

NUEVAS INVESTIGACIONES SOBRE LOS MORTEROS HIDRÁULICOS ⁽¹⁾

Parece resultar del cuadro B (fig. 6) que los ensayos de esfuerzo cortante dan, con los morteros, resistencias pro-

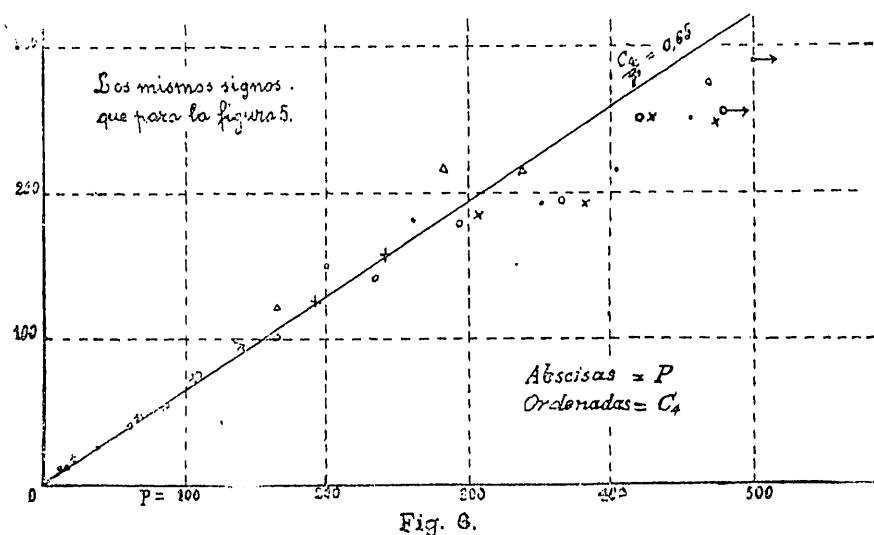


Fig. 6.

porcionales á las obtenidas por compresión. Lo mismo se observa en los experimentos de perforación, sin más diferencias que las producidas por el cambio de forma y dimensiones del punzón y de las pruebas (2).

(1) Véase el número anterior.

(2) Las principales conclusiones de estos experimentos, tomadas de la «Chimie appliquée à l'art de l'ingénieur», son las siguientes:

Perforación.—Esta operación se aplica á ensayos efectuados en sólidos que presentan dos caras planas paralelas, de las que una se apoya completamente sobre uno de los platillos de la máquina, mientras que la otra está oprimida por un elemento plano ó punzón de menor superficie que el modelo de ensayo.

La rotura lleva consigo un corte alrededor del contorno del punzón, después la separación del sólido directamente comprimido, de manera que el esfuerzo que hay que ejercer para producirla debe ser, en total, proporcional al número que mide la resistencia á la compresión por centímetro cuadrado.

Estos ensayos unirian á las ventajas de los de compresión sencilla la de no exigir modelos de prueba de dimensiones rigurosamente exactas, bastando solamente que presenten dos caras planas bien paralelas. Sin embargo, es de temer que influyan las variaciones de la composición del mortero en la proximidad de la cara perforada.

Repetidos experimentos sobre gran número de morteros de composiciones variadas, permiten establecer las leyes siguientes:

Para un punzón dado y un tipo de moldes perfectamente definido en forma y dimensiones, hay proporcionalidad entre la carga total de rotura por perforación y la resistencia á la compresión por centímetro cuadrado.

Si se divide la primera por la superficie del punzón, el número obtenido es mayor que la segunda.

La relación de estas dos resistencias, reducidas á la unidad de superficie, varía con la forma del punzón, así como con la dimensión del molde de ensayo, aun cuando la superficie del punzón sea constante.

Para un mismo tipo de moldes y punzones de la misma forma, pero de dimensiones crecientes, la carga total de la perforación no es proporcional á la superficie de los punzones; parece que equivale al esfuerzo total que sería preciso ejercer para romper por compresión ordinaria un bloque cuya sección fuese igual á la del punzón aumentada en una cierta constante que no dependa más que de la forma de este último, pero de ningún modo de su superficie.

Para un mismo punzón, la carga total necesaria para producir la rotura aumenta con las dimensiones horizontales del modelo de prueba, pero es independiente del espesor de éste en tanto que este espesor quede superior á la anchura del punzón. Para espesores menores, el esfuerzo de rotura aumenta y llega á ser de más difícil observación, como en los ensayos ordinarios por compresión en piezas planas.

En el caso más general se produce la perforación por la formación de un cono que tiene para base la superficie directamente comprimida por el punzón y que, formando cuña, hace saltar la materia subyacente.

Acabamos de ver que, en los cinco géneros de ensayos examinados, la flexión y la tracción por una parte, y el esfuerzo cortante y la perforación por otra, dan resistencias proporcionales.

Aunque frecuentemente se haya dicho, no hay relación constante entre la resistencia á la rotura por compresión y la por tracción ó flexión. Para morteros cada vez más resistentes, la primera crece más rápidamente que la segunda, de manera que el ensayo de compresión permite diferenciar los morteros de una manera más clara que los de tracción ó flexión. Parece que no hay entre las dos resistencias ninguna relación independiente de la naturaleza del mortero, dicho de otra manera, que dos morteros diferentes que tienen la misma resistencia á la compresión no se rompen necesariamente bajo el mismo esfuerzo de tracción. Estas conclusiones son el resultado de un considerable número de experimentos, puesto que durante cinco años casi todas nuestras investigaciones se han hecho con

morteros amasados en prismas de $4 \times 4 \times 16$ centímetros, que se ensayan primeramente por flexión y después por compresión. El cuadro B ofrece un ejemplo particular; para atenuar los errores inherentes á cada experimento, se hizo en varios ensayos el cálculo de los dos tipos de resistencias comparadas, adoptando por una parte, para esfuerzo de tracción-flexión T , una función de las resistencias F_{16} , F_4 y T_6 , que da un valor corregido de esta última, y por otra parte, para esfuerzo de compresión P , la media aritmética de las tres resistencias P_{50} , P_{16} y P_4 , suponiendo que deben ser iguales entre sí. Se ve en la fig. 7 que los puntos correspondientes á los morteros hechos con cada arena forman líneas curvas, separadas con claridad las unas de las otras.

Finalmente, resulta de lo que precede que, en los dos

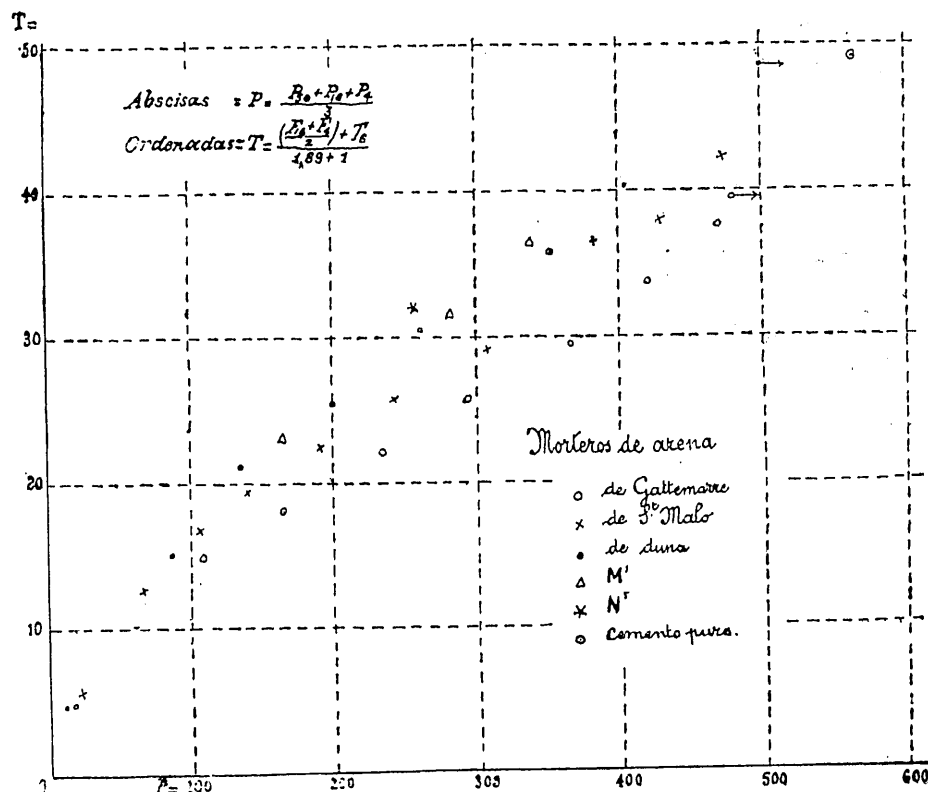


Fig. 7.

tipos de ensayos distintos á los que se reducen los cinco modos de rotura estudiados, el ensayo por compresión da, mejor que el de tracción, la media real de la cohesión de los morteros. Proporciona además resultados, por lo general, más regulares, sobre todo si se tiene cuidado de operar con bloques un poco gruesos, en los que los defectos locales de homogeneidad de los morteros tienen, relativamente, menor importancia.

III

COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA ELEMENTAL DE LOS MORTEROS

Las diversas propiedades de los morteros hidráulicos, dureza, permeabilidad, porosidad, aptitud para resistir más ó menos á la acción destructora del agua del mar,

etcétera, son función evidentemente de la naturaleza y cualidad del cemento empleado; pero dependen también, en mayor proporción de lo que generalmente se cree, de la constitución física molecular de los morteros, es decir, de las dimensiones y posiciones relativas de los diversos elementos que entran en su composición. Se encontrará un ejemplo en el cuadro E, que da á conocer una serie de morteros compuestos de proporciones variadas de un mismo cemento y dos clases de arena, una gruesa y otra fina, pero tales, que la cantidad de cemento que entra en un litro de cada uno de estos morteros permanece la misma, presentando, después de un mismo período de tiempo de conservación en condiciones idénticas, resistencias á la compresión que varían en la relación de 1 á 2,5.

Para precisar un poco el conocimiento de esta consti-

CUADRO E

Composición real en volúmenes del mortero.....	Polvo de cemento	2,46	2,40	2,35	2,10	1,94	1,82	1,74	8
	Arena muy fina	5,54	4,60	3,65	2,90	2,06	1,18	0,26	
	Arena muy gruesa	0	1	2	3	4	5	6	
Volumen real del cemento por litro mortero		0,158	0,161	0,166	0,160	0,160	0,160	0,162	
Resistencia á la compresión por centímetro cuadrado, a la que llega después de un año...		70	77	96	98	121	160	180	

tución íntima y poner en evidencia su influencia, se puede determinar el peso de un volumen dado de mortero reciente de composición ponderal conocida, deducir de él los pesos de cada elemento que entra en un litro y, finalmente, conociendo los pesos específicos del cemento, de la arena y del agua empleadas, calcular los volúmenes absolutos de las materias contenidas en la unidad de volumen del mortero. Estos volúmenes c , s , e , así como el volumen de los huecos v , igual á $1 - (c + s + e)$, definen la composición volumétrica elemental del mortero reciente, y se concibe que el estudio de sus variaciones, según las condiciones de fabricación de los morteros, debe establecer conocimientos útiles sobre la mejor composición que haya que adoptar.

En particular, hemos llamado *compacidad* de un mortero el volumen absoluto total de las materias sólidas que contiene. Este elemento, que en un mortero reciente se mide por la suma $c + s$, debe ser evidentemente un factor importante de la calidad de los morteros. No obstante, no es el único que debe considerarse, y el valor de un buen mortero debe ser abstracción hecha; fijémonos bien, de la naturaleza y de la cualidad del cemento, una función más ó menos compleja, variable además según el destino del mortero, de los volúmenes ocupados por los diversos elementos en el mortero endurecido, volúmenes que son ellos mismos función de los volúmenes elementales c , s , e , v , del mortero reciente (1).

IV

RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA Á LA COMPRESIÓN Y LOS VOLÚMENES ELEMENTALES

Siendo el cemento empleado y las condiciones de conservación las mismas, las resistencias observadas en su

endurecimiento en un instante cualquiera en morteros de diversas composiciones, dependen, como se ha visto en el cuadro E, no solamente del peso del cemento que entra en un litro de mortero, sino también de la composición volumétrica elemental de éste y, por consiguiente, como se acaba de decir, de la que tenía recién hecho.

Después de varios tanteos hechos sobre una gran serie de morteros, hemos hallado la siguiente ley:

Para toda clase de morteros plásticos hechos con un mismo cemento y arenas inertes, las resistencias á la compresión después de un mismo tiempo de conservación en condiciones idénticas, es únicamente función de la relación

$\frac{c}{e + v}$ ó $\frac{c}{1 - (c + s)}$, cualesquiera que sean la naturaleza y el grosor de la arena y las proporciones de los elementos, cemento, arena inerte y agua, de que cada uno está compuesto.

Se deduce de aquí que la resistencia crece á la vez con el volumen absoluto c de cemento que contiene la unidad de volumen del mortero reciente y con la compacidad $c + s$ de este mortero, cualesquiera que sean los valores relativos de e y de v inmediatamente después del amasado.

Una primera aproximación consiste en admitir que la resistencia P es proporcional á la relación $\frac{c}{e + v}$. En realidad, aumenta un poco más aprisa que esta relación, de manera que podríamos poner la relación bajo la forma

$$P = H \left(\frac{c}{e + v} \right)^m$$

siendo m un exponente poco mayor que 1, y H un coeficiente constante.

Se obtiene aun cierta aproximación por la fórmula

de los hormigones, el volumen v de los huecos puede descomponerse en dos partes, correspondiendo una á lo que pudiera llamarse *poros* ó huecos más ó menos capilares del mortero, y otra á las *cavidades* ó huecos relativamente grandes que resultan de estar imperfectamente llenos por el mortero los intervalos que dejan entre sí las piedras.

(1) Si el mortero contiene otra materia sólida, además del cemento y la arena, por ejemplo, una puzolana, debe tenerse en cuenta un quinto parametro m , que indique el volumen absoluto de esta materia, que entra en la unidad de volumen del mortero recién hecho.

La misma descomposición se aplica al estudio de los hormigones. Hay entonces que considerar otro parametro p , que representa el volumen absoluto de las piedras. En el caso

$$P = J \left(\frac{c}{e+v} - 0,1 \right),$$

que evita el empleo de potencias fraccionarias.

Otra fórmula bastante sencilla y que puede aplicarse en la mayoría de los casos, es:

$$P = K \left[\frac{\left(\frac{c}{e+v} \right)}{1 + \left(\frac{c}{e+v} \right)} \right]^2 = K \left(\frac{c}{1+s} \right)^2$$

Esta es la que nosotros hemos adoptado. Como ejemplo, la figura 8, deducida de la experiencia dada á conocer en el cuadro B, da una comprobación de ella.

En esta fórmula, el coeficiente K es una constante que caracteriza la energía del cemento en los morteros en la época que se ha procedido á los ensayos de rotura, cualquiera que sea la composición de estos últimos. En rigor, un sólo mortero cualquiera bastaría para la determinación de esta incógnita, pero, en razón á los inevitables errores de experimentación, es preferible, para medir la energía intrínseca K de un cemento después de un tiempo fijo de conservación de los morteros, componer con este cemento y arenas inertes varios morteros distintos, en los cuales se midan los volúmenes elementales en estado reciente, y que se ensayen por compresión en la época elegida. La media aritmética de los valores encontrados por las relaciones

$$\frac{P}{\left(\frac{c}{1-s} \right)^2}$$

relativas á los diversos morteros, da el parámetro buscado. Se puede todavía, para eliminar errores accidentales demasiado grandes, construir un diagrama tomando para abscisas los valores de $\left(\frac{c}{1-s} \right)^2$ relativos á los diversos

morteros de ensayo y para ordenadas los valores de P encontrados para estos morteros, y trazar por el origen de las coordenadas una recta que se aproxime lo más posible á los puntos obtenidos; el valor de K es entonces el coeficiente angular de esta recta. Esto es lo que se hizo en la figura 8, que da para el experimento correspondiente $K = 1965$.

Inversamente, conociendo K se puede deducir las resistencias que hubieran dado todos los morteros posibles del cemento considerado y de arenas inertes, á condición que se hubieran medido los volúmenes elementales de estos morteros recientes.

En total, una fórmula semejante tiene la gran ventaja de establecer, para cada producto hidráulico, un parámetro que da una medida absoluta de su energía específica después de una duración cualquiera de endurecimiento, independientemente de toda consideración sobre la naturaleza y la composición de los morteros.

Vamos á dar á conocer el partido que se podría sacar

de ella para la elección de los ensayos normales de resistencia.

(Se continuará.)

FERNANDO G. ARENAL.

PROYECTO PARA LA SUSTITUCIÓN DEL TRAMO METÁLICO ⁽¹⁾ DEL PUENTE SOBRE EL RÍO LLOBREGAT POR OTRO NUEVO

Para mayor sencillez expresaremos todos los momen-

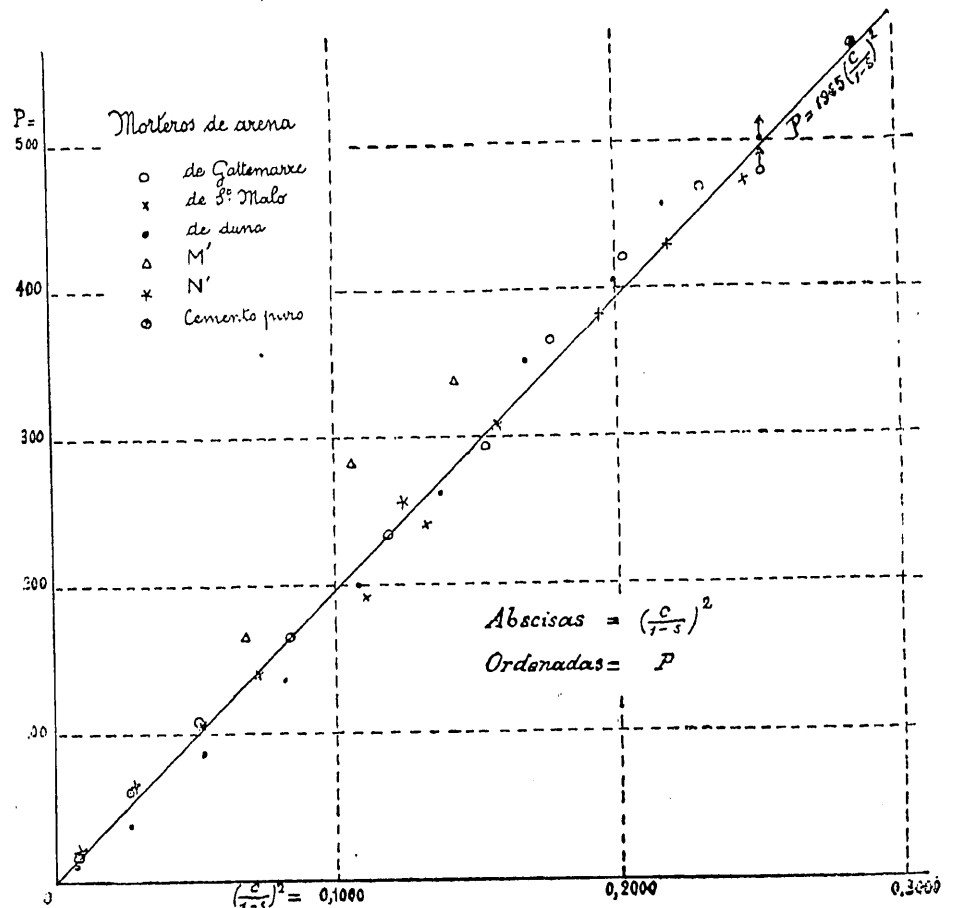


Fig. 8.

tos en función de pl_1^2 , lo cual no altera los valores hallados para los tramos cargados, puesto que $l_2 = l_3 = l_4 = l_5 = l_1$, excepto para el primero, que podemos transformar fácilmente, recordando que $l_1 = \frac{l_2}{1,6}$ del modo siguiente:

$$M' = 0,052397 pl_1^2 = \frac{0,052397}{1,6^2} pl_2^2 = 0,020468 pl_2^2$$

Con estos elementos podemos entrar de lleno en el estudio de los momentos que determina la carga permanente y los máximos y mínimos de la sobrecarga haciendo las combinaciones convenientes de tramos enteros cargados, cuyos efectos se obtendrán sumando los efectos debidos á las cargas de tramos aislados.

Momentos debidos á la carga permanente.—Los momentos sobre las pilas debidos á la carga permanente se obtendrán, según lo que acabamos de decir, sumando los que determina sobre cada una la carga aislada de todos los tramos del puente. Estando todos los momentos en función de pl_1^2 , que en este caso se convierte en ql_1^2 , el momento total M_k sobre la pila de orden k podrá expresarse

(1) Véase el número 1.196.