

689 - 28

# **protección del hormigón en las aguas agresivas. principios y procedimientos**

**J. Bonzel**

(«Revue des Matériaux», n.º 580, enero 1964, pág. 24)

Comunicación presentada al IV Congreso internacional de Hormigón Manufacturado. París, 1963

## **1. generalidades**

Normalmente se le exige a una construcción de hormigón que realice la misión a que se le ha destinado durante un cierto tiempo. En general, este período de tiempo se estima en unos 50 años para las construcciones técnicas, si bien es verdad que la longevidad de las construcciones de hormigón, realizadas según las reglas del arte, sobrepasa con mucho este plazo. Las construcciones y elementos de construcción en hormigón, en este caso, deben oponer una suficiente resistencia a las sustancias químicas agresivas cuya acción les afecta de forma constante o intermitente.

La corrosión química no suele presentarse en la práctica más que en presencia de humedad. Por regla general, se trata en este caso de aguas que llevan una sustancia agresiva, como por ejemplo, agua de mar, aguas subterráneas, aguas superficiales, aguas pantanosas y aguas residuales. Las materias sólidas o gaseosas no atacan, en general, al hormigón seco de forma notable. La presencia de la humedad que ya se encuentra a menudo en el hormigón o en el aire puede, sin embargo, activar los gases y disolver las materias sólidas. Independientemente de los líquidos agresivos, se pueden presentar, pues, suelos susceptibles de ser objeto de una humectación intermitente. El aire fuertemente cargado de emanaciones marinas o determinados gases procedentes de procesos industriales pueden hacer que sea necesario adoptar precauciones especiales.

## **2. las materias que atacan el hormigón y sus efectos**

Las materias que atacan el hormigón son, en general, las aguas que contienen ácidos, sulfatos, ciertas sales de magnesio o de amonio o que son particularmente dulces, así como ciertas soluciones orgánicas. *Las aguas ácidas y los ácidos minerales*, como el ácido sulfúrico, el clorhídrico y el nítrico tienen la propiedad de disolver el cemento fraguado y los áridos a base de carbonatos. Su capacidad corrosiva se expresa como *pH* (concentración de iones hidrógeno), inferior a 7 para los ácidos. La capacidad disolvente de los ácidos aumenta inversamente a dicho *pH*. *El sulfuro de hidrógeno* es

un ácido relativamente débil, que puede, sin embargo, en forma de gas, penetrar profundamente en el hormigón, y en contacto con el aire generar ácido sulfúrico y gases sulfurados que atacan al hormigón. Lo mismo que ciertos *sulfuros insolubles en el agua* (por ejemplo, la pirita de hierro, la pirita blanca) en contacto con el aire y la humedad pueden oxidarse para formar sulfatos y ácido sulfúrico. *El carbonato cálcico* es el resultado del ácido carbónico en suspensión en el agua, que tiene la propiedad de disolver el cemento. *Los ácidos orgánicos libres*, como por ejemplo el ácido húmico, los ácidos de las frutas, el ácido acético, el láctico y el butírico, no son, en general, tan fuertes como los ácidos inorgánicos. Forman con la cal libre del cemento fraguado sales que, en ciertos casos, son difícilmente solubles y pueden oponerse a otros ataques.

*Los sulfatos* se transforman en presencia de contenidos variables de cal y arcilla del cemento en sulfoaluminato cálcico o en yeso. El sulfoaluminato cálcico, rico en agua, también llamado “Ettringita” o “Bacilo del cemento”, al consolidarse aumenta considerablemente de volumen, dando lugar a expansiones en el hormigón. *Las sales de magnesio y de amonio* tienen la propiedad de disolver la cal del cemento fraguado y pueden provocar como los sulfatos efectos de expansión. La corrosión por el magnesio da lugar a la formación de hidróxido de magnesio, en forma blanda y gelatinosa. La acción corrosiva de la sal de amonio es más importante debido al amoníaco que se desprende por esta reacción.

*Las aguas muy dulces* tienen la propiedad de disolver la cal del cemento fraguado. Sin embargo, su acción corrosiva es muy débil. *Los aceites y las grasas vegetales y animales* atacan el hormigón, pues los ácidos grasos que contienen forman, con el hidróxido cálcico del cemento endurecido, sales de calcio (jabón de cal). *Los aceites y las grasas minerales* no atacan al cemento cuando no contienen ácidos. Sin embargo, los aceites ligeros y líquidos pueden penetrar en el hormigón seco y por su sola presencia (efecto lubricante) pueden reducir las resistencias del hormigón.

Las sustancias que atacan el hormigón se presentan en las aguas y sales más diversas. *El agua de mar* contiene esencialmente como sustancias que atacan al hormigón, los sulfatos y el magnesio. *Las aguas de montaña y de manantiales* por regla general son muy dulces y contienen frecuentemente ácido carbónico que disuelve la cal. En *las aguas pantanosas*, se encuentra en general, además del ácido húmico, ácido carbónico que disuelve la cal, ácidos minerales libres y sulfatos. En otras aguas como las *subterráneas*, se encuentra principalmente ácido carbónico que disuelve la cal, sulfatos y sales de magnesio. *Las aguas de río* pueden ser puras, pero pueden también contener casi todas las sustancias que atacan al hormigón mencionadas anteriormente. El contenido de las *aguas residuales* es esencialmente función del tipo de industria. Independientemente de las sustancias que atacan el hormigón, las aguas mencionadas precedentemente pueden contener ácido fénico, sales de amonio y ácidos orgánicos libres. *Los suelos y terraplenes* son también susceptibles de contener ácidos, sulfatos, sales de magnesio y amonio, sulfuros y soluciones orgánicas, que pueden hacerse corrosivos al entrar en contacto con la humedad del aire. El aire ambiente puede, en las proximidades de las costas, encontrarse fuertemente cargado de agua salina, y en las regiones industriales puede contener fuertes proporciones de gases residuales nocivos, lo que impone también la adopción de ciertas precauciones.

### **3. determinación del grado de actividad corrosiva**

Con el fin de determinar el grado de actividad corrosiva, basta, generalmente, tomar y controlar muestras de agua. No es necesario proceder a análisis del suelo nada más que cuando se sospecha la presencia de sustancias que atacan al hormigón, o cuando la toma de muestras de agua no es posible; sin embargo, cabe esperar una humectación intermitente del suelo.

### 3. 1. aguas agresivas

Las aguas sospechosas se reconocen frecuentemente por signos exteriores, como por ejemplo: color oscuro, formación de sales, olores nauseabundos y desprendimiento de burbujas de gas. La presencia de ácidos se revela por la coloración en rojo del papel de tornasol azul. El grado de actividad corrosiva de las aguas que tienen una composición esencialmente natural se determina generalmente en porcentaje y en contenido de:

- Acido carbónico ( $CO_2$ ) que disuelve la cal, según Heyer,
- Amonio ( $NH_4^+$ ),
- Magnesio ( $Mg^{++}$ ),
- Sulfato ( $SO_4^{=}$ ),

ya que el sulfuro de hidrógeno y las soluciones orgánicas corrosivas no se presentan generalmente o sólo en cantidades insignificantes. Sin embargo, es necesario proceder a un análisis por un especialista, si se observan diversas anomalías tales como: un olor muy acusado del agua, la presencia de ácidos en las aguas normalmente alcalinas, el olor a podredumbre que señala la presencia de sulfuros, un consumo de permanganato potásico que sobrepase los 50 mg/l. Esto se aplica más a las aguas residuales industriales que a las residuales domésticas, en las cuales, la proporción de sustancias orgánicas oxidables no ataca generalmente al hormigón de una forma significativa.

**TABLA 1**

**Valores límites y determinación del grado de agresividad de las aguas de una composición esencialmente natural**

	Grado de agresividad		
	Débil	Fuerte	Muy fuerte
1 pH	6,5 a 5,5	5,5 a 4,5	Inf. a 4,5
2 Acido carbónico que disuelve la cal ( $CO_2$ ) según Heyer en mg/l	15 a 30	30 a 60	Más de 60
3 Amonio ( $NH_4^+$ ), mg/l	15 a 30	30 a 60	Más de 60
4 Magnesio ( $Mg^{2+}$ ), mg/l	100 a 300	300 a 1.500	Más de 1.500
5 Sulfato ( $SO_4^{2-}$ ), mg/l	200 a 600	600 a 2.500	Más de 2.500

La Norma DIN 4030 actualmente en vigor—el hormigón en las aguas y en los suelos que atacan el hormigón—establece una diferencia entre las aguas ligeras y fuertemente agresivas. Las aguas que tienen un *pH* entre 6 y 5 y un contenido en sustancias agresivas (sales) entre 300 y 1.000 mg/l son consideradas como débilmente agresivas. El agua, en consecuencia, es fuertemente agresiva cuando el *pH* es inferior a 5 y el contenido en sustancias agresivas superior a 1.000 mg/l. Según los conceptos más recientes, parece más justificado tener en cuenta, en lugar de las sales, los iones que atacan el hormigón, y establecer una diferencia entre las aguas con débil, fuerte y muy fuerte agresividad. Para esta diferenciación se parte del principio de que el agua con débil y fuerte grado de agresividad no tiene prácticamente efecto perjudicial sobre el hormigón compacto y cuya composición responde a un hormigón de buena calidad. La tabla 1 da los valores límites que pueden atribuirse al agua estancada,

poco corriente, en importante cantidad y directamente agresiva. Se trata, pues, del agua que se puede renovar constantemente (los valores límites indicados en las tablas 1 y 2 y las modalidades de aplicación corresponden al estado actual de los estudios de un grupo de trabajo de la Unión de Fabricantes de Cementos Alemanes).

**TABLA 2**  
**Valores límites para la determinación de la capacidad**  
**agresiva de los suelos**

	Capacidad agresiva	
	Débil	Fuerte
1 Grado de acidez según Baumann-Gully	Más de 20	—
2 Sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) en mg/l	2.000 a 5.000	Más de 5.000

Para determinar el grado de agresividad del agua, se tendrá en cuenta respectivamente el valor más elevado tomado de la tabla 1, incluso si este grado no es alcanzado más que para uno de los valores designados en los puntos del 1 al 5. Cuando dos o varios valores se sitúan en el cuarto superior de una categoría (para el *pH*, en el cuarto inferior), el grado de agresividad aumenta en un escalón. Este aumento, sin embargo, no se aplica al agua de mar, a las aguas de una composición análoga ricas en cloruro, y a las aguas alcalinas, dado que el hormigón compacto viene resistiendo, desde hace muchos años, al agua de mar, no obstante su elevado contenido en magnesio y en  $SO_4^{2-}$  (véase norma 4030, apartado 4,1).

El grado de agresividad del agua puede venir aumentado por la fuerza de la corriente, porque la temperatura sea elevada y por presiones altas. *La temperatura elevada*, generalmente, acelera las reacciones químicas y refuerza la agresividad química. *Una corriente rápida* acentúa esencialmente el efecto de erosión y acentúa, también, la descomposición de los materiales, que penetran más profundamente para *las aguas bajo presión*. Para los elementos de construcción con estructura delgada, como por ejemplo, las canalizaciones con paredes delgadas, en general es necesario, a pesar de la alta calidad del hormigón, proceder a un examen más severo del agua. El grado de agresividad del agua subterránea no depende únicamente de las características del agua agresiva, sino también de la *permeabilidad del suelo*. Sucede frecuentemente que el caso determinado según la tabla 1 no tiene en cuenta la renovación constante del agua. En general el agua subterránea se filtra lentamente, pero la baja permeabilidad del suelo forma un obstáculo al contacto con el hormigón. Mientras que esta particularidad no ha sido hasta ahora tenida en cuenta para la norma DIN 4030, la norma rusa H 114-54 da valores límites que dependen de las dimensiones de la construcción y para las tres categorías de suelos siguientes:

- a) aguas libres y suelos con un coeficiente de permeabilidad  $k =$  superior a  $10^{-2}$  cm/seg (grava, arena);
- b) suelos con  $k =$  entre  $10^{-2}$  y  $10^{-4}$  cm/seg (arena fina, limo, arenas arcillosas, suelos de loess);
- c) suelos con  $k =$  menos de  $10^{-4}$  cm/seg (arcilla magra y grasa hasta un  $k = 10^{-9}$  cm/seg).

El grado de agresividad del agua subterránea disminuye, pues, en función del aumento de permeabilidad del suelo. Para los suelos permeables es preciso, por tanto, contar un escalón de menos de la tabla 1, y para los suelos de arcilla pura, materiales esencialmente impermeables, la agresividad es casi nula.

### **3. 2. suelos agresivos**

Los suelos agresivos se caracterizan frecuentemente por su color. Los suelos cuyo color va del negro al gris son especialmente sospechosos. Las capas de gris claro a blanco debajo de tierra vegetal de color marrón oscuro a negro indican la presencia de ácidos. Es preciso adoptar ciertas precauciones cuando las capas del suelo pueden contener, según el mapa, yeso, anhídrita u otros sulfatos. La capacidad agresiva de un suelo sometido a una humidificación frecuente puede determinarse, sobre poco más o menos, según los valores límites de la tabla 2 (ver 1.2). Esta se debe aumentar, también, cuando los dos valores se sitúan en el cuarto superior de una categoría, y se han de disminuir en función del aumento de la permeabilidad del suelo. Para los terraplenes y en presencia de sustancias sulfurosas, puede ser necesario proceder a otra estimación.

## **4. hormigón de altas resistencias**

### **4. 1. generalidades**

En general, se pueden repartir los ataques químicos al hormigón en dos categorías esenciales:

- a) efectos de disolución de la cal, que provoca la disolución del cemento endurecido y una degradación que empieza en la superficie del hormigón y
- b) efectos expansivos, provocados principalmente por la formación de "Ettringita" que puede determinar la destrucción completa de la estructura interna del hormigón.

La mayor parte de los ataques que se presentan en la práctica pueden ser soportados por los hormigones de altas resistencias, incluso sin que se adopten medidas especiales de protección. El hormigón debe estar constituido de tal forma que sea atacado lo menos posible y que las sustancias agresivas no puedan casi penetrar en él. Independientemente de la elección de los materiales, la resistencia crece contra los ataques químicos, mediante una adecuada composición del hormigón, de su forma de fabricarse y de su acabado que permita ser designado como compacto y de buena calidad.

### **4. 2. pasta fraguada compacta**

El hormigón se compone esencialmente de cemento fraguado y de áridos. Se llama "piedra de cemento" a las lechadas de cemento endurecido y se entiende por "lechadas de cemento" a las mezclas de cemento y agua. La calidad de la piedra de cemento depende esencialmente, para un acabado adecuado, de la cantidad de agua de amasado. Es preciso, en este caso, tener en cuenta no el valor absoluto del agua de amasado, sino la cantidad de agua de amasado en relación con la cantidad de cemento; el coeficiente agua/cemento se designará de ahora en adelante por a/c.

El cemento portland necesita para su hidratación completa alrededor de un 40 % de agua (a/c = 0,40). Un poco más de la mitad de este agua (o sea a/c = 0,25) se combina poco a poco quí-

micamente evitando que se produzca un secado prematuro. El resto se encuentra disponible para su evaporación en los poros del cemento endurecido. Un hormigón con un coeficiente  $a/c = 0,40$  y un contenido corriente de cemento (por ejemplo de 300 kilogramos) es, sin embargo, muy consistente y no se deja compactar del todo en obra. Es, pues, necesario, por regla general, aumentar la dosificación de agua. Dado que la cantidad de cemento no puede, la mayoría de las veces, aumentarse en las mismas proporciones, por razones económicas, resulta de esto un aumento del coeficiente  $a/c$ . En la producción de elementos prefabricados de hormigón, las condiciones son muy diferentes a las de obra en la mayoría de los casos. El exceso de agua, que se añade únicamente con vista a facilitar el tratamiento del hormigón, seca ulteriormente produciendo en el cemento endurecido poros capilares, que hasta un coeficiente  $a/c$  de alrededor de 0,60 no se corresponden sino con un largo período de endurecimiento. Para coeficientes superiores a 0,65 y hasta 0,70 los poros capilares están unidos entre sí, incluso después de un largo período de endurecimiento. La permeabilidad del cemento endurecido aumenta rápidamente (3-4). Para la producción de "piedras compactas de cemento" hay que tener en cuenta los principios de fabricación siguientes:

- a) el coeficiente  $a/c$  debe ser tan pequeño como sea posible;
- b) el cemento endurecido debe mantenerse húmedo en tanto la hidratación no se encuentre lo suficientemente avanzada.

#### **4. 3. hormigón compacto**

Un hormigón compacto exige una lechada de cemento endurecido compacta (5). Esta es la razón por la que el coeficiente  $a/c$  debe ser lo más reducido posible y que el hormigón se mantenga húmedo el mayor tiempo posible. Sin embargo, los otros componentes del hormigón tienen una influencia sobre las posibilidades de compactación. Con el fin de reducir todo lo más posible la proporción de agua destinada únicamente a facilitar la preparación, y no aumentar excesivamente el contenido de cemento, la mezcla de áridos no debe ser excesivamente rica en arena, sino que debe estar constituida de tal forma que exija poco agua (una composición granulométrica particularmente favorable en la región de la figura 2 de la Norma DIN 1045 o granulometría discontinua).

Para conseguir cualidades suficientes en la preparación y evitar la segregación, el hormigón compacto exige ante todo una determinada proporción de elementos finos (cemento + productos finos hasta 0,2 mm). El contenido en granulometría de ultrafinos para un tamaño máximo de árido grueso de 30 mm no debe, pues, alcanzar el máximo de 350 kg y para un tamaño máximo de árido de 15 mm un mínimo de 425 kg por metro cúbico de hormigón fabricado (6) sin que por el contrario se aumente exageradamente, lo que tendría por resultado influir desfavorablemente la resistencia al hielo y eventualmente la capacidad de resistencia química del hormigón. A. Steopoe (7) ha llamado la atención en diferentes ocasiones sobre el aumento de fisuras microscópicas en el hormigón como resultado del aumento en las proporciones de los áridos en polvos de piedra inertes e hidrófilos. J. Kavcic (8) ha estudiado la influencia de diversos aditivos de productos finos sobre la capacidad de compactación y de resistencia química de los morteros de cemento con un contenido de cemento de alrededor de 240 a 300 kg/m<sup>3</sup> y un coeficiente  $a/c$  de 0,72 a 1,0 (consistencia de 10 a 13 cm según la norma DIN 1164). Si estos ensayos necesitan todavía controlarse, y si los resultados obtenidos con mortero de cemento pobre no se aplican necesariamente al hormigón de calidad, se puede admitir, sin embargo, que el aumento de la adición de productos finos inertes por encima de las proporciones mínimas (dimensiones y reparto de los poros) aumenta la hermeticidad contra el agua a presión; sin embargo, este aumento es lógico que influya desfavorablemente sobre la absorción capilar de agua y sobre la capacidad de resistencia química. De acuerdo con estas consideraciones, la estanquidad y la ca-

pacidad de resistencia química del hormigón con una compactación efectiva y un acabado satisfactorio quedan esencialmente determinadas por el coeficiente  $a/c$ , que debe mantenerse lo más reducido que sea posible.

El hormigón debe siempre compactarse a fondo y por regla general en obra sometiéndolo al vibrador hasta una perfecta distribución, cuando ya no se producen grandes burbujas de aire en la superficie. Para la producción de elementos prefabricados en las fábricas especializadas existen otros procedimientos mecánicos de compactación. El hormigón debe protegerse contra el secado prematuro durante por lo menos 7 días, y todavía mejor 14 días.

#### **4. 4. elección de los materiales**

Por regla general, deben utilizarse áridos resistentes a las sustancias agresivas. Los áridos a base de carbonatos pueden ser adecuados cuando cabe esperar neutralizar las sustancias agresivas, como por ejemplo las aguas cargadas de ácidos que no se renuevan o se renuevan poco sobre la superficie del hormigón (9-10).

Respecto a la acción de los ácidos, diferencias poco sensibles en el comportamiento del cemento, para los cuales los ensayos realizados son todavía insuficientes, tienen menos importancia en comparación con la influencia sobre la estanquidad del hormigón, dado que la lechada de cemento endurecido sólo se presenta en capas muy delgadas y compactas. Contra la acción de los sulfatos, la capacidad de resistencia del hormigón se incrementa mediante el empleo de cementos especiales resistentes a los sulfatos. Estos son:

- a) cementos portland con poco o nada de  $C_3A$ ;
- b) los cementos de alto horno que contienen una elevada proporción de escorias (metalúrgico mixto, etc...);
- c) los cementos de alto horno (siderúrgico-clínker con clínker libre de  $C_3A$ ) y escoria granulada de alto horno en determinadas proporciones (metalúrgico especial).

### **5. medidas contra las aguas agresivas**

#### **5. 1. medidas referentes a la construcción**

Los elementos de construcción deben estar constituidos de forma que no presenten a la sustancia agresiva más que una superficie lo más reducida posible. Es preciso esforzarse en adoptar formas en las cuales se eviten entrantes y salientes haciéndose redondeados. Se deben utilizar en todo lo posible encofrados estancos, bien unidos y ajustados, a fin de obtener superficies unidas bien cerradas y regulares. Las juntas y, para las construcciones monolíticas, las uniones deben ejecutarse cuidadosamente. Cuando se presentan esfuerzos de tracción, como consecuencia de acciones exteriores, puede ser necesario realizar medidas según el apartado 1 o con tensión reducida del acero. Las armaduras de acero y otras armaduras deben protegerse contra la corrosión. Es, pues, necesario dotarlas de un recubrimiento de hormigón más fuerte que el normal (de al menos 4 cm para un grado de agresividad débil, y de 5 cm como mínimo para una fuerte agresividad).

## **5. 2. medidas a adoptar para una agresividad débil**

Un hormigón con resistencia acrecentada contra las aguas débilmente agresivas (ver tabla 1) debe ser, en general, bastante estanco para absorber la menor cantidad de agua posible, y para que el agua no penetre más de 5 cm durante los ensayos de permeabilidad al agua según la norma DIN 1048. Dado que frecuentemente no se controla la estanquidad del hormigón, es necesario facilitar recomendaciones para la composición del hormigón (comprendidos entre otros datos para la composición granulométrica de los áridos, sobre el contenido en productos muy finos), y particularmente indicaciones para el coeficiente a/c.

La estanquidad necesaria se obtiene por regla general cuando se observan para la fabricación y el acabado del hormigón los principios del párrafo 4,1 y cuando el coeficiente a/c se aproxima alrededor de 0,55 (11). Para el hormigón vibrado que, con una composición de áridos con un tamaño máximo de 30 mm, en las condiciones favorables, se deja preparar fácilmente con una proporción de agua entre 150 y 180 l/m<sup>3</sup>, es necesario calcular un contenido de cemento entre 270 y 325 kg/m<sup>3</sup>. Para la producción de elementos prefabricados de hormigón en fábricas especializadas, otros procedimientos mecánicos de compactación y otros áridos pueden dar lugar a otras proporciones de agua y cemento.

En presencia de agua agresiva que contenga yeso (sulfato cálcico hidratado), es posible no observar las exigencias de estanquidad y aumentar la relación a/c hasta 0,65, mediante la utilización de cementos especialmente resistentes a los sulfatos (ver párrafo 4,4). Estos cementos siempre se deben utilizar a partir de un contenido de sulfatos determinado, que para este hormigón debe ser de aproximadamente 400 mg de SO<sub>4</sub>/l.

Las atmósferas cargadas con aguas que contienen sales y los gases de los humos industriales pueden hacer necesario la protección contra la corrosión de las armaduras de los elementos de construcción provistos de ellas, no sobrepasando una cierta relación a/c, y aumentando el espesor del recubrimiento de cemento.

## **5. 3. medidas referentes a agresividades fuertes**

El hormigón con altas resistencias a las aguas muy agresivas (ver tabla 1) debe alcanzar, en general, una estanquidad, reduciéndose al mínimo la absorción de agua, no dejando penetrar el agua más de 1,5 cm durante los ensayos completos de permeabilidad de acuerdo con la norma DIN 1048. Por las mismas razones que las del párrafo 5,2, es necesario observar aquí las recomendaciones sobre la composición, preparación y acabado del hormigón, según el párrafo 4,3 y, en particular, las indicaciones se refieren al coeficiente a/c.

La hermeticidad necesaria se alcanza, por regla general, observando las prescripciones citadas anteriormente y manteniendo un coeficiente a/c próximo a 0,45 (11). Para el hormigón vibrado, que con una composición de áridos cuya granulometría máxima de 30 mm en las condiciones favorables se deja preparar de una forma irreprochable con una proporción de agua entre 150 y 180 l/m<sup>3</sup>, es necesario adoptar un contenido de cemento comprendido entre 335 y 400 kg/m<sup>3</sup>. Para la preparación de elementos prefabricados de hormigón en las fábricas especializadas, otros procedimientos mecánicos de compactación y otros áridos pueden dar lugar a otras proporciones de agua y cemento.

En presencia de agua agresiva que no contenga más que yeso, el coeficiente a/c puede elevarse hasta 0,55, incluso sin cumplir los requisitos de estanquidad, utilizando cementos altamente resis-

tentes a los sulfatos (ver párrafo 4,4). Tales cementos se imponen siempre a partir de un determinado contenido de sulfatos, que para este hormigón debe situarse alrededor de los 800 mg de  $SO_4/l$ .

Antes de entrar en contacto con el agua fuertemente agresiva, el hormigón debe haber alcanzado un grado de hidratación lo más elevado que sea posible. Puesto que la hidratación y la estanquidad del cemento endurecido bajo una buena humectación aumentan con la edad, puede ser necesario, en ciertos casos particulares, no poner en contacto al hormigón con las aguas fuertemente agresivas, sino después de un período de endurecimiento de dos a tres meses, o en el caso de una utilización prematura, dotarle de una capa eficaz de revestimiento protector.

#### **5. 4. medidas referentes a agresividades muy fuertes**

Incluso el hormigón altamente resistente a la agresión no puede oponer a la larga, sin protección, una resistencia suficiente a las aguas fuertemente agresivas (ver tabla 1). Para la protección del hormigón es necesario, en consecuencia, tomar medidas destinadas a impedir el contacto entre el hormigón y las sustancias agresivas. Con el fin de evitar la degradación del hormigón, en caso de ser ineficaz la protección, el hormigón dotado de tal protección debe, en casos importantes, disponer de una capacidad de resistencia acrecentada de acuerdo con lo que se dice en el párrafo 5.3.

Puede evitarse el contacto directo con las aguas fuertemente agresivas de los siguientes modos:

- a) mediante sistemas constructivos, como por ejemplo el desvío de las aguas mediante drenajes;
- b) mediante capas de protección, aplicando los principios de la técnica de la impermeabilización (por ejemplo, capas de pintura, enlucidos, bandas estancas, recubrimientos).

### **6. conclusiones**

La experiencia adquirida y las observaciones pueden resumirse así:

6.1. La capacidad agresiva de las aguas esencialmente naturales puede determinarse, en general, de forma suficiente en función del porcentaje y el contenido en ácido carbónico que disuelve la cal, en amonio, en magnesio y en sulfato. Es necesario un examen más profundo cuando ciertas características, como por ejemplo el olor, el color y el consumo de  $KMnO_4$ , revelan la presencia de otras sustancias agresivas.

6.2. Parece más adecuado considerar en lugar de las sales (ver norma DIN 4030) los iones que atacan el hormigón, establecer una diferencia entre las aguas con débil, fuerte y muy fuerte agresividad y determinar los valores límites correspondientes en los iones, el porcentaje y el ácido carbónico que ataca la cal.

6.3. El grado de ataque químico sobre el hormigón no es sólo función del género y de la concentración de la sustancia agresiva, sino también de la permeabilidad del suelo, de la naturaleza del hormigón, así como de la rapidez de la corriente y de la presión y temperatura (del ión atacante).

6.4. El hormigón dispone de una capacidad de resistencia elevada cuando su estanquidad es suficiente para que la sustancia agresiva no pueda penetrar en él profundamente. Por tanto, debe ser lo suficientemente estanco para que absorba poca agua y para que durante los ensayos de permeabilidad, de acuerdo con la norma DIN 1048, no penetre, en general, más de 5 cm para el hormigón sometido a aguas débilmente agresivas, y 1,5 cm para aguas fuertemente agresivas.

6.5. Puesto que la estanquidad de un hormigón es difícil de controlar frecuentemente es necesario dar recomendaciones para la composición del hormigón (composición granulométrica de los áridos, contenido en elementos finos y relación a/c). Un hormigón integralmente compacto que tenga un buen acabado suele presentar, en general, suficiente capacidad resistente cuando la relación a/c se aproxime a 0,55 para las aguas débilmente agresivas y a 0,45 para aguas fuertemente agresivas.

6.6. Para resistir los fuertes ataques de los sulfatos es necesario utilizar cementos que tengan una elevada resistencia a los sulfatos.

6.7. En las construcciones de hormigón que están en contacto continuo o intermitente con aguas altamente agresivas, el hormigón debe, antes de ser puesto en contacto directo con tales sustancias agresivas, ser provisto de una protección durable.

## **bibliografía**

(1) GESSNER, H.: «Die Ursachen der Betonzerstörungen in Meliorationsböden» («Las causas de degradación del hormigón en suelos mejorados»). Sonderdruck aus der Sammlung der Vorträge des ersten Fortbildungskurses der Konferenz schweizerischer Kulturingenieure vom 8. u. 9. April 1926 in Zürich. Verlag: Konferenz schweizerischer beamteter Kulturingenieure, Zürich, 1927.

(2) HALSTEAD, P. E.: «The effect of sulphates on portland cement concrete and other products» («Los efectos de los sulfatos sobre el hormigón de cemento Portland»). Technical Report April 1954, Cement and Concrete Association London.

(3) POWERS, T. C.: «The physical structure and engineering properties of concrete» («Estructura física y propiedades mecánicas del hormigón»). Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association, Chicago, July 1958, Bulletin 90.

(4) WISCHERS, G.: «Aufbau und physikalische Eigenschaften des Zementsteins» («Estructura y propiedades físicas de la piedra de cemento»). Der Deutsche Baumeister 23 (1962), H. 3, S. 201/205.

(5) HUMMEL, A.: «Das Beton-ABC» («ABC del hormigón»). 12. Auflage, Verlag Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin, 1959.

(6) WALZ, K.: «Anleitung für die Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften» («Instrucciones para la fabricación de hormigón con unas determinadas propiedades»). Beton- und Stahlbetonbau 53 (1958), H. 6, S. 163/169.

(7) СТЕПОВЕ, А.: «Sur la structure des suspensions aqueuses des ciments purs ou mélangés et sur les propriétés de ces suspensions durcies» («Sobre la estructura de suspensiones acuosas de cementos puros o mezclados y sobre las propiedades de estas suspensiones endurecidas»). Revue des Matériaux de Construction et de Travaux Publics, 1958, n.º 508, S. 1/9 (Vgl. Zement-Kalk-Gips, 12 (1959), H. 5, S. 223/228).

(8) КАВЧИЧ, Ј.: «Einfluss der Feinstkornfraktion im Zuschlagstoff auf die sulfatische Korrosion der Zementmörtel» («Influencia de los compuestos muy finos de los áridos sobre la corrosión por sulfatación del mortero de cemento»). Tonindustrie-Zeitung 86 (1962), H. 18, S. 460/465.

(9) BONZEL, J.: «Erläuterungen zu den Richtlinien für die Herstellung von Beton für Gärfuttersilos» («Comentarios sobre las prescripciones relativas a la preparación de hormigón para silos de forraje»). Beton 12 (1962), H. 2, S. 69/74.

(10) VAN AARDT, J. H. P.: «Säureangriff auf Beton bei kalkhaltigen Zuschlagstoffen» («Corrosión del hormigón por áridos a base de cal»). Zement-Kalk-Gips 14 (1961), H. 10, S. 440/447.

(11) WALZ, K.: «Stand der Neufassung des Teils «Beton» der Stahlbetonbestimmungen» («Nueva redacción del capítulo «Hormigón» de las prescripciones relativas a hormigón armado»). Betontechnische Berichte 1961, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1962, S. 137/140.