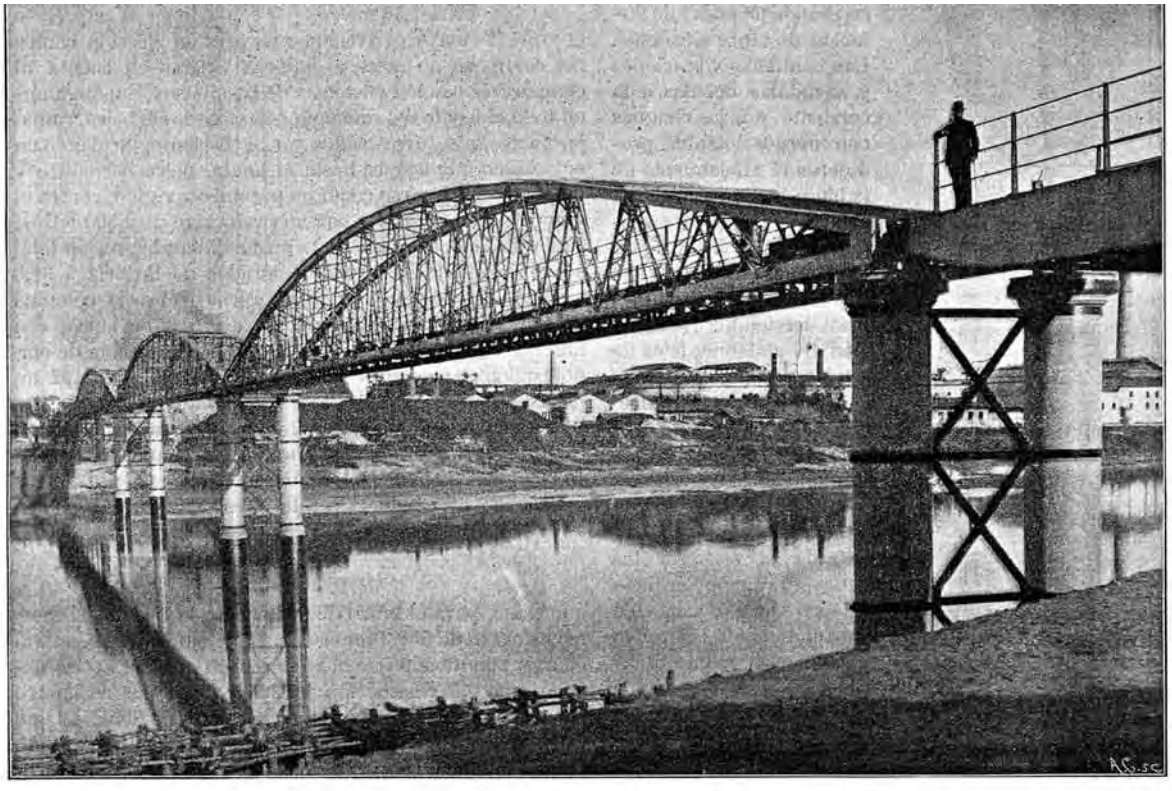
“Rotura de una pila tubular de la pasadera sobre el Guadalquivir en Sevilla”

Juan Manuel de Zafra

Revista de Obras Públicas vol.45, nº 1.209, noviembre de 1898, pp. 531-538

AÑO XLV. Madrid 24 de Noviembre de 1898. Número 1.209.



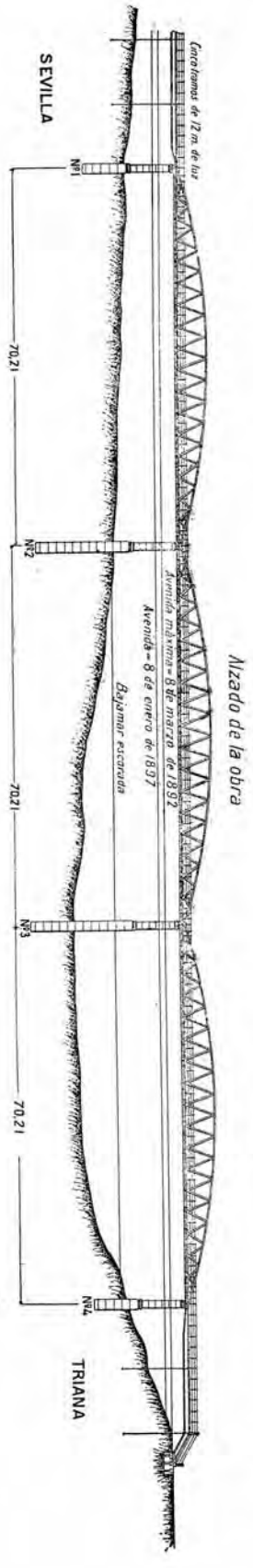
Pasadera sobre el Guadalquivir.—Vista general desde Triana.

ROTURA DE UNA PILA TUBULAR DE LA PASADERA SOBRE EL GUADALQUIVIR DE SEVILLA

En virtud de un convenio entre el Ayuntamiento de Sevilla y la empresa de abastecimiento de aguas, se ha construido para el paso de las tuberías sobre el Guadalquivir y para tránsito de peatones una pasadera, de tres metros de ancho y 294,63 de longitud. La obra, proyectada por MM. Anderson y Friend, de la Institución de Ingenieros civiles ingleses, antes del año 93, ha sido ejecutada por la casa Talleres de Zorroza, de Bilbao, bajo la inspección del Ingeniero de Caminos D. Alfonso Escobar, y posteriormente bajo la nuestra. Su coste ha sido de 337.636,01 pesetas.

Nada de particular ofrece la obra (véanse los grabados), pero ha ocurrido durante su construcción un accidente extraordinario y digno de ser conocido.

En Enero de 1897 se estaba terminando el relleno de hormigón de la parte inferior de la pila núm. 3, cuando sobrevino una gran crecida del Guadalquivir: sus aguas se elevaron hasta ocho metros sobre el nivel de la bajamar,



cubriendo por completo la parte de pila ejecutada, que sólo alcanzaba hasta la altura de pleamar viva, y casi por completo el andamio.

Estaba éste formado por pies derechos de 19 metros de longitud y 0,30 de escuadría, hincados tres metros en el fondo, cuyo calado en bajamar era de 7, y por tres planos de encepado y dos sistemas de cruces de San Andrés, cubicando el conjunto unos 11 metros, á los que corresponde un poder de flotación de cinco toneladas. Las continuas vibraciones y sacudidas debidas á la corriente y á los choques con cuerpos flotantes, produjeron el aflojamiento de la hinca de los pies derechos y, por otra parte, disminuyó esta hinca en un metro, por efecto de la socavación de la capa superficial del fondo. La flotación del andamio, lejos de ser inesperada, era un hecho previsto, y así sucedió, saliendo súbitamente á la superficie y arrastrándolo las aguas.

Lo imprevisto fué la desaparición de la pila, observada al recobrar las aguas su régimen ordinario de mareas. Reconocido inmediatamente el fondo por un buzo, se encontraron las dos columnas que la componían partidas á un nivel algo más bajo que el del terreno y en la forma que indican las figuras.

Suspendida la obra hasta ver qué partido se debía tomar, nos hicimos cargo de la inspección en 1.° de Marzo y procedimos, desde luego, á estudiar lo ocurrido, extrayendo uno de los trozos de pila. El problema era entonces oscuro: numerosísimos hundimientos ó destrucciones de pilas se han producido en los ríos que sufren fuertes avenidas, pero ninguno parecido á éste. Tratábase de una pila á medio construir, asentada sobre una capa de arcilla durísima, con una hinca de más de ocho metros á través de gravilla y grava de gran tamaño; cada una de sus columnas, separadas 3,30 metros entre ejes, se componía de anillos de hierro fundido de 1,50 metros de diámetro y 0,25 de espesor; ambas estaban ya rellenas de hormigón hidráulico y ambas aparecían, no desplomadas, sino partidas, conservando perfecta verticalidad los trozos empotrados en el terreno.

Desde luego, esta última circunstancia impedía atribuir el hecho á la socavación del fondo, que no pasó de un metro en la capa superficial de arena; á partir de esta profundidad, está mezclada con gravilla y grava en proporción y tamaño crecientes y es insocavable á las velocidades de avenida del Guadalquivir.

La rotura no pudo ser producida sino por un esfuerzo grande y de sentido horizontal. La corriente del Guadalquivir alcanza á 2,50 metros por segundo en la superficie durante las mayores avenidas. La presión ejercida contra las columnas no merece siquiera tenerse en cuenta ni compararse con la resistencia de las mismas. Supongamos en todo el frente del andamio detenidos los árboles, ramaje, pilotes, etc., arrastrados por la corriente, formando un entapizado que llegara hasta el fondo, fuera hermético y pudiera considerarse como un paramento rígido, contra el qu chocaran las aguas con una velocidad de 2,50 metros, supuesta independiente de la profundidad; la presión total sobre el área de 90 metros cuadrados no llegaría á 31,5 toneladas, de las que la mitad obrarían sobre la columna de agua arriba por intermedio de las guías de hinca, con un brazo de palanca de 12 metros sobre la sección de empotramiento, produciendo un momento flector de 192 toneladas-metros.

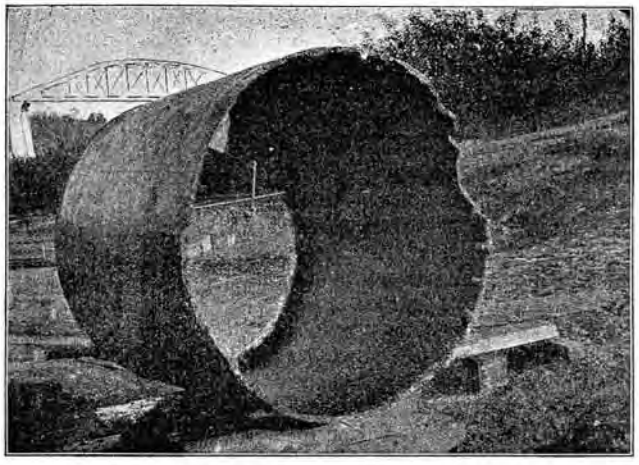
Suponiendo al hierro fundido una resistencia á la tracción de 10 kilogramos por milímetro cuadrado, ó sean 10.000 toneladas por metro cuadrado, el momento flector necesario para producir la rotura, es

$$\frac{RI}{v} = \frac{10.000 \times 0{,}3153}{0{,}75} = 4.204 \text{ toneladas-metros},$$

que exige, para el brazo de palanca de 12 metros, el enorme esfuerzo de 350,3 toneladas. Rebajemos ese número al cuarto, admitiendo que el hierro fundido tuviera tales defectos que sólo resistiera á 2,5 kilogramos por milímetro cuadrado; aun así, dicho esfuerzo es más de doble del que en condiciones exageradísimas hemos atribuído al causado por el empuje del agua sobre el andamio que, como veremos, ya había flotado cuando se rompió la pila.

Sólo hay otra causa capaz de producir la rotura: el choque de un cuerpo flotante entre dos aguas con una de las columnas. A primera vista parece inadmisible tal hipótesis, porque, á juzgar por el cálculo precedente, la resistencia transversal de la pila es enorme. Como no hay costumbre de comparar esfuerzos estáticos, que son los que siempre se tienen en cuenta en los cálculos, con esfuerzos dinámicos, la imaginación atribuye, desde luego, una masa también enorme al cuerpo que á una velocidad moderada pudiera producir el mismo efecto que un esfuerzo estático tan grande.

Sin embargo, esta era la única hipótesis admisible, tanto más cuanto que en uno de los reconocimientos había encontrado el buzo, á unos 13 metros de la pila, una barca cargada de piedra para machaqueo y completamente des-



Parte superior del anillo núm. 4.

trozada. Además, la circunstancia de estar partida en dos trozos la parte superior de la columna de agua arriba, inducía á pensar que en esa sección de rotura, situada á 4,50 metros sobre la de empotramiento, se hubiera verificado el choque, dejando quebrantado el material y produciéndose la separación en dos trozos al caer sobre el fondo.

Supongamos la columna como perfectamente empotrada en el terreno, formada por anillos de un hierro excelente, sin defectos de ningún género, que no se rompa sino á 15 kilogramos por milímetro cuadrado, y admitamos que las deformaciones se verifican con arreglo á una misma ley, aun pasado el límite de elasticidad, hasta el momento de producirse la rotura. Todas estas hipótesis son exageradamente favorables á la resistencia de la pila, y los resultados del cálculo serán, por lo tanto, muy superiores á los correspondientes en la realidad.

El momento flector de rotura será ahora 6.306 toneladas-metros y el esfuerzo estático correspondiente, obrando con un brazo de palanca de sólo 4,50 metros, 1.400 toneladas. La flecha producida en sentido horizontal á esos 4,50 metros del fondo, será

$$f = \frac{P l^3}{3EI} = \frac{1.400 \times 4{,}50^3}{3 \times 10.000 \times 0{,}3153} = 0{,}0135 \text{ metros.}$$

Sólo se pueden comparar los esfuerzos estáticos con los dinámicos por intermedio de los trabajos que se desarrollan por las fuerzas interiores al deformarse la pieza que los resiste. El desarrollado durante la flexión de una pieza empotrada por un extremo, es $\frac{1}{2}\int_o^f A \times dy$, siendo A el esfuerzo cortante; dicho trabajo es, en este caso,

$$T = \frac{1}{2} A f = 9{,}45 \text{ tonelámetros.}$$

Conocido este valor, podemos aplicar al problema en estudio el teorema de las fuerzas vivas, suponiendo que el cuerpo que choca está completamente desprovisto de elasticidad y que todo el trozo de pila superior á la sección de empotramiento obedece al choque, es decir, adquiere la misma cantidad de movimiento que si fuera un sólido libre. Ambas hipótesis son, con arreglo al criterio exagerado que llevamos, muy favorables á la resistencia de la pila.

Al chocar un cuerpo no elástico, de masa x, animado de una velocidad u, con la columna, ésta se rompe por la sección de empotramiento y el trozo superior, de masa m, adquiere, juntamente con aquel cuerpo, la velocidad

$$\frac{xu}{x+m}.$$

La expresión del teorema es

$$\frac{1}{2} x u^2 = T + \frac{1}{2}(x+m) \times \left(\frac{xu}{x+m}\right)^2$$

que se reduce á

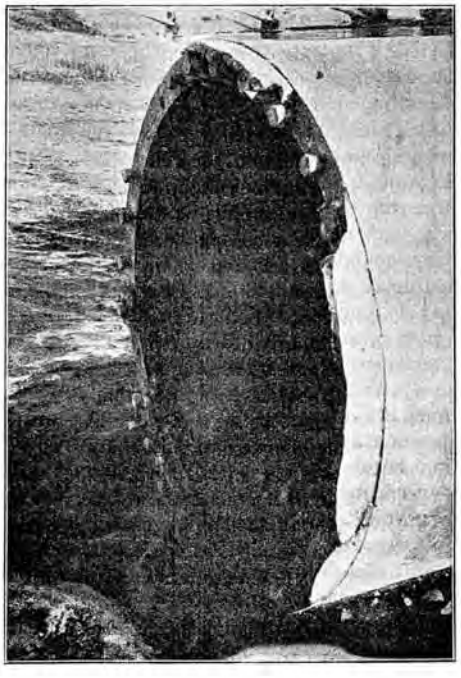
$$x = \frac{2Tm}{mu^2 - 2T}$$

ó

$$x = \frac{2T}{u^2 - \frac{2T}{m}}; \quad (1)$$

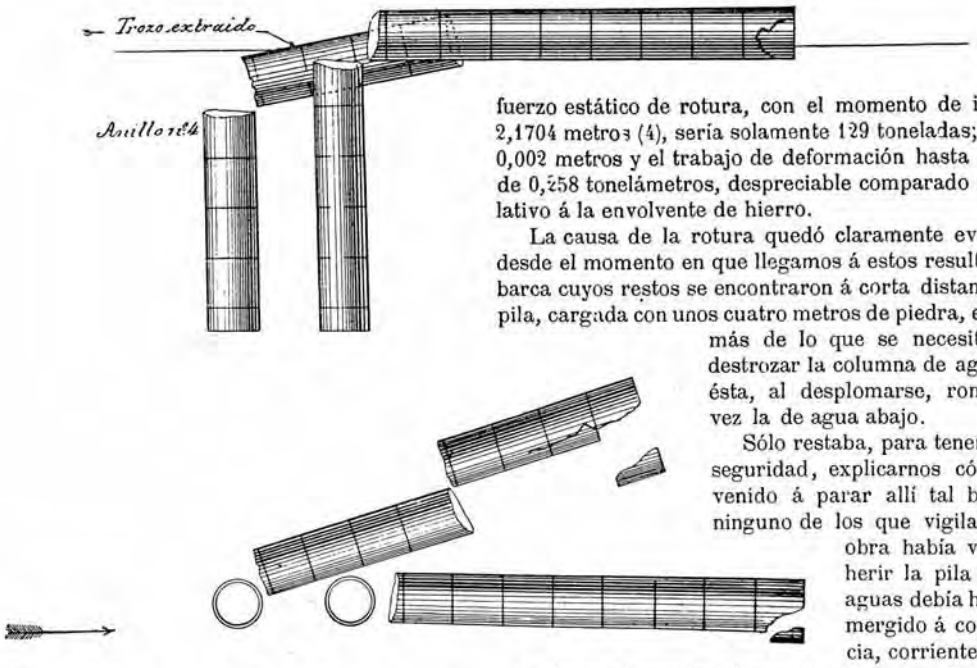
ecuación que liga la masa buscada con el valor de la resistencia por tracción, de la que es función el trabajo de rotura.

Aunque la velocidad superficial llega á 2,50 metros por segundo, supondremos en éste y en todos los cálculos que sigan, que la del cuerpo que choca no pasa de 2,00. Las masas las expresaremos por los mismos números que midan los pesos, en lugar de tomar éstos divididos por la aceleración g; lo que equivale á tomar una unidad g veces



Parte inferior del anillo núm. 5.

Pila destruida



menor que la correspondiente dentro del sistema *metro, kilo, segundo*, con la ventaja de que esos números hablan más á la imaginación.

Observemos de paso que el verificarse el choque dentro del agua en nada altera lo establecido, puesto que las fuerzas vivas y los trabajos sólo dependen de velocidades y de masas y en nada afecta á aquéllos el principio de Arquímedes. Hay, sin embargo, una influencia favorable á la resistencia de la columna: el agua que la rodea contribuye con su masa á aminorar el efecto del choque, absorbiendo cierta fracción de la fuerza viva que en él interviene.

El trozo de columna agua arriba, con su relleno de hormigón, tiene una masa de 35 toneladas (es decir, pesa en el aire ese número de toneladas métricas). El resultado numérico de la ecuación (1) es sorprendente; basta una masa de 5,46 toneladas, á velocidad de dos metros por segundo, para romper la columna, hiriéndola á una altura de 4,50 metros sobre la sección de empotramiento.

Salta á la vista la desproporción entre aquel número y el que mide el esfuerzo estático que con igual brazo de palanca produciría la rotura, y se comprende ahora fácilmente lo ocurrido.

De la resistencia del relleno de hormigón hemos prescindido, porque es insignificante. Contribuiría algo, sin duda, en los primeros elementos de tiempo del choque, pero en muy escasa medida, por alcanzar muy pronto y mucho antes que la envolvente metálica su límite de rotura. Aun considerándolo como si fuera mortero puro de excelente calidad, con resistencia á la tracción de 20 kilogramos por centímetro cuadrado y coeficiente de elasticidad de 900.000.000 kilogramos por metro cuadrado, el esfuerzo estático de rotura, con el momento de inercia de 2,1704 metros (4), sería solamente 129 toneladas; la flecha 0,002 metros y el trabajo de deformación hasta la rotura de 0,258 tonelámetros, despreciable comparado con el relativo á la envolvente de hierro.

La causa de la rotura quedó claramente evidenciada desde el momento en que llegamos á estos resultados. La barca cuyos restos se encontraron á corta distancia de la pila, cargada con unos cuatro metros de piedra, era mucho más de lo que se necesitaba para destrozar la columna de agua arriba; ésta, al desplomarse, rompió á su vez la de agua abajo.

Sólo restaba, para tener absoluta seguridad, explicarnos cómo había venido á parar allí tal barca, que ninguno de los que vigilaban en la obra había visto. Para herir la pila entre dos aguas debía haberse sumergido á corta distancia, corriente arriba, y, en efecto: el guarda del puente del ferrocarril de Sevilla á Huelva aseguró haber visto el 9 de Enero, día en que la avenida llegó al máximo, venir al garete una barca de tipo y dimensiones concordantes con las dadas por el buzo, y que, con el agua por la borda y á punto de irse á fondo, cruzó junto á una pila del puente, desapareciendo de su vista al anegarse por completo en los remolinos producidos por la misma. La distancia entre ésta y la destrozada en la pasadera es de 180 metros; el calado en aquellos momentos era de 16. Se comprende fácilmente que animada de una velocidad de más de dos metros por segundo recorriera la barca aquella distancia, sumergiéndose lentamente para llegar á herir la columna á 4 ó 5 metros sobre el fondo. El andamio flotó el 7 de Enero, dos días antes.

Si tan escasa es la resistencia á los choques de una columna aislada, cabe esperar que bien arriostrada con la otra el conjunto, la pila, la tenga mucho mayor. Sin embargo, no es así. Admitamos, además de las hipótesis ya hechas, que el arriostramiento sea tan eficaz que la pila pueda considerarse como un sólo cuerpo, una viga de doble T. Un cálculo análogo al hecho, da:

Momento de inercia, 1,2614 metros (4).

Momento flector de rotura, 7.875 toneladas-metros.

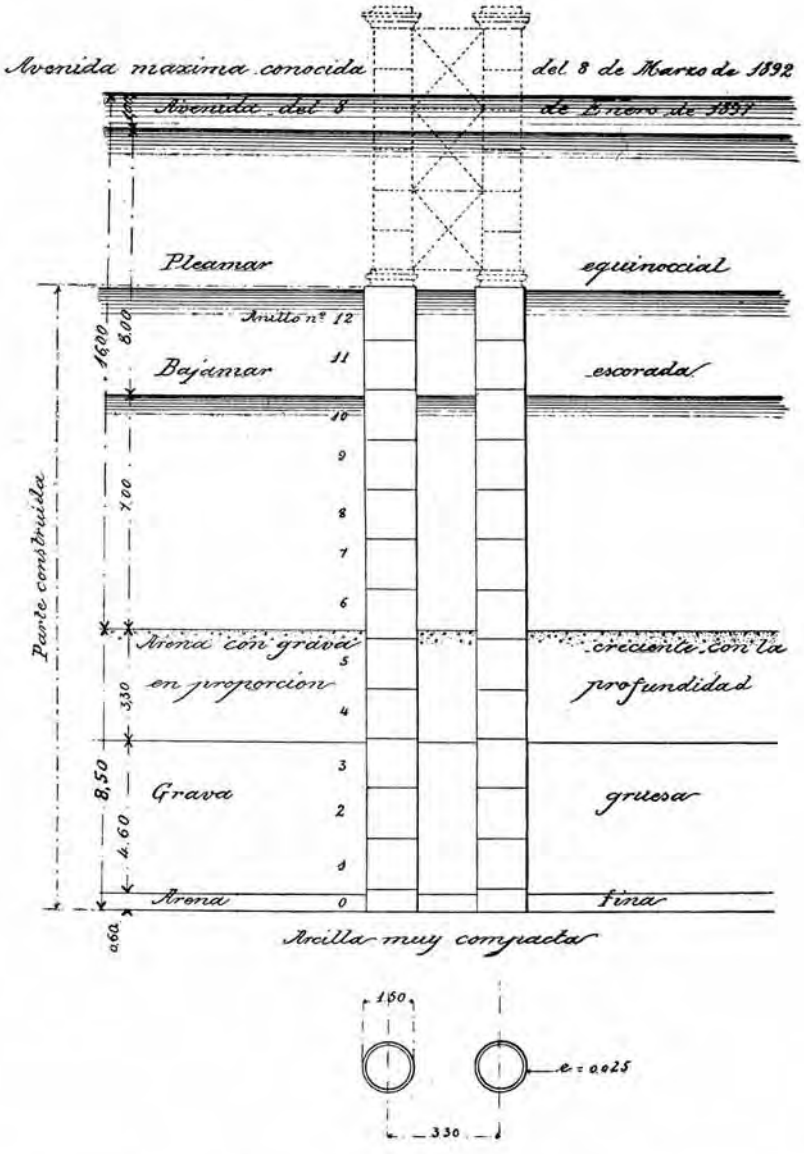
Esfuerzo estático correspondiente con un brazo de palanca de ocho metros, es decir, obrando á la altura de media marea, 984,37 toneladas.

Flecha, 0,0133 metros.

Trabajo, 6,55 tonelámetros.

Y teniendo en cuenta ahora la masa de toda la pila, 120 toneladas, la capaz de producir su rotura es 6,55.

Alzado dela pila



El resultado es, á primera vista, paradógico. La resistencia de una pila parece que debiera ser mucho más que el doble que la de una columna; el brazo de palanca, respecto al fondo, no llega al doble; la masa chocada es mucho mayor; luego la masa de rotura debiera ser mucho mayor que la encontrada.

La explicación es sencilla; el momento de inercia de la pila es, efectivamente, mucho más que doble que el de la columna, pero el módulo de inercia $\frac{I}{v}$ está muy lejos de crecer en la misma proporción, porque aumenta relativamente más la distancia de la fibra más cargada al centro de gravedad.

Estudiemos, por último, el caso verdaderamente práctico; la resistencia de la pila sosteniendo los tramos correspondientes, cuya masa ha de contribuir á aumentar aquélla y suponiendo que el choque se verifica con un cuerpo flotante en los momentos de mayores avenidas. El caso no sólo es posible, sino mucho más probable que el ya ocurrido.

Si bien el brazo de palanca resulta en este caso enorme, de 16 metros, parece también que por la gran fuerza viva que un conjunto de tanta masa ha de absorber, las condiciones de resistencia han de ser más favorables que en la pila aislada. Tampoco es así, á pesar de la exageración con que suponemos que toda la parte superior al em-

potramiento y con ella los dos semi-tramos sustentados se mueven como un sólido libre, cuando es claro que no siendo instantánea la transmisión del choque, la mayor parte de la fuerza viva ha de emplearse en quebrantar la sección peligrosa.

Resultan así:

Esfuerzo estático con brazo de palanca de 16 metros, 492,5 toneladas.

Flecha, 0,0532 metros.

Trabajo, 13,1 tonelámetros.

Masa del conjunto, 200 toneladas.

Masa de rotura, 6,77 toneladas.

Recordemos que todos los supuestos han sido muy favorables á la resistencia de la pila ó columna; que el hierro fundido rara vez resiste 15 kilogramos por milímetro cuadrado y que presenta, más que ningún otro material, numerosos defectos; que la velocidad de la corriente es 2,50 metros por segundo, y no 2,00; que el arriostramiento, por fuerte que sea, no llega á solidarizar las dos columnas hasta el extremo admitido, y se comprenderá que en la práctica la posibilidad de una nueva rotura es harto más fácil de lo que por los cálculos parece.

Lo dicho pone de manifiesto la necesidad de tener en cuenta la posibilidad de que ocurran accidentes análogos, en particular en ríos que, como el Guadalquivir, tienen grandes avenidas y arrastran durante ellas cuerpos de bastante masa, cuyo brazo de palanca puede ser considerable; y, por otra parte, la ventaja y conveniencia de sustituir el hierro fundido por el forjado ó, mejor, por el acero, en las pilas tubulares, especialmente cuando por las condiciones particulares de la obra, el cálculo ordinario de los apoyos conduzca á darles dimensiones menores que las habituales (2,50 á 3,00 metros).

En la pasadera, cuya ligereza es extremada, los autores del proyecto propusieron para las pilas un diámetro de 1,250 y un espesor de 0,015^{m}, dimensiones muy razonables considerando solamente los esfuerzos verticales que habia de soportar. Al aprobarse el proyecto se ordenó que se elevaran á 1,500 y 0,025 en la parte bajo el nivel de pleamar, en atención, sin duda, á la gran altura de dichas pilas, cuyo calado llega, en avenidas, hasta 16^{m} en la núm. 3. La experiencia ha venido después á hacer patente que no bastaba con ese aumento. No hay duda de que el caso es raro, ni de que las probabilidades de que se repita son escasas; pero raros, rarísimos, son también los vientos huracanados de tanta violencia como el que ocasionó la catástrofe del puente del Tay y, sin embargo, desde entonces se tiene siempre en cuenta en el cálculo de puentes la acción de un huracán semejante á aquél.

Nuestra afirmación lleva consigo el problema siguiente: ¿cuál es el límite de resistencia á los choques del que no se debe bajar?

La solución es sencilla: en éste, como en todos los puntos de Ingeniería práctica, hay que tomar por norma los resultados de la experiencia. Puesto que, concretándonos por ahora á la pasadera, en el mismo Guadalquivir existen varios puentes de pilas tubulares, que durante largos años han estado expuestos al mismo riesgo, mayor en algunos, por ser mayores la altura de avenidas y la velocidad superficial; que es muy posible que hayan sufrido algún choque, lógico es estudiar las condiciones de resistencia que presentan y tomarlos como modelo. Claro es que aun así, siempre quedará algún lugar á lo imprevisto, pero la previsión absoluta es irrealizable.

En el puente del ferrocarril de Huelva, 180^{m} agua arriba de la pasadera, las columnas, de 3,000 de diámetro en la parte inferior y 0,035 de espesor, distan 4,500 entre ejes. Un cálculo análogo al hecho da los resultados siguientes, que comparamos con los relativos á la pasadera.

Lineas de rotura

en el anillo nº 4



ELEMENTOS	Unidades.	PILAS		Relaciones
		Pasadera.	F. C. Huelva	
Diámetro	m.	1,500	3,000	2,0
Espesor	m.	0,025	0,035	1,4
Distancia entre ejes	m.	3,300	4,500	1,4
Módulo de inercia de una pila	m.	0,525	2,800	5,3
Momento de inercia de una pila	m	1,2614	10,4686	8,3
Momento de rotura de una pila	tons. m.	7,875	42,000	5,3
Trabajo de deformación y rotura	tons. m.	13,10	89,80	7,0
Masa de la pila (aproximada)	tons.	120	480	4,0
Masa de la pila y de los semitramos	tons.	200	600	3,0
Masa de rotura á velocidad de 2 m. y á 16 m. sobre el fondo	tons.	6,77	48,54	7,0

De un modo aproximado puede decirse que las masas de rotura son directamente proporcionales al trabajo necesario para la misma, porque en la ecuación

$$x = \frac{2T}{u^2 - \frac{2T}{m}},$$

el término $\frac{2\,T}{m}$, que representa el cuadrado de una velocidad, es muy pequeño con relación á u^2, (en los casos que estudiamos, sus valores son $\frac{13,1}{200} = 0,065$ y $\frac{89,6}{600} = 0,149$, que hay que restar de $u^2 = 4,000$.) Por otra parte, como hemos visto

$$T = \frac{1}{2} P f = \frac{1}{2} \frac{R I}{l v} \times \frac{R I l^2}{3 E I l v} = \frac{1}{6} \frac{R^2 I l}{E v^2}$$

La expresión de I en función de los diámetros D, d y de la distancia máxima al centro de gravedad, u, es muy compleja y la ley expresada por esta ecuación (que no es más que aproximada), no puede traducirse al lenguaje ordinario en forma que permita apreciar con claridad el papel que esos elementos desempeñan.

Pero se deduce claramente que el valor de $\frac{R^2}{E}$ debe ser el mayor posible, esto es, que el material sea lo más resistente, sin que su coeficiente de elasticidad sea en proporción muy elevado. Lo que indica desde luego la gran ventaja que se consigue sustituyendo el hierro fundido, para el que R es, en general, 13 y E 10.000 kilogramos por metro cuadrado, por el hierro laminado y mucho más por el acero, á los que corresponden, respectivamente, 36 y 20.000 y 45 y 22.000. Los valores de $\frac{R^2}{E}$ son 0,0169 0,0324 y 0,0920. Así empleando hierro laminado hay una ventaja representada por $\frac{0,0324}{0,0169} = 1,917$ que sube á $\frac{0,0920}{0,0169} = 5,443$, si es el acero el que sustituye al hierro fundido. Claro es que en ambos casos se perderá parte de esa ventaja por la disminución de $\frac{I}{v}$, debida á la del espesor de la envolvente, pero siempre la habrá muy grande, sin que el coste varíe de un modo sensible, porque el mayor precio del acero se compensa de sobra con la disminución del espesor.

En prueba de ello comparemos las pilas de la pasadera con otras de acero, una de las mismas dimensiones, salvo el espesor que es la mitad, otra de 2,00m de diámetro.

ELEMENTOS	Unidades.	PILAS		
		Pasadera.	Acero (A)	Acero (B
Diámetro	m.	1,500	1,500	2,000
Espesor	m.	0,025	0,0125	0,0150
Distancia entre ejes	m.	3,300	3,300	4,000
Módulo de inercia de una pila	m.	0,525	0,244	0,559
Momento de inercia de una pila	m.	1,2614	0,5864	1,6770
Momento de rotura de una pila	tons. m.	7,875	10,980	25.155
Trabajo de deformación y rotura	tons. m.	13,100	27,500	45,600
Masa de la pila (aproximada)	tons.	120	120	240
Masa de la pila y de los semitramos	tons.	200	200	320
Masa de rotura á velocidad de 2 m. y á 16 m. sobre el fondo	tons.	6,77	14,7	24,6

El coste de las de igual diámetro será el mismo ó con muy poca diferencia y la masa de rotura es, sin embargo, más de doble *en apariencia*.

En apariencia decimos, porque en la realidad ha de ser mucho mayor. En efecto: hasta ahora hemos comparado los dos materiales sin tener en cuenta que además de su diferente resistencia á la rotura difieren de un modo esencial en la manera de producirse ésta. El hierro fundido, material quebradizo, de textura más ó menos granular, tiene una agrupación molecular en absoluto distinta de la del acero laminado, material dulce, tenaz y de estructura perfectamente fibrosa. En los razonamientos y cálculos hechos hasta aquí hemos supuesto que en el momento de sufrir las fibras más cargadas de la sección peligrosa una tracción igual á la límite de resistencia, se producía la rotura total, sin llegar las fibras restantes á soportar esfuerzos iguales, sino progresivamente menores, en proporción inversa á su distancia al centro de gravedad. La hipótesis es racional tratándose del hierro fundido, cuya textura granular lo hace muy fácil de romper en tales circunstancias, corriéndose la línea de fractura y separándose elementos cuya fatiga molecular no ha llegado al límite, en especial cuando el esfuerzo que produce aquella obra de un modo brusco.

En el acero sucede de un modo muy distinto: la rotura de unas fibras trae consigo la deformación permanente de las contiguas, que hayan sufrido esfuerzos superiores al límite de elasticidad, pero nunca su rotura. Los anillos desechados en la construcción de la pasadera y vendidos por los contratistas, se trocearon con relativa facilidad con un macho de 6 á 7 kilos: inútil sería pensar en romper á martillazos anillos de las mismas dimensiones ó con espesor mucho menor, de hierro dulce ó de acero, y, en general, cualquier pieza hecha con esos materiales.

Así, pues, de dos pilas metálicas para las que el cálculo dé la misma masa de rotura, puede afirmarse que sometidas al choque, la de acero sufrirá grandes desperfectos, roturas parciales, perderá su verticalidad, quedando con una deformación permanente, pero subsistirá en pié, dando tiempo para remediar el daño, mientras que la de hierro fundido se romperá súbitamente y caerá, desplomándose los tramos sustentados.

Los grabados que acompañan, reproducción de fotografías del trozo de pila extraido en el reconocimiento y del anillo superior de los que quedaron empotrados en el terreno, sacado para la reconstrucción, corroboran lo que acabamos de decir. La fractura inferior, producida en la sección de em otramiento, presentaba sana toda la brida del anillo número 5 y muchos de sus tornillos sueltos, sosteniendo otros pedazos de la brida del anillo 4, uno de ellos bastante grande, precisamente situado en la parte aguas abajo, que durante el choque trabajó por compresión; los demás, pequeños y rotos del modo más caprichoso. Muchos de los correspondientes á las partes de brida desaparecidas, en donde los tornillos estaban sueltos, los sacó el buzo en los trabajos preparatorios y eran fragmentos menudos, algunos de menos de cuatro centímetros de arista máxima.

Cuando, posteriormente, para la reconstrucción de la pila, extrajimos los anillos superiores de los trozos que en el terreno quedaron empotrados, el examen de la fractura en el número 4 manifestó hechos más curiosos todavía. En la parte agua arriba, que trabajó por tracción, la

superficie de rotura separaba en muchos puntos los cartabones de la envolvente cilíndrica (véase el dibujo); en otros, los mismos cartabones del plano inferior de la brida: es decir, que, salvo en contados puntos, lejos de seguir la rotura por las superficies de mínima resistencia, en general separaba elementos pertenecientes á la de máxima. Agreguemos como hecho muy significativo que los trozos de columna que se conservaron empotrados no perdieron en lo más mínimo su verticalidad. Todo lo cual acusa de un modo indudable la violencia, la rapidez con que obró la causa destructora.

Dedúcese también de la ecuación que discutíamos que conviene aumentar todo lo posible el valor de $\frac{I}{V}$, pero sin que el de V sea muy grande, porque si bien contribuye á elevar el momento de inercia de la pila entera, entra en el denominador elevado al cuadrado. Conviene, pues, aumentar más bien el diámetro y el espesor de la envolvente que la separación entre las columnas.

Este aumento ejerce también otra influencia muy apreciable, porque la masa de la pila crece en razón de su cuadrado, y con ella la fracción de fuerza viva absorbida durante el choque.

En el cuadro anterior comparamos con la pila de la pasadera otra de dimensiones ligeramente superiores, á la que corresponde una masa de rotura cerca de cuatro veces mayor, 24,6 toneladas. Teniendo en cuenta lo dicho acerca de la manera de soportar el choque el acero, no es arriesgado afirmar que en la práctica esta pila tendría la misma ó quizá más resistencia que la del puente del ferrocarril, de hierro fundido y masa de rotura de 48,5 toneladas, á pesar de tener esta última en su favor su mayor masa y la mucho mayor aún de los tramos.

Creemos que la enseñanza dada por la experiencia con lo ocurrido en la pasadera merece no despreciarse en lo sucesivo, y en especial siempre que por la ligereza de la obra las dimensiones de los apoyos sean relativamente pequeñas. Y hoy día en que el precio de los aceros laminados es el doble ó poco más del doble que el del hierro fundido y que los trabajos de calderería gruesa se ejecutan con mucha baratura, acero es lo que se debe emplear siempre en la construcción de pilas tubulares, proscribiendo el hierro fundido, cuyo empleo no reportará economía alguna en la mayor parte de los casos, y en cambio, en muchos de ellos, puede constituir un serio peligro, en especial en nuestros ríos, sujetos todos á avenidas torrenciales.

JUAN M. DE ZAFRA.