

compresión del hormigón que corresponde a los montantes bajo la acción del viento a 270 kg/m^2 , corriente del agua y cuerpos arrastrados y tramo recto descargado, y para las armaduras, $1\,169,98 \text{ kg/m}^2$ en las riostras superiores o de coronación, y tiene lugar para la acción del viento a 170 kg/m^2 , corriente del agua, cuerpos arrastrados y tramo recto cargado.

Los accesos al puente tienen lugar: por la margen derecha, para su enlace con el trozo cuarto de la carretera, en dirección a La Roca, y con el camino vecinal de Montijo a Lobón, y por la margen izquierda, a unirse con la carretera del circuito de Madrid a Portugal por Badajoz. El volumen de tierras que cubican los terraplenes es de $9\,900 \text{ m}^3$, y de 190 el de desmonte.

El afirmado del puente es de adoquín microgranítico sobre lecho de mortero, pavimento adecuado al tráfico peculiar del puente, carros de llanta estrecha en su mayoría.

Los detalles de la construcción pueden seguirse en las fotografías que acompañan a este artículo, que hemos dedicado especialmente a lo que se refiere a los apoyos del puente, y que completaremos más adelante con lo que respecta a arcos y tramos rectos.

El presupuesto de ejecución material ascendió a 1 281 987,48 pesetas; el de contrata, a 1 474 285,60, habiéndose ejecutado todos los trabajos en 32 meses.

César VILLALBA GRANDA
Ingeniero de Caminos de la Jefatura
de Puentes y Cementaciones.

Nuevas ideas sobre presas¹

Presas de fábrica. - Fundamentos del método de Trial Load.

II.

1.ª PARTE. — GENERALIDADES.

a) La presa ideal y sus limitaciones.

La presa bóveda es la presa por antonomasia. Hemos visto en el artículo anterior las experiencias existentes sobre su seguridad y son de todos conocidas sus ventajas económicas.

Siempre que nos encontremos, en un clima no muy extremado, ante una garganta en V o en U muy estrecha, de laderas simétricas o transformables en tales, con unas cimentaciones geológicamente satisfactorias y de elasticidad calculable y un desagüe sin características especiales, podremos hacer la presa ideal.

Y esta será en general una presa bóveda finísima, en desplome hacia aguas abajo, de arco y radio variables sin apartarnos mucho de los 125° y secciones verticales no comparables a ninguna figura geométrica. La presa de Safford, de que hablábamos en el artículo anterior es un ejemplo típico y, según veremos, mejorable.

El cálculo de una presa tal es laborioso pero remunerador y perfecto en el estado actual de nuestros conocimientos. Para llegar a su máximo rendimiento, necesitamos conocer con gran aproximación la elasticidad de la roca y de los hormigones empleados y poder reducir considerablemente los efectos de temperatura y retracción de fraguado.

Al estudiar cimientos y hormigones, veremos que todas estas condiciones son asequibles, pero antes es preciso que estudiemos el método general de cálculo para tener idea de la importancia de estos factores.

Ahora bien: esta presa que hemos dado en llamar ideal sólo es aplicable a las condiciones ideales a que nos hemos referido. Al desaparecer estas condiciones, aparecen nuevos tipos de presa más económicos. A medida que se ensancha el valle, aparecen el arco-grave-

dad, los contrafuertes con bóvedas, pantallas o martillos y, al aumentar el caudal o descender la altura, las presas vertedero de los diferentes tipos, incluidos el de gravedad recto y los móviles. Al elevarnos sobre el nivel del mar, aparecen las presas de escollera y de tierra y ambas (sobre todo las últimas) siempre que la proximidad de buenos materiales pese más que el alejamiento de buenos cementos. La inseguridad de los cimientos nos llevará también a tipos de tierra y escollera y, en casos extremos, a los tipos para terreno permeable.

Este esquema, que ampliaremos más tarde en la discusión general, nos indica ya las limitaciones de la presa bóveda ideal, pero no las de su método de cálculo, pues el método del "trial load" que vamos a exponer se aplica indistintamente a las presas-bóveda, a las de arco-gravedad y a las de bóvedas múltiples. Así pues, hablaremos por ahora de presas-bóveda y aplicaremos después su cálculo al de otros tipos.

b) Fundamentos elásticos del método de "trial load".

La Comisión de presas de arco, que realizó hace poco tiempo interesantísimos estudios sobre presas existentes en Norteamérica, llegó a la conclusión de que los esfuerzos principales que resistían estas estructuras eran aproximadamente verticales y horizontales.

Este resultado, unido a los estudios fotoelásticos y a los datos de los aparatos medidores de tensión, ha aumentado el prestigio de todos los métodos de cálculo reticulado ("Trial Load", método de Stucky, etcétera). Se ha demostrado que toda presa-bóveda se puede considerar como una estructura infinitamente múltiple, es decir compuesta de infinitos arcos elementales *relativamente* empotrados en sus extremos e infinitas ménsulas *relativamente* empotradas en su base.

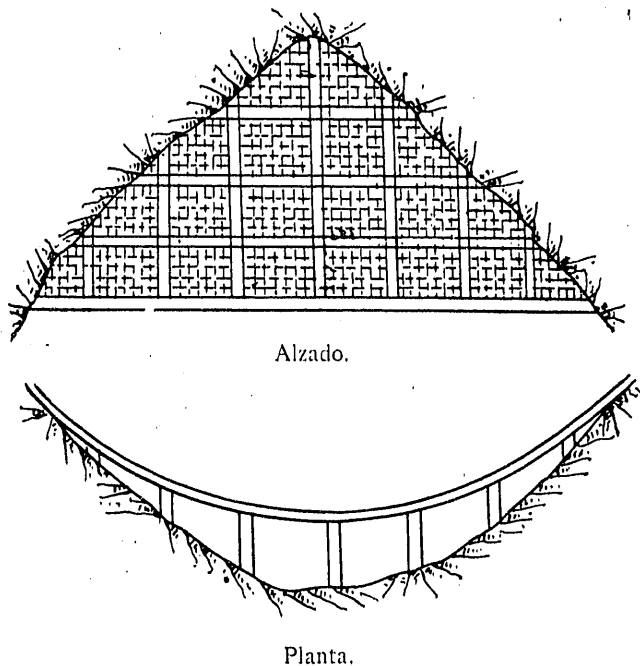
El problema, planteado así, es inabordable y su simplificación se puede asemejar a la substitución del cálculo diferencial por el cálculo de diferencias fini-

¹ Véase la REVISTA del 15 de diciembre de 1934, página 453.

tas: dividir en un número finito de arcos y ménsulas de dimensiones unitarias y calcular varios de estos elementos, para estudiar las deformaciones en una serie de nudos (fig. 1.^a).

Pero antes de adentrarnos en el problema, veamos los principios elásticos que nos permiten operar así:

Es una propiedad conocida que, en toda estructura múltiple, los esfuerzos se reparten según la línea de máxima resistencia de tal modo que, al deformarse los miembros, no se rompa la continuidad de la estructura.



NOTA — En la planta sólo se han marcado las ménsulas para mayor claridad. En el alzado las líneas horizontales y verticales interrumpidas indican la división hipotética de la presa; las llenas, los elementos que se eligen y se calculan.

Figura 1.^a

Sea, por ejemplo, la estructura *c* (fig. 2.^a) y veamos cómo se reparte la carga *P* entre sus miembros. Podemos considerar la estructura *c* compuesta de las dos ménsulas *a* y *b*, estáticamente determinadas. Si suponemos ambas separadas y $P = P_1 + P_2$ podemos, dando a P_1 y P_2 valores arbitrarios, tantear las deformaciones de *a* y *b* hasta encontrar cargas para las cuales los puntos A_1 y A_2 deformados sigan coincidiendo como los A_1 y A_2 originales. Esa será la solución del reparto de cargas. Una vez determinada, bastará aplicar P_1 y P_2 a las ménsulas correspondientes para obtener los esfuerzos en los puntos que nos interesen.

Este sencillo procedimiento puede ser enormemente fructífero en todos los casos de estructuras complicadas. En lo que se refiere a presas, no sólo ha sido aplicado por el Reclamation Service en el método de "trial load" sino también por muchos ingenieros europeos en el método de Stucky.

Ambos métodos aplican la división hipotética en arcos y ménsulas (fig. 1.^a), pero el método del "trial load" tiene dos ventajas innegables:

1.^a Profundizar más en el problema, permitiendo hacer las simplificaciones de Stucky cuando sea lícito y alcanzar sin embargo más exactitud en los casos en que el método europeo da una aproximación grosera.

2.^a No hace ensayos con la carga total, sino con *cargas unitarias de tanteo*, método que, con un cierto entrenamiento, permite una gran rapidez y multiplicidad de estudios.

Frente a estas dos ventajas hay un serio inconveniente: la complicación. Sin un completo estudio y sin un cierto entrenamiento, puede resultar este mé-

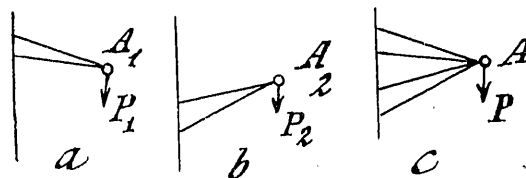


Figura 2.^a

todo mucho más largo que ningún otro. Sin embargo, conociéndolo a fondo, se obtienen resultados sorprendentes en precisión y rapidez.

c) Líneas generales del método.

Para abreviar, pasemos directamente a la aplicación a presas de arco y veamos las complicaciones que surgen.

Suponiendo la presa dividida en la forma que indica la figura 1.^a, los elementos se deformarán radialmente y habrá que tantear varios repartos de cargas hasta que los nudos coincidan. Este ajuste radial es, sin embargo, imperfecto, pues entre otros efectos secundarios, tendremos el que tiende a dejar el nudo en la forma que indica la figura 3.^a a.

Naturalmente, esto no ocurre en la práctica, sino que queda como en la figura 3.^a b, pero para llegar a esto habrá que aplicar un momento *M* al arco y otro igual y contrario a la ménsula.

Esto introduce nuevos esfuerzos en ménsula y arco, con los cuales habrá que ajustar los resultados obtenidos y volver a hacer el ajuste radial.

Igual ocurre con los esfuerzos tangenciales, que también producen deformaciones en los nudos y nos obligan a hacer otra corrección. El coeficiente de Poisson produce otros efectos secundarios, de que en su lugar hablaremos.

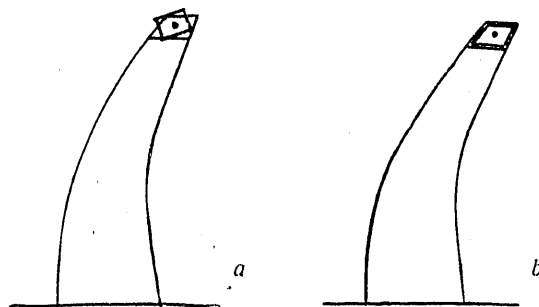


Figura 3.^a

Estos esfuerzos y los ajustes tangencial y de torsión que los calculan son despreciables para presas delgadas en valle estrecho. Empezaremos, pues, por estudiar estas presas haciendo sólo el ajuste radial y generalizaremos la teoría después, introduciendo los esfuerzos secundarios.

d) *Reparto de cargas en general.*

Las cargas que actúan en una presa de arco son de tres clases:

- 1) Cargas verticales

{	Peso propio. Componente vertical de la carga de agua. Subpresión.
---	---
- 2) Cargas de temperatura.
- 3) Cargas horizontales

{	Componente horizontal de la carga de agua. Presión de los hielos.
---	--

Estas cargas se reparten del modo siguiente:

1.º *Las cargas verticales se aplican sólo a las ménsulas.* — El arco se considera horizontal y estas cargas sólo producen en él un efecto de viga flotante y un efecto de torsión debido a la curvatura. Ambos efectos son siempre despreciables. En cuanto a las sobrecargas de construcción, no afectan al arco. La más im-

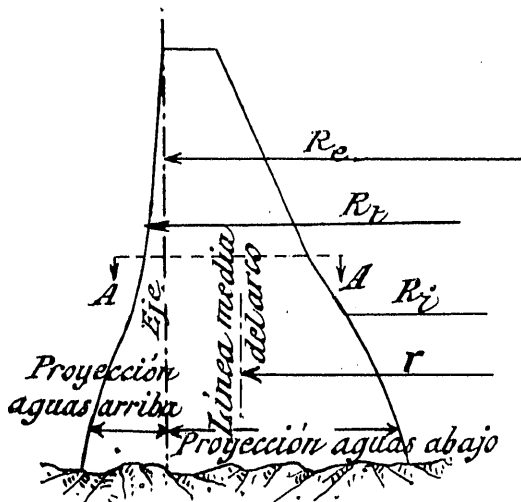


Figura 4.ª

portante de ellas, la retracción de fraguado, sólo produce tensiones en el trasdós, esfuerzo que no influye para nada en un arco de hormigón. Basta después rellenar las grietas que se produzcan para que el arco funcione como tal.

2.º *Las cargas de temperatura afectan sólo al arco.* La ménsula no las sufre porque es isostática y la parte más apreciable de ellas será la que transmita al arco.

3.º *Las cargas horizontales se reparten entre el arco y la ménsula.* — Para esto sirve el "trial load". Los demás esfuerzos son en general despreciables.

e) *Esquema de la solución.*

Para un primer estudio, daremos a la presa unas dimensiones deducidas de la fórmula de los tubos o de una presa análoga y supondremos en ella un cierto número de ménsulas de 1 metro de ancho y un cierto número de arcos de 1 metro de alto. Hecho esto,

1.º Calcularemos por un procedimiento muy rápido los esfuerzos debidos a cargas verticales en las ménsulas.

2.º Aplicaremos a cada arco una serie de cargas unitarias y calcularemos las deformaciones que produce cada una. Haremos lo mismo para las cargas de temperatura. (Todo esto se hace por medio de cuadros ya calculados).

3.º Aplicaremos las mismas cargas a las ménsulas y veremos las deformaciones correspondientes.

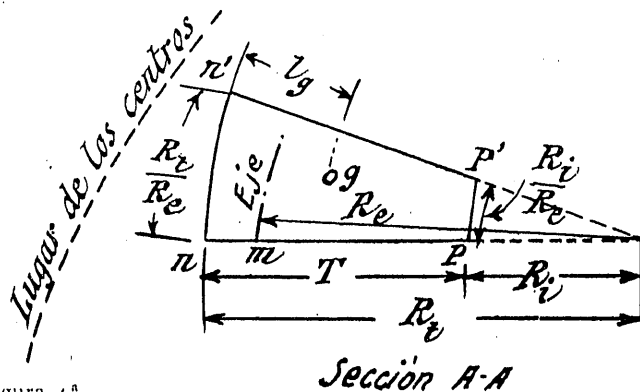
4.º Conocidas las cargas totales, haremos el ajuste radial, viendo en cada nudo cuántas cargas unitarias toman los arcos y cuántas las ménsulas para que las deformaciones coincidan.

5.º En los casos desfavorables, haremos las mismas operaciones para un ajuste tangencial y de torsión y, con los esfuerzos obtenidos, haremos un nuevo ajuste radial.

6.º Conocido ya el reparto de cargas, calcularemos para cada punto las tensiones moleculares en tres direcciones.

7.º En general, estas tensiones moleculares serán demasiado grandes o demasiado pequeñas y habrá que hacer un segundo estudio y un tercero y un cuarto, hasta llegar a una solución que nos dé la máxima economía dentro de la seguridad.

Veamos ahora el detalle de estas operaciones:



2.ª PARTE. — ESFUERZOS DEBIDOS A CARGAS VERTICALES.

a) *Forma del resultado.*

La ménsula tiene la forma indicada en la figura 4.ª. Tomaremos un ancho unidad a lo largo del eje del arco ($m m' = 1$ metro).

Los anchos agua arriba y agua abajo variarán al variar T , R_t , R_i y R_e ($n n' > 1$, $p p' < 1$).

La sección sufre flexión compuesta, es decir, suma de esfuerzos debidos a una carga normal más esfuerzos debidos a un momento flector.

Sea I momento de inercia de la sección alrededor de la tangente al eje del arco.

A área de la sección.

S , V y M esfuerzo, carga vertical y momento flector.

p y a subíndices para peso de hormigón y carga de agua.

Esfuerzos debidos al peso propio:

$$\text{Agua arriba } S_a = \frac{V_p}{A} - \frac{M_p l_g}{I}$$

$$\text{Agua abajo } S_p = \frac{V_p}{A} + \frac{M_p (T - l_g)}{I}$$

Esfuerzos debidos a la carga de agua:

$$\text{Agua arriba } S_p = \frac{V_a}{A} - \frac{M_a l_g}{I}$$

$$\text{Agua abajo } S_a = \frac{V_a}{A} - \frac{M_a (T - l_g)}{I}$$

A estos esfuerzos habrá que añadir el debido a la subpresión, cuyo cálculo no tiene dificultad ninguna. Veamos cómo se calculan V_p , V_a , M_p , M_a .

b) *Componente vertical y momento debidos al peso propio.*

El cálculo de V_p no ofrece ninguna dificultad conociendo el peso específico del hormigón y las dimensiones de la ménsula.

Para calcular el momento, vamos a utilizar un procedimiento muy rápido, transformando, a los efectos del cálculo, la ménsula de espesor constante en otra de profundidad constante. Sean (fig. 5.) a un trozo de ménsula de altura unidad y b la transformada del mismo trozo. Hemos conservado los volúmenes constantes a base de conservar las dimensiones como se indica en la figura. El elemento de volumen es igual a

$$\left(\frac{1 \times R_x}{R_e} dx \right)$$

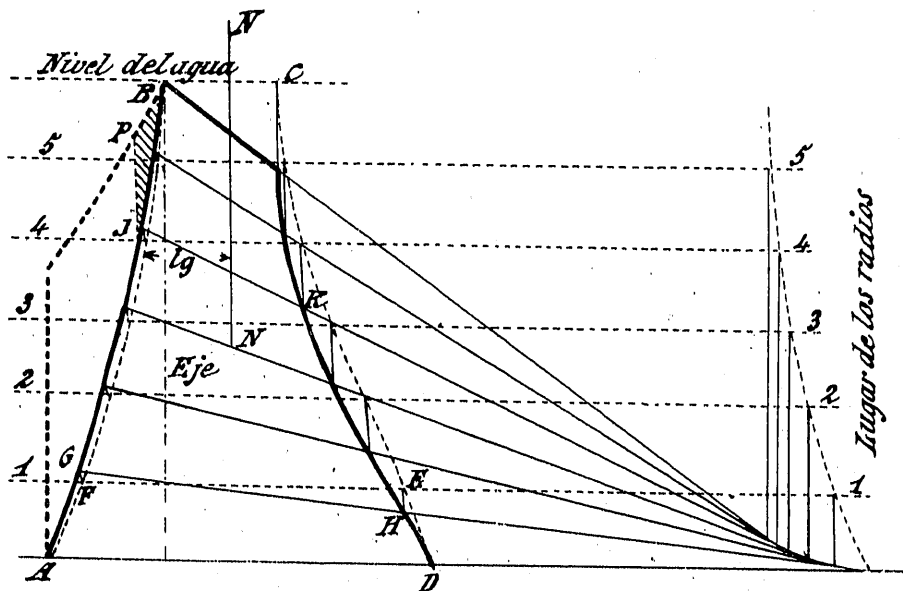


Figura 6.^a

tanto en el cuerpo primitivo como en el transformado. Además, como no hemos movido ninguna molécula radialmente, se conservarán constantes los momentos del volumen alrededor de cualquier eje tangencial horizontal. Demostrado, pues, que esta transformada nos sirve, veamos la manera de construirla.

Sean, en la figura 6.^a, las líneas de trazos finos el contorno de la ménsula de espesor variable y las líneas horizontales los niveles a los cuales deseamos conocer V_p y M_p . Consideraremos la sección entre AD y 1-1. Tracemos el eje vertical desde B y, por su intersección con 1-1, la recta hasta O . Refiramos los puntos E y F , por medio de verticales, a los G y H . Tracemos entonces, a la derecha, desde el centro del arco en el plano 1-1 la vertical hasta encontrar a la línea OH . Por el punto de intersección una recta hasta la intersección de 2-2 con el eje y continuemos así la construcción hasta llegar a B . Habremos hallado así una serie de puntos que, unidos por la línea gruesa, nos darán la transformada de la ménsula. Por geometría se puede demostrar fácilmente que cumple las condiciones.

Para obtener V_p y M_p procederemos como sigue: Vamos a hallarlos al nivel 4-4. Hallemos el centro de gravedad de la sección por 4-4 en la ménsula primi-

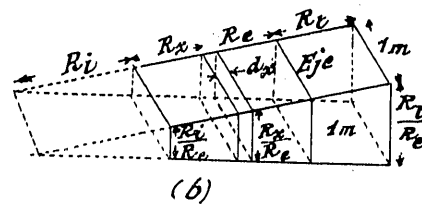
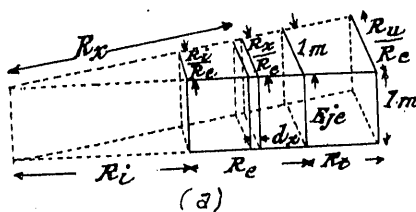


Figura 5.^a

tiva. Tracemos por él la vertical NN . Tomemos un integrador, y usando NN como eje, tracemos el contorno $B'X'K'J'$ con el brazo. La diferencia de lecturas en las escalas de áreas y momentos, multiplicadas por las constantes correspondientes, dan los resultados requeridos.

c) *Carga vertical y momento debidos a la carga de agua.*

El efecto de la carga de agua puede ser transformado en peso de hormigón y englobado en la solución de la figura 6.^a

Procederemos del modo siguiente: Supongamos que el nivel del agua llega a la coronación de la presa. En un punto cualquiera del paramento aguas arriba (sea, por ejemplo, el nivel 4-4) tomemos una distancia vertical JP igual a la altura de agua multiplicada por las relaciones de pesos específicos entre agua y hormigón. Haciendo, simplemente con la regla de cálculo, una serie de operaciones análogas, tendremos una serie de puntos análogos al P , con

los cuales trazaremos la línea de trazos gruesos. Esta es la transformada en hormigón de la carga de agua. Para hallar V_a y M_a , utilizaremos también el integrador con NN , por eje. Conviene hacerlo independientemente de los cálculos para peso propio para obtener por separado los esfuerzos a embalse lleno y a embalse vacío.

d) *Tabulación de los resultados.*

Para ordenar los resultados se puede disponer el cuadro siguiente:

Cota.	$\frac{R_t}{R_e}$	$\frac{R_d}{R_e}$	A	l_g	$T - l_g$	I	V_p	M_p	V_a	M_a	V_s	M_s	V	M
-------	-------------------	-------------------	---	-------	-----------	---	-------	-------	-------	-------	-------	-------	---	---

El subíndice *s* corresponde a la subpresión, sobre cuyo cálculo no hemos de decir nada nuevo.

como serie de arcos (sin ménsulas) excepto en los empotramientos.

3.^a En los empotramientos horizontales, la ménsula tomará casi toda la carga por ser mucho más rígida que el arco.

4.^a En los empotramientos verticales, si los hubiera, el arco tomaría casi toda la carga por ser mucho más rígido que la ménsula.

Estas dos consideraciones deben tenerse en cuenta al dar forma a una presa de tanteo y al suponer un reparto de cargas. Por muy delgada que hagamos una presa, siempre habrá que darle más espesor en la parte

inferior, que es el punto débil de la ménsula. En cuanto a los arcos, convendrá hacerlos con sección creciente hacia los extremos, más que por las razones indicadas, para combatir las excentricidades de la curva de presiones al variar la temperatura ambiente.

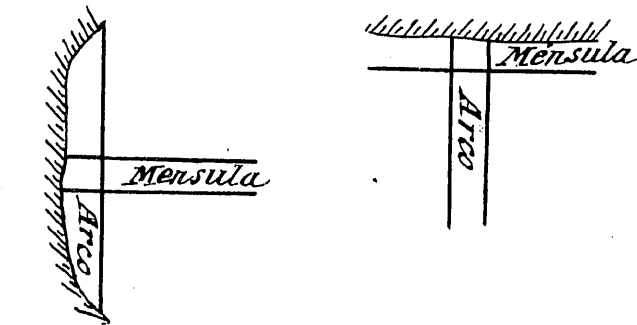


Figura 7.^a

3.^a PARTE. — REPARTICIÓN DE LAS CARGAS HORIZONTALES ENTRE ARCOS Y MÉNSULAS.

a) *Generalidades.*

El libro del Sr. Gómez Navarro, al describir el método de Stucky, explica claramente cómo se reparten las cargas entre arcos y ménsulas. No hemos de insistir aquí, por lo tanto. Sólo queremos hacer resaltar las siguientes propiedades fundamentales e importantísimas:

1.^a En la coronación no hay carga de agua ni, por lo tanto, reparto de esfuerzos exteriores, pero hay en general un momento en la ménsula, debido al peso propio. Este momento en los perfiles generalmente usados produce una deformación aguas arriba y una reacción del arco aguas abajo. Para evitar este efecto, convendría hacer la presa en desplome.

2.^a En el cuerpo de la presa se reparten las cargas, pero, cuando la ménsula es muy delgada, tiende a no soportar ningún esfuerzo. Por eso, las presas delgadas pueden calcularse

b) *Cargas unitarias en general.*

Para mejor comprensión de la teoría de las cargas unitarias, hemos dibujado en perspectiva un trozo de presa con un reparto de cargas (fig. 8.^a). La presa dibujada es gruesa y recta para mayor claridad del dibujo. El reparto de cargas dibujado corresponde, sin embargo, a una presa delgada y curva.

Vemos en la figura que el reparto de cargas es completamente irregular, pero — y esto es lo fundamental del método de Trial Load — siempre podremos descomponer las áreas poligonales representativas de las cargas de arcos y ménsulas en suma de áreas triangulares o rectangulares.

Estas cargas triangulares o rectangulares son las llamadas cargas unitarias. Si prefijamos una serie de cargas unitarias tipo, para cada arco y cada ménsula, calcularemos las deformaciones en todos los nudos producidas por cada una de ellas. Con este cuadro de

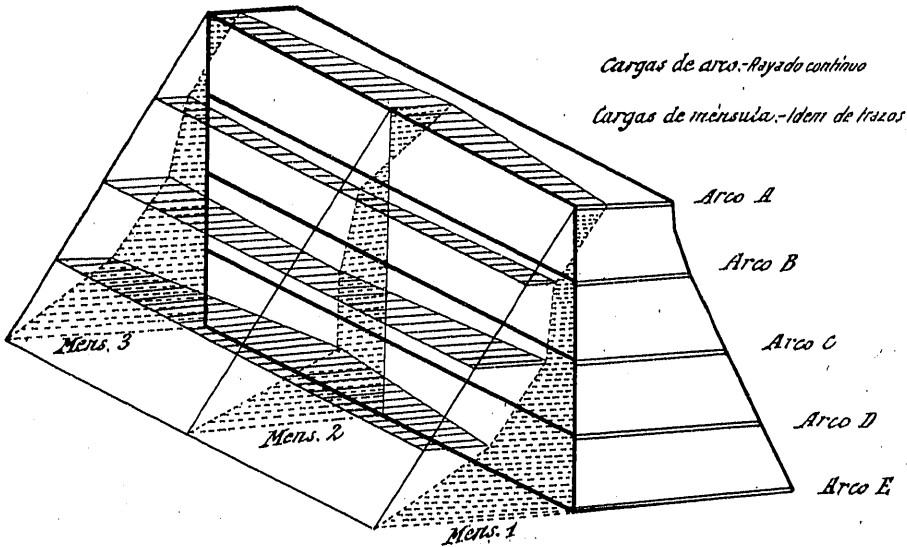
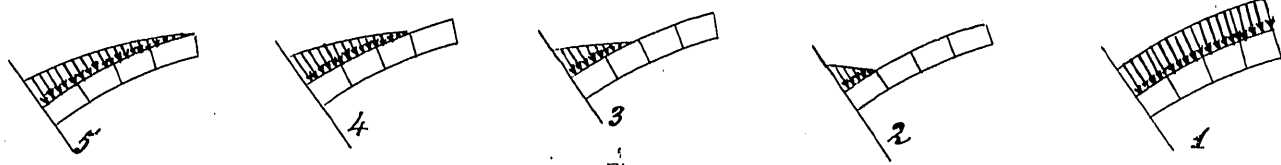


Figura 8.^a

lante, siempre podremos encontrar por tanteos una solución tal que una suma algebraica de cargas unitarias en arco y otra suma algebraica de cargas unitarias en ménsula cumplan las siguientes condiciones en cada nudo: 1.º Que su suma sea igual a la carga de

La deformación en la clave, por ejemplo, si marcamos con los subíndices correspondientes las deformaciones debidas a cada carga unitaria será:

$$\delta_c = 2 \delta_1 + 3 \delta_4 - 5 \delta_3 + \delta_2$$

Figura 9.^a

agua; 2.º Que las deformaciones de arco y ménsula coincidan.

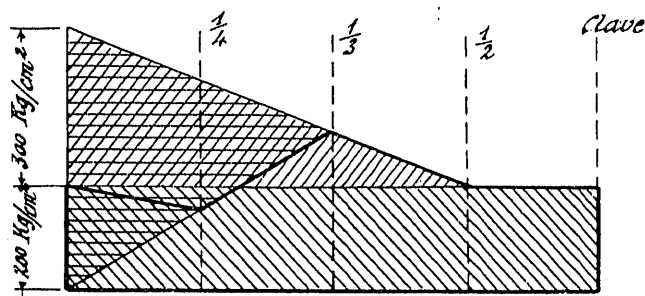


Figura 10.

A continuación aclararemos más el concepto.

c) Cargas unitarias radiales para arcos.

Utilizaremos en los arcos las cinco cargas unitarias que se indican en la figura 9.^a En ella hemos supuesto cada semiarco dividido en cuatro partes igua-

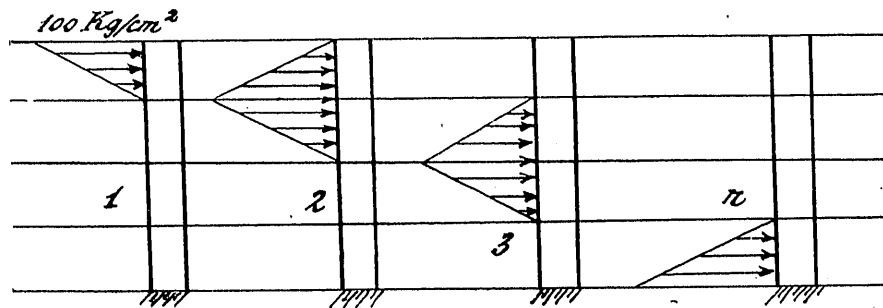


Figura 11.

les y una ordenada máxima de 100 kg. por centímetro cuadrado.

Para ver cómo se suman estas cargas observemos la figura 10. En ella se representa de trazo grueso la poligonal de las cargas del arco. Las zonas con diferentes rayados representan las cargas unitarias multiplicadas por coeficientes. La carga total del arco es igual a

$$2 \text{ cargas núm. } 1 + 3 \text{ núm. } 4 - 5 \text{ núm. } 3 + 2 \text{ núm. } 2.$$

d) Cargas unitarias radiales para ménsulas.

Para una ménsula en la que se tomen n nudos, las cargas unitarias a considerar serán las indicadas en la figura 11.

Si suponemos la ménsula de la figura 12 con la carga total indicada en a , esta carga será igual a

$$-0,5 \text{ cargas núm. } 1 + 0,5 \text{ núm. } 2 + 1,5 \text{ núm. } 3 + 2 \text{ núm. } 4 + 3 \text{ núm. } 5.$$

Y la deformación en la coronación será:

$$\delta_c = -0,5 \delta_1 + 0,5 \delta_2 + 1,5 \delta_3 + 2 \delta_4 + 3 \delta_5.$$

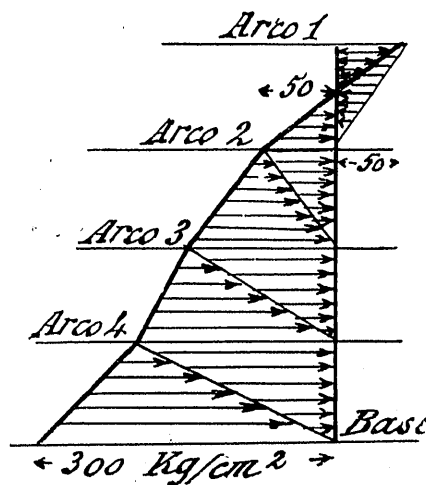


Figura 12.

e) Empleo de las cargas unitarias.

En el próximo artículo explicaremos cómo se utilizan estas cargas para obtener rapidez en los cálculos. Para calcular las deformaciones producidas por cada una existen cuadros que las dan. Pero hay dos momentos en los que sólo la práctica da rapidez de operación: uno es el de dar dimensiones a la presa que se va a tantear; otro es el ajuste radial.

Federico MOLERO
Ingeniero de Caminos.