

Investigación del coeficiente

de elasticidad de la mampostería

POR EL PROFESOR

A. S. TROYA

Uno de los materiales de construcción más antiguamente conocido es la piedra y el mortero, que le sirve de argamasa; la usaron desde los tiempos más remotos y no obstante es hasta ahora incierto el valor que debe darse al coeficiente de elasticidad, según la clase de obras.

Los ingenieros y constructores, han encontrado esta laguna, que no han podido llenarla a satisfacción y hoy me limitaré únicamente a dar a conocer el estado de conocimiento en esta materia.

Son tan pocas las ocasiones de que se dispone para hacer ensayos y experiencias, que no se puede dar conclusiones generales, y a esto se añade que las cualidades de resistencia varían tanto que sería difícil dar una ley que abarque a todas.

Es lógico y racional considerar a las mamposterías como materiales elásticos, puesto que se comportan exactamente como los metales, bajo los esfuerzos de compresión.

Sin embargo se ha propuesto considerar a las mamposterías como formadas de elementos indeformables e incomprensibles; pero esta hipótesis contraria a los principios de la mecánica, está desmentida por los hechos. Es evidente que los faros de mampostería y las altas chimeneas de las fábricas sufren bajo la acción de los vientos violentos, deformaciones y oscilaciones semejantes a las que se constata sobre las obras metálicas de la

misma forma. Las mamposterías sufren, pues, deformaciones elásticas como los metales, y si hasta aquí no se puede dar la demostración experimental, y determinar por observaciones precisas el valor del coeficiente de elasticidad, puesto que es necesario añadir a la rareza de los casos donde puedan ser útiles las observaciones por precisas, las dificultades de la experimentación de laboratorio sobre las obras existentes: en lo que concierne, por ejemplo, las oscilaciones que sufren los faros durante las tempestades, sería necesario medir la intensidad del viento, la duración y la amplitud de las oscilaciones, lo que se puede hacer con grandes dificultades.

Enunciaré aquí las pocas obras sobre las cuales se han hecho experimentaciones ya que la bibliografía está repartida en libros que no estarían al alcance de todos.

En el siglo pasado no encontramos sino un caso, de los que a mi conocimiento ha llegado, de experiencias hechas sobre una bóveda que se construyó exclusivamente con ese objeto y cuyas conclusiones permiten calcular el coeficiente de elasticidad para un tipo dado de mampostería; quiero hablar del arco de ensayo de las canteras de *Souppes* (Francia). Experiencias vigiladas y comentadas por los notables ingenieros M. Féline Romany y Vaudrey. Esta bóveda se construyó con la piedra calcárea de Château-Landon y de mortero de cemento. El cálculo se efectuó en la parte de bóveda que forma los paramentos exteriores, su extradós es paralelo al intrados, y comprende 77 dovelas de piedra tallada de 1.10 m. de altura por 0,50 m. de ancho, separadas por juntas de 0,012 m. de espesor con morteros de cemento de Portland.

Los datos relativos a esta obra son los siguientes:

Flecha: 2,125 m.

Luz: 37,886 m.

Radio del arco longitudinal: 85,00 m.

Espesor de la bóveda: 1,10 m.

Peso del metro cúbico de piedra (calcáreo de Château-Landon): 2.630 kilos.

Peso del metro cúbico del mortero de cemento: 2.100 kilos.

Peso del metro cúbico de mampostería: 2.620 kilos.

Después del decimbramiento de la bóveda, la clave bajó 0,014 m.

Aplicando a esta obra la fórmula relativa a la deformación de los arcos metálicos circulares de altura constante encastrado en los apoyos, y soportando una carga uniformemente repartida siguiendo una horizontal, da para el valor de E el valor de: $E = 250.000 \text{ k/cm}^2$.

La fórmula es:

$$f = \frac{15}{8} \times \frac{l p^2}{E S}$$

donde f = la flecha; l = la luz; p = peso del metro cúbico de mampostería; E = el coeficiente de elasticidad, y S = la superficie de la sección transversal.

Aplicando la fórmula a los datos de la bóveda, cuya dimensión tomada normalmente al plano del paramento exterior es la unidad; es

$$0,014 = \frac{15}{8} \times \frac{2620 \times 85^2}{E}$$

de donde se deduce el valor de E :

$$E = 2,5 \times 10^9$$

o sea

$$E = 250.000 \text{ k/cm}^2$$

Tal es el coeficiente de elasticidad de la mampostería de piedra de talla empleada en la bóveda que sirvió de experiencia.

Se hizo una segunda experiencia cambiando esta bóveda con otra construida de molones y mano de obra menos cuidadosa; el descenso de la clave bajo esta carga se encontró que era de 0,009. El cálculo de E basándose en esta última constatación, es muy largo, puesto que la carga para este caso no fue repartida uniformemente sobre la bóveda, la altura del maciso en los nacimientos era de 4,05 m y se reduce a 1,55 m. en la clave; por esto nos limitamos a decir que da una verificación muy exacta del precedente y conduce a admitir para E el valor ya citado.

Por los datos manifestados en el asentamiento de las mamposterías conduce a admitir que el coeficiente de elasticidad de las piedras decrece con su densidad.

Vamos ahora a indicar experimentos practicados por la Sociedad "Austriaca de Ingenieros y Arquitectos".

Las experiencias de mayor interés fueron hechas en cinco arcos de una luz de 22,98 m. y un ancho de 2,30 m.

Estos arcos son:

- 1º De mampostería de piedra de talla;
- 2º De ladrillo;
- 3º De hormigón;
- 4º De hormigón tipo Monier;
- 5º De acero.

Bóveda de mampostería de piedra. — Esta bóveda se construyó de piedra tallada con mortero de cemento Portland compuesto de 1 parte de cemento y 2,6 de arena, el experimento se hizo después de 51 días de terminado.

El espesor en la clave era de 0,60 m. y en los arranques de 1,10 m.

La carga se le aplicó verticalmente en cinco puntos, dividiendo la semi-luz en cinco partes iguales.

La última carga que causó la rotura fue de 3.222 kilos por metro cuadrado, sobre la mitad de la luz.

La bóveda falló cuando aparecieron grietas radiales, que principiaron en el extrados cerca de los arranques, en la junta de rotura, y en los riñones del lado descargado.

Bóveda de ladrillo. — Esta bóveda era idéntica en dimensiones a la bóveda de piedra y falló de una manera similar, bajo una carga de 2 938 hilos por metro cuadrado.

Bóveda de hormigón. — El espesor en la clave era de 0,446 m. y en los arranques lo mismo.

Esta bóveda se hizo de segmentos de hormigón compuestos de mezclas de diferentes proporciones, y los arranques se unieron con los estribos con un junta de asfalto de un centímetro y medio de espesor.

El arco falló bajo una carga de 3.622 kilos por metro cuadrado sobre la semi-luz.

Arco de hormigón, tipo "Monier". — Aquí las dimensiones generales fueron como las de arriba, pero el espesor en la clave fue solamente de 0,35 m. y en los arranques de 0,60 m.

El arco falló bajo una carga de 6.347 kilos por metro cuadrado sobre la semi-luz, las grietas aparecieron así:

- 1º Sobre el lado cargado en los arranques;
- 2º Sobre el lado descargado, en los riñones; y
- 3º Sobre el lado cargado en los riñones.

Arco de acero. — Falló cuando se le había aplicado una carga de 7.636 kilos por metro cuadrado, por encorvamiento de la porción descargada cerca de los riñones.

Deformaciones. — En todos los experimentos fueron medidas cuidadosamente las deformaciones causadas por el decimbramiento, por los cambios de temperatura, y los cambios al aplicar la carga.

Se anotó la carga que produjo la primera grieta.

Los arcos fueron finalmente ensayados hasta la completa destrucción y anotadas las correspondientes cargas.

Conclusiones. — Se encontró que para las bóvedas de piedra y ladrillo, las grietas aparecen primeramente en las juntas, separándose el mortero de la piedra o ladrillo. La resistencia a la adhesión del mortero para las piedras de la bóveda se encontró que llegaba a la cantidad de 8,44 kilos por centímetro cuadrado y el valor de $E = 67.500 \text{ k/cm}^2$.

En la bóveda de ladrillo la resistencia a la adhesión del mortero es de $4,92 \text{ k/cm}^2$, y el valor de E varía de 23.900 a 33.000 k/cm^2 .

De las últimas experiencias en arcos de hormigón la resistencia máxima es de $20,38 \text{ k/cm}^2$ y el valor de $E = 100.500$.

El arco del tipo Monier no fue discutido teóricamente, debido al empleo del metal dentro de la masa del hormigón.

El valor de E determinado por estas experiencias en el arco de acero es 1828000 que es un poco más pequeño que el valor obtenido en las experiencias de laboratorio sobre pequeñas muestras.

Aun en los arcos de mampostería las deformaciones fueron proporcionales a las cargas hasta un cierto punto, manifestando que el material se comporta de igual manera en los arcos como en las experiencias de modelos pequeños.

Por las medidas practicadas cerca de los arranques, indica que en el lado cargado, el arco se comporta como fijo en este extremo, y en el lado descargado no se manifiesta enteramente.

Este arco no se conduce ni como fijo ni como articulado, y los resultados teóricos obtenidos fueron tomados del término medio de aquellos que se encontraban considerando el arco como fijo y como articulado.

En todos los casos el arco falló en los puntos en los cuales indica la teoría.

Aunque los resultados obtenidos para E en las diferentes experiencias no son iguales, pues dependen del cuidado con que se ha fabricado las mamposterías, de la calidad de ellas, de la proporción empleada en la fabricación del mortero, de la cantidad que se emplea de este material en las juntas; pero sin embargo se deduce una conclusión muy importante: que las bóvedas de mampostería se conducen muy aproximadamente como *arcos elásticos fijos en los apoyos*, y entonces las fórmulas para los arcos elásticos, deben ser las únicas que se emplean en esta clase de obras.

Sería de desear con todo, que esta pequeña variación en los resultados se determinen más exactamente por medio de obser-

vaciones más precisas efectuadas en obras existentes. Las constataciones hechas en el momento del descimbramiento de los puentes de mampostería no pueden por lo general dar resultados concluyentes; los fenómenos que son difíciles de tenerse en cuenta, principalmente los efectos debidos a los cambios de temperatura, pueden influir notablemente sobre estos resultados y como la experiencia no puede ser renovada, es muy difícil deducir conclusiones ciertas.

Me permito indicar, que parece posible hacer observaciones más exactas en estos dos casos: 1º Se puede constatar las deformaciones sufridas por los diques, cuando se vacía o se llena un dique con agua. Aquí la fuerza exterior que actúa sobre la obra es conocida, aunque el tiempo que se necesita para llenar un dique es más de un día, y entonces las observaciones deben hacerse a largos intervalos. 2º Se podría medir las oscilaciones de las chimineas de alguna altura, bajo la acción del viento, conjuntamente con la intensidad de éste. Para lo que se necesitaría aparatos especiales y exactos, de los que carecemos todavía.



ÁREA HISTÓRICA
DEL CENTRO DE INFORMACIÓN INTEGRAL