

La agresividad del medio y la durabilidad del hormigón

*Ing. Paulo R. L. Helene **

Sinopsis

Cada día el hormigón es solicitado a desempeñar funciones de mayor responsabilidad en las construcciones de hormigón armado y pretensado. Esto se debe por un lado a la necesidad de responder a la evolución de los criterios de dimensionado más perfeccionados que posibilitan obtener piezas más delgadas, luces mayores, tensiones y deformaciones más elevadas.

Por otro lado existe siempre la limitación impuesta por los costos y plazos que exigen el empleo de procesos constructivos donde el hormigón es sometido a solicitaciones y a la acción de agentes agresivos a bajas edades.

¿Cómo especificar entonces un hormigón adecuado a un medio desconocido? ¿Cómo caracterizar un medio ambiente desde el punto de vista de la agresividad al hormigón?

En estas notas se tiene la intención de orientar a los constructores en el sentido de tomar los recaudos iniciales para la correcta elección de la naturaleza de los materiales y el proporcionamiento de estos frente a los medios agresivos.

Para lograr tal intento se analizan algunos pliegos de prescripciones (normas) y recomendaciones de diferentes naciones que tienen criterios para la clasificación de un medio ambiente respecto al hormigón. Se propone una forma de clasificar diferentes hormigones y se sugiere un camino para enfrentar un problema de agresividad al hormigón indicando los materiales y la proporción adecuada de estos para obtener un hormigón resistente y durable.

Se acredita que el hormigón es lo más económico y más durable entre los materiales de construcción siempre que se siga observando reglas mínimas de tecnología, desgraciadamente muchas veces olvidadas o menospreciadas.

INTRODUCCION

La durabilidad del hormigón ante los más diversos agentes agresivos es un problema complejo y que todavía no está totalmente solucionado.

Los fenómenos presentes en su degradación son tan poco conocidos como la propia naturaleza de los compuestos hidratados, lo que obliga a una simplificación de los mecanismos de degradación concentrándose en los factores de mayor peso.

* Ingeniero investigador del IPT. Profesor de EPUSP. Miembro ABNT São Paulo - Brasil.

De una manera general el hormigón puede sufrir las siguientes acciones:

- a) sollicitaciones mecánicas intensas para las cuales no estaba proyectado;
- b) acciones físicas especiales tales como: abrasión, cavitación, acción del calor y del frío, etc.;
- c) procesos químicos y físico-químicos de degradación provocados por la acción de agentes agresivos, que entran en contacto con el hormigón, tales como: gases, líquidos, y suelos.

A excepción del primero que resulta de una imprevisión de proyecto o acción excepcional sobre la estructura, los otros dos, b) y c) pueden ser prevenidos a partir de la elección adecuada, de los materiales.

Evidentemente esta elección es particular para cada situación específica de agresividad, siendo interesante, sin embargo, partir de recomendaciones generales, ya consagradas, adecuándolas a la situación dada.

Creemos que el problema puede ser dividido en dos etapas:

- 1º) Como caracterizar y clasificar un medio agresor; y,
- 2º) Como caracterizar y clasificar la estructura agredida, o sea, un medio será más o menos agresivo en función de la naturaleza y constitución del material que el agrede.

1º ETAPA — ¿Cómo caracterizar y clasificar un medio agresor?

Con respecto a la primera etapa del problema, la literatura técnica presenta dos caminos bastante definidos que son:

- a) **Firma rigurosa:** el medio es clasificado en función de la *concentración efectiva* de compuestos agresivos presentes. Esta clasificación presupone un análisis físico-químico adecuado del medio.
- b) **Forma indirecta:** la clasificación del medio se basa simplemente en las *condiciones de exposición* de la estructura admitiendo que a ellas están asociadas diferentes concentraciones de compuestos agresivos.

Un ejemplo clásico de la forma rigurosa de caracterización y clasificación del medio ambiente agresor es la norma TGL 11357 de la *República Democrática Alemana*, publicada en 1962. En ese aspecto se puede decir que los países orientales, cuyo mejor ejemplo es la *Norma SNeP II-28-73 de la Unión de las Repúblicas Socialistas Soviéticas*

URSS, tienen, fuerte preferencia por la forma rigurosa de caracterizar y clasificar el medio ambiente agresor, mientras que en los países occidentales, como por ejemplo los *Estados Unidos de América — USA*, a través de las recomendaciones del *Concrete Manual* editado por el *Bureau of Reclamation*, prefieren adoptar la forma indirecta.

Forma rigurosa

La clasificación de un medio a través de la medida de las concentraciones efectivas de compuestos agresivos es compleja y exige una metodología adecuada para tal finalidad. No siempre se puede hacer la comparación pura y directa de los índices sugeridos en diferentes normas nacionales si antes, no se compatibilizan los métodos de análisis químico empleados en cada país. Después de este cuidado se podrá identificar y clasificar las concentraciones de elementos agresivos y optar por el mejor proporcionamiento de los materiales.

En Brasil se adopta la norma *CETESB, L1.007 Agresividade do Meio ao Concreto — Classificação*, publicada en 1978 por la *Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental — CETESB*, que está siendo ampliamente empleada por el medio técnico en los casos de agresividad.

En la *tabla 1* se presenta la forma de clasificación de la agresividad de aguas en función de la cantidad de materias disueltas, recomendada por la norma *CETESB L1.007*.

A partir de los contenidos de sustancias agresivas son asociados los siguientes grados que diferencian la intensidad de la agresión del agua:

Grados	Intensidad de la agresividad del agua
O	de agresividad nula
I	de agresividad baja
II	de agresividad media
III	de agresividad fuerte
IV	de agresividad muy fuerte

Esta clasificación fue establecida en relación a un hormigón que tiene las siguientes características:

- Contenido unitario de cemento por m^3 : $C \geq 300 \text{ kg/m}^3$;
- hormigón de cemento portland común;
- relación agua/cemento = 0,60;
- sometido a las siguientes condiciones, hormigón no endurecido y en contacto con el agua en reposo u hormigón enterrado en suelo de arena y gravas cuyo coeficiente de permeabilidad es $\geq 10^{-3} \text{ cm/s}$.

Tabla 1. Agresividad del agua en función de la cantidad de materias disueltas. Norma CETESB L.1. 007

Reacciones		A					B					C					
		Debida principalmente a lixiviación, incluyendo hidrólisis de los compuestos cálcicos del hormigón					Debida principalmente a deformaciones químicas acompañadas de lixiviación					Transformaciones químicas y expansiones acompañadas de lixiviación con formación principalmente de					
Grado	Agresividad del agua	3	4	5	6	7	8		9	10		11	12	13	14	15	16
		del agua filtrada (mg/l)	en presencia simultánea de CO ₂ agresivo o que modifique el pH (mg/l)	pH	Contenido de calcio de Ca ⁺⁺ (mg/l)	pH	CO ₂ agresivo (mg/l)	Dureza Ca ⁺⁺ para (mg/l)	Acido carbónico agresivo (mg/l)	Magnesio Mg ⁺⁺ (mg/l)	Para NO ₃ ≤ 150 mg/l	Para NO ₃ > 150 mg/l	Amonio NH ₄ ⁺ (mg/l)	Para Sulfuros S ⁺⁺ (mg/l)	Etringita y yeso (mg/l)	Etringita y yeso (mg/l)	Yeso, hidróxido magnésico, sales amónicas (mg/l)
0	nula	> 150	-	-	> 100	> 6	< 10	> 14	< 100	< 100	< 100	< 50	< 1	< 20	< 250	< 100	
I	baja	50 a 150	0 a 5	≥ 6	50 a 100	5,5 a 6	< 10 10 a 40	1,4 a 14 > 14	100 a 150	100 a 150	50 a 100	50 a 100	1 a 10	200 a 350	250 a 400	100 a 200	
II	media	50 a 150	> 5	< 6	< 50	5 a 5,5	< 10 10 a 40 40 a 90	< 1,4 1,4 a 14 < 14	150 a 250	150 a 250	150 a 250	100 a 150	> 10	350 a 600	400 a 700	200 a 350	
III	fuerte	< 50	0 a 5	> 5,5	-	4 a 5	10 a 40 40 a 90 > 90	> 14 todas	250 a 500	250 a 500	250 a 500	150 a 250	-	600 a 1200	700 a 1500	350 a 600	
IV	muy fuerte	< 50	> 5	< 5,5	-	3 a 4	-	-	> 500	> 500	> 500	> 250	-	> 1200	> 1500	> 600	

Claro está que si acaso el hormigón que será empleado en la estructura presenta características distintas de estas, el medio agresor tanto puede dejar de serlo, bajando uno o dos grados de agresividad como pasar a ser fuertemente agresivo a pesar de que el medio continúe manteniendo las mismas concentraciones de compuestos agresivos presentes.

Por lo tanto el *grado de agresividad final* debe de tener en cuenta no sólo la naturaleza, del hormigón sino también otras condiciones del medio que contribuyan para disminuir o aumentar la intensidad o la posibilidad de degradación del hormigón.

El procedimiento para realizar la clasificación final del medio consta en el texto de la norma, que incluso cita el ejemplo analizado a seguir.

Ejemplo

Considerese una muestra de agua en la cual se determinó, a través de análisis físico-químico, los siguientes once parámetros considerados esenciales desde el punto de vista de la agresividad al hormigón:

- grasas y aceites vegetales y animales, sus ácidos grasos y ácidos grasos sintéticos;
- grasas y aceites minerales que contienen ácidos.

Confrontando los resultados de este ejemplo con los valores presentados en la *tabla 1*, se puede concluir que:

- 1º) Teniendo residuo no evaporable superior a 150 mg/l, con $\text{pH} > 6$, no hay riesgos evidentes de lixiviación de los compuestos hidratados, independientemente del contenido de CO_2 agresivo presente, (Analice con este objeto las columnas numeradas de 3 a 9), se trata de agua debilmente ácido ($\text{pH} < 7$) y altamente salina (residuo no evaporable > 150 mg/l);
- 2º) Conteniendo iones de Mg^{++} e NH_4^+ inferiores a 100 mg/l, el agua no tiende a provocar reacciones significativas de cambio iónico. Procesos de intercambio de naturaleza ácida iban a requerir también que el pH fuera inferior a 6. (Analice para ello las columnas 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13).

Nº	Parámetro	Contenido
01	pH	6,5
02	Residuo no evaporable del agua filtrada	1050 mg/l
03	Amonio (NH_4^+)	100 mg/l
04	CO_2 agresivo	9,0 mg/l
05	Nitrato (NO_3^-)	no determinado
06	Cloruro (Cl^-)	16 mg/l
07	Sulfato (SO_4^{--})	1.300 mg/l
08	Magnésio (Mg^{++})	34,4 mg/l
09	Calcio (Ca^{++})	no determinado
10	Dureza expresada en (Ca^{++})	249,4 ml/g
11	Sulfuros (S^{--})	no determinado

En algunos casos el análisis físico-químico del medio podrá ser más amplio determinándose también el contenido de otras sustancias potencialmente agresivas al hormigón armado y pretendido, como por ejemplo.

- ácidos orgánicos, tales como, ácido acético, ácido láctico y ácido cítrico;
- ácido húmico en el caso de aguas pantanosas;

Este fenómeno de intercambio iónico, atacaría sobretudo la portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, resultante de las reacciones de hidratación de los compuestos del cemento Portland, haciéndola más soluble y, en función de la mayor o menor capacidad de transporte del medio, lixiviando el hormigón y eventualmente atacando otros compuestos.

- 3º) Considerando que el contenido de clo-

ruros es inferior a 1000 mg/l y el de Mg^{++} y NH_4^+ inferior a 100 mg/l según la columna n° 14, el fenómeno preponderante de ataque será el de la formación de un compuesto altamente expansivo identificado como etringita o sal de Candlot. Entrando entonces con el contenido de $SO_4^- = 1300$ mg/l, se clasifica este agua como de *agresividad fuerte (grado IV)*.

Esta clasificación todavía puede sufrir alteración en función del análisis de las siguientes condiciones locales:

- a) aumentándose en un grado la intensidad encontrada cuando:
 - el agua está en movimiento;
 - el nivel del agua varía frecuentemente;
 - existe un gradiente hidráulico;
 - la temperatura del agua es elevada (≥ 45 °C);
 - la estructura es delgada (menor dimensión ≤ 20 cm).
- b) reduciéndose en un grado la intensidad encontrada cuando:
 - el medio agresivo entra en contacto con el hormigón después de por lo menos 28 días;
 - el contacto con el agua es intermitente y espaciado;
 - el suelo es de baja permeabilidad (arcillas).

Es evidente que las situaciones previstas en el texto de la norma CETESB L1.007, no cubren la totalidad de las posibilidades de ataque al hormigón. Otros medios agresivos, como por ejemplo los extremadamente ácidos, $pH < 3$, todavía deberán ser analizados como casos especiales y, como tal exigirán estudios especiales. También el ataque del agua de mar no debe ser analizado directa y simplemente por esta norma. La presencia en el agua de mar de muchas otras sales, alterando el equilibrio químico de las reacciones, trae como consecuencia que la degradación sulfática es más blanda que la que ocurriría en aguas dulces con el mismo contenido de sulfato, pues parece existir una cierta acción inhibitoria del cloruro de sodio.

Forma indirecta

La clasificación y caracterización de un medio a través de este criterio es más rápida y más objetiva, faltando sin embargo datos cuantitativos con respecto al ambiente agresor.

El ejemplo clásico es la norma *ACI. 201. Durability of Concrete in Service*, publicada en 1962 por el *American Concrete Institute*, cuyo resumen está en la *tabla 2*.

En esa recomendación se llama la atención, sobre la relación agua cemento máxima y la naturaleza del cemento empleado. Esos dos parámetros pueden ser considerados como los más importantes en cuanto a la durabilidad del hormigón.

Las condiciones de exposición son básicamente divididas en dos principales: 1ª) grandes variaciones de temperatura con acción del hielo y deshielo y 2ª) exposición a temperaturas suaves en regiones lluviosas o áridas. En seguida hay una subdivisión en exposición al aire, en la línea de fluctuación del agua dulce y en la línea de fluctuación del agua salada. Se entiende el siguiente orden creciente de probable ataque del medio:

- a) **Riesgo muy remoto de ataque;** estructuras permanentemente enterradas o protegidas;
- b) **Riesgo moderado de ataque;** estructura al aire, en contacto con intemperie;
- c) **Riesgo de ataque;** estructuras sometidas a respingos (salpicadura) y a variación del nivel del agua dulce o salada.

Además de estas variaciones se tienen en cuenta el tipo de estructura que estará sometida a estas exposiciones, poniendo las estructuras esbeltas como las más sujetas al ataque en contraposición a las estructuras donde prevalezca el empleo de hormigón en grandes volúmenes.

Como se puede observar en la *tabla 2*, auto-explicativa, la máxima relación agua/cemento tolerada es 0,58 permitiéndose emplear valor superior a este parámetro —solamente en función de las exigencias de trabajabilidad y resistencia mecánica— en unas pocas situaciones especiales.

2º ETAPA — ¿Cómo caracterizar y clasificar el hormigón?

La segunda etapa del problema consiste en caracterizar y clasificar el material agredido, o sea, el hormigón.

Consideramos adecuada la clasificación sugerida en la *tabla 3*.

Entiendese por aire natural la cantidad de aire presente en el hormigón fresco después de su compactación. Depende de la trabajabilidad del hormigón y de los equipos y dispositivos de compactación disponibles en la obra y no solamente en el Laboratorio donde será efectuado el estudio de dosificación del hormigón.

Se puede calcular por:

% de aire incorporado =

$$= 1 - \frac{\text{Masa específica realmente obtenida}}{\text{Masa específica máxima teórica}} \cdot 100,$$

Tabla 2. Durabilidad del Hormigón en Servicio. ACI 201-62

Condiciones de exposición	Relación agua / cemento (en kg/kg) máxima permisible					
	Grandes variaciones de temperatura o frecuentes acciones de hielo y deshielo (solamente para hormigones con aire incorporado *)		Temperaturas suaves, raramente abajo del cero grados Celsius, o lluviosa, o árida		En la línea de fluctuación del agua o en la zona de variación del nivel del agua o respingos (salpicaduras)	
	En el aire	En agua dulce	En el aire	En agua dulce	En el aire	En agua dulce
Tipos de estructuras						
Secciones esbeltas, tales como verjas, resguardo de puentes, soleras, bordes, orlas, hormigón ornamental y arquitectónico, pilotes, estacas armadas, tubos de hormigón pretensado y todas las piezas con menos de 2,5 cm de recubrimiento de hormigón sobre la armadura	0,49	0,44	0,40 ***	0,49	0,53	0,40 ***
Secciones moderadas tales como muros de contención, pilares, vigas.	0,53	0,49	0,44 ***	0,49	0,53	0,44 ***
Superficies exteriores de secciones de gran volumen (hormigón masa)	0,58	0,49	0,44 ***	0,49	0,53	0,44 ***
Hormigón sumergido	—	0,44	0,44	0,44	—	0,44
Forjados y losas sobre el suelo	0,53	—	—	—	—	—
Hormigón protegido de las intemperies, interiores de edificaciones, hormigón enterrado en suelo no agresivo	—	—	—	—	—	—
Hormigón que será protegido por cubiertas o tierra, pero durante algún tiempo podrá estar sometido a acción de hielo y deshielo antes del cubrimiento	0,53	—	—	—	—	—

Observaciones:

- * Hormigón con aire incorporado debe ser empleado en todas las situaciones de exposición severa. Puede eventualmente ser utilizado en condiciones suaves de exposición para mejorar la trabajabilidad de la mezcla.
- ** Suelo o agua subterráneas que contienen una concentración de sulfatos por encima de 0,2%
- *** Cuando se utiliza cemento Portland resistente a sulfatos la relación agua/cemento máxima permisible puede ser incrementada en 0,04.
- La relación agua/cemento puede ser escogida solamente en función de las exigencias de resistencia y trabajabilidad.

Nota:

- El ACI 301-72, Specifications for Structural Concrete for Buildings recomienda que:
 - relación agua/cemento $\leq 0,53$ y aire incorporado para hormigón normal sometido a condiciones usuales de intemperismo;
 - relación agua/cemento $\leq 0,53$ aire incorporado y $f_{ck} \geq 21 \text{MPa}$ ($\sim 210 \text{ kgf/cm}^2$), para hormigón ligero sometido a condiciones de intemperie severa;
 - relación agua/cemento $\leq 0,48$ aire incorporado y $f_{ck} \geq 26,4 \text{MPa}$ ($\sim 264 \text{ kgf/cm}^2$) para hormigón normal impermeable a agua dulce;
 - relación agua/cemento $\leq 0,44$, aire incorporado y $f_{ck} \geq 28,1 \text{MPa}$ ($\sim 281 \text{ kgf/cm}^2$) para hormigón normal impermeable a agua de mar.
 - relación agua/cemento $\leq 0,44$, aire incorporado, $f_{ck} \geq 28,1 \text{MPa}$ ($\sim 281 \text{ kgf/cm}^2$) y cemento resistente a sulfatos para concentraciones perjudiciales de soluciones de sulfatos u otras químicamente agresivas.

Tabla 3. Forma de caracterizar y clasificar el hormigón

Grado	Calidad del Hormigón	Características del hormigón				
		En estado plástico fresco			En estado endurecido	
		relación agua / cemento	aire natural	aire incorporado intencional	absorción de agua	penetración de agua
		kg/kg	%	%	%	mm
α	de compacidad baja	$\geq 0,60$	$\leq 2,0$	$\leq 3,0$	cualquiera	cualquiera
β	de compacidad normal	0,50 a 0,59	$\leq 2,0$	$\leq 3,0$	$\leq 5,0$	cualquiera
γ	de compacidad alta	0,45 a 0,49	$\leq 1,5$	$\leq 3,5$	$\leq 4,5$	≤ 80
δ	impermeable	$\leq 0,44$	$\leq 1,0$	$\geq 2,0$ a $\leq 4,0$	$\leq 4,3$	≤ 40

o de otra forma como por ejemplo empleándose el aparato y la metodología descrita en el método *ASTM C 231 Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*.

Por *aire incorporado intencional* se entiende la cantidad de aire intencionalmente incorporado al hormigón a través del empleo de aditivos. Este aire posee propiedades impermeabilizantes, y es de naturaleza diferente del anterior, el cual no contribuye para la impermeabilidad del hormigón. Se puede calcular de la misma forma indicada, teniendo el cuidado de restar el aire natural, previamente medido en el mismo hormigón sin aditivo incorporador de aire.

La *absorción de agua* del hormigón endurecido por inmersión a la temperatura ambiente, puede ser obtenida en porcentaje, por ejemplo según el método en la *ASTM C 642 Specific Gravity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*.

Finalmente, la *penetración de agua* se refiere a un ensayo donde el hormigón es sometido a la presión de agua de 0,8 Mpa (\sim m.c.a.) por un período de 24 horas. Las probetas son partidas de manera que se pueda observar la eventual penetración de agua, midiéndose entonces el máximo valor observado. Es conveniente utilizar para la confección de los moldes de las probetas, materiales de la mis-

ma naturaleza que los que serán empleados en los encofrados de obra. De este modo se obtendrá hormigones con texturas superficiales semejantes.

Naturalmente falta especificar la edad en la que se determina la absorción y la penetración de agua, Como se sabe, el fenómeno de hidratación de los compuestos principales del cemento es continuo en el tiempo, aumentando con este. Esa edad puede ser, por ejemplo, la edad en la que el hormigón entra en contacto con el medio agresivo.

A medida que aumenta la hidratación, se reduce la porosidad del hormigón y consecuentemente su absorción de agua y permeabilidad.

La práctica usual debe ser poner el hormigón frente al medio agresivo lo más tarde posible. En estas condiciones será más apto para enfrentar esos agentes agresivos.

Camino propuesto para hallar la solución a un problema de durabilidad.

Sugerimos para enfocar un problema de durabilidad del hormigón, la siguiente secuencia:

- 1º) Analizar el *medio ambiente* clasificándolo como de agresividad nula, debil, media, fuerte y muy fuerte. En este análisis es importante compatibilizar el método de aná-

Tabla 4. Tipo de hormigones ha elaborar segun la agresividad

Ambiente agresivo clasificado para hormigón de compacidad baja (a) = a (CETESB/L1.007)		Hormigón adecuado para el cual en principio no habrá ataque
Grado	Intensidad	Grado
0	de agresividad nula	$a \beta \gamma \delta$
I	de agresividad debil	$\beta \gamma \delta$
II	de agresividad media	$\gamma \delta$
III	de agresividad fuerte	δ
IV	de agresividad muy fuerte	debe de haber dispositivos especiales de protección

lisis químico empleado con la especificación consultada:

2º) Identificar el *hormigón de referencia* para el cual fue establecido la clasificación anterior;

3º) Tratándose de medio ambiente agresivo por acción de sulfatos, donde en principio el componente más probable de sufrir ataque es el aluminato tricálcico C_3A , se debe emplear preferencialmente cementos con bajo contenido de este componente, sugiriéndose el siguiente orden de prioridad en la elección:

Cemento Portland Siderúrgico: con contenido de escoria $\geq 60\%$;

Cemento Portland Puzolánico: con contenido de puzolana $\geq 20\%$.

Cemento Portland Resistente a los Sulfatos.

Cemento Portland Común.

4º) Tratándose de medio ambiente agresivo por acción de aguas puras, ácidas y carbónicas, emplear preferentemente la siguiente prioridad.

Cemento Portland Puzolánico: con contenido de puzolana $\geq 20\%$.

Cemento Portland Siderúrgico: con contenido de escoria $\geq 60\%$.

Cemento Portland de bajo contenido de silicato tricálcico: C_3S

5º) Tratándose de agresividad por acción de sílice reactiva (áridos deletéreos) emplear preferentemente la siguiente prioridad

Cemento Portland Puzolánico; con contenido de puzolana $\geq 20\%$;

Cemento Portland Siderúrgico: con contenido de escoria $\geq 60\%$;

Cemento Portland con bajo contenido de álcalis (Na_2O y K_2O).

6º) Elaborar *hormigones* según la clasificación propuesta en la Tabla 4.

Cabe recordar que la relación agua/cemento sugerida para la clasificación de los hormigones en $a \beta \gamma \delta$ (tabla 3), no son, ni podrían ser absolutas. Basta tener en cuenta por ejemplo que la cantidad mínima de agua de hidratación de un cemento Portland puede variar entre 0,22 y 0,32 de su masa

Considerando esos valores extremos tendremos:

Cemento A; agua de hidratación = 0,22 por lo tanto la relación agua/cemento mínima para amasado de ese hormigón será del orden de 0,41.

Cemento B; agua de hidratación = 0,32 por lo tanto la relación agua/cemento mínima para amasado de ese hormigón debe ser del orden de 0,54.

O sea, estos hormigones serán, en teoría, igualmente impermeables para relaciones agua/cemento 0,41 y 0,54 respectivamente. Por lo tanto la imposición inicial, sugerida en la tabla 3, de una relación agua/cemento máxima, solo puede ser orientativa y nunca absoluta.

7º) Tratándose de hormigón armado y pretensado es imprescindible limitar el contenido de cloruros —ion cloro Cl^- — pues este es excelen-

te conductor de corriente eléctrica, engendrada por pilas de corrosión por aireación o alcalinidad diferenciales, pudiendo conducir a la corrosión generalizada de las armaduras de hormigón armado o la corrosión bajo tensión en los hilos y cables de hormigón pretensado.

Los valores límites usuales para contenido de ion cloro son: $\leq 0,06\%$ del peso de cemento para hormigón pretensado y $\leq 0,35\%$ (cuantil de 95%) ninguno individual mayor que $0,50\%$ del peso del cemento para hormigón armado, recordando que: $\% \text{ ion cloro} \times 1,648 = \% \text{ equivalente de Na Cl}$.

$\% \text{ ion cloro} \times 1,565 = \% \text{ equivalente de Ca Cl}_2$ (producto básico utilizado como aditivo acelerador de fraguado y endurecimiento de los hormigones).

- 8º) Finalmente no basta disponer solamente de un hormigón adecuado para lograr una estructura durable. El control de calidad de los materiales y el control de las etapas constructivas es indispensable. En la mayoría de los casos de patología se observa que no hubo, durante la ejecución, los cuidados debidos. Las juntas de hormigonado, la compactación, el curado, etc., participan en igualdad de importancia con el material hormigón, de la resistencia y durabilidad de la estructura. Se recomienda entonces, durante la ejecución, el mismo rigor técnico y preocupación científica que fue adoptado en las etapas anteriores.

Aplicación a dos situaciones diferentes de agresión del medio:

1er. Caso:

Estación de tratamiento de agua de montaña para abastecimiento de agua potable.

Datos:

- a) Análisis físico-químico del agua:
 01. pH = 6,2
 02. Residuo no evaporable en el agua filtrada = 41,7 mg/l
 06. contenido de cloruros (Cl^-) = 2,70 mg/l
 07. contenido de sulfatos (SO_4^{2-}) = 3,70 mg/l
 08. contenido de magnesio (Mg^{++}) = 1,2 mg/l
 10. dureza (expresada en Ca^{++}) = 12,9 mg/l
- b) El hormigón de la estructura sólo entrará

en su contacto con el agua después de 90 días de la conclusión de la obra.

Incógnitas:

- a) grado de agresividad del agua según norma CETESB/L1.007:
- b) tipo de ataque que podrá ocurrir;
- c) características del hormigón y de la ejecución de la estructura para soportar tal agresividad.

Solución:

- a) cotejando los resultados del análisis físico-químico con los presentados en la tabla 1 se tiene:
 - * con relación al pH, debilmente ácido, el agua puede ser clasificada como de grado 0 a I, (columnas 5 y 7).
 - * con relación a los demás compuestos, no hay riesgo evidente de ataque ya que se encuentran en baja concentración (columnas 14, 15, 16 y 9).
 - * finalmente analizando el residuo no evaporable se constata que se trata de agua pura con baja salinidad encuadrada con el grado III, o sea, medio de fuerte agresividad,

Esta clasificación inicial podría ser aumentada en un grado ya que se trata de agua en contacto directo y en movimiento de forma que el proceso de lixiviación se auto acelera. Por otro lado podríamos reducir en un grado ya que sólo entrará en contacto con el hormigón cuando este tenga 90 días de edad. De esta forma parece mas adecuado mantener la clasificación inicial, o sea *grado III (fuerte agresividad)*.

- b) El tipo de ataque predominante que podrá ocurrir es el de lixiviación por la acción del agua con alto poder de disolución de los compuestos hidratados de la pasta de cemento, o sea, agua pura;
- c) Entrando en la tabla 4 con el grado III encontrado tendremos que el hormigón idóneo para este caso es clasificado como δ o sea *impermeable*, Considerando además que se trata de ataque predominante por agua pura tendremos:
 - * cemento más adecuado: Cemento Portland Puzolánico con tenor de puzolana $\geq 20\%$
 - * características principales del hormigón fresco:
 - factor agua/cemento en peso: $\leq 0,44$;
 - aire incorporado intencional de 2 a 4,0%;
 - aire aprisionado $\leq 1\%$ (a ser garantizado

no solo en la probeta del Laboratorio sino también y principalmente por los procesos de mezcla, transporte, vertido y compactación del hormigón en la obra);

* características principales del hormigón endurecido:

absorción del agua a la edad de 90 días $\leq 4,3\%$

penetración del agua a la edad de 90 días ≤ 40 mm

* cuidados principales en la ejecución:

curado semejante al que fue aplicado a las probetas empleadas en los ensayos de dosificación en el Laboratorio, tanto en calidad como principalmente en plazo:

empleo de agua no agresiva para el curado, o sea, no se podrá emplear el agua disponible a no ser que se neutralice previamente su agresividad, por ejemplo disolviendo cierta cantidad de cal hidratada, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ u óxido de calcio.

Total cumplimiento de las reglas de la buena construcción

2º Caso:

Estructura en hormigón visto armado, situada en una ciudad en la costa del mar.

Datos:

- * humedad relativa del aire $\geq 70\%$
- * temperatura ambiente: 20 a 38 °C
- * índice pluviométrico medio anual: 300mm
- * análisis químico del polvo sedimentado en 30 días.
contenido de cloruros: 1,25 g/m²
pH: de 3,5 a 6,0
- * presencia de compuestos salinos, agresivos y contaminantes decurrentes de atmósfera urbana, como el SO_2 .

Incógnitas:

- a) tipo de ataque que podrá ocurrir:
- b) características del hormigón y de la ejecución de la estructura para soportar tal agresividad.

Solución:

- a) Considerando las características del medio ambiente y cotejándolas con las condiciones de exposición previstas en la tabla 2 se encuentra que este caso no está claramente previsto. El más próximo parece ser la columna correspondiente a temperatura suaves en región lluviosa,

en el aire, o sea, columna, 4. El tipo de ataque esperado es el de carbonatación superficial acompañada de lixiviación por la acción ácida, pudiendo ocasionar la corrosión de las armaduras.

- b) Analizando la tabla 2, columna 4, línea 1, se observa que con respecto al hormigón se debe elaborar con una relación agua/cemento $\leq 0,53$.

Sea cual sea la naturaleza del cemento que será empleado y en especial si se trata de cemento portland con adiciones activas (puzolanas o escorias) se debe cuidar el curado por un plazo no inferior a 28 días pues las reacciones de puzolanicidad se lleva a cabo lentamente y sólo en presencia de la humedad.

Como el riesgo mayor es de lavado superficial acompañado de carbonatación se debe de observar cuidadosamente el recubrimiento de las armaduras aumentando al máximo permitido por el proyecto.

De esta forma será evitada la despasivación del acero por la disminución del pH del hormigón, con el consecuente retraso del inicio de la corrosión. Si es necesario se debe aumentar un poco la sección de los elementos estructurales externos y no revestidos.

Consideraciones finales.

La industria del cemento y consecuentemente la de la construcción civil está pasando y deberá pasar por grandes transformaciones. La crisis energética mundial impone la sustitución de los combustibles convencionales y la reformulación de los procesos de calcinación del clínker, Nuevos cementos con adiciones activas o no, serán en el futuro ofrecidos.

La optimización de los costos de producción provocará automáticamente el empleo racional de los cementos hidráulicos. Para cada situación habrá un aglomerante adecuado y consecuentemente más económico.

Esto exige y exigirá aún más del ingeniero constructor el conocimiento básico de las propiedades de los materiales disponibles en el mercado, de forma que sea posible la elección y el proporcionamiento adecuado de estos materiales para la obtención de un hormigón mejor ante una determinada situación.

Conforme fue ya presentado, desde el punto de vista de la durabilidad, la elección de la naturaleza (tipo) del aglomerante hidráulico (cemento) y la

relación agua/cemento en peso, son los parámetros preponderantes que deben de ser cuidadosamente seleccionados.

Hemos constatado que muchas especificaciones se limitan al mínimo consumo de cemento por m^3 de hormigón —y en este punto son exigentes— aceptando sin embargo relaciones agua/cemento superior a 0,55, valor este que ni siquiera es indicado para las obras de edificaciones en USA conforme se desprende de las recomendaciones del ACI 301-72 citado en la tabla 2.

Ahí entonces aparecen las soluciones posteriores: impermeabilización con mortero fuertemente aditivado, revestimientos sintéticos de naturaleza

orgánica extremadamente caros y a veces incluso insatisfactorios pues exigen mano de obra especializada la que no siempre está disponible en las obras.

Estas notas intentan recordar que el hormigón es un material impermeable ante las presiones usuales de los líquidos, además de ser extremadamente durable. Presas, reservorios, estaciones de tratamiento de agua, cañería de desagüe, etc., confirman esta afirmativa. Basta con conocer, aceptar y aplicar las mínimas reglas de la tecnología del hormigón para obtener un material de construcción con excelente durabilidad y desempeño mecánico.

BIBLIOGRAFIA

1. ACI COMMITTEE-201. *Durability of concrete in service*. In: *ACI Manual of Concrete Practice Part. 1*. American Concrete Institute, 1978.
2. ACI COMMITTEE-301. *Specifications for structural concrete for buildings* In: *ACI Manual of Concrete Practice. Part 3*. American Concrete Institute, 1980.
3. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI Publication SP-47. Durability of concrete 1975*.
4. BASILIO. Francisco de Assis, *Durabilidade do concreto em água do mar*. In: *Colóquio sobre Durabilidade do Concreto, São Paulo, 1972*, . . . Instituto Brasileiro do Concreto — IBRACON 1972.
5. BICZOK, Imre, *Corrosión y protección del hormigón (Betonkorrosion Betonschutz)*. Trad. Emilio I. D'Ocon, Asensi Bilbao, Urmo S.A. Ed., 1978.
6. BRITISH STANDARDS INSTITUTION BS CP-110 *Code of Practice for the structural use for concrete. Part. 1*. London, nov. 1972, revised 1977.
7. CALLEJA CARRETE, José, *Durability, International Congress on the Chemistry of Cement, 7th, Paris, 1980*. Paris, Septima, v. 1, p. VII-2/1-VII-2/48. 1980.
8. CINCOTTO, Maria Alba. *A agressividade meio ao concreto*. In: *Curso de Patología das Construções de Concreto, São Paulo, 1980, Anais* . . . *fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia/Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. FDTE/EPUSP/IPT. São Paulo, 1980*.
9. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL — CETESB L1.007 — *Agressividade do meio ao concreto — classificação*. São Paulo, 1978.
10. DDR-STANDARD. TGL 11357 — *El hormigón en las aguas agresivas. Examen de las aguas. Realización de las obras: In: Corrosión y protección del hormigón. Anexo II. Imre Biczók Bilbao Urmo. S.A. Ed., 1978*.
11. SNeP II-28-73 *Proteção de materiais de construção contra corrosão Norma aprovada pela Comissão Estatal do Conselho de Ministros dos Negócios da Construção Civil — Gosstroj. União das Repúblicas Socialistas Soviéticas — URSS. Trad. Paulo Gemerov. Rev. Maria Alba Cincotto e Paulo R. L. Helene, São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas — IPT, 1979*.
12. USA — Department of the interior. Bureau of Reclamation, *Concrete Manual — A water resources technical publication, 8a. ed., 1975*.
13. WOODS, Hubert *Durability of concrete construction, Iowa, American Concrete Institute, The Iowa State University Press, ACI Monograph nº 4 1968*.