

Apéndice C

Cálculo de estabilidad de los taludes de material del lugar no rocoso

Este apéndice tiene relación con las presas de tierra estudiadas en el tomo Construcciones Hidráulicas 2 (Sistemas fluviales con embalse de regulación).

C.1. Aspectos generales

C.1.1. Contenido y campo de aplicación

Esta aplicación se refiere a la estabilidad de todos los taludes de tierra (excavaciones, rellenos compactados y laderas naturales) conformados por materiales no rocosos y semirocosos.

En este apéndice se establece la metodología solo de aquellos cálculos que son semejantes para todos los tipos de estructuras de tierra que se presentan en la práctica ingenieril. Los diferentes cálculos exclusivos de algún tipo especial de estructura de tierra (por ejemplo, el talud de una presa de relleno hidráulico) no son considerados en esta publicación; estos cálculos particulares se enfocan en las bibliografías específicas destinadas al diseño de las diferentes estructuras especiales de tierra.

- Se asume que, generalmente, los taludes de tierra deben someterse a cálculo si su altura es relativamente grande (por ejemplo, mayor a 5 m).
- Los cálculos de estabilidad de los taludes son en gran medida aproximados. Los resultados de estos cálculos deben preferentemente ser correlacionados con datos de la práctica de diseño.
- En este apéndice no se incluyen los cálculos de consolidación y licuefacción de los suelos; sin embargo, en el presente material se aclara como debe ser considerada en el cálculo de la estabilidad general del talud la presión hidrodinámica conocida que surge como consecuencia de la consolidación del suelo.
- Los escenarios de diseño previstos del talud de una configuración dada y constituido por suelos identificados deben corresponder a las condiciones de operación menos favorables de dicho talud: presencia de una carga temporal relativamente grande en la cresta del talud, presencia del descenso del nivel de agua frente al talud, la ubicación altitudinal menos favorable del nivel de agua frente al talud, presencia de fuerzas inerciales sísmicas, etc.).

C.1.2. Definiciones de términos

Talud de tierra es la superficie de tierra que tiene el ángulo de inclinación con la horizontal mayor 10° (línea *BC* en la Figura C.1).

Cresta del talud, superficie de tierra *AB* que tiene inclinación menor de 10° respecto a la horizontal.

Superficie de la base del talud, superficie *CD* de inclinación menor de 10° respecto a la horizontal.

Borde del talud, línea de intersección del talud con su cresta (en la Figura C.1 se proyecta en el punto *B*).

Pie del talud, línea de intersección del talud de tierra con la superficie del terreno.

Altura del talud, diferencia de niveles entre el de la cresta y el del pie del talud.

Cuerpo del talud, espacio del suelo que yace sobre la línea *EC* trazada a través del punto *C*, horizontalmente o algo inclinada, por ejemplo, como continuación de la línea *CD*.

Base del talud, volumen del suelo que yace bajo la línea *ECD*.

Talud normal, talud plano que tiene cresta y superficie de la base en forma de superficies horizontales.

Talud libre o sin carga externa, talud sobre el cual como también en su cresta no está presente carga alguna en forma de fuerzas externas superficiales o puntuales.

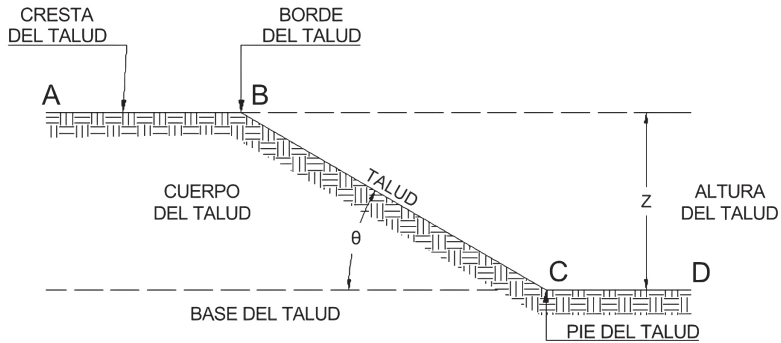


Figura C.1. Talud de tierra.
Fuente: los autores.

C.1.3. Clasificación de los taludes

Existe dos tipos de taludes: taludes naturales (laderas) y taludes artificiales, estos últimos se dividen en rellenos y excavaciones que limitan los macizos naturales del suelo. Asimismo, se pueden clasificar según tres criterios adicionales: primero, *dependiendo de la forma geométrica* del talud: taludes planos, taludes quebrados y taludes con curvatura; segundo, *dependiendo del tipo de suelo* que conforma el talud y su base de cimentación: taludes formados por suelos no cohesivos y taludes formados por suelos cohesivos, taludes formados por suelos homogéneos y taludes formados por suelos no homogéneos, taludes ubicados sobre un macizo rocoso y taludes ubicados sobre una base natural de cimentación no rocosa y taludes formados por suelos poco contráctiles (por ejemplo, los suelos arenosos) y taludes formados por suelos fuertemente contráctiles (por ejemplo, las arcillas); tercero, *dependiendo de la presencia o ausencia de agua* en los poros del suelo: taludes cuyo cuerpo y cimentación están constituidos por suelo prácticamente seco, taludes cuyo cuerpo y cimentación están formados (total o parcialmente) por suelo con contenido de agua pelicular (en una u otra cantidad), taludes cuyo cuerpo y cimentación está constituido total o parcialmente por suelo saturado con agua gravitacional en reposo y taludes cuyo cuerpo

cimentación está formado (total o parcialmente) por suelo saturado con agua gravitacional en movimiento.

C.1.4. Simbología adoptada para las magnitudes principales

θ : ángulo de inclinación del talud respecto a la horizontal.

m : coeficiente de talud: $m = \text{ctg } \theta$.

Z : altura del talud.

φ : ángulo de fricción interna del suelo.

φ_K : magnitud de φ con la cual el espacio considerado del suelo debe encontrarse en estado de equilibrio límite (ángulo de fricción interna crítico o en otras palabras ángulo de fricción interna para diseño).

φ_R : magnitud de φ , propia del suelo considerado (ángulo de fricción interna real).

c : cohesión específica del suelo.

c_K : magnitud de c , con la cual el espacio considerado del suelo debe encontrarse en estado de equilibrio límite (cohesión específica crítica o en otras palabras cohesión específica para diseño).

c_R : magnitud de c , propia del suelo considerado (cohesión específica real).

n : porosidad volumétrica del suelo, es decir la relación del volumen de poros del suelo al volumen total del suelo (formado por la fase sólida o esqueleto del suelo).

γ_o : peso específico del agua.

γ'_{sec} : peso volumétrico del suelo absolutamente seco.

γ_{sec} : peso volumétrico del suelo prácticamente seco.

γ_{sum} : peso volumétrico del suelo sumergido en agua:

$$\gamma_{sum} = \gamma'_{sec} - (1 - n)\gamma_o \quad (C.1)$$

γ_{sat} : peso volumétrico del suelo saturado de agua, es decir, el peso de una unidad de volumen del suelo conjuntamente con el agua que llena totalmente los poros:

$$\gamma_{sat} = \gamma'_{sec} + n\gamma_o \quad (C.2)$$

γ_{hum} : peso volumétrico del suelo húmedo que contiene agua capilar (en una u otra cantidad).

k_s : coeficiente de seguridad al deslizamiento del segmento considerado de suelo (también factor de seguridad del deslizamiento FSD del segmento de suelo).

k_s^t : coeficiente o factor de seguridad al deslizamiento del talud (también factor de seguridad al deslizamiento del talud FSD).

$(k_s^t)_{per}$: coeficiente permisible de seguridad al deslizamiento del talud (factor permisible de seguridad al deslizamiento del talud FSD_{PER}), que es el valor mínimo permisible de k_s^t .

C.1.5. Principales características físicas del suelo que conforma el cuerpo y la base de cimentación del talud

El valor numérico (A_R) de una u otra característica física (φ_R , c_R , n_R , etc.) propia del suelo considerado (característica física real) cabe determinar con la ecuación:

$$A_R = A^N \pm \sigma \quad (C.3)$$

Donde:

A^N : valor normativo (medio) de la característica determinado a partir de los datos de los ensayos de las muestras del suelo, tomadas en cantidad suficiente para la generalización estadística.

σ : error cuadrático medio obtenido del procesamiento de los datos experimentales.

Las magnitudes A_R —es decir, las magnitudes $\varphi_R, c_R, n_R, (\gamma_{sec})_R$, etc.— para calcular la estabilidad del talud deben ser dadas en correspondencia con la ecuación C.3. Para determinar las magnitudes φ_R y c_R cabe utilizar el signo menos indicado en la mencionada ecuación; para determinar la magnitud γ se empleará el signo positivo.

Para cálculos preliminares las magnitudes φ_R y c_R para los suelos arenosos y arcillosos se puede adoptar sin los ensayos correspondientes, de acuerdo con la Tabla C.1.

Tabla C.1
Valores reales φ_R (grados), c_R (Ton/m²) para suelos arenosos y arcillosos

Denominación del suelo		Indicador	Porosidad del suelo n					
			0,29-0,33	0,33- 0,37	0,37- 0,41	0,41- 0,45	0,45- 0,49	0,49- 0,53
Suelos arenosos	Gruesas y gravosas	$\begin{cases} \varphi_R \\ c_R \end{cases}$	41 0	38 0	36 0	--	--	--
	Medias	$\begin{cases} \varphi_R \\ c_R \end{cases}$	38 0	36 0	33 0	--	--	--
	Finas	$\begin{cases} \varphi_R \\ c_R \end{cases}$	36 0,1	34 0	30 0	--	--	--
	Muy finas	$\begin{cases} \varphi_R \\ c_R \end{cases}$	34 0,1	32 0,1	28 0	--	--	--
suelos arcillosos para humedad en el límite plástico $W_p, \%$	9,5-12,5	$\begin{cases} \varphi_R \\ c_R \end{cases}$	23 0,3	22 0,1	21 0			
	12,5- 15,5	$\begin{cases} \varphi_R \\ c_R \end{cases}$	22 1,4	21 0,7	20 0,4	19 0,2		
	15,5- 18,5	$\begin{cases} \varphi_R \\ c_R \end{cases}$	-- --	20 1,9	19 1,1	18 0,8	17 0,4	16 0,2
	18,5- 22,5	$\begin{cases} \varphi_R \\ c_R \end{cases}$	-- --	-- --	18 2,8	17 1,9	16 1,0	15 0,6
	22,5-26,5	$\begin{cases} \varphi_R \\ c_R \end{cases}$	-- --	-- --	-- --	16 3,6	15 2,5	14 1,2
	26,5- 30,5	$\begin{cases} \varphi_R \\ c_R \end{cases}$	-- --	-- --	-- --	-- --	14 4	13 2,2

C.1.6. Bases para calcular la estabilidad de los taludes de tierra

El cálculo de estabilidad de los taludes tiene carácter verificador: al comienzo es necesario adoptar la configuración del talud (si es que dicha configuración no es previamente conocida) y luego con ayuda del cálculo establecer el grado de estabilidad del talud que ha sido adoptado. Para calcular el grado de estabilidad de un talud normalmente se considera únicamente el modelo plano o bidimensional.

En el cálculo debe ser considerada la magnitud de diseño de las fuerzas (cargas) que actúan en el cuerpo del talud y en su cimentación. Estas magnitudes de diseño de las fuerzas son determinadas como el producto de las cargas normativas y de los correspondientes coeficientes n_o de sobrecarga (mayores o menores que la unidad).

El coeficiente de sobrecarga n_o cabe asumir igual a la unidad, es decir no considerarlo, para la determinación del peso propio del suelo y del agua, así como para determinar las fuerzas de filtración y las sísmicas.

El grado de estabilidad del talud considerado debe evaluarse con el coeficiente de o factor de seguridad k_s^t , (FSD) o con el coeficiente de condiciones de operación del talud m_o tomando en cuenta que:

$$m_o = \frac{1}{k_s^t} \quad (C.4)$$

En los casos sencillos de *suelo seco homogéneo*, con presencia de un talud normal libre, para determinar la magnitud k_s^t cabe utilizar las indicaciones que se formulan en el numeral C.2.

En calidad de método principal para determinar la magnitud de k_s^t generalmente es recomendable el método de las superficies circulares de corte del suelo (numeral C.3).

En caso de presencia nítida de estratos rectilíneos de suelo débiles en el cuerpo del talud o en su cimentación, para determinar el coeficien-

te k_s^t cabe adicionalmente aplicar el método de las superficies planas de corte, para superficies de falla en el interior del talud o de su cimentación, según el caso.

Para asegurar la estabilidad suficiente del talud es necesario exigir que el valor de k_s^t encontrado en el cálculo satisfaga la condición:

$$k_s^t \geq (k_s^t)_{per} \quad (C.5)$$

Donde:

$(k_s^t)_{per}$: valor permisible del coeficiente o factor de seguridad.

Para diseño hasta el nivel de factibilidad, el coeficiente $(k_s^t)_{per}$ se puede adoptar de acuerdo con los datos presentados en la Tabla C.2.

Tabla C.2
Coeficientes permisibles de seguridad al deslizamiento de un talud $(k_s^t)_{per}$

Combinación de factores (cargas y solicitaciones)	Nivel de importancia de la estructura			
	I	II	III	IV
Básica	1,35-1,25	1,25-1,15	1,20- 1,10	1,15- 1,10
Especial	1,15- 1,10	1,15- 1,10	1,10- 1,05	1,05

Vale mencionar que los valores mayores de $(k_s^t)_{per}$ se puede adoptar en el caso de suelo arcilloso, así como cuando el talud y/o su cimentación están conformados por suelos no homogéneos.

C.2. Determinación del coeficiente de seguridad para la estabilidad del talud normal libre de suelo homogéneo

C.2.1. Talud formado por un suelo saturado de agua en reposo

C.2.1.1. Suelos suelto y cohesivo

El coeficiente de seguridad al deslizamiento k_s^t de un talud normal libre, cuyo cuerpo y su cimentación están constituidos por suelo

cohesivo o no cohesivo saturado de agua en reposo en una profundidad Z_{sat} (Figura C.2), puede ser determinado en estudios hasta la etapa de factibilidad, inclusive, con ayuda de los gráficos propuestos por R. R. Chugaev, los mismos que constan en las figuras de C.3 a C.8 y que presentan la relación entre las magnitudes $\varphi_k, c_k, \gamma_{sec}, Z_{sat}, \theta$.

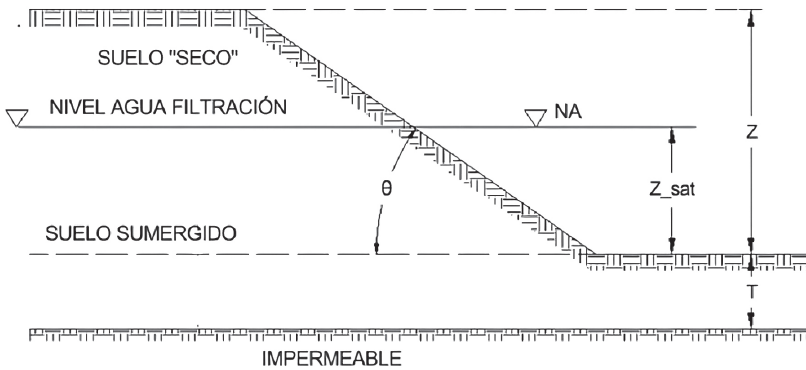


Figura C.2. Talud de cimentación Saturados
Fuente: los autores.

$$\varphi_k, c_k, \gamma_{sec}, Z_{sat}, \theta$$

La magnitud k_s^t en las figuras mencionadas se determina por aproximaciones:

- Se adoptan una serie de alores k_s^t .
- Se encuentra para estas magnitudes k_s^t los correspondientes valores φ_k y c_k utilizando las fórmulas:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_k = \frac{\varphi_R}{k_s^t} \\ c_k = \frac{c_R}{k_s^t} \end{array} \right. \quad (C.6)$$

- A partir de los valores encontrados de φ_k y c_k y al utilizar los valores dados de Z y γ_{sec} , con ayuda de los gráficos N° 1-6 en las figuras 3-8, se determinan los correspondientes valores de θ .
- En calidad de la magnitud buscada k_s^t se adopta aquella para la cual el valor de θ encontrado en los gráficos resulta ser igual al valor dado.

Aquí son necesarias dos aclaraciones. Primero, los gráficos presentados en las figuras C.3 a C.8 fueron elaborados por R. R. Chugaev, como parte de sus métodos para analizar la estabilidad de los taludes de las presas de material del lugar. Segundo, los gráficos presentados en las figuras C.3-C.8 están referidos a los siguientes casos:

- Gráfico 1 (Figura C.3) al caso $Z_{sat}/Z = 0$ (talud prácticamente seco).
- Gráfico 2 (Figura C.4) al caso $Z_{sat}/Z = 0,20$.
- Gráfico 3 (Figura C.5) al caso $Z_{sat}/Z = 0,40$.
- Gráfico 4 (Figura C.6) al caso $Z_{sat}/Z = 0,60$.
- Gráfico 5 (Figura C.7) al caso $Z_{sat}/Z = 0,80$.
- Gráfico 6 (Figura C.8) al caso $Z_{sat}/Z = 1,00$.

Los gráficos referidos han sido construidos por el *modelo de la masa deslizante sólida monolítica*, relativo al método de las superficies circulares de corte del suelo. Para su construcción se ha asumido que:

$$\frac{\gamma_{sum}}{\gamma_{sec}} = \frac{1,0}{1,6} = 0,625.$$

Así, en los ejes verticales de todos los gráficos se ubica la magnitud de la cohesión crítica reducida a adimensional:

$$(c_k)_{rel} = \frac{c_k}{Z\gamma_{sec}} \quad (C.7)$$

Por lo indicado, al obtener el valor $(c_k)_{rel}$, a partir de las magnitudes θ y φ_k mostradas en los gráficos, a continuación, para determinar la magnitud c_k , cabe aplicar la ecuación:

$$c_k = (c_k)_{rel} \gamma_{sec} Z \quad (C.7')$$

Esta ecuación es válida también para el gráfico 6 que se refiere al caso de un talud formado únicamente por suelo sumergido (a pesar de que aquí no está presente el suelo seco, la magnitud c_k en este caso de todas maneras hay que obtenerla con la ecuación (C.7') en la cual interviene γ_{sec} .

En el esquema del talud mostrado en el gráfico, a través de T se representa la profundidad (bajo el pie del talud) de la superficie del macizo rocoso. En los gráficos se muestran dos sistemas de curvas: continuas y punteadas. Las curvas punteadas se refieren a las magnitudes: $a = \frac{T}{Z}$, escritas en estas curvas. Las líneas continuas se refieren prácticamente a todos los valores de a .

Como resultado del análisis de los gráficos en las figuras C.3-C.8, se puede ver que la magnitud Z_{sat} de mayor riesgo (con la cual se obtiene el menor valor de k_s^t) resulta ser igual a:

$$Z_{sat} \approx 0,2Z \quad (C.8)$$

Para calcular y construir los gráficos, condicionalmente, ha sido asumido que los valores de φ y c son constantes a lo largo de la superficie de corte, es decir, independientes de la saturación del suelo con agua.

Si se asume que k_s^t es igual a la relación de los ángulos φ_R y φ_k (Ecuación C.6), mas no la relación de las tangentes de estos ángulos, entonces, la magnitud del valor permisible (k_s^t)_{per} (Tabla C.2) cabe disminuir en 2 y 3 %.

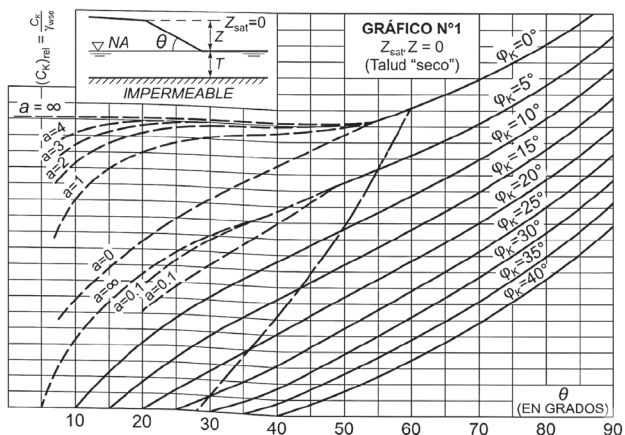


Figura C.3. Abaco para calcular taludes secos cuando $Z_{sat}/Z = 0$.

Fuente: Instituto B. E. Venedeva de investigaciones científicas. Moscú (1988). Criterios para analizar la estabilidad de taludes. VODGEO.

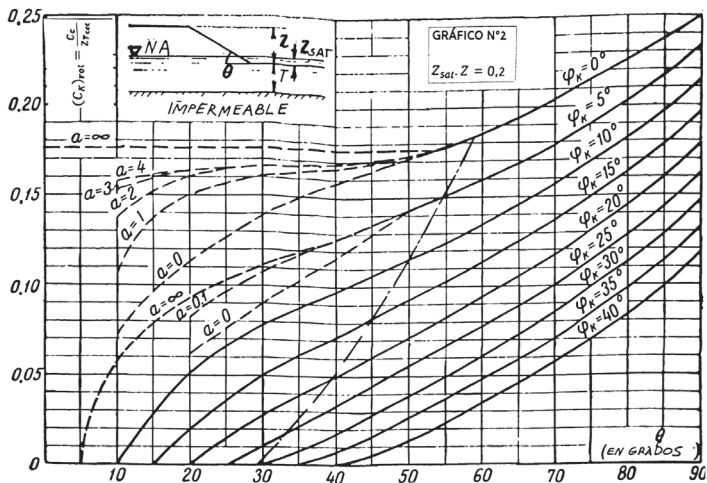


Figura C.4. Abaco para calcular taludes parcialmente saturados cuando $Z_{sat}/Z = 0,20$.

Fuente: Instituto B. E. Venedeva de Investigaciones Científicas. Moscú (1988). Criterios para analizar la estabilidad de taludes. VODGEO.

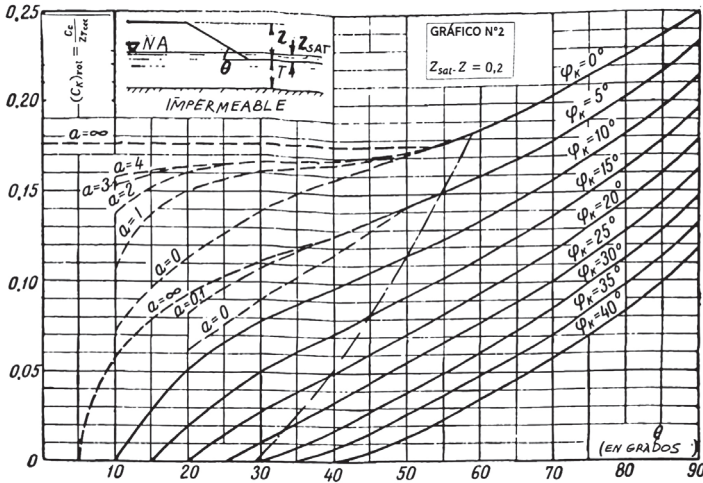


Figura C.5. Ábaco para calcular taludes parcialmente saturados cuando $Z_{sat}/Z = 0,40$.
 Fuente: Instituto B. E. Venedeva de Investigaciones Científicas. Moscú (1988). *Criterios para analizar la estabilidad de taludes. VODGEO.*

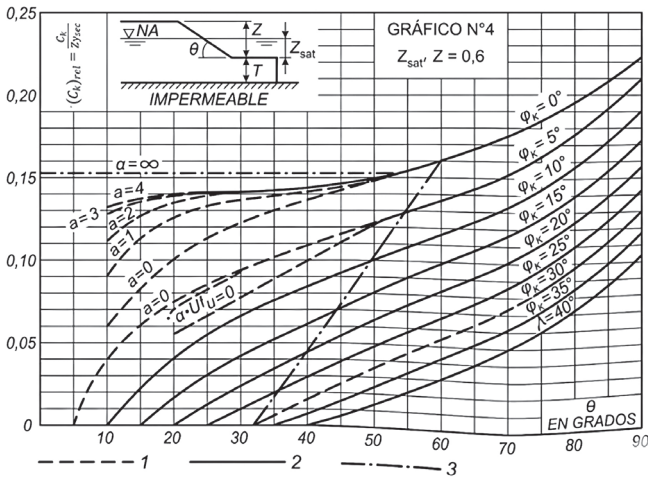


Figura C.6. Ábaco para calcular taludes parcialmente saturados cuando $Z_{sat}/Z = 0,60$.
 Fuente: Instituto B. E. Venedeva de Investigaciones Científicas. Moscú (1988). *Criterios para analizar la estabilidad de taludes. VODGEO.*

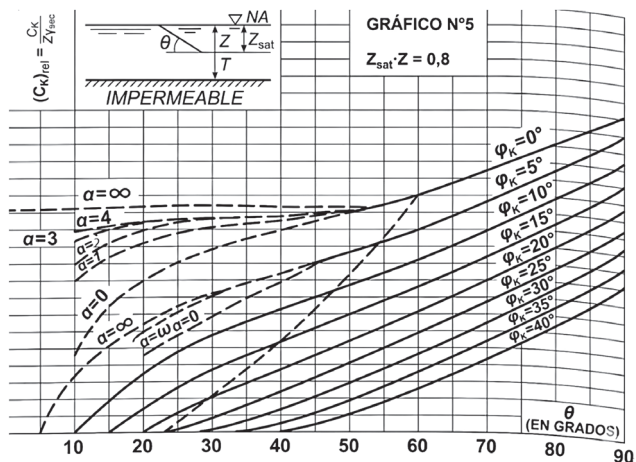


Figura C.7. Ábaco para calcular taludes casi totalmente saturados cuando $Z_{sat}/Z = 0,80$.

Fuente: Instituto B. E. Venedeeva de Investigaciones Científicas. Moscú (1988). *Criterios para analizar la estabilidad de taludes*. VODGEO.

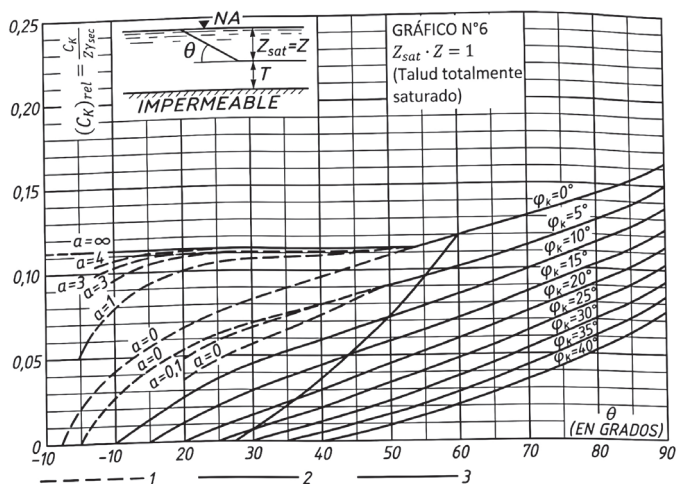


Figura C.8. Ábaco para calcular taludes totalmente saturados cuando $Z_{sat}/Z = 1,00$.

Fuente: Instituto B. E. Venedeeva de Investigaciones Científicas. Moscú (1988). *Criterios para analizar la estabilidad de taludes*. VODGEO.

En las figuras precedentes, las líneas curvas entrecortadas $(c_k)_{rel} = f(\theta)$ se refieren a las magnitudes $a = (T/Z)$ señaladas en dichas curvas. Las líneas curvas continuas $(c_k)_{rel} = f(\theta)$ se refieren a prácticamente todos los valores $a = (T/Z)$. El arco de falla con mayor riesgo siempre se ubica a la derecha de la línea curva de punto y raya, en el punto del pie del talud y no incluye el suelo de cimentación del talud (los centros del arco de falla con mayor riesgo se ubican a la derecha de la vertical trazada a través del punto del pie de talud).

C.2.1.1.1. EJEMPLO Y SOLUCIÓN

Se tiene un talud normal libre. Dado: $Z = 20 \text{ m}$; $Z_{sat} = 0,4Z$; $\theta = 35^\circ$; $\varphi_R = 20^\circ$; $c_R = 2,5 \text{ ton/m}^2$; $\gamma_{sec} = 1,65 \text{ ton/m}^3$. Se requiere determinar el coeficiente k_s^t de seguridad de la estabilidad del talud dado.

- Se adopta una serie de valores k_s^t en la Tabla C.3, en correspondencia con la ecuación (C.6) se calculan las magnitudes φ_k y c_k .
- Se determina la relación $Z_{sat}/Z = 0,4Z/Z = 0,4$.
- Por el gráfico C.3, en la Figura C.5 que pertenece a esta relación se determina el valor θ que corresponde a los valores encontrados de φ_k y c_k (para el efecto se utiliza la ecuación (C.7). Los valores obtenidos de θ se escriben en la Tabla C.3.

Tabla C.3

Reducción de parámetros resistentes y determinación del ángulo crítico θ en función del coeficiente de seguridad k_s^t

k_s^t	$\varphi_k = \frac{\varphi_R}{k_s^t}$	$c_k = \frac{c_R}{k_s^t} \text{ t/m}^2$	$(c_k)_{red} = \frac{c_k}{Z\gamma_{sec}}$	θ (por el gráfico nro. 3-Figura C.5)
1,0	20°	2,5	0,076	53°
1,1	18°11'	2,27	0,069	47°
1,2	16°39'	2,08	0,063	39°
1,3	15°23'	1,92	0,058	35°
1,5	13°20'	1,67	0,051	28°

Como se puede apreciar de la Tabla C.3, se desprende que al valor dado de $\theta = 35^\circ$, corresponde el factor de seguridad $k_s^t = 1,3$.

C.2.2. Talud formado por suelo seco

C.2.2.1. Suelo suelto (no cohesivo)

El coeficiente de seguridad a la estabilidad k_s^t de un talud normal libre con cuerpo y base de cimentación formados por suelo homogéneo seco suelto (no cohesivo), cabe determinar con la ecuación:

$$k_s = \frac{tg\varphi_R}{tg\theta} \quad (C.9)$$

Con la ecuación (C.9) cabe calcular también los taludes cuya base de cimentación está conformada por un suelo que tiene ángulo de fricción interna $[(\varphi_R)_{cim}]$ mayor que el ángulo de fricción interna propio del cuerpo del talud $[(\varphi_R)_{CT}]$. Caso contrario, cuando $(\varphi_R)_{cim} < (\varphi_R)_{CT}$ la magnitud k_s^t se determina por el método de las superficies cilíndrico circulares de corte del suelo (ver numeral C.3).

C.2.3. Suelo cohesivo

El coeficiente k_s^t de seguridad al deslizamiento de un talud normal libre con cuerpo y base de cimentación formados por suelo cohesivo seco se recomienda calcular utilizando el gráfico de la Figura C.3.

La magnitud k_s^t con ayuda de dicho gráfico se determina por aproximaciones:

- Se asume una serie de valores k_s^t .
- Se encuentran para estos valores las correspondientes magnitudes φ_k y c_k , aplicando las ecuaciones (C.6).
- A partir de los valores encontrados φ_k y c_k , así como también utilizando los valores dados de Z y γ_{sec} se determina en el gráfico de la Figura C.3 los valores de θ .
- En calidad de la magnitud buscada k_s^t se adopta aquella para la cual el valor θ encontrado en el gráfico resulta ser igual al valor dado de θ (ver numeral C.2.1).

C.2.3.1. Ejemplo y solución

Dado un talud normal libre: $\varphi_R = 20^\circ$; $c_R = 3 \text{ t/m}^2$; $\gamma_{sec} = 1,6 \text{ t/m}^3$; $Z = 0 \text{ m}$; $\theta = 30^\circ$. Se requiere encontrar el coeficiente k_s^t de seguridad al deslizamiento del talud dado.

- Se asume una serie de valores de k_s^t y, en la Tabla C.4 se calculan las correspondientes magnitudes de φ_k y c_k , en correspondencia con la ecuación (C.6).
- En la misma tabla se calculan las magnitudes:

$$(c_k)_{red} = \frac{c_k}{Z\gamma_{sec}}$$

- Utilizando el gráfico N°1 de la figura (C.3) y a partir de las magnitudes:

$$\varphi_k \text{ y } \frac{c_k}{Z\gamma_{sec}}$$

Se determinan los correspondientes valores θ , los mismos que también se registran en la Tabla C.4. Como se puede apreciar en la Tabla C.4, al valor dado de $\theta = 30^\circ$ corresponde $k_s^t = 1,3$:

Tabla C.4
Reducción de los parámetros resistentes
para la determinación iterativa del coeficiente de seguridad k_s^t

k_s^t	$\varphi_k = \frac{\varphi_R}{k_s^t}$	$c_k = \frac{c_R}{k_s^t} \text{ t/m}^2$	$(c_k)_{red} = \frac{c_k}{Z\gamma_{sec}}$	θ (por el gráfico nro. 1)
1,0	20°	3,0	0,0625	45°
1,1	18°11'	2,73	0,0570	41°
1,2	16°39'	2,50	0,0520	34°
1,3	15°23'	2,30	0,0480	30°
1,4	14°17'	2,14	0,0446	27°

C.3. Determinación del coeficiente de seguridad para la estabilidad del talud por el método de las superficies cilíndrico circulares de corte del suelo

C.3.1. Criterios generales del cálculo

El coeficiente k_s^t de seguridad del talud por el método de las superficies cilíndrico-circulares de corte se determina en cuatro pasos.

Primero, se adopta una serie de posibles superficies cilíndrico-circulares de corte del suelo; ver la Figura C.9 en la cual con el arco AB se muestra uno de las posibles “círculos (arcos) de corte”.

Segundo, para cada posible volumen de falla seleccionado, limitado desde abajo por el correspondiente arco de deslizamiento (Figura C.9, el volumen de falla ABCD), se calcula su coeficiente k_s de estabilidad. Para el efecto, se aplican las indicaciones del numeral C.3.2.

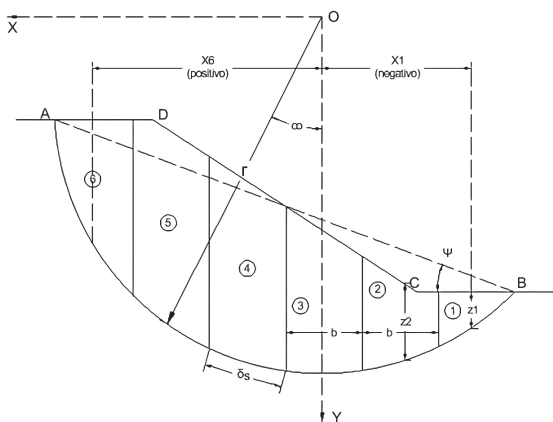


Figura C.9. Esquema del método de las dovelas.

Fuente: Instituto B. E. Venedeva de Investigaciones Científicas. Moscú (1988). *Criterios para analizar la estabilidad de taludes*. VODGEO.

Tercero, al comparar los valores obtenidos de k_s se establece entre ellos el de menor magnitud identificándolo como $(k_s)_{min}$; de esta ma-

nera que considera que la superficie circular para la cual $k_s = (k_s)_{min}$ es la de mayor riesgo.

Finalmente, la magnitud buscada k_s^t se adopta igual al valor encontrado $(k_s)_{min}$:

$$k_s^t = (k_s)_{min} \quad (C.10)$$

En el caso de un talud con pendiente pronunciada que tiene coeficiente de talud:

$$2,0 < m < 2,5 \quad (C.11)$$

Se realiza un ajuste del valor encontrado k_s^t . Para el efecto, se considera el volumen ya determinado de falla de mayor riesgo y se lo somete a un segundo cálculo como se indica:

- En el numeral C.3.3, punto 1.
- En el caso de suelo no homogéneo y en presencia de una estructura de nivel de importancia I o II, en el numeral C.3.3, punto 2.

Las superficies cilíndrico circulares de posibles fallas del suelo cabe adoptar de tal manera que entre ellas se encuentre una superficie ubicada suficientemente cerca de la superficie que efectivamente sea la de mayor riesgo.

Se recomienda asumir superficies de falla del suelo en el orden indicado en el ejercicio N°1 y en caso de suelo homogéneo es permisible limitarse a la consideración únicamente de aquellas superficies circulares que pasen a través del punto C del pie del talud, mostrado en la Figura C.9.

C.3.2. Método de cálculo útil para determinar el coeficiente o factor de seguridad k_s

Para determinar k_s relativo al volumen de falla considerado y limitado desde abajo por el arco de corte dado, se puede aplicar el

método de la presión por peso de R. R. Chugaev. De acuerdo con este método, en el caso de un talud convencional seco, se procede con cinco pasos:

Primero, el volumen de falla considerado (volumen $ABCD$, Figura C.9) es dividido en franjas o fragmentos verticales (comúnmente conocidos como dovelas) de ancho b a través del trazo de las correspondientes verticales.

Segundo, el peso de cada franja se representa por δG y se adopta la simplificación de acuerdo a la que la fuerza de presión normal δN que actúa en la base de la franja considerada, en el momento del estado límite es igual a:

$$\delta N = \delta G \quad (\text{C.12})$$

Tercero, el momento cortante o deslizante (M_{des}) de las fuerzas que tienden a girar el volumen de falla respecto al centro O del arco de falla, se sume que es igual a:

$$M_{des} = Gx_o \quad (\text{C.13})$$

Donde:

G : peso de todo el volumen de falla, así:

$$G = \sum \delta G \quad (\text{C.14})$$

Donde:

x_o : brazo de momento respecto al referido centro O .

Cuarto, el momento resistente crítico (M_{res}) de las fuerzas resistentes al giro del volumen de falla, considerado respecto al centro O en el momento del estado límite, se lo considera igual a:

$$M_{res} = \sum(r\delta T + r\delta C) = r\sum(\delta N tg\varphi_k + c_k \delta s) = [\sum(\delta G tg\varphi_k) + \sum(c_k \delta s)]r \quad (C.15)$$

Donde:

r : radio del arco de corte.

δT y δC : fuerza de fricción y fuerza de cohesión actuantes a lo largo de la base de las franjas verticales (fragmentos) en el momento del estado límite.

δs : longitud del elemento del arco que forma la base de la franja vertical considerada.

\sum : suma de las correspondientes magnitudes calculadas para todas las franjas verticales que constituyen el volumen de falla.

Por último, el denominado *momento resistente*: M_{res}^t se considera igual a:

$$M_{res}^t = k_s M_{res} = r[\sum(\delta G k_s tg\varphi_k) + \sum(k_s c_k \delta s)] = r[\sum(\delta G tg\varphi_R) + \sum(c_R \delta s)] \quad (C.16)$$

El coeficiente de seguridad al deslizamiento k_s del volumen de falla considerado se considera igual a:

$$k_s = \frac{tg\varphi_R}{tg\varphi_k} = \frac{c_R}{c_k} \quad (C.17)$$

Y la magnitud de k_s se calcula con la ecuación:

$$k_s = \frac{M_{res}^t}{M_{des}} \quad (C.18)$$

Tomando en cuenta que en el momento del equilibrio límite del volumen de falla tiene lugar la igualdad:

$$M_{des} = M_{res} \quad (C.19)$$

Debido a lo que la ecuación (C.18) debe siempre dar el mismo valor numérico de k_s que el de la ecuación (C.17).¹

A continuación, se formula la presentación de cálculo de las ecuaciones que sirven para determinar las magnitudes k_s de acuerdo con el método de presión por peso. Estas ecuaciones de cálculo se refieren a diferentes casos de taludes y han sido obtenidas como resultado de transformaciones sencillas de la ecuación (C.18). En el siguiente numeral (C.3.3) se formula el procedimiento para el ajuste de la magnitud encontrada de k_s , al que se debe recurrir únicamente en el caso de taludes con pendiente pronunciada, cuando $m < (2,0 \dots 2,5)$.

C.3.3. Ajuste de la magnitud encontrada de k_s en el caso de pendiente pronunciada del talud: $m < (2,0 \text{ a } 2,5)$

En presencia de un talud con pendiente pronunciada la superficie de corte de mayor riesgo se aproxima a un plano poco profundo bajo la superficie del talud. En este caso el valor de k_s obtenido con las ecuaciones del numeral C.3.2, puede resultar sobredimensionado.

Por lo indicado, en el caso de una pendiente pronunciada del talud, el volumen de corte de mayor riesgo previamente establecido debe ser sometido a un nuevo cálculo de ajuste.

Para ejecutar el cálculo de ajuste se utilizan las ecuaciones formuladas en el numeral C.3.2, realizando previamente dos cambios en dichas ecuaciones:

Primero, en casos normales (excepto los que se indican a continuación en el punto 2), la magnitud φ_R [$o \text{ } tg \varphi_R^{cim}$; *ver más abajo*] por la magnitud $tg \varphi'_R$ [$o, (tg \varphi_R^{cim})'$], igual a:

1 Considerando el modelo plano o bidimensional y expresando las correspondientes magnitudes, por ejemplo, en kilo Newtons y metros, se debe tomar en cuenta que:

$$\begin{aligned} |\delta G| &= |G| = kN/m \\ |\delta C| &= |C| = kN/m \\ |M_{res}^t| &= |M_{des}| = kN \cdot m/m \end{aligned}$$

$$tg\varphi'_R = 1,05\cos\psi \cdot tg\varphi_R; \text{ o } (tg\varphi_R^{cim})' = 1,05\cos\psi \cdot tg\varphi_R^{cim} \quad (C.20)$$

Donde:

ψ : ángulo de inclinación respecto a la horizontal de la curda tendida entre los extremos del arco de corte de mayor riesgo, previamente encontrado (Figura C.9).

Segundo, en el caso de una estructura de alto nivel de importancia (I, II) en presencia de un suelo en gran medida no homogéneo (respecto a φ y c a lo largo de superficie de corte con mayor riesgo, previamente encontrada), la magnitud (δG) reemplazar por la magnitud $(\delta G)'$ igual a:

$$(\delta G)' = [(\delta G)\cos\alpha] \quad (C.20')$$

Donde:

α : ángulo mostrado en la Figura C.9 que corresponde a la franja o fragmento vertical considerado de ancho b .

C.4. Determinación del coeficient k_s de seguridad para la estabilidad de un volumen de falla limitado desde abajo

C.4.1. Suelo homogéneo

De acuerdo con el método de la presión por peso la magnitud $k_s k_s$ en el caso de suelo homogéneo seco debe ser calculada con la ecuación:

$$k_s = \left[r \frac{\sum z}{\sum(zx)} \right] tg\varphi_R + \left[\frac{r}{b\gamma_{sec}} \frac{\sum(\delta s)}{\sum(zx)} \right] c_R \quad (C.21)$$

Donde:

b : ancho de las franjas (fragmentos) verticales, en los cuales para el cálculo se ha dividido el volumen de falla; la magnitud b se adopta constante ($b = const.$).

x : abscisa medida desde el eje vertical Oy hasta el eje vertical de la franja considerada, trazada a través del centro de masa. Para las franjas cuyos ejes verticales están ubicados a la derecha del eje Oy (Figura C.9) el valor de x es negativo.

z : altura media de las franjas (fragmentos) verticales (normalmente esta altura corresponde al punto medio del ancho de la franja).

El segundo cálculo (cálculo de ajuste) de la magnitud $k_s = k_s^t$, referido al volumen previamente establecido de mayor riesgo de falla, cabe realizar en el caso de talud con pendiente pronunciada $m < (2,0 \dots 2,5)$ de acuerdo con las indicaciones dadas en el punto C.3.3, con la ecuación:

$$k_s = \left[r \frac{\sum z}{\sum (zx)} \right] \cdot 1,05 \cos \psi \cdot tg \varphi_R + \left[\frac{r}{b \gamma_{sec}} \frac{\sum (ds)}{\sum (zx)} \right] c_R \quad (C.22)$$

C.4.1.1. Ejemplo y solución

El cuerpo y la base natural de cimentación de un talud están constituidos por suelo homogéneo seco (Figura C.10). Dado: $tg \varphi_R = 0,306$; $c_R = 2 t/m^2$; $\gamma_{sec} = 1,7 t/m^3$. Se requiere encontrar la magnitud del coeficiente de seguridad al corte del volumen de suelo limitado desde abajo por la superficie circular de falla que tiene radio $r = 76 m$.

Se divide el volumen de falla en franjas verticales de ancho b ; se asume la magnitud de $b = 10,0 m$.²

2 La magnitud b cabe adoptar, por ejemplo, $b \approx (1/3 \dots 1/4)Z$, donde Z es la altura del talud.

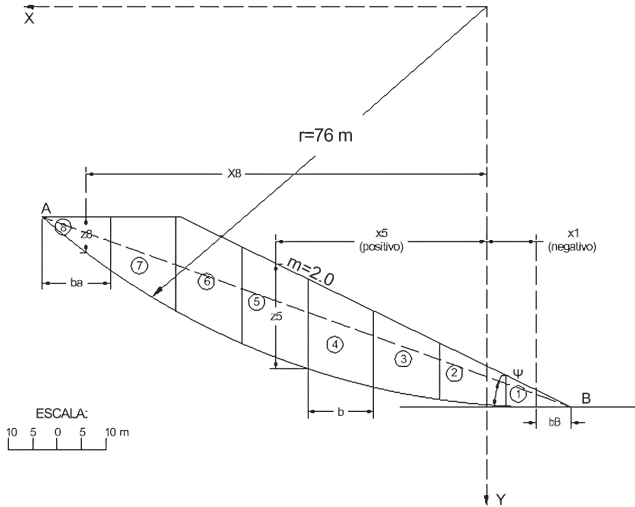


Figura C.10. Determinación geométrica de la superficie crítica mediante el método de rebanadas [superficie circular].

Fuente: Instituto B. E. Venedeeva de Investigaciones Científicas. Moscú (1988). *Criterios para analizar la estabilidad de taludes*. VODGEO.

La mencionada división del volumen deslizante se realiza de tal manera que el eje vertical Oy (ver gráfico) coincida sea con uno de los límites que dividen al volumen deslizante en franjas o con el eje vertical de una de las franjas (como se muestra en la Figura C.10, donde el eje vertical Oy coincide con el eje de la segunda franja vertical)³

El cálculo de k_s con la ecuación (C.21) se colocan en la tabla propuesta C.5. Al final de esta tabla se transcribe la ecuación (C.21) y directamente debajo se determina el valor buscado de k_s .

Al dividir el volumen de falla en franjas verticales de ancho b , en los puntos extremos A y B de dicho volumen normalmente se obtienen *residuos*, es decir, franjas que tienen ancho menor a b ($b_A < b$; $b_B < b$).

3 Al aplicar el método de la presión por peso la numeración de las franjas verticales es cómodo realizar de derecha a izquierda.

Para elaborar la Tabla C.5 los valores de x de dichos *residuos* son determinados de la misma manera que para las otras franjas (como la distancia horizontal desde el eje Oy hasta la vertical trazada a través del centro de masa de cada *residuo*); en lo que respecta a la magnitud z , para las franjas extremas en la Tabla C.5 no se introducen los valores reales de z , sino sus magnitudes ponderadas:

$$(z_{pon})_A = \frac{b_A}{b} z = \frac{6,5}{10} \cdot 5,0 = 3,25 \text{ m}$$

$$(z_{pon})_B = \frac{b_B}{b} z = \frac{7,5}{10} \cdot 3,0 = 2,25 \text{ m}$$

Tabla C.5
Determinación de los parámetros geométricos y sumatorias*
para el cálculo del coeficiente de seguridad en superficie circular
de falla ($r = 76 \text{ m}$)**

Nro. de la columna	Del gráfico, m		zx, m ²	δs, m
	x (positiva o negativa)	z		
1	2	3	4	5
1	-7,5	2,25	-16,9	7,95
2	0	7,0	0	11,30
3	10	11,5	115	9,95
4	20	14,0	280	10,6
5	30	16,5	495	10,6
6	40	15,5	620	11,3
7	50	12,5	625	13,9
8	57	3,25	186	9,95
		Σz = 82,5	Σ(zx) = 2304,1	Σδs = 85,55
* Σz, Σ(zx) y Σδs				
** r = 76 m; b = 10 m; γ _{sec} = 1,7 t/m ³ ; $\frac{r}{b\gamma_{sec}} = \frac{76}{10 \cdot 1,7} = 4,47 \text{ m}^3/\text{m}$				

$$k_s = \left[r \frac{\sum z}{\sum(zx)} \right] tg \varphi_R + \left[\frac{r}{b\gamma_{sec}} \frac{\sum(\delta s)}{\sum(zx)} \right] c_R =$$

$$= \left[76 \frac{82,5}{2304,1} \right] 0,306 + \left[\frac{76}{10,1,7} \frac{85,55}{2304,1} \right] \cdot 2 = 2,680.0306 + 0,166.2 = 1,15$$

En el caso que el volumen de falla considerado fuese el de mayor riesgo, entonces para $m < (2,0 \dots 2,5)$ habría que, en correspondencia con la ecuación (C.22) encontrar el ajuste para el valor k_s . Reemplazando en la ecuación (C.22) los correspondientes valores ya encontrados, la magnitud ajustada de k_s en el presente caso (para $\psi = 0,94$, ver Figura C.10) es igual a:

$$k_s = 2,680.1,05 \cos \psi 0,306 + 0,166.2 = 0,82.1,05.0,94 + 0,332 = 1,14$$

C.4.2. Suelo no homogéneo respecto al peso volumétrico

En el caso de suelo seco no homogéneo respecto a su peso volumétrico, la determinación del coeficiente de seguridad a la estabilidad de un volumen de falla dado cabe realizar con la ecuación (C.21), calculando las magnitudes z que en ella entran con la ecuación

$$z = z' \frac{\gamma'}{\gamma^{bas}} + z'' \frac{\gamma''}{\gamma^{bas}} + z''' \frac{\gamma'''}{\gamma^{bas}} + \dots + z^{(n)} \frac{\gamma^{(n)}}{\gamma^{bas}} \tag{C.23}$$

Donde:

$z', \dots z'', \dots z''', \dots z^{(n)}$: alturas (espesores) de las diferentes capas de suelo con distintos pesos volumétricos ($\gamma', \gamma'', \gamma''', \dots \gamma^{(n)}$) medidas en los ejes de las diferentes franjas verticales en las que ha sido dividido el volumen de falla.

γ^{bas} : magnitud de base, cualquiera de las magnitudes γ con las que se cuenta (sea γ' o γ'' , etc.).

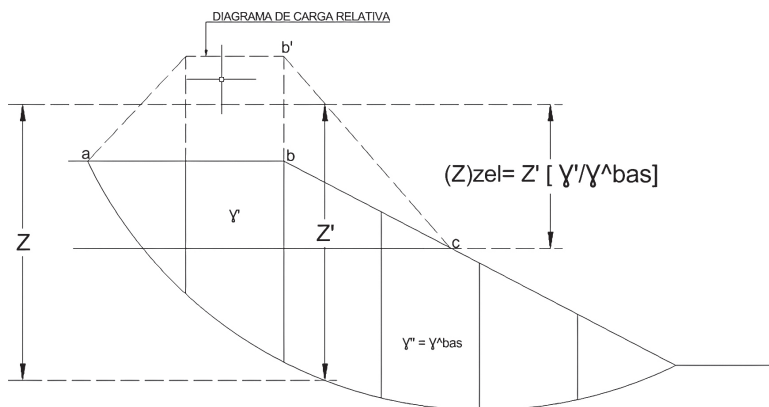


Figura C.II. Diagrama de equivalencia de pesos unitarios.

Fuente: Instituto B. E. Venedeeva de Investigaciones Científicas. Moscú (1988). *Criterios para analizar la estabilidad de taludes*. VODGEO.

Fuente: Instituto B. E. Venedeeva de Investigaciones Científicas. Moscú (1988). *Criterios para analizar la estabilidad de taludes*. VODGEO.

En lo que respecta a la magnitud γ_{sec} que entra en la ecuación (C.21), en el presente caso por esta magnitud se debe tomar el valor γ^{bas} .

En algunos casos, en lugar de aplicar la ecuación (C.23) para determinar las magnitudes z resulta cómodo reemplazar la configuración abc del volumen de falla (Figura C.11) por la configuración $ab'c$ del diagrama de carga relativa construido como se muestra en la figura. Precisamente utilizando dicho diagrama es posible determinar las magnitudes z directamente del gráfico, asumiendo que el peso volumétrico del suelo dentro de los límites de todo el volumen de falla es el mismo (e igual en este caso $\gamma^{bas} = \gamma''$).

C.4.3. Suelo no homogéneo respecto a las magnitudes φ_R y c_R

Se supone que el volumen de falla ha sido dividido en diferentes franjas verticales, de tal manera que dentro de los límites de la base de cada franja, el suelo es homogéneo respecto a: φ_R y c_R .

Las magnitudes φ_R y c_R que entran en las ecuaciones de cálculo se refieren solo a aquel espacio del suelo que se ubica directamente a lo largo del arco de falla. Precisamente estos valores φ_R y c_R deben ser considerados en el cálculo sin interesar los valores φ_R y c_R que se relacionan al suelo alejado del arco de falla.

Los desplazamientos pequeños, de los límites que dividen los espacios de los suelos diferentes, que se asuman con el fin de obtener para el cálculo un suelo homogéneo dentro de los límites de la base de cada franja vertical generalmente no tiene mayor significado (influye poco en el resultado final del cálculo).

En el caso considerado, cada franja vertical se caracteriza por tener un valor de la magnitud φ_R y de la magnitud c_R . Para fines del cálculo, de los dos grupos de las magnitudes: $tg\varphi'_R, tg\varphi''_R, tg\varphi'''_R, \dots$ y $c'_R, c''_R, c'''_R, \dots$, es necesario seleccionar de cada grupo una magnitud (cualquiera) $tg\varphi_R$ y c_R . A estas magnitudes se las denomina de base y se las identifica como $tg\varphi_R^{bas}$ y c_R^{bas} .

De esta manera, la magnitud del coeficiente de seguridad k_s a la estabilidad del volumen de falla dado, en el caso más general de un suelo no homogéneo, cabe determinar con la ecuación (C.21), presentándola con la siguiente forma:

$$k_s = \left[r \frac{\sum(\varepsilon z)}{\sum(zx)} \right] tg\varphi_R^{bas} + \left[\frac{r}{b\gamma_{sec}} \frac{\sum(\mu \cdot \delta s)}{\sum(zx)} \right] c_R^{bas} \quad (C.24)$$

Donde:

$$\varepsilon = \frac{tg\varphi_R}{tg\varphi_R^{bas}} \quad (C.25)$$

$$\mu = \frac{c_R}{c_R^{bas}}$$

Si el suelo es adicionalmente no homogéneo también respecto a γ , la magnitud z que entra en la ecuación (C.24) cabe determinar como

se indica en el numeral C.3.4: sea con la ecuación (C.23), sea como ordenada del diagrama previamente construido de la carga relativa que actúa en el arco de corte del suelo (Figura C.11).

En este caso, la magnitud γ_{sec} en la ecuación (C.24) puede considerarse igual a γ^{bas} .

El recálculo de ajuste de la magnitud $k_s = k_s^{bas}$ referido al volumen ya determinado como de mayor riesgo de corte cabe realizar en el caso de un talud con pendiente considerable $m < (2 \dots 2,5)$ en correspondencia con las indicaciones dadas en el numeral C.3.3, con la ecuación:

$$k_s = \left[r \frac{\Sigma(\varepsilon z)}{\Sigma(zx)} \right] 1,05 \cos \psi \operatorname{tg} \varphi_R^{bas} + \left[\frac{r}{b\gamma_{sec}} \frac{\Sigma(\mu \cdot \delta s)}{\Sigma(zx)} \right] c_R^{bas} \quad (C.26)$$

O para las estructuras de alto nivel de importancia (I, II) con la ecuación:

$$k_s = \left[\frac{\Sigma(\varepsilon zy)}{\Sigma(zx)} \right] \operatorname{tg} \varphi_R^{bas} + \left[\frac{r}{b\gamma_{sec}} \frac{\Sigma(\mu \cdot \delta s)}{\Sigma(zx)} \right] \quad (C.26')$$

Donde y se toma de la Figura C.9 como la distancia vertical desde el eje x hasta el centro de la base de la franja vertical.

C.4.3.1. Ejemplo y solución

El cuerpo y la base natural de cimentación de un talud están formados por suelo no homogéneo. Dada la Figura C.12: $\operatorname{tg} \varphi_R' = 0,268$; $\operatorname{tg} \varphi_R'' = 0,364$; $\operatorname{tg} \varphi_R''' = 0,466$; $c_R' = 2,0 \text{ t/m}^2$; $c_R'' = 1,0 \text{ t/m}^2$; c_R''' ; los pesos volumétricos del suelo: $\gamma' = 1,6 \text{ t/m}^3$, $\gamma'' = 1,8 \text{ t/m}^3$, $\gamma''' = 1,7 \text{ t/m}^3$. Hay que determinar la magnitud del coeficiente k_s de seguridad a la estabilidad del volumen de falla limitado desde abajo por el arco de corte que tiene radio $r = 42,0 \text{ m}$.

En calidad de valores de base de las magnitudes $\operatorname{tg} \varphi_R$, c_R y γ se adopta:

$$\begin{aligned}
 tg\varphi_R^{bas} &= \varphi_R'' = 0,364 \\
 c_R^{bas} &= c_R'' = 1,0 \text{ t/m}^2 \\
 \gamma^{bas} &= \gamma'' = 1,8 \text{ t/m}^3
 \end{aligned}$$

En la Tabla C.6 se calcula conforme a la ecuación (C.23) las magnitudes z para cada franja vertical.⁴

Tabla C.6
Cálculo de espesores transformados en suelo no homogéneo para la determinación de z [en m] equivalente mediante coeficientes γ'/γ^{bas} en cada franja vertical*

Nro. de columna	z'	z''	z'''	$z' \frac{\gamma'}{\gamma^{bas}}$	$z''' \frac{\gamma'''}{\gamma^{bas}}$	$z = z' \frac{\gamma'}{\gamma^{bas}} + z'' + z''' \frac{\gamma'''}{\gamma^{bas}}$
1	2	3	4	5	6	7
1	--	--	1,50	--	1,417	1,417
2	--	--	3,0	--	2,835	2,835
3	--	0,80	3,8	--	3,590	4,390
4	--	3,20	2,60	--	2,458	5,658
5	--	5,50	1,00	--	0,945	6,445
6	--	6,60	--	--	--	6,600
7	1,20	5,00	--	1,067	--	6,067
8	3,60	1,20	--	3,210	--	4,410
9	1,32	--	--	1,175	--	1,175

$$\gamma' = 1,6 \text{ t/m}^3; \quad \gamma'' = 1,8 \text{ t/m}^3; \quad \gamma''' = 1,7 \text{ t/m}^3$$

$$\frac{\gamma'}{\gamma^{bas}} = \frac{1,6}{1,8} = 0,89; \quad \frac{\gamma''}{\gamma^{bas}} = \frac{1,8}{1,8} = 1,0; \quad \frac{\gamma'''}{\gamma^{bas}} = \frac{1,7}{1,8} = 0,945$$

Luego de esto en la Tabla C.7 se calculan las magnitudes $\sum(\varepsilon z)$, $\sum(zx)$ y $\sum(\mu \cdot \delta s)$ que entran en la ecuación (C.24). Por último, al final de la Tabla C.7 con ayuda de la ecuación (C.24) se encuentra la magnitud $k_s = 1,37$.

4 Respecto a las magnitudes b y z (en particular para las franjas extremas) ver las indicaciones hechas en el ejemplo del numeral C.4.1.1.

Adicionalmente, si es que el volumen de falla considerado es el de mayor riesgo, entonces, en el caso de que se tenga la condición $m < (2,0 \dots 2,5)$ (que tiene lugar en el caso considerado) corresponde encontrar con la ecuación (C.26) el ajuste del valor k_s . Reemplazando en la ecuación (C.26) las magnitudes ya encontradas, el ajuste de k_s (en el presente caso, para $\cos\psi = 0,88$, Figura C.12) se obtiene $k_s = 2,54 \cdot 1,05 \cdot \cos\psi \cdot 0,364 + 0,447 \cdot 1,0 = 0,925 \cdot 1,05 \cdot 0,88 + 0,447 = 1,3$. Como se puede ver, el valor reajustado de k_s se diferencia del valor inicialmente obtenido en una magnitud algo mayor del 5 %.

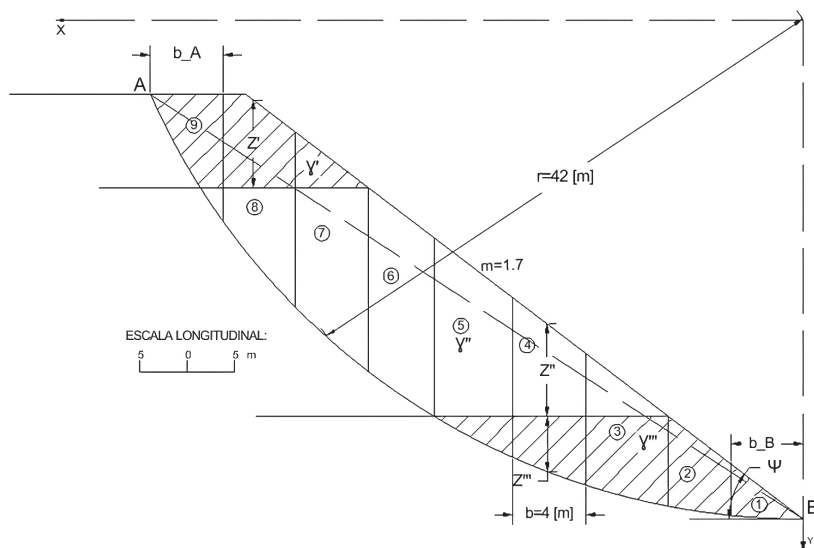


Figura C.12. Modelo geométrico del método de las dovelas con materiales heterogéneos y superficie circular de falla ($r = 42$ m).

Fuente: Instituto B. E. Venedeeva de Investigaciones Científicas. Moscú (1988). *Criterios para analizar la estabilidad de taludes*. VODGEO.

Tabla C.7
 Determinación de las magnitudes* para el cálculo del coeficiente de seguridad k_s en talud no homogéneo (superficie circular de falla)**

Nro. de columna	Del gráfico y tabla C.6		zx	$tg\psi_R$	$\varepsilon = \frac{tg\varphi_R}{tg\varphi^{bas}}$	εZ	$\frac{C_R}{t/m^2}$	$\mu = \frac{c_R}{c_R^{bas}}$	$\delta s, m$	$\mu \cdot \delta s$
	$\pm X, m$	z, m								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2,8	1,417	3,97	0,466	1,28	1,815	1,5	1,5	4,00	6,00
2	6,0	2,835	17,00	0,466	1,28	3,630	1,5	1,5	4,05	6,10
3	10,0	4,390	43,90	0,466	1,28	5,620	1,5	1,5	4,10	6,15
4	14,0	5,658	79,40	0,466	1,28	7,250	1,5	1,5	4,30	6,45
5	18,0	6,445	115,90	0,466	1,28	8,250	1,5	1,5	4,50	6,75
6	22,0	6,600	145,20	0,364	1,00	6,600	1,0	1,0	4,80	4,80
7	26,0	6,067	157,70	0,364	1,00	6,067	1,0	1,0	5,20	5,20
8	30,0	4,410	132,20	0,268	0,736	0,449	2,0	2,0	1,30	2,60
9	32,8	1,175	38,6	0,268	0,736	0,865	2,0	2,0	3,80	7,60
			733,87			44,366				56,25
$\ast \sum(zx), \sum(\varepsilon Z), \sum(\mu \delta s)$ $\ast\ast r=42,0 m; b=4,0 m; tg\varphi_R^{bas}=0,364; c_R^{bas}=1,0$ $t/m^2; \gamma_{sec} = \gamma^{bas} = 1,8 t/m^3; \frac{r}{b\gamma_{sec}} = \frac{r}{b\gamma^{bas}} = \frac{42,0}{4 \cdot 1,8} = 5,83 m^3/t$										

$$k_s = \left[42,0 \frac{44,366}{7,33,87} \right] 0,364 + \left[5,83 \frac{56,25}{733,97} \right] 1,0 = 2,54 \cdot 0,364 + 0,447 = 0,925 + 0,447 = 1,37$$

Para las estructuras de alto nivel de importancia (I, II) la magnitud k_s cabe determinar con la ecuación (C.26'). Ejecutando con dicha ecuación los cálculos requeridos es necesario construir en correspondencia con la ecuación (C.26') una tabla de cálculo adicional. Esta tabla se diferencia de la Tabla C.7 por la presencia de una columna vertical adicional (columna 4). Además, en lugar de la columna εZ (columna 7) es necesario en la tabla relativa a la ecuación (C.26') tener la columna $\varepsilon \gamma$.

El cálculo de k_s con la ecuación (C.26') en este caso da un valor $k_s = 1,26$; cómo se puede apreciar, el valor obtenido con el ajuste realizado se diferencia del resultado inicialmente obtenido de 1,37 en un 9 %.

C.5. Determinación del coeficiente k_s de seguridad para la estabilidad de un volumen cualquiera de falla al corte

C.5.1. Criterios generales para considerar las fuerzas de filtración por el método de las superficies cilíndrico circulares de corte

En el caso de que el suelo dentro de los límites de algún espacio del volumen de falla considerado esté saturado de agua, el coeficiente k_s de seguridad a la estabilidad del volumen de falla mencionado debe ser determinado con la ecuación (C.18) en el caso de que se aplique el método de la presión por peso.

Para el efecto, independientemente del carácter del flujo de filtración que se presenta en el caso incompresibilidad del esqueleto del suelo (independientemente de la forma de las líneas de flujo, de la dirección del flujo, etc.), cabe cumplir los siguientes criterios para determinar los momentos M_{des} y M_{res}^t que intervienen en la ecuación (C.18).

C.5.1.1. Criterios para determinar el momento deslizando M_{des}

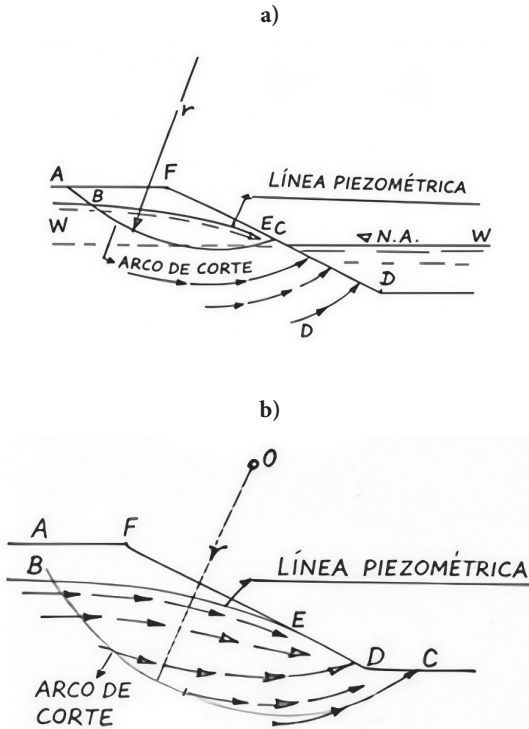
Primer criterio. Cuando el límite exterior del volumen de falla no es mojado por el agua del tramo (Figura C.13), la magnitud M_{des} es exactamente igual a la suma de dos momentos (respecto al punto O) de los pesos de los siguientes cuerpos que se encuentran dentro de los límites del volumen de falla:

- Del suelo seco ubicado sobre la línea piezométrica.
- Del suelo saturado ubicado bajo la línea piezométrica y que tiene peso volumétrico γ_{sat} , expresado por la ecuación (C.2).

Segundo criterio. Cuando el límite exterior del volumen de falla es mojado por el agua del tramo y la línea piezométrica se ubica sobre la horizontal W-W trazada en la cota del nivel de agua del tramo aguas

abajo (Figura C.14), la magnitud M_{des} es exactamente igual a la suma de tres momentos (respecto al centro O) de los pesos de los siguientes cuerpos que se encuentran dentro de los límites del volumen de falla:

- Del suelo seco, ubicado sobre la línea piezométrica.
- Del suelo saturado, ubicado entre la línea piezométrica y la horizontal W-W.
- Del suelo sumergido, ubicado bajo la horizontal W-W (el peso volumétrico del suelo sumergido ver ecuación (C.1)).⁵



5 En el caso que el punto A de inicio del círculo de corte se encuentre bajo agua del tramo, como se muestra en la figura C.14, c, entonces es necesario considerar además un cuarto momento (respecto al centro O): el momento del agua en el volumen ABM.

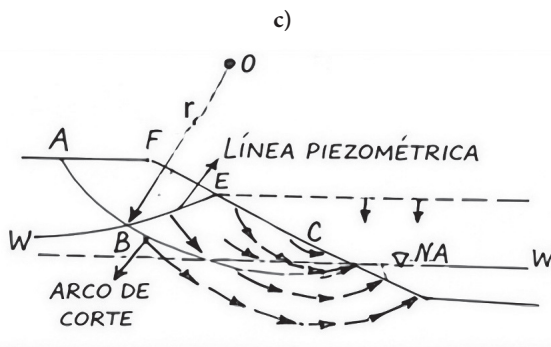


Figura C.13. Influencia de la línea piezométrica en la estabilidad del talud.
 a- flujo emergente con línea piezométrica alta; b- flujo aproximadamente paralelo al talud c- descenso de la línea piezométrica.

Fuente: los autores.

Tercer criterio. Cuando el límite externo del volumen de falla es mojado por el agua del tramo y la curva piezométrica se ubica bajo la horizontal W-W (Figura C.15), la magnitud de M_{des} es exactamente igual a la suma de tres momentos (en relación al centro O) de los pesos de los tres siguientes cuerpos que se encuentran dentro de los límites del volumen de falla:

Del suelo seco ubicado sobre la línea piezométrica.

Del suelo sumergido ubicado bajo la línea piezométrica.

Del agua imaginaria que llena totalmente el volumen MEBM que se encuentra entre la línea piezométrica y la horizontal W-W. Este último momento cabe considerar negativo.

C.5.1.2. Criterios para determinar el momento resistente

Cuando se aplica el método de presión por peso, el momento de las fuerzas de fricción que actúan en el arco de corte del suelo, cabe siempre calcular bajo la premisa que el suelo ubicado bajo la línea piezométrica se encuentra en estado de sumersión y que las fuerzas de filtración no están presentes.

Por un lado, investigaciones especiales demuestran que las fuerzas de filtración en el caso de los flujos de filtración normales pueden substancialmente influir solo en la magnitud de M_{des} , en tanto que la magnitud de M_{res}^t prácticamente no depende de la magnitud de las fuerzas de filtración.

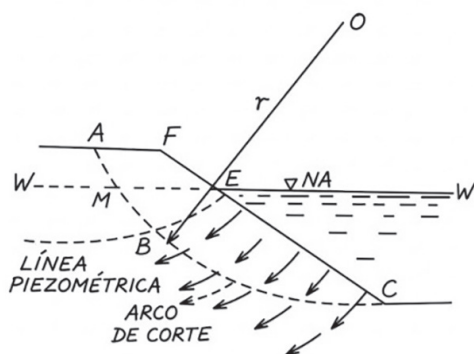


Figura C.15. Corrección por presión intersticial excedente en el método de las dovelas. Fuente: los autores.

Por otro, en correspondencia con la ecuación original (C.18), fácilmente puede ser considerada en el cálculo de k_s la denominada presión de poros excedente p_{exc} , determinada por la consolidación del suelo (únicamente si es conocida la magnitud de esta presión excedente). Para el efecto, es suficiente en el cálculo de M_{res}^t con la ecuación (C.16) disminuir el peso δG que entra en dicha ecuación, en la magnitud: $\delta W = bp_{exc}$, donde p_{exc} se determina como la diferencia de la presión real del agua en los poros (actuante en la región de la base de la

franja vertical considerada) y de aquella presión que está determinada por el punto de la línea piezométrica que corresponde a la base de dicha franja (sobre la magnitud b , ver el numeral C.3.3).

C.5.2. Suelo homogéneo

Para un suelo homogéneo saturado de agua (en movimiento o en reposo) dentro de los límites de alguna parte del volumen de falla, el coeficiente de seguridad a la estabilidad de dicho volumen, en concordancia con los criterios indicados en el numeral C.3.6 cabe determinar de acuerdo con la ecuación (C.21), la misma que para este caso debe ser formulada con la siguiente presentación:

$$k_s = \left[r \frac{\Sigma H_1}{\Sigma(H_2x)} \right] tg \varphi_R + \left[\frac{r}{b\gamma_o} \frac{\Sigma(\delta s)}{\Sigma(H_2x)} \right] c_R \quad (C.27)$$

Donde los significados de r , b , x , δs , Σ son los mismos que en el numeral C.3.3 y la magnitud H_1 es igual a:

$$H_1 = \Delta_{sec} Z_1 + \Delta_{sum} Z_2 \quad (C.28)$$

Donde:

Δ_{sec} : peso relativo del suelo seco:

$$\Delta_{sec} = \frac{\gamma_{sec}}{\gamma_o} \quad (C.29')$$

Δ_{sum} : peso relativo del suelo sumergido:

$$\Delta_{sum} = \frac{\gamma_{sum}}{\gamma_o} \quad (C.29'')$$

Z_1 : altura media de la parte seca ubicada sobre la línea piezométrica, en una franja vertical (Figuras C.6 y C.7).

Z_2 : altura media de la parte saturada ubicada bajo la línea piezométrica, en una franja vertical.

En lo que respecta a la magnitud H_2 , esta depende de dos casos:

En el caso cuando *no hay agua en el tramo aguas abajo* frente al talud o cuando el nivel de agua en dicho tramo se ubica bajo el punto C de salida al talud del círculo de falla (el límite externo del volumen de falla no es mojado por el agua, Figura C.6), entonces:

$$H_2 = H_1 + z_2 \quad (\text{C.30})$$

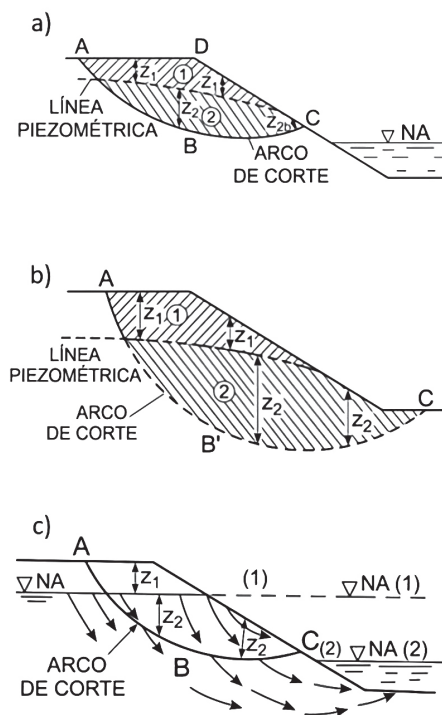


Figura C.16. Determinación geométrica de las zonas saturadas y no saturadas en el análisis de estabilidad con superficie circular.

a- línea piezométrica que intersecta parcialmente el talud; b- línea piezométrica más profunda; c- diferentes niveles de agua (NA1 y NA2).

Fuente: Instituto B.E. Venedeva de Investigaciones Científicas, Moscú (1988). Criterios para analizar la estabilidad de taludes. VODGEO.

En el caso cuando *la superficie del talud es mojada por el agua del tramo* dentro de los límites del volumen de falla, es decir, cuando el nivel del agua frente al talud se ubica sobre el ya referido punto C (Figura C.17), entonces:

$$H_2 = H_1 + z_3 \tag{C.31}$$

Donde:

z_3 : altura media de aquella parte de la franja vertical que se ubica entre la línea piezométrica y la horizontal W-W que es la continuación del nivel de agua en el tramo aguas abajo.

Cuando la parte indicada de la franja vertical está saturada de agua (Figura C.7, a, b) la magnitud z_3 cabe considerar positiva; caso contrario (cuando la parte indicada de la franja vertical está seca, Figura C.7c), z_3 cabe considerar negativa.

El recálculo para ajustar la magnitud $k_s = k_s^t$, relativa al talud ya identificado como de mayor riesgo al corte, en el caso de talud con pendiente pronunciada $m < (2,0 \dots 2,5)$, cabe ejecutaren correspondencia con las indicaciones del numeral C.3.2, con la ecuación:

$$k_s = \left[r \frac{\Sigma H_1}{\Sigma(H_2, x)} \right] \cdot 1,05 \cos \psi \cdot tg \varphi_R + \left[\frac{r}{b \gamma_o} \frac{\Sigma \delta s}{\Sigma(H_2, x)} \right] C_R \tag{C.32}$$

Donde:

ψ : ángulo de inclinación respecto a la horizontal de la cuerda que une los extremos del arco de corte del suelo.

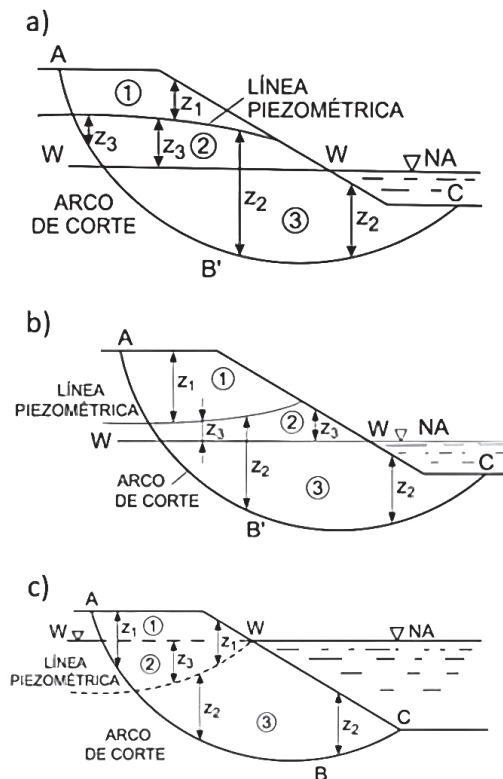


Figura C.17. Configuraciones hidráulicas del talud y corrección del factor de estabilidad k_s mediante la incorporación del término z_3 .

Fuente: Instituto B. E. Venedeeva de Investigaciones Científicas. Moscú (1988). *Criterios para analizar la estabilidad de taludes*. VODGEO.

C.5.2.1. Ejemplo y solución

El cuerpo y la base natural de cimentación de un talud están formados por un suelo homogéneo (Figura C.8). Bajo la línea piezométrica dada el suelo está saturado por agua en movimiento. Sobre la línea piezométrica el suelo es seco. Dado: $tg\varphi = 0,364$; $c_R = 3,0 t/m^2$; $\gamma_{sec} = 1,7 t/m^3$; $n = 0,4$, hay que determinar la magnitud del coeficiente k_s de seguridad a la estabilidad del volumen de suelo limi-

tado desde abajo por el círculo dado de corte ABC , que tiene radio $r = 58,5$ m.

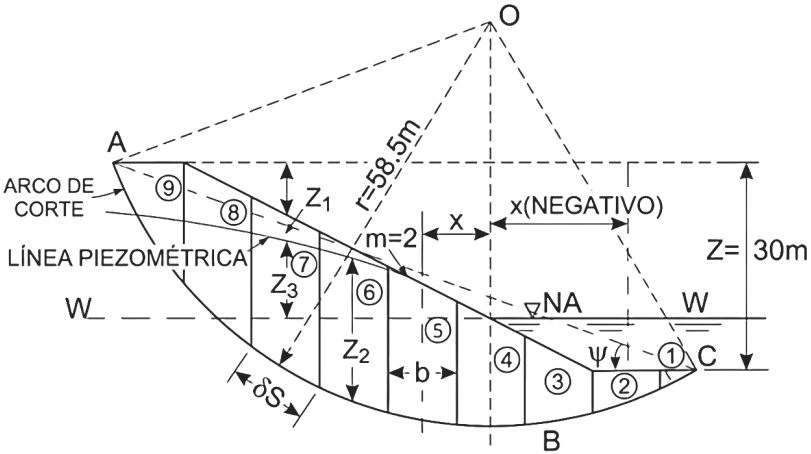


Figura C.18. Esquema geométrico del análisis de estabilidad de un talud homogéneo con línea piezométrica y superficie circular de falla ABC para el cálculo del coeficiente de seguridad k_s .

Fuente: los autores.

Despreciando el peso del agua capilar ubicada sobre la línea piezométrica, se considera que el peso volumétrico del suelo (Ecuación C.1) es igual a: $\gamma_{sum} = 1,7 - (1 - 0,4)1,0 = 1,1 \text{ t/m}^3$.

A continuación, el cálculo se ejecuta con la ecuación (C.27) y todas las operaciones se presentan en la Tabla C.8. Al final de la tabla se determina la magnitud buscada k_s .

Tabla C.8
 Determinación de las magnitudes* para el cálculo del coeficiente de seguridad k_s en talud con influencia de línea piezométrica (según ecuaciones C.30 y C.31)**

Nro. de columna	Desde el gráfico, m				$\Delta_{sec}Z_1$	$\Delta_{sum}Z_2$	$H_1 = \Delta_{sec}Z_1 + \Delta_{sum}Z_2$	$H_2 = H_1 + Z_3$	H_{2x}	$\delta s, m$
	X positivo o negativo	Z_1	Z_2	Z_3 positivo o negativo						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-27,5	--	0,75	--	--	0,83	0,83	0,83	-22,6	12,3
2	-20,0	--	4,5	--	--	4,95	4,95	4,95	-99,0	11,2
3	-10,0	--	10,0	--	--	11,0	11,0	11,0	-110	10,2
4	0	--	15,5	--	--	17,1	17,1	17,1	0	10,2
5	10,0	0,5	20,0	5,0	0,85	22,0	22,85	27,85	278,5	10,2
6	20,0	1,5	20,5	8,5	2,55	22,60	25,15	33,65	672,1	11,2
7	30,0	3,5	19,0	11,5	5,95	20,90	26,85	38,35	1150,35	12,3
8	40,0	7,0	13,5	13,5	11,90	14,85	26,75	40,25	1610,0	13,3
9	50,0	7,5	2,5	2,5	12,75	2,75	15,50	18,00	900,0	18,4

* H_1, H_2, H_{2x} y $\sum \delta s$
 ** $r = 58,5 m; b = 10,0 m; \Delta_{sec} = \frac{y_{sec}}{y_o} =$

$$k_s = \left[58,5 \frac{161,0}{4379,0} \right] tg \varphi_R + \left[5,85 \frac{109,3}{4379,0} \right] c_R = 2,15 tg \varphi_R + 0,146 c_R = 2,15 \cdot 0,364 + 0,146 \cdot 3 = 1,22$$

- La forma de la tabla en los casos mostrados en las Figuras C.13 y C.16 se simplifica:⁶ desaparece la columna 5 y en la columna 9 en lugar de $H_2 = H_1 + H_3$ debe aparecer $H_2 = H_1 + z_2$.
- Sobre las magnitudes b y z (en particular para las columnas de los extremos) hay que revisar las indicaciones del numeral C.4.1.1.

6 Es decir, en el caso cuando el arco de corte se extiende sobre el nivel de agua en el tramo aguas abajo o cuando no hay agua frente al talud.

- El valor de k_s calculado con la ecuación (C.32) (para $\cos \psi = 0,96$, Figura C18) es igual a:

$$k_s = 2,15 \cdot 1,05 \cdot \cos \psi \cdot 0,364 + 0,146 \cdot 3 = 0,783 \cdot 1,05 \cdot 0,96 + 0,438 = 1,23 \cdot$$

C.5.3. Suelo no homogéneo respecto a su peso volumétrico

Para un suelo saturado de agua en reposo o movimiento, no homogéneo respecto a la magnitud del peso volumétrico, el coeficiente k_s de seguridad a la estabilidad de un volumen de falla arbitrariamente dado cabe determinar con la ecuación (C.27) o (C.32), pero calculando H_1 no con la ecuación (C.28), sino con la siguiente expresión:

$$H_1 = (\Delta'_{sec} z'_1 + \Delta''_{sec} z''_1 + \Delta'''_{sec} z'''_1 + \dots) + (\Delta'_{sum} z'_2 + \Delta''_{sum} z''_2 + \Delta'''_{sum} + \dots) \quad (C.33)$$

En la Figura C.19, están indicados los símbolos correspondientes para una franja vertical:

$$\left. \begin{aligned} z'_1 + z''_1 + z'''_1 + \dots &= z_1; \\ z'_2 + z''_2 + z'''_2 + \dots &= z_2 \\ \Delta'_{sec} &= \frac{\gamma'_{sec}}{\gamma_o}; \Delta''_{sec} = \frac{\gamma''_{sec}}{\gamma_o} \dots; \\ \Delta'_{sum} &= \frac{\gamma'_{sum}}{\gamma_o}; \Delta''_{sum} = \frac{\gamma''_{sum}}{\gamma_o} \dots \end{aligned} \right\} \quad (C.34)$$

Las restantes identificaciones están en las ecuaciones (C.27 y C.32) al igual que para un suelo homogéneo. En particular, respecto a la magnitud H_2 cabe suponer sea la magnitud (C.30) o en los casos correspondientes la magnitud (C.31).

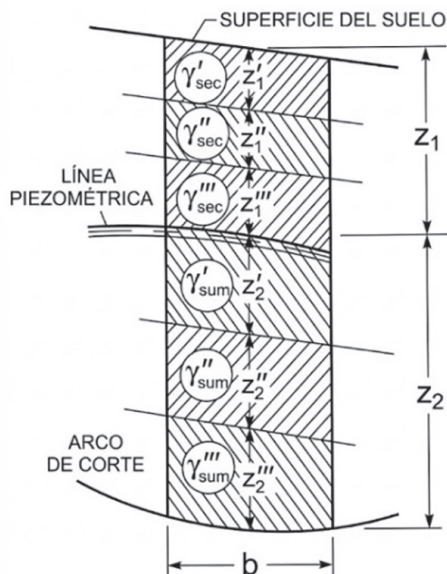


Figura C.19. Esquema de subdivisión de una franja vertical en capas con diferentes pesos volumétricos (γ_{sec} y γ_{sum}) para la evaluación de H_1 .

Fuente: los autores.

C.5.4. Suelo no homogéneo respecto a φ_R y c_R

En caso de que el suelo esté saturado de agua (en reposo o movimiento), para calcular el coeficiente k_s del volumen de falla dado cabe proceder como está indicado en el numeral C.3.5 (respecto al caso de suelo seco). Solo que, en este caso, en lugar de la ecuación de cálculo (C.24) hay que utilizar la siguiente expresión:

$$k_s = \left[r \frac{\sum(\varepsilon H_1)}{\sum(H_2 x)} \right] tg \varphi_R^{bas} + \left[\frac{r}{b \gamma_o} \frac{\sum(\mu \delta s)}{\sum(H_2 x)} \right] c_R^{bas} \quad (C.35)$$

En este caso, las expresiones ε y μ están en la ecuación (C.25), mientras las magnitudes H_2 y H_2 están expresadas en las ecuaciones (C.28 y C.31).

Si el suelo, adicionalmente, es no homogéneo también respecto a γ , entonces, la magnitud H_1 , que entra en la ecuación (C.35), hay que determinar para cada una de las franjas verticales, con la ecuación (C.33).

El recálculo (de ajuste) de la magnitud $k_s = k_s^t$, referido al volumen de falla ya identificado como el de mayor riesgo, se puede calcular en el caso de un talud con pendiente pronunciada, $m < (2,0 \dots 2,5)$, en correspondencia con las indicaciones del numeral C.3.2, con la ecuación:

$$k_s = \left[r \frac{\sum(\varepsilon H_1)}{\sum(H_2 x)} \right] 1,05 \cdot \cos \psi \cdot tg \varphi_R^{bas} + \left[\frac{r}{b \gamma_o} \frac{\sum(\mu \cdot \delta s)}{\sum(H_2 x)} \right] c_R^{bas} \quad (C.36)$$

O para las estructuras de alto nivel de importancia (I, II) con la ecuación:

$$k_s = \left[\frac{\sum(\varepsilon H_1 y)}{\sum(H_2 x)} \right] tg \varphi_R^{bas} + \left[\frac{r}{b \gamma_o} \frac{\sum(\mu \cdot \delta s)}{\sum(H_2 x)} \right] c_R^{bas} \quad (C.36')$$

En este caso, y se adopta del dibujo del talud (Figura C.9), como la distancia vertical desde el eje x hasta el centro de la base de la franja vertical considerada.

C.5.4.1. Ejemplo y solución

El cuerpo y la base de un talud están constituidos por suelo no homogéneo (Figura C.20). Bajo la línea piezométrica el suelo está saturado de agua en movimiento a gravedad. Bajo la línea piezométrica el suelo no está saturado con agua en movimiento (suelo seco). Dado: $tg \varphi_R' = 0,250$; $tg \varphi_R'' = 0,466$; $tg \varphi_R''' = 0,364$; $c_R' = 2,0 \text{ t/m}^2$; $c_R'' = 3,0 \text{ t/m}^2$; $c_R''' = 2,0 \text{ t/m}^2$; $\gamma_{sec}' = 1,65 \text{ t/m}^3$; $\gamma_{sec}'' = 1,75 \text{ t/m}^3$; $\gamma_{sum}'' = 1,10 \text{ t/m}^3$; $\gamma_{sum}''' = 1,0 \text{ t/m}^3$. Hay que determinar la magnitud del coeficiente k_s de seguridad a la estabilidad de un volumen de suelo limitado desde abajo por un arco dado de corte que tiene radio $r = 60,0 \text{ m}$.

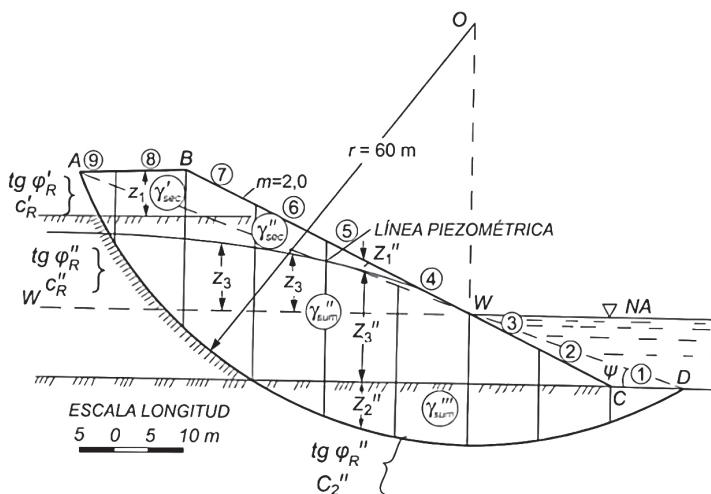


Figura C.20. Esquema geométrico para el cálculo del coeficiente de seguridad k_s en talud estratificado con diferentes parámetros resistentes y pesos volumétricos, bajo condiciones de flujo subterráneo.

Fuente: los autores.

En calidad de las magnitudes de base $tg \varphi_R$ y c_R , se asume:
 $tg \varphi_R^{bas} = tg \varphi'_R = 0,250$; $c_R^{bas} = c'_R = 2,0 \text{ t/m}^2$.

A continuación, en la Tabla C.9, se determina, de acuerdo con la ecuación (C.33), las magnitudes H_1 para cada franja vertical. Luego de esto, en la Tabla C.10, se calculan las magnitudes $\sum(\varepsilon H_1)$, $\sum(H_2 x)$ y $\sum(\mu \cdot \delta s)$ que forman parte de la ecuación (C.35). Finalmente, bajo la Tabla C.10 con la ecuación (C.35) se determina el valor de k_s .

Tabla C.9
 Cálculo de H_1 en suelo no homogéneo mediante contribuciones $\Delta_{sec}Z_1$ y $\Delta_{sum}Z_2$ por estratos [según ecuación C.33]*

Nro. de columna	Tomar desde el dibujo, m				$\Delta'_{sec}Z'1$	$\Delta''_{sec}Z''1$	$\Delta'''_{sum}Z'''2$	$\Delta''''_{sum}Z''''2$	H_1 m
	Z'_1	Z''_1	Z'_2	Z''_2					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	--	--	--	2,5	--	--	--	2,5	2,50
2	--	--	2,5	6	--	--	2,76	6	8,76
3	--	--	7,5	8	--	--	8,25	8	16,25
4	--	--	12,5	8	--	--	13,75	8	21,75
5	--	1,5	16,0	6	--	2,63	17,6	6	26,29
6	--	4,0	18,5	2,5	--	7,00	20,4	2,5	29,90
7	4,0	4,0	16,0	--	6,4	7,00	17,6	--	31,00
8	6,5	3,0	8,0	--	10,4	5,25	8,8	--	24,45
9	3,9	0,9	--	--	6,25	1,58	--	--	7,83

* $\Delta'_{sec} = \frac{\gamma'_{sec}}{\gamma_o} = \frac{1,6}{1,0} = 1,6$, $\Delta''_{sec} = \frac{\gamma''_{sec}}{\gamma_o} = \frac{1,75}{1,0} = 1,75$
 $\Delta''_{sum} = \frac{\gamma''_{sum}}{\gamma_o} = \frac{1,1}{1,0} = 1,1$, $\Delta'''_{sum} = \frac{\gamma'''_{sum}}{\gamma_o} = \frac{1,0}{1,0} = 1,0$

La forma de la Tabla C.10 en los casos mostrados en las Figuras C.13 y C.16, cuando para determinar H_2 en lugar de la ecuación (C.31) se utiliza la ecuación (C.30), se modifica parcialmente: primero, en la columna 4, en lugar de Z_3 se escribe las magnitudes $Z_2 = Z'_2 + Z''_2$; segundo, en la columna 5 la magnitud H_2 se determina con la ecuación: $H_2 = H_1 + Z_2$.

Respecto a las magnitudes b y z (en particular para las franjas verticales extremas) hay que seguir las indicaciones del numeral C.4.1.1.

Finalmente, el valor de k_s calculado con la ecuación (C.36) (para $\cos\psi = 0,96$, Figura C.20) es igual a:

$$k_s = 3,44 \cdot 1,05 \cdot \cos\psi \cdot 0,250 + 0,152 \cdot 2 = 0,858 \cdot 1,05 \cdot 0,96 + 0,304 = 1,17$$

El valor de k_s calculado con la ecuación (C.36') es igual a 1,14. Este valor de k_s es calculado con apoyo de otra tabla (no está inclui-

da en este texto) estructurada de forma análoga a la de la Tabla C.10 (al formato de la Tabla C.10 es necesario añadir una columna 5 para la magnitud y , pero, además, en lugar de la columna para las magnitudes εH_1 incluir una columna para las magnitudes $\varepsilon H_1 y$).

Tabla C.10

Determinación de H_2 , H_2^x , $\sum(\varepsilon H_1)$ y $\sum(\mu \delta s)$ para el cálculo del coeficiente de seguridad k_s en talud no homogéneo con influencia de línea pi-zométrica [según ecuaciones C.31 y C.32]*

Nro. de columna	H_1 , m de la Tabla C.9	Desde el dibujo	$H_2 = H_1 + Z_3$	$H_2 X$	$tg \phi r$	$\varepsilon = \frac{tg \phi_R}{tg \phi_R^{bas}}$	εH_1	$\frac{c_R}{m'}$	$\mu = \frac{c_R}{c_R^{bas}}$	δs m	$\mu \delta s$	
		X	Z_3									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	2,50	-25	--	2,50	-62,5	0,364	1,45	3,63	2,0	1,0	10,50	10,50
2	8,76	-15	--	8,76	-133	0,364	1,45	12,7	2,0	1,0	10,50	10,50
3	16,25	-5	--	16,25	-81,5	0,364	1,45	23,6	2,0	1,0	9,45	9,45
4	21,75	5	2,5	24,25	123	0,364	1,45	31,6	2,0	1,0	9,45	9,45
5	26,29	15	6	32,29	485	0,364	1,45	38,2	2,0	1,0	9,45	9,45
6	29,90	25	8	37,90	950	0,466	1,86	43,4	3,0	1,5	11,50	17,30
7	31,00	35	9,5	40,50	1420	0,466	1,86	45,5	3,0	1,5	14,70	22,10
8	24,45	45	8	32,45	1460	0,466	1,86	6,25	3,0	1,5	5,25	7,90
9	7,83	52	--	7,83	407	0,250	1,00	2,94	2,0	1,0	7,31	7,34

* $r = 60 \text{ m}$; $b = 10 \text{ m}$; $tg \phi_R^{bas} = 0,250$; $c_R^{bas} = 2,0 \text{ t/m}^2$; $\frac{r}{b \gamma_o} = \frac{60}{10 \cdot 1} = 6 \text{ m}^3/\text{t}$

$$\Sigma = 4568$$

$$\Sigma = 265,42$$

$$\Sigma = 115,49$$

$$k_s = \left[60 \frac{265,42}{4568} \right] tg \phi_R^{bas} + \left[6 \frac{115,49}{4569} \right] c_R^{bas} = 3,44 \cdot 0,250 + 0,152 \cdot 2 = 1,17$$

C.5.5. Caso de un tanque de carga ubicado sobre la cresta del talud

En el caso de que un tanque de carga esté ubicado en la cresta de un talud de tierra (Figuras C.21 y C.22), la magnitud del coeficiente de seguridad K_s al corte de un volumen deslizando arbitrario, limitado desde abajo por una superficie circular de falla, cabe determinar con ayuda de la ecuación (18):

$$k_s = \frac{M_{res}^t}{M_{des}} = \frac{M_f^o + r \sum (\delta s \cdot c_R)}{M_{des}} \quad (C.37)$$

Donde:

M_f^o : momento de las fuerzas de fricción actuantes a lo largo del círculo de corte.

Ambos momentos: M_f^o y M_{des} deben ser determinados de la siguiente manera:

El momento de las fuerzas de fricción (Figura C.21):

$$M_f^o = r(Q + G_{sec} + G_{sum} + W')tg\phi_R \quad (C.38)$$

Donde:

Q : suma de las fuerzas verticales actuantes en la estructura de hormigón (tanque de presión): peso propio de la estructura, subpresión actuante en la base de la estructura y otras); en el caso del esquema de la Figura C.21b), en el que existe ausencia de contacto del flujo de filtración con la base de la estructura, la subpresión es igual a cero.

G_{sec} : peso del suelo seco ubicado sobre la línea piezométrica, en el caso de que esta se presente en el cuerpo del talud analizado; para el esquema de la Figura C.21a la fuerza $G_{sec} = 0$.

G_{sum} : peso del suelo sumergido dentro de los límites del volumen de deslizamiento (bajo la línea piezométrica en el caso de que esta esté presente en el cuerpo del talud).

W' : Fuerza que comprime la carpeta contra el suelo de cimentación (diferencia de presiones sobre la carpeta desde arriba y abajo).

El Momento deslizando (Figura C.22):

$$M_{des} = M_{A_s} + M_{EHS} + M_{G_{sec}} + M_{G_{SAT}} \quad (C.39)$$

A través de M se identifican los momentos (respecto al centro O del círculo de corte) de las siguientes fuerzas:

A_S : peso del agua en el tramo aguas arriba, dentro el volumen limitado por el arco ab , que es la continuación de la superficie circular de corte; en este peso debe incluirse también el peso del agua que llena la estructura de hormigón.

EH_S : Fuerza externa que actúa en la estructura de hormigón, calculada sin considerar la presión del agua sobre la estructura, en particular sin considerar la subpresión (por ejemplo, el peso de la estructura).

G_{SEC} : peso del “suelo seco” ubicado sobre la línea piezométrica (en caso de que esta se presente en el cuerpo del talud; ver Figura C.22b); para el esquema de la figura 22, a) la fuerza $G_{SEC} = 0$.

G_{SAT} : peso del suelo saturado ubicado dentro de los límites del volumen deslizando (bajo la línea piezométrica en el caso de esta se presente en el cuerpo del talud); el peso volumétrico del suelo saturado se determina con la ecuación (C.2).

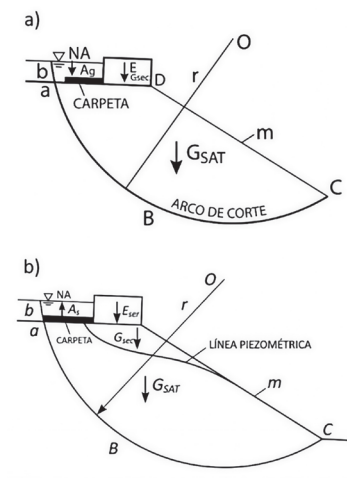


Figura C.21. Análisis de estabilidad de talud con tanque de carga en la cresta.

Fuente: los autores.

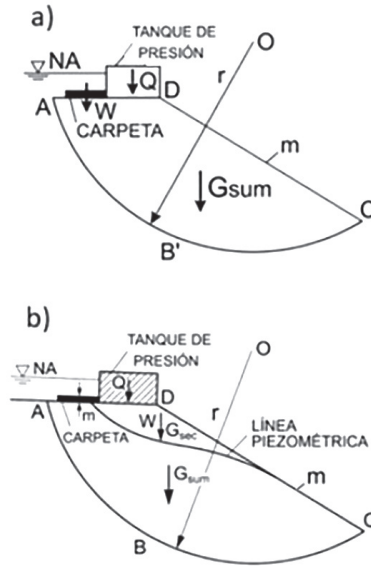


Figura C.22. Esquemas para la evaluación de los pesos del suelo seco (G_{sec}) y del suelo saturado (G_{SAT}).

Fuente: los autores.

En caso de ausencia de agua, las correspondientes ecuaciones de cálculo se obtienen a partir de las expresiones (C.38 y C.39) colocando en ellas:

$$G_{sum} = W' = A_S = G_{SAT} = 0 \tag{C.40}$$

Por otro lado, la no homogeneidad del suelo en los cálculos con la ecuación (C.37) debe ser considerada de acuerdo con las indicaciones formuladas en los acápites precedentes. De igual manera, de acuerdo con las indicaciones de los acápites precedentes en los casos correspondientes es necesario aplicar o el coeficiente corrector igual a $1,05 \cos \psi$ o una ecuación semejante a la ecuación (C.36').

Asimismo, para calcular el peso de la estructura de hormigón cabe tomaren cuenta los correspondientes coeficientes de sobrecarga establecidos en las normas o especificaciones.

En el caso considerado se tiene un problema tridimensional sobre la estabilidad de un talud, sobre el que actúa el peso de un tanque de presión. Por cuanto el problema dado condicionalmente se ha resuelto como bidimensional (plano), entonces, la magnitud del coeficiente permisible de seguridad $(k_s^o)_{PER}$ en el caso considerado puede ser en algo disminuido.

Simultáneamente, con el cálculo descrito de la estabilidad del talud cargado desde arriba por un tanque de carga, en el caso dado es necesario complementariamente analizar la estabilidad de la misma estructura de hormigón (tanque de carga), respecto a la superficie de corte ubicada en la superficie de cimentación del tanque (es posible también considerar el arrastre de volúmenes del suelo de cimentación). En este caso, el coeficiente de seguridad al deslizamiento del tanque de presión cabe calcular con la ecuación (C.17).

Una presa de hormigón cimentada en suelo (Figura C.23) puede ser considerada como un caso particular de un tanque de carga (cuando $m = \infty$). Para calcular la estabilidad de una presa de hormigón por el método de las superficies cilíndrico circulares de corte, cuando:

$$\frac{a}{L_o} \leq (0,15 \dots 0,20) \quad (C.41)$$

Donde las dimensiones a y L_o están indicadas en la Figura C.23, cabe aplicar el método de la presión por peso (C.11) y tomar en cuenta todo lo indicado líneas arriba respecto al tanque de presión (en este caso no es necesario incluir la consideración del coeficiente de ajuste igual a $1,05 \cos \psi$).

En correspondencia con lo indicado para el caso de la presa de la Figura C.23, las magnitudes M_{des} y M_f^o que forman parte de la ecuación (C.37) deben ser determinadas con las siguientes dos ecuaciones:

Momento deslizante:

$$M_{des} = M_{EH_{SEC}} + M_{A_s} + M_{A_i} + M_{G_{SAT}} \quad (C.42)$$

Donde:

M : representa los momentos (respecto al punto O) de las fuerzas indicadas en la Figura C.23a).

EH_{SEC} : el peso de la presa de hormigón (sin tomar en cuenta subpresión).

A_s y A_i : el peso del agua, respectivamente, aguas arriba y aguas abajo, indicados en la figura.

G_{SAT} : peso del suelo saturado de agua que se encuentra dentro de los límites del volumen deslizante.

Momento de las fuerzas de fricción:

$$M_f^o = r(EH_{SEC} - W_{EH} + V_s + V_i + G_{SUM} + W')tg\varphi_R \quad (C.43)$$

Donde:

W_{EH} : subpresión actuante en la base de la estructura de hormigón (presa).

V_s y V_i : presiones verticales del agua actuantes en el hormigón de la presa de los tramos aguas arriba y aguas abajo, respectivamente.

G_{SUM} : peso del suelo sumergido ubicado dentro de los límites del volumen deslizante.

W' : fuerza que por acción del agua comprime la carpeta contra el suelo de cimentación (diferencia de las presiones del agua desde arriba y desde abajo).

Finalmente, un muro hidráulico de contención también, con algún grado de aproximación, puede ser considerado como un caso particular de un tanque de carga. Para el cálculo de un muro por el método de las superficies circulares de corte cabe aplicar el método de la presión por peso (C.11) (en general sin recurrir en este caso al coeficiente correctos igual a $1,05 \cos \psi$).