

BARRO 9

INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA U Z

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS

ESIAZ
ING. CARLOS GARCÍA ROMERO
UNIDAD PROFESIONAL DE
ZACATENCO, MÉXICO.
JUNIO, 2020



1.- INTRODUCCIÓN

Un talud puede ser definido como la superficie vertical o inclinada del suelo que está en contacto con el aire y/o agua. Puede ser originado por las actividades del hombre, como lo son los cortes, figura 1, o bien los rellenos. En este número de Barro los taludes naturales serán reconocidos como laderas, figura 2.



FIGURA 1.- CORTE EN TOBA PARA LA AUTOPISTA TOLUCA – NAUCALPAN, ESTADO DE MÉXICO



FIGURA 2.- LADERA, CAMINO TENANGO – IXTAPAN DE LA SAL, ESTADO DE MÉXICO



La estabilidad del talud dependerá, fundamentalmente, de su resistencia al esfuerzo cortante, de la geometría de la superficie potencial de falla, de las condiciones sísmicas, estratigráficas, topográficas y desde luego, de las hidráulicas ya sean superficiales y/o subterráneas.

Cuando se define la superficie de falla tiende a generar movimientos descendentes y en dirección del talud, figura 3. En caso de que el comportamiento del suelo sea semejante al de un fluido viscoso, la superficie de falla no estará bien definida, debido a que la frontera entre las masas fija y móvil, estambién es una zona de flujo.



FIGURA 3.- DESLIZAMIENTO EL OSO, ARLINGTON, WASHINGTON, EEUU,
MARZO DEL 2014
FUENTE: THE TELEGRAPH

Un talud es estable cuando la relación entre fuerzas resistentes, ΣF_R , y deslizantes, ΣF_D , o momentos resistentes, ΣM_R , y deslizantes, ΣM_D , es mayor a la unidad. Así, el factor de seguridad, F_s , queda expresado como:

$$F_s = \Sigma F_R / \Sigma F_D$$

$$F_s = \Sigma M_R / \Sigma M_D$$

Y que en ellos, fuerzas o momentos, se han considerado todas las posibles combinaciones de fuerzas que en la vida útil del talud pudieran presentarse como son, entre otras, las fuerzas debido a los sismos, y a las fuerzas de filtración del agua. En este número del Barro se consideran únicamente las fuerzas debido a los sismos y a la gravedad.

La magnitud del factor de seguridad dependerá de la importancia de la obra pero también del nivel de incertidumbre que pudiera existir en las condiciones ambientales del talud, como pudieran ser la estratigrafía que incluye las características índices y mecánicas del suelo y la sismicidad del sitio. En general se han establecido como factores de seguridad mínimos 1.5 para condiciones estáticas y 1.3 bajo condiciones dinámicas o con sismo para taludes permanentes. Los factores de seguridad de taludes temporales pueden ser menores a los anteriores.



2.- RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE

La resistencia al esfuerzo cortante puede ser definida como la resistencia que presentan las partículas sólidas a desplazarse unas con respecto a otras. Esta resistencia básicamente está dada por la cohesión y la fricción entre partículas sólidas, así como por la viscosidad. Esta última resistencia se presenta en condiciones dinámicas, es decir, cuando la sollicitación de cargas es tan rápida que el tiempo tiende a ser cero. En cambio, bajo condiciones estáticas, la aplicación de la carga es tan lenta que el tiempo tiende a infinito, es muy grande.

Una manera de explicar esto es cuando uno, en la alberca, con agua fría, intenta introducirse lentamente, escalón por escalón, para tratar de dominar el frío; el tiempo de inmersión es muy grande, "infinito". Aparentemente el agua no ofrece oposición alguna a que nuestro cuerpo se sumerja en la alberca. En cambio, al saltar del trampolín de 10 m, y caer "de panzazo", en un tiempo prácticamente nulo, el golpe que se recibe es tan grande que esa parte del cuerpo queda enrojecida y adolorida. El agua, en este caso, opone una gran resistencia a la inmersión.

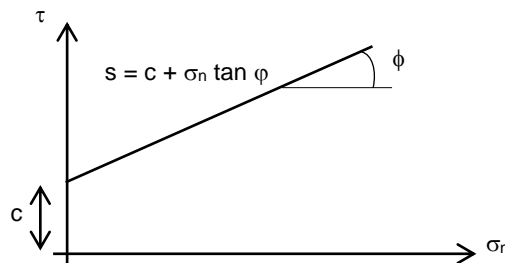
Así, la resistencia al esfuerzo cortante queda definida por la ley de Ch. A. Coulomb, mediante la expresión:

$$s = c + \sigma_n \tan \varphi$$

Donde:

s	resistencia al esfuerzo cortante
c	cohesión
σ_n	esfuerzo normal efectivo
φ	ángulo de fricción interna

La ecuación anterior representa una recta que corta el eje de las ordenadas a la altura "c", cuya pendiente es $\tan \varphi$, es decir, está inclinada φ grados.

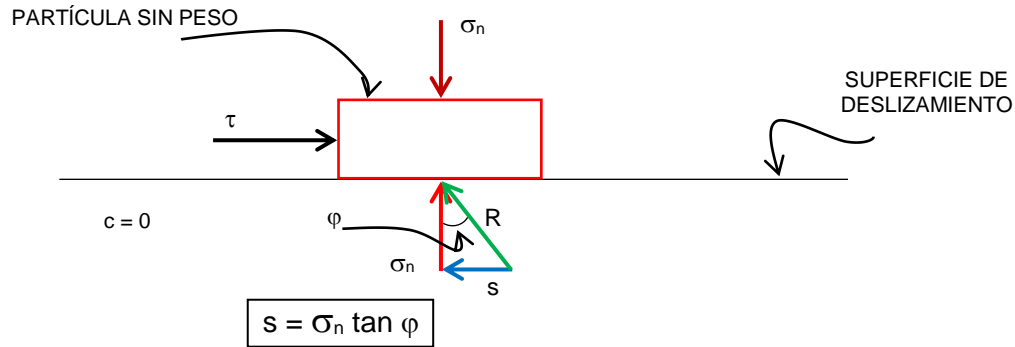


En suelos gruesos, gravas y arenas, sin finos, su resistencia al esfuerzo cortante estará dada únicamente por la fricción, la cual es función de su tamaño, textura y forma de las partículas sólidas, del grado de acomodo, es decir su compacidad relativa, confinamiento y esfuerzo efectivo normal a la superficie de falla.

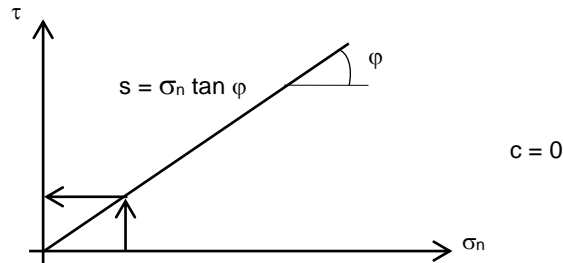


ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

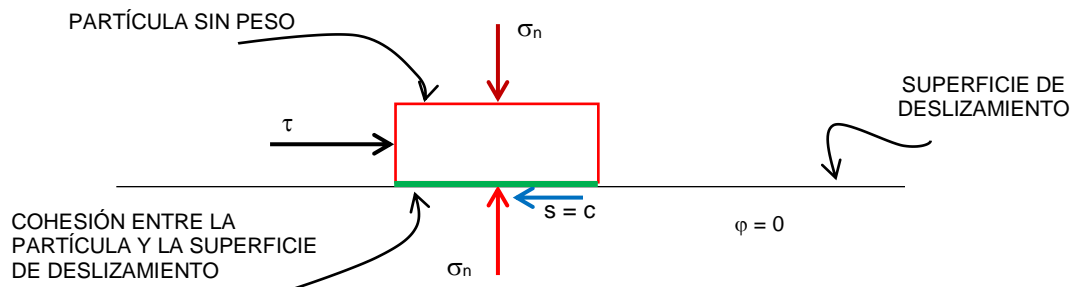


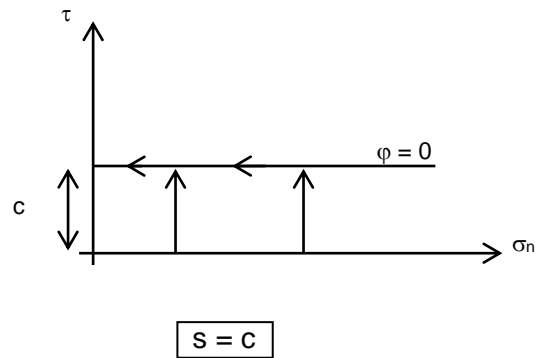
La ecuación de los suelos puramente friccionantes queda representada por una recta que pasa por el origen del sistema cartesiano:



Como se observa en a gráfica, a mayor esfuerzo normal, mayor resistencia al esfuerzo cortante. La resistencia al cortante es directamente proporcional al esfuerzo normal. Esta proporción se cumple hasta cierto valor del esfuerzo normal, esto es no se incrementa de manera indefinida ya que las partículas sólidas se romperían. Y, para las magnitudes de los esfuerzos que ordinariamente se trabajan en ingeniería nunca se alcanzan a romper los sólidos.

En suelos finos, limos y arcillas, de consistencia blanda, el ángulo de fricción interna es nulo.

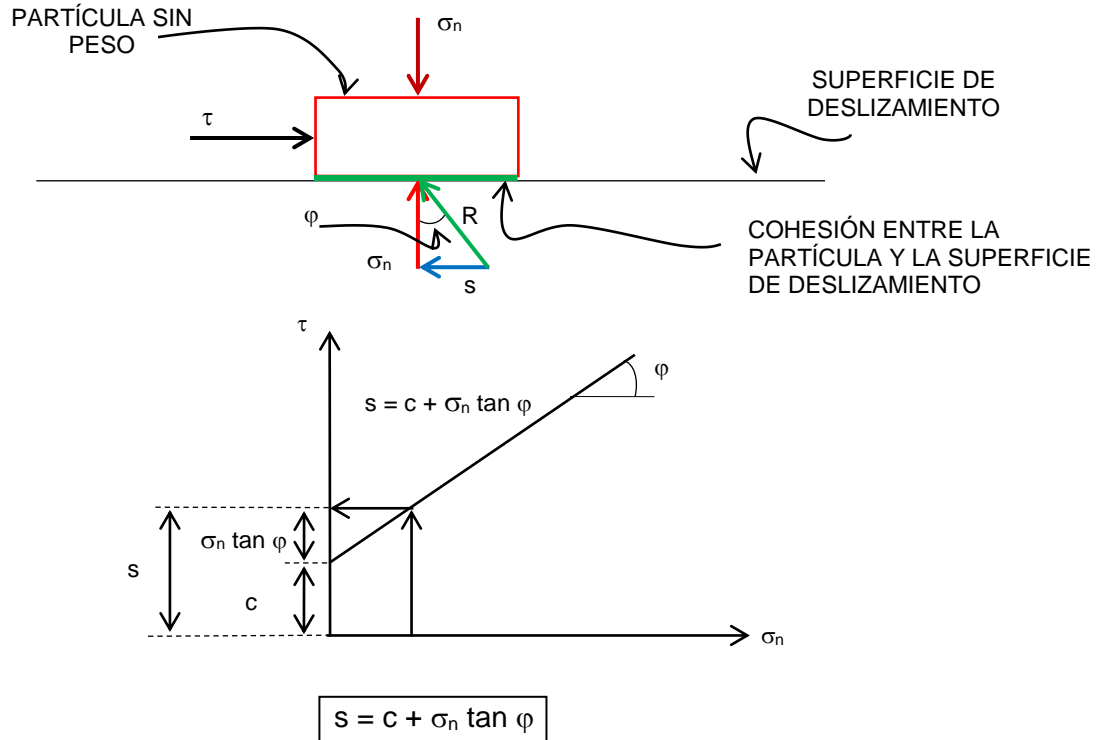




De la gráfica se observa que para cualquier esfuerzo normal, inclusive nulo, la resistencia al esfuerzo cortante es la cohesión. En consecuencia, se puede definir a la cohesión como la resistencia al esfuerzo cortante independiente del esfuerzo normal.

La cohesión dependerá de la calidad o tipo de cementante, consistencia o contenido de agua, historia de carga, entre otros factores. La cohesión es una propiedad circunstancial, su magnitud varía según varíe su contenido de agua.

Para suelos cohesivos – friccionantes el croquis queda:





ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante pueden ser evaluados por medio de pruebas de campo y de laboratorio. Si son de campo a partir de la prueba de penetración estándar, ver Barro2; y del empleo del penetrómetro de bolsillo figuras 4, para suelos finos, entre otras pruebas.



FIGURA 4.a.- PENETRÓMETRO DE BOLSILLO

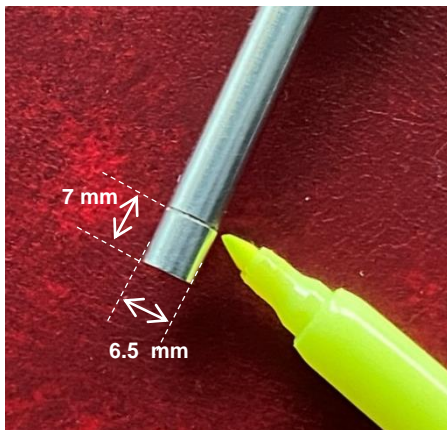


FIGURA 4.b.- VASTAGO DE PENETRACIÓN



FIGURA 4.c.- RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN, QUE REPRESENTA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE



FIGURA 4.d.- USO DEL PENETRÓMETRO EN LA PARED DE UN POZOA CIELO ABIERTO

Si, los parámetros de resistencia se determinan en laboratorio, podrá ser por medio de las pruebas de compresión triaxial, o en su defecto pruebas de compresión simple.



3.- ESTABILIDAD DE TALUDES

TIPOS DE FALLAS EN TALUDES

De acuerdo con los Dres. Karl von Terzaghi y R. B. Peck, “los deslizamientos pueden producirse de todas las maneras concebibles; lenta o rápidamente con o sin una aparente provocación”. Además citan, “dada la extraordinaria variedad de factores y de procesos que pueden ser causantes del origen de los deslizamientos, como regla general, la estabilidad de los taludes no puede determinarse por medio de análisis teóricos”.

Los diferentes tipos de falla que se pueden llegar a presentar dependen de varios factores, entre los más importantes son:

- Altura y geometría del talud.
- Estratigrafía, se incluyen sus propiedades índices y mecánicas.
- Características hidráulicas, escurrimientos superficiales, filtraciones subterráneas.
- Tipo y densidad de vegetación.
- Condiciones ambientales, como la frecuencia y magnitud de sismos, vulcanismo y la susceptibilidad a la erosión e intemperismo.
- Actividades antrópicas

Los tipos de fallas pueden ser clasificadas como: de translación, por flujo, rotación, y compuestas. En el primer tipo existe un contacto entre dos estratos o formaciones, resultando este contacto una potencial superficie de falla. Por lo general la formación subyacente es más resistente que la suprayacente. Las fuerzas actuantes son las debidas a la acción de la gravedad, a los sismos y a la presencia de agua en la superficie de falla. En el siguiente croquis se presenta las fuerzas que actúan por peso propio.

FALLAS POR TRANSLACIÓN

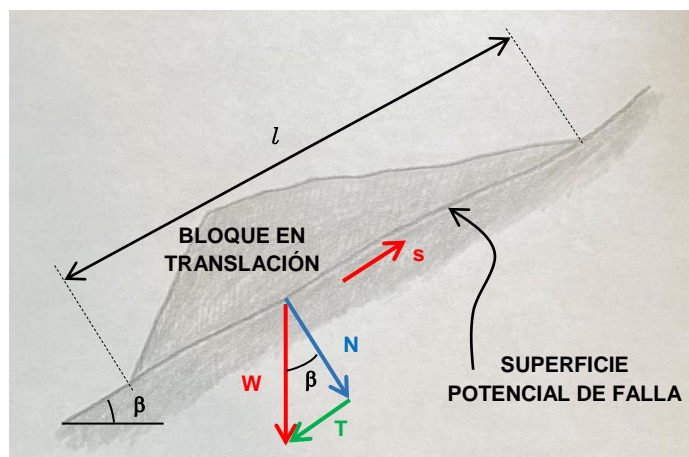


FIGURA 5.- FALLA POR TRANSLACIÓN



El bloque de suelo por desplazarse, figura 5, se considera que se comporta como un cuerpo rígido, el cual se desliza en el contacto con el suelo o roca en del cual se apoya. De esta manera las fuerzas que actúan son las componentes normal y tangencial, N y T , de su peso propio, W , y la resistencia al cortante, s , que se genera en la superficie de deslizamiento. Así, para un ancho unitario, se obtiene:

$$W = A \gamma$$

Donde:

A área del bloque por deslizarse
 γ peso volumétrico del bloque de suelo

$$N_w = W \cos \beta$$

$$T_w = W \sin \beta$$

La fuerza resistente, F_R , al deslizamiento será:

$$F_R = l (1) s = c_a l + N_w \tan \varphi_a$$

Siendo:

c_a cohesión en la superficie de falla
 φ_a ángulo de fricción interna en la superficie de falla

Así, el factor de seguridad queda expresado por:

$$F_s = \Sigma F_R / \Sigma F_D$$

$$F_s = (c_a l + N_w \tan \varphi_a) / T_w$$

$$F_s = (c_a l + W \cos \beta \tan \varphi_a) / W \sin \beta$$

Ejemplo de este tipo de falla es la que se presentó en la colonia Santa Fe al Oeste de la Ciudad de México, figura 6.



FIGURA 6.- FALLA EN LA COLONIA SANTA FE, CUAJIMALPA, MÉXICO. AUNQUE YA EXISTÍA UNA SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA, EL DESLIZAMIENTO SE PRESENTÓ POR HABER REMOVIDO EL PIE DEL TALUD PARA DAR PASO A UNA VIALIDAD.



En caso de presencia de agua con presión, es decir, con presión de poro, habrá que trabajar con esfuerzos efectivos, de esta manera se obtiene el siguiente croquis, figura 7, para cuando la superficie de falla está llena de agua, pero sin flujo:

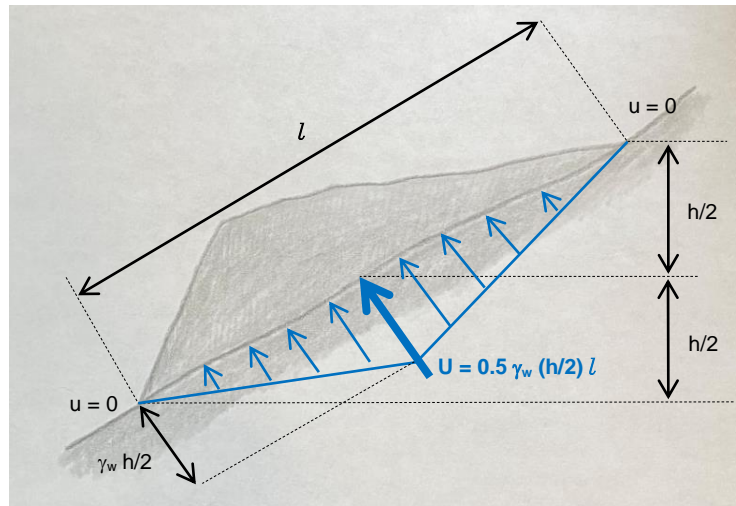


FIGURA 7.- EMPUJE HIDROSTÁTICO, $U = 0.5 \gamma_w (h/2) L$

Siendo U la subpresión que tiende a levantar la cuña de falla, origina una disminución en las fuerzas normales a la superficie de falla. El factor de seguridad, en condiciones estáticas queda:

$$F_s = [c_a l + (N_w - U) \tan \phi_a] / T_w$$

En caso de sismo se obtendrán las componentes horizontal y vertical de la fuerza sísmica, figura 8:

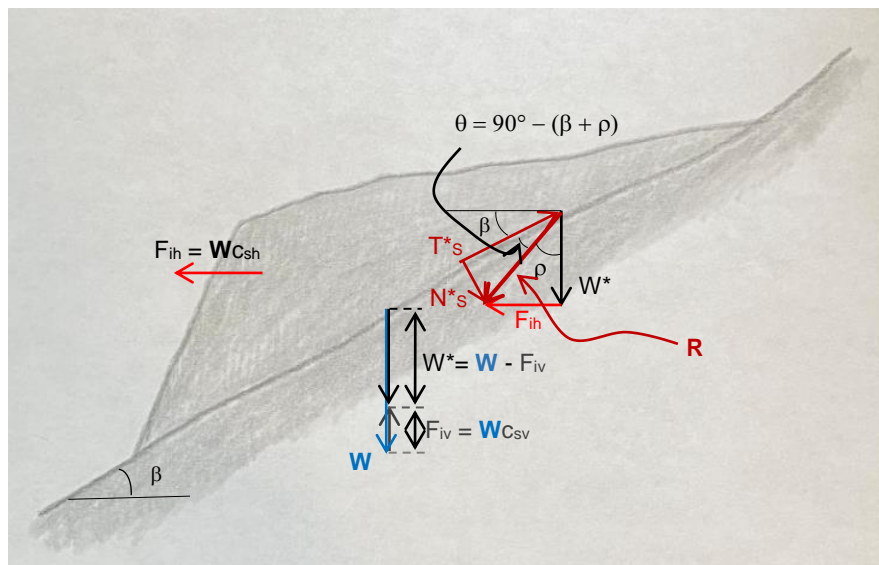


FIGURA 8.- FUERZA DEBIDAS AL SISMO



$$F_{ih} = W c_{sh}$$

$$F_{iv} = W c_{sv}$$

$$W^* = W - F_{iv}$$

$$R = [F_{ih}^2 + W^{*2}]^{0.5}$$

$$T_s^* = R \cos\theta$$

$$N_s^* = R \sen\theta$$

Donde:

F_{ih}	fuerza de inercia horizontal
W	peso de la cuña o bloque por deslizarse
c_{sh}	coeficiente sísmico horizontal
F_{iv}	fuerza de inercia vertical
c_{sv}	coeficiente sísmico vertical
β	ángulo de inclinación de la superficie de falla respecto a la horizontal
W^*	peso de la cuña de falla disminuida por la fuerza de inercia vertical
T_s^*	componente tangencial de la resultante R
N_s^*	componente normal de la resultante R

De esta manera el factor de seguridad considerando la subpresión y el sismo, queda:

$$F_s = [c_a l + (N_s^* - U) \tan \varphi_a] / T_s^*$$

El coeficiente sísmico horizontal puede determinarse mediante el programa PRODISIS v 4.1 de la Comisión Federal de Electricidad, CFE, el coeficiente sísmico vertical se considera 2/3 del horizontal o bien 0.7 del c_{sh} .

En las zonas sísmicas A y B, únicamente se considerará la F_{ih} y en las zonas sísmicas C y D ambas fuerzas F_{ih} y F_{iv} .

La CFE, ha establecido cuatro zonas sísmicas, las cuales se muestran en la figura 9.

FALLAS POR DESLIZAMIENTO SUPERFICIAL, CREEP

Se refiere al deslizamiento lento pero continuo del suelo debido a diferentes factores, entre ellos el incremento de la presión de poro y/o la modificación de la filtración del agua en la masa del suelo. La velocidad del movimiento depende de la época del año. Es un comportamiento plasto viscoso de una masa superficial, generalmente, de una ladera. Las figuras 10 a 13, son ejemplo de este tipo de falla.



FIGURA 9.- ZONAS SÍSMICAS ACTUALES ESTABLECIDAS POR LA COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD



FIGURA 10.- DESLIZAMIENTO EN LAS COMUNIDADES DE SANTIAGO MITLALTONGO Y SANTA CRUZ MITLALTONGO, OAXACA, EN NOVIEMBRE DEL 2011. LA SUPERFICIE DE SUELO DESPLAZADO SE ESTIMA EN 2.3 x 1.0 km.



FIGURA 11.- CAMINO DE TERRACERÍA DE SANTIAGO MITLALTONGO AFECTADO POR EL CREEP DEL CERRO LA PEÑA COLORADA, UBICADO AL NORTE DE LA POBLACIÓN.



FIGURA 12.- VARIAS CONSTRUCCIONES FUERON DESPLAZADAS JUNTO CON SU CIMENTACIÓN AL DESLIZARSE LA MASA DE SUELO QUE LA SOPORTABA. ESTA CASA DETUVO SU DESLIZAMIENTO AL QUEDAR ATRAPADA EN UNA NUEVA HONDONADA LLENA DE AGUA.



FIGURA 13.- EL MAYOR PORCENTAJE DE LAS CONSTRUCCIONES QUEDARON AFECTADAS ESTRUCTURALMENTE DESDE SU CIMENTACIÓN AL DESLIZASE MILLONES DE METROS CÚBICOS DE SUELOS.

DESLIZAMIENTO POR LA PRESENCIA DE FALLA GEOLÓGICAS

La presencia de fallas geológicas activas, en algún momento generan desplazamiento importantes de varios miles o millones de metros cúbicos. Un ejemplo de esto es el sistema de fallas que existe en Baja California, figuras 14 y 15.

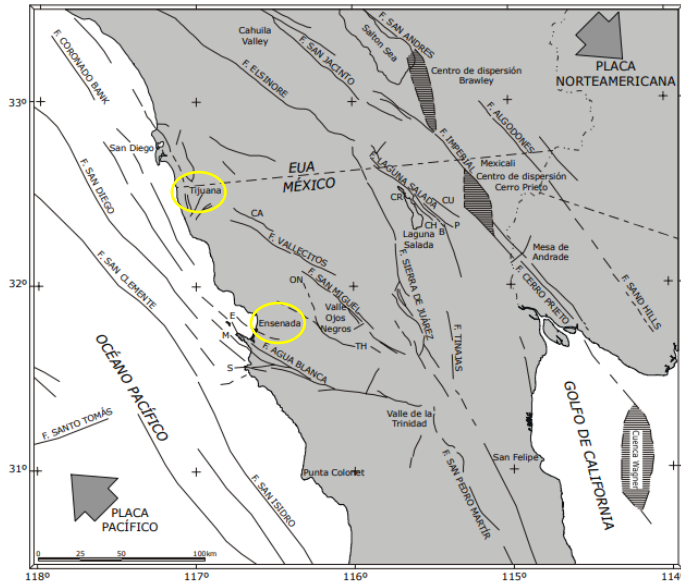


FIGURA 14.- FALLAS ACTIVAS REGIONALES AL NORTE DE BAJA CALIFORNIA.
 FUENTE: UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A. C., IMP, MANUEL CRUZ CASTILLO



FIGURA 15.- DESLIZAMIENTO EN LA AUTOPISTA ESCÉNICA TIJUANA – ENSENADA, EN DICIEMBRE DEL 2013, APROXIMADAMENTE EN EL KILÓMETRO 93+000

FALLAS POR DESCONCHAMIENTOS O DESPRENDIMIENTOS DE SUELO POR INTEMPERISMO

Los suelos, principalmente los cohesivos, al perder humedad se contraen generando grietas de tensión, en las cuales se pierde toda su resistencia al esfuerzo cortante, dando como resultado la caída de bloque de suelos de diferentes tamaños, quedando expuesta al intemperismo una nueva superficie o cara, la cual, si no es protegida contra el intemperismo, la erosión avanza de manera



indefinida sino se protege. Las figuras 16 y 17 presentan desconchamientos que ponen en riesgo la estabilidad de las construcciones.



FIGURA 16.- GRIETAS POR PÉRDIDA DE HUMEDAD EN LA PARED DEL CORTE, UBICADO EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE NAUCALPAN Y HUIXQUILUCAN, ESTADO DE MÉXICO, SEPTIEMBRE DEL 2020



FIGURA 17.- POR EFECTOS DEL INTEMPERISMO EL SUELO DE APOYO A LA CIMENTACIÓN DEL PATIO DE UNA CASA, SE DESPRENDE DEJANDOLA AL DESCUBIERTO Y EN PELIGRO DE CAER. LA UBUCACIÓN DEL SITIO ES LA MISMA DE LA FIGURA ANTERIOR.



FALLAS POR ROTACIÓN

Este tipo de falla se asemeja a una espiral logarítmica, su forma se presenta en las figuras 18 y 19.

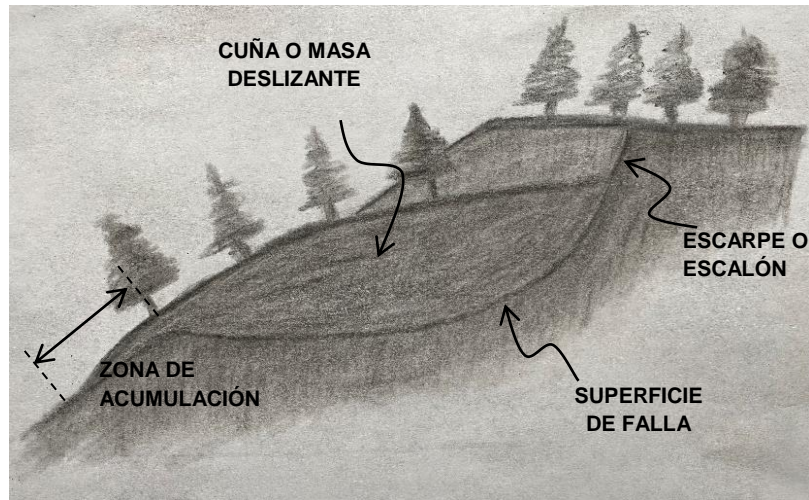


FIGURA 18.- SUPERFICIE DE FALLA POR ROTACIÓN. LA GEOMETRÍA DE LA FALLA SE ASEMEJA A UNA ESPIRAL LOGARÍTMICA

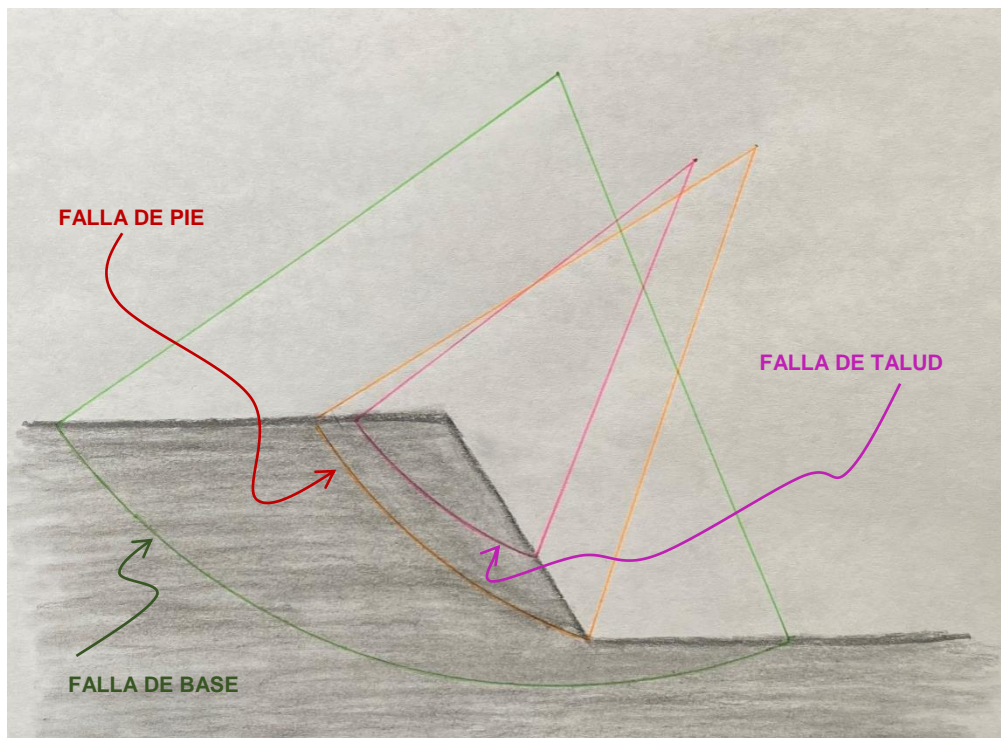
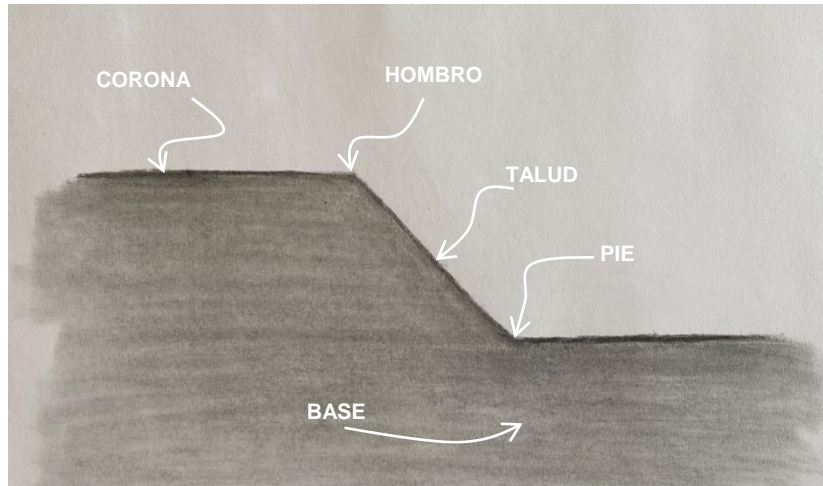


FIGURA 19.- FALLA ROTACIONAL EN UN CAMINO PRÓXIMO A UNA CAÑADA

Dado a que la trayectoria de la superficie de falla se presenta donde el suelo ofrece la menor resistencia al esfuerzo cortante para localizarla se ha optado sustituirla por un arco circular, método sueco. Se pueden presentar diferentes tipos de fallas, clasificadas dependiendo donde la falla intercepta o corta al talud o a la base.



Para su estudio se definen las partes de un talud como sigue:



Así, al igual que en la falla por translación, el cálculo de la estabilidad del talud con falla por rotación, consiste en evaluar el cociente de la suma de las fuerzas resistentes entre la suma de las fuerzas deslizantes, o bien la relación entre momentos resistentes y momentos deslizantes.



TALUD EN SUELOS HOMOGÉNEOS, PURAMENTE COHESIVOS, $\varphi = 0$

Considérese un talud homogéneo y puramente cohesivo:

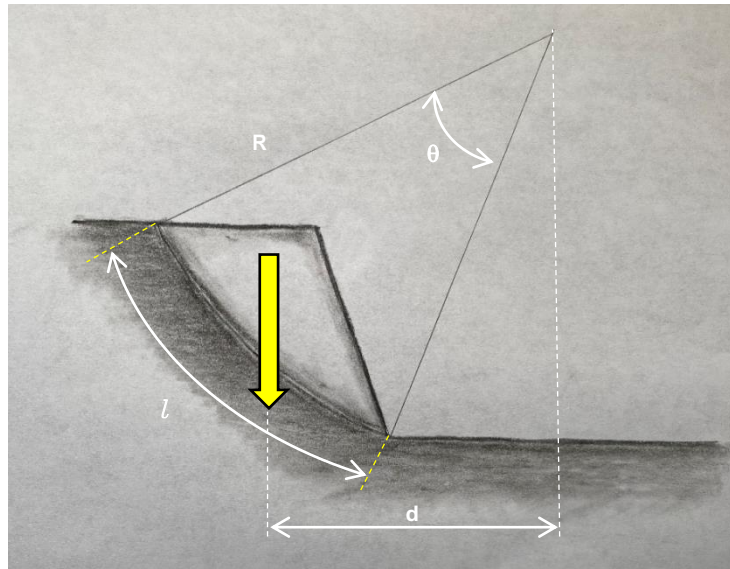


FIGURA 20.- FACTOR DE SEGURIDAD PARA TALUD CON FALLA DE PIE EN SUELOS HOMOGÉNEOS, PURAMENTE COHESIVO

$$l = R \theta_{\text{rad}}$$

$$F_s = \Sigma M_R / \Sigma M_D$$

$$F_s = c l R / W d$$

MÉTODO DE LAS DOVELAS

En caso de que el talud esté conformado por dos o más estratos y estos sean cohesivos, friccionantes o ambos, habrá que tomar en cuenta las diferentes propiedades índices y mecánicas de cada estrato. Para el análisis la cuña de falla se divide en dovelas.

Las bases de las dovelas deberán ubicarse en un solo estrato a fin de considerar únicamente las propiedades mecánicas del estrato correspondiente, figura 21. Los pesos de cada dovela se calculan considerando las áreas y los pesos volumétricos por estrato, así:

$$W_i = \Sigma A_i \gamma_i$$

Los pesos se concentran por el centroide de cada dovela y se representan por un vector localizado en la superficie de falla. Posteriormente dichos pesos se descomponen en su normal y tangencial, N



y T, a la superficie de falla, para aplicar la igualdad siguiente que define el factor de seguridad del círculo de falla propuesto:

$$F_s = \left[\sum c_i l_i + \sum N_i \tan \varphi_i \right] / \sum T_i$$

Siendo:

- $\sum c_i l_i$ suma de las resistencias por cohesión de cada estrato
- c_i cohesión en la superficie de falla, de cada estrato
- l_i longitud de la falla, arco circular, de cada estrato
- $\sum N_i$ suma de las componentes normales a la superficie de falla de los pesos de cada dovela
- φ_i ángulo de fricción de los estratos por donde pasa la superficie de falla
- $\sum T_i$ suma de las componentes tangenciales de los pesos W_i . Esta es una suma algebraica

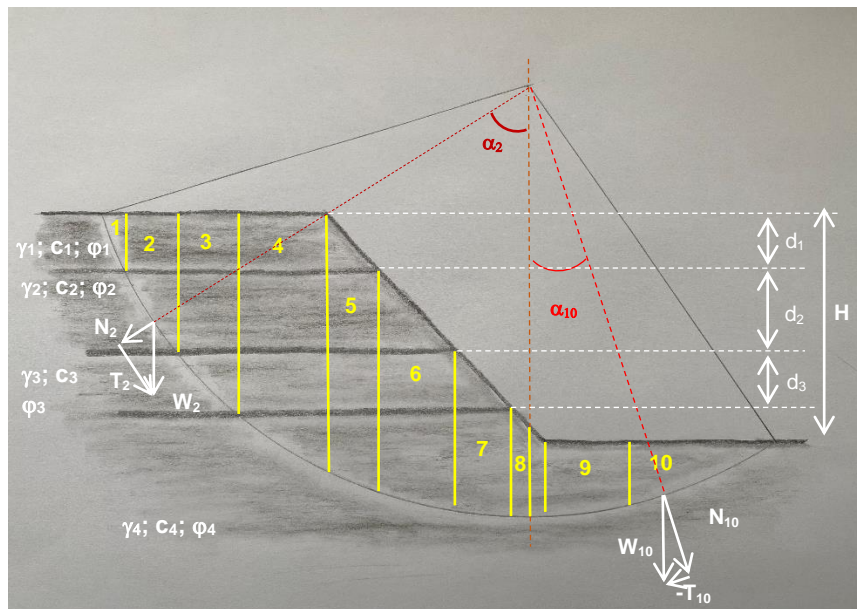


FIGURA 21.-MÉTODO DE LAS DOVELAS, FALLA DE BASE

EJEMPLO

Para un talud de 13.0 m de altura con tres estratos cohesivos friccionantes, calcular el factor de seguridad, de un círculo con falla de base, de 22.8 m de radio, cuyo centro se localiza con los ángulos direccionales $\beta_A = 24.55^\circ$ y $\beta_B = 48.86^\circ$. Las propiedades de los estratos son:



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESTRATO	ESPESOR	γ	c	ϕ
Número	m	kN/m ³	kPa	°
1	4.2	17.5	45	30
2	5.8	18.6	65	35
3	Indefinido, pero > 3.0	20.1	50	33

γ peso volumétrico c cohesión ϕ ángulo de fricción interna

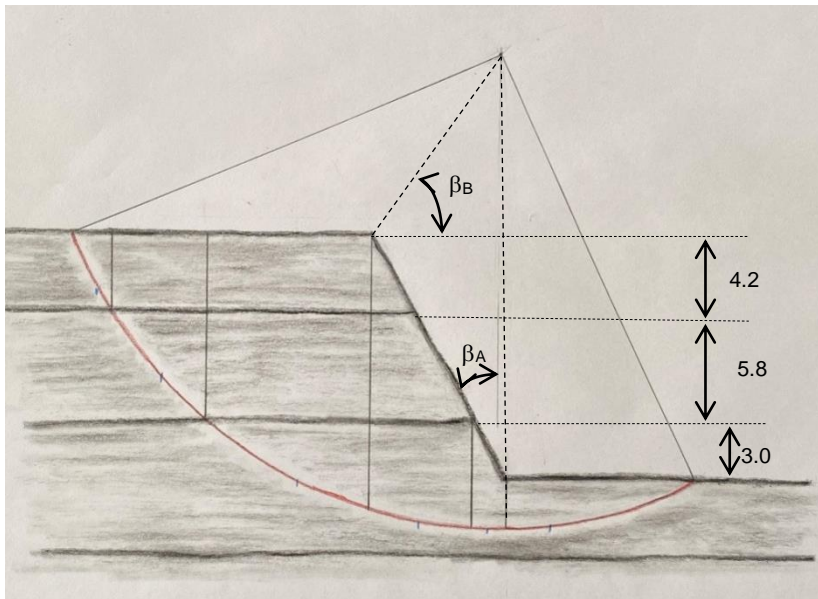
Dado a que el problema se resuelve gráficamente, en primera instancia habrá que dibujarlo a una escala conveniente. Posteriormente, se seleccionan las dovelas, en este caso se proponen 6 dovelas a fin de trabajar con las mínimas necesarias. En general no conviene tener más de 10 dovelas ya que el dibujo se cargaría demasiado. En este ejemplo el objetivo es explicar el método de las dovelas. Una vez entendido el estudiante podrá considerar un número mayor de dovelas, teniendo presente que la base de cada dovela se ubique en un solo estrato.

Una vez propuestas las dovelas, se procede a calcular el peso de las mismas, $W_i = \Sigma A_i \gamma_i$, si existiera una sobrecarga, ésta se deberá sumar al peso de la dovela correspondiente, así se obtiene:

$$W_i = \Sigma A_i \gamma_i + q l_i$$

Siendo:

q sobrecarga uniformemente distribuida
 l_i longitud de la carga sobre de la dovela



$$N_i = W_i \cos \alpha_i$$

$$T_i = W_i \sen \alpha_i$$

$$l_i = R \theta_{\text{rad}i}$$



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

$$\theta_1 = 11^\circ = 0.192 \text{ radianes}$$

$$\theta_2 = 18^\circ = 0.314 \text{ radianes}$$

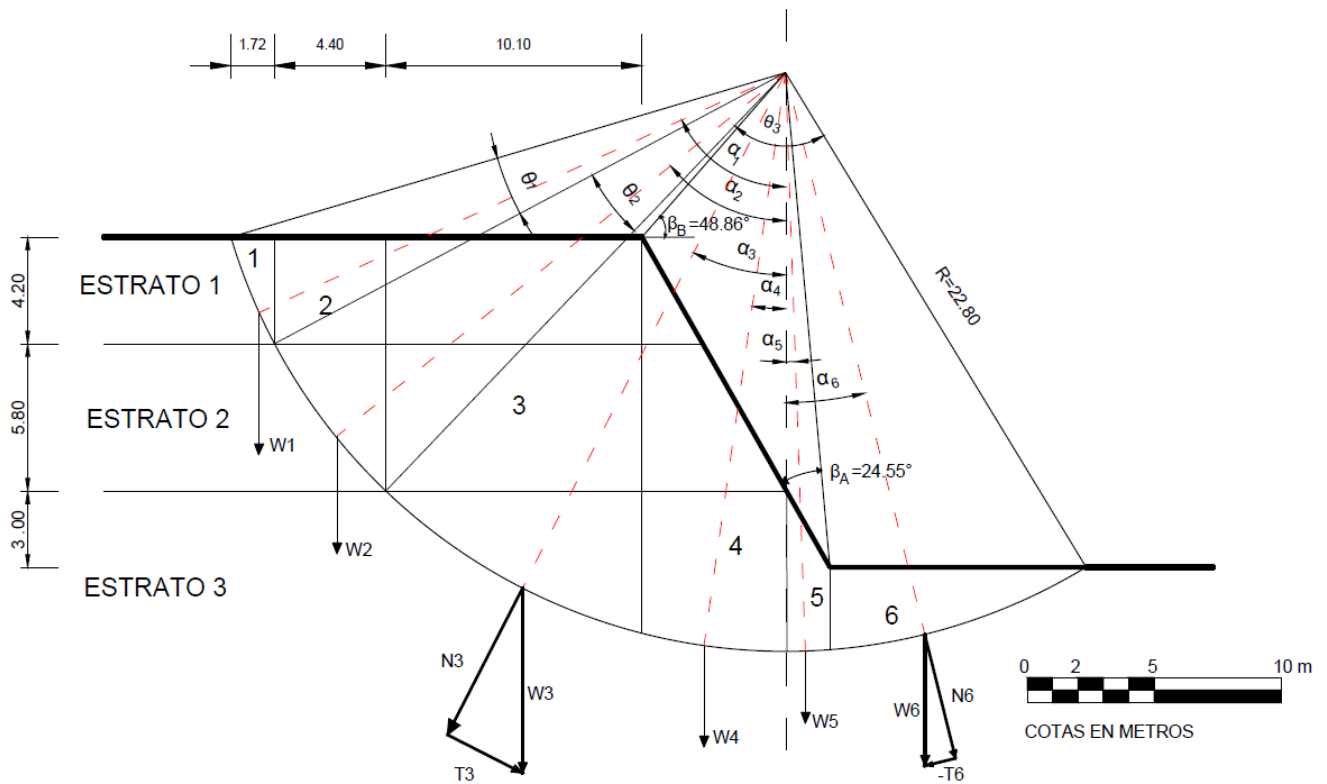
$$\theta_3 = 75^\circ = 1.309 \text{ radianes}$$

$$l_1 = 22.80 (0.192) = 4.38 \text{ m}$$

$$l_2 = 22.80 (0.314) = 7.16 \text{ m}$$

$$l_3 = 22.80 (1.309) = 29.85 \text{ m}$$

DOVELA	W	α	N	T
Número	kN/m	°	kN/m	kN/m
1	68.95	66	28.04	62.99
2	584.80	51	368.03	454.47
3	2,514.42	27	2,240.36	1,141.52
4	1,772.00	8	1,754.76	26.61
5	169.85	2	169.75	5.93
6	418.08	-14	405.66	- 101.14
suma				1,590.38



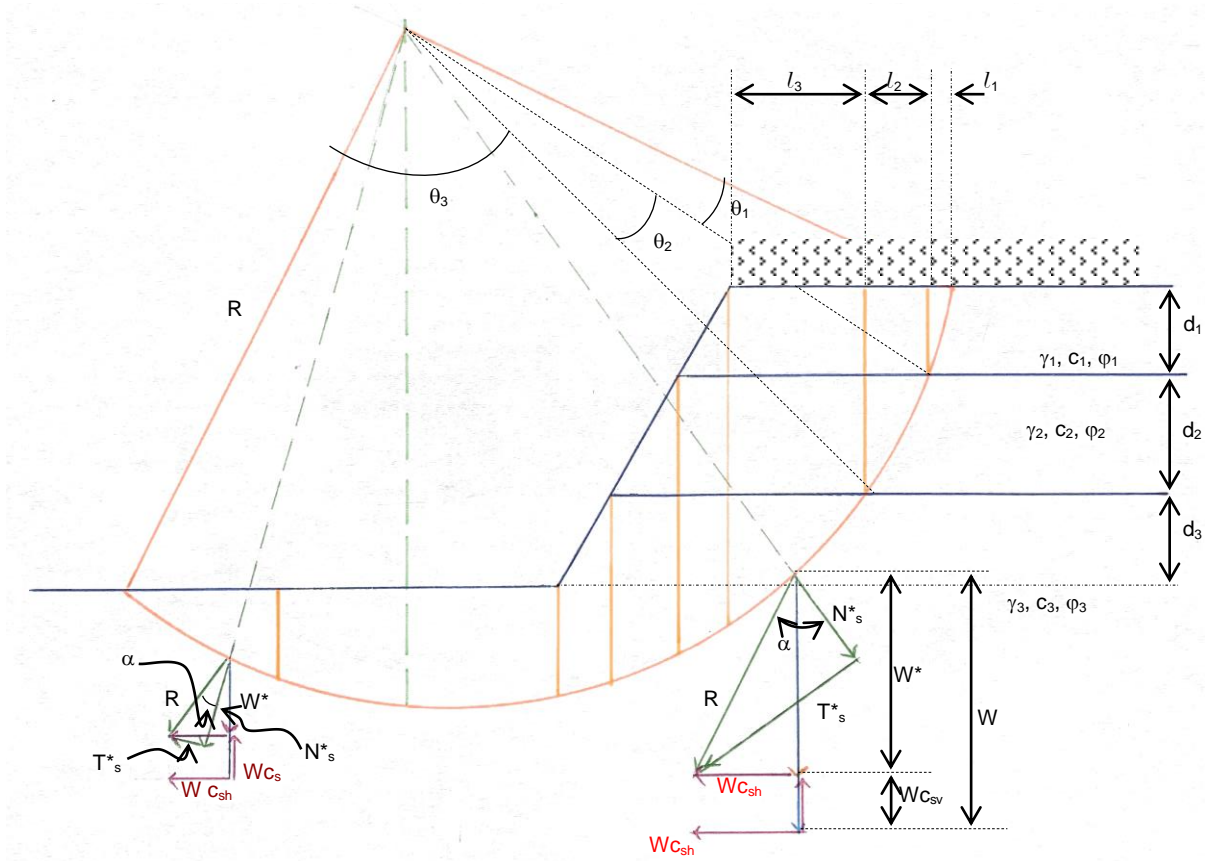
$$F_s = (\sum c_i l_i + \sum N_i \tan \phi_i) / \sum T_i$$

$$F_s = \{[45 (4.58) + 65 (7.16) + 50 (29.85)] + [28.07 \tan 30^\circ + 368.03 \tan 35^\circ + 4,570.53 \tan 33^\circ]\} / 1,590.38$$

$$F_s = 3.39$$



En caso de que el talud se encuentre en zona sísmica habrá que considerar las fuerzas que el sismo genere, para la cual es válida la figura 8, para cada dovela, de esta manera se obtiene:



$$R_i = [(W_i C_{sh})^2 + W_i^{*2}]^{0.5}$$

$$W^*_i = W_i - W_i C_{sv} = W_i (1 - C_{sv})$$

$$N^*_{si} = R_i \cos \alpha_i$$

$$T^*_{si} = R_i \sen \alpha_i$$

$$l_i = R_i \theta_{radi}$$

$$Fs = [\sum c_i l_i + \sum N^*_{si} \tan \varphi_i] / \sum T^*_{si}$$

EJEMPLO

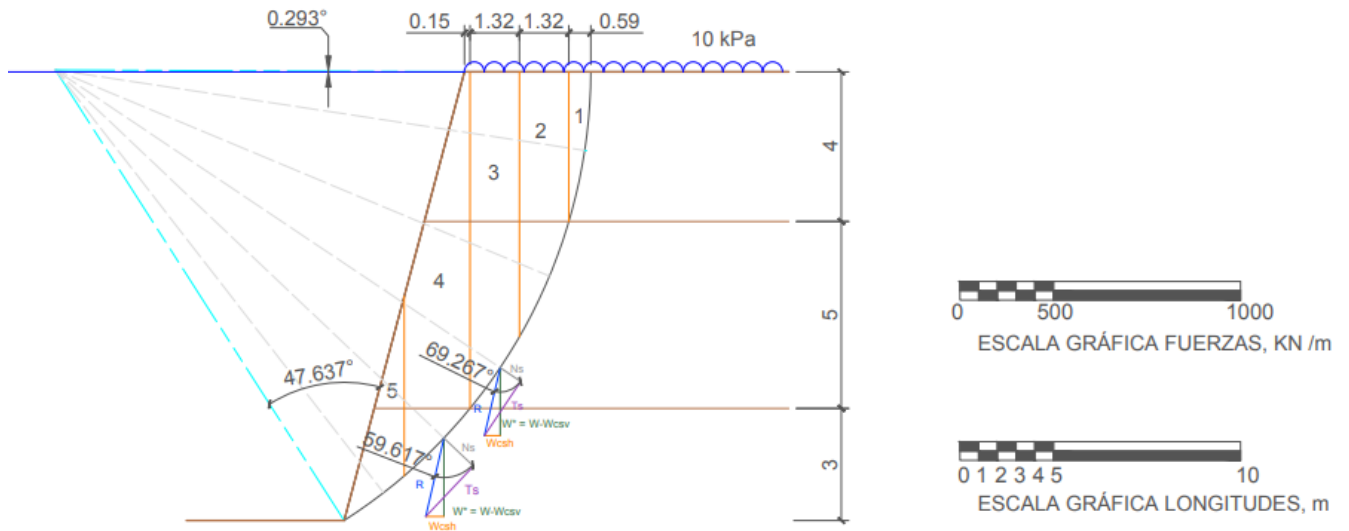


ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Calcular el factor de seguridad del siguiente talud cuyo ángulo respecto a la horizontal es de 75° , sobre su corona actúa una sobrecarga de 10 kPa; los coeficientes sísmicos horizontal y vertical son de 0.20 y 0.14, respectivamente, la superficie de falla es de pie. Las propiedades de los estratos son:

ESTRATO	ESPESOR	PESO VOLUMÉTRICO	COHESIÓN	ÁNGULO DE FRICCIÓN
Número	m	kN/m^3	kPa	$^\circ$
1	4.0	17.0	40.0	30
2	5.0	20.0	60.0	35
3	>3.0	18.0	70.0	28

El centro del círculo por analizar se ubica en $\beta_A = 47.637^\circ$, $\beta_B = 0.293^\circ$



DOVELA	W	α	Wc_{sh}	Wc_{sv}	$W-Wc_{sv}$	R	Ns^*	Ts^*
1	32.29	85.567°	6.46	4.52	27.77	28.51	2.20	28.43
2	148.06	80.423°	29.61	20.73	127.33	130.73	21.75	128.91
3	211.20	69.267°	42.24	29.57	181.63	186.48	66.01	174.40
4	243.74	59.617°	48.75	34.12	209.62	215.21	108.85	185.66
5	72.79	50.895°	14.56	10.19	62.60	64.27	40.54	49.87
							Σ	567.27

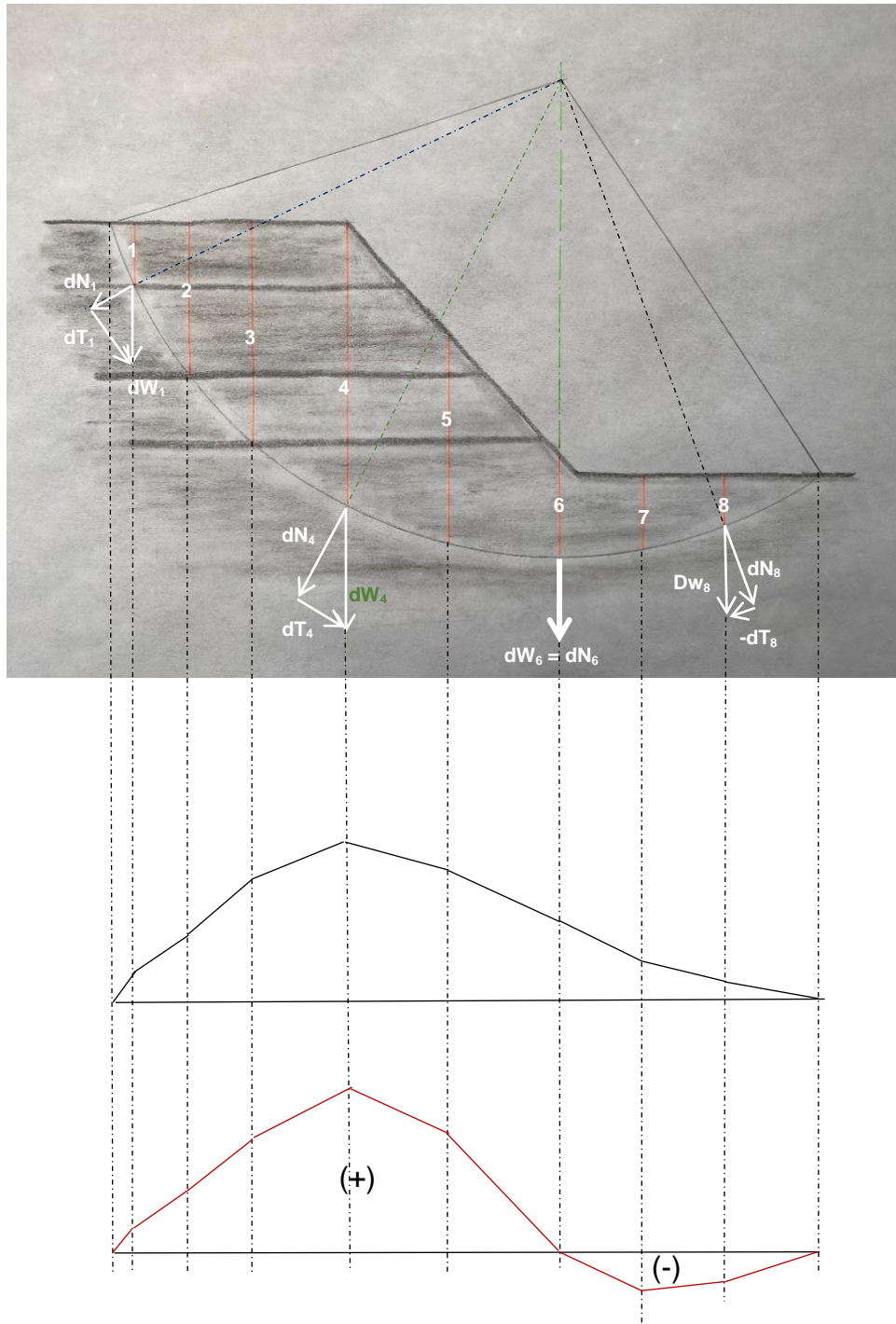
DOVELA DIFERENCIAL



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Este método es una variante del método anterior, su principal diferencia es que el ancho de la dovela es diferencial, dx , en consecuencia el peso, y sus componentes normal y tangencial son dW , dN , y dT .





De igual manera, por ser una solución gráfica, se dibujará el problema a escala conveniente, de acuerdo al tamaño del papel. Se seleccionan las dovelas diferenciales, de preferencia que coincidan algunas de ellas en los cambios de estratos para calcular las fuerzas normales y las longitudes de arco por estrato. Además, en caso de falla de talud se recomienda ubicar una dovela por la vertical que pasa por el centro del círculo potencial de falla analizado, a fin de evaluar el cambio en el signo de las componentes tangenciales, cuando son a favor del deslizamiento y cuando son contrarias a él.

Los pesos diferenciales se calculan con la suma de los productos de las alturas por sus respectivos pesos volumétricos.

$$dW_i = \sum h_i \gamma_i$$

Se acostumbra evaluar gráficamente las componentes normales y tangenciales, dN_i y dT_i , a partir de la representación gráfica de sus pesos diferenciales. O bien con las igualdades siguientes:

$$dN_i = dW_i \cos \alpha_i$$

$$dT_i = dW_i \sen \alpha_i$$

Las componentes diferenciales dN_i y dT_i son graficadas a escala sobre de una horizontal debajo del problema para posteriormente evaluar las áreas que queden entre la horizontal y la envolvente de las normales y tangenciales diferenciales.

Finalmente, se determina el factor de seguridad con la expresión:

$$F_s = [\sum c_i l_i + (\int dN_i dx) \tan \varphi_i] / \int dT_i dx$$

A continuación se presenta un ejemplo del método de la dovela diferencial. Considérese un talud con 60° de inclinación respecto a la horizontal, de 16.5 m de altura, figura 22. El círculo analizado es un círculo de falla de base, de 29.0 m de radio, ángulos direccionales, $\beta_A = 41^\circ$, $\beta_B = 28.5^\circ$.

DOVELA	dW_i	dN_i	dT_i
Número	kN/m	kN/m	kN/m
1	82.5	42.0	71.0
2	184.5	125.0	136.0
3	283.5	247.0	140.0
4	194.6	183.0	67.0
5	72.0	68.0	24.0
6	79.2	79.2	0.0
7	63.0	62.0	11.0

$$l_i = R \theta_i$$

$$l_1 = 29 (0.201) = 5.83 \text{ m}$$



$$l_2 = 29 (0.262) = 7.60 \text{ m}$$

$$l_3 = 29 (1.370) = 39.73 \text{ m}$$

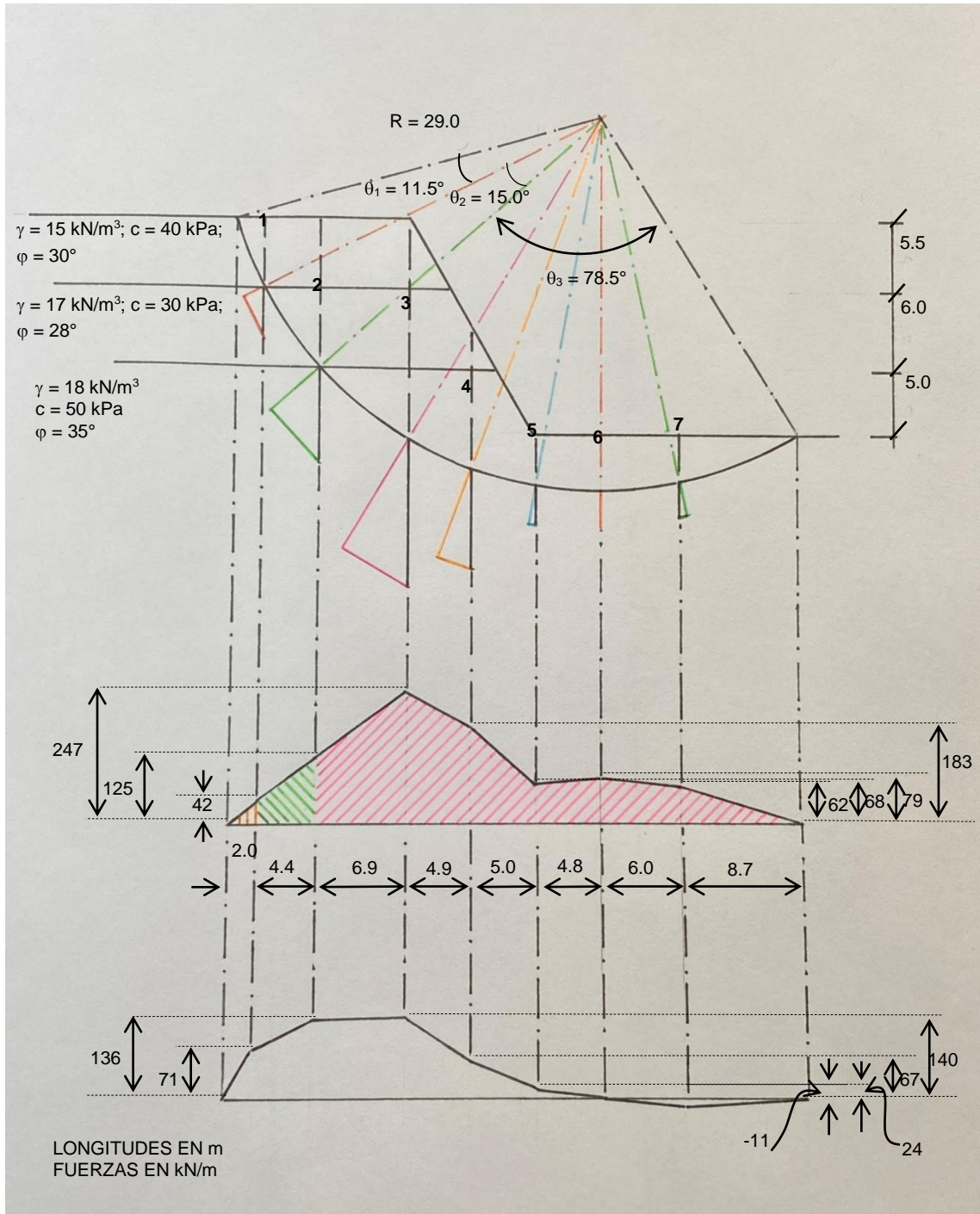


FIGURA 22.- APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LAS DOVELAS DIFERENCIALES PARA DETERMINAR EL FACTOR DE SEGURIDAD



$$F_s = [\sum c_i l_i + \sum N_i \tan \varphi_i] / \sum T_i$$

$$\sum N_1 = 0.5 (2) 42 = 42 \text{ kN/m}$$

$$\sum N_2 = [(42 + 125) / 2] 4.4 = 367.40 \text{ kN/m}$$

$$\sum N_3 = [(125 + 247) / 2] 6.9 + [(247 + 183) / 2] 4.9 + [(183 + 68) / 2] 5 + [(68 + 79) / 2] 4.8 + \\ + [(79 + 62) / 2] 6 + 0.5 (6) 8.7 = 4,009.90 \text{ kN/m}$$

$$\sum T = 0.5 (71) 2 + [(71 + 136) / 2] 4.4 + [(136 + 140) / 2] 6.9 + [(140 + 67) / 2] 4.9 + [(67 + 24) / 2] 5 + \\ + 0.5 (24) 4.8 - 0.5 (6) 11 - 0.5 (11) 8.7 = 2,190 \text{ kN/m}$$

$$F_s = \{ [40(5.83) + 30 (7.60) + 50 (39.73)] + [42 \tan 30^\circ + 367.40 \tan (28^\circ) + 4,009.90 \tan 35^\circ] \} / 2,190$$

$$\underline{F_s = 2.50}$$

CÍRCULO CRÍTICO O DE FALLA EN TALUDES HOMOGÉNEOS PURAMENTE COHESIVOS, $\varphi = 0$

Para localizar el centro del círculo crítico en taludes homogéneos, puramente cohesivos, con falla de pie, W. Fellenius propone los siguientes ángulos direccionales, β_A y β_B , ver la figura 23.

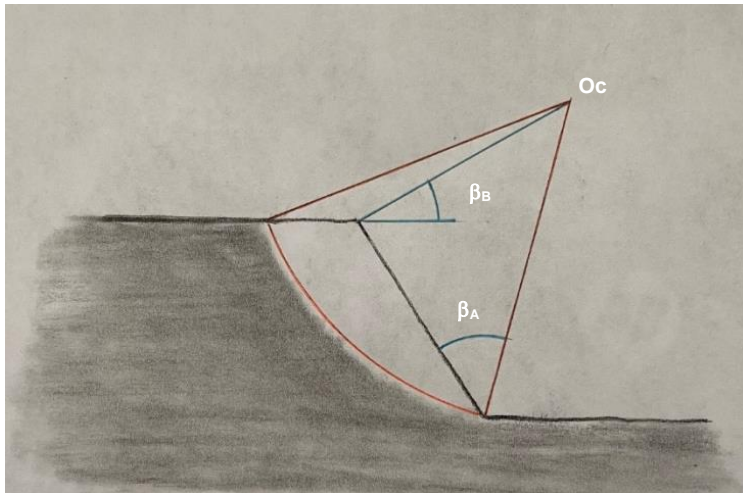


TABLA 1.- ÁNGULOS DIRECCIONALES SEGÚN FELLENIUS

TALUD		β_A	β_B
1 : n	°	°	°
1 : 0.58	60.00	29	40
1 : 1.0	45.00	28	38
1 : 1.5	33.68	26	35
1 : 2.0	25.57	25	35
1 : 3.0	18.43	25	35

FIGURA 23.- UBICACIÓN DEL CENTRO DEL CÍRCULO CRÍTICO SEGÚN FELLENIUS PARA TALUDES HOMOGÉNEOS, PURAMENTE COHESIVOS
 FUENTE: A. R. JUMIKIS, SOIL MECHANICS

FACTOR DE SEGURIDAD PARA SUELOS PURAMENTE FRICCIONANTES, $c = 0$



De la figura 24, considérese que ρ es el ángulo inicial de un talud de arena o grava, puramente friccionante, homogéneo y que la cuña de falla es el triángulo abd. Su factor de seguridad está dado por las componentes de su peso, W , según la igualdad siguiente.

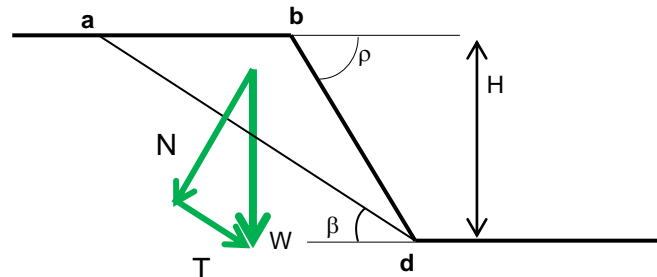


FIGURA 24.- TALUD EN SUELO HOMOGÉNEO, PURAMENTE FRICCIONANTES

$$F_s = N \tan \varphi / T$$

Siendo:

$$N = W \cos \beta$$

$$T = W \sin \beta$$

$$F_s = W \cos \beta \tan \varphi / W \sin \beta$$

$$F_s = \tan \varphi / \tan \beta$$

Como se observa en la ecuación anterior, el factor de seguridad es independiente del peso de la cuña de falla, es decir, para condiciones estáticas, sin sobrecarga y ni flujo de agua, si $\varphi > \beta$ el talud es estable para cualquier altura.

PARA SUELOS HOMOGÉNEOS, COHESIVOS - FRICCIONANTES, $\varphi \leq 15^\circ$, FALLA DE PIE

A. R. Jumikis propone determinar el centro del círculo crítico a partir de los ángulos direccionales de Fellenius, figura 23, con la condición de que el ángulo de fricción interna sea menor de 15° y el talud sea homogéneo. En primera instancia el problema se dibuja a una escala conveniente; posteriormente se localiza en centro del círculo crítico, asumiendo que el ángulo de fricción interna es nulo, después se ubica el punto K, contando hacia abajo, a partir del pie del talud, una distancia igual a la altura del talud y $4.5 H$ también del pie, figura 25. Al unir estos dos puntos se define la "línea de posición". Sobre de ella se proponen centros de círculos de falla, falla de pie, y se calcula la cohesión necesaria igualando las fuerzas resistentes con las fuerzas deslizantes, es decir, el factor de seguridad, F_s , es unitario.

Dada la expresión



$$F_s = [c l + \Sigma N \tan \varphi] / \Sigma T$$

Para

$$F_s = 1.0$$

$$c_{nec} = [\Sigma T - \Sigma N \tan \varphi] / l$$

Sobre de la línea de posición se grafican perpendiculares a ella y a escala conveniente la c_{nec} en el centro de su círculo correspondiente. De esta manera se define una curva por la cual se pasa una tangente a ella, paralela a la línea de posición, este punto define el centro del círculo crítico del talud con falla de pie. Finalmente se calcula el factor de seguridad de círculo crítico el cual define el factor de seguridad del talud.

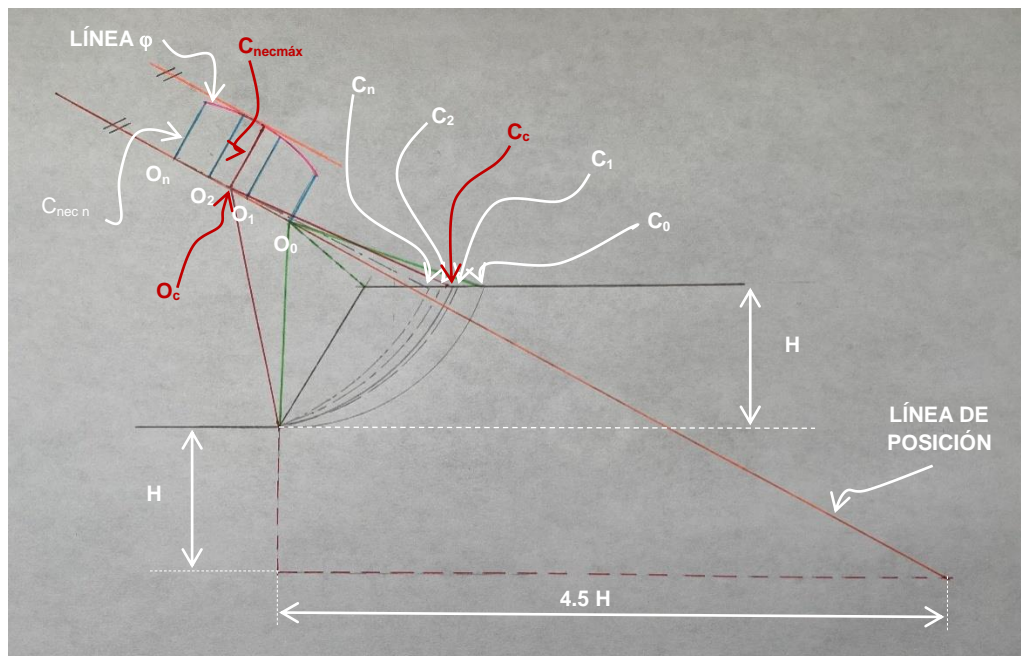


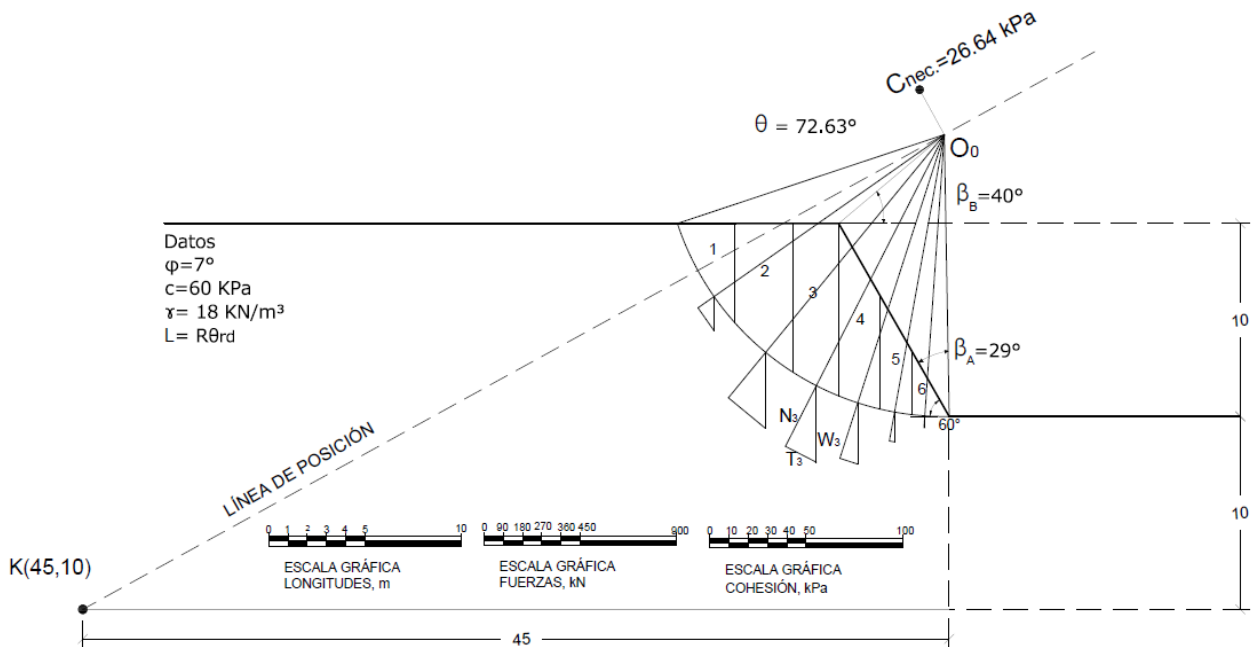
FIGURA 25.- LOCALIZACIÓN DEL CÍRCULO CRÍTICO PARA FALLA DE PIE EN TALUD HOMOGÉNEO COHESIVO FRICCIONANTE, CON ÁNGULO DE FRICCIÓN MENOR A 15°

EJEMPLO

Aplicando el criterio anterior, calcular el factor de seguridad de un talud homogéneo, cohesivo friccionante, de 10.0 m de altura, peso volumétrico de 18 kN/m³, cohesión de 60 kPa, ángulo de fricción interna de 7°.



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



$R = 14.60 \text{ m}$
 $l = 18.51 \text{ m}$

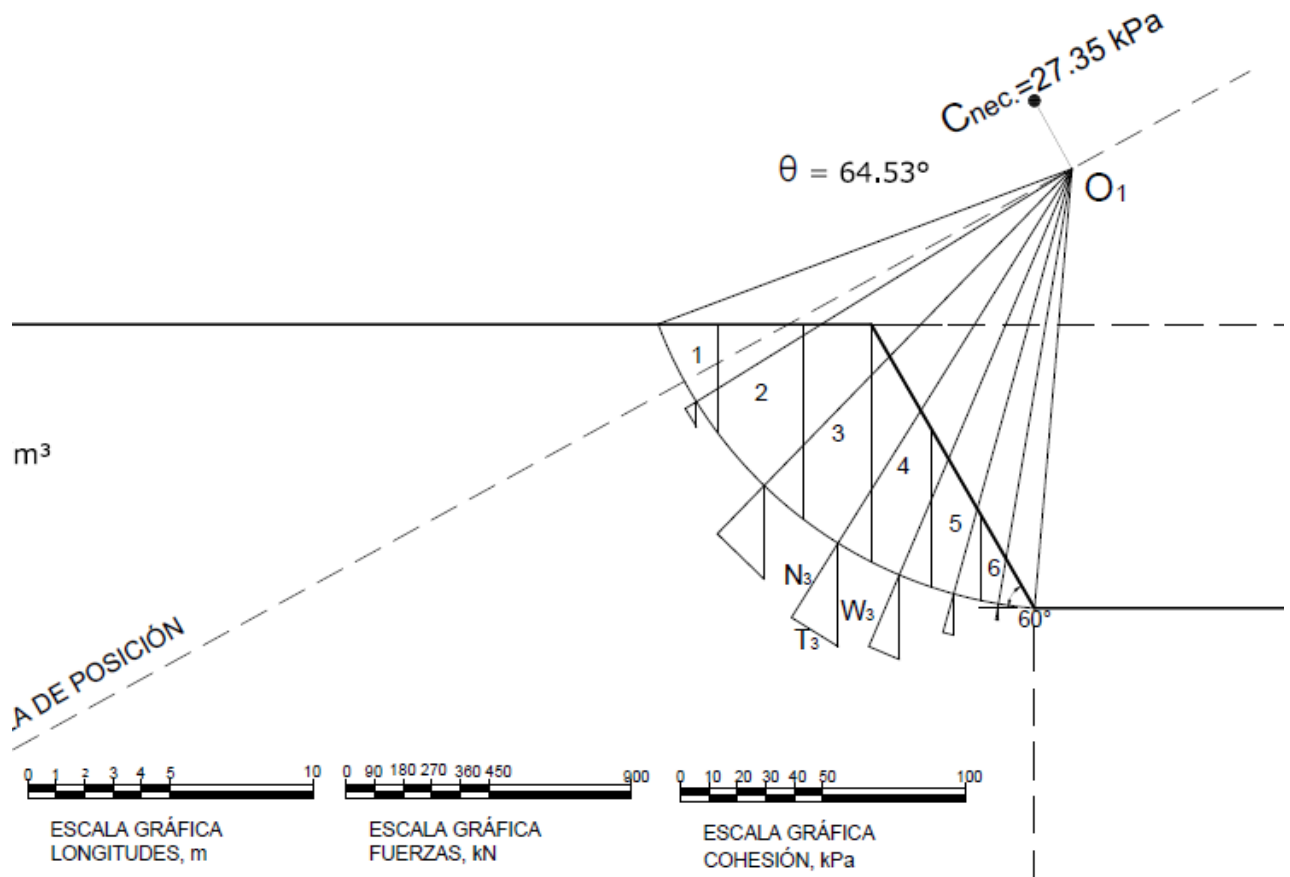
DOVELA	ÁREA	W	N	T
Número	m ²	kN/m	kN/m	kN/m
1	8.90	160.20	91.8	131.1
2	19.74	355.32	274.5	225.0
3	19.85	357.30	317.7	162.0
4	15.91	286.38	271.8	88.2
5	7.75	139.50	136.8	24.3
6	3.10	55.80	54.9	3.6
SUMA			1,147.5	634.2

$C_{nec} = [\Sigma T - \Sigma N \tan \phi] / l = [634.2 - 1,147.5 \tan 7^\circ] / 18.51 = 26.65 \text{ kPa}$



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



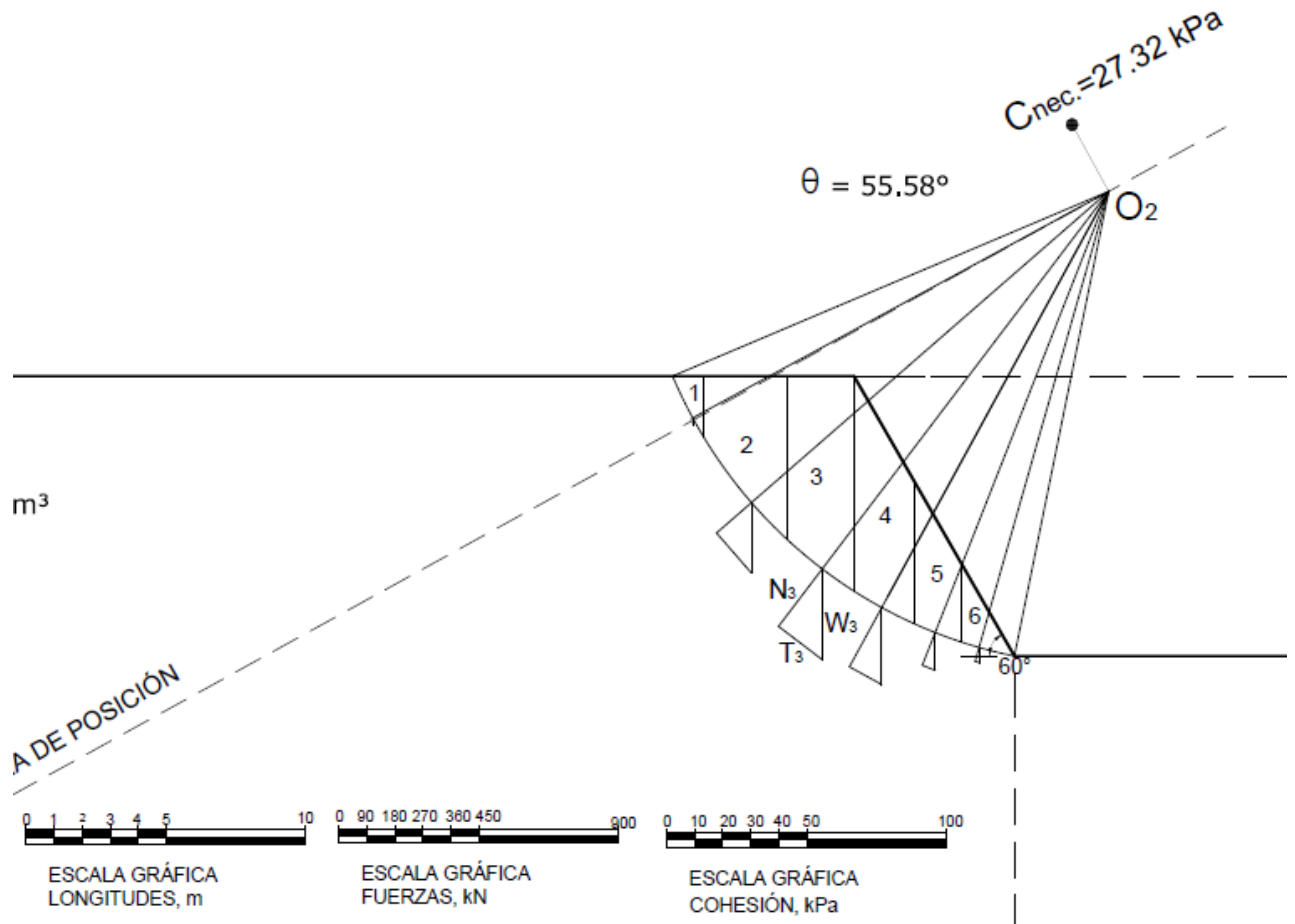
$$R = 15.52 \text{ m}$$
$$l = 17.48 \text{ m}$$

DOVELA Número	ÁREA m ²	W kN/m	N kN/m	T kN/m
1	4.41	79.40	41.83	67.26
2	16.72	300.99	213.29	206.68
3	18.18	327.16	278.00	173.30
4	14.92	268.64	246.91	104.73
5	7.29	131.27	126.61	35.14
6	2.92	52.62	51.47	8.68
		SUMA	958.11	595.79

$$C_{nec} = [\Sigma T - \Sigma N \tan \varphi] / l = [595.79 - 958.11 \tan 7^\circ] / 17.48 = 27.35 \text{ kPa}$$



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS
 ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



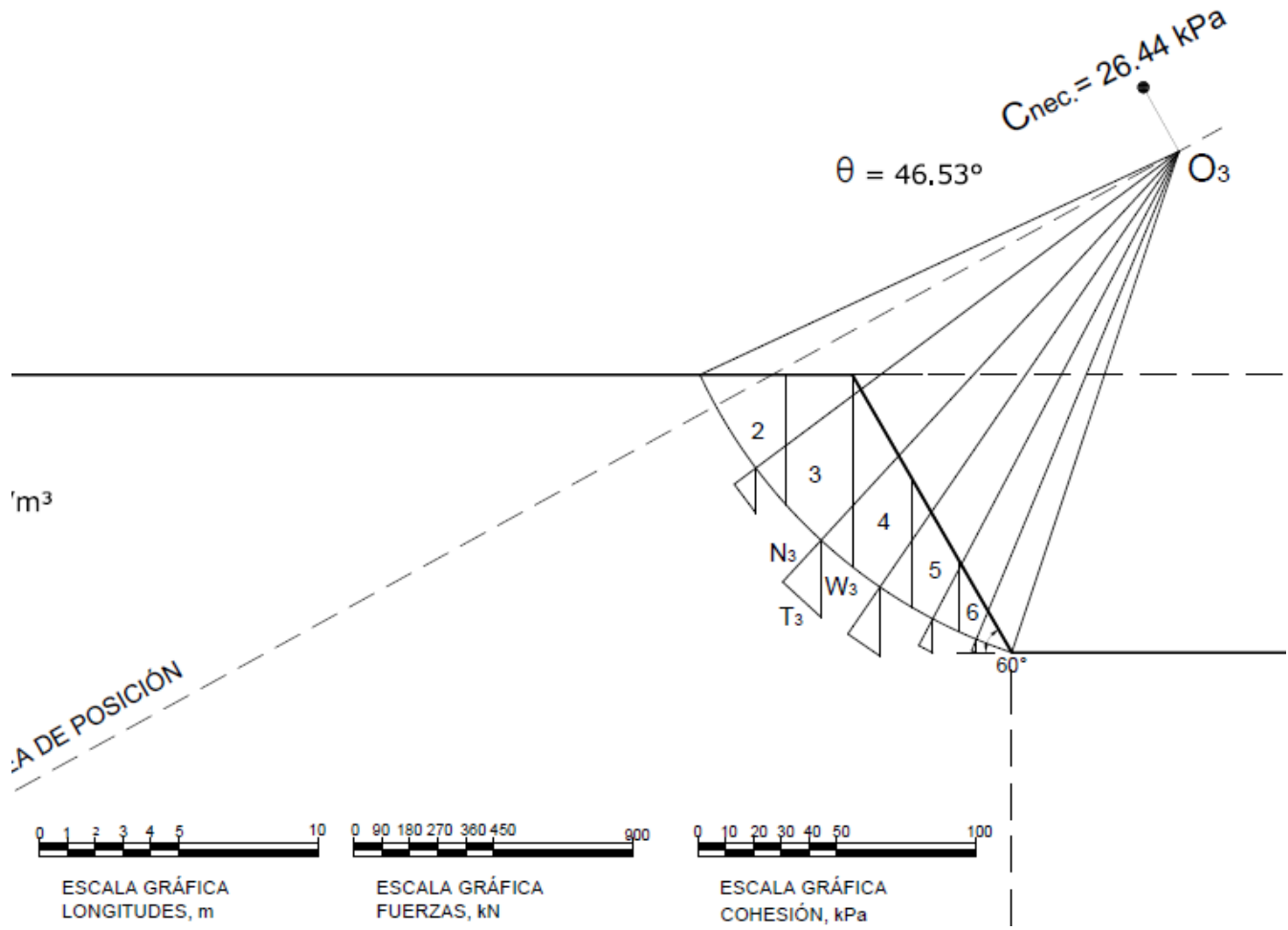
$R = 16.93 \text{ m}$
 $l = 16.42 \text{ m}$

DOVELA Número	ÁREA m ²	W kN/m	N kN/m	T kN/m
1	1.25	22.48	10.75	19.13
2	12.60	226.80	148.84	171.00
3	16.18	291.24	232.15	176.45
4	13.75	247.50	217.21	118.65
5	6.74	121.32	113.04	44.45
6	2.71	48.78	46.74	13.31
		Suma	768.73	543.08

$$c_{nec} = [\sum T - \sum N \tan \varphi] / l = [543.08 - 768.73 \tan 7^\circ] / 16.42 = 27.32 \text{ kPa}$$



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS
 ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



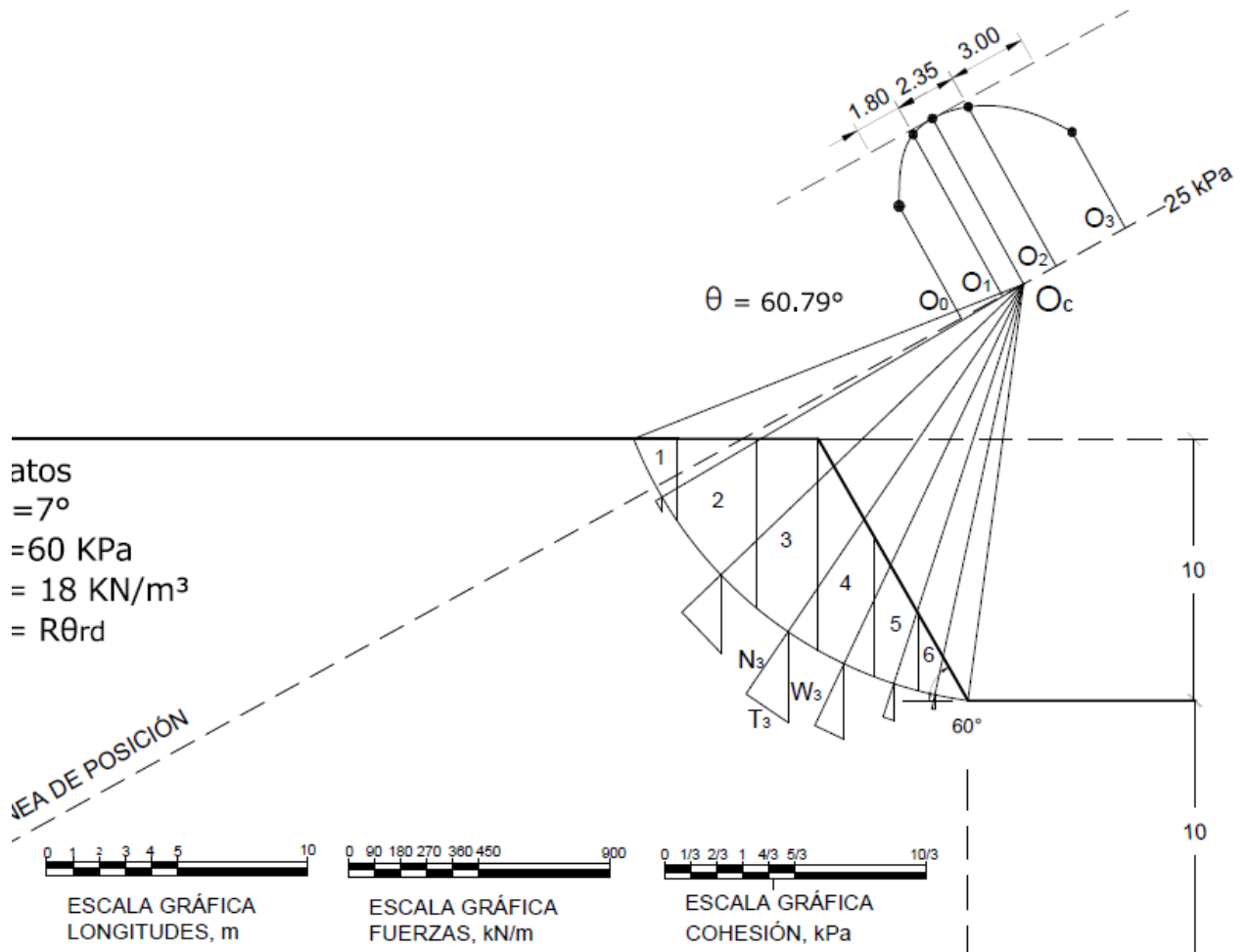
$R = 19.02 \text{ m}$
 $l = 15.45 \text{ m}$

DOVELA Número	ÁREA m ²	W kN/m	N kN/m	T kN/m
2	8.08	145.44	87.42	116.64
3	13.91	250.38	184.14	169.29
4	12.43	223.74	184.77	126.63
5	6.14	110.52	97.92	51.48
6	2.47	44.46	40.73	16.89
SUMA			594.98	480.93

$$C_{nec} = [\Sigma T - \Sigma N \tan \varphi] / l = [480.93 - 594.98 \tan 7^\circ] / 15.45 = 26.44 \text{ kPa}$$



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS
 ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



$R = 16.05 \text{ m}$
 $l = 17.08 \text{ m}$

DOVELA Número	ÁREA m ²	W kN/m	N kN/m	T kN/m
1	2.86	51.57	26.14	44.45
2	14.94	269.00	186.16	194.18
3	17.37	312.64	258.70	175.55
4	14.45	260.06	235.18	111.01
5	7.07	127.28	121.05	39.36
6	2.84	51.06	49.93	10.80
SUMA			877.16	575.35

$$F_s = [c l + \sum N \tan \phi] / \sum T = [60 (17.08) + 877.16 \tan 7^\circ] / 575.35$$

$F_s = 1.97$



MÉTODO "FACTORES MÍNIMOS DE SEGURIDAD"

En este caso, también por tanteos, se determina el centro del círculo crítico con falla de pie. En primera instancia se localiza al azar una línea horizontal o vertical. Aquí, se propone una horizontal sobre de la corona del talud, en ella se proponen centros de círculos potenciales de falla y se calculan sus respectivos factores de seguridad para cada círculo, los que se grafican a escala a partir de la línea horizontal. Los factores de seguridad se unen por medio de una envolvente, por la que se traza una tangente a ella, paralela a la línea horizontal. Posteriormente, en el punto de tangencia se traza una línea vertical, para nuevamente proponer otros centros de círculos para calcular sus factores de seguridad los cuales también son dibujados a escala para obtener la curva que los une.

Finalmente, se traza la vertical tangente a ésta última curva y se define el factor de seguridad mínimo tanto en el sentido horizontal como vertical. Este factor de seguridad es, el factor de seguridad del talud analizado, figura 26. Es decir el menor factor de seguridad en los sentidos horizontal y vertical define el factor de seguridad del talud analizado para el tipo de falla considerado.

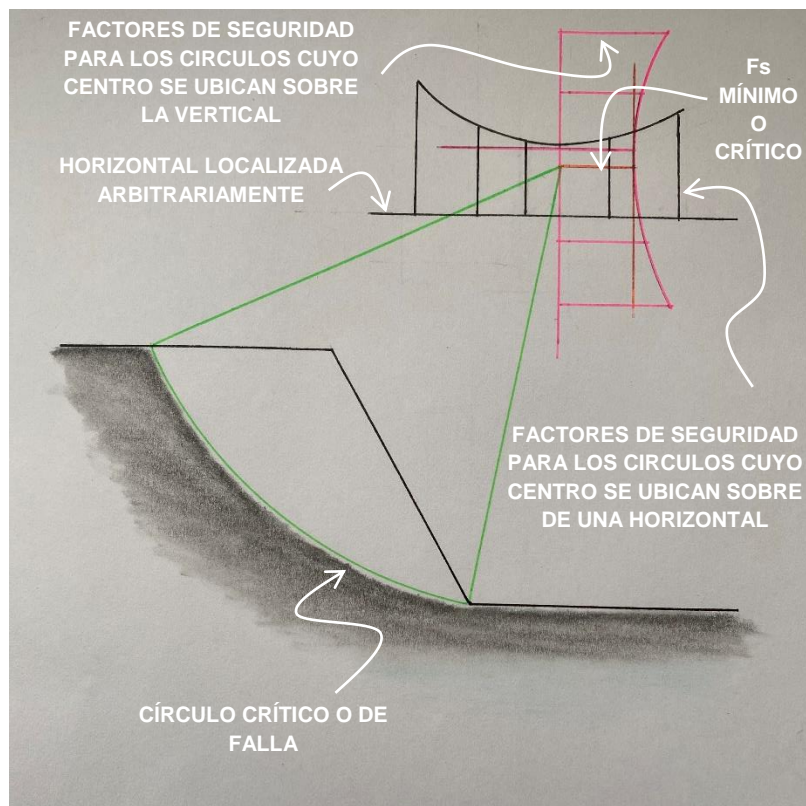


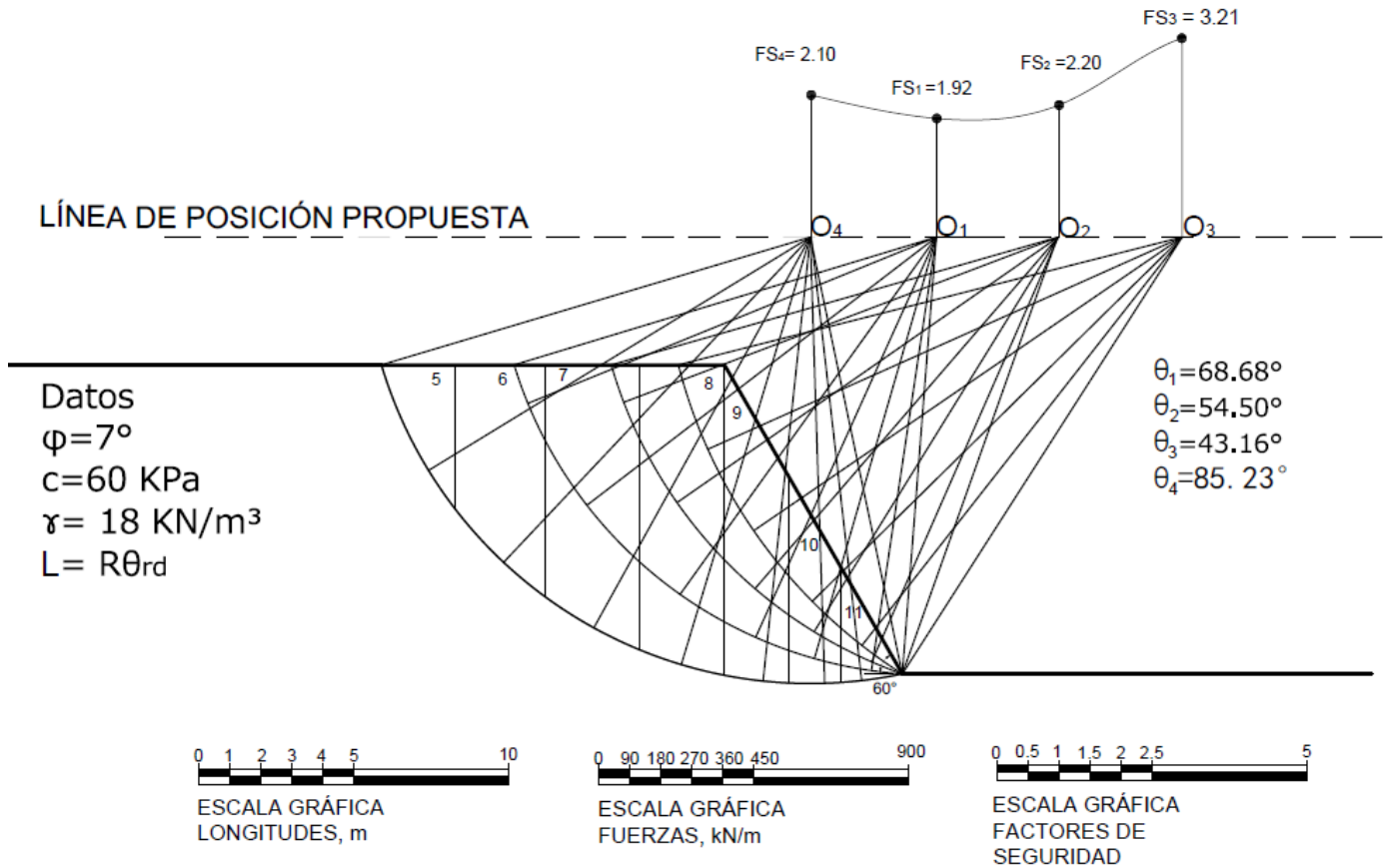
FIGURA 26.- LOCALIZACIÓN DEL CENTRO DEL CÍRCULO CRÍTICO POR MEDIO DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE CÍRCULOS CUYOS CENTRO SE LOCALIZAN SOBRE DE UNA HORIZONTAL Y UNA VERTICAL.

EJEMPLO



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Para el talud del ejemplo anterior, calcular su factor de seguridad calculando aplicando el criterio de los “factores mínimos de seguridad”



CIRCULO 1

DOVELA Número	ÁREA m ²	W kN/m	N kN/m	T kN/m
6	1.33	23.94	9.00	22.50
7	14.13	254.34	155.70	200.70
8	20.37	366.66	297.90	213.30
9	14.42	259.48	236.70	106.20
10	7.57	136.26	130.50	36.90
11	3.15	56.70	56.70	8.10
Suma			886.70	587.70

$R = 14.17 \text{ m}$
 $\theta = 68.68^\circ = 1.199$
 $l = 14.17 (1.199) = 16.99 \text{ m}$



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

$$F_s = [c l + \Sigma N \tan \phi] / \Sigma T = [60 (16.99) + 884.70 \tan 7^\circ] / 587.70$$

$$F_s = \underline{1.92}$$

CIRCULO 2

DOVELA Número	ÁREA m ²	W kN/m	N kN/m	T kN/m
7	1.18	21.24	8.10	19.80
8	12.54	225.72	129.60	185.40
9	11.22	201.96	153.00	131.40
10	6.10	109.80	93.60	57.60
11	2.58	46.62	43.20	18.90
Suma			427.50	413.10

$$R = 15.00 \text{ m}$$

$$l = 14.27 \text{ m}$$

$$F_s = \underline{2.20}$$

CIRCULO 3

DOVELA Número	ÁREA m ²	W kN/m	N kN/m	T kN/m
8	3.18	57.24	23.40	52.20
9	7.47	134.46	75.60	110.70
10	4.51	81.18	56.70	57.60
11	2.01	36.18	27.90	22.50
Suma			183.60	243.00

$$R = 16.77 \text{ m}$$

$$l = 12.63 \text{ m}$$

$$F_s = \underline{3.21}$$

CIRCULO 4

DOVELA Número	ÁREA m ²	W kN/m	N kN/m	T kN/m
5	6.42	115.56	60.30	98.10
6	18.02	324.36	236.70	222.30
7	25.66	461.88	404.10	223.20
8	26.54	477.72	457.20	137.70
9	21.62	389.16	387.00	41.04
10	4.60	82.80	81.90	2.70
11	3.70	66.60	66.20	7.56
Suma			1,693.70	712.44

$$R = 14.44 \text{ m}$$

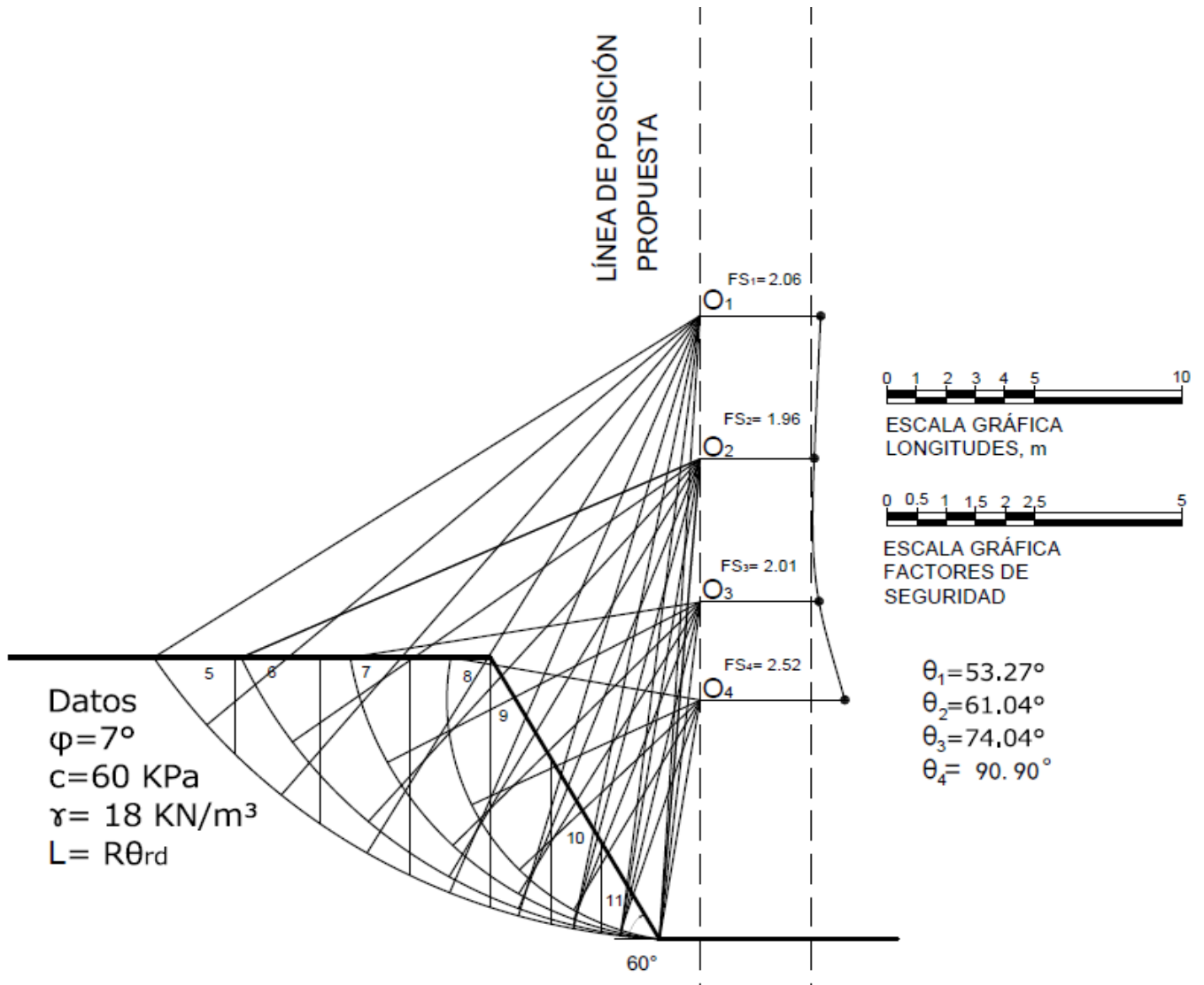
$$l = 21.48 \text{ m}$$

$$F_s = \underline{2.10}$$



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

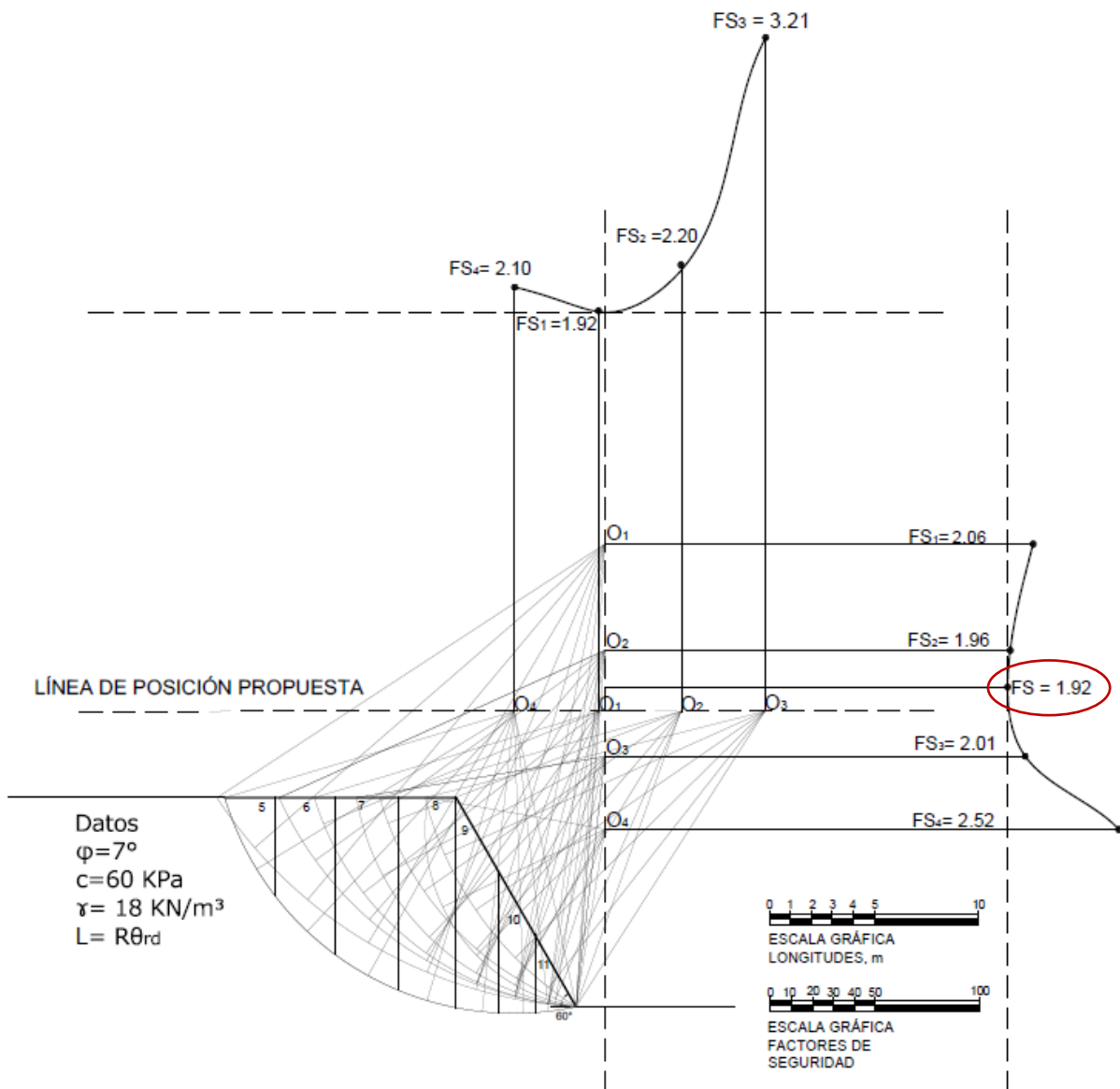
De igual manera se determinan los factores de seguridad de la línea de posición vertical, obteniéndose la siguiente gráfica.



Los factores de seguridad sobre de la vertical se calculan de la misma manera que los anteriormente calculados.

Finalmente, se define el factor de seguridad mínimo del talud. En este caso resulta ser:

$$\underline{Fs = 1.92}$$



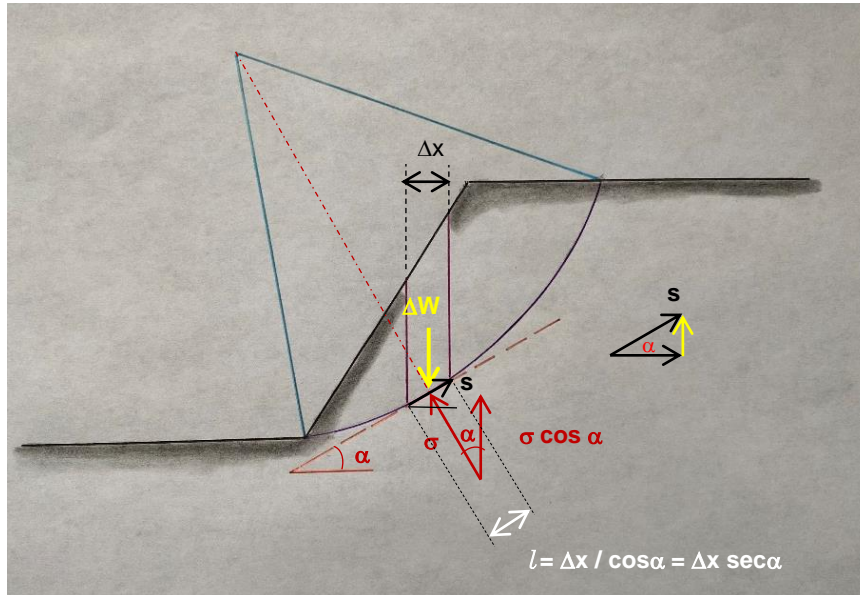
MÉTODO A. W. BISHOP SIMPLIFICADO

El método de Bishop propuesto en 1955, considera al suelo homogéneo, cohesivo friccionante, además de:

1. Las fuerzas tangenciales entre dovelas se desprecian.
2. Las fuerzas horizontales entre dovelas son prácticamente iguales, se anulan.
3. La suma de fuerzas verticales, afectadas de un factor de seguridad, están en equilibrio.



4. La relación entre las fuerzas resistentes por dovela y las fuerzas deslizantes definen el factor de seguridad.
5. El cálculo del factor de seguridad queda expresado por una igualdad que se resuelve por iteraciones.



La fuerza resistente en la base de la dovela enésima es:

$$s \Delta x / \cos \alpha = (c + \sigma \tan \varphi) \Delta x / \cos \alpha$$

La componente vertical de la fuerza resistente es:

$$(c + \sigma \tan \varphi) \Delta x \sin \alpha / \cos \alpha = (c + \sigma \tan \varphi) \Delta x \tan \alpha$$

La componente vertical de la fuerza normal, σ , vale:

$$\sigma \cos \alpha l = \sigma \cos \alpha \Delta x / \cos \alpha = \sigma \Delta x$$

Así la suma de las fuerzas verticales, afectando las fuerzas resistentes por un factor de seguridad F_s , quedan:

$$\Delta W = [(c + \sigma \tan \varphi) \Delta x \tan \alpha] / F_s + \sigma \Delta x$$

$$\Delta W = c \Delta x \tan \alpha / F_s + \sigma \tan \varphi \Delta x \tan \alpha / F_s + \sigma \Delta x$$

$$\Delta W = c \Delta x \tan \alpha / F_s + \sigma \Delta x (1 + \tan \alpha \tan \varphi / F_s)$$

$$\sigma = [\Delta W - c \Delta x \tan \alpha / F_s] / \Delta x (1 + \tan \alpha \tan \varphi / F_s)$$



El factor de seguridad puede ser expresado como la relación de las fuerzas resistentes entre las fuerzas deslizantes, así se obtiene:

$$F_s = \Sigma F_R / \Sigma F_D$$

$$\Sigma F_R = (c + \sigma \tan \varphi) \Delta x \sec \alpha = c \Delta x \sec \alpha + \sigma \tan \varphi \Delta x \sec \alpha$$

Sustituyendo el valor de σ en la ecuación anterior:

$$\Sigma F_R = c \Delta x \sec \alpha + \{ [\Delta W - c \Delta x \tan \alpha / F_s] / \Delta x (1 + \tan \alpha \tan \varphi / F_s) \} \tan \varphi \Delta x \sec \alpha$$

Operando la expresión anterior se reduce a:

$$\Sigma F_R = (c \Delta x + \Delta W \tan \varphi) / (\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi / F_s)$$

Igualando

$$(\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi / F_s) = M\alpha$$

Las fuerzas resistentes quedan expresadas por:

$$\Sigma F_R = (c \Delta x + \Delta W \tan \varphi) / M\alpha = (c \Delta x + \Delta W \tan \varphi) (1 / M\alpha)$$

Siendo las fuerzas deslizantes, $\Sigma F_D = \Sigma \Delta W \sin \alpha$

El factor de seguridad es igual a:

$$F_s = \Sigma [(c \Delta x + \Delta W \tan \varphi) (1 / M\alpha)] / \Sigma \Delta W \sin \alpha$$

Dado a que en ésta ecuación el factor de seguridad está en ambos términos, la igualdad puede resolverse por iteraciones. En la figura 27 se presenta la relación entre $(\tan \varphi / F_s)$, α y $M\alpha$.

EJEMPLO

Calcular el factor de seguridad de un talud de 10.0 m de altura excavado con un ángulo de 60°, en un suelo homogéneo cohesivo friccionante, con peso volumétrico de 18 kN/m³, cohesión de 40.0 kPa y ángulo de fricción interna de 30°. La superficie de falla es de pie y el centro del círculo por analizar se localiza con los ángulos direccionales $\beta_A = 42.74^\circ$ y $\beta_B = 16.45^\circ$.

Aplicando el método de W. Bishop Simplificado, se obtiene:



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

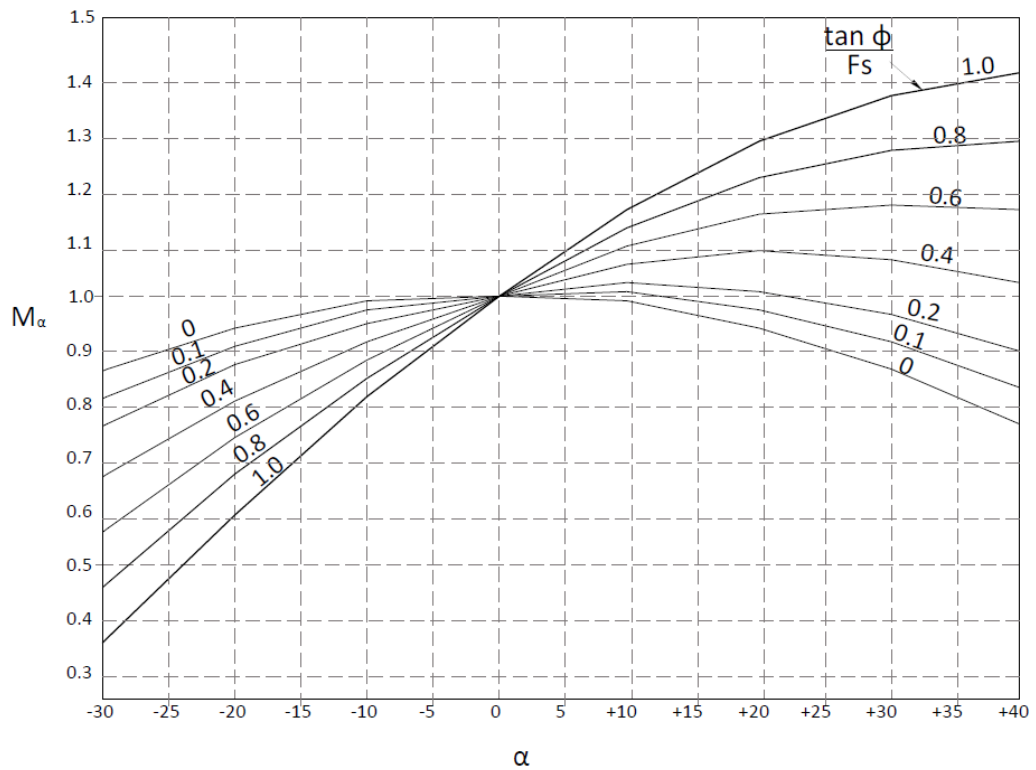
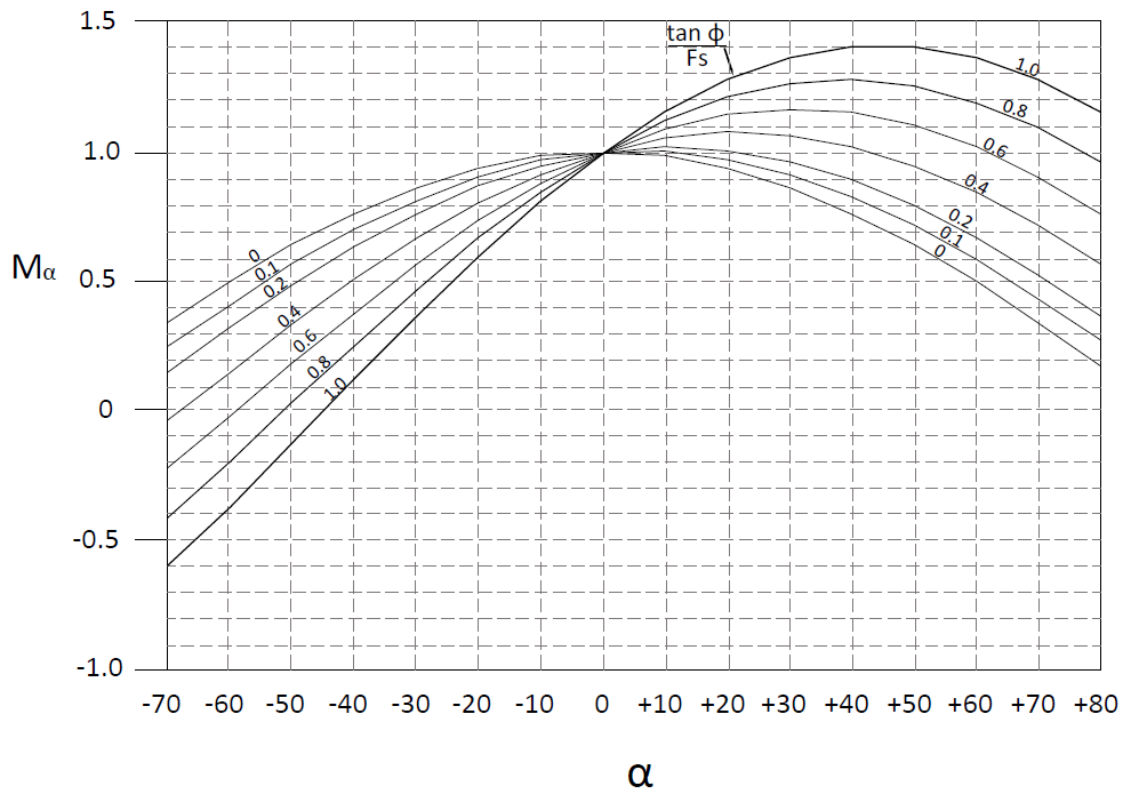
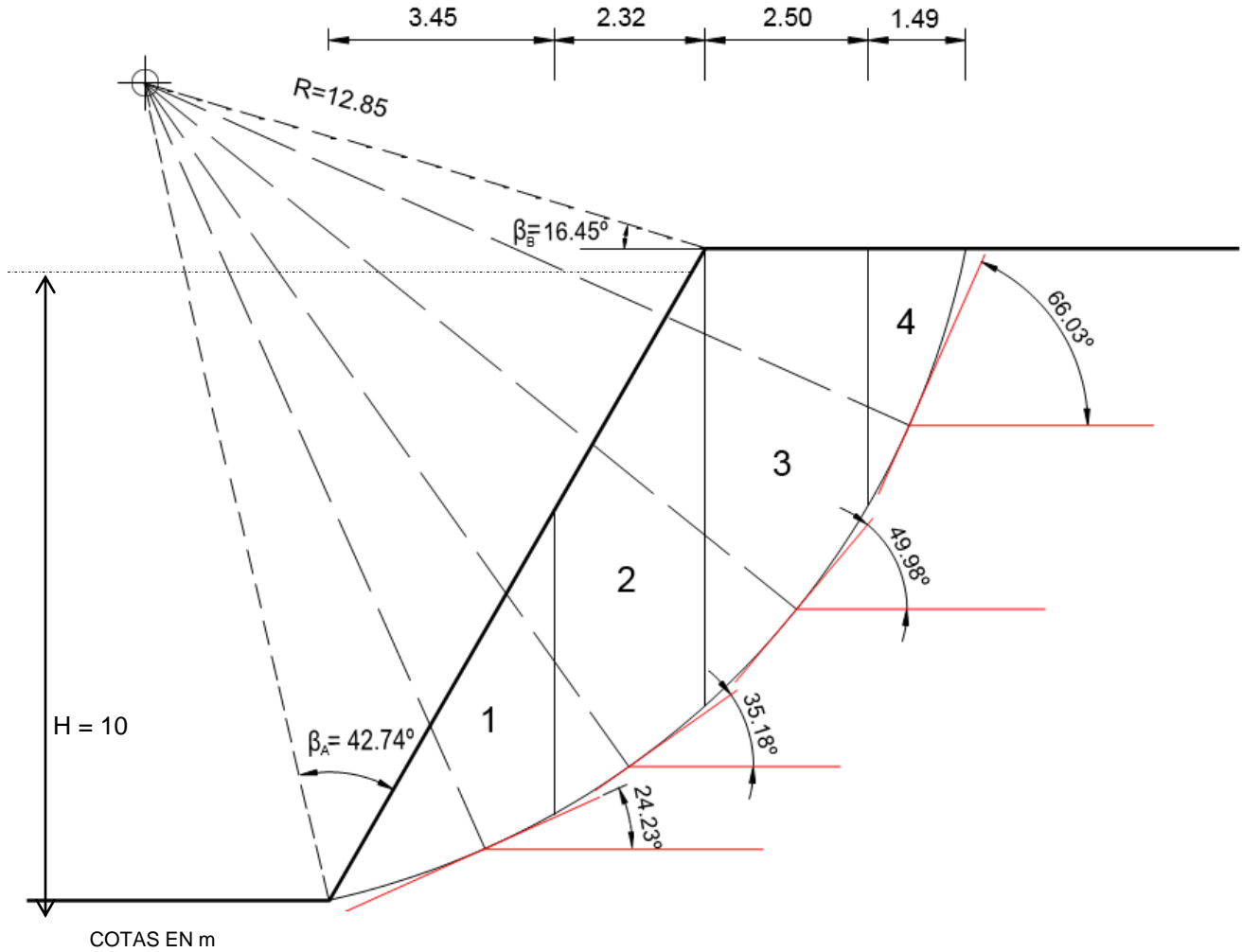


FIGURA 27.- RELACIÓN ENTRE $(\tan \phi / F_s)$, α Y M_α



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

$$F_s = \frac{\sum [(c \Delta x + \Delta W \tan \varphi) (1 / M\alpha)]}{\sum \Delta W \operatorname{sen} \alpha}$$



DOVELA Número	ΔW kN/m	α °	$\Delta W \operatorname{sen} \alpha$ kN/m	$c \Delta x + \Delta W \tan \varphi$ kN/m
1	149.94	24.23	61.54	224.57
2	246.24	35.18	141.87	234.97
3	253.26	49.98	193.95	246.22
4	61.38	66.03	56.09	95.04

$$\sum \Delta W \operatorname{sen} \alpha = 453.45 \text{ kN/m}$$

Para $F_s = 1.8$; $\tan \varphi / F_s = 0.321$



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DOVELA Número	$c \Delta x + \Delta W \tan \varphi$ kN/m	$M\alpha$	$(c \Delta x + \Delta W \tan \varphi) / M\alpha$
1	224.57	1.11	202.32
2	234.97	1.08	217.57
3	246.22	1.00	246.22
4	95.04	0.81	117.33
Suma			783.43

$$F_s = 783.43 / 453.45 = 1.73$$

Para $F_s = 2.0$; $\tan \varphi = 0.289$

DOVELA Número	$c \Delta x + \Delta W \tan \varphi$ kN/m	$M\alpha$	$(c \Delta x + \Delta W \tan \varphi) / M\alpha$
1	224.57	1.02	220.17
2	234.97	0.97	242.24
3	246.22	0.85	289.67
4	95.04	0.68	139.76
Suma			891.84

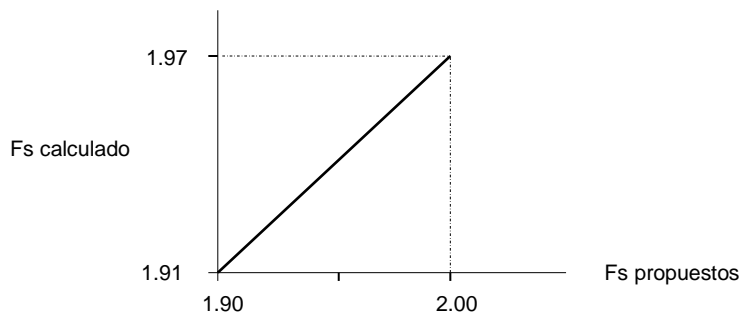
$$F_s = 891.84 / 453.45 = 1.97$$

Para $F_s = 1.9$; $\tan \varphi = 0.304$

DOVELA Número	$c \Delta x + \Delta W \tan \varphi$ kN/m	$M\alpha$	$(c \Delta x + \Delta W \tan \varphi) / M\alpha$
1	224.57	1.04	215.93
2	234.97	0.98	239.77
3	246.22	0.89	276.65
4	95.04	0.71	133.86
Suma			866.31

$$F_s = 866.31 / 453.45 = 1.91$$

Por lo que se concluye que el factor de seguridad del ese círculo y para ese talud es de 1.94; este resultado se deduce por una relación de triángulos semejantes o bien mediante una gráfica entre F_s 's propuestos y calculados.





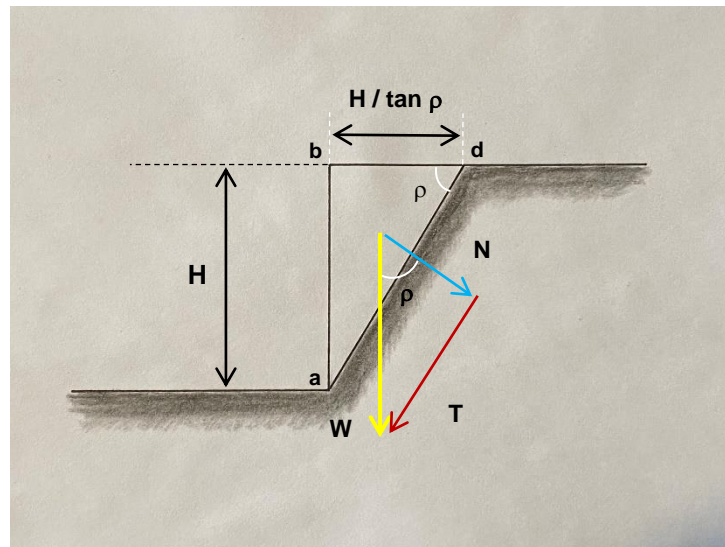
MÉTODOS APROXIMADOS MEDIANTE EL USO DE CARTAS O GRÁFICOS

En estos apuntes únicamente se tratarán los métodos de W. Fellenius, D. Taylor, de N. Janbu y de Hoek y Brown; métodos recomendables para suelos homogéneos, taludes temporales en condiciones estáticas, sin presión de poro.

ANTECEDENTES

Considérese el siguiente talud vertical, de altura H , cortado en un suelo homogéneo, cohesivo friccionante, con superficie de falla es plana. En la cual la resistencia al esfuerzo cortante está definida por la ley de resistencia de Ch. A. Coulomb.

Para un factor de seguridad unitario, las fuerzas resistentes son iguales a las fuerzas deslizantes.



Para $F_s = 1.0$

$$\Sigma F_R = \Sigma F_D$$

$$c H_{cr} / \text{sen } \rho + W \cos \rho \tan \varphi = W \text{sen } \rho$$

$$W = 0.5 H_{cr}^2 \gamma / \tan \rho$$

$$(c H_{cr} / \text{sen } \rho) + (0.5 H_{cr}^2 \gamma / \tan \rho) \cos \rho \tan \varphi = (0.5 H_{cr}^2 \gamma / \tan \rho) \text{sen } \rho$$

$$(c H_{cr} / \text{sen } \rho) = (0.5 H_{cr}^2 \gamma / \tan \rho) \text{sen } \rho - (0.5 H_{cr}^2 \gamma / \tan \rho) \cos \rho \tan \varphi$$

$$(c H_{cr} / \text{sen } \rho) = (0.5 H_{cr}^2 \gamma) [(\cos \rho / \text{sen } \rho) \text{sen } \rho - (\cos \rho / \text{sen } \rho) \cos \rho \tan \varphi]$$



$$c = (0.5 H_{cr} \gamma) [\sin \rho \cos \rho - \cos^2 \rho \tan \varphi]$$

$$H_{cr} = 2 c / \{ \gamma [\sin \rho \cos \rho - \cos^2 \rho \tan \varphi] \}$$

La fuerza resistente al cortante por cohesión es directamente proporcional a la altura del muro.

La altura crítica o máxima es directamente proporcional a la magnitud de la cohesión.

La fuerza deslizante es proporcional al cuadrado de la altura, es decir, al aumentar la altura del corte la fuerza deslizante se incrementa más rápidamente que la fuerza resistente.

De la expresión anterior para $[\sin \rho \cos \rho - \cos^2 \rho \tan \varphi]$ mínimo, H_{cr} será máxima. Derivando con respecto a ρ e igualando a cero, se obtiene:

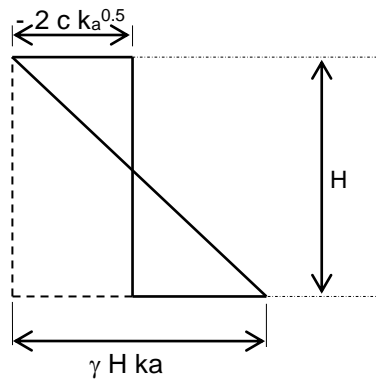
$$\cos 2 \rho_c + \tan \varphi \sin 2 \rho_c = 0$$

$$\cos 2 \rho_c / \sin 2 \rho_c = - \tan \varphi$$

$$\text{ctg } 2 \rho_c = - \tan \varphi = \text{ctg } (90^\circ + \varphi)$$

$$\rho_c = (45^\circ + \varphi/2)$$

Para $\rho_c = (45^\circ + \varphi/2)$, y el talud vertical, de acuerdo con el Dr. Karl von Terzaghi, se puede considerar que el talud está en el estado activo de Rankine. De ésta manera se tiene el siguiente diagrama de esfuerzos:



$$E_a = 0.5 \gamma H^2 k_a - 2 c H k_a^{0.5} = 0$$

Para $\varphi = 0$; $k_a = 1.00$

$$\frac{1}{2} \gamma H_{cr} = 2 c$$

$$H_{cr} = 4 c / \gamma$$



Siendo “factor o número de estabilidad, N_0 ” la relación:

$$\gamma H_{cr} / c = N_0$$

Sin embargo, el valor de $N_0 = 4$ corresponde a una superficie plana, cuando en realidad la superficie de falla o de deslizamiento es curva, para este caso W. Fellenius propone la igualdad:

$$H_{cr} = 3.86 c / \gamma$$

Considerando que las tensiones cercanas a la superficie reducen o bien, anulan la resistencia al cortante del suelo, el Dr. Karl von Terzaghi propone que la profundidad máxima de las grietas por tensión alcance la mitad de la altura del talud.

Al reducir e inclusive eliminar la resistencia al esfuerzo cortante en la zona de las grietas de tensión, se incrementan los esfuerzos cortantes en la parte inferior, por lo que la altura máxima o crítica debe reducirse:

$$H_{cr}' = H_{cr} - 0.5 H_{cr}' = (2/3) H_{cr}$$

Así, la altura crítica corregida, H_{cr}' , queda expresada por la igualdad:

$$H_{cr}' = 2.67 c / \gamma$$

MÉTODO DE W. FELLENIUS

Considérese un talud homogéneo y puramente cohesivo, como el mostrado en la figura 20, W. Fellenius graficó la relación entre el ángulo del talud, β , y el factor de estabilidad N_0 , para el factor de seguridad mínimo considerando varios círculos de falla con diferentes centro y radios. Sus resultados se muestran en la figura 28.

Para ángulos del talud mayor a 60° , la superficie de falla pasa por el pie del talud.

Si el talud es homogéneo con el suelo de base y el ángulo del talud es menor de 53° , el factor N_0 es independiente del ángulo del talud y adquiere el valor de 5.5 que permanece constante.

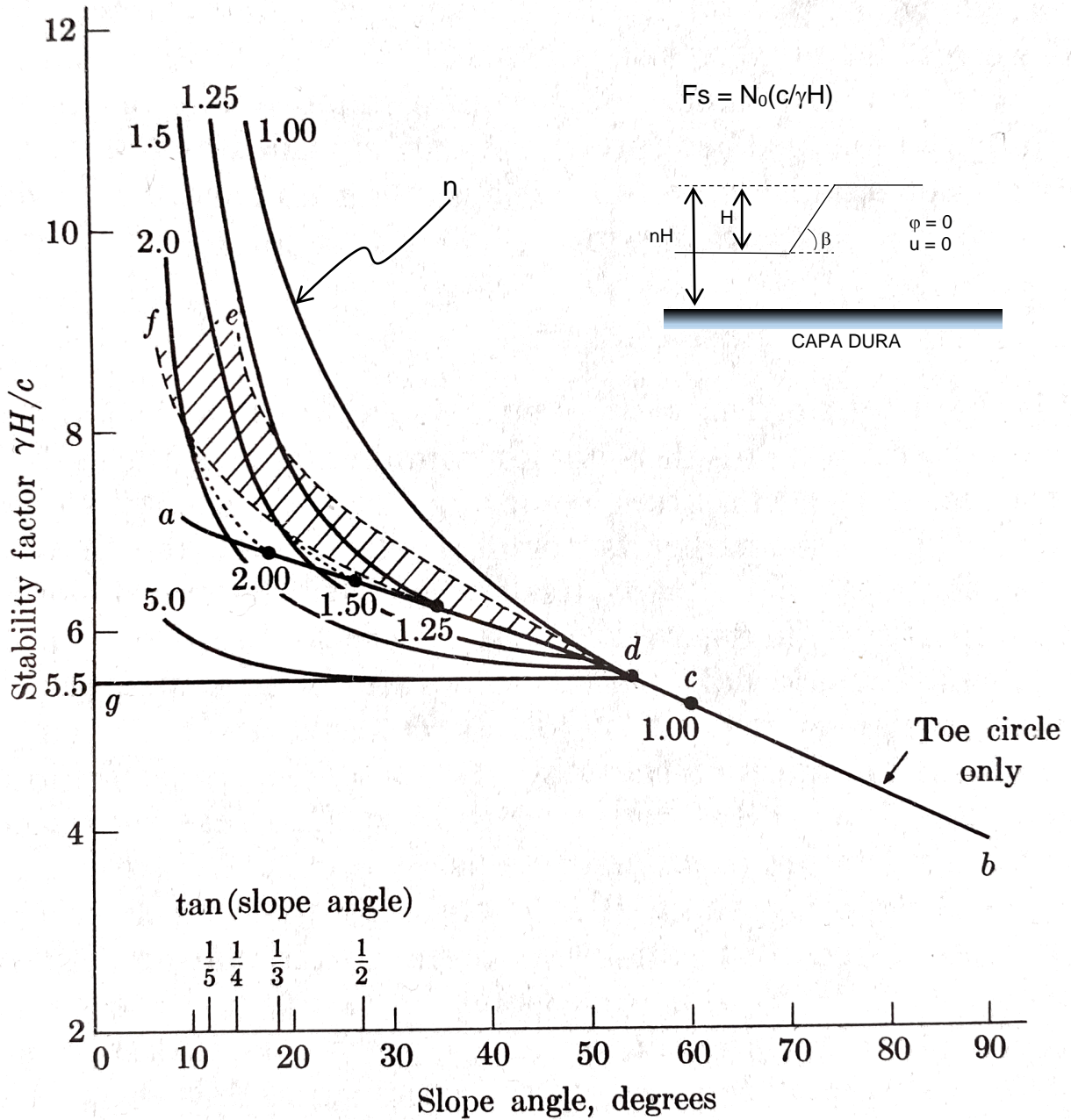


FIGURA 28.- FACTOR DE ESTABILIDAD PARA TALUDES HOMOGÉNEOS, PURAMENTE COHESIVOS, SIN SOBRECARGA, NI PRESIÓN DE PORO, EN CONDICIONES ESTÁTICAS. FUENTE: PRINCIPLES OF SOIL MECHANICS, RONALD F. SCOTT

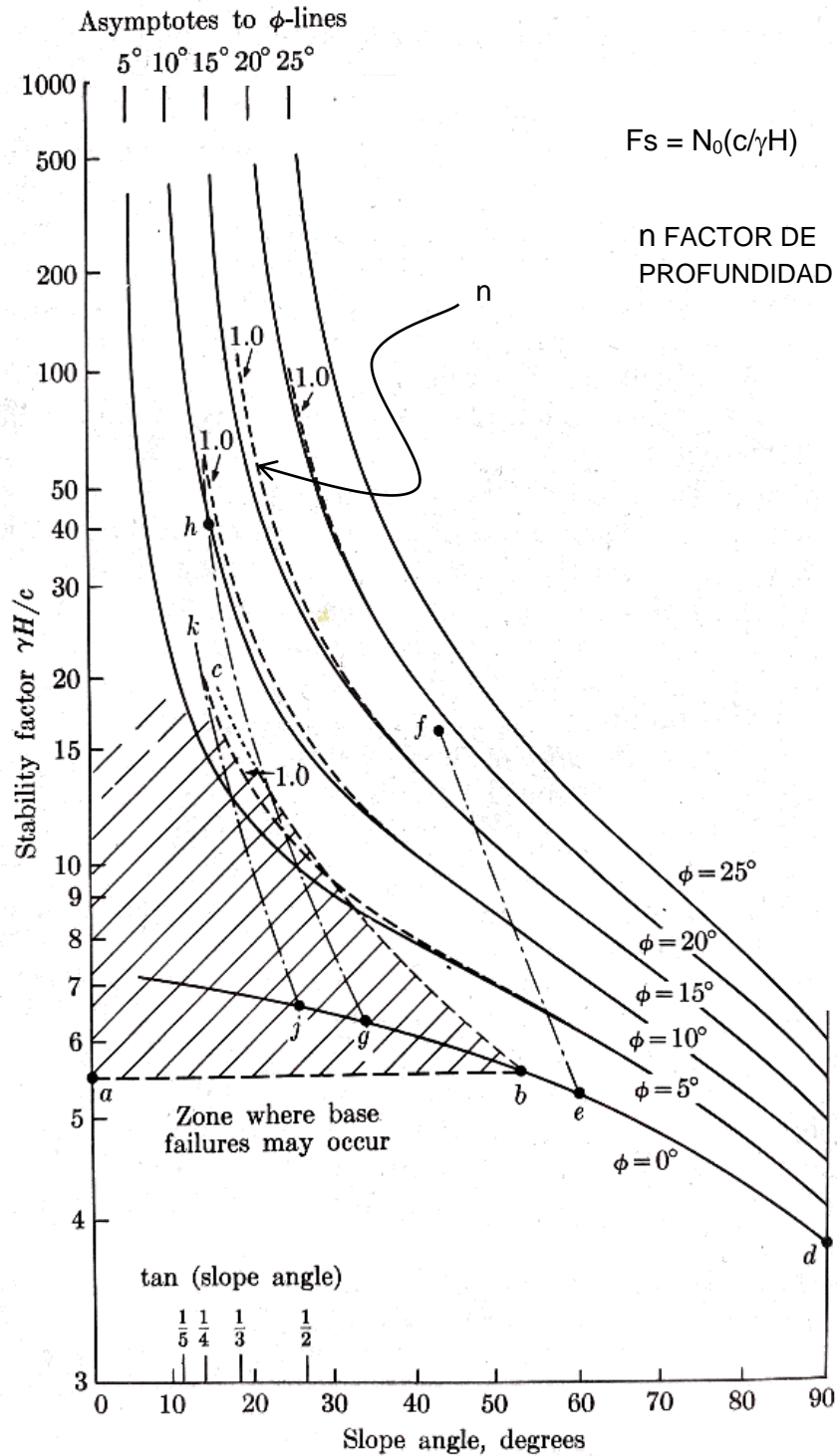
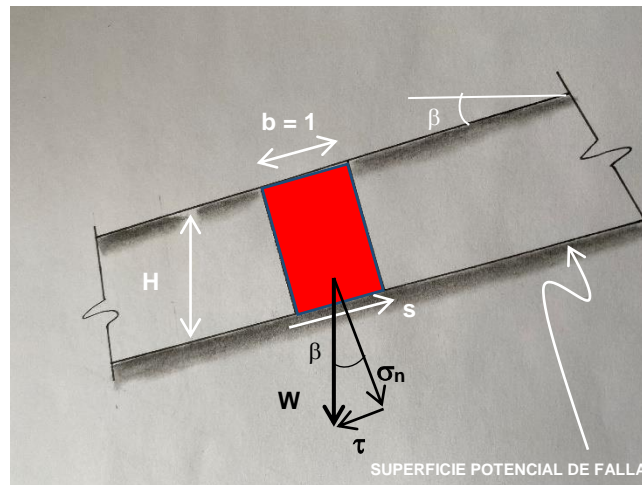


FIGURA 29.- FACTOR DE ESTABILIDAD PARA SUELOS HOMOGÉNEOS, COHESIVO - FRICCIÓNANTES
FUENTE: PRINCIPLES OF SOIL MECHANICS, RONALD F. SCOTT



MÉTODO DE D. W. TAYLOR

Considérese un estrato de longitud infinita, suprayacente a otro tal que la frontera entre ellos sea la superficie potencial de falla en la cual la resistencia al esfuerzo cortante está dada por la ley de resistencia de Ch. A. Coulomb.



SUPERFICIE DE DESLIZAMIENTO DE LONGITUD INFINITA

$$W = \gamma H \cos \beta$$

$$\sigma_n = W \cos \beta = \gamma H \cos^2 \beta$$

$$\tau = W \sin \beta = \gamma H \cos \beta \sin \beta$$

Para $F_s = 1.0$, $s = \tau$

$$c + \gamma H_{cr} \cos^2 \beta \tan \varphi = \gamma H_{cr} \cos \beta \sin \beta$$

$$c = \gamma H_{cr} \cos \beta \sin \beta - \gamma H_{cr} \cos^2 \beta \tan \varphi$$

$$c / \cos^2 \beta = (\gamma H_{cr} \cos \beta \sin \beta - \gamma H_{cr} \cos^2 \beta \tan \varphi) / \cos^2 \beta$$

$$c / \cos^2 \beta = \gamma H_{cr} \tan \beta - \gamma H_{cr} \tan \varphi = \gamma H_{cr} (\tan \beta - \tan \varphi)$$

$$c = \gamma H_{cr} (\tan \beta - \tan \varphi) \cos^2 \beta$$

$$c / \gamma H_{cr} = (\tan \beta - \tan \varphi) \cos^2 \beta$$

Siendo:

$$N = c / \gamma H_{cr}$$



Para suelos puramente cohesivos, $\phi = 0$, en la figura 20 se obtuvo que el factor de seguridad queda definido por la igualdad:

$$F_s = c \int R / W d$$

En 1937 Donald W. Taylor resolvió la ecuación anterior en función del ángulo del talud y de la relación $c / (\gamma H)$, para un factor de seguridad unitario.

$$N = c / \gamma H$$

Siendo N “número de estabilidad” el cual se puede determinarse por medio de la figura 30.

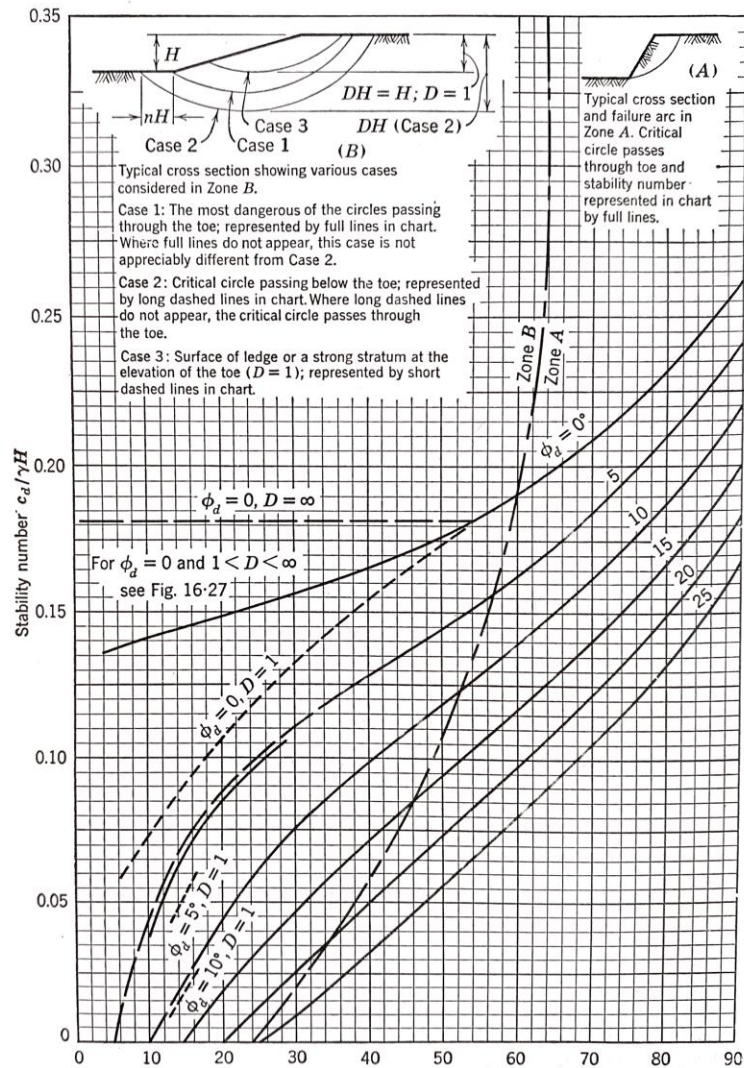


FIGURA 30.- RELACIÓN ENTRE EL ÁNGULO DEL TALUD, β , Y EL FACTOR DE ESTABILIDAD, N_s , PARA DIFERENTES FACTORES DE PROFUNDIDAD η_D
 FUENTE: FUNDAMENTALS OF SOIL MECHANICS, DONALD W. TAYLOR



Así:

$$F_s = c / N \gamma H$$

En el libro Theoretical Soil Mechanics del Dr. Karl von Terzaghi utiliza "factor de estabilidad" N_s , que es el inverso de N . Así, el factor de seguridad se expresa por la igualdad siguiente y N_s de la gráfica de la figura 31.

$$F_s = N_s c / \gamma H$$

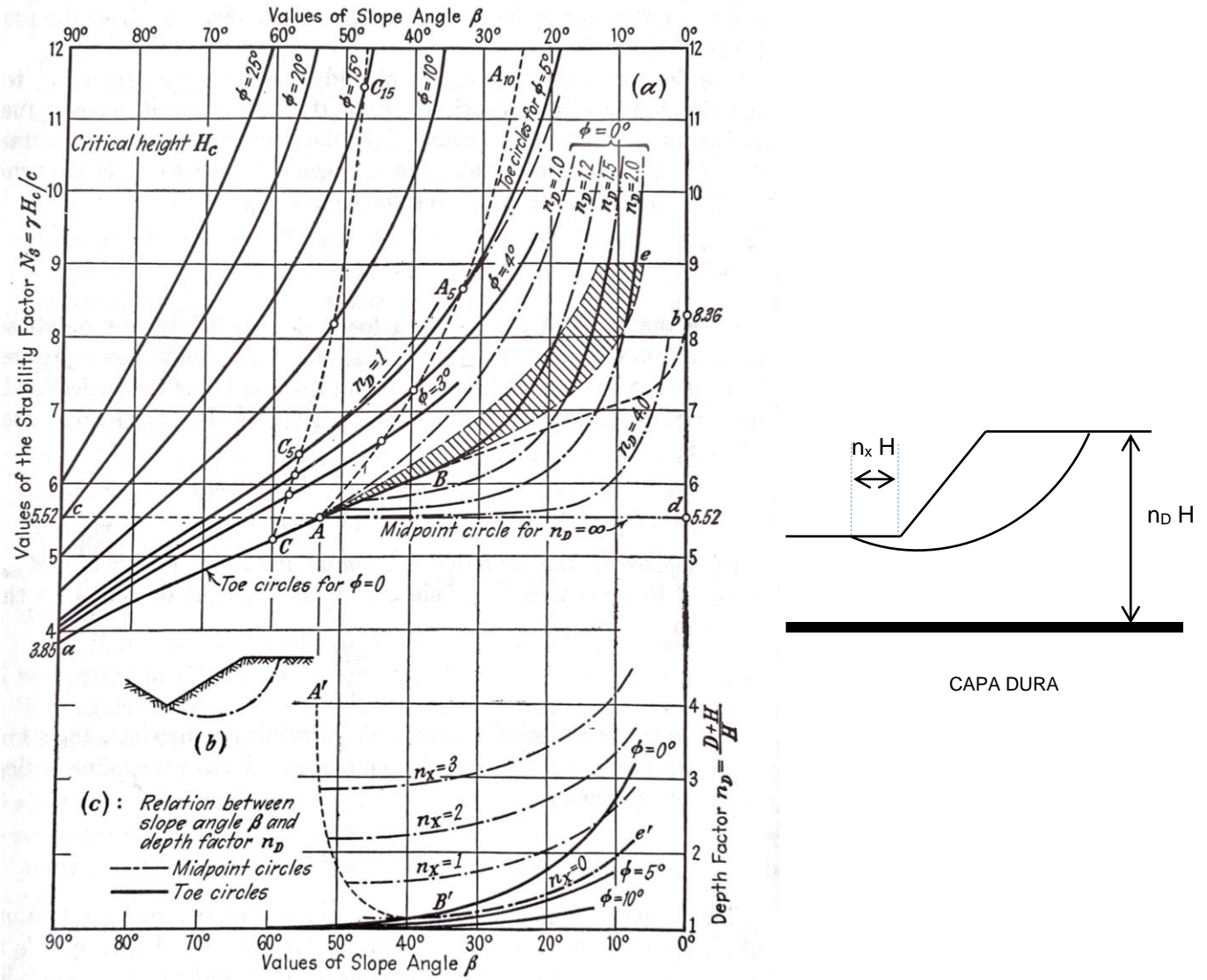


FIGURA 31.- RELACIÓN ENTRE EL ÁNGULO DEL TALUD, β , Y EL FACTOR DE ESTABILIDAD, N_s , PARA DIFERENTES FACTORES DE PROFUNDIDAD n_D
 FUENTE: THEORETICAL SOIL MECHANICS, KARL VON TERZAGHI



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES CON PARÁMETROS ADIMENSIONALES PROPUESTOS POR NILMAR JANBU

A) SUELOS PURAMENTE COHESIVOS, $\phi = 0$

En la solución se considera lo siguiente:

- a) La superficie potencial de falla es cilíndrica.
- b) No se consideran las condiciones de frontera, el análisis es bidimensional.
- c) La resistencia al cortante es constante a lo largo de la superficie de falla.
- d) En el momento de la falla es movilizadada toda la resistencia al esfuerzo cortante. En zonas de grietas la resistencia al cortante es nula.
- e) El factor de seguridad está definido por la relación entre las resistencias al esfuerzo cortante disponible y la necesaria para alcanzar el equilibrio a lo largo de la superficie de falla.
- f) El suelo es homogéneo y puramente cohesivo.

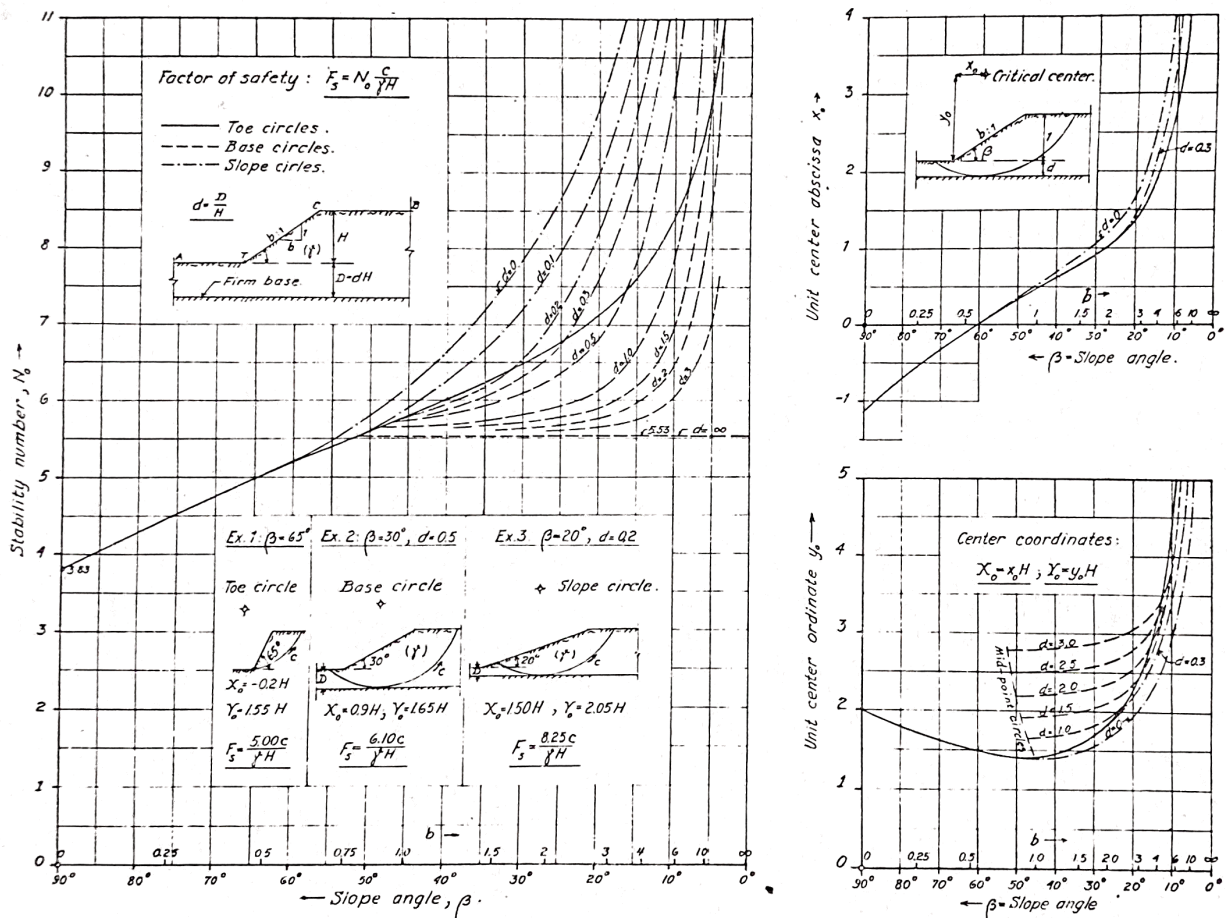


FIGURA 32.- NÚMERO DE ESTABILIDAD Y COORDENADAS DEL CENTRO DEL CÍRCULO CRÍTICO PARA TALUDES HOMOGÉNEOS, PURAMENTE COHESIVOS

FUENTE: THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF SCIENCE STABILITY ANALYSIS OF SLOPES WITH DIMENSIONLESS PARAMETERS, N. JANBU



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Como se citó arriba, el factor de seguridad para taludes simples, sin sobrecargas, grietas de tensión, ni presencia de agua, está expresado por la siguiente expresión, en la cual N_0 es el número de estabilidad para suelos puramente cohesivos, $\phi = 0$, figura 32.

$$F_s = N_0 c / \gamma H$$

Janbu considera los efectos de sobrecarga, grietas y presencia de agua, figuras 33 y 34, mediante factores de reducción μ_q , μ_w , μ_t , de esta manera:

$$\mu_q \mu_w \mu_t N_0 = \mu_d N_0$$

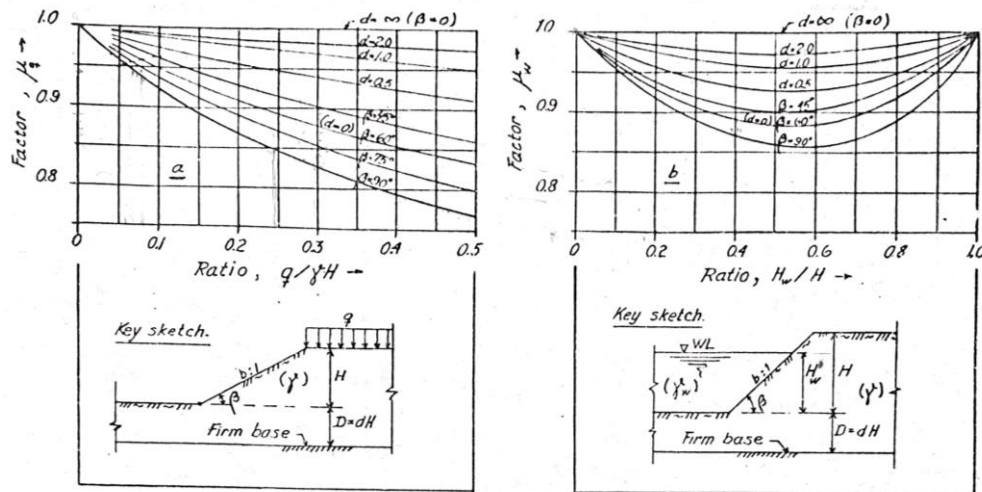
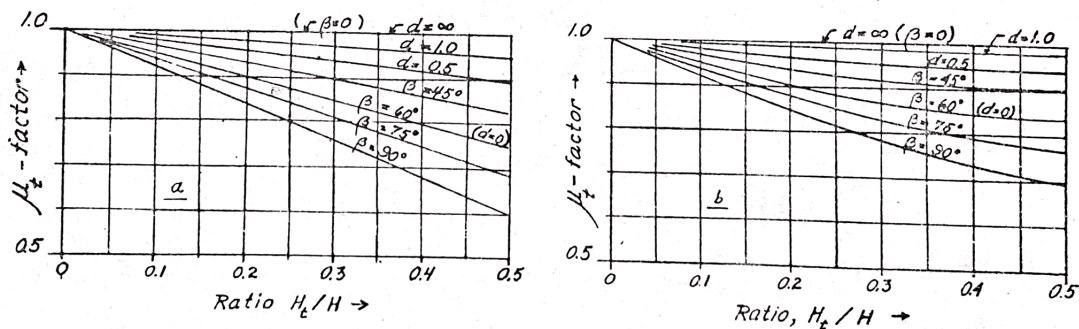


FIGURA 33.- FACTORES DE REDUCCIÓN POR SOBRECARGA Y PRESENCIA DE AGUA
 FUENTE: THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF SCIENCE STABILITY ANALYSIS OF SLOPES WITH DIMENSIONLESS PARAMETERS, N. JANBU



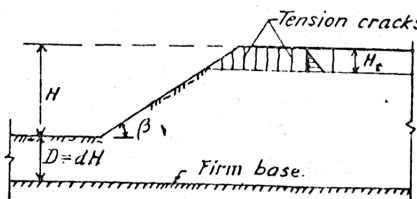
Key sketch.  Tension cracks. *Graph a: Full hydrostatic pressure is acting in the tension cracks.*
Graph b: The hydrostatic pressure is equal to zero.

FIGURA 33.- FACTORES DE REDUCCIÓN POR GRIETAS DE TENSIÓN CON O SIN PRESIÓN DE AGUA
 FUENTE: THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF SCIENCE STABILITY ANALYSIS OF SLOPES WITH DIMENSIONLESS PARAMETERS, N. JANBU

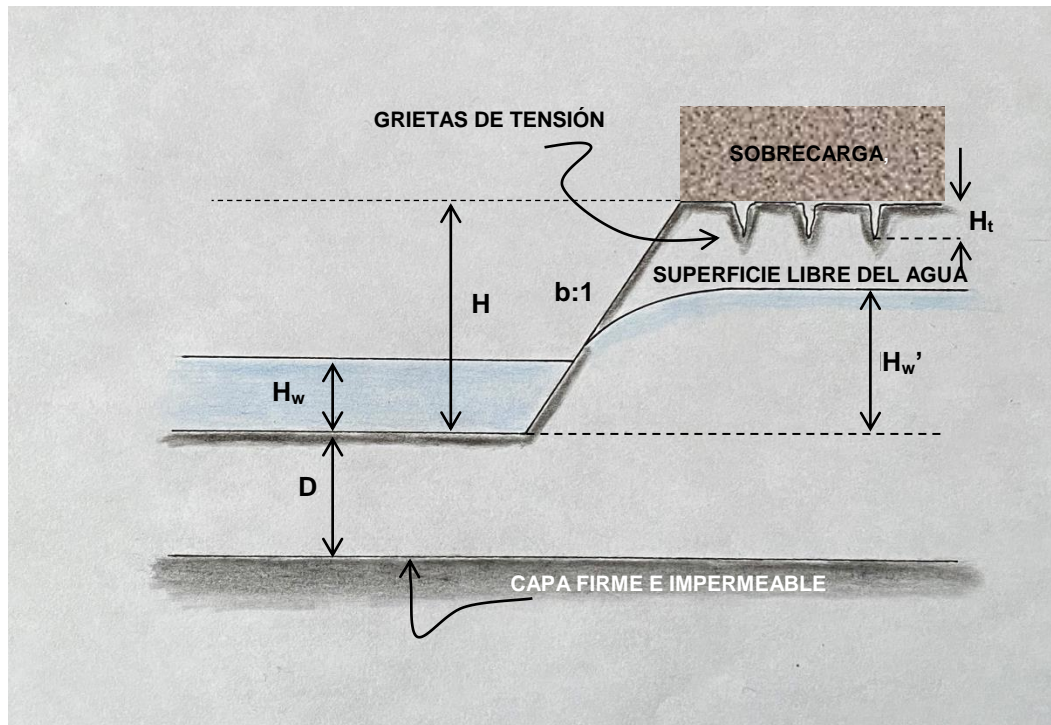


FIGURA 34.- CROQUIS DEFINIENDO LAS DISTINTAS LITERALES DE LAS ECUACIONES PROPUESTAS POR JANBU
FUENTE: THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF SCIENCE STABILITY ANALYSIS OF SLOPES WITH DIMENSIONLESS PARAMETERS, N. JANBU

B) SUELOS HOMOGÉNEOS COHESIVOS FRICCIONANTES, $c > 0$, $\varphi > 0$

En la solución se consideran básicamente las mismas consideraciones propuestas para suelos puramente cohesivos. El factor de seguridad queda definido por la igualdad siguiente:

$$F_s = N_{cf} c / p_d$$

Siendo:

- N_{cf} número de estabilidad para suelos cohesivos fricciones, función del ángulo del talud y del parámetro $\lambda_{c\varphi}$
- c cohesión
- p_d presión

$$p_d = (\gamma_{sat} H + q - \gamma_w H_w) / \mu_d$$

$$\mu_d = \mu_w \mu_q \mu_t$$

$$\lambda_{c\varphi} = p_e \tan \varphi / c$$

$$p_e = (\gamma_{sat} H + q - \gamma_w H_w') / \mu_e$$



$$\mu_e = \mu_q \mu_w'$$

El número de estabilidad N_{cf} y el centro del círculo crítico se pueden determinar en las figuras 35 y 36.

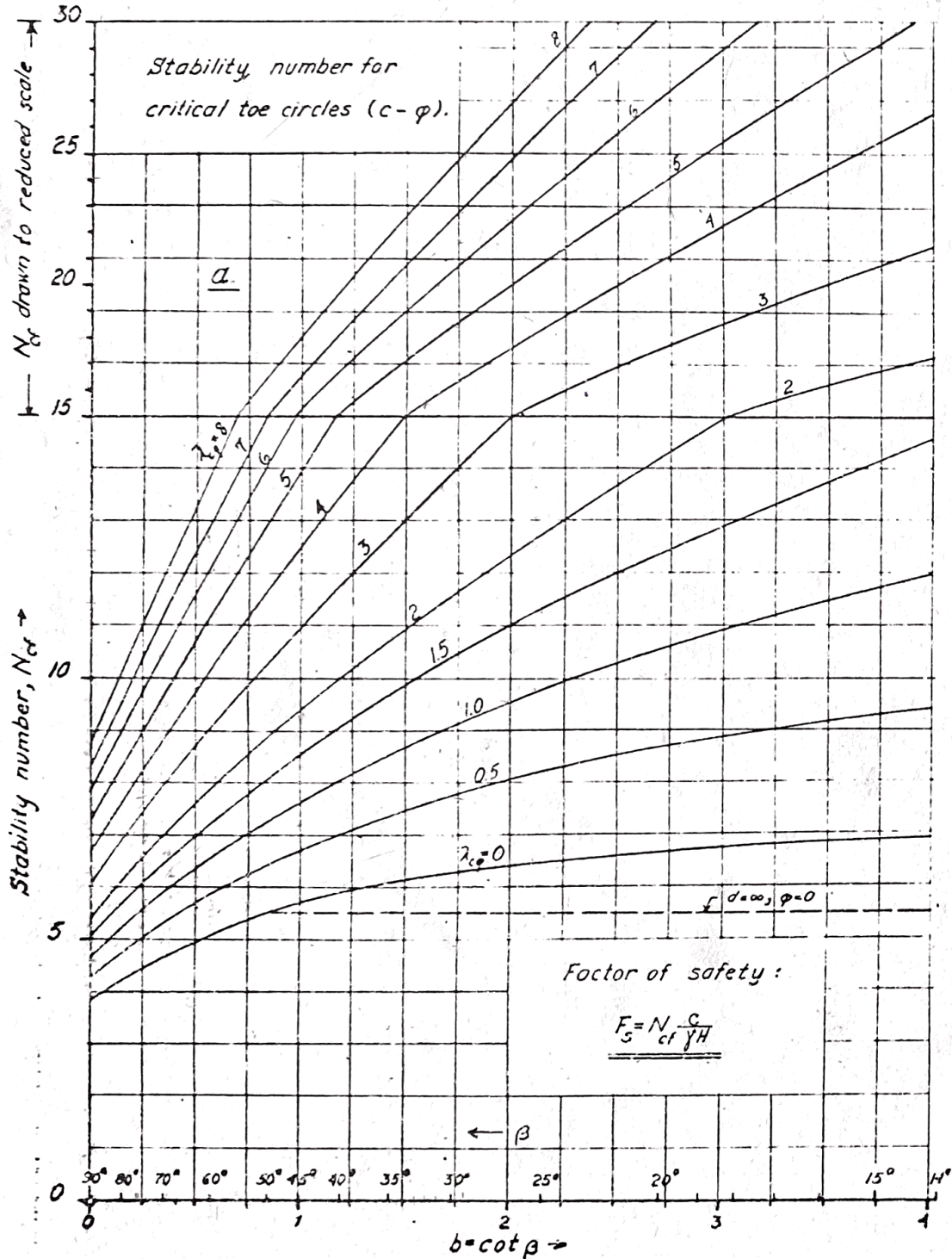


FIGURA 35.- NÚMERO DE ESTABILIDAD PARA TALUDES HOMOGÉNEOS, COHESIVOS FRICCIONANTES
FUENTE: THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF SCIENCE STABILITY ANALYSIS OF SLOPES WITH DEMENSIONLESS PARAMETERS, N. JANBU



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS
 ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

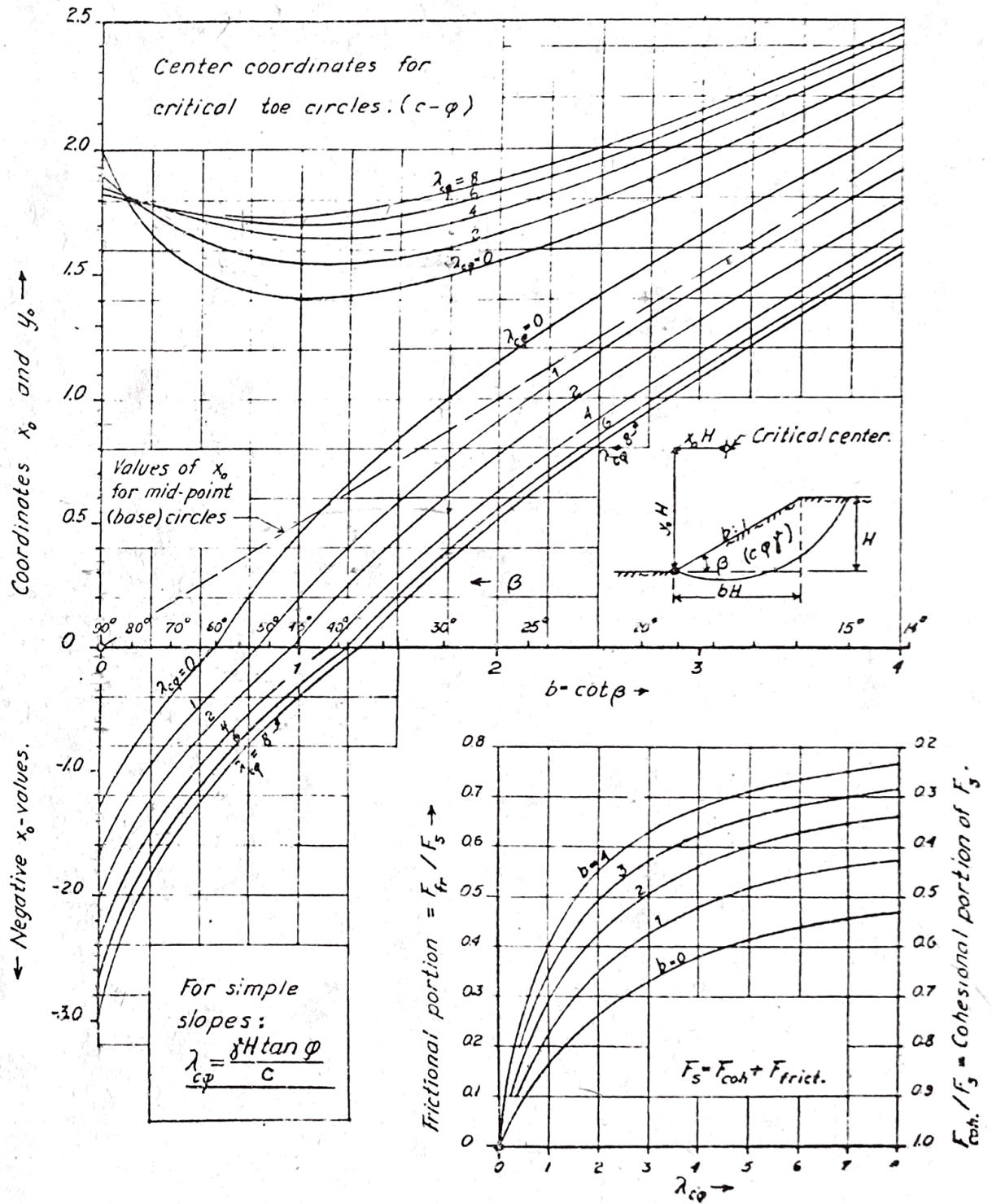


FIGURA 36.- COORDENADAS DEL CENTRO DEL CÍRCULO CRÍTICO PARA TALUDES HOMOGÉNEOS, COHESIVOS FRICCIONANTES CON FALLA DE PIE
 FUENTE: THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF SCIENCE STABILITY ANALYSIS OF SLOPES WITH DEMENSIONLESS PARAMETERS, N. JANBU



EJEMPLO

Aplicando el criterio de N. Janbu, determinar el centro del círculo crítico y calcular el factor de seguridad de un talud de 12 m de altura, que presenta grietas de tensión de 1.5 m de profundidad y no están llenas de agua. En su corona se aplica una sobrecarga de 15 kPa. El ángulo del talud es de 60° respecto a la horizontal; el suelo es homogéneo con las siguientes propiedades:

Peso volumétrico	20 kN/m ³
Cohesión	60 kPa
Ángulo de fricción interna	32°

De acuerdo a Janbu:

$$F_s = N_{cf} c / p_d$$

$$p_d = (\gamma_{sat} H + q - \gamma_w H_w) / \mu_d$$

$$\mu_d = \mu_w \mu_q \mu_t$$

$$\lambda_{c\phi} = p_e \tan \phi / c$$

$$p_e = (\gamma_{sat} H + q - \gamma_w H_w') / \mu_e$$

En este caso:

$$p_d = p_e = (\gamma H + q) \mu_d$$

$$\mu_d = \mu_q \mu_t = 0.902$$

$$q / \gamma H = 15 / [(20) 12] = 0.063$$

$$\mu_q = 0.96$$

$$H_t / H = 1.5 / 12 = 0.125$$

$$\mu_t = 0.94$$

$$p_e = [20 (12) + 15] / 0.902 = 282.71$$

$$\lambda_{c\phi} = 282.71 \tan 32^\circ / 60 = 2.94$$

$$N_{cf} = 9.9$$

$$\underline{F_s = 2.10}$$

$$y_0 = 1.67; \underline{y_0 H = 20.40 \text{ m}}$$

$$x_0 = -0.88; \underline{x_0 H = -10.56 \text{ m}}$$



MÉTODO DE HOEK Y BROWN

La propuesta de Hoek y Brown está basada en el método del “Círculo de Fricción”. Proponen cinco ábacos para diferentes condiciones de tirantes de agua desde seco hasta totalmente saturado, figura 37.a. La aplicación de los ábacos consiste en, elegir una de las cinco posibilidades expuestas en las figuras 37.b a 37.f, seleccionando siempre la más desfavorable en caso de estar entre dos posibilidades. Posteriormente, calcular el cociente:

$$c / \gamma H \tan \varphi$$

Ubicar dicho cociente en la parte exterior del cuarto de circunferencia, del ábaco seleccionado, figuras 37.b a 37.f, trazar un radio hacia el origen del ábaco, iniciando en el cociente ($c / \gamma H \tan \varphi$) hasta su intersección con la curva correspondiente al ángulo del talud para determinar los valores:

$$\tan \varphi / F_s$$

$$c / \gamma H F_s$$

De ellos despejar el F_s para considerar el menor, el cual definirá el factor de seguridad del talud en cuestión.

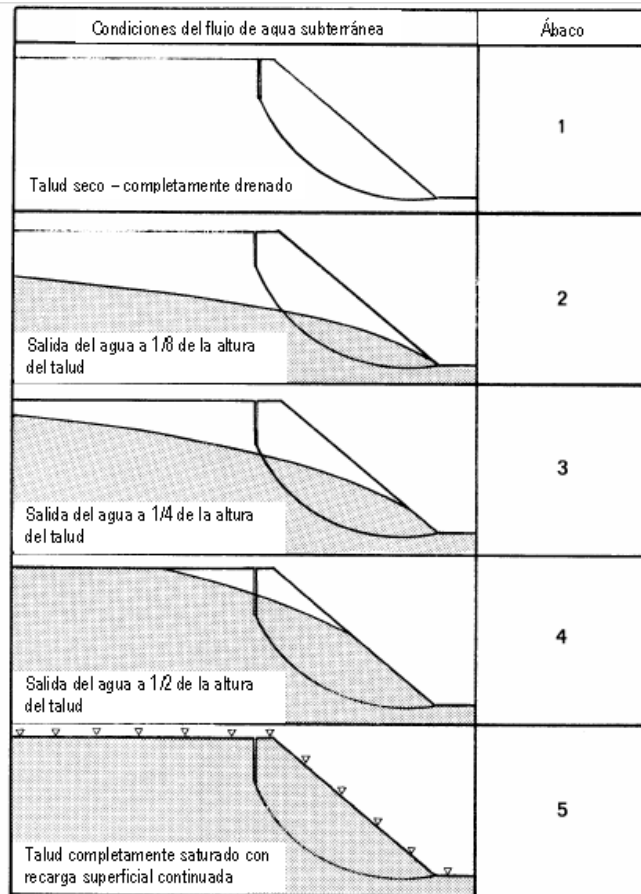


FIGURA 37.a.- DIFERENTES DE LA SUPERFICIE DEL AGUA
FUENTE: ESTABILIDAD DE TALUDES, E. A. PÉREZ DE ÁGREDA

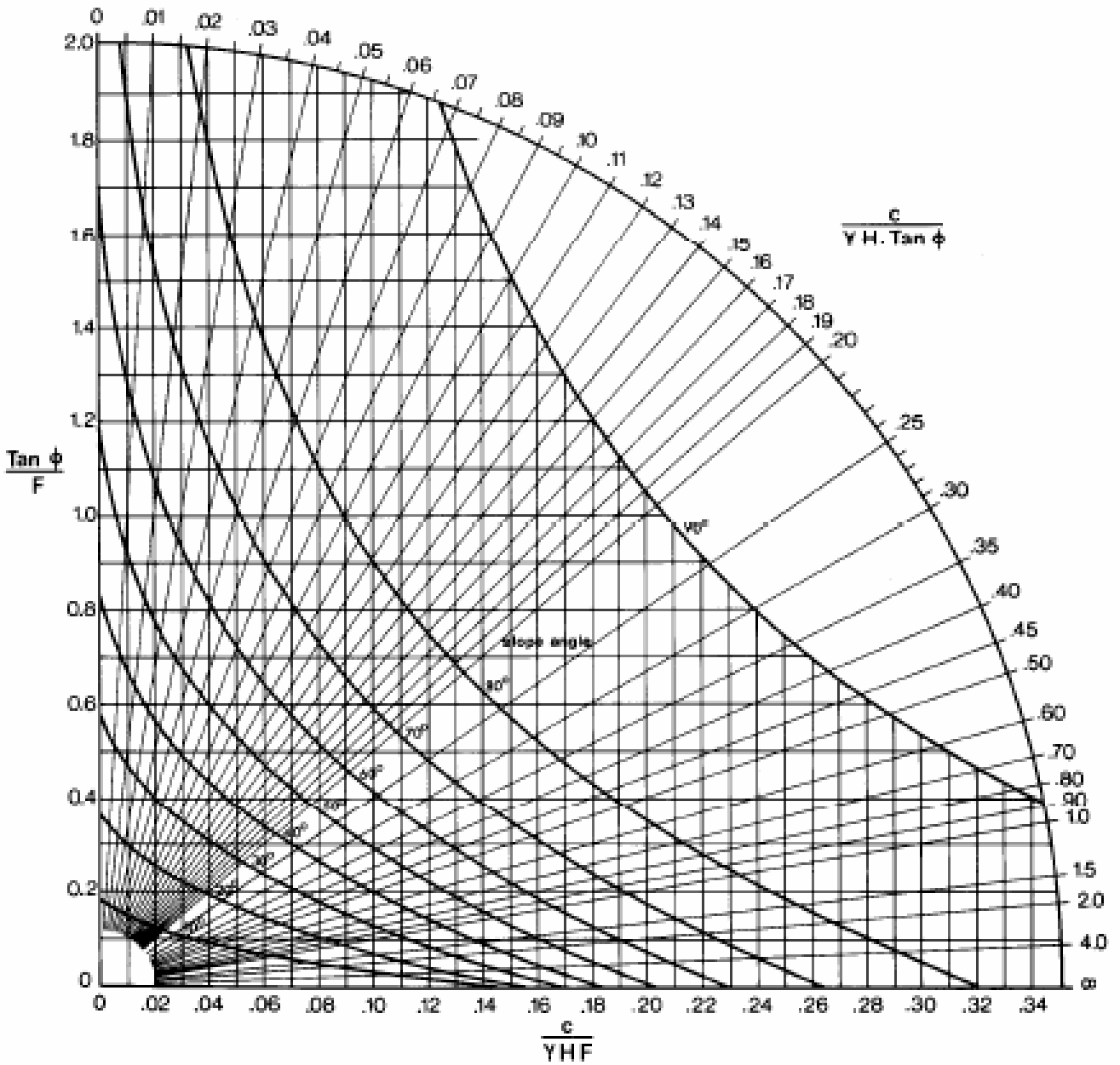


FIGURA 37.b.- CONDICIÓN 1

FUENTE: ESTABILIDAD DE TALUDES, E. A. PÉREZ DE ÁGREGA

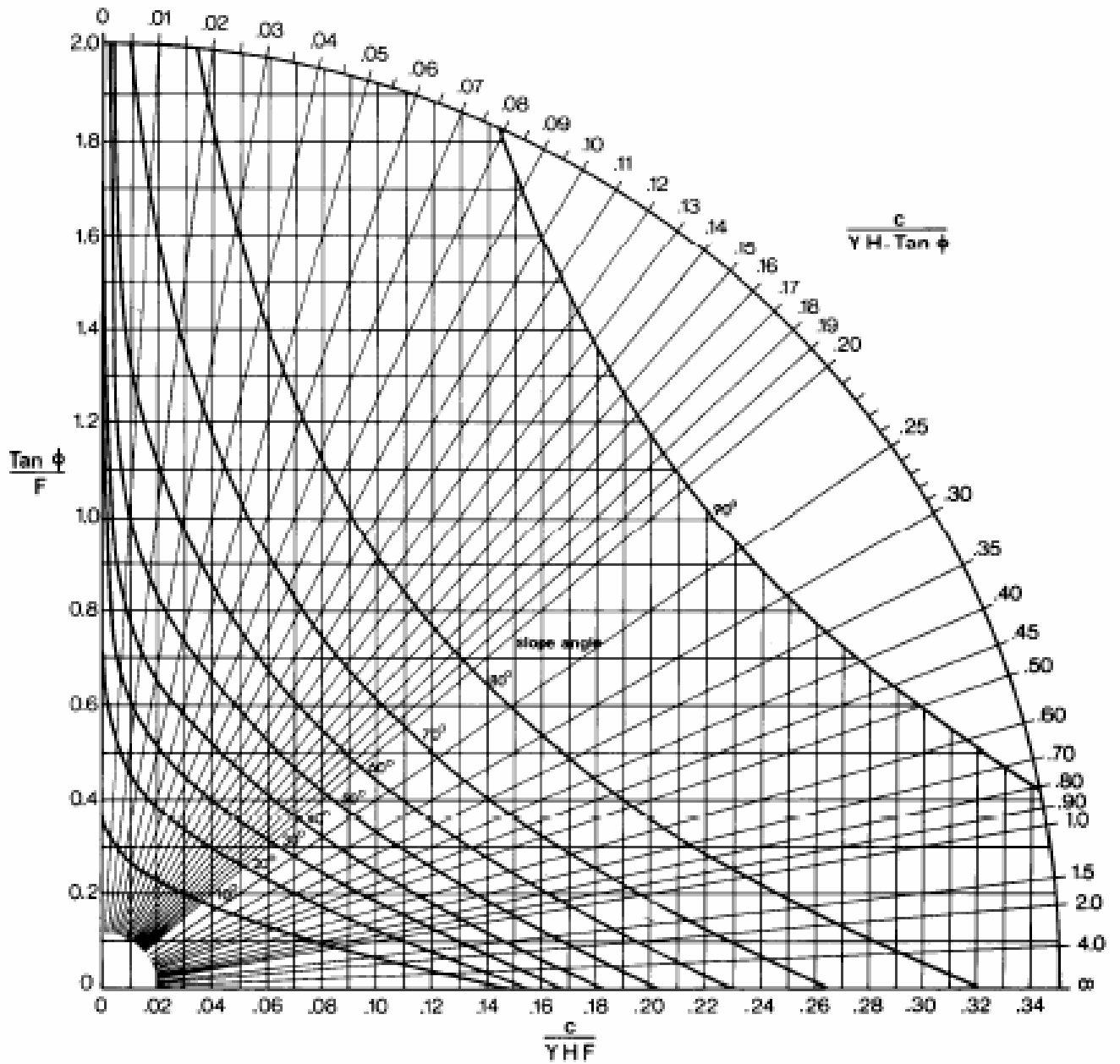


FIGURA 37.c.- CONDICIÓN 2
FUENTE: ESTABILIDAD DE TALUDES, E. A. PÉREZ DE ÁGREGA

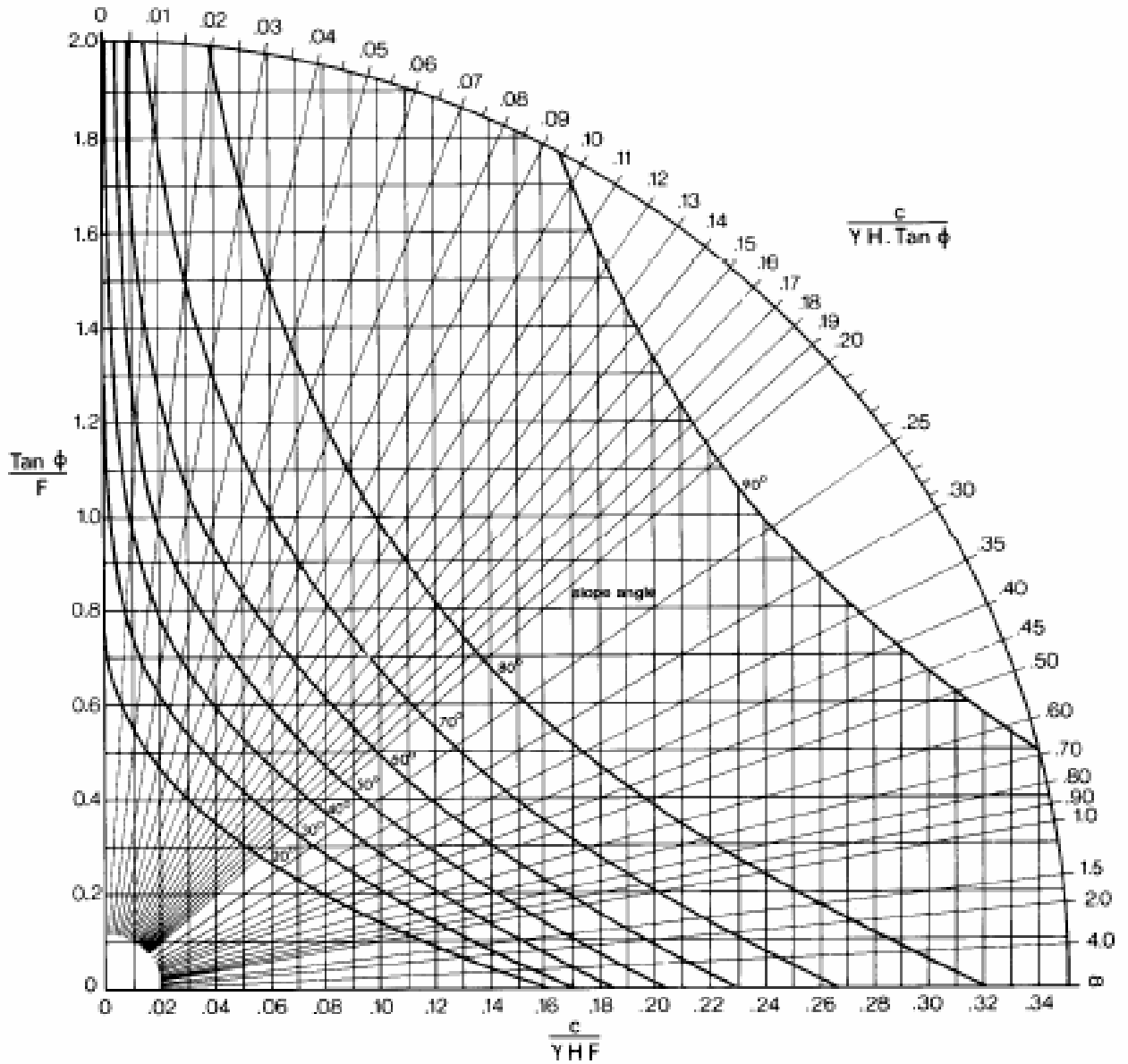


FIGURA 37.d.- CONDICIÓN 3
FUENTE: ESTABILIDAD DE TALUDES, E. A. PÉREZ DE ÁGREGA

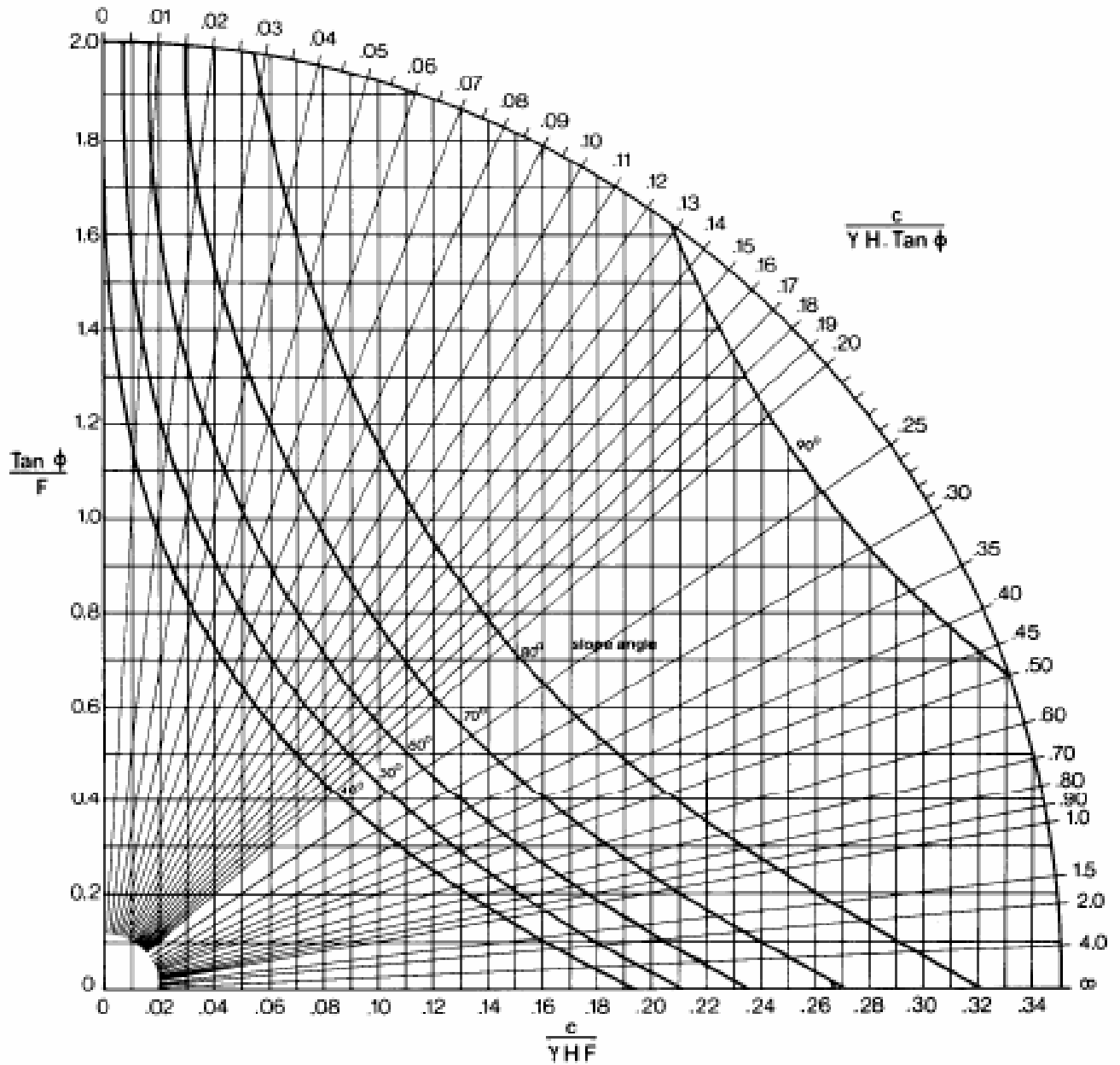


FIGURA 37.e.- CONDICIÓN 4
FUENTE: ESTABILIDAD DE TALUDES, E. A. PÉREZ DE ÁGREGA

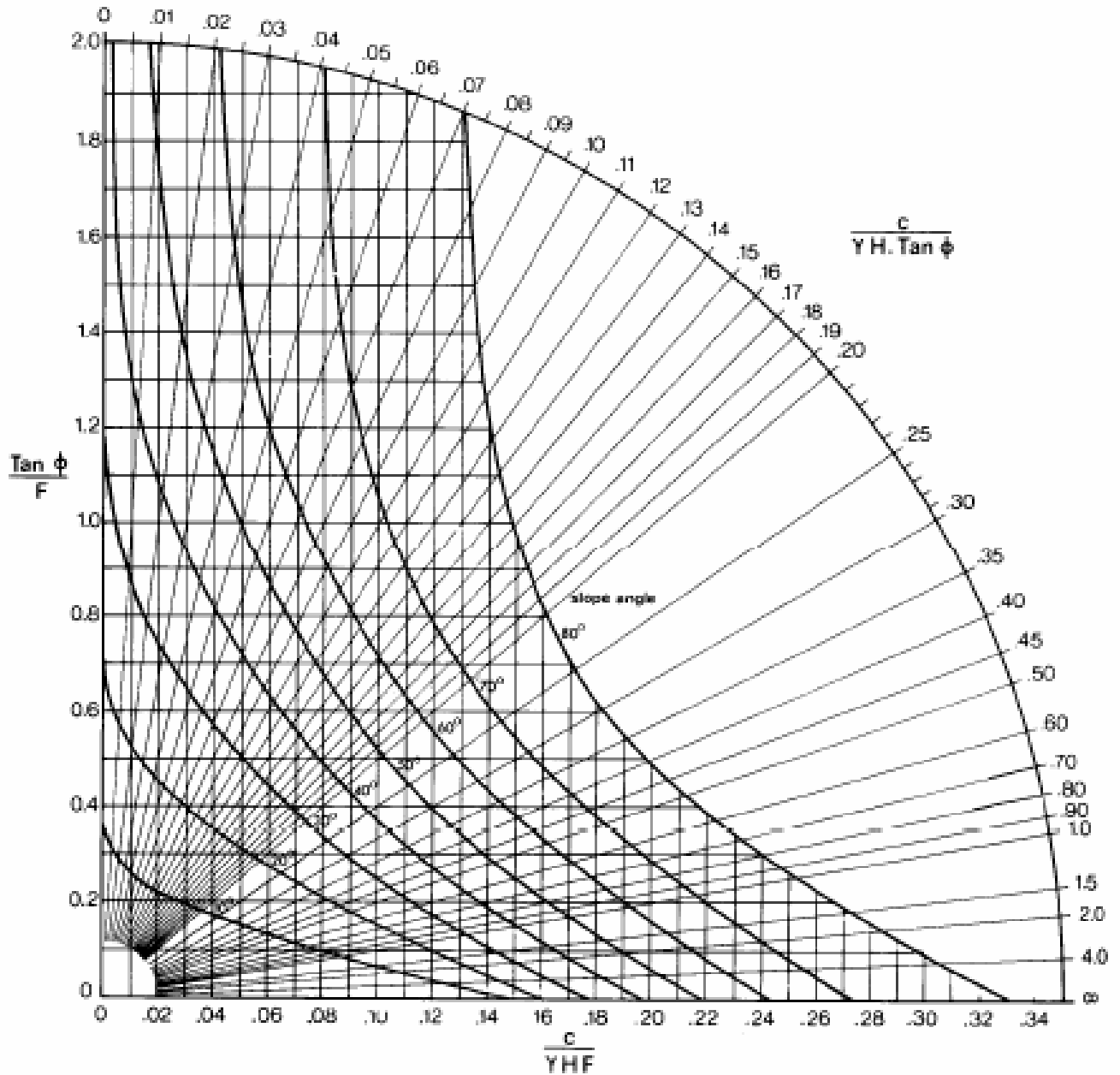


FIGURA 37.f.- CONDICIÓN 5
FUENTE: ESTABILIDAD DE TALUDES, E. A. PÉREZ DE ÁGREGA

EJEMPLO

Calcular el factor de seguridad de una talud de 15.0 m de altura, cuya inclinación es de 1.00 : 1.43, horizontal a vertical, excavado en un suelo homogéneo, con la siguiente información:

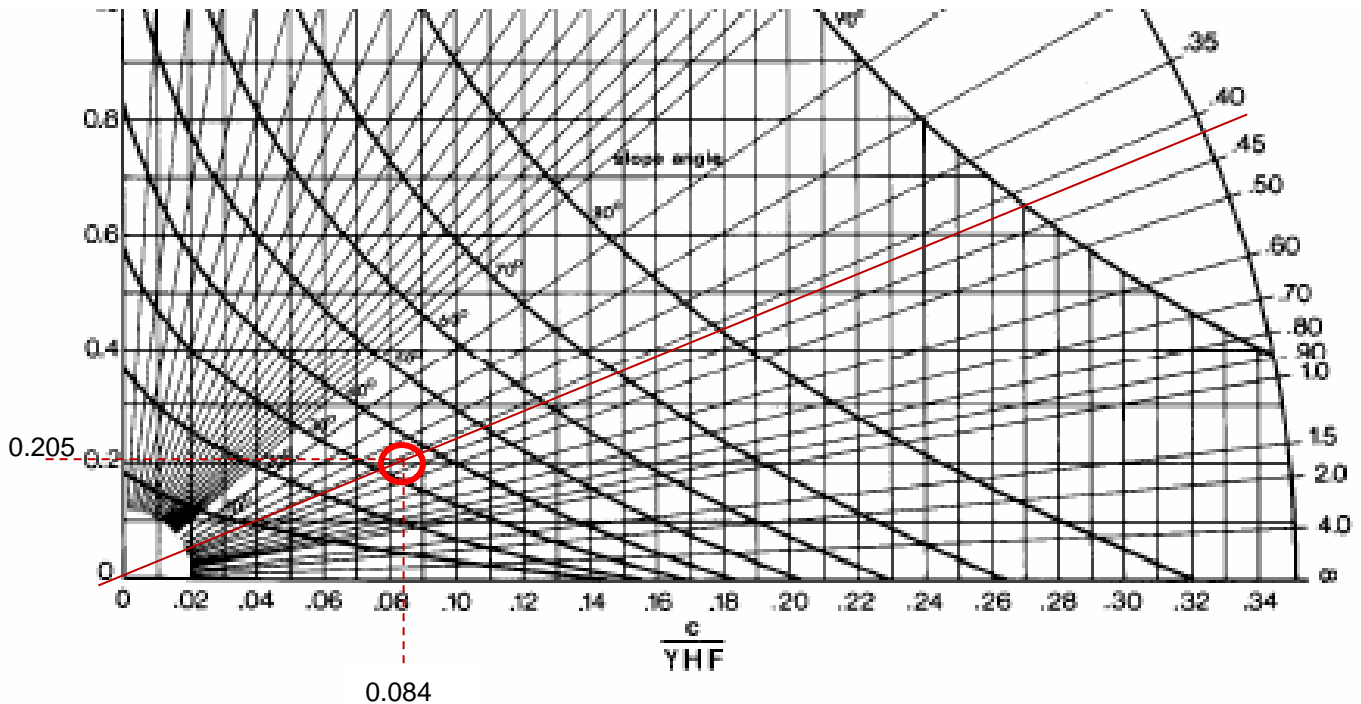


ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Peso volumétrico 17.0 kN/m³
Cohesión 50 kPa
Ángulo de fricción interna 35°

SOLUCIÓN:

$$c / \gamma H \tan \phi = 50 / 17.0 (10.0) \tan 35^\circ = 0.420$$



$$0.084 = 50 / [17 (15) F_s]$$

$$F_s = 50 / [17 (15.0) 0.084] = 2.33$$

$$0.205 = \tan 35^\circ / F_s$$

$$F_s = \tan 35^\circ / 0.205 = 3.42$$

El factor de seguridad del talud es de 2.33

PROBLEMAS PROPUESTOS

1.- En una capa o estrato de arcilla, se efectúa una *ancha excavación temporal* a cielo abierto en un predio de superficie horizontal, en la cual la capa dura se localiza a 15 m de profundidad contado a partir de la superficie original del terreno, el cual se ubica en la ciudad de Saltillo, Coahuila. El ángulo



del corte es de 35° respecto a la horizontal. Cuando la excavación alcanzó la profundidad de 8.0 m, se produjo una falla. Si el peso volumétrico medio es de 17.6 kN/m^3 , calcular:

- La magnitud media de la cohesión
- El tipo de falla
- La distancia entre el pie y la intersección de la superficie de falla con el fondo de la excavación

R: $c = 24.3 \text{ kPa}$; distancia = 10.4 m

2.- Para un almacenamiento temporal de agua, calcular el ángulo del corte con un factor de seguridad de 3.0 para falla de pie, si se requieren excavar 8.0 m de profundidad en un terreno cuyo subsuelo es considerado como un solo estrato cuyas características promedio se citan a continuación. Una vez terminada la excavación, a fin de no generar filtraciones hacia el suelo, aquella será cubierta con una geomembrana para almacenar agua con un tirante de 7.0 m.

Peso volumétrico	18.8 kN/m^3
Ángulo de fricción interna	30°
Cohesión	50 kPa
Profundidad de la roca	28.0 m

Considérese una sobrecarga por peso propio de la maquinaria de 15 kPa.

Una vez lleno el depósito, con el tirante de agua de 7.0 m, calcular el nuevo factor de seguridad. Asimismo, ubicar el centro del círculo crítico.

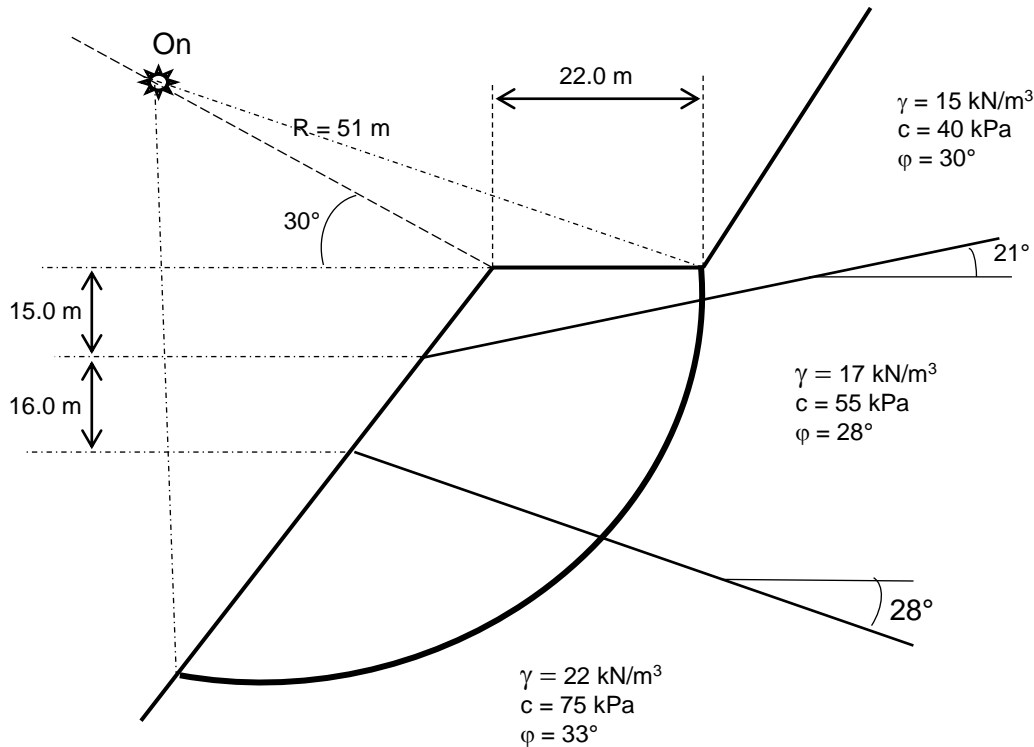
R: $\beta = 35^\circ$; $F_s = 5.43$; $x_0 H = 3.28 \text{ m}$; $y_0 H = 12.4 \text{ m}$

3.- Calcular el factor de seguridad del siguiente suelo homogéneo cohesivo friccionante, aplicando los criterios de D. Taylor, Hoek y Brown y, N. Janbu.

Peso volumétrico	17.5 kN/m^3
Ángulo de fricción interna	32°
Cohesión	45 kPa
Ángulo del talud	75°
Altura del talud	16.0 m
Profundidad de la roca	30.0 m

R: D. T. 1.21; H. y B. 1.17; N. J. 1.30

4.- Se requiere revisar el factor de seguridad de la potencial superficie de falla indicada en el *croquis* con centro O_n , que corresponde al talud del kilómetro 600+055 de la carretera *en operación* México – Torreón, Coah. El sitio está próximo a la ciudad de Zacatecas, Zac. Considerar los efectos del sismo y las sobrecargas que correspondan.



R: $F_s = 1.14$

5.- Para la construcción de un desarrollo habitacional, ubicado en la Sierra de Las Cruces, en Huixquilucan, se requiere un corte de 7.0 m de altura. El ángulo del corte proyectado es de 75° respecto a la horizontal. Sobre de la superficie original del terreno se presenta una sobre carga uniformemente distribuida de 10 kPa, calcular el factor de seguridad, si se considera que el suelo es homogéneo con las siguientes propiedades:

Peso volumétrico	21 kN/m ³
Ángulo de fricción interna	35°
Cohesión	80 kPa

En primera instancia, en condiciones estáticas, determinar el factor de seguridad y la ubicación del círculo crítico mediante el criterio de "Parámetros Adimensionales" de N. Janbu, para las mismas condiciones estáticas aplicar el criterio de Hoek y Brown. Finalmente aplicar el método de las dovelas para el centro del círculo crítico definido por el método de N. Janbu considerando la zona sísmica y los coeficientes sísmicos para un periodo de retorno de 150 años.

R: H. y B. 2.69; N. J. 2.93, $Hx_0 = -7.70$, $Hy_0 = 12.04$; Dovelas: $c_{sh} = 0.186$, $c_{sv} = 0.130$, $F_s = 2.43$



6.- Para un talud temporal, determinar el ángulo del talud para un factor de seguridad de 1.75; la altura del talud será de 6.5 m. El suelo se considera homogéneo, cohesivo friccionante. Su peso volumétrico es de 17.4 kN/m^3 , la cohesión de 45 kPa y el ángulo de fricción interna de 33° . Sobre de su corona actuará una sobrecarga de 15 kPa.

R: N.J. 90°

Bibliografía:

Principles of Soil Mechanics.- R. F. Scott
Fundamentals of Soil Mechanics.- D. Taylor
Mecánica de Suelos.- G. P. Tschebotarioff
Soil Mechanics.- A. R. Jumikis
Theoretical Soil Mechanics.- Karl von Terzaghi
Physical and Geotechnical Properties of Solis.- J. E. Bowles
Thesis for the Degree of Doctor of Science Stability Analysis of Slopes with Dimensionless Parameters.- N. Janbu
Fundamentos de Mecánica de Suelos.- R- Whitlow
Estabilidad de Taludes.- E. A. Pérez de Ágreda
Mecánica de Suelos.- T. W. Lambe y R.V Whitman
Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica.- Karl von Terzaghi y R. B. Peck
Manual de Obras Civiles, B.2.3.- Comisión Federal de Electricidad
Apuntes de la clase de Mecánica de Suelos III.- C. García Romero
Barro 2.- C. García Romero

Se agradece la participación de los ingenieros de la empresa Estudios e Ingeniería GR, S. A. de C. V. en la elaboración de este número.