

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.
Colaboradores..... D. Manuel Maluquer, Ingeniero del mismo Cuerpo, *Secretario*.
 Todos los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

SE PUBLICA LOS JUEVES

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

CÁLCULO RÁPIDO DEL VOLUMEN DE UNA PRESA DE FÁBRICA

Introducción.

Con motivo de la formación del plan general de pantanos y canales de riego, los Ingenieros afectos á las Divisiones del servicio hidrológico, se ven precisados á calcular muchas presas de embalse para pantanos, necesitando hacerlo con toda la rapidez posible, y se ven en el caso de tener que estudiar y calcular con cierto detalle y detenimiento el perfil de dichas presas para calcular su coste aproximado, lo cual exige mucho tiempo y cálculos laboriosos, ó tienen que recurrir, para abreviar tiempo, á la adopción de uno de los innumerables tipos de perfiles de presas propuestos por diversos autores, perfiles que andan rodando desde hace mucho tiempo por manuales y formularios, y que hoy día no son aceptables, pues no tuvieron presentes sus autores, al calcularlos, algunos efectos conocidos ya hoy día, como es la subpresión del agua, aparte de que dichos perfiles no han sido del todo sancionados por la experiencia, pues han sido causa de algunos desastres.

Hemos creído por eso que tal vez fuera útil á dichos Ingenieros el disponer de un medio rápido que proporcionara con sencillez, rapidez y alguna aproximación, el volumen de fábrica necesario para la construcción de una presa de buenas condiciones de resistencia en un emplazamiento determinado, y por tanto su coste. Este es el motivo que nos induce á escribir este ligero artículo, en que nada se hallará de nuevo, y si sólo el deseo de poder ahorrar tiempo y trabajo á nuestros compañeros.

Como ese volumen depende de la forma del valle en el lugar que haya de ocupar la presa, de la altura de agua que haya que embalsar y de la naturaleza mineralógica de los materiales de que se disponga para la construcción de la obra, indicaremos en función de estos datos el volumen de fábrica necesario por medio de una fórmula bastante sencilla, como se verá; y como este artículo ha sido redactado con un fin práctico, hemos procurado facilitar aún más la aplicación de dicha fórmula construyendo un cuadro que da en ciertos casos, que serán los que probablemente se presenten con más frecuencia, la fórmula que hay que emplear para hallar dicho volumen de la presa.

Perfil que se adopta para la presa.

Aun cuando sean muchos los perfiles propuestos, como son, por ejemplo, los debidos á los Sres. Boix, Crugnola, Delocre, Krantz y otros, no es difícil elegir uno aceptable, porque no lo es casi ninguno de los citados; en efecto, esos tipos de perfil han sido calculados hace ya mucho tiempo, y en ellos no se pudo tener presente por sus autores, por ser entonces desconocidos, algunos efectos que pueden dar lugar á accidentes desastrosos, siendo el principal de ellos el de la subpresión que el agua puede producir á la menor grieta que se produzca en el paramento de agua arriba, si al dibujar el perfil no se le estudió de modo que en todos los puntos de dicho paramento la compresión que

sufra la fábrica sea igual ó mayor que la presión hidrostática correspondiente; este efecto fué indicado por M. Le Rond en 1895, (*Annales des Ponts et Chaussées*, Julio), y por M. Maurice Lévy, quien además es autor de varios notables artículos referentes al cálculo de las presas de fábrica, y es el primero que indicó la necesidad de tener en cuenta la inclinación de ambos paramentos, lo cual hace que la presión sea paralela al paramento en los elementos próximos á éste, y que por esto las presiones reales en las fábricas sean mayores de lo que antes se presumía. (Véase *Comptes Rendus des séances de l'Académie des Sciences*, 5 de Agosto de 1895, y *Annales des Ponts et Chaussées*, 1897, cuarto trimestre.) El desconocimiento de todo esto ha sido motivo de la rotura de varias presas y de las catástrofes consiguientes por haberse adoptado perfiles excesivamente delgados.

En vista de ello, hemos fijado nuestra atención en el perfil triangular con paramento de aguas arriba vertical, propuesto por Castigliano en 1884, á cuyo perfil se acerca mucho el de la mayor parte de las presas construidas recientemente.

Dicho perfil ha sido preconizado y defendido en España por D. José Nicolau en los artículos que publicó en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS en el año 1889 (números de 4 y 18 de Mayo, 1.º y 8 de Junio, 20 de Julio y 24 de Agosto), y en esos artículos hallará el que desee profundizar algo más estas indicaciones demostrada la innegable ventaja de dicho perfil, al que el señor Nicolau aplica las teorías de M. Lévy, y deduce una fórmula sencillísima que nos da inmediatamente la forma que ha de tener el perfil y esa fórmula, y por tanto, el perfil que de ella se deduce es el método adoptado en este ligero estudio, pues la fórmula debida al Sr. Nicolau reúne á su sencillez de cálculo la ventaja de dar un perfil de presa de muy buenas condiciones de resistencia.

Cierto es que esa fórmula da un perfil de mayor área que casi todos los demás perfiles propuestos por otros Ingenieros; pero es porque ese aumento es necesario, pues en este perfil se tienen presentes las subpresiones, etc., y en los otros no, y los demás perfiles no tienen estabilidad suficiente, como por desgracia se ha visto comprobado con la rotura de varias presas construidas con arreglo á ellos.

Además, como se trata sólo de hallar un presupuesto aproximado y á la ligera, es preferible pecar por exceso y hacer lo que se suele llamar un presupuesto de máximo, que pecar por defecto á indicar un coste insuficiente para la presa.

Admitido por lo expuesto el perfil que propone el Sr. Nicolau por su sencillez y buenas condiciones de resistencia, pasaremos á establecer las fórmulas objeto de este artículo, empezando por indicar las notaciones que hemos adoptado.

Notaciones adoptadas.

Llamaremos:

P = la densidad de la piedra con que se construirá la mampostería del cuerpo de la presa.

K = la densidad de esta mampostería, teniendo en cuenta la del mortero.

H = la altura de la presa.

L = la longitud de la presa en la coronación.

l = la longitud de la presa en la base.

d = la anchura que hay que dar á la coronación de la presa, que depende de la clase de tránsito que por ella haya de efectuarse.

V = el volumen de fábrica necesario para la presa, que es la incógnita del problema.

Debemos hacer sobre estas magnitudes que entrarán en la fórmula algunas advertencias.

Las dos densidades vendrán referidas á la densidad del agua del embalse como unidad, y son, por lo tanto, las relaciones de los pesos específicos de la piedra y de la mampostería al peso específico del agua embalsada.

La altura H de la presa se compone de tres partes:

1.º La altura de agua que haya que embalsar.

2.º El resguardo ó distancia vertical que hay que dejar siempre entre el nivel libre del agua á embalse lleno y la coronación de la presa, resguardo que es necesario dejar, y en el que va comprendida la altura del vertedero de la presa, á menos que se adopte la viciosa disposición de hacer que la misma presa haga de vertedero, vertiendo el agua sobrante en las crecidas por encima de la coronación, disposición muy poco recomendable en general.

3.º De la profundidad de los cimientos, si se desea que la fórmula dé incluido en el volumen de la presa el volumen del ci-

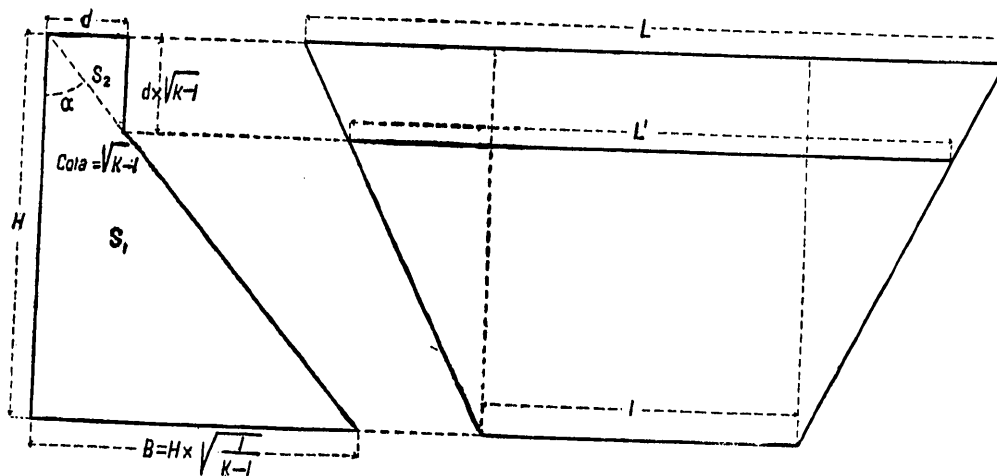
miento. Si se desea hallar sólo la parte superior al terreno, sin contar el cimiento, entonces este tercer sumando no debe entrar en el valor de H .

En las longitudes L y l debe venir incluido el arraigo que la presa ha de tener en ambas márgenes, si se desea que esa parte de la presa venga incluida dentro del volumen que da la fórmula. Si no se quiere hallarla al mismo tiempo, sino por separado, entonces L y l serán sólo los anchos del valle, y en caso contrario serán dichos anchos aumentados en la suma de las longitudes que la presa haya de incrustarse ó empotrarse en las laderas.

Advertiremos que aunque se hagan entrar esos cubos de fábrica del cimiento y los empotramientos laterales en la fórmula del sencillo modo indicado, eso no evita el tener que calcularlos, pues hace falta hallar su volumen para calcular el coste de la excavación que para ellos haya de abrirse.

Como para el cálculo del volumen de los cimientos precisa conocer el espesor de la presa en la base, espesor que viene dado por la fórmula del Sr. Nicolau en función de la altura H y la densidad K , damos en el cuadro final los valores que tendrá dicha base para los valores de K más corrientes, quedando sólo ya en función de H el espesor de la presa en la base, ó sea el ancho de los cimientos.

Pasemos ya á hallar la fórmula que nos da el volumen de la presa.



Expresión del volumen de la presa.

El perfil de la presa tiene la forma siguiente: se compone de un triángulo rectángulo de altura H y base $H \times \sqrt{\frac{1}{K-1}}$, pues

según la fórmula dada por el Sr. Nicolau, la cotangente del ángulo superior debe de ser $\cot \alpha = \sqrt{K-1}$. Sobre este triángulo va otro en posición inversa, de ancho en la parte superior igual á d , y rectángulo también, siendo por tanto sus catetos d y $d \times \sqrt{K-1}$. El volumen V de la presa se compone de dos partes: la correspondiente al primer triángulo (cuya área llamaremos S_1), que tendrá un volumen V_1 , y la correspondiente al triángulo superior, cuyo volumen será V_2 , y llamaremos al área de este segundo triángulo S_2 .

Se tendrán las fórmulas: $V = V_1 + V_2$

$$S_1 = \frac{1}{2} H \times H \sqrt{\frac{1}{K-1}} = \frac{H^2}{2} \sqrt{\frac{1}{K-1}}$$

$$S_2 = \frac{1}{2} d \times d \sqrt{K-1} = \frac{d^2}{2} \sqrt{K-1}$$

Como la sección del valle es un trapecio, aproximadamente, cuyas bases son L y l , el volumen V_1 se compone de tres partes: la proyectada en el rectángulo central del trapecio (cuyas bases

son H y l), que será un prisma de base S_1 y de longitud l , y las dos pirámides laterales, cuya base es S_1 , y cuyas alturas suman entre ambas $L - l$, proyectadas en los dos triángulos laterales del trapecio. Por tanto, ese volumen valdrá

$$V_1 = S_1 \times l + \frac{S_1}{3} \times (L - l) = S_1 \left(l + \frac{L - l}{3} \right) = \frac{S_1}{3} (L + 2l),$$

valor que podría haberse hallado directamente, pues V_1 es un tronco de prisma triangular, cuyo volumen será igual á la sección recta S_1 , multiplicada por la media aritmética de sus tres aristas, ó sea $\frac{L + l + l}{3}$.

De un modo análogo se obtendrá el volumen V_2 , que si llamamos L' la longitud de la presa al nivel de la base de ese triángulo superior, ó sea á una distancia $d \times \sqrt{K-1}$ por bajo de su coronación, se tendrá:

$$V_2 = S_2 \times L' + \frac{S_2}{3} (L - L') = \frac{S_2}{3} (L' + 2L).$$

Poniendo en vez de S_1 y S_2 sus valores, tendremos:

$$V = V_1 + V_2 = \frac{H^2}{2} \sqrt{\frac{1}{K-1}} \times \frac{1}{3} (L + 2l) + \frac{d^2}{2} \sqrt{K-1} \times \frac{1}{3} (L' + 2L).$$

El ancho L' se halla fácilmente en el trapecio de bases L y l y se tiene

$$\frac{L - L'}{L - l} = \frac{d\sqrt{K-1}}{H} \text{ de donde } L' = L - (L - l) \frac{d\sqrt{K-1}}{H}$$

y poniendo este valor en su lugar en la expresión del volumen, llegaremos á la fórmula:

$$V = \frac{H^3}{6} \sqrt{\frac{1}{K-1}} \times (L + 2l) + \frac{d^3}{6} \sqrt{K-1} \times \left(3L - [L - l] \frac{d\sqrt{K-1}}{H} \right),$$

ó sea

$$(1) \quad V = \frac{H^3}{6} \sqrt{\frac{1}{K-1}} \times (L + 2l) + \frac{d^3}{2} \times L\sqrt{K-1} - \frac{d^3}{6} (K-1) \times \frac{L-l}{H};$$

puede aún ponerse bajo la forma

$$(2) \quad V = a H^2 (L + 2l) + b L - c \frac{L-l}{H},$$

siendo a , b y c tres coeficientes que dependen solamente de d y K , y que hemos calculado para los valores más usuales de ambas variables, insertando al final de este artículo en un cuadro las fórmulas que hay que usar según los valores de d y K , para tener el volumen de la presa en función, sólo de su altura y sus longitudes en la base y en la coronación.

En resumen: el volumen de la presa viene dado por la fórmula (1) que es la que habrá que aplicar si se presenta un caso que no sea de los comprendidos en el cuadro de fórmulas inserto más adelante. Si el caso considerado es de los comprendidos en el cuadro, bastará aplicar la fórmula correspondiente, teniendo presente lo indicado en el párrafo: *Notaciones adoptadas*.

Sólo nos resta indicar el valor de K como puede hallarse. Como hemos llamado P la densidad de la piedra disponible, si llamamos M la del mortero ó cemento, como por regla general suele haber en la mampostería de las presas (según las obras construídas recientemente) un 40 por 100 de mortero y un 60 por 100 de piedra, el valor de K será:

$$K = 0,40 M + 0,60 P.$$

Si se trata de hormigón en vez de mampostería, entonces la proporción es de 50 por 100 y se tendrá:

$$K = 0,50 M + 0,50 P.$$

Si se trata de ladrillo, la proporción será de 25 por 100 y se tendrá:

$$K = 0,25 M + 0,75 P$$

Hemos adoptado como valor del peso del m.³ de mortero hidráulico 1,900 kilogramos, ó sea $M = 1,9$. El que desee adoptar otro valor distinto, fácilmente podrá hacerlo con las tres fórmulas anteriormente citadas, calculando con ellas el valor de K correspondiente.

Otra observación haremos antes de terminar. El perfil triangular es sólo aplicable hasta cierta altura, que se obtiene por la fórmula: $H_0 = \frac{R}{K}$ en que H_0 es en metros esa altura límite y R es

el coeficiente de resistencia práctico que se admita para la mampostería, en toneladas por m.², según hace ver el Sr. Nicolau en sus artículos, y dicho señor calculó un cuadro que da esa altura límite y que se halla en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS de 1.º de Junio de 1899.

Advertiremos que existe la creencia errónea de que para R hay que tomar valores escasos y hay quienes indican no debe pasarse de 60 ó 80 toneladas por m.² ó sea 6 ó 8 kilogramos por cm.²; á lo que se puede hacer observar que hay presas construídas que resisten mucho más aún, por ejemplo, la de Tibi ó Alicante, que resiste hace muchos siglos á razón de 124 toneladas por m.² en su base y en la cual la presión se elevará á más de 160, ó sea más de 16 kilogramos por cm.², cuando se hayan ejecutado las obras comenzadas recientemente, de recrecimiento de dicha presa en 8 metros de altura á más de los 41 que ya tiene hoy día, y que una presión mayor aún tal vez soporta la presa de Croton (para la alimentación de agua potable de New-York). No depende el buen éxito de estas obras de que se hallen calculadas para resistir presiones pequeñas, pues otras se han caído con presiones mucho menores, sino de calcularlas con arreglo á sanas doctrinas y combinar sus disposiciones con sujeción á las reglas del arte de construir.

Aplicación de la fórmula.

El volumen de la presa vendrá en resumen dado por la fórmula: $V = a H^2 (L + 2l) + b L - c \times \frac{L-l}{H}$ y á continuación

damos un cuadro en que se hallarán los valores de a , b y c que entran en dicha fórmula. Como esos valores son función de d , ancho de la coronación, y K densidad de la mampostería ó fábrica, el cuadro es de doble entrada, siendo las variables d y K .

Con estas indicaciones creemos que sobra para comprender el modo de usar el cuadro. En cuanto al espesor de la presa en la base, basta para obtenerle multiplicar el número correspondiente de la cuarta columna del cuadro por la altura de la presa. Teniendo ese espesor, fácil será calcular el volumen de los cimientos, según la profundidad que quiera asignársele en vista de la naturaleza geológica del terreno.

Podrá á veces la sección del valle tener forma que no sea la trapezoidal, y poderse usar, sin embargo, la fórmula. Por ejemplo, si se compone de dos trapecios superpuestos, prolongando los lados no paralelos del trapecio inferior, queda la presa dividida en tres trozos: un trapecio central, y á los lados dos triángulos ó un triángulo y un trapecio, ó dos trapecios, según que en el paso de un talud de las laderas á otro (ó sea en el paso de un trapecio al otro) no haya en ninguna margen banquetta ó parte horizontal, que la haya en una de las laderas ó que la haya en las dos. El volumen será la suma de los tres parciales hallados por medio de la fórmula. Según los casos podrán idearse descomposiciones diversas para poder usar la fórmula. Lo único necesario es, que todos los trozos en que se descomponga el volumen total han de comenzar desde la coronación de la presa, con la cual han de tener un punto ó recta común en la proyección vertical ó alzado de la presa.

Hemos supuesto que la sección del valle tenía forma trapezoidal, y habrá casos en que no lo será, y en los cuales adoptará una forma curva que podría asimilarse á un arco de círculo ó de parábola.

Caso en que la sección del valle sea curva cóncava.—Este caso será también frecuente, y lo estudiamos aquí, adoptando idénticas notaciones, igual perfil para la presa y la misma marcha en el cálculo.

Asimilaremos la sección del valle á un arco de parábola de segundo grado, cuya cuerda será L y cuya flecha será H .

La altura de la presa á una distancia y del centro del valle será $H \times (1 - \frac{4y^2}{L^2})$, según es fácil ver.

El área que llamábamos S_1 valdrá: $S_1 = \frac{H^2}{2} (1 - \frac{4y^2}{L^2})^2 \times \sqrt{\frac{1}{K-1}}$ y el volumen V_1 valdrá:

VALORES DE LOS COEFICIENTES DE LA FÓRMULA QUE DA EL VOLUMEN DE LA PRESA

ANCHURA DE LA PRESA EN LA CORONACION

NATURALEZA mineralógica de los materiales.																		
	$d = 2,5 \text{ m.s.}$			$d = 3,5 \text{ m.s.}$			$d = 4 \text{ m.s.}$			$d = 4,5 \text{ m.s.}$			$d = 5 \text{ m.s.}$			$d = 6 \text{ m.s.}$		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Relación del espesor de la presa en la base a su altura..... $\frac{B}{H}$	1,118	1,026	0,953	0,861	0,830	0,803	0,775	0,758	0,742	0,726	0,710	0,694	0,678	0,662	0,646	0,630	0,614	0,598
Peso específico de la fábrica..... K	1,80	1,95	2,10	2,20	2,35	2,45	2,55	2,65	2,75	2,85	2,95	3,05	3,15	3,25	3,35	3,45	3,55	3,65
Peso específico de la piedra..... P	1,75	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2
Ladrillo ó caliza muy poco densa.....	0,1863	2,7951	2,0882	0,1863	4,0249	3,6000	0,1863	5,4784	5,7168	0,1863	7,1554	8,5328	0,1863	9,0561	12,1496	0,1863	11,1804	16,6664
Caliza poco densa.....	0,1710	3,0459	2,4738	0,1710	4,3861	4,2750	0,1710	5,9699	6,7887	0,1710	7,7974	10,1327	0,1710	9,8686	14,4277	0,1710	12,1335	19,7914
Caliza media ó arenisca ligera ó hormigón con materiales calizos.....	0,1589	3,9775	2,8644	0,1589	4,7196	4,9500	0,1589	6,4239	7,8606	0,1589	8,3905	11,7326	0,1589	10,6192	16,7057	0,1589	13,1101	22,9163
Caliza media ó arenisca densa ó hormigón con caliza muy densa.....	0,1521	3,4233	3,1248	0,1521	4,9295	5,4000	0,1521	6,7096	8,5752	0,1521	8,7636	12,7992	0,1521	11,0914	18,2244	0,1521	13,6931	24,9996
Caliza muy densa ó granito ligero ó hormigón con materiales silíceos ó cuarcita poco densa.....	0,1434	3,6309	3,5154	0,1434	5,2285	6,0750	0,1434	7,1166	9,6471	0,1434	9,2952	14,3991	0,1434	11,7632	20,5025	0,1434	14,5937	28,1245
Granito denso ó cuarcita pesada.....	0,1384	3,7630	3,7758	0,1384	5,4137	6,5250	0,1384	7,3755	10,3617	0,1384	9,6333	15,4657	0,1384	12,1921	22,0212	0,1384	15,0520	30,2079
Mármol.....	0,1339	3,8906	4,0362	0,1339	5,6024	6,9750	0,1339	7,6256	11,0763	0,1339	9,9599	16,5323	0,1339	12,6055	23,5399	0,1339	15,5624	32,2912

$$V_1 = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \frac{H^2}{2} \left(1 - \frac{4y^2}{L^2}\right) \times \sqrt{\frac{1}{K-1}} \times dy,$$

y hechos los cálculos resulta

$$V_1 = \frac{4}{15} \times H^2 \times L \times \sqrt{\frac{1}{K-1}}.$$

Para hallar V_2 supondremos que en la parte superior del valle la parábola se confunda con su tangente; es decir, aplicaremos la fórmula del caso de perfil trapecial, y como en la parábola la subtangente es doble de la alcisa, se ve inmediatamente que eso equivale á suponer (y solamente para el triángulo superior de área S_1) que la longitud l de la presa en la base sea $\frac{L}{2}$. Tendremos entonces

$$V_2 = \frac{d^2}{2} \times L \times \sqrt{K-1} - \frac{d^3}{6} (K-1) \times \frac{L - \frac{L}{2}}{H} = \frac{d^2}{2} \times L \times \sqrt{K-1} - \frac{d^3}{6} (K-1) \times \frac{L}{2H},$$

y el volumen total tendrá por valor

$$V = \frac{4}{15} \times \sqrt{\frac{1}{K-1}} \times H^2 \times L + \frac{d^2}{2} \times L \times \sqrt{K-1} - \frac{d^3}{6} (K-1) \times \frac{L}{2H},$$

que es la fórmula que hay que usar en este caso, en vez de la (1). Podemos ponerla también bajo la forma

$$V = m \times H^2 \times L + b \times L - c \times \frac{L}{2H},$$

siendo b y c los coeficientes mismos que indica el cuadro para el caso de la sección trapecial y m un nuevo coeficiente, cuyos valores para los distintos valores de K damos aquí:

$K =$	1,80	1,95	2,10	2,20	2,35	2,45	2,55,
$m =$	0,2981	0,2736	0,2541	0,2435	0,2295	0,2213	0,2141.

Añadiremos solamente que el tomar para V_2 la tangente por la curva produce un error por exceso, que dijimos era lo que debía hacerse, y no por defecto, para no indicar un coste insuficiente á la presa.

PABLO FERNÁNDEZ QUINTANA.

EL PANTANO DE TIBI

(PRESA ACTUAL)

(CONCLUSIÓN)

La continuación de este pleito, lejos de entibiar la perseverante acción del Municipio, alentó su constancia en sostener el nuevo incidente á que se le provocaba; y en tanto que los tribunales de justicia seguían conociendo las razones alegadas por las partes litigantes, la comisión elegida para la reparación de la rotura del Pantano gestionó el medio para que aquélla se efectuase, celebrando una reunión con el Ayuntamiento el día 16 de Septiembre de 1731.

A 16.000 libras se calculó que ascendería el gasto de la obra á que nos referimos, y para cubrirlo juzgóse conveniente vender con facto de retrovendo 16 hilos de agua, que se crearon aumen-