

El agua y el hormigón

FLORENTINO DEL VALLE RODRIGUEZ, DR. ARQUITECTO

RESUMEN. *Se hace referencia a la influencia que puede tener el agua de amasado, de curado y de entumecimiento, en diversas características de los hormigones que están relacionadas con la durabilidad de los hormigones fraguados y de las armaduras que estos puedan tener en su interior.*

SUMMARY. *Reference is made to the influence which water can have in mixing, curing and swelling in various characteristics of concrete which, in turn, are associated with the durability of set and the reinforcement bars it can have in its interior.*

INDICE GENERAL

1. Introducción 2. Dosificación y curado 3. Retracción 4. Condiciones de fisuración por retracción
5. Entumecimiento. Condiciones de fisuración 6. Congelación. Condiciones de fisuración y sus secuelas
7. Fluencia 8. Corrosión de las armaduras 9. Conclusiones 10. Bibliografía

1. INTRODUCCION

Precisamente porque no existe la menor duda del gran papel que el agua desempeña en todo el complejo proceso en que se desenvuelve el hormigón, nunca está de más insistir en la influencia que su presencia tiene en la mayor parte de las incidencias, unas más positivas que otras y que pueden aparecer a lo largo de la vida de los hormigones.

De una parte, la consistencia, la resistencia o la adaptabilidad han sido algunas de las características que más positivamente se han valorado y en todas ellas interviene activamente el agua, colaborando adecuadamente si se han tenido en cuenta un mínimo de exigencias, relacionadas tanto con

su calidad intrínseca como con la cantidad empleada y forma de utilizarse.

De otra, la retracción, el entumecimiento, la fluencia o la corrosión, son también otras características, generalmente consideradas menos positivas y en las que vuelve a jugar un primordial papel el agua. Si en forma análoga a lo anteriormente expuesto se cuidara más su empleo, podrían ser minoradas sus secuelas, drásticamente en algunos casos, parcialmente en otros.

Constituyen en conjunto, parte de las características que pueden coexistir en el hormigón y por ello justifican el análisis sucinto de algunas, tanto de las claramente favorables como de las estimadas menos positivas, con especial incidencia en este último grupo.

2. DOSIFICACION Y CURADO

La dosificación es el primer paso de todo el proceso. Al ser el inicial resulta fundamental, pues de una correcta dosificación van a depender la mayoría de las características de los hormigones, tanto si lo consideramos en estado fresco como fraguado y endurecido.

En la dosificación se considerará fundamentalmente la cantidad de agua aportada, pero también la calidad de la misma.

Respecto a la calidad necesaria pueden utilizarse

aguas potables, aguas razonablemente limpias o exentas de impurezas, aguas sin materia orgánica, admitiéndose incluso agua de mar para fabricar hormigones en masa, adoptando alguna precaución respecto a la resistencia final exigible.

En el art. 6 de la EH-91 se enumeran las siguientes condiciones que deben poseer las aguas a utilizar:

- Exponente de hidrogeno pH (UNE 7.234): > 5
- Sustancias disueltas (UNE 7.130): $< 15 \text{ gr/l}$ (15.000 p.p.m.)
- Sulfatos expresados en SO. (excepto para el cemento SR, en que se eleva este limite a 5 gramos por litro (5.000 p.p.m.)) (UNE 7.131): $< 1 \text{ gr/l}$ (1.000 p.p.m.)
- Ión Cl para hormigón con armadura (UNE 7.178): $< 6 \text{ gr/l}$ (6.000 p.p.m.)
- Hidratos de Carbono (UNE 7.132): 0
- Sustancias orgánicas solubles en éter (UNE 7.235): 15 gr/l (15.000 p.p.m.)

y a falta de más precisión admite las sancionadas por la práctica. Caso de duda prescribe el análisis.

Resulta evidente que la norma al permitir las sancionadas por la práctica, de alguna manera deja un margen amplio de interpretación, aunque

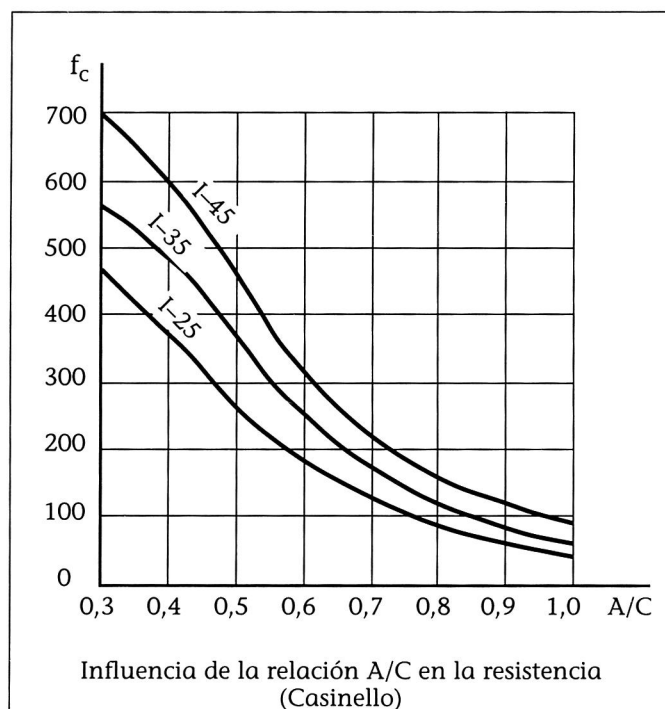


Figura 1

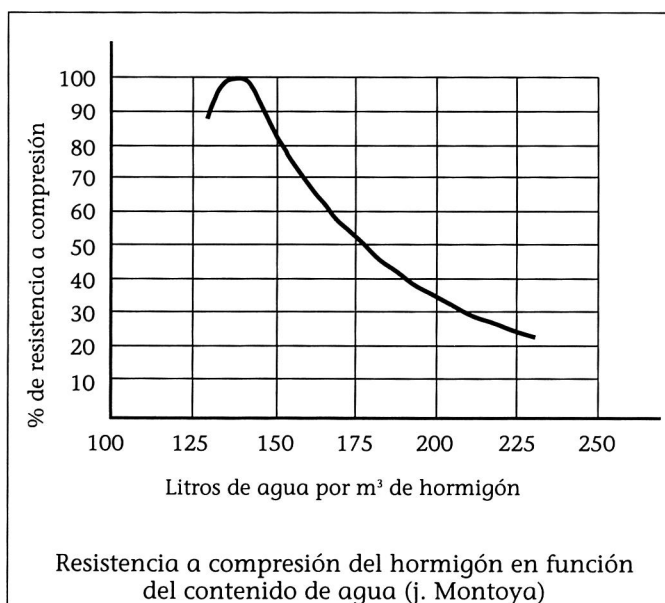


Figura 2

Litros de agua por m³ de hormigón							
Consistencia del hormigón	Asiento (cm)	Grava y Arena natural (mm)			Arido machaqueo (mm)		
		80	40	20	80	40	20
Seca	0-2	135	155	175	155	175	195
Plástica	3-5	150	170	190	170	190	210
Blanda	6-9	165	185	205	185	205	225
Fuida	10-15	180	200	220	200	220	240

Figura 3

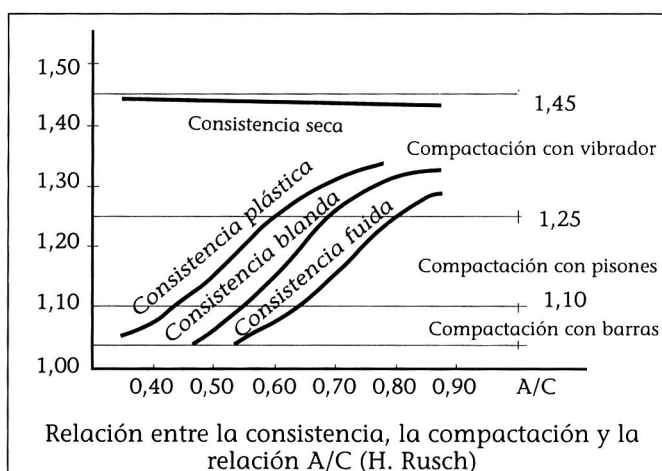


Figura 4

es claro que la calidad tiene que mantenerse dentro de ciertos límites y cumplir un mínimo de exigencias.

Pero quizás tan importante o más que la calidad, se nos presenta la cantidad. El exceso o la falta de agua, puede provocar una situación delicada.

La modificación de la relación agua-cemento, exhaustivamente analizada, produce caso de exceso una primera y no única consecuencia importantísima. Disminución de la resistencia. En el extremo opuesto, la escasez o falta de agua, no solo dificultará su puesta en obra, sino que al no hidratarse la totalidad del cemento, conducirá igualmente a pérdida de resistencia. (figura 1 y figura 2)

Además en ambos casos la consistencia o la compacidad, resultarán también afectadas. (figura 3 y figura 4)

Sin embargo la cantidad de agua aportada en una correcta dosificación, es siempre mayor de la estrictamente precisa para que todo el cemento se hidrate. De hecho para la total reacción de silicatos bi y tricálcicos se precisa entre un 20 y un 25% del peso de los mismos. Para el aluminato, la proporción aumenta hasta el 40% de su peso. De acuerdo con los porcentajes con que intervienen cada uno de ellos, bastaría una aportación de agua equivalente al 25% del peso del cemento pa-

ra conseguir una total reacción química del mismo y alrededor del 40% para su total hidratación. El resultado sería un hormigón, correcto bajo el punto de vista resistente, pero escasamente manejable. Se requiere una mayor proporción pues es preciso mojar los áridos, dotar a la pasta de la necesaria trabajabilidad, posibilitar que el hormigón no se resienta cuando una parte se evapore tanto por influencias climáticas como por las propias reacciones exotérmicas internas, sin olvidar futuras migraciones debidas a las solicitaciones actuantes. De ahí que la cantidad que se incorpora alcanza mayores porcentajes.

En la figura 5 puede observarse, la composición volumétrica de los componentes de la lechada de cemento en función de la relación agua/cemento y un grado de hidratación igual a la unidad, entendiendo por tal la relación entre el peso del cemento hidratado y el peso del hidratable.

Se ve igualmente como al aumentar la relación agua/cemento, disminuye la lechada de cemento que contribuye decisivamente a la resistencia, poniéndose de manifiesto una vez más la gran importancia del agua en la consecución de la resistencia.

A la vista del gráfico y retomando el dato ante-

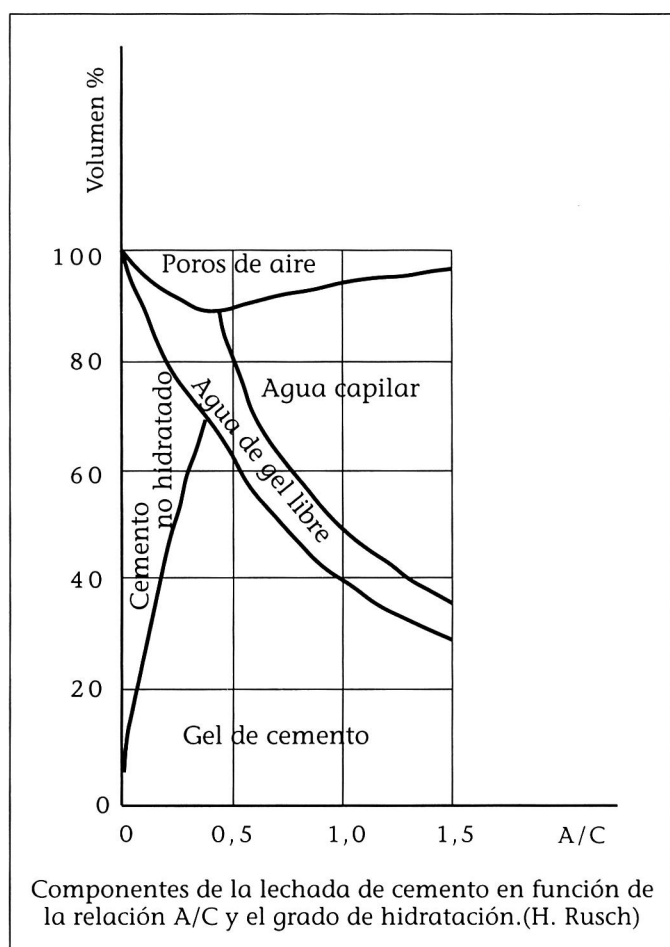


Figura 5

Ambiente I: Estructuras en interiores de edificios o medios exteriores de baja humedad (no se sobrepasa el 60% de la humedad relativa más de 90 días al año).

Ambiente II: Estructuras en exteriores normales (no agresivos) o en contacto con aguas normales o terreno ordinario.

Ambiente III: Estructuras en atmósfera agresiva industrial o marina o en contacto con terrenos agresivos o con aguas salinas o ligeramente ácidas (EH-91)

Figura 6

Limitación a los contenidos de agua y cemento

Ambiente	Relación A/C máx.	Contenido mín. cemento (kg/m³)	
		Hormigón en masa	Hormigón en masa
I	0,65	250	250
II	0,60	175	275
II h	0,55	175	300
II f	0,50	200	300
III	0,55	200	300
III h	0,50	200	325
III f	0,50	200	3325

Figura 7

rior de una aportación estricta de agua equivalente al 40 % del peso de cemento y un grado de hidratación igual a la unidad, todo el cemento se hidratará. Cualquier dosificación que establezca una relación A/C inferior a 0,4 solo permitirá la hidratación de una cantidad de cemento equivalente a 2,5 veces el peso de agua que se haya aportado, con gran incidencia en la resistencia.

El conocimiento que se tiene de todos estos procesos, permite afirmar que la cantidad de agua precisa para una correcta dosificación, está bastante estudiada respecto a su relación con el cemento, con muy ligeras variantes según las normativas aplicadas. (Las figuras 6 y 7 recogen las especificaciones de la EH-91 y las figuras 8 y 9 las basadas en el CEB).

Respecto a los áridos no ocurre lo mismo. Las diversas variables que deben tenerse en cuenta, naturaleza, forma, tamaño, granulometría .. etc, plantean una serie de cuestiones que por lo general quedan mejor resueltas por la experiencia que por la teoría. Se debe a Kluge el dar por vez primera y con carácter orientativo unas tablas indicando el agua precisa según las distintas composiciones granulométricas y consistencias seca-plástica, simplificadas posteriormente por el mismo (figura 10).

Guía de diseño de la CBE	
1. Ambiente seco	Localidades secas o de humedad baja y constante. La humedad relativa solo excede en pocas ocasiones del 70% interiores de edificios.
2. Ambiente húmedo	2.a Ambientes donde son poco frecuentes las grandes variaciones de humedad relativa presentándose sólo ocasionalmente riesgos de condensaciones.
	2.b Ambientes donde son poco frecuentes las grandes variaciones de humedad relativa presentándose sólo ocasionalmente riesgos de condensaciones.
3. Ambiente húmedo con heladas y agentes de deshielo	Elementos exteriores expuestos a vientos y a la intemperie o agua y suelos no agresivos y heladas y agentes ligeramente ácidos
4. Ambiente marino	Elementos en la zona de salpicadura o sumergidos en agua de mAr y una cara expuesta al aire. Elementos expuestos a una atmósfera saturada y con sales

Figura 8

Con todo, las formulas más sencillas y manejables y que gozan de general aceptación fueron establecidas por Feret:

$$A = 0,235 C + 0,220 F + 0,030 G$$

(arena de río o mina)

$$A = 0,235 C + 0,255 F + 0,040 G$$

(arena de machaqueo)

En resumen, la cantidad de agua tiene enorme importancia en todo la vida posterior del hormigón, pues no solo afectará a la resistencia, trabajabilidad, reología o corrosión de las armaduras. También su compacidad y por tanto su resistencia a la acción de agentes externos o su impermeabilidad, van a resultar afectadas.

Hay sin embargo un período en la vida del hormigón, durante el cual no solo necesitará el agua de dosificación, sino nuevas e importantes cantidades. Nos referimos al **curado**, proceso vital para endurecer y alcanzar adecuadamente las resistencias exigibles en función de las acciones a que sera sometido. Durante una etapa relativamente corta, el hormigón necesitará aportes de agua para ir alcanzando dureza y resistencia y debe indicarse que con el agua de curado, deben extremarse las precauciones en relación a la calidad de la misma, pues por ejemplo el agua de mar no debe utilizarse, ante la acción corrosiva que pueden provocar en las armaduras las sales cloradas si llegan a ellas, tanto por efecto capilar como por difusión.

El agua durante el curado, ayuda a crear las condiciones ambientales precisas para favorecer el fraguado y endurecimiento en los plazos adecuados, al mismo tiempo que puede minimizar los efectos de una retracción o afogamiento incipiente.

La aportación de agua puede efectuarse por diferentes procedimientos. Riego directo, pulverización con aspersores, protección superficial con laminas plásticas, arena húmeda, esteras mojadas.,etc.

Uno de los procedimientos que pueden resultar de más fácil aplicación, es la cubrición con láminas plásticas que por su propia impermeabilidad impiden que el agua evaporada del hormigón se

Limitación a los contenidos de agua y cemento (ENV-206)				
Ambiente	Relación A/C máx.		Contenido mín. cemento (kg/m³)	
	Hormigón armado	Hormigón pretensado	Hormigón armado	Hormigón pretensado
1	0,65	0,60	260	300
2.a	0,60	0,80	280	300
2.b	0,55	0,55	280	300
3	0,50	0,50	300	300
4	0,55	0,55	300	300

Figura 9

pierda. Al contrario, al saturarse la atmosfera creada entre superficie hormigonada y tela plástica, se consigue un doble efecto. Durante el día, bien la temperatura externa, bien las propias reacciones exotérmicas internas, en ambos casos favoreciendo la evaporación, permiten la creación de esa atmosfera saturada que mantiene mojada a la superficie del hormigón e impide que desde la masa se trasmita agua al exterior. Cuando la temperatura externa baja o las reacciones exotérmicas han concluido, el vapor se condensa y cae en forma de gotas sobre la superficie del hormigón que la absorbe. Es un procedimiento de no alto coste y razonablemente válido, pues aunque no incorpora adición alguna de agua, impide o minimiza las posibles pérdidas que se producirían. Sin embargo el curado así realizado puede no ser totalmente efectivo, precisamente por no haberse aportado la necesaria cantidad de agua para ello.

Otros curados se obtienen colocando esteras, arena o serrín, previamente empapados que cubren la superficie del hormigón. En este caso y conforme se vayan desecando debe procederse a mojarlos nuevamente. Por las marcas o señales que pueden dejar sobre la superficie, no son procedimientos aptos para curar hormigones vistos.

Un método tradicionalmente usado es el riego directo mediante manguera, aspersores, pulverizadores.. etc. Si el procedimiento empleado provoca una caída mansa del agua es perfectamente valido, seria el caso de pulverizadores. Pero si el agua aportada lleva alguna presión y cae sobre hormigones frescos, provoca un lavado con pérdida de lechada superficial, rica en cemento y que ha fluido durante el vibrado. El resultado sera un empobrecimiento del hormigón y el sistema no resulta valido ya que quedara afectada la resistencia. Por esta razón es recomendable no regar el hormigón directamente hasta que no hayan transcurrido algunas horas y el proceso de fraguado este muy avanzado.

En esta situación debe considerarse que ya no se provoca un lavado superficial, pero si las condiciones climáticas exteriores son adversas, - sequedad,

calor o viento - cuando se inicia el curado ya ha podido comenzar la retracción -térmica e hidráulica- y con ella el ahogamiento superficial, con su secuela de aparición de fisuras.

En consecuencia y aceptando que se trata de una práctica habitual, entendemos que el curado mediante riego directo con agua dotada de alguna presión, es un método imperfecto si se actúa directamente sobre superficies de hormigón en los primeros instantes de su vida. Por el contrario nada hay que objetar si el método se aplica sobre los encofrados, especialmente cuando estos poseen permeabilidad, pues al mantenerlos mojados, se favorece el curado siempre que se prolongue el tiempo necesario nunca menos de 7 días-, para que el hormigón alcance las cotas de resistencia marcadas.

El curado mediante la aportación simultanea de calor y humedad, a base de vapor a presión normal o elevada, resulta un método muy efectivo, especialmente si se pretenden acelerar los plazos para alcanzar altas resistencias rápidamente, sin necesidad de tener que recurrir al empleo de cementos de altas resistencias iniciales.

Normalmente un curado con vapor precisa de instalaciones más complejas unido a un mayor coste. Por ello no suele ser normal su utilización a pie de obra, salvo en el caso de una prefabricación **in situ**, empleo de encofrados especiales o con plazos de ejecución muy cortos que fueren el alcanzar altas resistencias en poco tiempo. Su uso queda pues restringido a instalaciones industriales, normalmente dedicadas a la prefabricación de elementos.

Con el empleo de vapor en el curado, se introduce el concepto de **maduración del hormigón**, mediante el que se establece que la formación de la resistencia esta ligada a la duración del endurecimiento y a la temperatura.

A.G. Saúl en 1951 y S.G. Bergstrom en 1953, publicaron los resultados de un conjunto de experiencias que intentaban encontrar la relación entre la resistencia y las dos variables anteriores, endurecimiento y temperatura. Aparece así lo que se conoce como **grado de madurez**.

Porcentaje de agua absorbida, para consistencia plástica y A/C = 0,55 (F. Kluge)									
Absorción de agua	Aridos								
	Tamaño de granos en mm								
	0-0,25	0,25-0,50	0,50-1	1-2	2-4	4-8	8-16	16-32	32-64
% parte sólida	40	23	15	10	8	7	6	5	5
x de material	0,40	0,23	0,15	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05
% en peso	14,8	8,5	5,6	3,7	3,0	2,6	2,2	1,9	1,8

Figura 10

Matemáticamente la relación quedó contenida en un formulación muy simple:

$$R = Ej (T + 10)$$

en la cual T representa la temperatura media del día en el hormigón y j el numero de días durante los que se ha mantenido la misma. De esta formulación se deriva una conclusión:

"Hormigones de igual composición, endureciendo a distintas temperaturas, alcanzan la misma resistencia si coincide su grado de maduración"

3. RETRACCION

La retracción es un fenómeno inherente al hormigón cuando fragua y endurece en atmosfera normal o seca. Se caracteriza por un acortamiento o disminución del volumen final y quizás la secuela más llamativa sea la fisuración que puede provocar. Fisuración con incidencia e importancia varia-

ble en el plano resistente, pero siempre preocupante como camino que se abre para la acción de agentes externos que pueden afectar tanto al hormigón en si como a las armaduras.

Numerosas experiencias han incidido sobre este fenómeno, intentando minimizar sus efectos sin éxito definitivo. Ni siquiera mediante el empleo de cementos de fraguado expansivo que contrarrestaran los acortamientos experimentados.

La causa de esta deformación no es única pues no es único el tipo de retracción que aparece. De hecho coexisten e influyen tanto la retracción hidráulica originada por la pérdida de agua, como la térmica, debida al inicial incremento de temperatura que producen las reacciones exotérmicas de los componentes del cemento al fraguar, lo que favorece a su vez la evaporación del agua, seguida de posterior enfriamiento en busca del equilibrio térmico interno masa-externo ambiente. Algunos autores apuntan también el efecto de retracción que provoca la carbonatación superficial del hormigón.

Se trata por tanto de un proceso complejo que se ha analizado para cada una de las formas en que se manifiesta, con conclusiones similares respecto a sus consecuencias finales de fisuración, pero cada una se desarrolla en forma diferente, fundamentalmente en cuanto a rapidez de propagación de las fisuras, mucho más lentamente las debidas a retracción hidráulica que las de origen térmico.

Ciñendonos a la que tiene su origen principal en el agua, debe añadirse que se produce cuando hay pérdida de la misma. Aceptando que en una dosificación estrictamente mínima el agua represente alrededor del 40 % del peso del cemento, vimos anteriormente que las necesidades para realizarse todas las reacciones químicas quedaban cubiertas con una cantidad equivalente al 25 % de su peso, no necesitando el 15 % restante que queda incorporada a la mezcla como agua vaporizable.

Podríamos decir que durante el fraguado el agua incorporada se reparte en:

- agua de cristalización
- agua de gel
- agua de adsorción
- agua capilar

La que verdaderamente interviene de forma activa en las diversas reacciones es la de cristalización. Las tres ultimas no reaccionan pero son necesarias, especialmente el agua de gel, para facilitar los intercambios precisos en las reacciones que se originan.

En condiciones normales tanto el agua de adsorción como el capilar, pueden ser eliminadas. Para que el agua de cristalización y la de gel se pierdan se requieren muy fuertes incrementos de temperatura o presión.

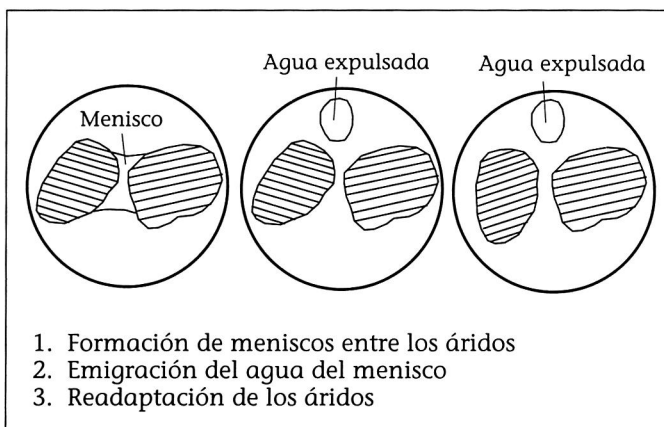


Figura 11

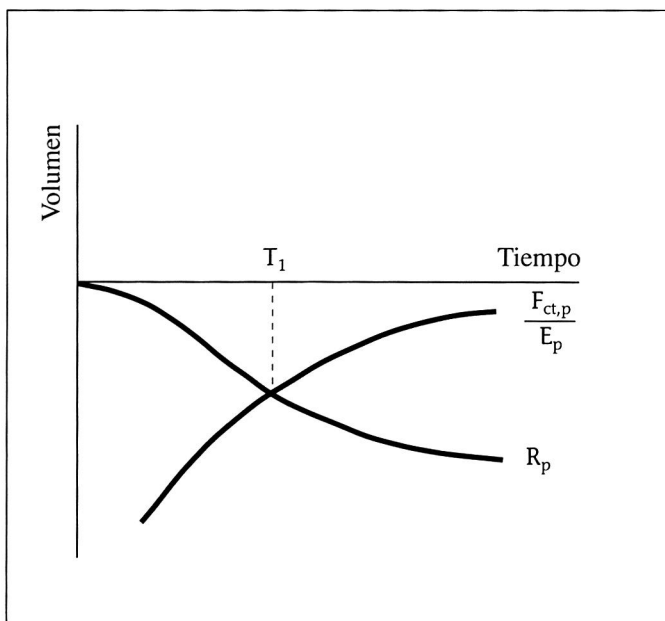


Figura 12

Cuando dos cuerpos se ponen en contacto, existe una tendencia natural a intercambios mutuos ya sea de temperatura, humedad, .. etc, hasta que lleguen a un equilibrio. Al mezclar y amasar los diferentes componentes del hormigón, ese equilibrio se crea internamente y el fraguado en condiciones normales se inicia en un ambiente interno con mayor grado de humedad que el exterior y que de forma progresiva alcanza también mayor temperatura que el ambiente que le rodea. Siguiendo la tendencia natural expuesta la masa de hormigón busca el equilibrio con el exterior, tanto en temperatura como en humedad. Cuando la humedad relativa ambiental es capaz de absorber humedad del hormigón, se produce una emigración de agua desde el interior de la mezcla hacia el exterior y en su recorrido produce capilares y deja poros.

Al eliminarse el agua de adsorción, los meniscos que en su momento se originaron entre los áridos desaparecen y con ellos la tensión superficial creada, provocándose un acercamiento de los áridos que llena los huecos dejados por la emigración del agua y como suma final, un acortamiento del volumen del hormigón (figura 11).

Existe además una realidad física y es que el volumen final del cemento fraguado, debido a las tensiones de cohesión internas que se generan es menor, en un 4,5 % equivalente aproximadamente al 1% del volumen total del hormigón, que la suma de los volúmenes de cemento y agua constituyentes, lo cual de por sí ya implica un menor volumen final.

4. CONDICIONES DE FISURACION POR RETRACCION

Si los acortamientos los puede realizar el elemento hormigonado libremente, sin ningún tipo de coacción, la deformación no tiene porque traducirse necesariamente en fisuras. Pero si algún enlace o nudo los impide, la fuerza de la retracción es tan importante que acabara rompiendo la estructura interna que cohesionan la masa y apareceran las fisuras. Lógicamente este efecto es mayor cuanto menor sea la resistencia alcanzada por el hormigón. Por eso el afogamiento, que es una retracción temprana con fuerte incidencia de las diferencias térmicas, se produce muy rápida y superficialmente, lo que no ocurre con la retracción en general, de consecuencias mucho más lentas en el tiempo.

La condición de fisuración por retracción del hormigón consiste en la imposibilidad de deformarse. Aparece en el momento en que la **retracción potencial** $-R_p$ sin deformación en el tiempo, se iguala al cociente entre la **resistencia a tracción potencial** $-F_{ct,p}$ y el **módulo de rotura potencial** $-E_p$.

Por **retracción potencial** $-R_p$ -, entendemos la re-

tracción medida inmediatamente después de producirse la rotura, cuando la tensión ha desaparecido. Alcanza un valor menor que la retracción libre.

La **resistencia a tracción potencial** $-F_{ct,p}$ -, coincide con la resistencia a tracción bajo carga lenta y es menor que la que se obtiene bajo carga aplicada a velocidad normal.

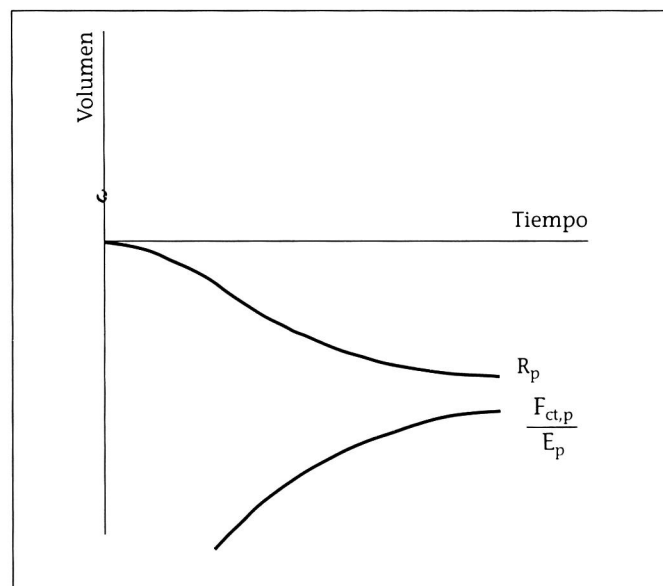


Figura 13

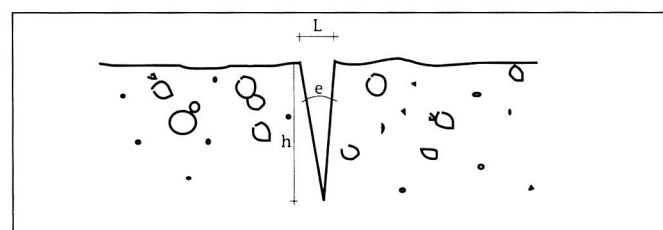


Figura 14

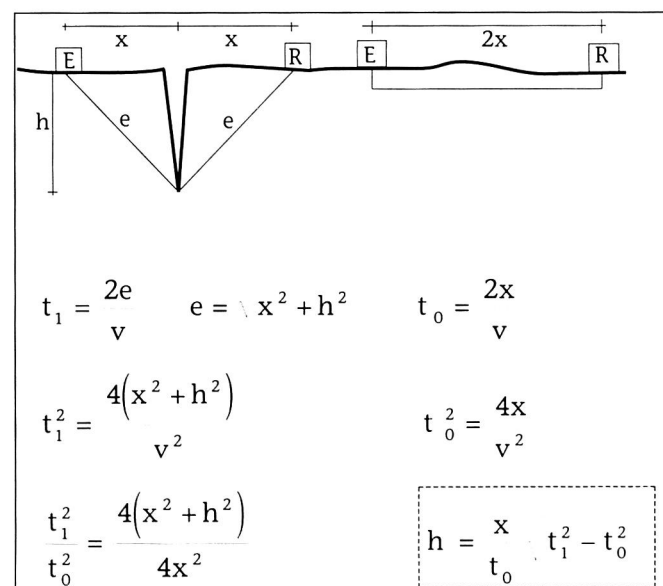


Figura 15

El **módulo de rotura potencial a tracción -E_p**, es algo menor que el de elasticidad.

Si representamos mediante curvas los dos miembros de la igualdad anteriormente expresada, vemos que la rotura se produce cuando las curvas representativas se cortan, de forma tal que no existirá fisuración si las gráficas no se cruzan. Ello puede ocurrir cuando es bajo el valor de la **retracción potencial** o cuando el cociente entre $F_{ct,p}$ y E_p es alto (figura 12 y figura 13).

Como el valor que alcanza la retracción hidráulica no suele ser inicialmente grande, lo lógico es que el fraguado concluya sin que aparezcan fisuras debidas a ella. Sin embargo en numerosas ocasiones y especialmente cuando la relación superficie-espesor de las piezas hormigonadas es alto, aparecen muchas fisuras superficiales. Es el **afogamiento** anteriormente enunciado. Su presencia se ve favorecida por las altas temperaturas exteriores y el viento.

Es importante analizar hasta que punto son peligrosas las fisuras debidas a la retracción y al afogamiento, cuantificando su anchura y la profundidad alcanzada.

La anchura alcanzada es función del ángulo de

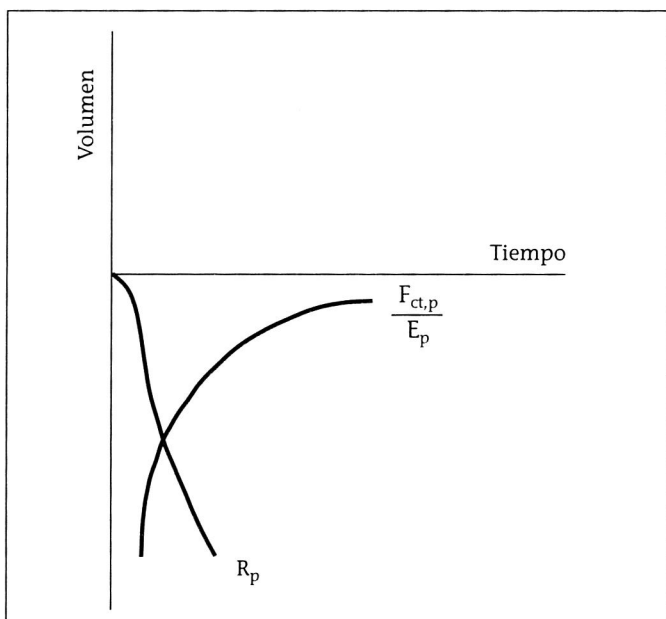


Figura 16

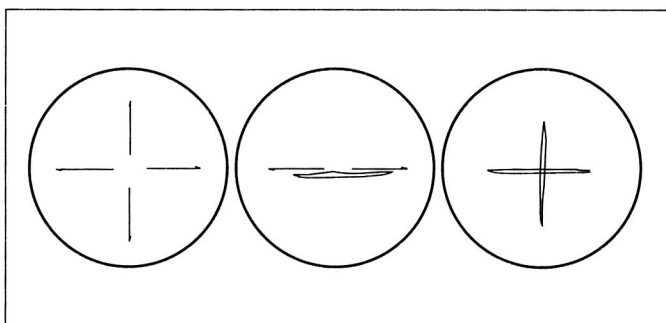


Figura 17

abertura y de su profundidad, de acuerdo con la expresión siguiente (figura 14):

$$L = e \times h$$

expresión en la cual el ángulo e vale:

$$e = \frac{(1 + \nu) \times F_{ct,p}}{E_p}$$

y ν es el coeficiente de Poisson del hormigón.

Por tanto para un hormigón H-175 Kp/cm², con una $F_{ct,p}$ de 17 kp/cm², un coeficiente de Poisson ν de 0,2 y un E_p de 100.000 Kp/cm², se obtiene para L un valor aproximado de :

$$L = \frac{1}{5000} \times h$$

de donde se desprende que no es fácil detectar las fisuras de retracción, siendo recomendable mojar la superficie, ya que por capilaridad el agua penetra en las que puedan existir y al secarse el entorno los bordes siguen húmedos y se acusan.

La profundidad puede evaluarse razonablemente a partir de la medición del tiempo que tarda en recorrer una distancia en zona no fisurada, determinada por la situación de emisor y receptor y por tanto conocida, una onda introducida en el hormigón considerado como medio homogéneo. Sabiendo el tiempo y la distancia recorrida, no ofrece dificultad alguna determinar la velocidad de propagación.

La repetición de la medición, sobre idéntica distancia pero en zona fisurada, proporcionará tiempo diferente al recorrer la onda distancias distintas, pues la fisura la obliga a modificar su recorrido sin alterar su velocidad. El proceso descrito, ampliamente conocido se puede expresar como sigue (figura 15).

Las fisuras debidas al afogamiento aparecen muy pronto y son más aparatosas que peligrosas en el plano resistente. Sin embargo crean unas vías de penetración muy claras para agentes externos capaces de dañar al hormigón y especialmente a las armaduras, ya que pueden alcanzar profundidades que traspasen la capa de recubrimiento de las mismas. Gráficamente la aparición de fisuras

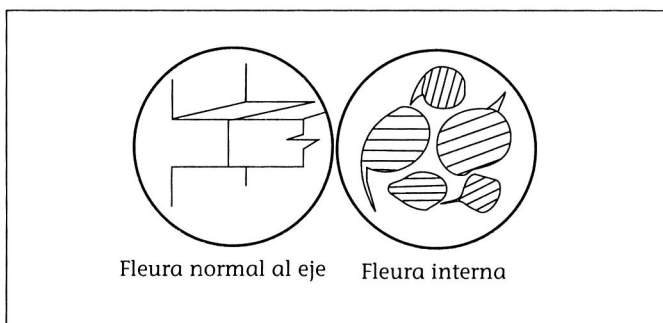


Figura 18

responde a un esquema en todo similar al de la retracción (figura 16).

Las fisuras de claro origen hidráulico, se propagan con lentitud y tardan cierto tiempo en detectarse, según se desprende del cuadro siguiente, que indica la profundidad alcanzada por las fisuras en función del tiempo:

1 día:	0,5 mm
7 días:	2 mm
28 días:	4 mm
90 días:	7 mm
360 días:	15 mm

En general la distribución de estas fisuras es irregular.

Cuando aparecen por ahogamiento suelen cortarse en ángulos prácticamente rectos. La razón estriba en la existencia previa de tracciones en todas direcciones en la superficie. Así cuando una fisura se origina, la tensión normal a ella se elimina pero permanece la tensión paralela a la fisura originada que a su vez puede ser causa de una nueva fisura, en este caso ortogonal a la anterior (figura 17).

Si se deben a retracción hidráulica, es normal que se acusen en una única dirección, coincidente en elementos superficiales con la dirección de las armaduras. Si se trata de elementos lineales, la fisuración suele ser normal al eje de la pieza y no se limita a una sola cara.

Con todo la fisuración más peligrosa es aquella que puede darse en el interior de los elementos de hormigón, sin que se aprecien externamente. Suelen producirse cuando el tamaño de los áridos es grande, de forma que actúan impidiendo la libre retracción de la pasta rica en cemento. Cuando esta deformación se produce, la resistencia a compresión del hormigón disminuye (figura 18).

En el plano práctico y preventivo las opciones más correctas y racionales para minimizar los efectos negativos de las retracciones, pasan por la creación de juntas e incluso por desfases en el tiempo, del hormigonado de distintas zonas de una misma pieza o elemento, posibilitando así la libre deformación del hormigón en su proceso de fraguado y endurecimiento.

5. ENTUMECIMIENTO. CONDICIONES DE FISURACION

El entumecimiento se produce fundamentalmente por el incremento de volumen que en presencia del agua, experimentan determinados componentes del hormigón, desarrollandose unas fuerzas expansivas que disgregan los enlaces que crearon silicatos y aluminatos.

En todos los cementos Portland existe una proporción variable de cal libre que si puede hidratar-

se rápidamente, antes de finalizar el fraguado, no suele plantear problemas. Ahora bien cuando la hidratación es lenta y la misma se produce durante el endurecimiento, el sistema de cristalización se modifica, propiciandose un aumento del volumen aparente de la cal, origen de grandes presiones como en su día puso de manifiesto Le Chatelier.

Más peligroso es aun el OMg, pues su expansividad por similares motivos que la cal, es más lenta pero más importante.

Los sulfatos cálcicos, precisos para regular el tiempo de fraguado, influyen en la hidratación de los aluminatos tricálcicos, de forma que se precisa tanto más sulfato cuanto más aluminato existe. Sin embargo un exceso de sulfatos, actuando conjuntamente con aluminatos ricos en cal, propiciarán la formación de sulfoaluminatotricálcico hidratado o ettringi-

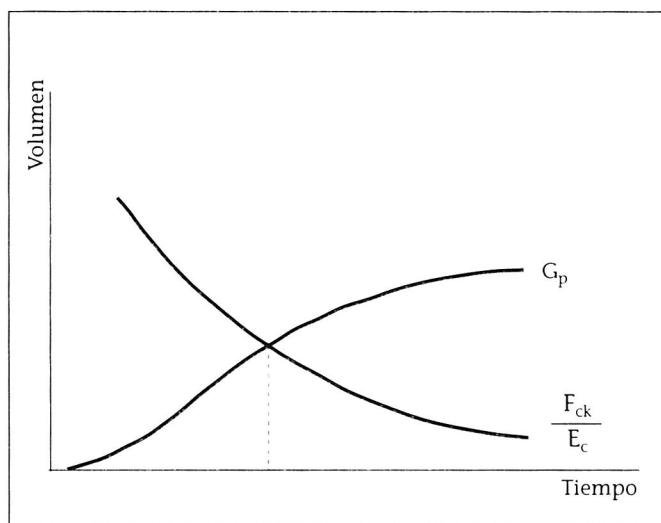


Figura 19

Influencia de la temperatura ambiente

Tiempo transcurrido	Profundidad alcanzada
1 hora	20 cms
24 horas	80 cms

Figura 20

Disminución en un 10% de la temperatura ambiente

A profundidad de	Tiempo necesario
10 cms	1 hora
35 cms	12 horas
50 cms	24 horas

Figura 21

ta, más conocido como sal de Candlot, compuesto peligrosísimo pues su entumecimiento -del orden de un 225% mayor que los componentes básicos- produce inexorablemente la ruina del hormigón.

Por último indicar que también pueden ser causa de deformaciones por entumecimiento, la mezcla de conglomerantes incompatibles, entendiendo como tales aquellos que al mezclarse dan compuestos de resistencia inferior a la media de cada uno de ellos por separado. Así ocurre cuando se mezclan cementos Portland y los muy sulfatados o los Portland con los aluminosos, produciéndose importantes aumentos de volumen.

Respecto a la aparición de fisuras debidas a este proceso, en términos generales puede decirse en analogía con la retracción que un hormigón rompe por entumecimiento, cuando el cociente entre la resistencia a compresión F_{ck} y el módulo de rotura a compresión E_c , igualan al entumecimiento, lo que se expresa por la formulación siguiente:

$$G_p = \frac{F_{ck}}{E_c}$$

Gráficamente las curvas a considerar tienen carácter similar a cuanto se ha indicado para la retracción (figura 19).

6. CONGELACION. CONDICIONES DE FISURACION Y SUS SECUELAS

Los hormigones normales tienen una baja conductividad térmica y aunque depende de diversos factores como pueden ser entre otros el contenido de agua, el tipo de árido o la proporción de huecos, se sitúa en torno a 0,003 cal/cm.s.°C.

De hecho en un macizo de hormigón se precisa una hora para que la temperatura ambiente se aprecie a 20 cms de profundidad o para que una disminución ambiental de 10 °C se traduzca en una disminución de temperatura de solo 1 °C a 10 cms de profundidad (figuras 20 y 21).

En consecuencia las variaciones térmicas son asimiladas muy lentamente por el hormigón. lo que nos conduce a considerar que la congelación del agua existente en el interior del mismo requiere bastante tiempo para que se produzca. Si por el contrario, existen vías de penetración a modo de capilares o alta porosidad, la situación cambia notablemente pues los intercambios térmicos ya siguen pautas diferentes y mucho más rápidas.

Cuando por las variaciones climáticas el agua confinada en el interior del hormigón cristaliza, aumenta de volumen alrededor del 5 % y crea fuertes tensiones internas provocando deformaciones en forma de fisuración.

El hecho de que la temperatura se sitúe por debajo de los 0 °C no implica necesariamente la aparición

de fisuras por congelación del agua, entre otras razones porque solo se congela la existente en los grandes poros. El agua submicroscópica no se congela como no sea a bajísimas temperaturas, situación difícil de producirse si se tiene en cuenta la lenta modificación térmica que se produce en el interior de la masa de hormigón. Ello equivale a decir que se precisan reiterados ciclos de congelación y descongelación y una atmosfera interna saturada, para que la fisuración se manifieste en forma visible, mediante la aparición de exfoliación paralela a la superficie que al desprenderse propician la entrada de agua desde el exterior y vuelve a comenzar el proceso.

La comprobación de la congelación del agua existente en los hormigones se efectúa mediante reiterados ciclos completos de congelación y descongelación, observándose el comportamiento de la masa y sobre todo la textura y aspecto de la superficie, así como su volumen final y la resistencia a tracción. Se trata siempre de ensayos de muy larga duración y en consecuencia irrealizables en lo que puede ser la duración normal de la ejecución de una estructura o cimentación, lo que restringe sus posibilidades a los laboratorios.

7. FLUENCIA

La función primordial que deben cumplir los elementos estructurales de hormigón es la de resistir adecuadamente las sollicitaciones que se presenten, lo que llevan a cabo a partir del comportamiento de los componentes, fundamentalmente cemento y áridos. El agua en si no es un elemento resistente pero subsiste en el interior del hormigón y resulta conveniente conocer su comportamiento cuando comienzan a actuar las acciones externas.

Al ponerse estas de manifiesto, el agua contenida en poros y capilares queda sometida a presiones superiores a la existente en el exterior, lo que favorece su lenta expulsión y la aparición de vacíos que son ocupados por las partículas sólidas, igualmente sometidas a las acciones, provocándose una paulatina redistribución interna que lleva aparejada deformaciones diferidas en el tiempo. Aparece así la Fluencia, fenómeno descrito en 1905 por Woolson.

Las más afectadas son la adsorbida y la capilar. Resulta por tanto evidente que su mayor o menor presencia, aspecto íntimamente ligado a la relación A/C y a la edad del hormigón, unida a otras causas, es importantísima en todo el proceso que deviene en la Fluencia.

Tanto la relación A/C como la incidencia de la edad se han podido comprobar experimentalmente.

La importancia de la citada relación se ve al sumergir una probeta, deformada bajo la acción de carga constante y posteriormente descargada, en agua. La probeta así tratada experimenta un entu-

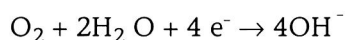
mecimiento al volver a ocupar el agua parte de los vacíos que su expulsión produjo y en consecuencia, la deformación plástica permanente que subsiste por efecto de la fluencia, disminuye.

La incidencia de la edad, se pone de manifiesto por el valor alcanzado por la deformación en hormigones jóvenes, bastante mayor que en hormigones con más edad, lo que se explica por la menor rigidez interna que posee la estructura de los hormigones recientes, debida no sólo a la menor resistencia alcanzada sino a la presencia de mayor cantidad de agua interna, aun no eliminada, lo que le concede una mayor capacidad de deformación.

8. CORROSION DE LAS ARMADURAS

En los metales existe una clara tendencia a convertirse de nuevo en los minerales de donde proceden. Proceso de reversibilidad que generalmente se lleva a cabo mediante oxidaciones, a través del contacto del metal con el oxígeno, favorecido por la humedad ambiental.

De esta tendencia a la oxidación no se excluye el acero, ya que cuando entra en contacto con el agua, ésta queda cargada positivamente por los iones metálicos que aquel desprende -reacción anódica-, mientras que sobre el acero quedan los electrones y por tanto cargado negativamente. Electrones que a su vez pueden ser captados por el oxígeno molecular del medio acuoso -reacción catódica-, según el siguiente esquema



El resultado es un acero descargado de sus electrones y un medio externo que ha equilibrado sus cargas positivas. La situación es prácticamente coincidente con la inicial y todo el proceso de liberación de iones metálicos y captación de electrones por el oxígeno molecular esta en condiciones de reproducirse indefinidamente, de forma que únicamente terminará cuando todo el acero haya desaparecido ó cuando se adopten medidas que impidan la corrosión descrita.

Para que en el hormigón armado se reproduzca el proceso electroquímico descrito, causa de la corrosión de la armadura, se requieren una serie de factores:

1. Existencia de un electrolito: Determinados componentes del mortero de cemento, como el hidróxido de cal, pueden disolverse en el agua libre que existe en los hormigones, llenando los poros en forma de solución concentrada y actuando como un buen electrolito.

2. Diferencia de potencial: Deben crearse un ánodo y un cátodo, bien por diferente composición de los aceros, bien por la presencia de diferentes clases de cementos, bien por falta de homogeneidad en las sollicitaciones,.. etc.

3. Presencia de Oxígeno, además de agua: Es necesario para que el hierro libre reaccione con el Oxígeno y posteriormente con el agua, formándose hidróxido férrico, $\text{Fe}(\text{OH})_3$

4. Presencia de sulfuros o sales cloradas: Pueden estar presentes en los componentes del hormigón o proceder del exterior -atmósferas agresivas, por ejemplo- que actúen de ánodo y por hidrólisis posibiliten la formación de hidróxido férrico, si bien para que la reacción tenga lugar se requiere la existencia de iones de hierro.

Si suponemos que se dan todas las condiciones para que la corrosión comience, puede optarse por permitir que continúe y se destruya la armadura y con ello el hormigón ó se intenta detener el proceso. El propio hormigón en la mayoría de los casos posibilita la autoprotección de las armaduras, mediante la creación de una fina capa protectora que las envuelve, originada normalmente por la reacción de los iones metálicos con el hidróxido cálcico producido al disolverse, en el agua depositada en los poros, la cal libre liberada durante el fraguado. Se produce así la denominada pasivación de la armadura, proceso favorecido por el carácter claramente alcalino del hormigón con un pH en torno a 13.

A través de la pasivación se impide que las armaduras sigan cediendo iones, en forma de disolución anódica, por lo que resulta fundamental el mantenimiento de la capa pasivante para reducir drásticamente el proceso de corrosión.

Cuando los hormigones están bien dosificados y mejor compactados, existe una buena protección de las armaduras, pero también con frecuencia se ve alterado su pH, normalmente mediante la carbonatación superficial de la cal libre, neutralizada por el anhídrido carbónico del aire. Proceso tanto más acelerado cuanto más rápido se seque la superficie. Mediante estas reacciones el pH del hormigón se modifica sustancialmente y puede bajar situándose en torno a 8, - para algunos autores un pH de valor 11 ya posibilita el comienzo de la corrosión - adquiriendo carácter ácido la zona afectada y como consecuencia la posibilidad de la pérdida de la protección pasiva de las armaduras, si la carbonatación llega hasta la capa pasivante, inoperante en un medio ácido.

Todo dependerá de la rapidez en la carbonatación de las capas internas del hormigón. Afortunadamente la progresión es lenta, sin embargo no lo es tanto en hormigones porosos, característica frecuentemente ligada a altas relaciones A/C.

Si bien la sequedad superficial influye notablemente en la carbonatación, no solo afecta a la superficie del hormigón, también a los electrolitos, lo que dificulta en forma simultánea la oxidación de las armaduras, aunque haya disminuido o desaparecido el efecto de pasivación. Cuando los hormigones se encuentran en ambientes húmedos, no agre-

sivos, la carbonatación superficial se ralentiza y el peligro de oxidación disminuye.

Es decir los hormigones más vulnerables a la oxidación de sus armaduras son los expuestos a cambios climáticos frecuentes, lo cual ocurre en la inmensa mayoría de los edificios, lo que de nuevo justifica una llamada de atención sobre la conveniencia de proteger y aislar adecuadamente los elementos estructurales.

También la acción despasivante puede ser favorecida por la existencia de iones Cloro que eliminan la capa protectora. Iones que pueden ser aportados en gran medida por los cloruros utilizados como aceleradores de fraguado, muy comúnmente empleados. Como el cloro puede quedar libre sin reaccionar, si llega hasta las armaduras y su velocidad de penetración se estima proporcional a la $\sqrt{t}$, el ataque es posible, de ahí que su uso deba ser sometido a constante control y no sobrepasar las dosis establecidas. La EH-91 desaconseja su empleo en hormigones armados.

Por último y aunque no es frecuente su aparición en los hormigones, es obvio que cualquier elemento puede disolverse si existe el disolvente adecuado. Estaríamos ante una lixiviación que en el caso concreto que nos ocupa consistiría en la disolución de la capa pasivante.

De lo expuesto se deduce que la corrosión se presenta como una realidad grave en sus consecuencias. Para evitar su aparición dos aspectos deben ser tenidos en cuenta. En primer lugar una vigilancia estricta y severa durante todo el proceso de dosificación, ejecución, transporte y puesta en obra, con objeto de conseguir los más compactos, resistentes e impermeables hormigones que sea posible para garantizar toda las necesidades exigibles. En segundo lugar una adecuada protección de los elementos estructurales unido a una conservación ininterrumpida.

Ambas consideraciones adquieren toda su importancia en la casuística que nos ocupa, cuando se analizan las consecuencias de la oxidación de las armaduras, concretada en fisuraciones y manchas.

La fisuración, mucho más importante y preocupante que la aparición de manchas, se origina por el fuerte incremento volumétrico que experimenta el acero al oxidarse, entre 2 y 4 veces, manifestándose mediante sucesivas exfoliaciones concéntricas. En los hormigones armados, la corrosión provoca tan fuertes tensiones internas que llega a producirse el desprendimiento de los 3 o 4 cms de la capa de recubrimiento siguiendo la dirección de las armaduras, con un agravante añadido. Producida la fisuración el camino para nuevas agresiones desde el exterior ha quedado abierto y la situación aun más agravada si cabe, pues se facilita enormemente que la corrosión continúe, perdiéndose sección de acero y sección de hormigón y con ello capacidad resistente del elemento. Así pues la aparición de fisuras siguiendo el trazado de las armadu-

ras debe ser objeto de especial e inmediata atención y análisis.

Las manchas que el óxido pueda dejar en el hormigón, dan en principio un dato concreto. Hay armadura en proceso de corrosión y por tanto suponen un aviso no desdeñable.

Bajo el punto de vista de la estética, si no se trata de hormigones vistos o con funciones decorativas, las manchas pueden carecer de importancia. Es obvio que se apreciaran de forma inmediata las que se producen en elementos visibles, lo que no implica necesariamente ni carácter decorativo ni que se trate de hormigones vistos, pudiendo tratarse de elementos estructurales, sin ninguna otra función. En cualquier caso como el óxido ha tenido que recorrer cierto camino hasta llegar a la superficie, a su paso ha ido tiñendo el hormigón dificultándose la limpieza y eliminación de lo manchado.

9. CONCLUSIONES

Las relaciones entre el agua y los restantes componentes del hormigón, deben desarrollarse en un ambiente que podríamos denominar cordial, para que las mutuas interacciones no desemboquen en situaciones anómalas.

En la introducción manifestamos que poner un mínimo de cuidado en el agua que se utiliza, puede eliminar ó disminuir las consecuencias menos negativas que suelen presentarse.

La estricta observación de la relación A/C, quizás el factor de mayor incidencia, será un índice de garantía en los resultados que deban obtenerse respecto a la consistencia, impermeabilidad o resistencia, sin olvidar la retracción o el entumecimiento, entre otros.

La exigencia de ensayos cuando existan dudas de su idoneidad, permitiría eliminar efectos negativos de corrosiones o impedir esos mismos efectos negativos si el curado se efectúa con agua no recomendable.

En resumen, el diario contacto y su frecuente uso para múltiples necesidades, nos hace a veces olvidar que el agua como cualquier elemento, puede contener impurezas o sustancias en disolución que permitiendo un uso genérico válido, no permitan en cambio su utilización para la fabricación de hormigones o simplemente no lo hagan aconsejable, sin la adopción de las oportunas precauciones, aspecto que es en definitiva el que hemos intentado exponer.

10. BIBLIOGRAFIA

1. RÜSCH H.: *Hormigon armado y hormigon pretensado*.
2. GONZALEZ J.A., ANDRADE C.: *Teoria y practica de la corrosion*.