

REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

FUNDADA Y SOSTENIDA POR EL CUERPO NACIONAL DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Redactor-Presidente... Excmo. é Ilmo. Sr. D. Leonardo de Tejada, Inspector general del Cuerpo
Redactores..... Los Sres. Presidentes de las Comisiones regionales de Ingenieros.
 D. Antonio Sonier, Profesor de la Escuela de Caminos.
 D. Manuel Maluquer, Ingeniero del mismo Cuerpo, *Secretario*.
Colaboradores..... Todos los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

SE PUBLICA LOS JUEVES

Redacción y Administración: Puerta del Sol, 9, pral.

EMPUJE DE TIERRAS

Demostración elemental de la fórmula de Boussinesq.

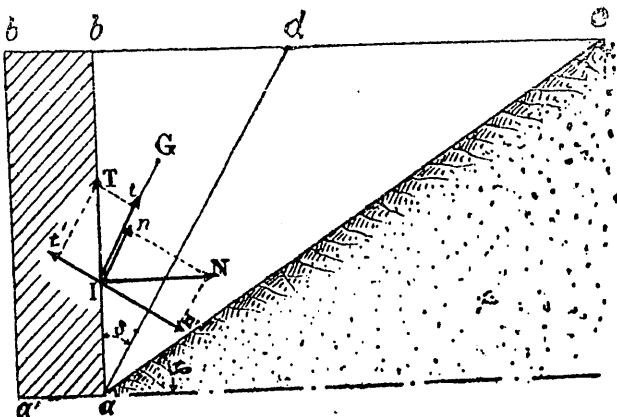
En el número correspondiente al 23 de Febrero último publicó la REVISTA un artículo acerca de la aplicación á las obras públicas de la fórmula de Boussinesq para el cálculo del empuje que ejercen las tierras sobre los muros de sostenimiento. Dicha fórmula es

$$R = C \frac{\pi h^2}{2},$$

en la cual R representa el empuje oblicuo al paramento posterior del muro, π el peso del metro cúbico de tierra, h la altura del muro y C un coeficiente numérico bastante complicado que depende de los ángulos de rozamiento de las tierras entre sí y de las tierras con la fábrica. En el citado artículo se dan tablas y reglas empíricas para calcular brevemente el valor de C en ciertos casos particulares que se presentan con mucha frecuencia en la práctica.

M. Boussinesq ha tenido en cuenta, al deducir su fórmula, el rozamiento de las tierras contra el paramento interior del muro. Su teoría es muy científica, y como en todos sus trabajos, este insigne matemático hace gala de sus extraordinarias facultades y de su dominio sobre las mas elevadas ramas del análisis. Pero en un interesante estudio comparativo de las diversas teorías del empuje de las tierras, debido á M. J. B. Goudin y publicado recientemente en los *Annales des chemins vicinaux*, se encuentra una demostración muy elemental de la fórmula de Boussinesq para el caso en que el macizo de tierras esté limitado por un plano horizontal al nivel de la coronación del muro y el paramento interior de éste sea vertical.

Considera este autor los mismos prismas de empuje de la antigua teoría de Coulomb, y escribe la ecuación de equilibrio de todas las fuerzas que obran paralelamente al plano de deslizamiento, deduciendo de ella la fórmula de Boussinesq.



Sea abd la sección recta de uno cualquiera de estos prismas, definido por el ángulo δ que forma con la vertical el plano ad , por el cual se apoya sobre el resto del macizo de tierras. Llamemos P al peso del prisma, y sea G su centro de gravedad.

La componente de P paralela á ad será $P \cos \delta$. En el instante en que se inicia el movimiento, existirá además una fuerza de rozamiento opuesta á la anterior y cuyo valor es $Pf \sin \delta$. De modo que la fuerza que tiende á hacer deslizar el prisma á lo largo de ad será

$$P \cos \delta - Pf \sin \delta$$

A esta fuerza se opondrá la reacción R del muro, que puede descomponerse en una normal al paramento N , y otra tangencial T .

Descomponiendo á su vez estas fuerzas normal y paralelamente á ad , tendremos las componentes de N ,

$$\begin{aligned} In &= N \sin \delta \\ In' &= N \cos \delta \end{aligned}$$

La segunda origina un rozamiento $f' N \cos \delta$, que se opone al movimiento del prisma, y es, por consiguiente, del mismo signo que In .

Las componentes de T son:

$$\begin{aligned} H &= T \cos \delta \\ H' &= -T \sin \delta, \end{aligned}$$

ésta última negativa por ser de sentido opuesto á In' .

Origina, pues, un rozamiento

$$-f' T \sin \delta.$$

La ecuación de equilibrio será

$$N \sin \delta + f' N \cos \delta + T \cos \delta - f' T \sin \delta = P \cos \delta - f P \sin \delta.$$

Si llamamos ψ' al ángulo de rozamiento de las tierras contra el muro, vemos en la figura que

$$\begin{aligned} N &= R \cos \psi' \\ T &= R \sin \psi' \end{aligned}$$

$$y \quad P = \frac{1}{2} \pi h^2 \tan \delta$$

Siendo ψ el talud natural de las tierras ó el ángulo de rozamiento de las tierras entre sí, se obtendrá haciendo estas sustituciones en la ecuación del equilibrio,

$$R = \frac{1}{2} \pi h^2 \frac{tg \delta}{[tg (\delta + \psi) + tg \psi'] \cos \psi'}$$

Para hallar el empuje máximo, bastará sustituir en vez de δ el

valor $\frac{\pi}{4} - \frac{\psi}{2}$ que, como es sabido, corresponde al prisma de má-

ximo empuje, el cual se obtiene trazando la bisectriz del ángulo bac .

Hechas las transformaciones se llega á la expresión

$$R = \frac{1}{2} \pi h^2 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \frac{\cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)}{\cos \left[\varphi' - \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \right]}$$

que es la fórmula de Boussinesq.

El valor del coeficiente C es, según esto,

$$C = \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \frac{\cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)}{\cos \left[\varphi' - \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \right]}$$

Debe tenerse presente en las aplicaciones que este empuje forma con la horizontal el ángulo φ' de rozamiento de las tierras contra el muro. Si se supone, como lo admiten muchos autores, que este ángulo sea igual al de rozamiento de las tierras entre sí, en atención á que suele quedar adherida á las rugosidades de la fábrica una capa de tierra que forma una especie de enlucido, el empuje será paralelo al talud natural de las tierras ac .

En la figura se ve inmediatamente que el punto I de aplicación del empuje se halla al tercio de la altura del muro, puesto que G está al tercio de la mediana correspondiente al lado ad del triángulo abd .

L. G.

PANTANO DE LA ESTANCA EN CALAHORRA (4)

En el artículo anterior hemos copiado los párrafos de la Memoria descriptiva concerniente á nuestro indicado propósito; después del último transcrito, terminábamos aquella con un extracto de las tarifas para el suministro del agua, que juzgamos ocioso reproducir por el carácter especialmente local que reviste. Como consecuencia final deducíamos el rendimiento probable, y con las ilusiones que inevitablemente acompañan á proyectos que, como éste, se han trazado con verdadero cariño, llegábamos á suponer que en los años mejores podría llegarse á un beneficio del 12 por 100 del capital; pero no sin agregar que en años lluviosos los productos podrían ser insignificantes y aun nulos.

Luego veremos hasta dónde han correspondido los hechos á las esperanzas anunciadas.

Lo que no admitía duda era, que si bien el éxito del accionista no era seguro, la obra era altamente beneficiosa á la localidad, asegurando contra las sequías las cosechas del agricultor, lo que reportaba asimismo ventajas evidentes á los propietarios que no llevaban el cultivo directo.

No hubo así dificultad alguna para reunir el pequeño capital necesario. Por el contrario, desechando proposiciones que se me hicieron para proporcionarlo una sola persona, mis esfuerzos se dirigieron á que tomaran participación el mayor número posible de pequeños propietarios, con lo que se prevenían cuestiones que pudieran surgir en las expropiaciones, aprovechamiento de cauces, etc., asegurando de esta manera la rápida realización del proyecto.

Se fundó la Sociedad en 24 de Enero de 1884, fijando el capital en 150.000 pesetas, representadas por 750 acciones de á 200 pesetas cada una: habiendo reducido tanto el importe de cada acción al fin que acabamos de expresar.

El presupuesto general de las obras del primer grupo, únicas que nos proponíamos por de pronto realizar, y únicas que se han realizado, era el siguiente, en el que las últimas partidas son cantidades alzadas:

	Ptas. Cts.
Expropiación de terrenos.....	19.730
Obras de tierra del dique.....	45.500
Toma de aguas. {Obra de fábrica.....	3.025,07
{Obra de hierro.....	7.611,25
Aliviadero de superficie.....	947,36
Defensa del dique.....	1.724,85
Compuertas de entrada del agua en el pantano....	303,35
Desviación de la acequia de la «Torrecilla Alta»..	4.679,54
Módulo.....	808,76
Casa para el guarda.....	4.564,71
Ensanche del cauce de alimentación.....	3.000
Apertura del de toma y ensanche de su prolongación.....	2.000
Arbolado.....	2.500
Gastos de útiles y herramientas de los regadores, etc.....	1.500
Imprevistos.....	2.105,11
Total de ejecución material.....	100.000
Gastos de dirección, administración, etc. (15 por 100).....	15.000
Presupuesto total.....	115.000

En vista de esta cifra, sólo emitimos 600 acciones, y con la reducción en los gastos en las partidas alzadas y en los gastos generales no llegó á distribuirse el décimo dividendo pasivo: de manera que el capital invertido en la construcción fué realmente de 108.000 pesetas.

Las obras, llevadas á cabo por el sistema de contratos parciales á pública subasta, se terminaron en la primavera de 1885.

Diremos aquí, como digresión de la finalidad que perseguimos en este segundo artículo, que las obras se realizaron con entera sujeción al proyecto; pero debemos advertir que las compuertas inclinadas han confirmado, por completo, nuestros temores: el asiento desigual del terraplén arrastrando los puntos de apoyo de las varillas produjo la flexión de éstas haciendo imposible su manejo. Afortunadamente, con este temor, se habían dejado abiertas, y cerradas las llaves de pasó, construidas en Glasgow, que han funcionado perfectamente desde su instalación.

El revestimiento ó defensa del talud interior del dique, también se ha modificado posteriormente. Los cañizos fueron destruidos en pocos meses, y existiendo en la proximidad del dique bancos de pequeño espesor de una arenisca arcillosa, impropia como material de construcción, pero muy propia al objeto, sustituímos los cañizos con losas de esa procedencia, apoyadas sencillamente sobre el talud.

Como decíamos, las obras se terminaron en 1885; pero en los dos primeros años los pedidos de agua fueron casi nulos, en 1891 llegaron á ingresar 8.627 pesetas, y en 1893, el año hasta el último de mayor recaudación, se llegó á 9.768,25; pero ya la demanda de agua ha entrado en la costumbre de aquellos agricultores, y sólo en años muy lluviosos disminuye notablemente esa cifra. En este, por el contrario, se llevan ya recaudadas 10.700 pesetas.

La experiencia adquirida en los primeros años nos ha servido para arreglar la manera de suministrar el agua y fijar sus precios tendiendo á conseguir el mayor consumo, asegurando así, como vamos diciendo, alguna remuneración para el accionista, y sobre todo mayor beneficio para los intereses generales de los labradores.

Modificamos, algún tanto, nuestras primeras impresiones respecto á la fijeza del precio, y aumentamos el volumen de lo que hemos denominado en la Memoria, hila métrica, y ya en Septiembre de 1888 redactamos el Reglamento de riegos, cuyos seis primeros artículos copiamos á continuación:

«Artículo 1.º El agua para los riegos se proporcionará por

(4) Véase el número 1.245.