz, para que nosotros marquemos sobre la rebanada que queramos obtener su representación de fuerzas, tal y como se muestra en la figura siguiente:



- En *View*, podemos ver toda la información de la rebanada.

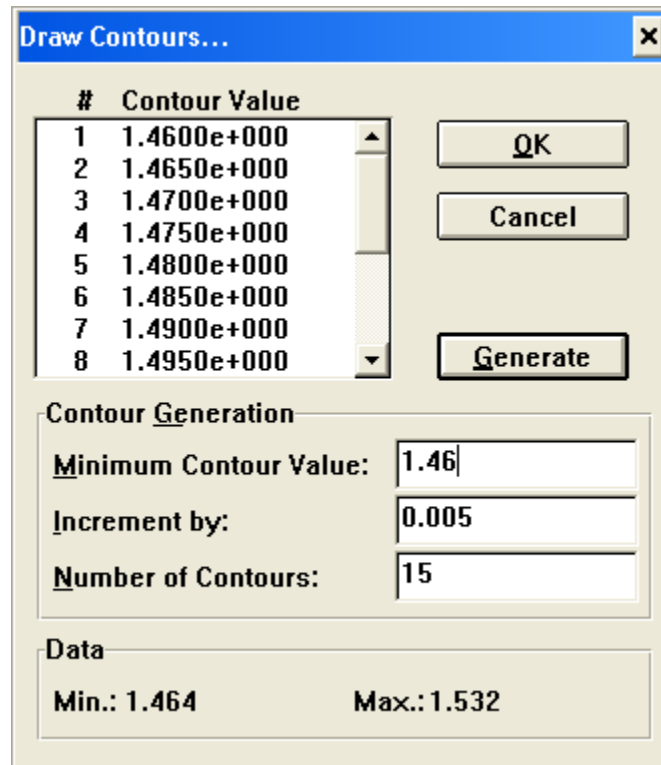
View Force Information...

Slice 10	Value
Weight	78.121
Base Shear Force	24.678
Base Normal Force	76.819
Left Side Normal Force	160.02
Right Side Normal Force	177.66
Factor of Safety	1.464

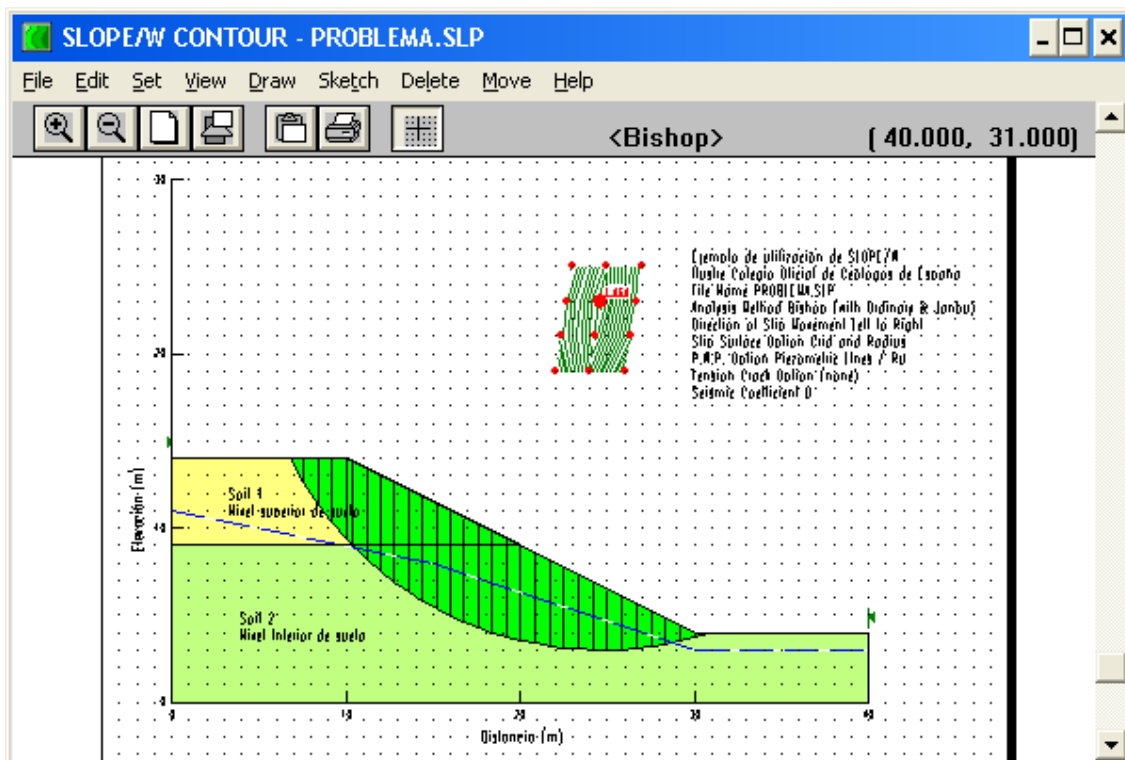
Copy Print... Done

2.3.3. VER LOS CONTORNOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD

- Seleccionar *Contours* en el menú *Draw*. Aparecerá el siguiente cuadro de diálogo:

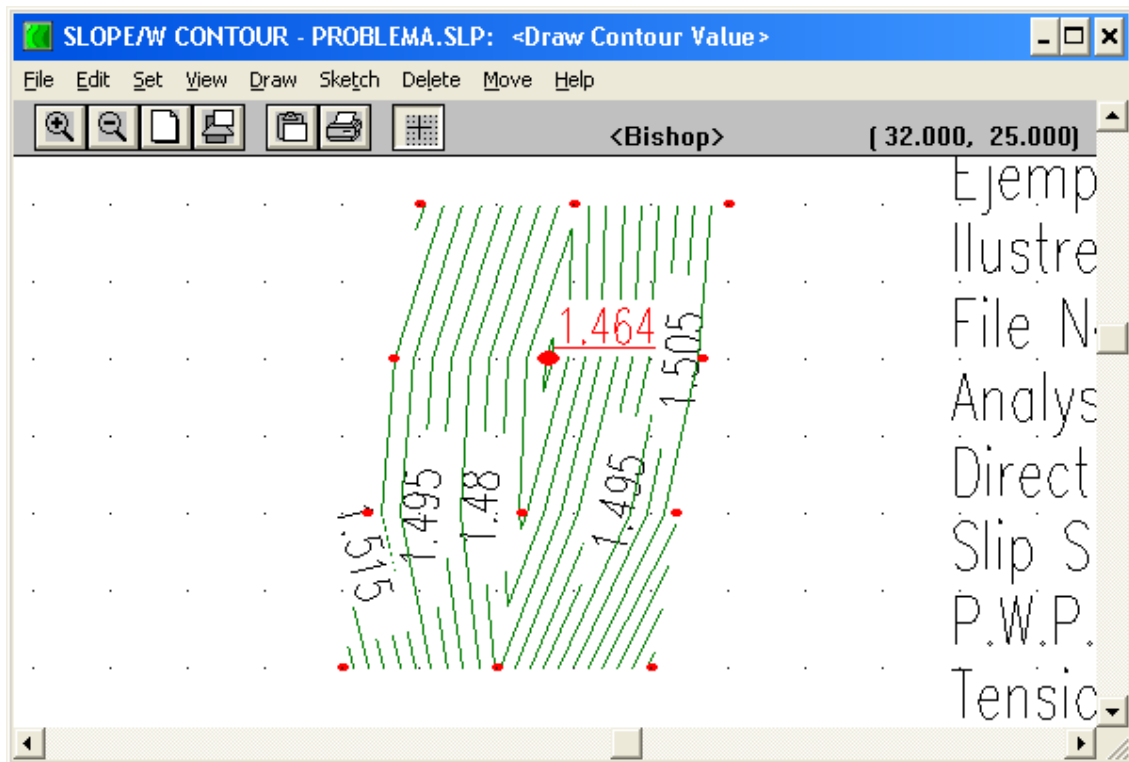


- En el que se puede elegir: el mínimo valor del contorno (Factor de seguridad pésimo), el incremento y el número de contornos.
- Presionar *Generate* y después *OK*. La siguiente figura muestra el resultado.



- Para poner etiquetas en los contornos, seleccionar Contour Values en el menú Draw. El cursor del ratón se volverá una cruz para que seleccionemos el

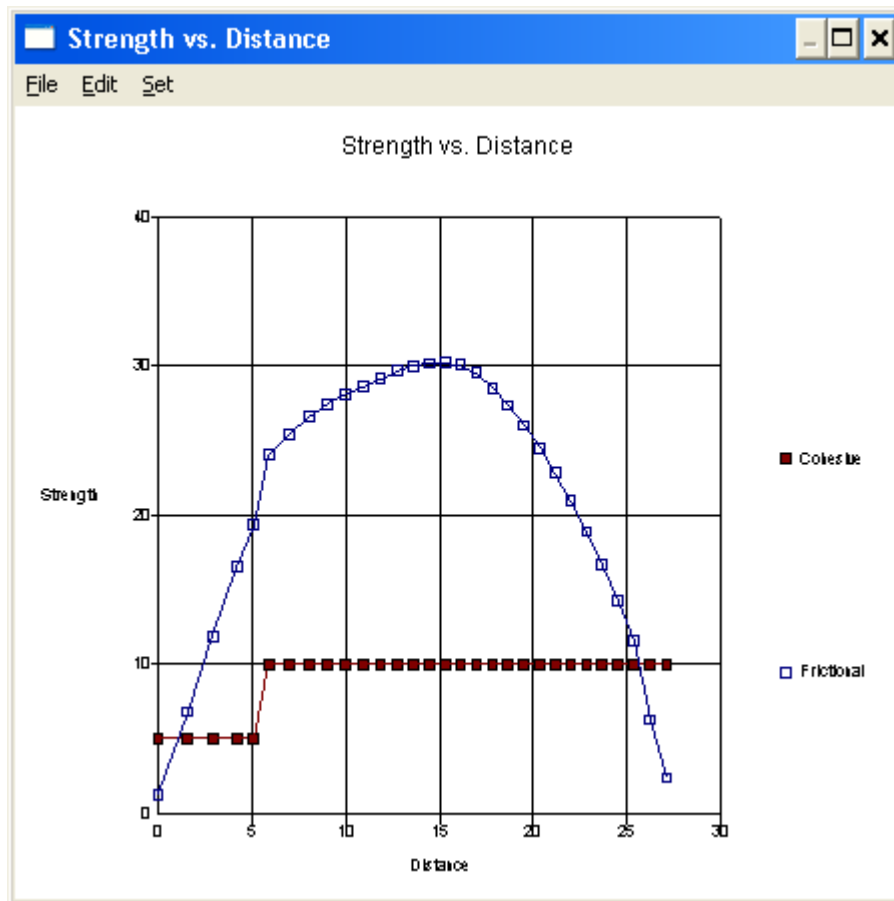
contorno que deseamos poner una etiqueta, como se muestra en la figura siguiente:

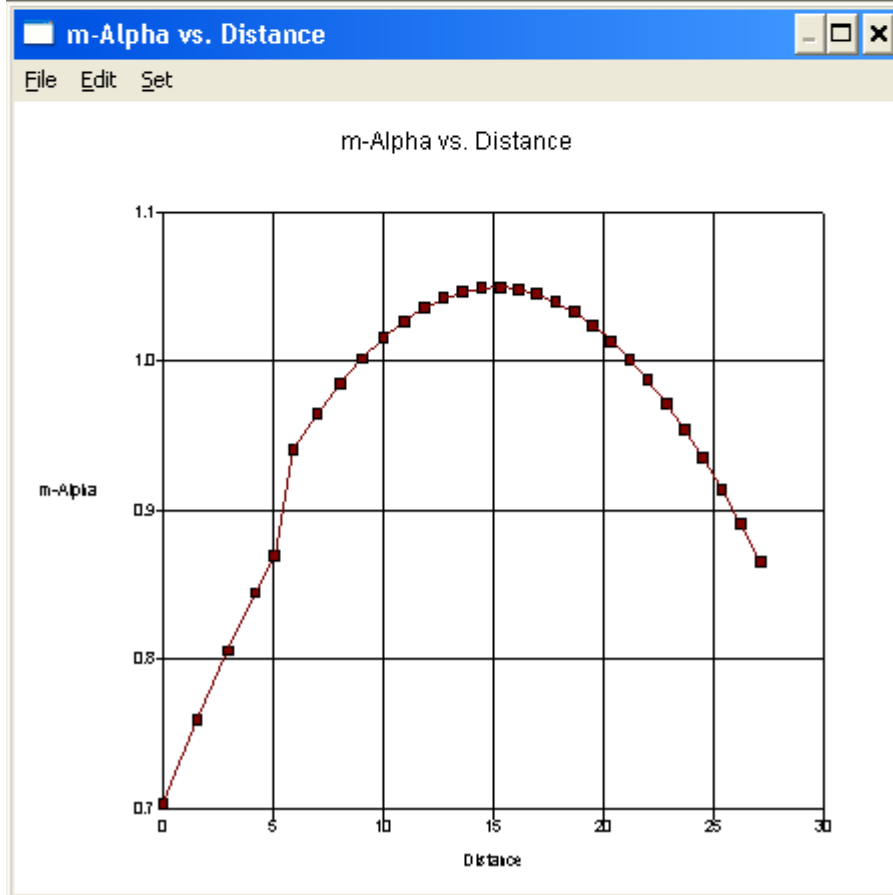
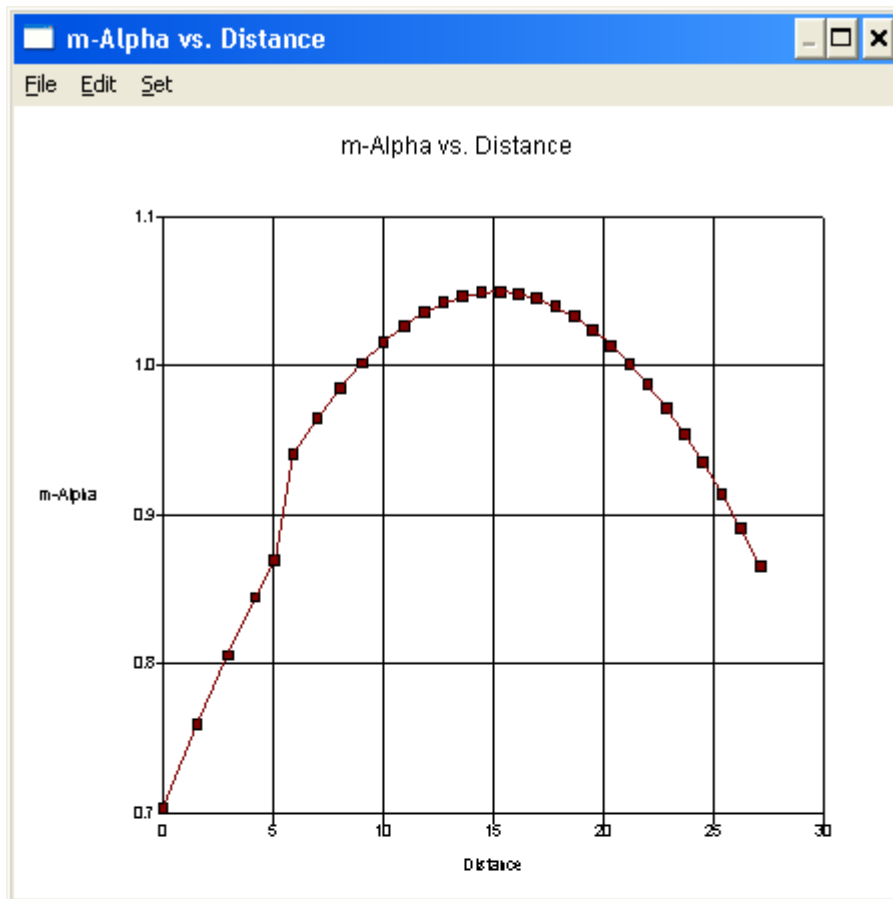


2.3.4. VER GRÁFICOS DE RESULTADOS

Son numerosos los tipos de gráficos que el programa nos permite obtener:

- Esfuerzo / distancia.
- Presión hidrostática / distancia.
- $M\alpha$ / distancia. Etc.





3. PROBLEMA

Con los datos procedentes de los 5 sondeos siguientes, medidas de niveles freáticos y características geotécnicas, calcular:

- Factor de seguridad del círculo pésimo (para todos los métodos).
- Discutir las diferencias entre los métodos.
- Adoptar medidas de estabilización en caso de no ser estable el talud (bulones, anclajes, sobrecargas al pie del talud, etc.).
- Probar variaciones en las características geotécnicas y profundidad del nivel freático.

En el gráfico de la página siguiente se muestra el perfil del talud (en metros).

COLUMNAS LITOLÓGICAS DE SONDEOS

Materiales	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5
<i>Relleno</i>	0,00-1,00	0,00-1,50	0,00-2,00		
<i>Arcillas rojas</i>	1,00-3,00	1,50-5,00	2,00-6,00		
<i>Arenas</i>	3,00-5,00	5,00-7,50	6,00-9,00		
<i>Limos arcillosos</i>	5,00-9,00	7,50-12,00	9,00-14,00	0,00-1,00	0,00-1,50
<i>Arenas</i>	9,00-12,00	12,00-14,00	14,00-15,00	1,00-2,00	1,50-3,00
<i>Calizas</i>	12,00-17,50	14,00-17,00	15,00-16,00	2,00-3,00	3,00-3,50

NIVELES FREÁTICOS

Profundidad del nivel freático	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5
	2,50	4,00	7,50	1,50	2,50

CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

Materiales	Cohesión (KN/m²)	Ángulo de fricción (°)	Densidad (KN/m³)
<i>Relleno</i>	0	20	15
<i>Arcillas rojas</i>	15	25	18
<i>Arenas</i>	2	31	20
<i>Limos arcillosos</i>	10	28	19
<i>Arenas</i>	0	35	21
<i>Calizas</i>	Substrato rocoso		

