

## *Estabilidad de las masas de tierra*

**Esfuerzos debidos a los terremotos.** La aceleración horizontal de un terremoto,  $ae$ , comunica a la masa una fuerza momentánea,  $Wa./g$ . Una forma aproximada de tener en cuenta su efecto, es añadir esta fuerza de inercia multiplicada por su brazo al momento motor. El verdadero efecto es menos crítico, porque la aceleración es momentánea. Un análisis más exacto, como el propuesto por Newmark, 11:7 considera la deformación producida y sus efectos.

**Agrietamiento en la cima del talud.** Como se explicó en el capítulo 8, la parte superior de un talud en un suelo cohesivo está en un estado de tracción. Por el efecto "Continuado de esta tracción se producen grietas verticales que destruyen parte de la resistencia a esfuerzo cortante y que pueden contribuir a la falla, si se llena de agua. La profundidad,  $d$ , de las grietas de tracción es, aproximadamente:

$$d= 2c/\gamma$$

El suelo situado por arriba de este nivel no contribuye al momento resistente del arco de falla, como se indica en el ejemplo 11: 1 y si la grieta se llena de agua, la presión del agua contribuye al momento de vuelco.

**Efectos de la sumersión y de la filtración.** La sumersión de un talud tiene tres, efectos: Primero, el peso del segmento circular se aumenta por el peso del agua arriba del talud y por el mayor peso específico del suelo, lo cual aumenta el momento motor. Segundo, este aumento está más que compensado por el momento, resistente de la presión horizontal del agua. Tercero, el esfuerzo neutro aumenta en la superficie de falla, dependiendo su valor de la red de flujo que se produzca y compensa mucho de lo que se gana en resistencia por el peso adicional del suelo y por el peso del agua. El resultado final es que el talud sumergido tiene generalmente un factor de seguridad mayor que el mismo talud sin estar sumergido.

Cuando el nivel del agua en que está sumergido el talud desciende tan rápidamente que el esfuerzo neutro dentro del talud no puede ajustarse al nuevo nivel del agua, se produce lo que se llama *desembalse rápido*. El momento debido a la presión horizontal del agua, que

ayudaba al momento resistente, se reduce; el peso del suelo y del agua también se reducen, pero el esfuerzo neutro no cambia grandemente. El resultado es que el factor " de seguridad cae bruscamente, llegando a ser corrientemente inferior al del

talud no sumergido. Esto es, frecuentemente, la condición más crítica en el proyecto del paramento aguas arriba de una presa de tierra.

Las filtraciones a través del suelo hacia el paramento del talud se producen por un exceso de esfuerzo neutro dentro de la masa 'de suelo y dan

como resultado un descenso en la resistencia del suelo y un factor de seguridad menor, comparado con el del mismo talud sin filtraciones. Esta con condición es a menudo crítica en las excavaciones profundas, en los cortes para carreteras o ferrocarriles, en el paramento aguas abajo de las presas de tierra y en los taludes naturales.

**Taludes en arcillas homogéneas blandas.** El caso especial de un talud uniforme en una arcilla homogénea blanda cuya resistencia a esfuerzo cortante dada por la relación  $s = c$ , se puede resolver analíticamente y los resultados se pueden presentar en la forma' de un número adimensional  $m$  que se llama *coeficiente de estabilidad*. El coeficiente de estabilidad depende; solamente del ángulo del talud,  $B$  y del *factor de profundidad*,  $nd$ , que es' la razón entre la profundidad de un estrato duro y denso, medida desde la parte superior del talud y la altura del talud. La altura del talud,  $H$   $c$ , a la que se producirá la falla, está dada por la relación:

$$Hc = c/my$$

Y el factor de seguridad de un talud de altura  $H$ , esta dado por:

$$SF = c/mHy$$

Se ha preparado' un ábaco {figura 11.7 *a*) que contiene la relación del coeficiente de estabilidad con el ángulo del talud y el factor de profundidad que está basado en los resultados de los estudios de D. W. Taylor.

El ábaco se puede observar que la falla de pie de talud se produce en' todos los taludes, que tengan pendientes superiores a  $53^\circ$ . La posición del centro de la circunferencia de falla se puede hallar por el gráfico.

**Método de las dovelas o rebanadas.**, Para calcular la estabilidad de los taludes en suelos cuya resistencia depende del esfuerzo normal, es necesario calcular el esfuerzo normal efectivo a lo largo de la superficie de falla. No se dispone de una solución rigurosa para los esfuerzos normales, pero el método de las dovelas, desarrollado por Fellenius, ha comprobado que es suficientemente aproximado para estos cálculos.

La zona de falla se divide en rebanadas verticales como se muestra en la figura 11.5; no es necesario que todas tengan el mismo ancho y para facilitar los cálculos se hace que sus límites coincidan con las intersecciones de la circunferencia con los estratos de suelo por abajo y con el paramento del talud por arriba. Al hacer el análisis se considera que cada rebanada actúa independientemente de las colindantes: no se desarrolla esfuerzo cortante entre ellas y las presiones normales en cada lado de la dovela producidas por las colindantes son iguales.

La fuerza vertical que actúa en cada rebanada,  $W$ , incluye el peso del suelo más el del agua directamente arriba de ella; también incluye el peso

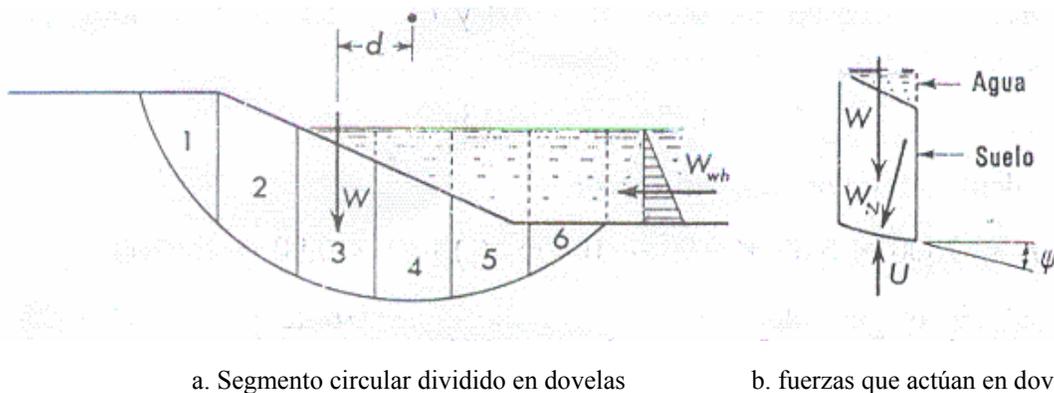


Fig. 11.5 Método de las dovelas o rebanadas para el análisis por falla circular de taludes de suelos cuya resistencia depende de la presión normal.

de cualquier carga externa; como una estructura. La fuerza neta o efectiva que actúa hacia abajo en la parte curva de la rebanada, es el peso total menos la fuerza hacia arriba debida al

esfuerzo neutro,  $W' = W - U$ . La fuerza hacia arriba  $U$ , se halla multiplicando el esfuerzo neutro  $u$  (que se calcula por la red de flujo) por el ancho de la dovela.

Si la rebanada es suficientemente estrecha, la curva inferior se puede substituir por una línea recta que forme el ángulo  $\psi$  con el eje horizontal. La componente de la fuerza vertical normal al plano,  $W'N$  se calcula, por la expresión  $W'N = W' \cos \psi$ . La resistencia a esfuerzo cortante en ese segmento de arco se puede expresar en la forma siguiente:

$$p' \tan \phi,$$

$$s = (c' + W'_N / \Delta L) \tan \phi$$

El momento resistente total de todos los segmentos de arco se halla, como anteriormente, por la ecuación 11: 2b.

El momento de vuelco se puede hallar, como se indicó anteriormente, por la ecuación 11: 2a. El momento de las fuerzas verticales es la suma algebraica de los momentos del peso total  $W$  de cada una de las dovelas con respecto al centro de la circunferencia,  $W_d$ . A este momento hay que añadir, algebraicamente, los momentos totales de la componente horizontal de la presión del agua sobre el talud y de la, presión del agua en las grietas.

Se han hecho: muchas Variaciones y refinamientos de éste método básico. Aunque ninguno es riguroso, se ha comprobado que son suficientemente exactos para el análisis y proyecto.

Para hacer el análisis es necesario tantear un gran número de posibles superficies de falla; la que tenga el factor, de seguridad menor será la superficie más crítica, esto es, la superficie en la cual es más probable que ocurra la falla. La forma tabular o la computadora digital son las indicadas para resolver los problemas cuando se emplea esta forma de análisis, a las cuales se adapta bien. Se fija una cuadrícula donde se sitúan los centros de, las posibles circunferencias de falla y se establece un rango de valor para los radios de las circunferencias correspondientes a cada centro. Una computadora puede dejar impreso directamente, todos los factores de seguridad o solamente el mínimo (y su radio) para cada centro de circunferencia. Si se dibujan curvas uniendo los centros de las circunferencias que tienen iguales factores de seguridad mínimo, como si fueran curvas de nivel se puede determinar la

ubicación de la circunferencia más crítica (es posible más de una circunferencia en masas no homogéneas) y el factor de seguridad mínimo.

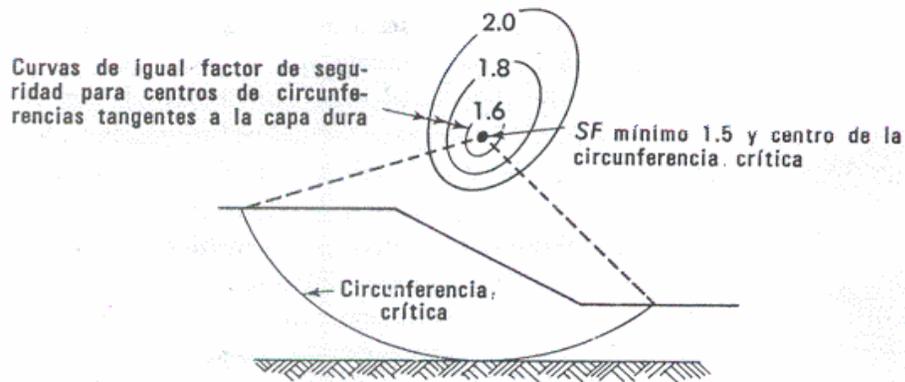


Fig. 11.6 Método para localizar el centro de la circunferencia crítica por las curvas que tienen igual factor de seguridad.

**Taludes en arenas** La estabilidad de un talud homogéneo con su suelo de cimentación, construido con un suelo "puramente friccionante", tal como una arena limpia, es una consecuencia de la fricción que se desarrolla entre las partículas constituyentes, por lo cual, para garantizar estabilidad bastara que el ángulo del talud sea menor que el ángulo de fricción interna de la arena, que en un material suelto seco y limpio se acercará mucho al ángulo de reposo. Por lo tanto, la condición límite de estabilidad es, simplemente:

$$\alpha = \phi$$

Sin embargo, si el ángulo  $\alpha$  es muy próximo a  $\phi$ , los granos de arena próximos a la frontera del talud, no sujetos a ningún confinamiento importante, quedarán en una condición próxima a la de deslizamiento incipiente, que no es deseable por ser el talud muy fácilmente erosionable por el viento o el agua. Por ello es recomendable que en la práctica  $\alpha$  sea algo menor que  $\phi$ . La experiencia ha demostrado que si se define un factor de seguridad como la relación entre los valores de  $\alpha$  y  $\phi$ , basta que tal factor tenga un valor del orden 1.1 ó 1.2 para que la erosionabilidad superficial no sea excesiva.

## El Método Sueco

Como ya se ha dicho, bajo el título genérico de *Método Sueco* se comprenden todos los procedimientos de análisis de estabilidad respecto a falla por rotación en los que se considera que la superficie de falla es un cilindro, cuya traza con el plano en el que se calcula es un arco de circunferencia. Existen varios procedimientos para aplicar este método a los distintos tipos de suelo, a fin de ver si un talud dado tiene garantizada su estabilidad en lo que sigue se mencionarán los procedimientos para resolver el problema con cada tipo de suelo de los que se consideran.

### a) Suelos "puramente cohesivos" ( $\phi = 0$ ; $c \neq 0$ )

Se *trata* ahora el caso de un talud homogéneo con su suelo de cimentación y en el cual la resistencia al esfuerzo cortante puede, expresarse con la ley:

$$s = c$$

donde  $c$  es el parámetro de resistencia comúnmente llamado cohesión. El caso se presenta en la práctica cuando se analizan las condiciones iniciales de un talud en un suelo fino saturado, para el cual la prueba triaxial rápida representa las condiciones críticas. En este caso el método puede aplicarse según un procedimiento sencillo debido al Dr. A. Casagrande, que puede utilizarse tanto para estudiar la falla de base como la de pie de talud, la descripción que sigue se refiere a la figura V-2.

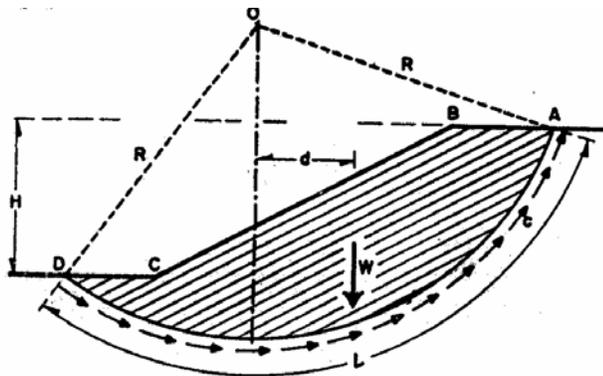


FIG. V-2. Procedimiento de A. Casagrande para aplicar el Método sueco a un talud puramente "Cohesivo"

Considérese un arco de circunferencia de centro en  $O$  y radio  $R$  como la traza de una superficie hipotética de falla con el plano del papel. La masa del talud que se movilizaría, si

esa fuera la superficie de falla, aparece rayada en la figura V-2. puede considerarse que las fuerzas actuantes, es decir, las que tienden a producir el deslizamiento de las masas de tierra, son el peso del área ABCDA, (nótese que se considera un espesor de talud normal al papel de magnitud unitaria y que bajo esa base se hacen todos los análisis que siguen) mas cualesquiera sobrecargas que pudieran actuar sobre la corona del talud. El momento de estas fuerzas en torno a un eje normal a través de O según la fig. V-2, en la que no se consideran sobrecargas, será simplemente:

$$M_m = Wd$$

Que es el llamado momento motor.

Las fuerzas que se oponen al deslizamiento de la masa de tierra son los efectos de la “cohesión” a lo largo de toda la superficie de deslizamiento supuesta. Así:

$$M_R = cLR$$

Es el momento de esas fuerzas respecto a un eje de rotación normal, al plano de papel, por O (momento resistente)

En el momento de falla incipiente:

$$M_m = M_R$$

Por lo tanto en general:

$$\sum Wd = cLR$$

donde el símbolo  $\sum$  debe interpretarse como la suma algebraica de los momentos respecto a O de todas las fuerzas actuantes (pesos y sobrecargas).

Si se define un factor de seguridad:

$$F_3 = M_R / M_m$$

Podrá escribirse:

$$F_3 = cLR / \sum Wd$$

La experiencia permite considerar a 1.5 como un valor de  $F_3$  compatible con una estabilidad práctica razonable. Debe, pues, de cumplirse para la superficie hipotética seleccionada, que:

$$F_3 \geq 1.5$$

Por supuesto, no está de ningún modo garantizado que la superficie de falla escogida sea la que represente las condiciones más críticas del talud bajo estudio (círculo crítico). Siempre existirá la posibilidad de que el factor de seguridad resulte menor al

adoptar otra superficie de falla. Este hecho hace que el procedimiento descrito, se torne un método de tanteos, según el cual deberán de escogerse otras superficies de falla de diferentes radios y centros, calcular su factor de seguridad asociado y ver que el mínimo encontrado no sea menor que 1.5, antes de dar al talud por seguro. En la práctica resulta recomendable, para fijar el  $F_3$  mínimo encontrar primeramente el círculo crítico de los que pasen por el pie del talud y después el crítico en falla de base; el círculo crítico del talud será el más crítico de esos dos.

En el Anexo V-a se presentan ideas complementarias debidas a Taylor de gran interés práctico para el análisis sin tanteos de taludes simples en suelos “cohesivos” homogéneos.

Nótese que en el procedimiento anterior, aparte de la falla circular, se está admitiendo que la resistencia máxima al esfuerzo cortante se está produciendo a la vez a lo largo de toda la superficie de deslizamiento. Esto, en general, no sucede, pues a lo largo de la superficie de falla real la deformación angular no es uniforme y, por lo tanto, los esfuerzos tangenciales, que se desarrollan de acuerdo con ella, tampoco lo serán. Esto implica que la resistencia máxima del material se alcance antes en unos puntos de la superficie que en otros, lo cual conduce a una redistribución de esfuerzos en las zonas vecinas a los puntos en que se alcanzó la resistencia, dependiendo esta redistribución y la propagación de la falla en estos puntos, de la curva esfuerzo-deformación del material con que se trabaje. Si ésta es del tipo plástico llegarán a tenerse zonas, a lo largo de la superficie de falla, en las que se haya alcanzado la máxima resistencia, pero ésta se mantendrá aun cuando la deformación angular progrese; por ello, en el instante de falla incipiente es posible aceptar que, a largo de toda la superficie de falla, el material está desarrollando toda su resistencia. Por el contrario, en un material de falla frágil típica, aquellos puntos de la superficie de falla que alcancen la deformación angular correspondiente a su máxima resistencia ya no seguirán cooperando a la estabilidad del talud; esto puede producir zonas de falla que, al propagarse pueden llegar a causar la falla del talud (falla progresiva). Como se discutió en el Capítulo XII del Vol. 1 de esta obra, la prueba de esfuerzo cortante directo presenta este efecto de falla progresiva y algunos investigadores admiten que el valor menor de la resistencia al corte que con ella se obtiene representa un mejor valor para el análisis de la estabilidad de un talud que el obtenido de una prueba triaxial. Sin embargo, la opinión más general es que el fenómeno de falla

progresiva no es en un talud tan acentuado como en una prueba directa de esfuerzo cortante, por lo que la resistencia del suelo en esta prueba puede resultar conservadora. Estos últimos especialistas consideran preferible usar en un cálculo real de la estabilidad de un talud un valor de la resistencia intermedio a los obtenidos en prueba directa y triaxial. La experiencia y criterio de cada proyectista resultan decisivos en este punto para definir la actitud de cada uno.

b) *Suelos con "cohesión" y "fricción"* ( $c \neq 0; \phi \neq 0$ )

Bajo el anterior encabezado han de situarse aquellos suelos que, después de ser sometidos a la prueba triaxial apropiada, trabajando con esfuerzos totales, y después de definir la envolvente de falla de acuerdo con el intervalo de presiones que se tenga en la obra real, tienen una ley de resistencia al esfuerzo cortante del tipo:

$$s = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$$

con parámetro de "cohesión" y de "fricción".

De todos los procedimientos de aplicación del Método Sueco a este tipo de suelos, posiblemente el más popular y expedito sea el de las "dovelas", debido a Fellenius (1927), que se expone a continuación.

En primer lugar, se propone un círculo de falla a elección y la masa de tierra deslizante se divide en dovelas, del modo mostrado en la fig. V-3.a.

El número de dovelas es, hasta cierto punto cuestión de elección, si bien, a mayor número, los resultados del análisis se hacen más confiables.

El equilibrio de cada dovela puede analizarse como se muestra en la parte b) de la misma fig. V-3.  $W_i$  es el peso de la dovela de espesor unitario. Las fuerzas  $N_i$  Y  $T_i$  son las reacciones normal.

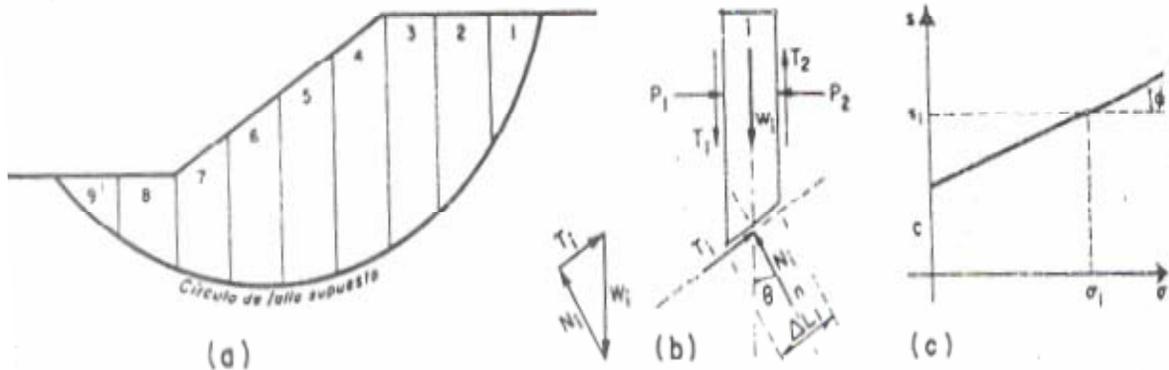


FIG. V-3. Procedimiento de las "Dovelas" o de Fellenius

y tangencial del suelo a lo largo de la superficie de deslizamiento  $\Delta L_i$ . Las dovelas adyacentes a la  $i$ -ésima, bajo estudio, ejercen ciertas acciones sobre ésta que pueden representarse por las fuerzas normales  $P_1$  y  $P_2$  y por las tangenciales  $T_1$  y  $T_2$ .

En el procedimiento de Fellenius se hace la hipótesis de que el efecto de las fuerzas  $P_1$  y  $P_2$  se contrarresta; es decir se considera que esas dos fuerzas son iguales, colineales y contrarias. También se acepta que el momento producido por las fuerzas  $T_1$  y  $T_2$  que se consideran de igual magnitud, es despreciable. Estas hipótesis equivalen a considerar que cada dovela actúa en forma independiente de las demás y que  $N_i$  y  $T_i$  equilibran a  $W_i$ .

El cociente  $N_i / \Delta L_i$  se considera una buena aproximación al valor de  $\sigma_i$  presión normal actuante en el arco  $\Delta L_i$  que se considera constante en esa longitud. Con este valor de  $\sigma_i$  puede entrarse a la ley de resistencia al esfuerzo cortante que se haya obtenido (ver parte c) de la fig. V-3) y determinar ahí el valor de  $s_i$  resistencia al esfuerzo cortante que se supone constante en todo el arco  $\Delta L_i$ .

Puede calcularse el momento motor debido al peso de las dovelas como:

$$M_m = R \sum |T_i|$$

Nótese que la componente normal del peso de la dovela,  $N_i$  pasa por O, por ser la superficie de falla un arco de circunferencia, y por lo tanto no da momento respecto a aquel punto. Si en la corona del talud existiesen sobrecargas su momento deberá calcularse en la forma usual y añadirse al dado por la expresión 5-6.

El momento resistente es debido a la resistencia al esfuerzo cortante,  $s_i$  que se desarrolla en la superficie de deslizamiento de cada dovela y vale:

$$M_R = R \sum s_i \Delta L_i$$

Una vez más se está aceptando que la resistencia máxima al esfuerzo cortante se desarrolla al unísono en todo punto de la superficie de falla hipotética lo cual, como ya se discutió, no sucede realmente debido a las concentraciones de esfuerzos que se producen en ciertas zonas, las que tienden a generar más bien fallas progresivas, antes que las del tipo que aquí se aceptan.

Calculados el momento resistente y el motor puede definirse un factor de seguridad:

$$F_3 = M_R / M_m = \sum s_i \Delta L_i / \sum |T_i|$$

La experiencia ha demostrado que una superficie de falla en que resulte  $F_3 \geq 1.5$  es prácticamente estable. El método de análisis consistirá también en un procedimiento de tanteos, en el cual deberán fijarse distintos círculos de falla, calculando el  $F_3$  ligado a cada uno: es preciso que el  $F_{3\min}$  no sea menor de 1.5, en general, para garantizar en la práctica la estabilidad de un talud. El criterio del proyectista juega un importante papel en el número de círculos ensayados, hasta alcanzar una seguridad razonable respecto al  $F_{3\min}$ : en general es recomendable que el ingeniero no respaldado por muy sólida experiencia no regatee esfuerzo ni tiempo en los cálculos a efectuar.

El procedimiento arriba descrito habrá de aplicarse en general a círculos de falla de base y por el pie del talud.

La presencia de flujo de agua en el cuerpo del talud ejerce importantísima influencia en la estabilidad de éste y ha de ser tomada en cuenta por los procedimientos descritos en el Volumen III de esta obra.

En el Anexo V-b se tratan algunos trabajos que complementan lo aquí escrito.

### c) *Suelos estratificados*

Frecuentemente se presentan en la práctica taludes formados por diferentes estratos de suelos distintos, que pueden idealizarse en forma similar al caso mostrado en la fig. V-4.

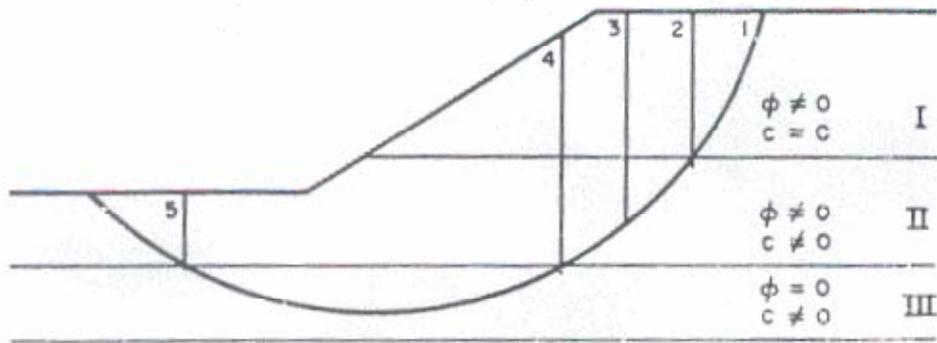


FIG. V-4. Aplicación del Método Sueco a taludes en suelos estratificados

Ahora puede realizarse una superposición de los casos tratados anteriormente. En la figura se suponen tres estratos: el I de material puramente "friccionante", el II de material "friccionante" y "cohesivo" y el III, formado por suelo puramente "cohesivo". Puede considerarse a la masa de suelo deslizante, correspondiente a un círculo supuesto, dividida por dovelas, de modo que ninguna base de dovela caiga entre dos estratos, a fin de lograr la máxima facilidad en los cálculos.

Un problema especial se tiene para obtener el peso de cada dovela. Ahora debe calcularse en sumandos parciales, multiplicando la parte del área de la dovela que caiga en cada estrato por el peso específico correspondiente.

Las dovelas cuya base caiga en los estratos I y II, en el caso de la: fig. V-4 deberán de tratarse según el método de Fellenius, aplicando las expresiones 5-6 y 5-7 y trabajando en cada caso con la ley de resistencia al esfuerzo cortante del material de que se trate. Así se obtienen momentos motores y resistentes parciales.

La zona correspondiente al estrato III, siempre con referencia a la fig. V-4, debe tratarse con arreglo a las normas dadas en el inciso a) de esta sección, aplicando las fórmulas 5-2 y 5-3. Así se obtienen otros momentos motor y resistente parciales.

Los momentos motor y resistente totales se obtienen, naturalmente, como suma de los parciales calculados y con ellos puede calcularse el  $F_3$  correspondiente al círculo de falla elegido; usando otros arcos de circunferencia se podrá llegar al  $F_{3min}$  que no debe ser menor de 1.5, al igual que en los casos anteriores.

d) *Resumen de hipótesis*

Las hipótesis utilizadas en los párrafos anteriores pueden resumirse como sigue:

- 1) Falla circular
- 2) El análisis es bidimensional, respondiendo a un estado de deformación plana
- 3) Es válida la ley de resistencia de Mohr-Coulomb
- 4) La resistencia al esfuerzo cortante se moviliza por completo y al mismo tiempo en toda la superficie de deslizamiento
- 5) En su caso, las hipótesis ya comentadas referentes al manejo de las dovelas (no existe interacción entre ellas).
- 6) El factor de seguridad se define como la relación entre la resistencia promedio al esfuerzo cortante a lo largo de la superficie de falla y los esfuerzos cortantes actuantes medios en dicha superficie.

e) *Procedimiento de cálculo con el círculo de fricción*

Krey<sup>4</sup> proporcionó hacia 1936 las ideas que permitieron a los doctores G. Gilboy y A. Casagrande desarrollar un método especial de análisis de estabilidad de taludes respecto a fallas por rotación, conocido con el nombre de procedimiento del círculo de fricción o abreviadamente, círculo  $\phi$

El procedimiento acepta también que la superficie de deslizamiento de los taludes puede considerarse un cilindro cuya traza con plano de los cálculos es un arco de circunferencia (círculo de falla). La secuela ya ha sido aplicada en este volumen a problemas de empuje de tierras (ver capítulo IV).

Considérese el talud mostrado en la fig. V-5 con un círculo de falla escogido; con centro en O, del círculo de falla, puede trazarse el círculo de fricción de radio.

$$r = R \text{ sen } \phi.$$

Donde  $\phi$  es el ángulo de fricción del material constituyente del talud.

Si  $f$  es la resultante de la reacción normal y de fricción en un elemento de arco de la superficie de falla supuesta, formará con la normal a esta superficie un ángulo  $\phi$  y, por lo tanto, será tangente al círculo de fricción, según se desprende evidentemente de la fig. V-5.

El equilibrio de la masa de suelo deslizante bajo estudio depende de la acción de las siguientes fuerzas:  $W$ , peso de la masa de suelo, que pasa por el centro de gravedad de dicha masa.

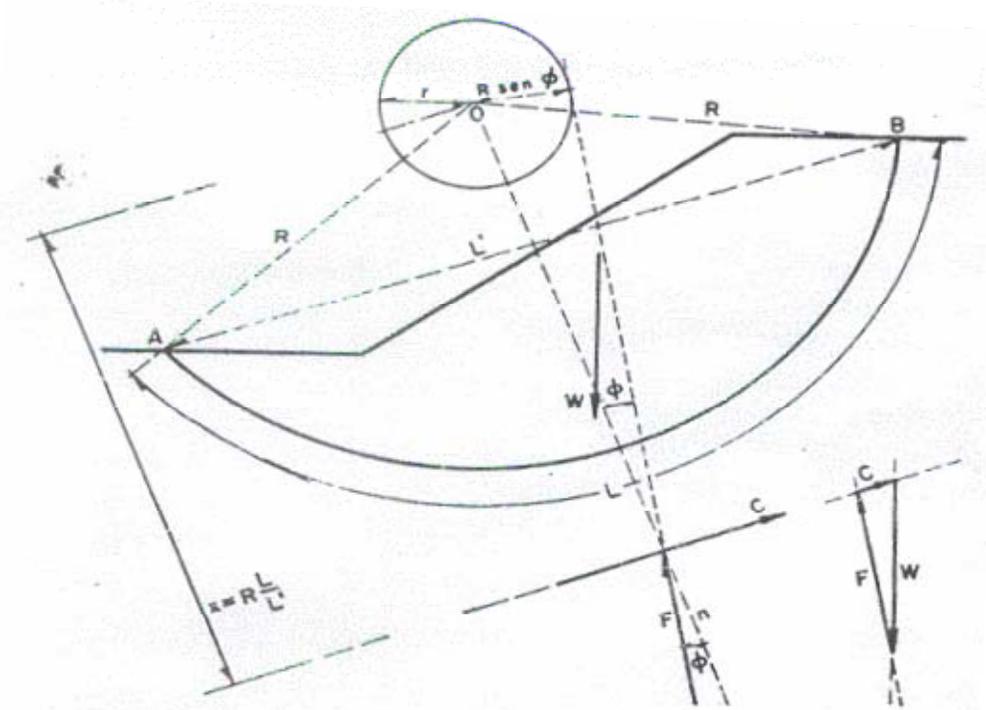


FIG. V-5. Aplicación del círculo de fricción a taludes

$C$ , fuerza total de cohesión desarrollada a lo largo de toda la superficie de deslizamiento y generada por la "cohesión" del suelo.

$F$ , resultante total de las reacciones normales y de fricción.

Se supone que no actúan fuerzas de filtración ni sobrecargas; las primeras de éstas se tomarán en cuenta, según se dijo, con los métodos descritos en el Volumen III de esta obra; las segundas con procedimientos que se desprenden evidentemente de lo que sigue.

La fuerza  $C$  puede calcularse, en magnitud, con la expresión.

$$C = c_e L'$$

donde  $c_e$  es la "cohesión" del suelo requerida para el equilibrio y  $L'$  la longitud de la cuerda del arco de deslizamiento supuesto. La línea de acción de la fuerza  $C$  debe ser paralela a la cuerda  $AB$  (fig. V-5), puesto que esta cuerda es la línea que cierra el dinámico

de las fuerzas de cohesión que se desarrollan a lo largo de la superficie de falla supuesta. Tomando momentos respecto al punto 0 podrá escribirse

$$c_e L R = c_e L'x$$

donde  $x$  es el brazo de momento correspondiente a la fuerza  $C$ , que fija la línea de acción de ésta.

$$\text{Por lo tanto: } x = L / L' (R)$$

Nótese que el valor de  $x$  es independiente de  $c_e$ . La fuerza  $F$ , es la resultante total de las fuerzas  $f$  que son tangentes al círculo  $\tilde{r}$  de fricción; estas fuerzas  $f$  no constituyen pues un sistema concurrente y la fuerza  $F$  no será tangente al círculo de fricción (en la sección IV-10, sin embargo, se consideró tangente, cometándose un pequeño error de escasas consecuencias que, por supuesto, puede corregirse en parte adoptando los procedimientos aquí descritos). La posición  $F$  respecto a 0 puede definirse por la expresión

$$d = K \cdot R \text{ sen } \varnothing$$

donde

$d$  = distancia de 0 a  $F$

$K$  = un factor de proporcionalidad mayor que 1, que depende de la distribución de esfuerzos a lo largo del arco  $AB$  (fig. V-5) y del ángulo central  $AOB = 2\theta$

$R, \varnothing$  = los sentidos usuales.

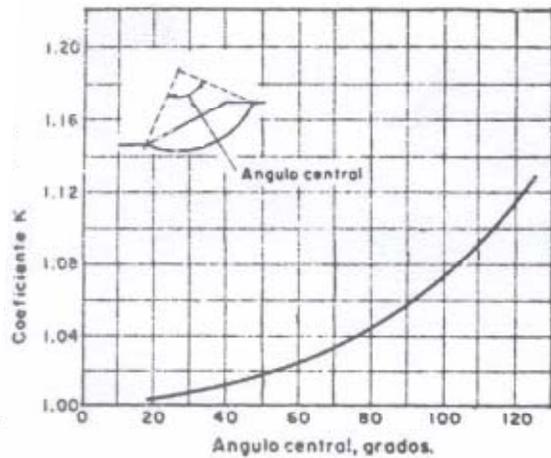


FIG. V-6. Gráfica para obtener el valor de  $K$  (Taylor)

Taylor<sup>7</sup> da una gráfica en que puede encontrarse el valor de  $K$  en función del ángulo central  $AOB = 2\theta$ ; la gráfica aparece en la fig. V-6 y está constituida con la hipótesis de una distribución senoidal de esfuerzos normales a lo largo del arco  $AB$ , con valor nulo para el esfuerzo en los puntos  $A$  y  $B$ .

Con las líneas de acción de  $W$  y  $C$  puede encontrarse su punto de concurrencia, por el cual ha de pasar la fuerza  $F$ , pues si la masa deslizante ha de estar en equilibrio,  $W$ ,  $C$  y  $F$  han de ser concurrentes. Con esto se define la línea de acción de  $F$ , que pasa por el mencionado punto de concurrencia de  $W$  y  $C$  y es tangente a una circunferencia con centro en  $O$  y radio  $KR \sin \varnothing$ .

Conocidas las líneas de acción de  $F$  y  $C$  puede construirse con  $W$ , conocido en magnitud y posición, un triángulo de fuerzas en el cual puede determinarse la magnitud de  $C$  necesaria para el equilibrio.

La "cohesión" del material constituyente del talud es conocida por pruebas de laboratorio y vale  $c$ ; el valor necesario del parámetro para que el talud sea estable según el cálculo, es decir, para tener la condición de equilibrio de las fuerzas actuantes es, según la expresión 5-10

$$c_e = C / L'$$

que puede ya calcularse. Por ello, puede determinarse la relación

$$F_c = c / c_6$$

Con lo cual se obtiene un factor de seguridad asociado al círculo escogido en términos de la "cohesión".

Si el valor de  $\varnothing$  con el cual se construyó el círculo de fricción es el real del suelo, la expresión 5-13 proporciona un factor de seguridad del talud, el que estaría trabajando, pudiera decirse, en condición límite respecto a la fricción.

Cuando se desea que el talud trabaje con seguridad no sólo respecto a la "cohesión" sino también a la fricción puede aplicarse el método del círculo  $\varnothing$  con un valor de  $\varnothing$  menor que el real del suelo; se define así un factor de seguridad respecto a la fricción<sup>5</sup>

$$F \varnothing = \text{tg } \varnothing / \text{tg } \varnothing_e$$

donde  $\varnothing$  es el valor real del suelo y  $\varnothing_e$  el escogido para aplicar el método, menor que el anterior. En estas condiciones se obtendrá para el mismo talud un valor de  $F_c$  distinto y menor que si el  $\varnothing_e$  elegido hubiese sido igual a  $\varnothing$ .

Existen así infinitas combinaciones posibles de valores de  $F_c$  y  $F_\phi$  asociados a un talud dado.

Si se desea que  $F_c = F_\phi = F_s$ , donde  $F_s$  es el factor de seguridad respecto a la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, para manejar un solo factor de seguridad ligado a un círculo dado, puede procederse como sigue (Taylor):

Usense varios valores lógicos de  $\phi_e$  en la aplicación del método de círculo  $\phi$ . A cada valor está ligado un  $F_\phi$  y para cada valor puede obtenerse un  $F_c$ . Grafíquense esos valores de  $F_c$  y  $F_\phi$  correspondientemente, como se muestra en la fig. V-7.

La Curva obtenida corta a una recta a  $45^\circ$  en un punto en que

$$F_c = F_\phi = F_s$$

Ese punto indica un valor de  $F_\phi$  y  $F_c$  al que corresponde un cierto valor de  $\phi_e$  que es con el que tendría que haberse aplicado el método del círculo  $\phi$  para obtener directamente factores de seguridad iguales respecto a "cohesión" y "fricción", en el círculo de falla tentativo que se esté estudiando.

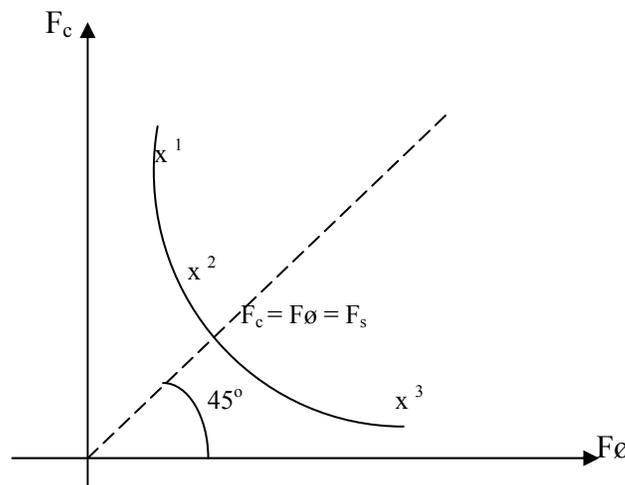


FIG. V-7. Método de Taylor para fijar el factor de seguridad de un talud.

Puede demostrarse que en un suelo homogéneo sin fuerzas filtración y con círculo crítico de falla de base, una vertical al círculo de fricción pasa por el punto medio del talud. (Anexo V-a)

### V-5. Grietas de tensión

Es un hecho experimental que antes de ocurrir un deslizamiento de tierras en el cuerpo de un talud que no sea *puramente friccionante* aparecen en la corona grietas más o menos longitudinales; esto es indicativo de la existencia de un estado de tensiones en esa zona.

La aparición de las grietas causa, en general los siguientes efectos:

- a) Una reducción en la longitud de la superficie de deslizamiento, con la correspondiente disminución en el momento resistente, fig. V-8.
- b) Una disminución del momento motor, que se reduce en el paso de la cuña  $e_1$   $f_e$ .
- c) Una generación de empujes hidrostáticos, causados por el agua de lluvia cuando se almacena en la grieta. Estos empujes son desfavorables a la estabilidad del talud.

Terzaghi ha indicado que los dos últimos efectos señalados tienden, en general, a contrarrestarse, por lo que su influencia neta en la estabilidad del talud es despreciable y sólo el primer efecto mencionado ha de ser tomado en cuenta. Para ello el propio Terzaghi ha propuesto, en suelos puramente "cohesivos", substituir la "cohesión del suelo, obtenida de pruebas de laboratorio, por un valor.  $C_a$ , corregido según la relación (fig. V-8)

$$C_a = (be_1 / be) c$$

Generalmente se considera que las fuerzas que producen el movimiento incluyen la inercia, la gravedad y, todas las cargas externas. Las que se oponen o resisten el movimiento incluyen la resistencia del suelo y otras fuerzas a lo largo de la superficie potencial de movimiento.

Análisis con un arco de circunferencia (método sueco). E: ingeniero sueco K. E. Petterson fue el primero que sugirió un método general de análisis de estabilidad de taludes, como resultado de los estudios de los deslizamientos en el puerto de Gotemburgo. La superficie de deslizamiento se representa por un segmento de la superficie de un cilindro, que en sección transversal es un arco de circunferencia (figura 11.3), El momento de vuelco  $M_o$  por metro de ancho de talud, con respecto al centro

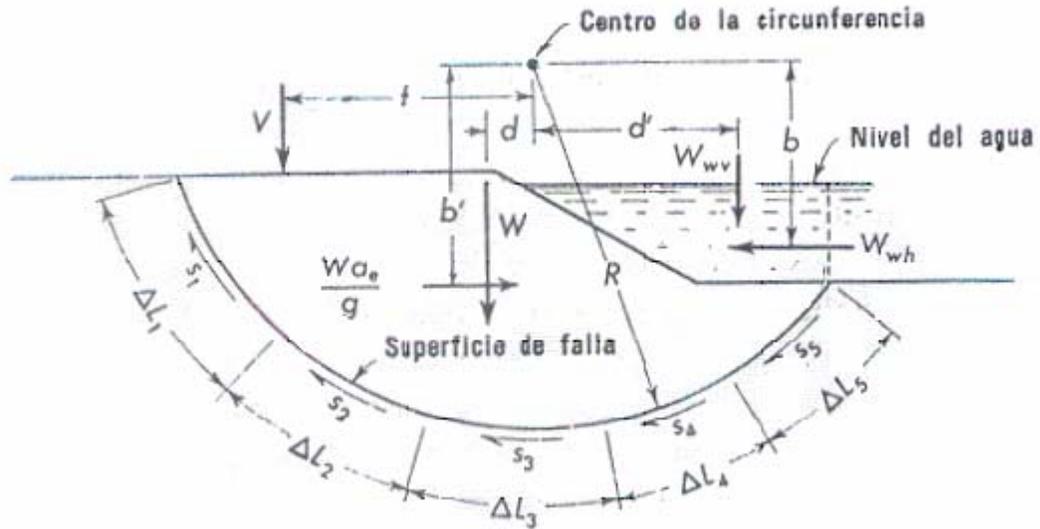


Fig. 11.3 Análisis por el método sueco del movimiento de una masa de tierra.

de la circunferencia es la suma algebraica de los momentos debidos al peso de la masa  $W$ , las componentes horizontal y vertical de la presión del agua (si el talud está inundado) actuando en la superficie del talud,  $W_{wh}$  y  $W_{wv}$  y cualquier otra fuerza externa que actúe sobre la masa,  $V$ . (Momento motor.)

$$M_0 = Wd - W_{wh}b - W_{wh}d' + Vf +/ (W_a e b' / g)$$

En esta expresión,  $b$ ,  $b'$ ,  $d$ ,  $d'$  y  $f$  son las distancias respectivas de los centroides de los pesos o de las líneas de acción de las fuerzas con respecto al centro de la circunferencia. El momento resistente lo proporciona la resistencia del suelo. Si la resistencia a esfuerzo cortante es  $s$ , en cada segmento de arco  $\Delta L$ , cuyo radio es  $R$ , el momento resistente por cada metro de ancho de talud es:

$$M_r = R \sum s \Delta L = R (s_1 \Delta L_1 + s_2 \Delta L_2 + \dots)$$

El factor de seguridad del segmento circular se halla así:

$$SF = M_r / M_0$$

El análisis por el arco de circunferencia se puede aplicar a cualquier pendiente y combinación de fuerzas, siempre que la resistencia a esfuerzo cortante de los suelos sea

independiente de los esfuerzos normales al plano de falla; tales son las arcillas saturadas en las cuales la falla ocurre tan rápidamente que no hay cambio en la humedad o en la resistencia del suelo.

Ejemplo 11:1

Calcular el factor de seguridad en el segmento representado en la figura 11.4, si la grieta que tiene 1.50 m de profundidad se llena de agua; el radio del arco tiene 9.90m de longitud.

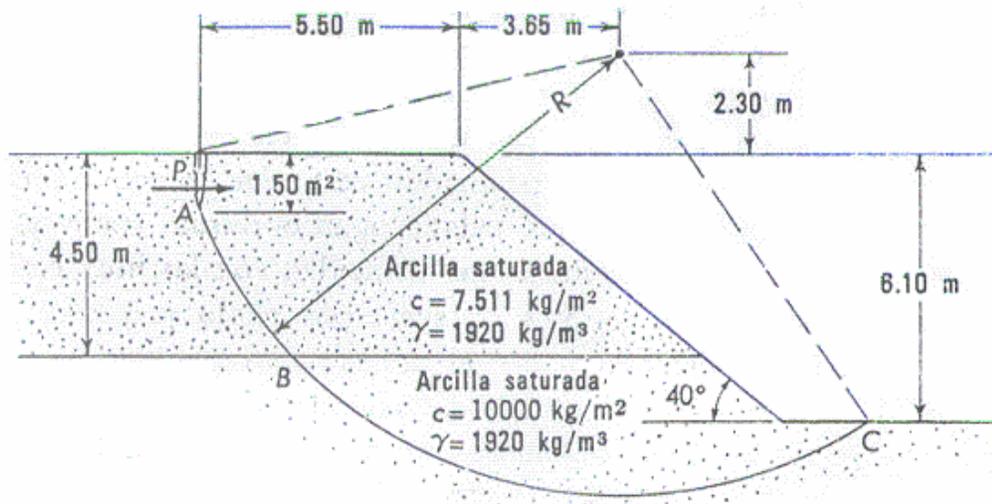


Fig. 11.4 Ejemplo 11:1 Análisis por el arco de circunferencia de un talud en un depósito de arcillas saturadas estratificadas.

1. Divida el arco en dos segmentos, AB y BC y determine la longitud de cada uno.

$$AB = 3.65 \text{ m}; BC = 13.40 \text{ m}.$$

2. Calcule el momento resistente:

$$Mr = 7500 \times 3.65 \times 9.90 + 10000 \times 13.40 \times 9.90 = 1597000 \text{ kgm}.$$

3. Calcule el peso del segmento y halle el centroide por los métodos de la estática:

$$W = 113160 \text{ kg}; a = 3.10 \text{ m}.$$

### **Bibliografía**

Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones

Gorge B. Sowers.

George F. Sowers.

Mecánica de Suelos

Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos.

Eulalio Juárez Badillo.

Alfonso Rico Rodríguez.