

Reflexiones acerca de las fisuras del hormigón

ALBERT JOISEL

INTRODUCCION

Los organizadores de estas Primeras Jornadas de Durabilidad, me han pedido que les hable sobre la fisuración del hormigón. Pero durante la preparación de esta conferencia han surgido en mi algunas dudas.

La durabilidad es la vida, y la fisuración es, quizás la muerte. No hablar más que de la muerte es arriesgarse a pasar por un necrólatra y un pesimista. *Me dolería*, después de estudiar una veintena de años las fisuras del hormigón, similarmente a como los médicos estudian las enfermedades para mejorar y prolongar la vida.

Por otro lado, el problema de la durabilidad del hormigón y el de su fisuración, son de hecho inseparables ya que esta durabilidad no está amenazada más que por la fisuración, producida por acciones mecánicas, físicas o químicas. Por consiguiente, la fisuración depende:

- de la resistencia y de la deformabilidad del hormigón,
- de su impermeabilidad,
- de su adherencia,
- de su resistencia al hielo,
- de su estabilidad de volúmen,
- de su inercia química, etc.

El objeto es, pues, amplio. Por ello, tengo la intención de limitarme a realizar *algunas reflexiones sobre las fisuras del hormigón*. Tal es el título de mi conferencia.

Del resto, una de mis obras ha sido editada en español. Su título es: "Fisuras y grietas en morteros y hormigones" (Editores técnicos asociados, S. A. Barcelona). Más detalles sobre el tema, se encontrarán en la obra citada.

GENERALIDADES

¿Qué es, con exactitud, una fisura? Es una rotura, es decir, una solución de continuidad mecánica entre dos partes que no están ligadas ya y que llegan a separarse. ¿Quiere decir ésto que se separan siempre? No, con seguridad. Todo depende de la profundidad de la fisura, de su longitud, de su anchura. Hay fisuras graves, pero, afortunadamente, la mayor parte no son mortales y numerosas, benignas.

Una obra de hormigón, tiene más o menos fisuras, según se observe más o menos lejos y según la mayor o menor experiencia de la persona que la vea. A distancia, las fisuras pueden ser invisibles; si se mira con lupa, casi todos los hormigones están fisurados. Y si se hace con un microscopio, lo son todos. Pero no siempre es necesario acudir a una lupa para estudiar un hormigón, como tampoco lo es para juzgar un cuadro de Goya o de Velázquez.

Cuando se estudia un gran número de obras de hormigón de la misma edad, se puede hacer una comprobación:

- las obras estructurales en *hormigón pretensado* no están, generalmente, fisuradas,
- los edificios en *hormigón armado* tienen relativamente pocas fisuras,
- las *losas* están frecuentemente fisuradas,
- y los *enfoscados* lo están casi siempre.

¿Existirá una relación unívoca entre esas diversas técnicas (o sus ejecutores) y la fisuración? No exactamente, ya que se han visto vigas pretensadas destruidas, y enfoscados sin fisuras aparentes. Sólo que cuando una viga se desploma es grave, y si un revestimiento se despega no es tan peligroso. El arquitecto, el ingeniero, el albañil, no se toman el mismo *margen de seguridad* en los distintos casos; para los unos y los otros toda realización deriva de un compromiso entre, por una parte, la ausencia de defectos, de fisuras y por otra parte, la economía. Siempre es posible reducir la fisuración o incluso suprimirla, y ello no es forzosamente caro, aunque nunca gratuito. Un ejemplo típico es el del hormigón armado tradicional. Este hormigón ha de estar fisurado si el acero trabaja razonablemente. Un cálculo simple demuestra que en un hormigón armado que no tuviera fisuras, el acero trabajaría en un límite muy bajo, del orden de 400 kp/cm² (o 4 kp/mm²), ya que para evitar todas las fisuras sería necesario que la tensión de tracción del acero fuera inferior al producto de la tensión de rotura en tracción del hormigón (que no sobrepasa apenas los 30 kp/cm²) por el coeficiente de equivalencia (que es del orden de 15):

$$T_{\text{acero}} < T_{\text{hormigón}} \times m$$

Esto indica que hay que calcular las armaduras de tal modo que las fisuras inevitables aparezcan con un tamaño razonable, o sino escoger el hormigón pretensado.

Obras romanas en hormigón, tales como el Panteón de Roma tienen más de veinte siglos, y están bien; pero muchas otras no están hechas para durar tanto tiempo. Se forman ciertas fisuras progresivamente, en función del ambiente social, climático o químico. El compromiso técnico-económico, del que he hablado, ha de tener en cuenta el factor tiempo. Una presa ha de durar mucho tiempo; pero no así una plataforma de artillería de campaña.

Además, las obras y las disposiciones legales que las conciernen están realizadas por hombres y para hombres cuya vida terrestre es limitada, y ateniéndose a veces más a los rendimientos y al aspecto inicial del hormigón que a su durabilidad.

En resumen, se puede siempre reducir la fisuración en el hormigón pero esto no es siempre deseado o deseable.

Un ejemplo característico es el de las carreteras de hormigón. Se pueden en ellas evitar fisuras poniendo las necesarias precauciones, y en particular vigilando las juntas de flexión y de retracción-dilatación. Pero se puede también tolerar deliberadamente una cierta fisuración adoptando un hormigón armado sin juntas.

CAUSAS DE LAS FISURAS

Después de estas consideraciones, más bien filosóficas, veamos cómo se producen las fisuras, cuáles son sus causas, lo que es absolutamente necesario conocer si se quieren poner los remedios adecuados.

Las fisuras del hormigón, que son roturas, resultan de las *variaciones de ciertas dimensiones*. Esta consideración es una evidencia, pero es bueno recordarlo si se quiere dominar los problemas de la fisuración. Estas variaciones de dimensiones tienen dos causas que es importante diferenciar:

- causas que yo llamaría “*extrínsecas*” y mecánicas: éstas son las cargas, sin olvidar el propio peso del hormigón,
- y causas “*intrínsecas*” y físico-químicas: son las retracciones y las expansiones, que tienden a provocar deformaciones espontáneas.

No insistiré más sobre las variaciones de dimensiones positivas.

- *hidráulicas*: entumecimientos de capilaridad;
- *químicas*: expansiones por la cal o por la magnesia libres, de los sulfoaluminatos, de los áridos reactivos, del acero oxidado;
- y *físicas*: dilataciones térmicas debidas a elevaciones de temperatura, o a la congelación del agua.

Estas distintas variaciones son generalmente características, y conociendo sus causas, se pueden fácilmente encontrar los remedios. Por ejemplo, una armadura de hormigón, en condiciones corrientes, no se oxida antes de un número de años igual a $e^2/10$ siendo e el espesor del hormigón que la recubre, expresado en milímetros. Si esto no es así, las fisuras observadas son debidas a otra causa.

Otro ejemplo: la fisuración debida al hielo, alcanza en primer lugar a los vertices, después a las aristas y más tarde a la superficie del acabado; no puede ser confundida con la que proviene de áridos reactivos, etc.

Quisiera dedicar más tiempo a las *retracciones*. En primer lugar resalto el plural de la palabra. Las diversas retracciones son, desdichadamente, confundidas a menudo. El Simposio Internacional organizado en este I.E.T.c.c. en el año 1968 bajo los auspicios de la RILEM y el CEMBUREAU ha contribuido en una buena parte a aclarar este problema de las retracciones.

Es necesario distinguir esencialmente:

- lo que yo llamaría “*retracción de adaptación antes del fraguado*”, que es la única irreversible;
- la “*retracción hidráulica*”, que, posiblemente sea la más conocida y que generalmente paga los vidrios rotos, es debida (después del fraguado) a la evaporación del agua, a la hidratación del cemento y a, la carbonatación de las sales cálcicas;
- y la “*retracción térmica*” que acompaña a todo enfriamiento.

Destaquemos que en la lengua francesa, (y en otras), se dispone tradicionalmente de tres palabras para las tres principales variaciones de dimensiones positivas: gonflement, expansion y dilatation (entumecimiento o hinchamiento, expansión y dilatación), mientras que las variaciones negativas corresponden tradicionalmente al único vocablo “retrait”

(retracción). Esto acentúa la confusión. “Nuestra lengua, ha dicho Henri Poincaré no está llena más que de ideas preconcebidas y no lo puede estar de otra cosa. Solamente con ideas preconcebidas inconscientes, mil veces más peligrosas que las otras”. (La Science et l’Hypothèse).

Algunos, deseosos de aclarar las cosas, pero al mismo tiempo de simplificarlas, se inclinan por decir: “¿Para qué diferenciar las causas? Cuando se producen retracciones, los efectos son, si no idénticos, al menos análogos”. ¡Ni hablar! los efectos no son del todo similares y las causas no son las mismas, los remedios tampoco; pueden llegar, incluso a ser opuestos.

Por ejemplo: la “retracción de adaptación antes del fraguado” puede ser 5 veces más fuerte que la “retracción hidráulica”; esta retracción de adaptación es, corrientemente, del orden de 1 mm/m *algunas horas después de la puesta en obra* y alcanza entonces 10 cm de espesor. La retracción hidráulica apenas alcanza este espesor, después de transcurridos muchos años.

Segundo ejemplo: La “retracción de adaptación antes del fraguado” puede reducirse por:

- un aumento de la dosificación de cemento,
- un aumento de la finura del cemento,
- un aumento de la cantidad de agua del hormigón.

Estas tres modificaciones ejercen sobre la retracción hidráulica el efecto contrario.

Tercer ejemplo: La retracción térmica es casi siempre más importante que la hidráulica. Para un hormigón corriente, la retracción hidráulica es del orden de 200 a 300 micras/metro. La térmica es, en las mejores condiciones climáticas, a la sombra, por ejemplo en Bilbao o en Barcelona, del orden del doble: 400 micras/metro, y puede alcanzar 1.100 micras/metro para obras que en ocasiones están al sol, en Madrid o en Salamanca. Por otra parte, una pieza de hormigón tiene una retracción térmica al menos 10.000 veces más veloz que la hidráulica.

Cuarto ejemplo: Para reducir los efectos de la retracción hidráulica se pueden aumentar las armaduras. Pero esto no reduce la fisuración debida a la “retracción de adaptación antes del fraguado”; etc.

FORMA DE LAS FISURAS

Por la atenta observación de las fisuras, tanto en el laboratorio como en obra, se pueden apreciar las causas, y así evitar, o al menos reducir, la fisuración en las obras que se pretenden construir.

Las fisuras debidas a las cargas son relativamente simples:

- en *tracción*, son perpendiculares al esfuerzo,
- en *compresión*, son en el sentido del esfuerzo,
- en *cizallamiento*, es decir, cuando existe una tracción y una compresión perpendiculares, la forma de las fisuras depende de aquellas. Las fisuras que forman un ángulo de 45° con la vertical, son generalmente fisuras de cizallamiento. Un asentamiento local del suelo, suele ser la causa.

Se sabe que los suelos son deformables. Y aún así no se tiene ésto bastante en cuenta. Ciertas presas de hormigón hechas sobre roca, se desplazan una decena de centímetros según que su capacidad esté o no cubierta al máximo. No es de extrañar que una obra en hormigón donde los módulos de deformación sean del orden de 100.000 a 400.000 kp/cm² puede fisurarse cuando esté colocada sobre un suelo en el que el módulo de elasticidad sea solamente del orden de 10 a 100 kp/cm², sin hablar de módulos de deformación aún más débiles.

Las *expansiones* no escapan a estas reglas; por ejemplo, las “*pústulas*” debidas a gránulos de cal libre, o bién a áridos reactivos o heladizos aislados, tienen forma de pequeños conos con un semiángulo de 45° en el vértice.

El sulfoaluminato y las exfoliaciones debidas al hielo tienen aspectos característicos, de los que mis colegas en este Simposio hablarán con detalle. Cuando una obra deba resistir a agentes agresivos, es necesario, sobre todo evitar la penetración de la agresión y hacer el hormigón lo más *impermeable* que sea posible, usando, entre otros parámetros, una elevada dosificación de cemento. Esto corresponde a una proporción relativamente débil del elemento inerte del hormigón que es el árido. Esta observación paradógica demuestra que el punto de vista químico del problema, a pesar de su importancia, no debe enmascarar el punto de vista físico.

En cuanto a las fisuraciones debidas a la *retracción*, revisten el aspecto de un cuarteado, en el que la dimensión de las retículas dependen esencialmente, de la clase de retracción causante:

- algunos centímetros; se trata de una “retracción hidráulica”,
- algunos decímetros; se trata de una “retracción de adaptación antes del fraguado”,
- algunos metros; entonces se trata de una “retracción térmica”.

REMEDIOS A LAS FISURAS

La fisuración del hormigón proviene de múltiples causas; pero, afortunadamente, se sabe que existe generalmente *una causa principal, y tan sólo una*. Sobre todo a esta causa es a lo que hay que poner remedio, sin detenernos demasiado en las accesorias. Esto, que es demasiado simple no es del todo exacto, ya que “lo que no es sencillo es inutilizable” (Paul VALERY).

Citaré un ejemplo característico en apoyo de esta tesis: se pueden observar *enlucidos* fisurados, plaquetas más o menos despegadas de la pared que las soporta. Se suele culpar de ello a la “retracción hidráulica”, ya que las fisuras que están a menudo francamente abiertas, atestiguan una retracción. Los mejores morteros para disminuir esta fisuración son los hechos a base de “cemento de albañilería” o de “cal hidráulica” que son frecuentemente cementos más magros (fillerizados); estos morteros tienen mayor retracción que si están fabricados con cementos corrientes. Lo que ocurre es que los “cementos de albañilería” y las “cales hidráulicas” tienen características favorables:

- por una parte, la resistencia a la tracción que confieren al mortero es relativamente débil,
- y por otra parte, gracias a su finura, a su superficie específica (más o menos el doble de la de los cementos corrientes), la adherencia que confieren al mortero sobre su soporte es buena.

Estas dos cualidades —*resistencia débil* y *gran adherencia*— son eminentemente favorables para evitar la fisuración. Esto resulta de consideraciones matemáticas bastante simples: la malla del cuarteado de un enlucido tiene una dimensión mínima:

siendo:

$$l = 2 \frac{T}{\tau} h$$

T la resistencia a la tracción de un enlucido.

τ su adherencia.

h su espesor.

La fisuración es por lo tanto más pequeña cuanto menor sea la malla.

El factor primordial es, evidentemente, la adherencia, ya que puede variar desde 1 a 100 o incluso más. De ello resulta que la naturaleza y la finura del conglomerante, la incorporación de aditivos, y más ampliamente, la composición del mortero del enlucido y su puesta en obra, intervienen mucho en la retracción, cuya influencia es despreciable.

Lo que en definitiva he dicho, es que la débil resistencia a la tracción del enlucido o enfoscado es favorable para reducir la fisuración. En ocasiones se intenta lo contrario, y esto es un error. Frente a un vendaval, los juncos pueden ser superiores a los robles. Para evitar las fisuraciones, los medios son función de las causas:

- si el riesgo de fisuración en el hormigón es por *causas extrínsecas*, es decir, cargas, su resistencia ha de ser elevada,
- si lo es por *causas intrínsecas de retracciones* su resistencia ha de ser débil,
- si lo es por *causas intrínsecas de entumecimiento (hinchamiento)* (hielo, sulfatos, armaduras), su resistencia ha de ser elevada.

He hablado del interés que tienen las resistencias bajas para el caso particular de los *enlucidos* o enfoscados. Generalmente, la *fluencia*, y por consiguiente, la *relajación* y la adaptación a las deformaciones, son tanto más importantes, cuanto más débil es la resistencia mecánica. En este aspecto, el hormigón sigue la regla general de numerosos materiales.

Sin embargo, si el hormigón debe sufrir simultáneamente cargas y retracciones, ¿qué solución es necesario adoptar? Pues bien, en toda realización son necesarios ciertos compromisos. Por descontado, un mínimo de resistencia es necesario siempre. Es preciso que el constructor ejecute su obra con todo conocimiento de causa. Para concretar mi pensamiento, esquematizando, diré:

- Para los *hormigones en masa*, la retracción térmica que sigue al desprendimiento del calor de hidratación del cemento, es primordial; de ahí los diversos preceptos de hormigonar a baja temperatura, con una dosificación limitada de cemento, en tongadas bastante delgadas, empleando tubos refrigerantes, etc.
- Para las *carreteras* o *las pistas* de hormigón, el efecto de carga es primordial; por ello, la necesidad de fundaciones “ad hoc”, de espesor suficiente, de limitar la longitud de las losas, etc.
- Para hormigones *armados* o *pretensados*, las cargas tienen, igualmente, un efecto primordial; pero dadas las dimensiones de la mayor parte de los elementos en hormigón, es necesario prever sus variaciones de dimensión por causas térmicas (retracción y dilatación), de la misma manera que, por ejemplo, para las construcciones metálicas.

Como para los casos precedentes, el asentamiento de las cimentaciones debe de tenerse en cuenta:

— En fin, para los *enlucidos* o *enfoscados*, su adherencia es lo principal, y respetar las prescripciones fundamentales, están bien establecidas.

Como se puede observar, si examinamos todos los casos citados se ve que la retracción hidráulica —corrientemente llamada “retracción” a secas— no es nunca la causa principal de las fisuras. Es necesario, para librarse de una idea errónea muy extendida, “despojar al hombre viejo”. Se puede, artificialmente, en el laboratorio, provocar fisuras por retracción hidráulica; pero en la realidad, yo nunca las he visto.

Es decir, que el imponer a los materiales, y en particular al cemento, *un ensayo llamado de fisurabilidad*, es tan peligroso como el hacer a un automóvil un ensayo de accidentabilidad o aconsejar a los toreros una pócima mágica que les haría invulnerables. Si se garantizara un automóvil contra los accidentes, se incitaría al conductor a la negligencia en lo esencial, que es el Código de Circulación; y si por una simple pócima se garantizara la longevidad se estaría animando a los enfermos a hacer excesos, y a los toreros a arriesgarse demasiado.

La fisuración depende de todas las características del hormigón y según los casos, pueden ser diametralmente opuestas. Es de necesidad, y en primer lugar, respetar eso que se llama las “reglas del arte”. “No se hace un artista, poniendo en las manos de un peón el cincel de Fidias”, decía Le CHATELIER.

Es necesario siempre considerar que el hormigón, armado o no, es una *roca artificial* a la que la infinidad de formas, la “moldeabilidad”, le da todo el valor; no obstante, es una roca. Por ejemplo, si se colocase en el suelo una losa de piedra, de 20 metros de larga y 20 centímetros de espesor, se sabe que al pasar por ella un camión de 35 toneladas, correría un gran riesgo de fisurarse. Es así como se hicieron las primeras carreteras en hormigón.

CONCLUSION

Antes, quisiera concluir esta conferencia haciendo votos para que la fisuración del hormigón sea desmitificada. Este problema es a menudo falseado por cualquier motivo, eslógans que crean prejuicios y que confunden a ese maravilloso ordenador que es el cerebro humano.

Es necesario también tomar conciencia de que las reparaciones de las fisuras crean gastos desproporcionados con la economía que se ha creído poder hacer sobre el volumen del hormigón, la dosificación de cemento, las armaduras, los sondeos, etc., en resumen, sobre las *reglas del arte*.

La solución razonable de los problemas ha de resultar de un compromiso entre lo técnico y lo económico. En el término medio está la virtud.