

PLANTACIONES EN TALUDES(*) EFECTO ESTABILIZADOR

Por LUIS FORT LOPEZ-TELLO

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos.
Doctor Ingeniero Agrónomo.

El autor trata de aportar una forma de tratamiento racional e integral de las plantaciones, en problemas de estabilidad, protección, conservación y ordenación de taludes, proporcionando elementos de juicio frente a problemas concretos, para decidir no sólo desde el punto de vista agrobiológico qué plantas son las más adecuadas, sino también desde el punto de vista mecánico, precisando la profundidad óptima del desarrollo que deben alcanzar sus raíces, qué zonas del talud conviene sembrar y en cuáles conviene introducir plantas de mayor porte, mayor consumo de agua o mayor densidad de raíces, etc.

Este tratamiento racional e integral se consigue recogiendo en el modelo los siguientes factores:

- a) Cálculo de la radiación solar sobre el talud, teniendo en cuenta su orientación e inclinación (problema hasta ahora no resuelto en el sentido indicado anteriormente).*
- b) Influencia del desarrollo estimado de la vegetación en el balance hídrico.*
- c) Adopción de un coeficiente de escorrentía variable con el tiempo, según el grado de humedad del suelo.*
- d) Predicción y simulación de grietas en el terreno.*
- e) Influencia del tiempo, tanto en el aspecto de pérdida de resistencia del terreno, como en el desarrollo de las plantas y en las diferentes situaciones climatológicas.*
- f) Cuantificación del efecto puramente mecánico del conjunto suelo-raíces.*

Este artículo es un extracto de la tesis doctoral del autor (1975, E.T.S. de Ingenieros Agrónomos de Madrid).

Para estudiar de una forma teórica el comportamiento de un talud protegido con plantaciones, se propone un modelo discreto del terreno, para sustituir el continuo indefinido (figs. 1 y 2).

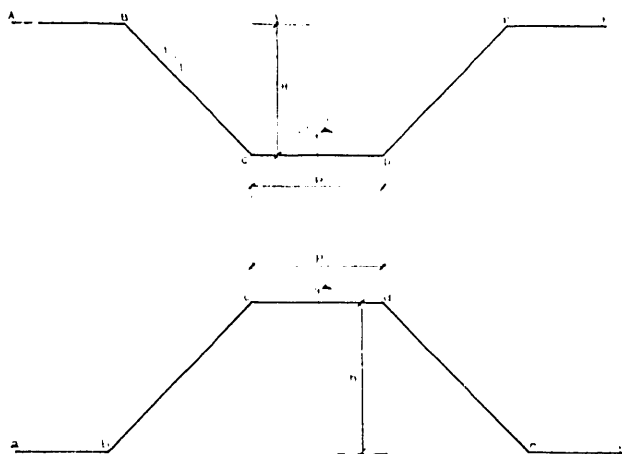


Figura 1.

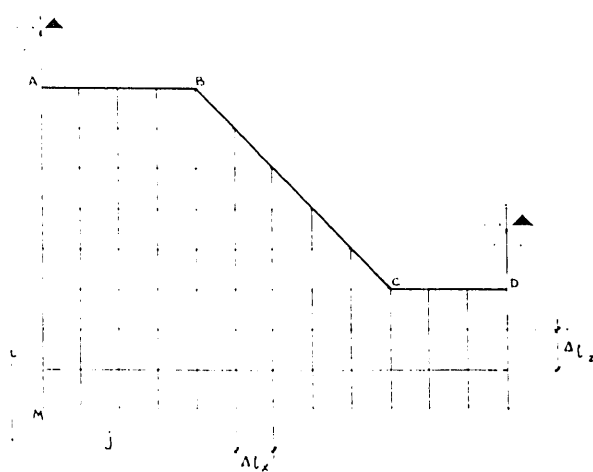


Figura 2.

A) PLANTEAMIENTO

Se pretende el conocimiento de la evolución de las características resistentes del terreno en las proximidades de taludes de desmontes o terraplenes. Para llegar

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta revista hasta el 30 de noviembre de 1977.

a este punto se parte de la distribución de humedades en el suelo, determinando la variación de la succión a lo largo del tiempo, según las condiciones climatológicas y geométricas del propio talud. Se recurre para ello a la ley de difusión, que se acepta, regula el flujo de agua en suelos no saturados, hacia los que se orienta el estudio, y cuya expresión matemática es la dada por la ecuación:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla [D(h) \nabla (h - z)] \quad (1)$$

h = succión (presión medida en centímetros de agua, con la cual el agua está retenida por el suelo).

t = tiempo.

$$\nabla = \text{operador diferencial} = \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

$$(\text{cm}^2/\text{seg}) D = \text{difusividad} \simeq K \frac{\partial h}{\partial \theta}$$

z = altura geométrica.

θ = humedad o contenido volumétrico de agua.

La aplicación directa de este método no es válida para suelos rocosos estratificados, macizos diaclasados, terrenos con acuíferos intercalados, y, en general, en aquellos casos en que la ley de difusión no rige el movimiento del agua del suelo. Responden muy bien al modelo que se propone, taludes excavados en suelos arcillosos, limosos, arcillo-limosos y arcillo-arenosos, de naturaleza homogénea, o bien en capas que se puedan caracterizar por difusividades bien definidas.

B) ECUACIONES A APLICAR EN EL MODELO

En diferencias finitas, la ecuación de la difusión para los *puntos del interior* es:

$$\Delta h_{i,j} = \Delta t \left\{ \frac{D_v(t)}{\Delta l_v^2} [h_{i+1,j}(t) + h_{i-1,j}(t) - 2h_{i,j}(t)] + \frac{D_H(t)}{\Delta l_H^2} [h_{i,j+1}(t) + h_{i,j-1}(t) - 2h_{i,j}(t)] \right\} \quad (2)$$

D_v = Difusividad en sentido vertical.

D_H = Difusividad en sentido horizontal.

En los bordes, las condiciones que se establecen son:

Los bordes izquierdo AM (por ser la superficie del terreno suficientemente larga) y derecho DN , por simetría, se pueden suponer como superficies espejo. Esto es, la ecuación será aplicable para todos sus puntos, excepto para los AMN y D , que pertenecen a otros bordes, en los que están determinadas las influencias externas al sistema, teniendo en cuenta que por ser puntos de superficies espejo $h_{i,j+1} = h_{i,j-1}$.

En los puntos del borde inferior $M N$ se deberá cumplir: $h_{i,j}(t) = f(t)$ para todo punto en que $i = i(M N)$, siendo $f(t)$ una función conocida, es decir, que se pueda definir el valor de h supuesto en cada instante t , y que puede representar, por tanto, las variaciones con el tiempo del nivel de la capa freática. Si ésta está muy lejos, $h_i(M N)$, $j^{(0)} = h_j(M N)$, $j(0)$, siendo este valor el de la succión correspondiente a la humedad de retención o próximo a ella, es decir, con un $p F$ comprendido entre 2, 7 y 3. Si la capa freática está muy próxima, y el suelo, por tanto, saturado, cualquier gota de agua que llegue a ese nivel por percolación irá a parar a la capa freática. En la superficie de ésta, $h = 0$ y $p F = -\infty$.

En la superficie quebrada superior, $A B C D$, se deben distinguir tres zonas.

La zona $A B$, supuesta horizontal (o con muy poca pendiente en la mayor parte de los casos, comparada con la del talud $B C$), se caracteriza porque en ella prácticamente toda el agua caída en exceso de la evaporada se infiltrará. En la zona $B C$, correspondiente al talud, la escorrentía será apreciable, dependiendo ésta de la pendiente del mismo, su protección superficial, etc. Sólo infiltrará el exceso de la caída sobre la evaporada y la que corra por el mismo.

La zona $C D$ podrá ser similar a la $\overline{A B}$, o por el contrario, en el caso de una autopista o carretera bien terminada, caracterizarse como una superficie impermeable, que ni dejará infiltrarse ni evaporarse prácticamente nada.

Si se llama e_1 , e_2 y e_3 el exceso por unidad de superficie de la evapotranspiración sobre la infiltración en cada una de las zonas respectivas $A B$, $B C$ y $\overline{C D}$, la ecuación para los puntos de esas superficies exteriores quedará de la siguiente forma:

Zona $A B$:

$$\Delta h_{i,j}(t) = \Delta t \left\{ \frac{e_1(\Delta t)}{\Delta l_z^2} \frac{\Delta h}{\Delta 0} + \frac{D_v(t)}{\Delta l_z^2} [h_{i-1,j}(t) + \Delta l_z - h_{i,j}(t)] + \frac{D_{II}(t)}{\Delta l_x^2} [h_{i,j+1}(t) + h_{i,j-1}(t) - 2h_{i,j}(t)] \right\} \quad (3)$$

Análoga a la anterior, sustituyendo:

$$D_v(t) [h_{i+1,j}(t) - h_{i,j}(t)]$$

por el:

$$\frac{\Delta h}{\Delta 0} + \frac{D_v(t) \Delta l_z}{(\Delta t) \Delta l_x}$$

Zona $B C$: (Análoga, sustituyendo e_1 por e_2).

Zona $C D$: (Análoga, sustituyendo e_1 por e_3).

Según Richards, procediendo por diferencias finitas en la ecuación de la difu-

sión, para una mejor aproximación de ésta, debe asegurarse la condición de estabilidad:

$$\frac{D \Delta t}{\Delta L^2} \leq 0,5 \quad (4)$$

Finalmente, la succión en cualquier punto vendrá dada por:

$$h_{i,j}(t + \Delta t) = h_{i,j}(t) + \Delta h_{i,j}(\Delta t) \quad (5)$$

$\frac{\Delta h}{\Delta \theta}$, representa la pendiente de la curva, que relaciona la succión en un punto del suelo con la humedad o contenido volumétrico de agua.

B.1. Cálculo de los valores de e .

Para determinar los valores de e se adoptan las fórmulas de Turc para cálculo de la evapotranspiración, tanto en suelos desnudos como en suelos con vegetación.

La expresión de estas fórmulas es la siguiente

1. Suelos desnudos:

$$E_D \text{ (mm/10 días)} = \frac{P + a}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + a}{I}\right)^2}} \quad (6)$$

P = altura de las precipitaciones durante la década.

$a = 35 - \Delta$, siendo Δ el déficit en agua del suelo al principio de la década considerada, con un máximo de $a = 10$ y un mínimo $a = 1$.

a , representa por tanto la forma en que se deseca el suelo, cuando no llueva.

$$I = \frac{(t + 2) \mid y}{16} \quad (7)$$

t = temperatura media del aire durante la década considerada.

y = radiación solar global media de la década en calorías/cm²/día.

2. Suelos cultivados:

$$E_T \text{ (mm/10 días)} = \frac{P + a + V}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + a}{I} + \frac{V}{2I}\right)^2}} \quad (8)$$

donde V representa el efecto de la vegetación. Para cada década, V es la menor de estas dos funciones:

$$\left. \begin{aligned} V &= 25 \sqrt{\frac{M \cdot c}{Z}} \\ V &= \left(\Delta_0 + 30 + 1,5 M \cdot c \frac{Z}{Z} \right) - \Delta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Para vegetación tipo pradera artificial, no cuidada, como puede ser las de las inmediaciones de las carreteras, puede tomarse $M \sim 30 \text{ Qm/Ha}$, que se puede corregir en función de la radiación recibida por $M = 30 \sqrt{\beta}$:

M = materia seca recolectada, en Qm/Ha (secada a 105° C).

Z = número de décadas del período de vegetación.

z = rango de la década considerada.

c = relación del coeficiente de transpiración al del trigo.

(= 8/6 para pratenses)

Δ_0 y Δ = déficits al principio del período de vegetación y al principio de la década de rango z .

De experiencias realizadas, se propone establecer los valores de e_i en la forma siguiente:

1. Zona del talud, coronación o plataforma, *desnuda* $e_{11} = E_{11} - I$, siendo E_{11} = evaporación en suelo desnudo, calculada de acuerdo con la fórmula de Turc para suelos desnudos, e I una fracción de la precipitación en la década, fracción dada según la escorrentía aceptada en esa zona de la sección del terreno.

2. Zona del talud, coronación o plataforma, *protegida con vegetación*.

1. Durante las Z décadas del período vegetativo:

$$e_s = E_M - I, \quad \text{siendo} \quad E_M \sim 0,8 E_{11}$$

$e_s = 0,8 E_{11} - I$ corresponde a la pérdida neta de humedad a través de la superficie del suelo. Como la evapotranspiración total será ET , calculada por la fórmula de Turc para suelos con vegetación, la diferencia $e_r = ET - 0,8 E_{11}$ corresponde al agua evaporada a través de las raíces, por lo que deberá tenerse en cuenta en puntos más interiores, que dependerán del desarrollo de los diferentes tipos de raíces, pero que en principio se fijará en la fila de puntos del modelo inmediatamente debajo de la superficie (0,30 a 0,70 m). Podrá fraccionarse este término, e_r , entre varias filas de puntos interiores si se acepta una distribución y crecimiento de las raíces con el tiempo.

En estos puntos interiores, y durante esas décadas debido al efecto puntual de las raíces, la ecuación a aplicar no será la dada anteriormente para puntos del interior, sino la siguiente:

$$\Delta h_{ij} = \Delta t \left\{ \frac{e_r (\Delta t) \Delta I_x}{\Delta I_x^2} \frac{\Delta h}{\Delta 0} + \frac{D_v(t)}{\Delta I_x^2} [h_{i-1,j}(t) + h_{i+1,j}(t) - 2h_{ij}(t)] + \frac{D_{11}(t)}{\Delta I_x^2} [h_{i,j+1}(t) + h_{i,j-1}(t) - 2h_{ij}(t)] \right\} \quad (10)$$

II. Durante el resto del año no comprendido en el ciclo vegetativo, aceptando que la vegetación seca proteja el terreno en forma análoga a si estuviera cubierto con paja o *mulch*:

$$e_s = 0,8 E_{11} - I$$

Puede valorarse también el mayor poder de infiltración de un terreno agrietado, suponiendo en la década siguiente a aquélla en que han aparecido puntos con $h > h_{\text{retracción}}$, que un porcentaje de la infiltración se realiza directamente en los puntos situados a una profundidad igual a la de la grieta, y, por tanto, al igual que en el caso de las raíces, considerar más de una fila de puntos como línea de superficie. En la superior, el coeficiente e vendría dado por la diferencia $E - \alpha I$, $\alpha \leq 1$ (coeficiente de infiltración, que representa la relación de superficie de captación de la zona no agrietada a la total). En la línea inferior de grietas, el coeficiente e_g sería $(\alpha - 1) I$.

B.1.1. Cálculo de la radiación.

Para tener en cuenta la inclinación θ y orientación ε del talud, se han deducido unas fórmulas que permiten calcular el valor diario de la radiación sobre el talud Y , partiendo del valor diario de la radiación sobre una superficie horizontal Y_0 . Estas fórmulas se han tabulado y se han pasado a unos ábacos para su más fácil manejo, de los que se adjuntan dos a título informativo (fig. 3).

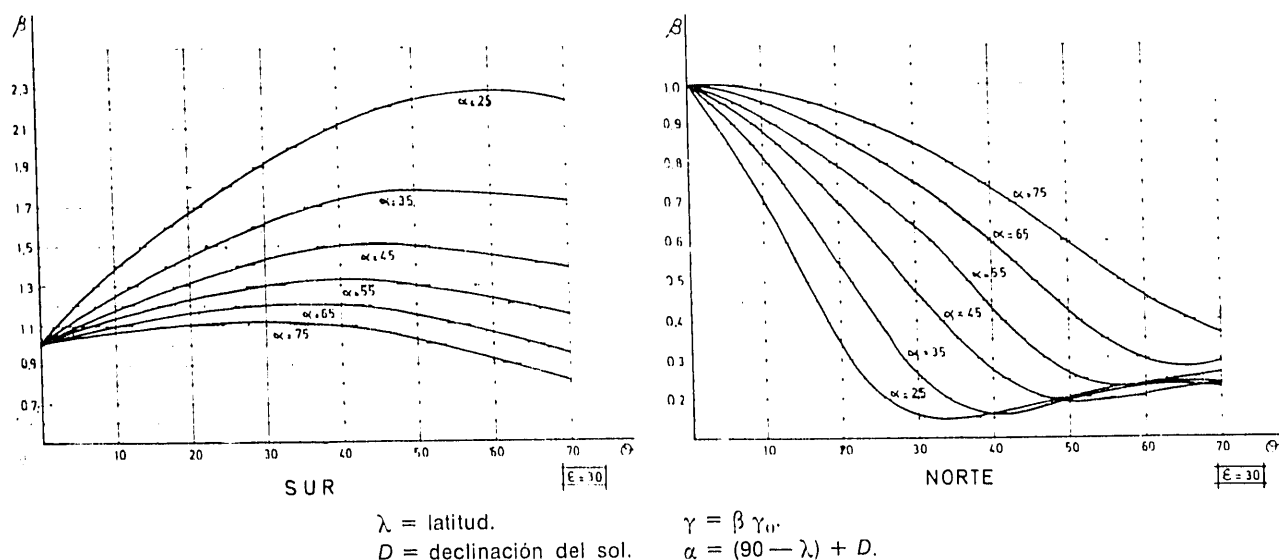


Figura 3.

B.1.2. Cálculo de la infiltración.

Para el cálculo de la infiltración se define un coeficiente de escorrentía que depende del grado de humedad del terreno, a partir del método de curva de escorrentía del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos.

Este dependerá del ángulo del talud, altura del mismo, grado de humedad de la capa superficial, intensidad de la precipitación, revestimiento del mismo, etc.

B.2. Determinación de los parámetros de flujo.

Para la difusividad se utiliza una expresión del tipo dado en la fórmula, debida a Richards:

$$D(h) = \frac{A}{B + Ch + dh^2} + E \quad (11)$$

A , B , C , D y E son constantes a determinar, según el tipo de suelo y el sentido en que se considere la difusividad (fig. 4).

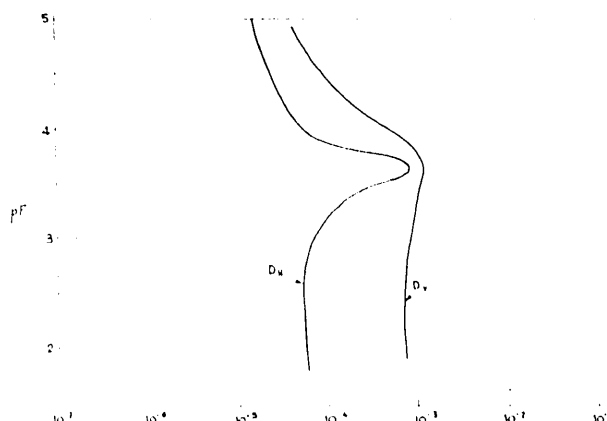


Figura 4.

La variación de la succión con la humedad se ajusta con una expresión del tipo de la anterior, también utilizada por Richards:

$$\frac{\Delta h}{\Delta \theta} = \frac{1}{a + b h^{-1} + c h^{-2}} \quad (12)$$

a , b y c son constantes a determinar (fig. 5).

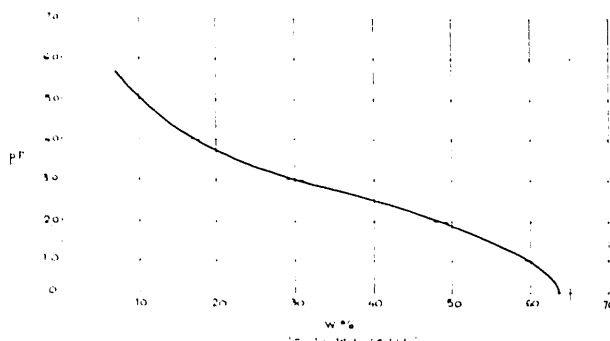


Figura 5.

C) PROCESO DE CALCULO DE LAS SUCCIONES

El cálculo de las succiones en cada uno de los puntos de la malla definida en el modelo (fig. 6), para cada década, se realiza en ordenador, según el organigrama, que puede resumirse como sigue:

1. Se da como dato el valor de la succión en cada punto de la malla, en el instante inicial ($t = 0$) y las tablas de datos climáticos y de coeficientes de escorrentía para todas las décadas. Se definen también los parámetros de las fórmulas.
2. Se inicia el cálculo de succiones en los puntos interiores y en los bordes, con sus respectivas ecuaciones, antes definidas.

3. Se hacen las correcciones debidas a la vegetación y a la presencia de grietas, cuando haya lugar a ello, utilizando sus correspondientes ecuaciones.

4. Se imprimen las tablas por décadas, con los valores de la succión (para mayor comodidad, se da el pF) en cada uno de los puntos, ordenados por columnas.

El proceso de cálculo se hace para talud desnudo y para talud con vegetación.

5. Se define el círculo crítico para el talud en estudio por el método simplificado de Taylor, analizándose la variación de la succión a lo largo del año en los puntos de la malla comprendidos en dicho círculo (fig. 6).

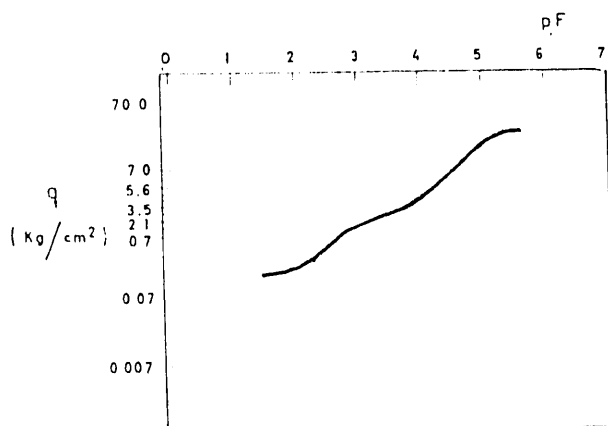


Figura 6.

Por estabilizarse los valores de la succión en los puntos interiores para un año climático medio, y haberse estabilizado también la pérdida de resistencia a esfuerzo cortante por el tiempo del suelo, como ahora veremos, se escoge para el cálculo de la cohesión media a lo largo del círculo crítico los valores de la succión al final del año en todos los puntos interiores y 2,7 en los exteriores, pues depende en ellos directamente del momento en que se mide.

Calculadas las variaciones de succión en los puntos que interesan a las posibles superficies de rotura del talud, se estiman las variaciones en las características resistentes, fundamentalmente reducidas al valor de la cohesión, y con ellas por los métodos habituales de cálculo de taludes se puede tener una evolución de la seguridad frente a estabilidad del talud en estudio, para el caso de talud desnudo o protegido con vegetación.

D) EFECTO DE LAS VARIACIONES DE SUCCION, DE LA VEGETACION Y DEL TIEMPO SOBRE LAS CARACTERISTICAS RESISTENTES DEL TERRENO

D.1. Variaciones de succión.

Croney y Coleman han encontrado con muestras de arcilla pesada una relación

entre la succión inicial de la probeta y su resistencia a compresión simple. Esta relación se reproduce en la figura 7.

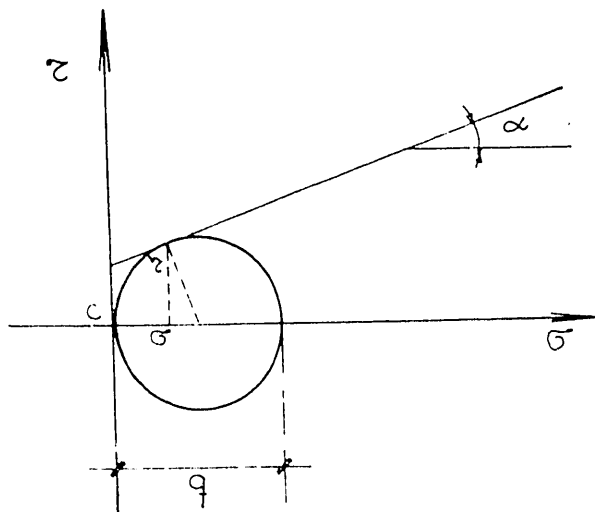


Figura 7.

Como puede observarse, la variación de q es muy importante para variaciones de la succión entre $p F$, 2,5 y 4,5, pudiendo aumentar diez veces para un cambio de un punto en el $p F$.

En un ensayo a compresión simple, aceptando la expresión de Coulomb de resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, se deduce para valor de la cohesión c :

$$c = \frac{q}{2 \operatorname{tg} (45 + \varphi/2)} \quad (13)$$

y la tensión normal sobre el plano de rotura:

$$\sigma = q \cos^2 (45 + \varphi/2) \quad (14)$$

Considerando, como es prácticamente cierto, constante el ángulo de rozamiento de un suelo dado en cuanto su estado no sea absolutamente seco, se deduce que la cohesión (según 13) y la resistencia a esfuerzo cortante τ (según 13 y 14) son proporcionales a la resistencia a compresión simple, y, según lo anterior, dependientes de la succión del suelo en el punto considerado.

D.2. Efecto mecánico de la vegetación.

Por otra parte, apoyándose en los resultados de las experimentaciones de Kassiff y Kopelovitz, puede tenerse en cuenta un aumento de la resistencia a esfuerzo cortante en la zona de suelo ocupada por las raíces de las plantas.

El comportamiento del compuesto suelo-fibras fue comprobado con el del compuesto suelo-raíces, siendo ambos prácticamente similares.

Los diferentes ensayos se realizaron con muestras que contenían 4, 12 y 20 fi-

bras, lo que representaba unos porcentajes en volumen de suelo de $\beta = 0,5; 1,5$ y $2,5$, respectivamente.

El volumen de raíces dependerá de las especies sembradas y del tiempo desde la plantación, pero para los efectos que se buscan puede aceptarse un término medio. Con un promedio de 5.000 Kg/Ha , un 1 por 100 del volumen de suelo.

Según los resultados de los ensayos de Kassiff, puede aceptarse, pues, un aumento en la resistencia a esfuerzo cortante, del orden de $2,5$ veces sobre la del suelo sin raíces, o francamente superior para determinadas humedades, tanto en suelos arcillo-arenosos como en *loess*.

D.3. Efecto del tiempo.

Finalmente, se debe tener en consideración otro aspecto, para ver de qué resistencia al corte debe partirse en el cálculo de la estabilidad del talud, al cual va enfocado todo este trabajo. Se trata de la pérdida de resistencia que presentan los suelos arcillosos (y otros materiales) ante cargas continuadas.

Vyalov y Skibitsky, para suelos arcillosos, proponen una ley que recoge la pérdida de resistencia al esfuerzo cortante, según el tiempo de actuación de la carga:

$$\frac{\tau^*}{\tau} = \log_e \frac{t}{t^*} \quad (15)$$

donde τ^* y t^* son parámetros, que pueden determinarse a partir de ensayos, midiendo τ para varios valores de t .

Estos autores han recomendado tomar para resistencia inicial la obtenida con $t_0 =$ una hora, como última resistencia (pues la pérdida es ya despreciable); la obtenida con $t = 15.000$ horas y fijar el parámetro t^* en $6,5 \cdot 10^{-6}$ horas; 15.000 horas representan aproximadamente veintiún meses. Al cabo de un año, la resistencia a esfuerzo cortante se ha reducido a un 57 por 100.

Con estas consideraciones, puede ya estudiarse la estabilidad de un talud por cualquiera de los métodos normales: Bishop, de fajas, etc., adoptando para los puntos de las superficies de deslizamiento tanteadas las características de resistencia a esfuerzo cortante así determinadas en los casos de vegetación y talud desnudo. Simplificadamente, puede utilizarse el ábaco de Taylor adoptando una cohesión media, ponderada a lo largo de la superficie deslizante crítica.

E) EJEMPLO DE APLICACION PRACTICA.

Concretamente, en el caso estudiado (figura 6, talud de 10 m de altura y 45° de inclinación, excavado en arcillas miocenas del valle del Guadalquivir), el coeficiente de seguridad a la estabilidad se eleva, al considerarlo protegido con vegetación, en un 33 por 100, sin tener en cuenta los efectos de protección contra la erosión, etcétera, que siempre suponen una disminución de la degradación de aquél.

Recíprocamente, un talud protegido con vegetación puede ofrecer análoga seguridad a la estabilidad, con mayor inclinación que la del mismo talud desnudo, es decir, con menor volumen de excavación o de terraplén, visión esta que podría ayudar en el enfoque de la financiación en la creación de estas áreas verdes.