

## VALIDEZ RELATIVA DEL VALOR NUMÉRICO DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE UN TALUD

**Gianfranco Perri** Ingeniero Consultor, Profesor de "Diseño Geotécnico de Taludes" en la Universidad Central de Venezuela

### Resumen

Se introducen los conceptos de probabilidad de falla de un talud y de confiabilidad del diseño de un talud, a lado del clásico concepto de factor seguridad de un talud. Se explica que la seguridad de un talud no está cabalmente representada por el valor de su factor de seguridad, ya que además depende fuertemente del grado de certidumbre, o de incertidumbre, que caracteriza los valores numéricos que en el calculo se asumen para los parámetros fundamentales del análisis: por ejemplo los de resistencia al corte de los terrenos, o los sísmicos, o los hidráulicos, ect. Mediante tres casos sencillos, se demuestra como por ejemplo un talud con un determinado factor de seguridad puede tener una probabilidad de falla mas alta de la de un talud con un factor de seguridad menor, si está asociado este último a parámetros de igual o menor valor medio, pero cuya dispersión sea mas pequeña que la de los parámetros del primer talud.

### Introducción

La definición de factor de seguridad comúnmente aplicada al caso de fallas por deslizamiento en un talud, es la de relación entre fuerzas resistentes y fuerzas deslizantes que actúan a lo largo de la superficie del potencial deslizamiento, así que un factor de seguridad mayor de 1 indica estabilidad del talud y un valor menor de 1 indica inestabilidad del talud.

En la práctica también se establecen los valores mínimos aceptables para el factor de seguridad, los cuales, generalmente en función de la importancia de la obra a la que pertenece el talud, se fijan entre 1.10 y 1.50.

Los métodos y programas de cálculo disponibles, finalmente calculan el factor de seguridad con lujo de detalles y precisión: es común indicar para el factor de seguridad un valor con 3, 4, o 5 decimales (ejemplo:  $FS = 1.2314$ ) contribuyendo a difundir una ilusoria sensación de confiabilidad sobre el resultado de un cálculo determinístico.

La realidad es mucho menos simple, ya que el valor numérico que se calcula para el factor de seguridad, depende de un conjunto numeroso de factores y parámetros, cuyos valores numéricos introducidos en los cálculos pueden ser en buena medida diferentes de los reales y, en consecuencia, el factor de seguridad así calculado puede resultar también diferente del real.

El problema a resolver es, saber de cuanto el factor de seguridad calculado puede alejarse del real o, en otras palabras, cuanto es confiable el diseño de un talud basado sobre el solo cálculo del factor de seguridad.

Dentro de los parámetros cuyos valores numéricos controlan el resultado relativo al valor del factor de seguridad de un talud, ciertamente son los parámetros de resistencia al corte del material o de los materiales involucrados, que están generalmente sujetos al mayor grado de incertidumbre numérica, especialmente cuando se trata de macizos rocosos en extremo heterogéneos y en buena parte anisotrópicos; aunque hay también otros parámetros que pueden variar y afectar numéricamente el valor del factor de seguridad: por ejemplo las cargas sísmicas y las cargas hidráulicas, entre otros.

Ahora bien, dentro de este orden de ideas se quiere aquí señalar que debe prestarse mucho más atención al grado de incertidumbre, bien sea ligada al poco conocimiento bien sea ligada a la objetiva variabilidad (dispersión), que acompaña los parámetros que controlan el resultado de un cálculo, que al valor numérico mismo de este resultado expresado en términos de un factor de seguridad determinístico.

Por ejemplo: puede ocurrir que sea mucho más seguro un talud con un factor de seguridad de 1.2 que un talud con un factor de seguridad de 1.5 y esto puede ciertamente ocurrir si, por ejemplo, el grado de dispersión relativo a los valores numéricos de los parámetros de resistencia al corte (por ejemplo cohesión y fricción) usados para el cálculo del factor de seguridad del primer talud es menor que el grado de dispersión de los parámetros usados para el segundo talud.

Los conceptos anteriores, pueden explicarse de una manera más cuantitativa y no solo cualitativa, recurriendo al análisis estadístico y reemplazando al concepto de factor de seguridad, el concepto de probabilidad de falla o, nuevamente en términos de factor de seguridad, hablando de la probabilidad que el factor de seguridad sea inferior o superior a un determinado valor numérico (por ejemplo 1).

No hay dudas que conceptualmente represente un salto cualitativo importante y positivo el pasar de un concepto a otro, aunque debe reconocerse (Hoek, 1998) que: “el impacto emocional de proponer al público no especialista que existe siempre un riesgo finito (aunque pequeño) de falla asociado al diseño de un talud, es tal que dificulta la propuesta de reemplazar el factor de seguridad estándar con la probabilidad de falla o con el índice de confiabilidad de un talud”.

## **Ejemplos**

A continuación se reporta una serie de resultados numéricos, obtenidos para ilustrar cuantitativamente los conceptos antes expuestos, aplicando a algunos taludes típicos los cálculos sea determinísticos que probabilísticos del factor de seguridad y de la probabilidad de falla, para diferentes niveles de dispersión relativos a los valores numéricos de los parámetros de resistencia al corte asumidos en los cálculos.

En este sentido se definen para estos parámetros, además de sus valores más probables (valor medio de una distribución estadística, por ejemplo la estándar) también sus dispersiones (por ejemplo la desviación de la distribución utilizada).

Puede así claramente demostrarse que:

- a. El valor numérico del factor de seguridad en sí para un talud, no puede cabalmente ilustrar la calidad de una obra o la seguridad de la misma, si no está asociado con una clara medida del grado de efectiva representatividad que tienen los factores que han incidido directamente en la obtención de tal valor numérico (la dispersión de los parámetros de resistencia, de las cargas sísmicas, de las hidráulicas, etc.)
- b. Debe asociarse al concepto de factor de seguridad del talud, el de probabilidad de falla (o índice de confiabilidad) y para ello deben asignarse a los parámetros más influyentes en el cálculo y más inciertos en su determinación, valores estadísticos en términos de media y desviación de la distribución que mejor los represente.
- c. En la medida de lo posible, debe intentarse obtener las referidas distribuciones estadísticas de los parámetros de cálculo, en base a observaciones de campo, mediciones y ensayos, con el objetivo de esclarecer la real e inevitable variabilidad de aquellos, como principal medio de alcanzar un diseño óptimo y realista de un talud y evitar en consecuencia diseños bien sea injustificadamente conservadores o, peor aún, arriesgadamente inconfiables.

La tabla anexa, resume algunos resultados relativos a tres ejemplos sencillos del cálculo del factor de seguridad y de la probabilidad de falla de un talud, en función de diferentes posibles desviaciones para los parámetros de resistencia al corte: fricción y cohesión.

Se ha asignado una desviación constante del 10% ( $2.5^\circ$  sobre  $25^\circ$ ) a la fricción, lo cual es generalmente razonable y, se hace variar entre límites muy amplios la desviación de la cohesión (hasta del 75%), para tomar en cuenta la efectiva amplia incertidumbre que generalmente está asociada al valor real de este parámetro, para suelos y sobre todo para macizos rocosos.

En el ejemplo N°1, puede observarse como la probabilidad de falla, o sea de obtener un factor de seguridad menor que 1, aumenta con el aumentar del valor de la desviación de la cohesión, hasta inclusive cuando la cohesión en sí sea mayor y el factor de seguridad determinístico sea mayor:

La probabilidad de falla pasa del 2% al 6% para una misma cohesión de  $20 \text{ t/m}^2$ , cuando la desviación pasa de 8 a 10 o, la probabilidad de falla pasa del 9% al 13% a pesar de pasar de una cohesión de  $10 \text{ t/m}^2$  a  $15 \text{ t/m}^2$  pero con una desviación que pasa de 3 a 8 y todo esto mientras el factor de seguridad determinístico pasa de 1.569 a 2.147.

En el ejemplo N°2, que se refiere al caso de un talud heterogéneo (con dos distintos materiales), puede nuevamente observarse que, sin cambiar el valor de la cohesión, la probabilidad de falla pasa, por ejemplo de 1.3% a 7% y a 15%, con solamente aumentar la desviación de 2 a 3 y a 4.

Finalmente en el ejemplo N°3, que se refiere a un talud estabilizado con anclajes, es interesante observar como disminuye relativamente la influencia de la desviación de la cohesión, ya que se asume constante la magnitud de la carga estabilizante de los anclajes. En este caso la probabilidad de falla aumenta relativamente poco (de 2% a 4%, y de 4% a 7%) al aumentar la desviación de la cohesión (de 2.5 a 3 y de 8 a 10). Ciertamente en este ejemplo, la probabilidad de falla resultaría muy sensiblemente afectada por una eventual desviación que se asignara a la magnitud de la carga de los anclajes.

En la misma tabla resumen ya comentada, se reporta en la última columna, la probabilidad que el factor de seguridad sea inferior a un valor preestablecido de 1.40 para los ejemplos N°1 y N°3 y de 1.25 para el ejemplo N°2, en todos los casos menor que el factor de seguridad obtenido del cálculo determinístico.

Nuevamente se puede observar como la probabilidad que se produzca un factor de seguridad inferior a un valor preestablecido, crece con el incrementarse del valor de la dispersión de la cohesión:

En el ejemplo N°1, se pasa de una probabilidad de 48% a 65% a 75% y 77% al incrementarse la desviación de la cohesión de 2 a 3 a 4 y 5.

En el ejemplo N°2, se pasa de una probabilidad de 23% a 33% a 42% y 50% al incrementarse la desviación de la cohesión de 2 a 3 a 4 y 5 y finalmente, en el ejemplo N°3, la probabilidad aumenta de 34% a 35% al incrementarse la desviación de la cohesión de 2.5 a 3.

También se anexan, a manera de ejemplo, dos salidas gráficas típicas, obtenidas del cálculo probabilístico de la estabilidad de taludes, ejecutado con el código SLOPE/W de Geologic Internacional de Canada.

## ***Bibliografía***

E. Hoek, 1998. *Rock Engineerin*. Course notes

**EJEMPLO N°1**

$\emptyset$	$\delta$	c (t/m <sup>2</sup> )	$\delta$	F.S. Determinístico	F.S. Estadístico	F.S. < 1 p (%)	F.S.<1,4 p(%)
25	0	10	0	1.569	1.569	0	0
25	2.5	10	2	1.569	1.411	1	48
25	2.5	15	5	2.147	1.743	2	--
25	2.5	20	8	2.703	2.120	2	--
25	2.5	20	10	2.703	1.973	6	--
25	2.5	10	3	1.569	1.325	9	65
25	2.5	15	8	2.147	1.544	13	--
25	2.5	10	4	1.569	1.228	21	75
25	2.5	15	10	2.147	1.398	23	--
25	2.5	10	5	1.569	1.136	34	77

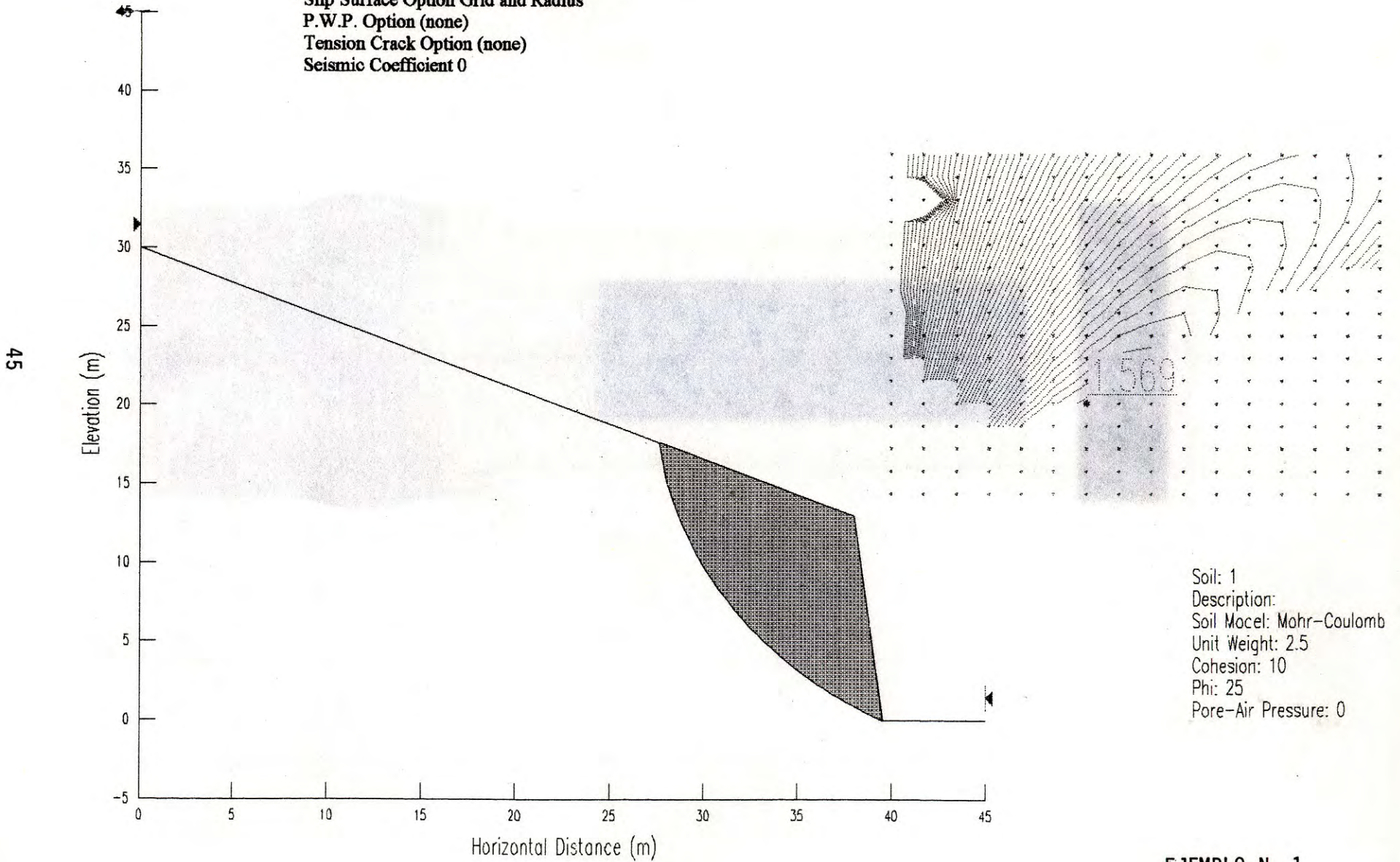
**EJEMPLO N°2**

$\emptyset$	$\delta$	c (t/m <sup>2</sup> )	$\delta$	F.S. Determinístico	F.S. Estadístico	F.S. < 1 p(%)	F.S.<1,25 p(%)
25	2.5	5 10	0 0	1.385	1.386	0	0
25	2.5	5 10	2.0 2.0	1.385	1.383	1.3	23
25	2.5	5 10	3.0 3.0	1.385	1.375	7	33
25	2.5	5 10	4.0 4.0	1.385	1.344	15	42
25	2.5	5 10	2.5 5.0	1.385	1.338	28	50

**EJEMPLO N°3**

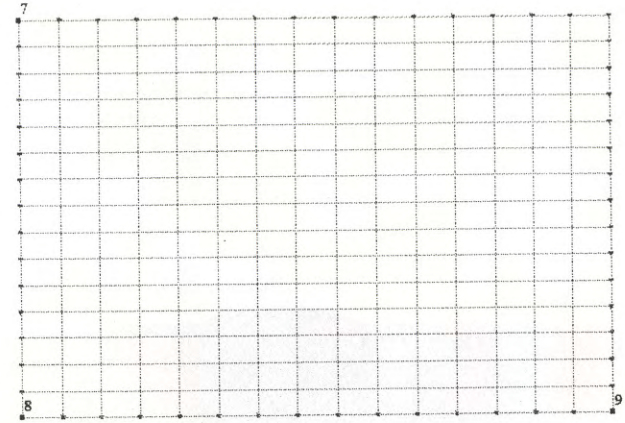
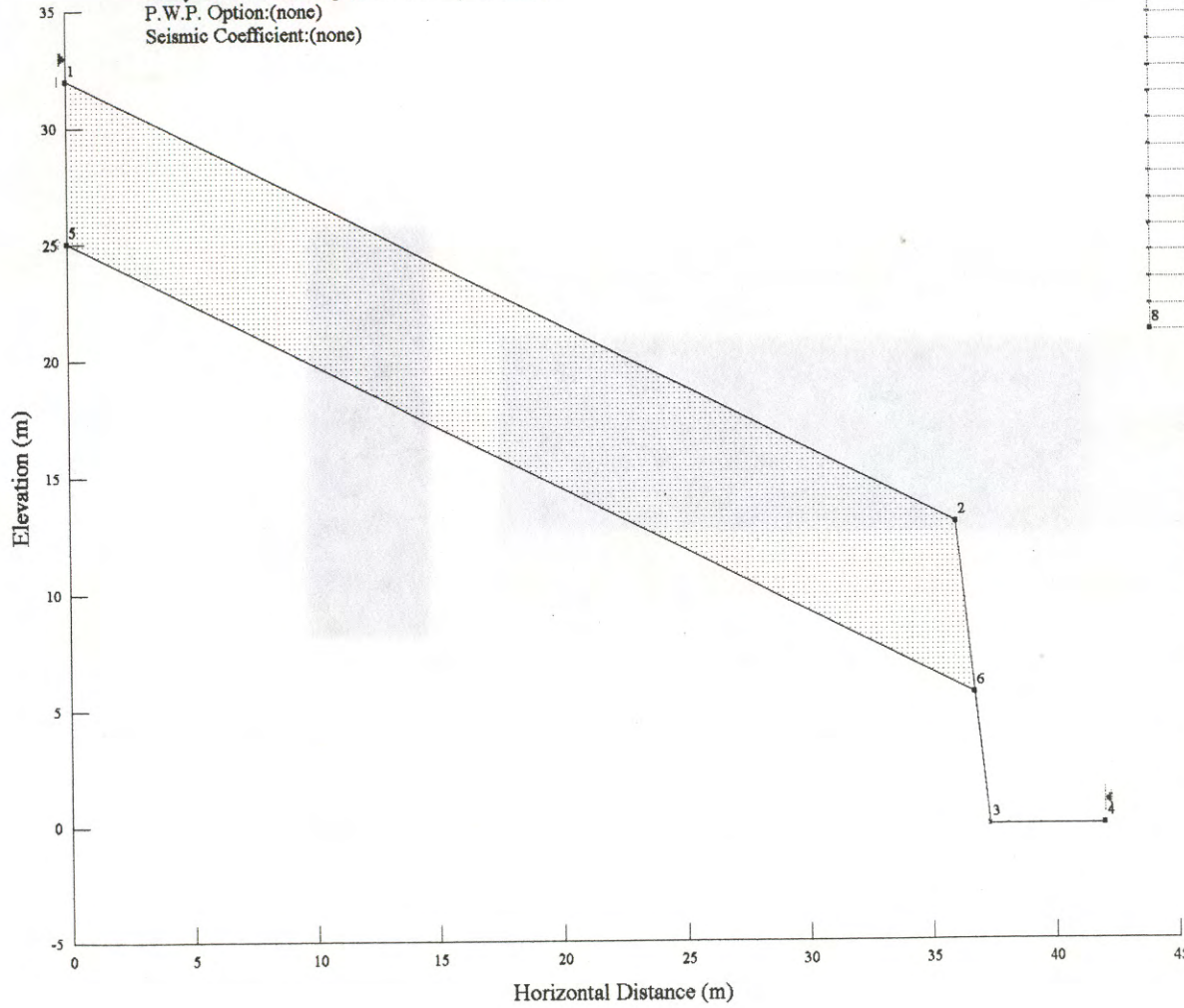
$\emptyset$	$\delta$	c (t/m <sup>2</sup> )	$\delta$	F.S. Determinístico	F.S. Estadístico	F.S. < 1 p (%)	F.S.<1,4 p (%)
25	2.5	7	0	1.584	1.587	0	0
25	2.5	7	2.5	1.584	1.579	2	34
25	2.5	7	3	1.584	1.573	4	35
25	2.5	15	8	2.400	2.445	4	--
25	2.5	15	10	2.400	2.456	7	--

Tunel Palmarito Portal Sur Sección C-C  
Talud Seco sin Estabilizar  
File Name PSURC.SLP  
Analysis Method Bishop (with Ordinary & Janbu)  
Direction of Slip Movement Left to Right  
Slip Surface Option Grid and Radius  
P.W.P. Option (none)  
Tension Crack Option (none)  
Seismic Coefficient 0



Soil: 1  
Description:  
Soil Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 2.5  
Cohesion: 10  
Phi: 25  
Pore-Air Pressure: 0

Description: PRUEBA  
 Comments: Talud Seco sin Estabilizar  
 File Name: ESTADIS2.slp  
 Last Saved Date: 25/06/98  
 Analysis Method: Bishop (with Ordinary & Janbu)  
 P.W.P. Option: (none)  
 Seismic Coefficient: (none)

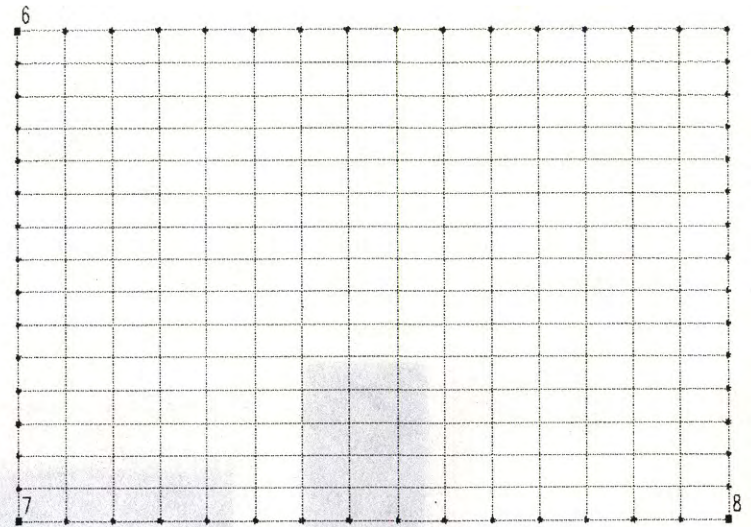
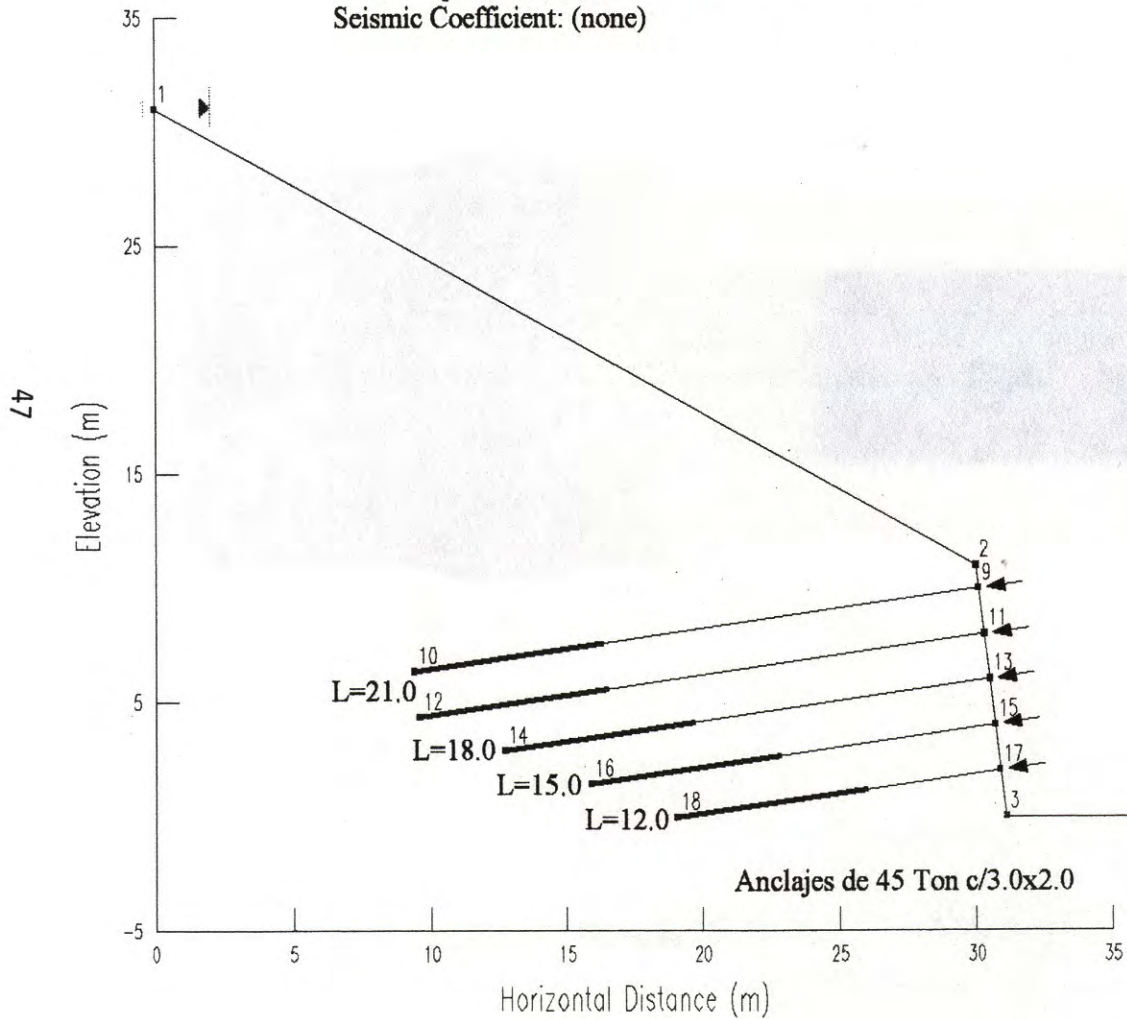


Soil: 1  
 Description:  
 Soil Model: Mohr-Coulomb  
 Unit Weight: 2.4  
 Cohesion: 5  
 Phi: 25  
 Pore-Air Pressure: 0

Soil: 2  
 Description:  
 Soil Model: Mohr-Coulomb  
 Unit Weight: 2.4  
 Cohesion: 10  
 Phi: 25  
 Pore-Air Pressure: 0

EJEMPLO N. 2

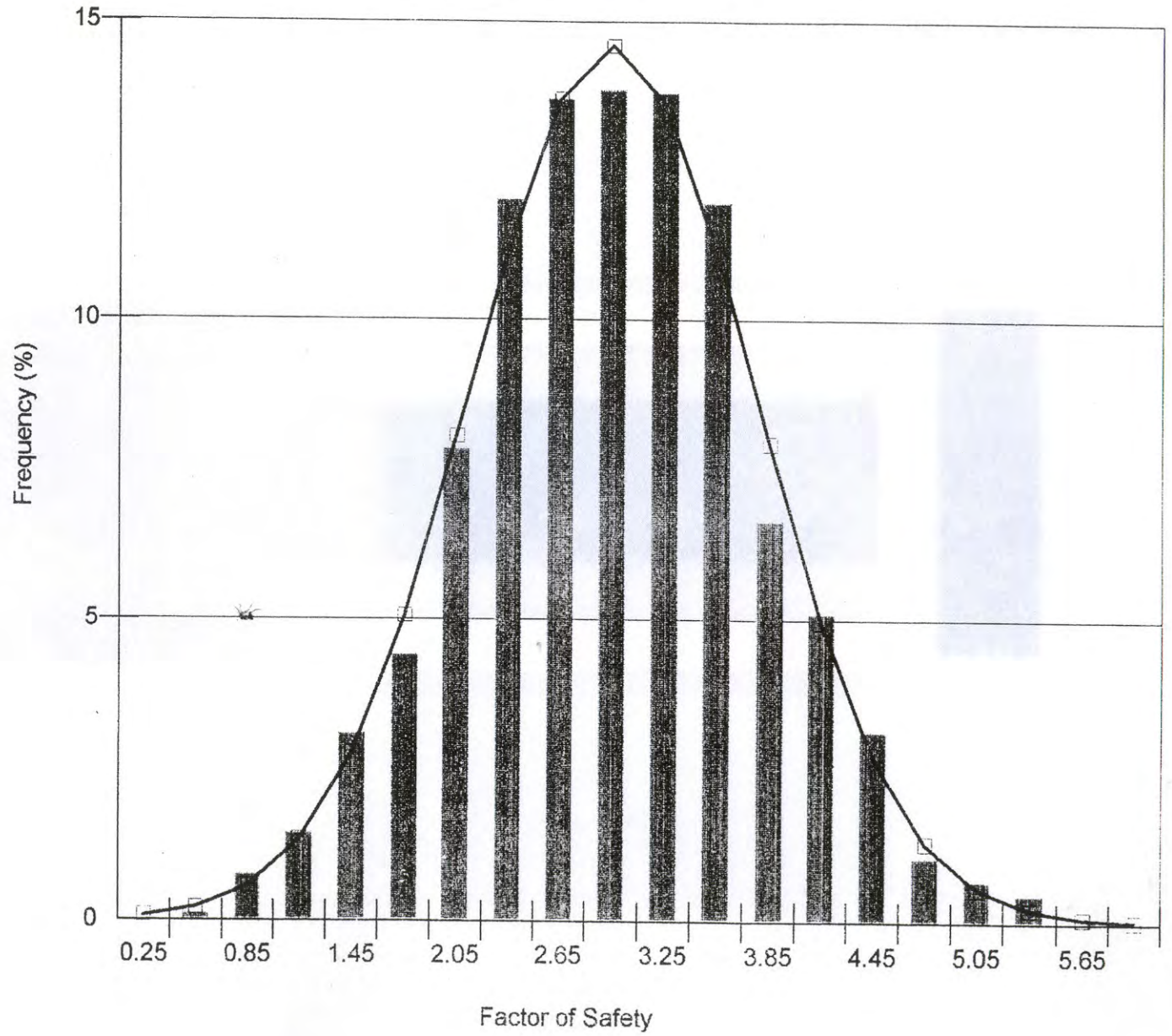
Description: Tunnel Palmarito Portal Norte Sección B-B  
 Comments: Talud con Sismo Estabilizado  
 File Name: estadis1.slp  
 Last Saved Date: 22/06/98  
 Analysis Method: Bishop (with Ordinary & Janbu)  
 P.W.P. Option: (none)  
 Seismic Coefficient: (none)



Soil 1  
 Soil Model Mohr-Coulomb  
 Unit Weight 2.6  
 Cohesion 7  
 Phi 26  
 Unsaturated Phi B 0  
 Pore-Air Pressure 0

EJEMPLO N. 3

# Probability Density Function





# Probability Distribution Function

