

Algo de teoría sobre el ensayo de los aglomerados de cemento y de los materiales integrantes de los mismos ¹

Imaginemos una materia o producto sólido resultante de conglomerar con una pasta *aglutinante* una materia sólida inerte fraccionada en partículas (grava, arena, o ambas cosas), o sea lo que en la técnica de los materiales de construcción se llama *árido*.

Supongamos este producto conglomerado sometido a esfuerzo de tensión.

Los factores de solidaridad (llamémosles así, a falta de expresión más rigurosamente adecuada, prescindiendo del sentido matemático de la palabra *factor*) que juegan o actúan en el trabajo interior de la masa considerada son: la resistencia del aglutinante y la adherencia entre el aglutinante y el árido, las cuales tienen valores límites variables (crecientes) con la edad del producto, y la resistencia del árido, cuyo valor límite puede ser igual para todos los elementos de éste u ofrecer más o menos variedad entre los mismos; pero nosotros supondremos, para simplificar, por ahora, que no pasen de dos estos valores diferentes, de acuerdo con lo observado (si bien puede decirse que todavía *grasso modo*) repetidamente en gravillas procedentes de una misma piedra, aun pareciendo ésta homogénea.

Para facilitar y abreviar la expresión precisa de los conceptos adoptamos la abundante notación que sigue:

- s El área de la sección plana AB , de máxima perturbación molecular, debida a la tensión y normal a la resultante de ésta.
- s_c Idem id. de la parte ocupada en AB por el aglutinante.
- s_a Idem id. por el árido.
- s_a' Las ídem de las ocupadas por dos supuestas distintas categorías del árido ($a' + a'' = a$).
- s_a'' Las ídem de las ocupadas por dos supuestas distintas categorías del árido ($a' + a'' = a$).
- r_c La resistencia unitaria límite del aglutinante, a la rotura por tensión, a la edad de la prueba.
- r_a Idem id. del árido.
- r_a' Idem id. de los elementos del árido que aparecen rotos en la superficie de la fractura.
- r_a'' Idem id. de los ídem que quedan sin romper en ídem ídem.
- r El esfuerzo unitario aparente en la sección AB , al cual rompe el cuerpo.
- T La tensión total que en un momento cualquiera actúa en la sección AB .
- T_r La ídem id. que ídem id. en el momento de la rotura del cuerpo.
- α El esfuerzo unitario de la adherencia en cada momento.
- α_l El límite de la adherencia unitaria entre el árido y el aglutinante a la edad de la prueba.

- t La tensión unitaria aparente general en la sección AB en un momento cualquiera antes de producirse la rotura del cuerpo.
- t_r Idem id. en el momento de la rotura.
- t_c La tensión unitaria del aglutinante en cada momento.
- t_a La ídem id. del árido.
- t_a' Las tensiones de los elementos de una y otra categoría cuando la general es t .
- t_a'' Las tensiones de los elementos de una y otra categoría cuando la general es t .
- t' Esfuerzo unitario de toda la parte de la sección AB , que sigue resistiendo al fallar o inhibirse parte del árido y no producirse la rotura del cuerpo.
- t'' Idem id. id. en el momento de adquirir el valor r la tensión t , o sea en el momento de la rotura del cuerpo.
- t''' Idem id. id. al fallar o inhibirse la adherencia.
- t''' Idem id. id. en el momento de producirse la rotura del cuerpo.

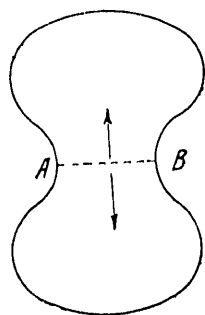
Supongamos que la acción productora o determinante del esfuerzo de tensión en el cuerpo se ejerce de tal modo que sus efectos en la sección AB son normales a ésta y se reparten en ella o en las zonas resistentes que en cada momento ella ofrece sin retardo sensible y uniformemente.

Cada uno de estos esfuerzos elementales pondrá en juego: o la cohesión del aglutinante en las zonas de la sección ocupadas por éste, o la de un elemento del árido, que sufrirá la tensión transmitida hasta él merced a su adherencia con el aglutinante.

Imaginemos un crecimiento continuo del esfuerzo desde *cero* hasta el punto de rotura.

Los mencionados factores de solidaridad actuarán simultáneamente en cada momento, y creciendo de un momento a otro, mientras el aglutinante o su adherencia con el árido no alcancen su límite correspondiente a la edad de la prueba, ni el árido tampoco alcance su esfuerzo de rotura, y todos tendrán igual valor unitario en cada momento, que será el valor unitario, en el mismo momento, de la tensión transmitida hasta la sección plana que se considera: se tendrá, pues, en toda esta primera etapa:

$$\alpha = t_c = t_a = t = \frac{T}{s}$$



¹ Estaba yo ocupándome en formar dos o tres artículos (éste el primero de ellos), que me parecen de interés, extractando la reseña de un ensayo de materiales hecho en Gijón, en 1930, por iniciativa del entonces director de las obras del puerto del Musel, D. Eduardo de Castro, cuando este inteligentísimo y estudioso compañero me ha hecho el honor de citar con encomio mis modestos trabajos, en su artículo titulado "Importancia de los ensayos del hormigón"; y no puedo menos de expresar aquí, juntamente con mi gratitud, la satisfacción que me produce oír, en labios de un ingeniero de la calidad del Sr. Castro, el toque de atención que da sobre la necesidad e importancia de hacer algo más (acaso mucho) de lo hasta ahora efectuado y más o menos conocido, no sólo en España, sino también en los grandes Centros técnicos, en materia de ensayos y estudio sobre tan traído y llevado material.

Pero uno u otro de los factores (en cada caso, claro es, el que tenga más bajo su límite de esfuerzo posible con relación a los otros dos) fallará o se *inhibirá* de actuar al llegar el esfuerzo unitario general a igualarse con dicho valor límite, produciéndose en el mismo instante la rotura del cuerpo si quien falla es la resistencia del aglutinante, y produciéndose o no dicha rotura, si quien falla es alguno de los otros, según que el aglutinante pueda o no resistir el acrecimiento instantáneo de su esfuerzo unitario, debido a recaer sobre él todo el esfuerzo que deja de efectuar el que falla, y que se adiciona repentinamente al que ya sufría aquél. Si, por ejemplo, el fac-

tor que falla es la adherencia, el esfuerzo unitario t_e del aglutinante saltará en el momento del valor $t = \alpha_l$ al valor

$$t'' = \frac{\alpha_l \times s}{s_e}$$

y si quien falla es el árido (suponiendo, por el momento, que éste es perfectamente homogéneo y fallan, a la vez, todos sus elementos), el salto será de

$$t_e = r_a \quad \text{a} \quad t' = \frac{r_a \times s}{s_e}$$

Si, pues, la resistencia r_e del aglutinante, en el momento de la prueba, es superior al menor de los productos

$$\alpha_l \times \frac{s}{s_e} \quad \text{y} \quad r_a \times \frac{s}{s_e}$$

no se producirá la rotura del cuerpo al fallar la adherencia o el árido, y quedará *encubierto* el verdadero esfuerzo al cual este fallo tiene lugar, no rompiendo el cuerpo hasta que el esfuerzo unitario aparente o general t alcance un valor r tal, que $\frac{rs}{s_e} = r_e$. Y siem-

pre que este caso de *encubrimiento* se dé, y aun en el caso límite de igualdad de r_e al menor de los productos

$$\alpha_l \times \frac{s}{s_e} \quad \text{y} \quad r_a \times \frac{s}{s_e}$$

la resistencia del aglutinante será bien determinada por esta última ecuación, $\frac{rs}{s_e} = r_e$, al efectuarse la rotura del cuerpo.

Si r_e está comprendido entre el menor de los valores límites, α_l y r_a , y el producto del mismo por $\frac{s}{s_e}$, la rotura del cuerpo se producirá al llegar t a igualarse con el mismo valor límite; pero el propio valor r_e es el que resulta *encubierto* en este caso, pudiéndose sólo saber que ha llegado a él el esfuerzo del aglutinante en medio del salto del valor α_l o r_a al producto

$$\alpha_l \times \frac{s}{s_e} \quad \text{o} \quad r_a \times \frac{s}{s_e}$$

Esta sencilla discusión analítica pone de manifiesto que, en general, no bastará una sola serie de pruebas de roturas; es decir, la serie posible de roturas de las piezas o probetas fabricadas con unos mismos componentes e igualdad de dosificación y circunstancias, para determinar, si así lo deseamos, todas las incógnitas; pero se llega a ver a la vez la perfecta posibilidad de conseguirlo mediante el ensayo combinado de series de distintas dosificaciones. En efecto:

En el caso primero, o sea cuando el aglutinante tenga el límite de resistencia menor que los de la adherencia y del árido ($r_e < \alpha_l$ y $r_e < r_a$) y en que, por consiguiente, se producirá la rotura por fallar aquél antes de que falle ninguno de los otros dos (lo cual se conocerá en la superficie de fractura por no aparecer rotos los elementos del árido, pero sí con porciones o restos del aglutinante adheridos a ellos),

se puede formular, además de las desigualdades indicadas, la ecuación

$$r_e = \frac{r}{s} = r$$

pero no nos bastará esto para conocer los valores α_l y r_a , interesantísimo este último, especialmente, porque él nos indicará la resistencia a que podemos aspirar con el árido de que se trate y otro aglutinante de más calidad. Podremos, es cierto, demorar largamente algunas de las pruebas y alcanzar, acaso, de este modo la edad en que r_e se iguale con α_l o con r_a ; pero si es lo primero lo que antes se presenta, o sea $r_e = \alpha_l$ o $r_e > \alpha_l$ (lo cual se revelará en la fractura por el despegamiento limpio de los elementos del árido, sin porciones adheridas del aglutinante), será indispensable cambiar de aglutinante para alcanzar la rotura del árido, dentro de plazo de ensayo relativamente breve, y poder así conocer su resistencia.

Puestos ya en el caso $r_e > r_a$ y $r_e < \alpha_l$ (revelado en la fractura por aparecer rotos, no despegados, los elementos del árido), puede ocurrir que tenga lugar la inequación $r_e > r_a \times \frac{s}{s_e}$, y entonces quedará *encubierto* el esfuerzo r_a que buscamos, y será preciso hacer otra partida de probetas con menor dosis de aglutinante, en busca de que se haga

$$r_a \times \frac{s}{s_e} > r_e$$

y deje de tener lugar el *encubrimiento*.

El inconveniente de ser $\alpha_l < r_a$, hecho que impide la rotura del árido, puede presentarse en las pruebas a corta edad; pero no es probable en las roturas a edad avanzada, y este último caso se obviaría también variando de aglutinante.

Y si aun empleando un aglutinante enérgico se dan en las primeras probetas que se fabriquen las inequaciones

$$r_e < r_a \times \frac{s}{s_e} \quad \text{y} \quad r_e < \alpha_l \times \frac{s}{s_e}$$

si bien sea $r_e > r_a$ y $r_e > \alpha_l$, quedará al producirse la rotura de las piezas (como ya hemos indicado antes) *encubierto* el valor de r_e ; pero se podrá remediar el inconveniente aumentando la dosis del aglutinante, con lo cual se aumentará s_e y disminuirán, por consiguiente, los segundos miembros de las primeras inequaciones dichas.

Queda, por tanto, demostrado lo que afirmé: que siempre podrá el Laboratorio conseguir el conocimiento cierto de las varias incógnitas que se ofrecen y resolver con seguridad plena los varios problemas de interés que se plantean en el estudio mecánico del hormigón mediante el método de estudio y ensayos de rotura que describo.

Creo, sin embargo, conveniente añadir algunas indicaciones más, para mayor esclarecimiento de la materia y para completar la determinación práctica del sistema.

Hemos supuesto, hasta ahora, el mínimo número y mínima complicación consiguiente de incógnitas a determinar, o sea que el árido ofrezca una perfecta homogeneidad mecánica o una misma resistencia lí-

mite en todos sus elementos e igualdad de límite de adherencia con el aglutinante para todos éstos; pero, en general, esto no sucede, y aunque se opere con una gravilla obtenida por trituración artificial de una piedra muy homogénea al parecer, existen a veces en ella (como ya indiqué anteriormente) varias categorías de elementos, en cuanto a la resistencia límite de los mismos se refiere, y el número de categorías distintas puede ser hasta muy grande en arenas y gravas naturales, y claro es que el número de combinaciones de todas estas distintas resistencias límites con los valores límites de la resistencia del aglutinante y de la adherencia de éste con el árido a cada edad, puede multiplicarse enormemente, y con él de modo pavoroso las combinaciones diferentes de composición y las series de pruebas de rotura necesarias para la determinación de todas las incógnitas. Pero no hay que perder de vista que el buen sentido y las circunstancias de cada caso de investigación o de cada lugar imponen siempre condiciones y limitaciones que reducen grandemente la complejidad de los problemas y trabajos, que muchas veces también serán facilitados, en su planteamiento y en sí mismos, por un conocimiento previo, exacto o aproximado, de algunas de las incógnitas y de naturales relaciones entre ellas existentes. En unas ocasiones podrá ser suficiente, para el objetivo práctico que interese, averiguar la proporción o cantidad relativa y la resistencia límite de los elementos más flojos o de los más resistentes de una cierta grava; en otras, determinar qué valor mínimo o máximo de r_c puede ofrecer un cierto aglutinante en hormigones hechos con él y una grava conocida, bien sea variando la dosificación o bien, sin alterar ésta, variando el modo e intensidad del batido de la masa o el procedimiento de elaboración de las piezas, circunstancias o condiciones todas éstas que influyen en el valor de r_c ; en otras, comparar el efecto de varias gravas en la resistencia unitaria o general r del hormigón, empleando un cemento o un mortero ya bien experimentados y de características, por tanto, conocidas, etc., etc. En casos análogos a éstos, que son los que con finalidad práctica ordinariamente se ofrecen al técnico investigador, será casi tan fácil como en el simplificado supuesto que ha servido para la exposición fundamental del método, hacer la discusión analítica de variantes posibles, así como para dicho supuesto se ha indicado, y formular las inequaciones y ecuaciones correspondientes.

Ahora bien, venimos contando con que se den siempre las condiciones siguientes:

1.ª Medida o conocimiento exacto de la tensión total T que en cada momento se transmite a la sección plana AB mínima normal al esfuerzo.

2.ª Reparto elemental uniforme e instantáneo de T en el plano AB y en toda su área s , o en las zonas parciales de ella que en el momento puedan reaccionar o trabajar, y conocimiento o medida exacta de las áreas s_c , s_a , etc., de estas zonas.

Y debemos ver si estas condiciones pueden darse siempre que queramos. Veámoslo:

Imaginemos un tubo recto de sección ortogonal circular y espesor uniforme de pared y cuya materia sea hormigón "archicompacto", es decir, un hormigón sin otros huecos que los ultrainapreciables de la textura molecular y cuya *homogeneidad relativa* sea tal que las cantidades de los varios componentes contenidas en cualquier porción *mínima completa* del

mismo (llamando *completa* la que contenga en sí toda la variedad de calidades y tamaños de elementos propia del árido empleado) sean iguales, y su mutua disposición o distribución, dentro de la supuesta porción, también la misma.¹ Es evidente que en un tubo de estas condiciones las áreas de las secciones de los varios componentes contenidas en cualquier sección plana diametral estarán entre sí en una misma relación proporcional, que será igual a la de los volúmenes efectivos de materia maciza que de los componentes han entrado en la masa total del tubo, bastando conocer este dato de fabricación para poder descomponer exactamente el área total en las áreas parciales correspondientes a la pasta pura de cemento y al árido, o al mortero y a la grava, y, por tanto, para conocer con exactitud estas áreas parciales sin tener que intentar medirlas directamente. Las únicas que será necesario medir o apreciar materialmente en la superficie de fractura, después de producida la rotura de la probeta, son las zonas *sa* de elementos rotos del árido cuando éste contenga más de una categoría de resistencia.

Supongamos, por otra parte, el tubo imaginado sometido a tensión por presión hidráulica interior, y concebamos la transmisión y actuación de los esfuerzos en la intimidad de la masa.

La acción de la presión hidráulica se aplica uniformemente² contra la superficie interior o intradós del tubo, produciendo, en una capa tan delgada como se quiera imaginar de la pared, un efecto o tendencia de dilatación mediante la cual se transmite la acción a la capa inmediata siguiente, con análogo efecto o tendencia sobre ésta, que, a su vez, la transmite a una tercera capa, y así de una en otra capa, a través de la masa toda, hasta su capa exterior. Este esfuerzo o tendencia de dilatación disminuiría en intensidad, del interior al exterior, si la pared del tubo se hallase realmente formada por sobrepuestas capas no solidarizadas entre sí; pero estando las capas que imaginamos punto por punto mutuamente solidarizadas, y siendo relativamente pequeño el espesor de la pared, se puede estar ciertos de que la diferencia del esfuerzo de tensión, del interior al exterior, si existe, será tan pequeña e inapreciable, que se puede dar por nula. Y he aquí, pues, en la sección plana diametral de la pared del tubo realizadas las condiciones 1.ª y 2.ª arriba expresadas, quizá mejor y más pura y simplemente que puedan serlo en ninguna otra forma de probeta ni de aplicación de esfuerzo. Y no hay que decir que la tensión total T , en cada momento repartida en la sección dicha, es dato fácil y exactamente medible, por cuanto se equilibra con la resultante de la presión hidráulica que actúa sobre la mitad del tubo (la mitad determinada por el plano diametral supuesto), la cual en todo momento nos es dada por la indicación del manómetro y las dimensiones del tubo.

Angel BLANC
Ingeniero de C., C. y P.

¹ Hormigón que, como ya repetidamente tengo dicho, es siempre posible obtener a voluntad, según explicaré en un folleto que tengo en preparación.

² Supongo relativamente despreciable la parte de la presión debida al *peso propio* del agua contenida en el tubo, y cuento con que el taponamiento del tubo se haga en la forma, ya prácticamente experimentada en nuestros ensayos, en que no se añaden esfuerzos extraños al de la presión hidráulica interior.