

# sobre los métodos para el estudio de la durabilidad de los conglomerados hidráulicos

J. CALLEJA y P. GARCIA DE PAREDES

## 1. GENERALIDADES

Se entiende por durabilidad de un conglomerado hidráulico su capacidad de resistencia, a lo largo del tiempo, frente a agentes y medios destructivos.

En esta definición hay tres aspectos principales a considerar. El primero es que la durabilidad se refiere siempre en la práctica, a un *conglomerado hidráulico*, es decir, a un mortero o, lo que es más frecuente e importante, a un hormigón, puesto que en los elementos constructivos, estructuras y acabados de las obras no se suelen emplear las pastas puras de los cementos. El segundo es que la durabilidad, como su nombre indica, implica *resistencia en el tiempo*, con lo que queda sentado que éste ha de constituir necesariamente una de las principales variables en los estudios sobre durabilidad. El tercero es que la durabilidad de un conglomerado se entiende siempre frente a agentes y medios destructivos, generalmente externos al mismo.

Si se centra el problema de la durabilidad sobre el hormigón como material, es preciso considerar que éste es un conglomerado heterogéneo (1) constituido por un componente activo que es el conglomerante, por unos componentes generalmente inactivos, aunque no siempre deban ser considerados como tales, que son los áridos, por otro componente, el agua, que da una cierta coherencia al conjunto y que desarrolla la actividad hidráulica del conglomerante, y finalmente (y de forma eventual) por algún aditivo llamado con expresión acertada el cuarto componente del hormigón. Es de tener en cuenta también, a efectos del comportamiento del hormigón frente a determinadas acciones y en ciertas circunstancias, el aire ocluido, bien de forma espontánea, o bien de modo deliberado y controlado. El agua y el conglomerante forman la pasta que engloba a las fracciones más finas del árido —la arena— y forma con ellas el mortero de agarre, el cual rodea a las fracciones más gruesas —la gravilla y la grava— rellenando los huecos entre ellas y dando trabazón a la masa. A los efectos de la durabilidad en general, todos estos factores aislados: conglomerantes, áridos y agua, eventuales aditivos y aire ocluido pueden ejercer una influencia, así como también el producto obtenido de ellos, es decir, el hormigón como tal.

La actividad del conglomerante debe considerarse, no solo en el aspecto de sus posibilidades de desarrollar propiedades hidráulicas, sino también en el de ejercer interacciones con los agentes agresivos potenciales, las cuales pueden modificar las condiciones y el comportamiento de los conglomerados. De hecho, los conglomerantes, y más concretamente

los hidráulicos, esto es, los cementos, *a igualdad de todo lo demás* confieren en la práctica distinta durabilidad a los hormigones. Y lo hacen en función de la proporción en que forman parte del hormigón, y en función de sus características físicas y, sobre todo, químicas. De la proporción con que forman parte del hormigón, ya que aquélla influye en la resistencia y en la compacidad. De sus características físicas (y mecánicas), por cuanto que, con arreglo al tipo, clase y categoría según las normas, los cementos son capaces de desarrollar resistencias con mayor o menor velocidad y en mayor o menor cuantía total; de sus características químicas, por cuanto que, en virtud de sus correspondientes tipo, clase y categoría, los cementos tienen distinta composición y constitución, y los mecanismos de su fraguado y endurecimiento, así como su actividad hidráulica y los productos hidratados finales a que dan lugar, lo mismo que la naturaleza y estructura física de la pasta hidratada resultante, son muy distintos. La velocidad de endurecimiento, como determinante de la resistencia del cemento a una edad determinada, y la resistencia final alcanzada, influyen por razones evidentes; la naturaleza y estructura de los productos de la hidratación influyen por su condición cristalina o de gel, por su porosidad y capacidad de imbibición, por el carácter retractivo o expansivo dominante en su formación, y por sus características químicas que marcan su mayor o menor susceptibilidad frente a determinados agentes agresivos químicos de acción más o menos específica.

Los áridos, según su naturaleza, pueden ser inertes, tanto frente a los agentes externos de todo tipo (físicos y químicos), como frente a componentes químicos activos del propio conglomerante; o, por el contrario, pueden ser susceptibles a los unos y/o a los otros. En cualquier caso, la proporción y la granulometría de los áridos, a igualdad de todo lo demás, son codeterminantes de la resistencia y de la compacidad del hormigón e influyen, por lo tanto, en su durabilidad.

El agua de amasado puede afectar a la durabilidad del hormigón, bien sea por las sustancias solubles que contenga, y que pueden influir sobre el fraguado, sobre las resistencias y sobre la naturaleza de los productos de la hidratación, o bien por la proporción en que actúa, es decir, por la relación agua/cemento o por su inversa, la "concentración" del hormigón. La concentración influye, por una parte, en la estructura física de la pasta y, por otra, en la resistencia y en la porosidad del hormigón.

Los aditivos, disueltos o dispersos en el agua de amasado, pueden influir de múltiples formas, según su acción específica principal y sus acciones secundarias, en diversas propiedades del hormigón fresco o endurecido, las cuales determinan a su vez distinto comportamiento de éste frente a acciones y medios agresivos.

En virtud de cuanto antecede, en la durabilidad del hormigón pueden influir las características de sus materiales y la proporción en que intervienen, particularmente la cantidad de cemento, la concentración y la granulometría de los áridos. Pero, a constancia de todos estos factores, influye también la ejecución, es decir: el amasado como condicionante de la uniformidad del material obtenido; el transporte y la puesta en obra, como posibles causas de segregaciones, de mayores heterogeneidades y de una compacidad deficiente; y el curado, decisivo para obtener (o no) del hormigón el mejor comportamiento de que puede ser capaz.

Este último factor, el curado, está en relación con el hecho, señalado al principio, de que la durabilidad es permanencia del hormigón a lo largo del tiempo. En efecto, los procesos del endurecimiento del hormigón son continuos y se prolongan durante muy largos períodos de tiempo, bien que con velocidad decreciente. Esto quiere decir, que, a constancia de las restantes circunstancias, un hormigón será más durable, en general, cuanto ma-

por sea el grado de endurecimiento alcanzado por él en unas condiciones normales de curado; y que, por el contrario, un hormigón joven y poco consolidado tiene menos probabilidades de ser durable en circunstancias adversas. Es decir, en la durabilidad influye no sólo el tiempo durante el cual actúa el agresivo, sino también el transcurrido desde la confección del hormigón hasta el comienzo del ataque.

Finalmente queda por comentar el aspecto de los agentes y medios destructivos. Así como desde el punto de vista del hormigón influyen en su durabilidad las características físicas y químicas de sus materiales y las físicas del propio hormigón, así también los agentes, medios y procesos destructivos pueden ser de naturaleza física, química o mixta. Los de naturaleza física operan generalmente por expansión y ésta, a su vez, suele ser el resultado de una cristalización: del agua, por congelación en los poros e intersticios del hormigón, o del yeso, en determinados ataques por sulfato cálcico. En estos casos el agente expansivo en potencia penetra en el hormigón desde el exterior en estado líquido (agua) o en disolución (yeso) y, una vez dentro puede actuar solo. Los agentes, medios y procesos de naturaleza química pueden operar también por expansión, si bien en este caso el agente expansivo se forma dentro del hormigón, por interacción entre ciertos componentes activos del cemento, e incluso de los áridos, y el agresivo que ha penetrado desde el exterior; es el caso de determinados ataques por sulfato cálcico y otros sulfatos. Pero pueden operar igualmente por disolución: "deslavado" de la cal de hidrólisis por aguas muy puras o ácidas, etc. En general, los procesos agresivos son complicados en su aspecto químico, y son el resultado de una suma de acciones físicas (penetración por permeabilidad del hormigón, succión capilar de las disoluciones agresivas, etc., y expansiones por cristalización de productos más voluminosos que aquéllos de que proceden) y de acciones químicas (interacciones agresivo-hormigón, con disolución de unos compuestos y formación de otros que cristalizan). Estas acciones de los agentes agresivos pueden verse más o menos facilitadas o dificultadas por la naturaleza y condiciones del hormigón y de sus materiales: las acciones físicas por la mayor o menor compacidad del material; y las químicas por la composición y estructura de los áridos y, sobre todo, de la pasta hidratada del cemento.

Los agresivos químicos ejercen, en general, acciones que pueden y deben calificarse de específicas y no de genéricas. Con esto se quiere significar que, por ejemplo, no todos los sulfatos, por el hecho de serlo, actúan igual, sino que, por el contrario, las acciones del sulfato sódico, las del sulfato magnésico y las del sulfato cálcico son totalmente distintas entre sí, como también lo son los resultados a que aquéllas dan lugar.

Igualmente han de tenerse en cuenta las diversas acciones que un mismo agresivo puede ejercer por varios conceptos, ya que una sal, por ejemplo, puede actuar sólo o principalmente por el anión, o por el catión; o por ambos, como sucede en el caso del ataque del hormigón por el sulfato magnésico.

Si los hormigones pueden ser muy distintos por sus materiales, por las proporciones en que éstos intervienen y por la ejecución, mucho mayor variedad se da en los agresivos. En cuanto a los medios, éstos pueden ser gaseosos o líquidos. Los primeros están constituidos por la atmósfera normal o por atmósferas agresivas (ambientes marítimos o de zonas industriales). Los segundos están formados por aguas naturales dulces (blandas o duras) o salinas (marinas o minerales), por desagües industriales, y por toda clase de productos químicos y sustancias líquidas de origen animal, vegetal o mineral que por diversas razones puedan entrar en contacto o hayan de estar en contacto con el hormigón. Los medios agresivos sólidos apenas si actúan como tales, pues el contacto superficial del agresivo con el hormigón no basta, en general, para la destrucción masiva de

éste, y la penetración se produce siempre por difusión de una fase líquida que suele ser una disolución del propio agresivo sólido en un disolvente idóneo, generalmente acuoso. Con tal condicionamiento pueden considerarse medios agresivos sólidos los materiales y sustancias sólidas en contacto con el hormigón o contenidos en depósitos y silos hechos con hormigón (suelos y terrenos; productos químicos o alimenticios, etc.).

En cuanto a los agentes agresivos en sí, pueden ser de naturaleza mineral o inorgánica, y dentro de ésta, ácidos, básicos o salinos; o de naturaleza orgánica: hidrocarburos, sustancias de distinta función simple o mixta (alcoholes, cetonas, ácidos, fenoles), aceites y grasas, productos de fermentación, jugos y extractos de origen vegetal o animal, etc. Sus características químicas influyen de forma distinta pero decisiva en el mecanismo y en la cinética del ataque. Influyen también en distinta medida las concentraciones y muchas veces el hecho de que la acción del agresivo sea continua o intermitente, o de que el hormigón se halle total o parcialmente inmerso en el medio agresivo, o de que éste se renueve o no, o de que el ataque se produzca en condiciones estáticas o dinámicas, o de que contribuya o no al ataque alguna acción de tipo físico, o la variable temperatura.

Los productos del ataque, según sean y según las condiciones en que se formen, pueden llegar incluso a proteger a las partes del hormigón no atacadas, modificando la cinética del proceso hasta atenuar o anular la acción agresiva. Tal sucede cuando colmatan los poros que dan acceso al agresivo o cuando, siendo insolubles en el medio atacante, recubren en forma de película protectora continua e impenetrable, al resto de las partes vulnerables del hormigón.

La exposición precedente, basada en los conceptos que intervienen en las definiciones dadas de durabilidad y de hormigón, pone de manifiesto la complejidad tan grande que presenta el problema de la durabilidad, por su gran amplitud debida al elevado número de variables que intervienen, y hace resaltar la dificultad de su estudio, si se tiene en cuenta que, al menos en la práctica, estas variables no se pueden separar y fijar a voluntad para manejar una a una, o dos a dos, ya que se hallan indisolublemente ligadas unas a otras. Esta dificultad se pone de relieve, ante todo, cuando se trata de establecer métodos y técnicas para estudiar la durabilidad, y sobre todo cuando se intenta valorar e interpretar correctamente los resultados de los estudios llevados a cabo.

## **2. EL PROBLEMA DE LA DURABILIDAD. METODOS PARA SU ESTUDIO**

El problema de la durabilidad, tomado en sentido general, puede plantearse en el terreno doctrinal o en el pragmático. En el terreno doctrinal todo queda reducido a averiguar el cómo y el por qué se produce la destrucción del hormigón en cada caso, es decir, a determinar el mecanismo y las causas de la misma. En el terreno pragmático el planteamiento puede consistir, o bien en averiguar qué características de todo género debe reunir un hormigón para ser durable frente a cualquier tipo de agresividad, o bien en establecer qué probabilidad tiene un hormigón dado de resistir eficazmente a una determinada clase de ataque. Como es lógico, resuelta en cada caso la cuestión doctrinal, queda implícitamente resuelto el problema práctico.

La cuestión doctrinal es relativamente fácil de resolver en el caso de la segunda de las alternativas dadas al planteamiento en la práctica, y lo sería igualmente en el caso de la primera, si existiese una sola causa y un solo mecanismo de ataque, y si ambos dependieran de pocas variables independientes, conocidas y fácilmente mensurables. La glosa hecha en el punto 1 demuestra que no es así, con lo cual se complica, tanto el planteamiento teórico, como el práctico del problema de la durabilidad. Y, por el contrario, toda

solución útil del mismo debe hallarse a base de planteamientos sencillos. Esto impone simplificaciones apriorísticas de tal manera que, cuantas más se adopten, más fácil será llegar a una solución, pero menos general será el carácter que ésta tenga y menor su valor en todos los órdenes. Hay, pues, como en todos los problemas que se plantean en terrenos de la ciencia y de la técnica, una relación inversa entre la facilidad de su resolución y la validez general y práctica de las soluciones encontradas para aquéllos, que desemboca en un compromiso entre ambos términos antagónicos.

El aspecto pragmático del problema de la durabilidad postula, de por sí, el hallazgo de un método (sencillo, rápido, reproducible, preciso, etc., etc.) que, con validez, no para un caso determinado, sino lo más general posible, permita contestar a las dos cuestiones principales antes propuestas: el cómo y el por qué.

Llevado este postulado hasta el último extremo, se trataría de establecer, no sólo un método, sino toda una norma con carácter prescriptivo y valores y condiciones límite, para fijar cómo ha de ser un hormigón que haya de resistir un ataque, o establecer si un hormigón determinado es capaz de resistirlo o no. Y vista la incompatibilidad existente entre la posibilidad de hallar no ya una norma, sino un método que dé una solución general al problema de la durabilidad, y un planteamiento sencillo para lograrlo, veamos en lo que sigue dónde se encuentran las principales dificultades.

El primer intento de solución del problema de la durabilidad consiste en dividirlo para hallar soluciones parciales a aspectos parciales del mismo. Algunos de estos planteamientos ya se han hecho y algunas de las correspondientes soluciones ya se han encontrado. Por ejemplo, considerado el hormigón como mezcla de agua, áridos y cemento, las condiciones que han de reunir las aguas para poder ser empleadas en el amasado de hormigones y morteros, no sólo con vistas a la durabilidad, sino en términos generales, son desde hace mucho tiempo objeto de una norma (2). Lo mismo sucede en cuanto a los áridos gruesos, por lo que respecta a su helacidad (3), y a los finos, en lo que hace a su contenido en arcillas, sales solubles y otras materias potencialmente perjudiciales para el hormigón (2). Es más, la posible susceptibilidad de ciertos áridos frente a los álcalis de los cementos, la cual da lugar a productos expansivos que pueden provocar la destrucción del hormigón, también está limitada en normas y existen los correspondientes métodos para determinarla (4) y (5).

Donde verdaderamente se presenta el problema con mayores dificultades es en el caso de los cementos, como componentes activos del hormigón. El planteamiento es éste: qué cemento es el más idóneo para hacer un hormigón que deba resistir un determinado tipo de ataque. El hallazgo de la solución requiere, como siempre, un método de ensayo y, a ser posible, un patrón de comparación. Métodos de ensayo pueden proponerse, y de hecho se han propuesto, varios y hasta muchos. Patrón de comparación, en puridad, no existe más que uno: el hormigón que haya de utilizarse en cada caso, frente al agresivo de turno y en las condiciones prácticas de la obra real; esto equivale a decir que prácticamente no puede existir patrón de comparación a priori, pues si el ensayo más adecuado ha de ser a escala real y su realización exige la ejecución de la obra, una y otra se identifican y, una vez realizada la obra, huelga pensar en el ensayo. Además, en un ensayo, cualquiera que sea, no siempre pueden preverse de antemano todas las condiciones que van a darse en el futuro de una obra, pues lo contrario sería profetizar. Visto así que no existe en el aspecto práctico un patrón verdaderamente absoluto para contrastar los resultados de los diversos métodos para determinar la durabilidad real de un cemento, surge la nueva cuestión de cómo decidir qué método es el más idóneo, con lo cual el problema queda indeterminado: o habría de conocerse previamente un orden de durabili-

dad de los distintos tipos, clases y categorías de cementos, para establecer con arreglo a él un orden de aptitud de los métodos para determinar dicha durabilidad y elegir el más idóneo, o por el contrario, habría que partir de un conocido orden de aptitud de los métodos, para fijar, basado en el más idóneo de todos ellos, el orden de durabilidad de los cementos y elegir el más adecuado en cada caso.

En realidad, es inevitable no caer en el empirismo, ya que, habiendo de prescindir de patrones absolutos, se ha de tratar de establecer unos previos órdenes relativos de durabilidad de los cementos ensayados por distintos métodos y ver hasta qué punto los resultados coinciden, a fin de tomar en consideración los métodos que más coincidencias presenten, y siempre que el orden más frecuente de durabilidad hallado para los cementos sea el lógico previsto, en relación con otros parámetros y características de los propios cementos. Es posible, aunque poco probable, encontrar así un método que supere a los restantes en posibilidades de aplicación con carácter general o, cuando menos, más amplio.

Admitido este planteamiento, quedan muchos puntos por fijar en un posible método general para el estudio de la durabilidad. Estos puntos afectan a aspectos muy diversos, como pone de relieve lo que sigue:

- a) el tipo de material objeto del ensayo (pasta, mortero u hormigón);
- b) la forma y dimensiones de las probetas;
- c) el número de probetas que deben ensayarse a cada edad y las edades a que deben hacerse los ensayos;
- d) las condiciones de amasado, curado y conservación de las probetas;
- e) el grado de madurez o de curado que deben tener las probetas en el momento de ser sometidas a la acción del agresivo;
- f) el tiempo durante el cual deben prolongarse las observaciones y las determinaciones;
- g) los agresivos que se deben utilizar y las concentraciones con las que deben actuar, así como la forma y condiciones en que hayan de hacerlo;
- h) las magnitudes variables que se hayan de tomar en cuenta como índice de durabilidad (resistencias mecánicas, módulos de elasticidad, variaciones dimensionales, pérdidas o ganancias de peso, variaciones de composición o de concentración de los medios agresivos, formación o desaparición de determinadas fases o componentes, etc.).

La enumeración podría continuar y hacerse tan extensa como se quisiera, pero con lo expuesto basta para poner de relieve la nueva complejidad. Que no ha sido posible simplificarla en la medida de lo deseable lo prueba el buen número, antes aludido, de ensayos propuestos hasta la fecha y la gran variedad de matices que presentan en relación con los aspectos antes enumerados. En efecto, hay métodos que, como el MERRIMAN, tanto en su versión original (6) como en su versión modificada por GARCIA DE PARADES (7) utilizan probetas de pasta pura, tal cual; otros como el de LE CHATELIER-ANSTETT BLONDIAU (8) o el ASTM C 452-64 (9) utilizan pasta hidratada reamada con yeso, o pasta obtenida de una mezcla de yeso y cemento anhidro, respectivamente; y otros como el de KOCH y STEINEGGER (10), el de WITTEKINDT (11) y el A.P.C.M. (12) propugnan por el empleo de probetas de mortero. Cabe admitir la posibilidad de otros que realicen el ensayo sobre probetas de hormigón. En cuanto a la forma y dimensiones de las probetas, la diversidad es grande: probetas prismáticas con dos dimensiones mucho

mayores que la tercera — $100 \times 50 \times 5$  mm (6) y  $100 \times 50 \times 2$  mm (7) de pasta pura;  $160 \times 40 \times 10$  mm (11) de mortero—; probetas prismáticas con una sola dimensión mayor que las otras dos iguales entre sí — $60 \times 10 \times 10$  mm (10) de mortero;  $25,4 \times 25,4 \times 285,75$  (ó  $\times 158,75$ ) mm (9) de pasta pura con yeso y  $2,54 \times 2,54 \times 254$  mm (13) de mortero—; probetas cilíndricas de 80 mm de diámetro y 30 mm de altura (8) de pasta hidratada, con yeso. Los detalles de estos métodos están, por lo demás, suficientemente descritos (7).

Particularmente importante es el tiempo durante el cual deben prolongarse las observaciones, antes de decidir sobre el comportamiento de un hormigón o de un cemento en cuanto a durabilidad. La razón es que el comportamiento puede ser cambiante con el tiempo, e incluso invertirse. Es decir, que un conglomerante puede comportarse bien durante bastante tiempo en unas condiciones agresivas dadas y dejar de hacerlo a partir de un determinado momento; o, a la inversa, comportarse deficientemente durante un cierto período y a partir de un instante dado no experimentar evolución posterior o, incluso, evolucionar favorablemente. En estos casos los resultados de un ensayo, y con ellos la valoración o calificación del comportamiento del conglomerante, serían distintos y aún contradictorios según se tomasen en consideración antes o después del cambio de comportamiento. Esto puede suceder, no con uno, sino con distintos métodos, en diversa medida y para diferentes períodos de tiempo, con lo cual la comparación entre los resultados de aquéllos se vería afectada de una grave dificultad.

Esta comparación entre los resultados de los distintos métodos para el estudio de la durabilidad se hace muy difícil, en razón de la heterogeneidad que en los aspectos y matices enumerados presentan dichos métodos, la cual implica que las apreciaciones de la durabilidad hayan de hacerse y los resultados de las mismas hayan de expresarse con magnitudes igualmente heterogéneas. Esto invalida a priori la aplicación de tratamiento y análisis estadísticos a los resultados. Por otra parte, es imposible traducir éstos a valores expresables en una misma magnitud y medibles con una unidad común, y todo cuanto cabe hacer es adoptar el recurso de asignar a cada resultado una valoración o calificación, esto es, un orden dentro de una escala, por supuesto arbitraria. Es dudoso que las valoraciones resultantes se puedan someter a un análisis estadístico, puesto que son el resultado de la interpretación difícil de unos resultados, en la cual intervienen muchos factores subjetivos que por su propia naturaleza escapan a la objetividad de la estadística. Sin embargo, tampoco en este aspecto queda otra alternativa que la de aplicar unos ciertos criterios estadísticos y ver lo que así resulta.

### **3. PLANTEAMIENTO DEFINITIVO DEL PROBLEMA DE LA DURABILIDAD**

Centrado el problema de la durabilidad en la intrínseca del conglomerante, y tenido en cuenta lo que precede, cabe hacer el siguiente planteamiento: a) elegir una serie de cementos con distintas características de todo tipo y, asignándoles o no previamente un orden en cuanto a comportamiento desde el punto de vista de la durabilidad en general, someterlos a diferentes métodos de ensayo; b) llevar a cabo este trabajo por parte de diversos laboratorios y/o experimentadores, aplicando todos los mismos métodos y de forma rigurosa en cuanto al conjunto de detalles operatorios de los mismos; c) adoptar por parte de todos los laboratorios y experimentadores copartícipes un criterio de interpretación, valoración y, sobre todo, de expresión de los resultados obtenidos con los distintos métodos, según una escala común de calificación, arbitraria pero única, precisa y exenta al máximo de ambigüedades; d) comparar los resultados así obtenidos por todos los laboratorios y experimentadores, entre sí, y con el orden lógico de calificación, dado

previamente, en su caso, a los conglomerantes ensayados; e) sacar de ello las conclusiones que sean de rigor. El punto más difícil es el relativo a la comparación de los resultados. En ella se deberá intentar aplicar, si es posible, algún criterio estadístico, como antes se indicaba.

El anterior planteamiento ha sido tomado en consideración por el Subcomité para el estudio de resistencia de los cementos al ataque químico en el seno del CEMBUREAU (13), durante varios años. En este estudio ha tenido una parte muy activa el I.E.T.c.c. (14), (15) y (16), así como otros miembros del Subcomité citado (17), (18) y (19). Los cementos estudiados han sido cinco, de acuerdo con las normas españolas (20): un portland de alta resistencia —RHPC— P-450; un portland resistente a los sulfatos —SRPC— PAS-350; un puzolánico corriente —PZC— PUZ-350; un puzolánico especial —PZC especial— PUZ especial que reúne las características del puzolánico corriente y del portland resistente a los sulfatos; y un portland de horno alto —BLC— PHA-250. Los métodos empleados han sido ocho: LE CHATELIER-ANSTETT-BLONDIAU (8); A.P.C.M. (12); A.S.T.M. (9); KOCH y STEINEGGER (10); WITTEKINDT (11); C.E.R.I.L.H. (21) y MERRIMAN modificado por GARCIA DE PAREDES (7). Las particularidades en cada caso están descritas en las correspondientes publicaciones hechas hasta la fecha (7), (14), (15) y (16), las cuales incluyen las variaciones o los detalles complementarios introducidos ocasionalmente en algunos de los métodos. El criterio de valoración y calificación adoptado unánimemente ha consistido en asignar a cada conglomerante, y de acuerdo con los respectivos resultados obtenidos con cada uno de los ocho métodos, una calificación, de 1 a 5 en cada caso, utilizando sólo los correspondientes cinco números enteros, entendiéndose que el número más alto corresponde al cemento de mayor durabilidad, es decir, al de mejor comportamiento, y el número más bajo al de comportamiento más deficiente. En pocas ocasiones se ha dado el caso de asignar la misma calificación a distintos conglomerantes juzgados por los resultados de un mismo método, pero ello ha sido tenido en cuenta. En cuanto a la aplicación de métodos estadísticos para comparar las calificaciones asignadas a los cementos, hasta el momento no ha sido posible aplicar ninguno, o al menos no se ha intentado de forma decisiva. Sobre este punto se insistirá más adelante.

#### **4. CONCLUSIONES PARCIALES EXTRAIDAS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS METODOS Y CEMENTOS UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS DE DURABILIDAD**

En lo que sigue se dan, para cada uno de los métodos empleados, las conclusiones provisionales, así como el orden de calificación de los cementos estudiados, según la apreciación de GARCIA DE PAREDES y otros investigadores (7), (17), (18) y (19), con arreglo a los detalles que figuran en las publicaciones previas ya citadas.

##### **4.1. Método LE CHATELIER-ANSTETT-BLONDIAU**

De acuerdo con una primera serie de ensayos, parecía que el método, por el hecho de dar resultados concordantes (independientes del tamaño de la torta y de la frecuencia de las medidas) y en el caso de cuatro laboratorios diferentes ensayando los cinco cementos distintos, era aplicable, en general, en las condiciones prescritas en el mismo, esto es, haciendo la observación y medida de las tortas a los 90 días. El orden decreciente de bondad de comportamiento colocaba a los cementos de la siguiente forma:

PAS — PUZ esp. — PHA — PUZ — P.



Sin embargo, la conclusión que pudo extraerse a la vista de resultados posteriores fue que, según el tipo de conglomerante de que se trate, el plazo a que deben tomarse los resultados para hacer el enjuiciamiento de los cementos debe ser corto (7 días para PAS y PUZ) o largo (90 días para P—PUZ esp.—PHA); un plazo intermedio parece ir bien a algunos de los cementos (28 días para PHA y tal vez para P).

#### 4.2. Método A.P.C.M.

Las conclusiones en este caso son las siguientes:

- a) la calificación de cada conglomerante depende del plazo a que se haga, y con independencia del observador;
- b) a un plazo dado y cualquiera que sea el experimentador, la calificación puede ser distinta según que se utilice  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  o  $\text{MgSO}_4$  como medio agresivo;
- c) habida cuenta de lo anterior y considerando promedios de calificaciones, el orden en que se sitúan los cementos según su durabilidad decreciente es el siguiente:

PHA — PAS — P — PUZ esp. — PUZ.

#### 4.3. Método A.S.T.M.

La calificación de los cementos depende también en este caso del plazo a que se dé, porque:

- a) no todos dejan de dilatar al mismo tiempo;
- b) alguno —PAS— sigue dilatando después de dos años;
- c) en otros aparece una retracción después de la dilatación, y a plazos distintos para cada uno en los que esto ocurre (P—PUZ—PHA).

Las calificaciones de algunos de los cementos cambian también con el plazo y en distinta medida, y hasta con signo contrario de unos a otros:

- d) no cambia la del PUZ esp.;
- e) cambian mejorando las del PUZ y las del PHA;
- f) cambian empeorando las del PAS y las del P;

Habida cuenta de ello, las calificaciones promedias sitúan a los cementos así:

PUZ esp. — PUZ — PHA — P — PAS

o bien así:

PUZ esp. — PUZ — PHA — PAS — P

#### 4.4. Método de KOCH y STEINEGGER

Los resultados en este caso llevan a las siguientes conclusiones:

- a) las calificaciones son diferentes dependiendo de la edad del ensayo, tanto con  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  como con  $\text{MgSO}_4$ , y más aún en este último caso;
- b) los resultados obtenidos con  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  son distintos de los obtenidos con  $\text{MgSO}_4$  a cualesquiera edades iguales a que se comparen unos y otros;

- c) los resultados obtenidos con  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  parecen depender poco de la arena con que se confeccione el mortero;
- d) el método parece dar calificaciones concordantes, con  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a 90 días, y el orden decreciente de durabilidad de los cementos en tales condiciones es el siguiente:

PHA — PUZ esp. — PUZ — PAS — P.

#### 4.5. Método de MERRIMAN (modificado por GARCIA DE PAREDES)

Las conclusiones más destacadas en este caso son las siguientes:

- a) las calificaciones parecen ser tanto más concordantes cuanto más largo es el plazo en que se hacen;
- b) a mayor compacidad (menor porosidad) de las placas, mayor es el plazo en que aparecen las alteraciones;
- c) la máxima concordancia en las calificaciones se observa con la determinación de calcio en disolución de sulfato sódico a 100 días (y tal vez a 30 días), y en agua de mar a 30 días.

El orden de calificación de los cementos es:

PHA — PUZ esp. — PUZ — P — PAS

casi coincidente con el que resulta del método de KOCH y STEINEGGER.

#### 4.6. Resumen de las conclusiones parciales

La ordenación de los cementos por su calificación según su durabilidad decreciente, de acuerdo con los distintos métodos, es en conjunto, la indicada en el Cuadro 1.

El Cuadro 2 muestra la frecuencia máxima con que aparece cada uno de los cinco cementos con cada una de las cinco calificaciones.

Si se considera la división del Cuadro 1 por la línea vertical de puntos se observa que a la izquierda y a la derecha de ella los distintos cementos se encuentran presentes las veces que indica el Cuadro 3.

Si se considera la división del Cuadro 1 por la línea horizontal de puntos y a su vez se consideran las zonas derecha e izquierda con relación a la línea vertical, la distribución de la frecuencia de los distintos cementos en las cuatro zonas así creadas es la que indica el Cuadro 4.

El Cuadro 2 indica que los cementos más claramente calificados por los cinco métodos en conjunto son: PHA, PUZ esp. y P, por este orden y en la misma medida; y en la misma medida también, pero con valor menor que la anterior, PUZ y PAS, asimismo en este orden, e interpuestos entre PUZ esp. y P. Esto quiere decir que la calificación de los cementos resultante de la aplicación global de los cinco métodos da la siguiente ordenación: PHA — PUZ esp. — PUZ — PAS — P, de acuerdo con la dada en particular por el método de KOCH y STEINEGGER.

El Cuadro 3 muestra el mismo resultado, aunque con otra visión distinta.

El Cuadro 4 expresa, en dos aspectos diferentes, que los métodos LE CHATELIER-ANSTETT y A.P.C.M. por una parte, y el resto de los métodos, por otra, conducen a calificaciones distintas. Los dos primeros sirven mejor para calificar los cementos PHA, PUZ y

PAS, con independencia de la calificación resultante para cada uno, y califican de forma dudosa o deficiente a los cementos PUZ esp. y P; esto se deduce de la igualdad o desigualdad de los valores de la frecuencia con que aparecen los respectivos cementos en las partes superior derecha y superior izquierda del cuadro. Los métodos restantes parecen ser más definitivos en la calificación, alta para los cementos PHA, PUZ esp. y PUZ, y baja para PAS y P; esto se deduce de la división de valores determinada por la línea de puntos en la parte inferior (derecha o izquierda) del cuadro.

El Cuadro 1 indica, además, que entre los métodos A.S.T.M., KOCH y STEINEGGER y MERRIMAN - GARCIA DE PAREDES, los dos últimos dan calificaciones muy afines entre sí.

En resumen, de la exposición de conclusiones parciales hecha en 4.5. y del análisis de las mismas hecho en lo que precede parece deducirse:

- a) que el orden de los cementos en cuanto a durabilidad decreciente, resultante de una calificación global media hecha con todos los métodos considerados, es la siguiente:

PHA — PUZ esp. — PUZ — PAS — P;

- b) que este orden coincide con el dado en particular por el método de KOCH y STEINEGGER y se aproxima mucho al dado por el método MERRIMAN - GARCIA DE PAREDES;
- c) que estos dos métodos y el A.S.T.M. forman un grupo homogéneo, distinto del formado a su vez por los métodos LE CHATELIER-ANSTETT y A.P.C.M.

## 5. NUEVOS RESULTADOS Y NUEVAS CONCLUSIONES

Con el mismo criterio y la misma finalidad que han orientado el punto precedente, se ha hecho con posterioridad un mayor y más sistemático acopio de los resultados obtenidos hasta el momento presente en años sucesivos a partir de 1966, fecha en que se presentaron a la reunión del Grupo de Trabajo del CEMBUREAU en Lisboa los primeros valores de calificación de los cementos según distintos métodos de ensayo de durabilidad.

Los Cuadros 5, 6 y 7 muestran los resultados de distintos investigadores en los años 1966 (Reunión CEMBUREAU en Lisboa), 1967 (Reunión CEMBUREAU en Atenas) y 1968 (Reunión CEMBUREAU en Dublín), obtenidos de acuerdo con los diferentes métodos utilizados.

Como puede apreciarse, en el conjunto de los tres años y para un total de siete series de ensayos a comparar, una de ellas con resultado que presenta dos alternativas, es decir, como si se tratara de ocho resultados en total, se obtienen, en el promedio de los métodos utilizados, valores relativos de durabilidad que sitúan a los cementos en el orden indicado en el Cuadro 8.

En él se observa que el orden de calificación más frecuente coincide con el resultante según la conclusión parcial del punto 4. Los otros órdenes difieren poco y se circunscriben a la primacía entre PUZ y PAS, en tres casos, y entre PHA y PUZ especial en el caso restante.

Los Cuadros-resumen 9, 10 y 11, que engloban y promedian todos los resultados, ponen aún más de relieve estos hechos, y en particular el de que el orden que resulta de la

media de las calificaciones de los cementos, según los resultados obtenidos por la aplicación de los distintos métodos empleados por diversos investigadores en diferentes épocas, es el siguiente:

PHA — PUZ esp. — PUZ — PAS — P

según la durabilidad decreciente, y de acuerdo con el resultante de los ensayos y conclusiones parciales previas, expuestos en los puntos 4.1. a 4.5. y 4.6., respectivamente.

Esto quiere decir, en primer lugar, que dicho orden es, con bastante probabilidad, el orden real de durabilidad de los cementos en la práctica, puesto que es una media bastante representativa de su comportamiento relativo, según métodos de ensayo muy distintos, en los que se opera en condiciones muy diferentes. En segundo lugar, y por lo mismo, quiere decir también que aquél método o métodos que en sus resultados individuales de calificación de los cementos se ajusten exactamente o lo más exactamente posible a dicho orden, serán, en principio, los más idóneos para enjuiciar y prever el comportamiento probable de los cementos en cuanto a durabilidad. Y tanto más cuanto que el orden en cuestión es bastante lógico, si se tienen en cuenta las características químicas y la naturaleza intrínseca, mixta o no, de los conglomerantes ensayados. Estos métodos son, en concordancia con las conclusiones parciales del punto 4, el de KOCH y STEINEGGER en términos absolutos, seguido, por aproximación, del de MERRIMAN-GARCIA DE PAREDES y del de WITTEKINDT, por este orden.

La diferencia entre las calificaciones de estos dos métodos y el de KOCH y STEINEGGER está en que, según el de MERRIMAN-GARCIA DE PAREDES se invierte el orden de los cementos P y PAS, y de acuerdo con el de WITTEKINDT se invierte el orden de los cementos PUZ esp. y PHA, en favor siempre de los primeros. La explicación que se ofrece en el caso de los cementos P y PAS, y puesto que las diferencias de calificación de ambos son pequeñas, es que el cemento PAS utilizado no estaba exento en absoluto de aluminato tricálcico, con lo cual pudo ser vulnerable en lo que respecta a este componente, y además tenía un grado de saturación mayor que el del P, con lo cual pudo ser también más vulnerable en lo que concierne a la cantidad de cal de hidrólisis liberada en la hidratación. En efecto, los datos relativos a módulos, grado de saturación y composición potencial de los clínkeres utilizados en la preparación de los cementos P y PAS, según RIO (17), son los indicados en el Cuadro 12. Es posible que la suma de estas dos vulnerabilidades pudiera ser del mismo orden o incluso algo superior a la de las correspondientes del cemento P, con lo cual se explica la poca diferencia en la calificación global de ambos cementos por los distintos métodos, e incluso su inversión mutua con respecto al orden lógico de comportamiento que cabe esperar de la distinta naturaleza de uno y otro. Quiere decir esto que un cemento resistente a los sulfatos verdadero, es decir, exento de aluminato tricálcico y con moderada o baja saturación de cal, muy probablemente se comportaría mejor que un cemento portland, con lo cual, incluso aplicando el método MERRIMAN-GARCIA DE PAREDES, se situarían ambos en el mismo orden resultante del método de KOCH y STEINEGGER. No hay que olvidar que éste opera con mortero, mientras que el otro lo hace con pasta pura, en la que las influencias que dependen de la naturaleza del cemento pueden ser lógicamente más acusadas. Por supuesto, que esta explicación es aplicable a los resultados y conclusiones expuestos en el punto 4.6.

En el caso de los cementos PUZ esp. y PHA es más difícil ofrecer una explicación análoga. Aparte de que se puedan considerar extraños los resultados obtenidos con el medio agresivo consistente en sulfato magnésico (como pone de relieve el Cuadro 10), por las

razones de tipo general ya señaladas en el punto 2, y (debido tal vez a ellas) por una mayor susceptibilidad de los cementos PUZ especial (y sobre todo PUZ) al sulfato magnésico, en relación con el cemento PAS, es un hecho que, respecto de su comportamiento frente al sulfato sódico, los cementos PUZ especial y PHA tienen calificaciones muy análogas según el ensayo de WITTEKINDT, y la inversión del orden de ambos cementos es poco significativa.

Dentro del método de WITTEKINDT la variante que más se ajusta al resultado medio de todos los métodos y al del método de KOCH y STEINEGGER en particular, es la que utiliza el sulfato sódico como medio agresivo. En el método MERRIMAN-GARCIA DE PAREDES las variantes que cumplen con la citada condición son las que emplean como medio atacante agua desionizada y sulfato sódico, y particularmente las que basan la calificación en el valor resultante de la determinación de calcio en ambos casos, como ponen de relieve los Cuadros 5 y 11.

## **6. CONCLUSION FINAL**

Se ha partido del principio de que el orden de calificación de los cementos por diversos métodos que miden variables muy distintas y operan en muy diversas condiciones, debe tener gran probabilidad de coincidir con el orden real de comportamiento de dichos cementos en condiciones prácticas de agresividad.

Se ha considerado además que todo método que individualmente dé un orden de calificación de los cementos coincidentes exacta o muy aproximadamente con el orden medio de todos los métodos tiene también gran probabilidad de calificar a los cementos de acuerdo con su comportamiento real en la práctica frente a condiciones agresivas.

De acuerdo con el principio expuesto, el orden medio de calificación de los cementos estudiados sitúa a éstos conforme a la secuencia: PHA — PUZ esp. — PUZ — PAS — P, de mejor a peor comportamiento. Este orden es bastante lógico, si se consideran las características de todo tipo de cada uno de los cementos, lo cual sirve también de apoyo al principio adoptado.

Los órdenes particulares de calificación, coincidentes con el orden medio de todos los métodos o más aproximados a él, son los correspondientes al método de KOCH y STEINEGGER y al de MERRIMAN-GARCIA DE PAREDES.

De conformidad con la consideración anteriormente hecha, estos métodos son los que parecen dar resultados que reflejan mejor el comportamiento de los cementos en la práctica. En consecuencia, se cree que son los que primero deben ser tenidos en cuenta para un estudio más detallado de sus posibilidades en cuanto a poder incluirlos en una norma de durabilidad de cementos.

Con objeto de realizar un posible estudio comparativo en común de métodos por parte de varios laboratorios, se propone, en consecuencia, el de KOCH y STEINEGGER y el de MERRIMAN-GARCIA DE PAREDES, tanto por ser los que más se ajustan a los principios adoptados, cuanto porque uno, el primero, opera con mortero, mientras que el otro opera con pasta pura.

Se propone también utilizar en todo caso sulfato sódico como único medio agresivo (opativamente podrían emplearse también agua de mar y agua desionizada), y determinar, además de las variaciones de concentración de calcio en el medio agresivo a distintas edades a fijar y por lo menos hasta un año, los índices de agresividad en el caso del método de KOCH y STEINEGGER.

Se juzga imprescindible fijar al máximo las condiciones operatorias y unificar el modus operandi en todos los aspectos, con objeto de poder considerar lícitamente como comparables los resultados obtenidos por los distintos laboratorios y operadores que pudieran tomar parte en un tal estudio comparativo hecho en común.

C U A D R O 1

Calificaciones Métodos	5	4	3	2	1
LE CHATELIER - ANS-TETT	PAS	—PUZ esp.	PHA—	PUZ	—P
A.P.C.M.	PHA	—PAS	P —	PUZ esp.	—PUZ
A.S.T.M.	PUZ esp.	—PUZ	PHA—	PAS	—P
KOCH y STEINEGGER	PHA	—PUZ esp.	PUZ—	PAS	—P
MERRIMAN - G. de P.	PHA	—PUZ esp.	PUZ—	P	—PAS

C U A D R O 2

Calificaciones Cemento	5	4	3	2	1
PHA	3	0	2	0	0
PUZ esp.	1	3	0	1	0
PUZ	0	1	2	1	1
PAS	1	1	0	2	1
P	0	0	1	1	3

C U A D R O 4

Calificaciones Cementos	Arriba izquierda	Arriba derecha
PHA	2	0
PUZ esp.	1	1
PUZ	0	2
PAS	2	0
P	1	1

C U A D R O 3

Cementos	Izquierda / Derecha		Total
	Izquierda	Derecha	
PHA	5	0	5
PUZ esp.	4	1	5
PUZ	3	2	5
PAS	2	3	5
P	1	4	5

Calificaciones Cementos	Abajo izquierda	Abajo derecha
PHA	3	0
PUZ esp.	3	0
PUZ	3	0
PAS	0	3
P	0	3

C U A D R O 5

Año 1966		Laboratorio A			
Cementos	P-450 HSC	PAS-350 SRC	PUZ-350 POZ	PUZ-350 esp. POZ esp.	PHA-250 BL
Métodos					
LE CHATELIER-ANSTETT	2	5	3	4	1
A.P.C.M.					
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	1	4	2	5	—
$\text{MgSO}_4$	4	5	1	2	—
A.S.T.M.	—	—	—	—	—
KOCH y STEINEGGER	2	1	3	5	4
WITTEKINDT	1	2	5	4	3
MERRIMAN-G. DE PAREDES					
Agua desionizada					
$\text{Ca}^{2+}$	2	1	3	4	5
$\text{SO}_4^{2-}$	4	5	3	1	2
Sulfato sódico					
$\text{Ca}^{2+}$	2	1	3	4	5
$\text{SO}_4^{2-}$	1	3	2	5	4
Sulfato magnésico					
$\text{Ca}^{2+}$	2	1	4	3	5
$\text{SO}_4^{2-}$	2	3	5	4	1
Sulfato cálcico					
$\text{Ca}^{2+}$	2	1	3	5	4
$\text{SO}_4^{2-}$	4	2	3	1	5
Agua de mar					
$\text{Ca}^{2+}$	2	1	4	3	5
$\text{SO}_4^{2-}$	1	3	2	4	5
S	32	38	46	54	49
n	15	15	15	15	13
S/n	2,13	2,53	3,07	3,60	3,77
Calificación relativa	1	2	3	4	5

C U A D R O 6

Cementos Métodos	Año 1967						Año 1967					
	Laboratorio B			Laboratorio C			Laboratorio B			Laboratorio C		
	P-450 HSC	PAS-350 SRC	PUZ-350 POZ	PUZ-350 esp. POZ esp.	PHA-250 BL	P-450 HSC	PAS-350 SRC	PUZ-350 POZ	PUZ-350 esp. POZ esp.	PHA-250 BL		
LE CHATELIER - ANS- TETT	1	4	2	5	3	1	4	2	5	3		
A.P.C.M.												
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1	3	2	4	5	1	2	3	4	5		
MgSO <sub>4</sub>	2	4	1	3	5	2	3	1	5	4		
A.S.T.M.	2	5	3	4	1	3	1	4	2	2		
KOCH y STEINEGGER												
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
MgSO <sub>4</sub>	2	3	4	1	5	—	—	—	—	—		
WITTEKINDT												
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1	3	2	4	5	1	3	2	5	4		
MgSO <sub>4</sub>	2	4	1	3	5	—	—	—	—	—		
C.E.R.I.L.H.												
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2	3	1	4	5	2	3	1	4	5		
MgSO <sub>4</sub>	2	3	1	4	5	2	5	1	3	4		
S	16	34	20	36	44	13	27	14	34	32		
S/n	1,6	3,4	2,0	3,6	4,4	1,6	3,4	1,75	4,25	4,0		
Calificación relativa	1	3	2	4	5	1	3	2	4	5		



C U A D R O 7

Cementos Métodos	Año 1968					Laboratorio B					Laboratorio C				
	P-450 HSC	PAS-350 SRC	PUZ-350 POZ	PUZ-350 esp. POZ esp.	PHA-250 BL	P-450 HSC	PAS-350 SRC	PUZ-350 POZ	PUZ-350 esp. POZ esp.	PHA-250 BL	P-450 HSC	PAS-350 SRC	PUZ-350 POZ	PUZ-350 esp. POZ esp.	PHA-250 BL
LE CHATELIER - ANS- TETT	1	5	2	4	3	1	5	2	4	3	1	5	2	4	3
	2	4	1	3	5	3	4	1	3	5	3	4	1	2	5
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	5	4
KOCH y STEINEGGER	1	2	3	4	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1	2	3	4	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2	1	4	5	3	1	1	2	3	2	1	2	3	4	5
	2	3	4	1	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S	9	17	17	21	26	6	13	9	15	17	6	13	9	15	17
S/n	1,50	2,83	2,83	3,50	4,33	1,50	3,25	2,25	3,75	4,25	1,50	3,25	2,25	3,75	4,25
Calificación relativa	1	2-3	3-2	4	5	1	3	2	4	5	1	3	2	4	5

(Continuación)

## C U A D R O 7

Cementos Métodos	Año 1968				Año 1968				Laboratorio B						
	P-450 HSC	PAS-350 SRC	PUZ-350 POZ	PUZ-350 esp. POZ esp.	PHA-250 BL	P-450 HSC	PAS-350 SRC	PUZ-350 POZ	PUZ-350 esp. POZ esp.	PHA-250 BL	P-450 HSC	PAS-350 SRC	PUZ-350 POZ	PUZ-350 esp. POZ esp.	PHA-250 BL
LE CHATELIER - ANS- TEIT	1	5	3	4	2	1	5	2	4	3	1	5	2	4	3
A.P.C.M.	4	5	1	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A.S.T.M.	2	1	4	5	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
KOCH y STEINEGGER															
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 56 d Segovia	1	2	3	5	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 90 d Segovia	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 56 d DIN	1	2	3	4	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 90 d DIN	1	2	3	4	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
MERRIMAN I.E.T.c.c.	2	1	3	4	5	4	3	1	2	5	4	2	3	1	5
"	2	1	5	3	4	4	1	2	4	5	4	2	3	1	5
"	2	1	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
"	2	1	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
"	4	3	1	5	3	2	4	3	1	5	2	4	3	1	5
"	2	1	5	4	3	4	1	2	3	5	4	2	3	1	5
"	1	3	5	2	4	2	3	1	4	5	2	3	1	4	5
"	2	1	4	3	5	2	3	1	4	5	2	3	1	4	5
"	2	1	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
"	2	1	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
"	1	2	3	4	5	3	1	2	4	5	3	1	2	4	5
"	1	3	2	4	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
"	1	2	3	4	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S	40	41	73	81	93	30	32	40	51	72	30	32	40	51	72
S/n	1,82	1,86	3,32	3,68	1,43	2,00	2,13	2,67	3,40	4,80	2,00	2,13	2,67	3,40	4,80
Calificación relativa	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

NOTA: El Cuadro 8, en la pág. 76.

C U A D R O 9

Métodos (diversos autores)	Fecha	S de calificac. n calificaciones	P-450 HSC	PAS-350 SRC	PUZ-350 POZ	PUZ-350 esp. POZ esp.	PHA-250 BL
LE CHATELIER-ANSTETT	1966	1	2	5	3	4	1
"	1967	2	2	8	4	10	6
"	1968	4	4	20	9	16	11
S		7	8	33	16	30	18
S/n		—	1,14	4,71	2,29	4,29	2,57
Calificación relativa		—	1	5	2	4	3
A.P.C.M.	1966	2 (0)*	5	9	3	7	—*
"	1967	4	6	12	7	16	19
"	1968	3 (2)**	9	13	3	8	10**
S		9 (6)***	20	34	13	31	29
S/n		—	2,20	3,78	1,44	3,44	4,83
Calificación relativa		—	2	4	1	3	5
KOCH y STEINEGGER	1966	1	2	1	3	5	4
"	1967	3	4	7	10	9	15
"	1968	12	14	24	38	48	56
S		16	20	32	51	62	75
S/n		—	1,25	2,00	3,19	3,87	4,69
Calificación relativa		—	1	2	3	4	5
A.S.T.M.	1967	2	5	10	4	8	3
"	1968	1	2	1	4	5	3
S		3	7	11	8	13	6
S/n		—	2,33	3,67	2,67	4,33	2,00
Calificación relativa		—	2	4	3	5	1

(Continuación)

C U A D R O 9

Métodos (diversos autores)	Fecha	S de calificac. n calificaciones	P-450 HSC	PAS-350 SRC	PUZ-350 POZ	PUZ-350 esp. POZ esp.	PHA-250 BL
WITTEKINDT	1966	1	1	2	5	4	3
"	1967	3	4	10	5	12	14
S		4	5	12	10	16	17
S/n		—	1,25	3,00	2,50	4,00	4,25
Calificación relativa		—	1	3	2	4	5
MERRIMAN I.E.T.c.c.	1966	10	22	21	32	34	41
"	1968	27	56	45	85	91	128
S		37	78	66	117	125	169
S/n		—	2,11	1,78	3,16	3,38	4,57
Calificación relativa		—	2	1	3	4	5
C.E.R.I.L.H.	1967	4	8	14	4	15	19
S		4	8	14	4	15	19
S/n		—	2,00	3,50	1,00	3,75	4,75
Calificación relativa		—	2	3	1	4	5
SS		—	146	202	219	292	333
S/n		80 (77)*	—	—	—	—	—
SS/Sn		—	1,82	2,52	2,74	3,65	4,27
Calificación relativa		—	1	2	3	4	5

C U A D R O 10

Laboratorio (diversos métodos)	Fecha	S de calificac.	P-450 HSC	PAS-350 SRC	PUZ-350 POZ	PUZ-350 esp. POZ esp.	PHA-250 BL
A	1966	15 (13)*	32	38	46	54	49*
	1968	22	40	41	73	81	93
	S S/n Calific.	37 (35)**	72 1,95 1	79 2,14 2	119 3,22 3	135 3,65 4	142** 4,06 5
B	1967	10	16	34	20	36	44
	1968	6	9	17	17	21	26
	S S/n Calific.	16	25 1,56 1	51 3,19 3	37 2,31 2	57 3,56 4	70 4,37 5
C	1967	8	13	27	14	34	32
	1968	4	6	13	9	15	17
	S S/n Calific.	12	19 1,58 1	40 3,33 3	23 1,92 2	49 4,08 4	49 408 5
D	1968	15	30	32	40	51	72
	S/n Calific.	—	2,00 1	2,13 2	2,67 3	3,40 4	4,80 5
	SS Sn	—	146	202	219	292	333***
Calificación relativa	SS/Sn	80 (78)**	—	—	—	—	—
	SS/Sn	—	1,82	2,52	2,74	3,65	4,27
	SS/Sn	—	1	2	3	4	5

C U A D R O 11

Métodos	Laboratorio	Fecha	S n	P-450 HSC	PAS-350 SRC	PUZ-350 POZ	PUZ-350 esp. POZ esp.	PHA-250 BL
LE CHATELIER-ANSTETT	A	1966	1	2	5	3	4	1
"	B	1967	1	1	4	2	5	3
"	C	1967	1	1	4	2	5	3
"	B	1968	1	1	5	2	4	3
"	C	1968	1	1	5	2	4	3
"	D	1968	1	1	5	2	4	3
"	A	1968	1	1	5	3	4	2
S			7	8	33	16	30	18
S/n			--	1,14	4,71	2,29	4,29	2,57
Calificación relativa			--	1	5	2	4	3
A.P.C.M.								
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	A	1966	1	1	4	2	5	--
MgSO <sub>4</sub>	B	1967	1	4	5	1	2	--
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			1	1	3	2	4	5
MgSO <sub>4</sub>	C	1967	1	2	4	1	3	5
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			1	1	2	3	4(5)	5(4)
MgSO <sub>4</sub>	B	1968	1	2	3	1	5	4
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			1	2	4	1	3	5
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	C	1968	1	3	4	1	2	5
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	A	1968	1	4	5	1	3	--
S			6(4)* 3 (2)**	12	22	10	21(22)	20(19)* 9**
S/n			--	2,00	3,67	1,67	3,5(3,67)	5,00(4,75) 4,50
Calificación relativa			--	2	4	1	3	5

(Continuación)

C U A D R O 11

Métodos	Laboratorio	Fecha	n	S	P-450 HSC	PAS-350 SRC	PUZ-350 POZ	PUZ-350 esp. POZ esp.	PHA-250 BL
A.S.T.M.	B	1967	1		2	5	3	4	1
"	C	1967	1		3	5	1	4	2
"	A	1968	1		2	1	4	5	3
S			3		7	11	8	13	6
S/n			—		2,33	3,67	2,67	4,33	2,00
Calificación relativa			—		2	4	3	5	1
KOCH y STEINEGGER									
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	A	1966	1		2	1	3	5	4
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	B	1967	1		1	2	3	4	5
MgSO <sub>4</sub>				1	2	3	4	1	5
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	C	1967	1		1	2	3	4(5)	5(4)
56 d. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	B	1968	1		1	2	3	4	5
90 d. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>				1	1	2	3	4	5
56 d. MgSO <sub>4</sub>				1	2	1	4	5	3
90 d. MgSO <sub>4</sub>				1	2	3	4	1	5
56 d. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	C	1968	1		1	2	3	5	4
90 d. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>				1	1	2	3	4	5
56 d. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	D	1968	1		1	2	3	4	5
90 d. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	A	1968	1		1	2	3	4	5
Seg. 56 d. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>				1	1	2	3	4	5
Seg. 90 d. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>				1	1	2	3	4	5
DIN 56 d. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>				1	1	2	3	4	5
DIN 90 d. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>				1	1	2	3	4	5
S			13	3	14	25	39	55(56)	62(61)
S/n			—	—	1,08	1,92	3,00	4,23(4,31)	4,78(4,69)
Calificación relativa			—	—	1	2	3	4	5

(Continuación)

CUADRO II

Métodos	Laboratorio	Fecha	n	S	P-450 HSC	PAS-350 SRC	PUZ-350 POZ	PUZ-350 esp. POZ esp.	PHA-250 BL
WITTEKINDT									
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	A	1966	1	1	1	2	5	4	3
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	B	1967	1	1	1	3	2	4	5
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	C	1967	1	1	2	4	1	3	5
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			1	1	1	3	2	5	4
S			3	1	3	8	9	13	12
S/n			—	—	1,00	2,25	3,00	4,08	4,00
Calificación relativa			—	—	1	2	3	5	4
MERRIMAN I.E.T.c.c.	A	1966							
Agua desionizada									
Ca <sup>2+</sup>			1	1	2	1	3	4	5
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>					4	5	3	1	2
Sulfato de sodio									
Ca <sup>2+</sup>			1	1	2	1	3	4	5
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>					1	3	2	5	4
Sulfato de magnesio									
Ca <sup>2+</sup>			1	1	2	1	4	3	5
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>					2	3	5	4	1
Sulfato de calcio									
Ca <sup>2+</sup>			1	1	2	1	3	5	4
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>					4	2	3	1	5
Agua de mar									
Ca <sup>2+</sup>			1	1	2	1	4	3	5
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>					1	3	2	4	5
	D	1968	12	12	27	23	32	39	59
	A	1968	15	15	29	22	53	52	69



C U A D R O 11

(Final)

Métodos	Laboratorio	Fecha	n	P-450 HSC	PAS-350 SRC	PUZ-350 POZ	FUZ-350 esp. POZ esp.	PHA-250 BL
SS			—	66	50	102	110	152 145
Sn			32	—	—	—	—	—
SS/Sn			—	2,06	1,56	3,19	3,43	4,75 4,53
Calificación relativa			—	2	1	3	4	5 5
C.E.R.I.L.H.	B	1967	1	2	3	1	4	5
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			1	2	3	1	4	5
MgSO <sub>4</sub>	C	1967	1	2	3	1	4(5)	5(4)
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			1	2	5	1	3	4
MgSO <sub>4</sub>			2	4	6	2	8(9)	10(9)
S			—	2,00	3,00	1,00	4,00(4,50)	5,00(4,5)
S/n			—	2	3	1	4	5
Calificación relativa			—	2	4	1	3	5
SS			—	114	155	186	250(253)	280(277)
Sn			66(64)	103	141	142	176	205
SS/Sn			—	1,73	2,35	2,82	3,79(3,83)	4,37(4,33)
Calificación relativa			—	1	2	3	4	5

C U A D R O 12

Valores		Clinker P		Clinker PAS	
Módulo hidráulico	MH	2,79		2,20	
Módulo silíceo	MS	2,74		2,88	
Módulo de fundentes	MF	2,14		0,96	
Grado de saturación	GS	90,8 (K)*	94,4 (LP)**	92,5 (K)*	95,1 (LP)**
Silicato tricálcico	C <sub>3</sub> S	57,4	77,8	66,1	81,3
Silicato bicálcico	C <sub>2</sub> S	20,4		81,3	
Aluminato tricálcico	C <sub>3</sub> A	10,3	18,1	3,4	15,5
Ferrito-aluminato tetracálcico	C <sub>4</sub> AF	7,8		12,1	
Relación C <sub>3</sub> S/C <sub>2</sub> S		2,81		4,35	
Relación C <sub>3</sub> A/C <sub>4</sub> AF		1,32		0,28	
Cal libre	CaO	0,20		0,30	

\*K según Kühl;  
\*\*LP: según Lea y Parker.

C U A D R O 8

	Cementos					Número de resultados
	PHA	PUZ esp.	PUZ	PAS	P	
Calificación	5	4	3	2	1	4
	5	4	2	3	1	3
	4	5	2	3	1	1

## REFERENCIAS

- (1) CALLEJA, J., TRIVIÑO, F. y BACLE, B.: Heterogeneidades de la composición química en el hormigón" Monografía núm. 258 del I.E.T.c.c., Madrid 1967. *Revista de Ciencia Aplicada*, Vol. 20, núm. 110, Fasc. 3, págs. 231-242, mayo-junio 1966. *Materiales de Construcción* (Ultimos Avances) I.E.T.c.c., núm. 127, julio-agosto-septiembre 1967.
- (2) Instrucción para el Proyecto y Ejecución de Obras de Hormigón en Masa o Armado. Ministerio de Obras Públicas (España), 1968.
- (3) A.S.T.M. C. 8863: "Soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate". UNE 7 136 (Norma Española): "Estabilidad de áridos frente a disoluciones de sulfato sódico o sulfato magnésico".
- (4) A.S.T.M. C. 289-66: "Test for potential reactivity of aggregate (chemical method)". UNE 7 137 (Norma Española) "Ensayo químico para determinar la reactividad de los áridos, utilizados en la fabricación de hormigones, con los álcalis del cemento".
- (5) A.S.T.M. C. 227-67: "Test for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (mortar-bar method)".
- (6) MERRIMAN, T.: *Proceedings A.S.T.M.* 45, 165 y 194 (1945).
- (7) GARCÍA DE PAREDES, P.: "Inalterabilidad de los conglomerantes frente al ataque de los sulfatos. Comparación de métodos para apreciarla". *Cuadernos de Investigación I.E.T.c.c.*, números 12 y 13, diciembre 1967.
- (8) BLONDIAU, L.: *Rev. Mat. Const.* núm. 524, 189-200 (1961).
- (9) A.S.T.M. C. 452-64: "Test for potential expansion of portland cement mortars exposed to sulfate".
- (10) KOCH, A. y STEINEGGER, H.: *Zement-Kalk-Gips*, 7, 317 (1960).
- (11) WITEKINDT, W.: *Zement-Kalk-Gips*, 13, 565 (1960).
- (12) BURKE, E.: Comunicación privada, 1966.
- (13) CEMBUREAU: Grupo de Estudio sobre Ensayos de Cementos y Hormigones; Subcomité para el Estudio de la Resistencia Química de los Cementos, Presidente J. M. BALAGUER.
- (14) GARCÍA DE PAREDES, P.: "Durabilidad del Hormigón: Interpretaciones actuales de sus causas fisicoquímicas". Monografía núm. 232 del I.E.T.c.c., Madrid 1963.
- (15) GARCÍA DE PAREDES, P.: "Influencia que el tipo de conglomerante ejerce en la durabilidad de los hormigones frente a los sulfatos". I Coloquio Internacional sobre las Obras Públicas en Terrenos Yesíferos, Tomo III, páginas 73-125, Madrid 1965.
- (16) FERNÁNDEZ-PEÑA, O.: "Ensayos de durabilidad de los conglomerantes frente al ataque por sulfatos". *Cuadernos de Investigación I.E.T.c.c.*, núm. 6, marzo 1967.
- (17) RÍO, A.: Comunicaciones privadas, 1966 y 1967.
- (18) BURKE, E.: Comunicaciones privadas, 1966 y 1968.
- (19) LOCHER, F. W.: Comunicaciones privadas, 1967 y 1968.
- (20) P.C.C.H. 64: Pliego de Condiciones para la Recepción de Conglomerantes Hidráulicos, I.E.T.c.c., Madrid 1964.
- (21) JOISEL, A.: Comunicación privada a J. M. BALAGUER (cita 13), junio 1966.