

Cálculo de tablestacas*

(Traducción efectuada por los ingenieros señores Vesubio González, Pedro Errázuriz y Juan Günther).

A.—GENERALIDADES SOBRE LA TEORÍA DE EMPUJE DE TIERRAS

NUESTROS conocimientos de las condiciones de presión en el terreno son escasos. A pesar de que la ciencia se ha preocupado de esta materia muy detenidamente, en especial en lo que se refiere a presiones en paredes verticales o inclinadas, poseemos solamente una teoría que ha sido establecida para arena sin cohesión y aún ésta deja bastante que desear. El comportamiento estático de terrenos con cohesión es aún completamente desconocido.

La teoría del empuje de tierras la supondremos conocida, ya que se puede consultar en cualquier manual de construcción. Ella se basa sobre la suposición de que al ceder una pared solicitada por el empuje de tierras, se produce un plano de deslizamiento sobre el cual resbala un cuerpo en forma de cuña hacia la pared; y además, que la resistencia que oponc el terreno a este resbalamiento es una función del rozamiento de las partículas que forman el terreno y que se aprecia cuantitativamente por el valor del talud natural. Estas suposiciones no son exactas ya que la superficie de deslizamiento puede ser curva o lo que sucede en algunos casos no se

produce y además que el valor del rozamiento interno del terreno, aún para arena, sólo corresponde aproximadamente al talud natural y depende del grado de penetración, y para terrenos con cohesión está íntimamente ligado con el grado de humedad y con la forma de la sollicitación. Más aún, la teoría aceptada hace caso omiso del comportamiento elástico del terreno y de la construcción, lo que es muy importante, ya que los valores límites que estudia la teoría sólo pueden producirse cuando el terreno y también la construcción hayan sufrido ciertas deformaciones.

Se está trabajando continuamente en el perfeccionamiento de la teoría, y especialmente en los últimos años ha recibido un gran impulso con la obra de Terzaghi. En distintas partes se han hecho experimentos y aún se hacen, pero será necesario mucho trabajo, mucho dinero y bastante tiempo para llenar los huecos de nuestros conocimientos y alcanzar bases seguras para el cálculo que abarquen en forma más o menos correcta los fenómenos reales.

Por ahora estamos obligados a calcular con procedimientos bastante defectuosos.

En general, el procedimiento de cálculo corriente da, empleándolo con cierto cuidado, resultados aceptables; sin embargo, debe tenerse constantemente presente la inseguridad de las hipótesis fundamentales, pero estudiando en qué forma los resultados obtenidos son in-

(*) Traducción de la obra «Der Grundbau». (Procedimiento adoptado por el Departamento de Obras Marítimas).

fluenciados según las hipótesis aceptadas, se puede llegar a apreciar la solici-tación real de la construcción. La supo-sición de superficies de deslizamiento planas en vez de curvas no conduce generalmente a grandes diferencias, tam-bién el comportamiento elástico de la construcción y del terreno no influcian en forma apreciable los resultados. De importancia primordial son las suposi-ciones del rozamiento interior en el te-rreno. En este caso uno tiene que ayu-darse con valores límites y determinar aproximadamente la solici-tación según estos valores. Empleando tablas uno se puede dar cuenta sin gran pérdida de tiempo en qué forma son alterados los resultados para los distintos valores del rozamiento interior. En este caso uno puede formarse criterio empleando el sistema ideado por Hedde de las líneas de influencia.

Como se ha dicho, la dificultad prin-cipal consiste en que la teoría del em-puje no es aplicable a terrenos con cohesión. Uno se puede ayudar en este caso solamente por una elección muy cuidadosa del valor del rozamiento inte-rior. Se tendrán que elegir los valores más desfavorables que se puedan produ-cir especialmente para los distintos gra-dos de humedad; los valores así obteni-dos habrá que reducirlos aún más to-davía considerando la inseguridad que encierra la teoría para terrenos con cohesión.

En vista de la incertidumbre de las hipótesis de cálculo, es inútil pretender hacer cálculos muy exactos; al contrario, cálculos de esta especie encierran el pe-ligro de ocultar que los resultados están basados sobre suposiciones muy incier-tas. En lo sucesivo se indicará un pro-cedimiento de cálculo para los casos más importantes que sea de fácil aplicación y que dé resultados suficientemente se-

gueros para poder fijar con ellos las di-mensiones de la obra. En casos excep-cionales, condición del terreno muy complicadas, formas y dimensiones ex-traordinarias de la obra, deberán hacerse cálculos complementarios basados en las ideas indicadas en la literatura moderna y aún hacer experiencias solicitando la cooperación de un Instituto investigador.

B.—INFLUENCIA DEL ROZAMIENTO CON-TRA LA PARED

En las explicaciones de más abajo se emplean las notaciones siguientes:

- E_a Empuje de tierra (El denominado antiguamente empuje activo).
- E_p Resistencia del terreno (El denomi-nado antiguamente empuje pasivo).
- γ Peso específico
- ρ Angulo de talud natural
- δ Angulo del rozamiento entre tierra y pared.
- ϵ Huecos del terreno
- h Altura libre de la pared sobre el fondo.
- t Ficha de la pared, medida desde el fondo.

En la mayoría de los casos la pared del tablestacado es vertical, y la super-ficie del terreno, horizontal. Entonces es aplicable el caso especial de Rankine, para el cual, despreciando el rozamiento entre la tierra y la pared, ($\delta=0$), se ve-rifica:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma t g^2 (45 - \rho/2) h^2$$

$$= \frac{1}{2} \lambda_a h^2$$

$$= \frac{1}{2} g_a h$$

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma t g^2 (45 + \rho/2) h^2$$

$$= \frac{1}{2} \lambda_p h^2$$

$$= \frac{1}{2} g_p h$$

$$\lambda_a = \gamma t g^2 (45 - \rho/2)$$

$$\lambda_p = \gamma t g^2 (45 + \rho/2),$$

Los coeficientes del empuje de tierras λ_a y λ_p determinan el empuje y la resistencia del terreno, $g_a = \lambda_a h$ y $g_p = \lambda_p h$ son las bases de los triángulos representativos del empuje y de la resistencia.

La determinación de las áreas de empuje para pared inclinada o superficie inclinada, o para el caso de considerar el rozamiento entre pared y tierra se puede suponer conocida. Ella se obtiene con el auxilio de las tablas de empuje de tierras o gráficamente por el procedimiento sencillo de Culmann; procedimiento que permite llegar también a la solución cuando no son aplicables las tablas. En cambio se puede hablar algo sobre la influencia del rozamiento sobre la pared. Si se toma en cuenta el rozamiento, el empuje sobre la pared disminuye, la resistencia del terreno aumenta, su influencia sobre la estabilidad de la pared es entonces favorable. El rozamiento que solicita la pared está inclinado hacia abajo en el lado en que actúa el empuje y hacia arriba en el lado en que actúa la resistencia por desplazarse los terrenos en estos sentidos.

EN EL GRÁFICO 1 se indica cómo varían, el empuje y la resistencia del terreno para diferentes ángulos del talud natural, considerando el rozamiento sobre la pared. La influencia sobre la magnitud del empuje es sólo pequeña; ella disminuye aproximadamente un 10% los valores más usuales de este empuje. En cambio es considerable la influencia del rozamiento de la pared sobre la resistencia del terreno aún cuando se considere que los valores elevados de esa resistencia no alcancen a producirse en realidad, debido a que para estos casos la hipótesis de las superficies planas de deslizamiento no se realizan.

Esta influencia del rozamiento que se

traduce en un aumento de la resistencia del terreno puede ser tomada en cuenta únicamente cuando es posible impedir que la pared se deslice hacia arriba.

En sentido contrario al rozamiento, contra el deslizamiento hacia arriba, obra el peso de la pared, las componentes inclinadas hacia abajo del empuje del otro lado de la pared, y las resistencias que ofrecen las irregularidades de la pared, como los anclajes u otros salientes ligados a la construcción.

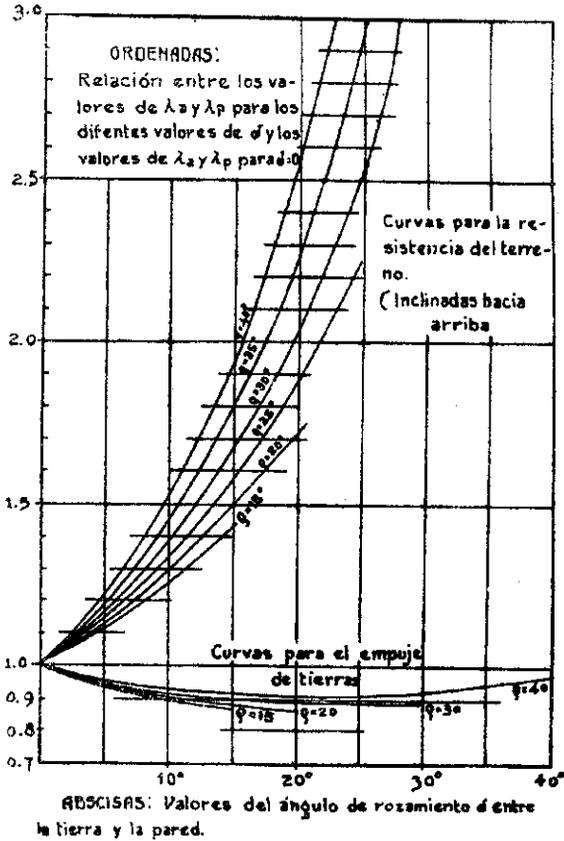
Estas fuerzas no bastan en algunos casos especiales para resistir (neutralizar) la componente del empuje inclinada hacia arriba: por ejemplo cuando una pared lisa (sin rugosidades) debe resistir altos empujes de agua, o cuando en tablestacados anclados la pared, o en el caso de Duques de Alba el pilote o el haz de pilotes, están solicitados por fuerzas horizontales. En estos casos la resistencia del terreno no está producida únicamente por el empuje de tierras (que contendría en todo caso la reacción contra la fuerza de rozamiento dirigida hacia arriba), sino en gran parte por fuerzas simplemente horizontales. Puede suceder que las reacciones para neutralizar la acción del rozamiento falten. Si en estos casos se aceptaran la resistencia del terreno inclinadas, es decir consideradas con sus magnitudes más altas, deberá en todo caso demostrarse que su componente vertical puede ser efectivamente resistida.

Según las experiencias últimas de Franzius la resistencia del terreno en el caso de arena húmeda o arena sumergida con pared rugosa, resulta aproximadamente una y media vez mayor que el valor que se obtiene analíticamente para el caso de una pared lisa sin rozamiento. Los experimentos se hicieron en terreno de relleno apisonado; para el caso de

terreno más compacto (consolidado por raíces vegetales) aumenta la magnitud de la resistencia.

En aquellos casos en que se hinquen

si el rozamiento puede producirse efectivamente. Para el caso de terrenos de relleno y para aquellos terrenos cuyo ángulo de talud natural es inferior a



tablestacas ancladas en terrenos vegetales o compactos cuyo ángulo de talud natural sea por lo menos de 25° , se puede aceptar sin mayor estudio la resistencia del terreno igual al doble del que se obtiene analíticamente para una pared lisa (sin rozamiento).

Se exceptúan los casos especiales mencionados anteriormente (alta presión de agua, paredes ancladas, duques de Alba), para los cuales hay necesidad de verificar

25° , debe ser considerado el valor que se obtiene, sin considerar el rozamiento. Cuando estos terrenos no oponen una resistencia suficiente a la compresión debe calcularse solamente con el empuje de tierra pero no con la resistencia del terreno.

Una comparación de los resultados experimentales de Franzius con los valores calculados analíticamente que aparecen en el gráfico 1, muestra claramente de

cuan poco valor es el cálculo exacto para suposiciones tan inseguras, como las que deben hacerse en los cálculos de empuje de tierra. Las hipótesis simplificadas para la consideración del rozamiento, en el cálculo de la resistencia del terreno quedan por este motivo justificadas. Y así mismo es admisible para el cálculo del empuje de tierras prescindir absolutamente del rozamiento, ya que su influencia es pequeña.

C.—INFLUENCIA DEL AGUA EN EL TERRENO

1°. *Angulo del talud bajo agua.*—La hipótesis aceptada ordinariamente de que el ángulo del talud natural bajo agua sea considerablemente menor que el de el mismo terreno en seco, no es

exacta. Experimentos de Engel, Krey y Franzius demuestran que en aguas tranquilas no existe casi una diferencia. Krey recomienda a pesar de todo, para mayor cuidado, los valores corrientes, por esta misma razón en la tabla N.º 1 están indicados también para terrenos sumergidos ángulos del talud bastantes disminuídos. Terzaghi hace notar especialmente en que el rozamiento interno determinante para los cálculos del empuje de tierra no es de ninguna manera igual al ángulo del talud natural, sino que depende con muchas probabilidades fuertemente de la naturaleza y cohesión del relleno. En consideración a esto se puede calcular, hoy en día, sin mayor examen, con ángulos del talud mayores que los indicados en la TABLA N.º 1 para terrenos sumergidos.

TABLA N.º 1

| Clase de terreno | Peso Específico t/m ³ | Talud natural en grados |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Terraplen seco | 1,4 | 35—40 |
| " húmedo | 1,6 | 40—45 |
| " saturado de agua | 1,8 | 27 |
| Arena suelta seca | 1,58—1,65 | 30—35 |
| " húmeda | 1,8 | 35—40 |
| " saturada de agua | 2,0 | 20—25 |
| " con terreno vegetal o arcilla, estado seco | 1,65—1,75 | 38—40 |
| Tierra arcillosa seca | 1,5 | 40—45 |
| " mojada | 1,9 | 20—25 |
| Arcilla seca | 1,6 | 40—50 |
| " mojada | 2,0 | 20—25 |
| Ripio seco | 1,8—1,85 | 35—40 |
| " mojado | 1,86 | 25 |
| " muy grueso | 1,8 | 30 |
| Enrocados cantos vivos | 1,8 | 45 |
| " " redondeados | 1,8 | 30 |

2.º Cálculo separado para empuje de tierra y agua.—En terrenos permeables, Krey propone calcular el empuje de la tierra y del agua separadamente. El agua que rodea las partículas del terreno, produce un empuje horizontal sobre la pared, y sobre las partículas mismas obra la subpresión. Se debe, en consecuencia, calcular con el empuje total del agua y con el empuje del terreno disminuído por la subpresión.

Este empuje de tierra se calcula de la manera corriente disminuyendo únicamente el peso específico del terreno.

Si se designa por ϵ el volumen de los huecos del terreno, la supresión vale $1(1-\epsilon)$, y por lo tanto el peso específico que se adoptare para el cálculo será

$$\gamma - 1(1-\epsilon) = \gamma - 1 + \epsilon.$$

considerando arena o ripio y designando por s el peso específico de las partículas, valor que fluctúa entre

$$s = \frac{\gamma}{1-\epsilon} = 2,6 \text{ a } 2,65,$$

obtendremos los pesos específicos bajo agua para distintas compacidades indicadas en la TABLA II.

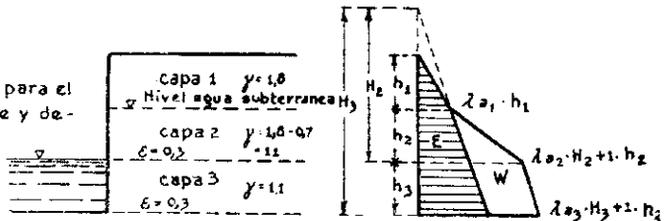
TABLA 2

| Pesos específicos de tierra completamente seca γ | Espacio hueco ϵ | Proporción de la parte solida $1-\epsilon$ | Pesos específicos bajo agua $\gamma - 1 + \epsilon$ |
|---------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1,56 a 1,59 | 0,45 | 0,60 | 0,96 a 0,99 |
| 1,69 " 1,72 | 0,35 | 0,65 | 1,04 " 1,07 |
| 1,82 " 1,85 | 0,30 | 0,70 | 1,12 " 1,15 |
| 1,95 " 1,99 | 0,25 | 0,75 | 1,20 " 1,24 |
| 2,08 " 2,12 | 0,20 | 0,80 | 1,28 " 1,32 |
| 2,22 " 2,25 | 0,15 | 0,85 | 1,37 " 1,40 |

Las cifras varían desde la naturaleza suelta hasta la compacta del terreno. La compenetración del relleno depende de la composición de los granos, de la formación del relleno y de la presión a que están sometidas las distintas capas. El

espacio hueco 0.20 corresponde a un relleno ya bastante compacto. Un relleno más compacto aún se encuentra sólo en raras ocasiones, cuando el escalonamiento del tamaño de los granos es favorable.

FIGURA 1
Áreas de empuje para el caso de arena sobre y debajo del agua.



En el caso de terrenos ripiosos y arenosos saturados de agua, las áreas de empuje deben representarse como se indican en la FIG. 1. En aquellas capas

en las cuales existe agua a ambos lados de la pared, se indica solamente la subpresión que actúa a un lado. Que se calcule o no según este procedimiento

bajo separación del empuje de tierra y del agua no es de gran influencia para el empuje de tierras por introducir, pero sí sobre la magnitud de la resistencia del terreno. El cálculo separado es necesario para el caso de terrenos arenosos, porque la presión de agua se neutraliza a través de ésta. Terrenos más compactos (menos permeables) que no permitan el paso al agua e impidan la neutralización de las presiones de agua, deben ser considerados también como terrenos saturados de agua, es decir, terrenos húmedos, en los cuales tampoco la presión de agua, y la subpresión se transmiten. Averigüese el % o la porción de agua y el peso específico del terreno dependiente de ella, pero introdúzcase como ya se ha dicho más arriba los valores del rozamiento interior con especial cuidado.

Puede mencionarse, a propósito de esto, la afirmación de Rankes, de que en el fondo de los puertos la subpresión no llega a formalizarse en la mayoría de los casos, porque las capas son impermeabilizadas por los sedimentos inmediatamente bajo el fondo del agua y separan las capas de arena más profundas y limpias. Estas serán consideradas entonces como húmedas, pero no como saturadas de agua. Esta interpretación no es muy exacta, porque los huecos de la arena no están llenos con aire sino con agua. Cuando en los casos investigados por Rankes, la consideración de subpresión, es decir, el cálculo separado, produce resultados muy desfavorables, en tal caso probablemente la resistencia del terreno ha sido tomada muy baja;

con esto nada se ha demostrado contra la validez del cálculo separado.

3.º *Altura de la sobrepresión.* — En cada caso particular debe determinarse la diferencia de nivel que deberá ser introducida en el cálculo. El nivel libre del agua baja o sube en la zona de influencia de las mareas; en la costa alemana raras veces más de 0,4 m. por hora, en el curso superior de los ríos alemanes la velocidad ascendente del agua apenas es la mitad del valor anterior. De la permeabilidad de la pared y de la permeabilidad del terreno depende el nivel del agua que se produce en el terreno. Para arena gruesa y terrenos ripiosos no se le atribuye valor alguno a la impermeabilidad de la pared, pero sí para arena fina. Para este caso se producirán entonces las más grandes diferencias de nivel. En todo caso hay que consultar un buen drenaje que posibilite una neutralización de las presiones. En la mayoría de los casos la diferencia de los niveles no es mayor de 0,1 m., en zonas de mareas de 0,2 m. y en los casos más desfavorables 0,5 m. o también un poco más. En cálculo con más de 1 m. de diferencia de nivel de agua es para el caso de terrenos arenosos, exagerado; es un cuidado, en consecuencia, muy poco económico.

Para el caso de terrenos menos permeables la cosa es distinta, en estos casos la saturación del terreno sigue el nivel libre del agua sólo muy lentamente o no se produce. Por este motivo habrá que determinar en los casos particulares los límites de la saturación.

(Concluirá).