

Corrosividad de los gases de combustión del PVC sobre el acero embebido en hormigón(*)



SUMARIO

El cloruro de hidrógeno gaseoso generado en la combustión del PVC puede reaccionar con el hormigón, neutralizando su reserva alcalina y liberando iones cloruro que pueden desencadenar la corrosión del acero utilizado como refuerzo.

Se ha estimado que la relación entre la masa de PVC quemada y la superficie absorbente (PVC/S) es del orden de 5 mg PVC/cm² en incendios en viviendas, y alcanza valores superiores en incendios en recintos comerciales o industriales donde se almacene o fabrique PVC.

Se han realizado ensayos de exposición de probetas de diferentes hormigones comerciales a los gases de combustión del PVC, determinando el grado de contaminación por cloruros de los mismos a diferentes profundidades. Todos los hormigones expuestos muestran un importante gradiente de concentración de Cl⁻ con la profundidad. La mayor parte del Cl⁻ detectable en dichos hormigones se encuentra a profundidades menores de 5 mm. Las concentraciones de Cl⁻ en las inmediaciones de los aceros son siempre inferiores a los umbrales considerados como desencadenantes de la corrosión, excepto para el hormigón pretensado con valores elevados de la relación (PVC/S) que presenta un contenido de Cl⁻ en dicha zona capaz de producir efectos corrosivos a corto plazo. En el resto de los casos podrían producirse corrosiones a más largo plazo si se produjera migración de iones Cl⁻ por difusión hacia el seno del hormigón. La absorción de HCl y la penetración de Cl⁻ en el interior del hormigón es tanto mayor cuanto más poroso es este último.

Palabras clave: PVC, incendio, corrosión, acero en hormigón, cloruros.

MIGUEL ÁNGEL CLIMENT LLORCA
ESTANISLAO VIQUEIRA PÉREZ

*Departamento de Ingeniería de la
Construcción, Obras Públicas e
Infraestructura Urbana.
Universidad de Alicante*

INTRODUCCIÓN

Los elementos estructurales de hormigón armado o pretensado de un edificio son susceptibles de resultar dañados en un incendio, especialmente si el fuego actúa directamente sobre ellos, pudiendo sufrir deterioros de diversa índole: desprendimientos, fisuraciones, etc. En los casos extremos pueden producirse colapsos de dichos elementos, con pérdida de la capacidad resistente de la estructura (1). Cuando se producen incendios

(*) Este artículo es el trabajo presentado a la Fundación MAPFRE como resultado final de la investigación desarrollada durante el año 1994, a raíz de la beca concedida en su Convocatoria 1993/94, sobre «Estudio de la corrosividad de los gases de combustión del PVC sobre el acero embebido en hormigón».

de combustión de materiales plásticos halogenados, como el cloruro de polivinilo (PVC), existe un riesgo adicional para las estructuras mixtas hormigón-acero debido a la generación de gases de carácter ácido. Dichos productos pueden reaccionar directamente con el hormigón y pueden, además, contaminarlo con iones haluro, cuyo carácter promotor de la corrosión del hierro y sus aleaciones es ampliamente conocido. La corrosión electroquímica del acero embebido en el hormigón armado y pretensado es uno de los factores que inciden más negativamente en la duración de las construcciones, llegando a ser causa de costosas reparaciones para mantener las características de funcionalidad y seguridad de las estructuras (2).

La enorme difusión del hormigón armado se debe al complemento de propiedades de dos materiales relativamente baratos: el acero y el hormigón, que, reunidos en un material compuesto, le dotan de la resistencia a la tracción del primero y a la compresión del segundo. La excelente adherencia entre ambos garantiza la transferencia de propiedades de un material a otro y facilita la acción protectora del hormigón contra la corrosión del acero. Esta acción protectora es de doble naturaleza:

a) El hormigón supone una barrera física a la penetración por difusión de sustancias corrosivas hasta la superficie del acero.

b) La elevada alcalinidad de la disolución existente en la red interna de poros del hormigón (pH entre 12,5 y 14) mantiene a las armaduras embebidas en él en estado de pasividad frente a la corrosión electroquímica. Esta situación se atribuye a la existencia de una capa de óxido submicroscópica que recubre al acero e impide casi totalmente la reacción de oxidación.

La pasividad natural de las armaduras en el hormigón puede perderse por efecto de una fabricación incorrecta, una dosificación inadecuada de materias primas (cemento, agua y áridos), por la verificación de procesos que disminuyen el pH del hormigón o por efecto de la presencia de sustancias tales como los iones cloruro, Cl^- , capaces de destruir localmente la capa pasivante (2).

EL PVC, CLORURO DE POLIVINILO

El PVC es un material termoplástico, resultado de la polimerización del cloruro de vinilo, cuya fórmula mono-

La corrosión electroquímica del acero embebido en el hormigón armado y pretensado es uno de los factores que inciden más negativamente en la duración de las construcciones, llegando a ser causa de costosas reparaciones para mantener las características de funcionalidad y seguridad de las estructuras.

mérica es $-[CH_2-CHCl]-$. Su contenido de cloro es del 56,7 por 100 en peso. Como consecuencia de su precio asequible es un material ampliamente utilizado en el campo de la construcción (3-6), constituyendo la materia prima para la fabricación de muy diversos objetos manufacturados. Una lista no exhaustiva de sus aplicaciones más importantes abarcaría: tuberías, cables, conducción de protección de cables, mobiliario, persianas, revestimientos de suelos y paredes, recipientes, electrodomésticos, material de embalaje, calzado, juguetes, etc.

El PVC rígido, sin plastificantes, se utiliza para fabricar semiproductos y piezas moldeadas; sin embargo, el PVC plastificado permite la obtención de objetos flexibles. La riqueza en resina de PVC de los productos manufacturados puede variar de un 50 por 100 en el caso de cubiertas o aislamientos de cables hasta más de un 90 por 100 para las tuberías de presión (6). Existe una gran variedad de aditivos que se incorporan a la resina de PVC con la finalidad de obtener

productos con acabados y propiedades muy dispares (6), entre ellos destacan: estabilizantes, lubricantes, plastificantes, cargas, colorantes inorgánicos y orgánicos, diluyentes, espesadores y reforzantes.

COMBUSTIÓN DEL PVC

Los principales productos de la combustión del PVC en aire son: cloruro de hidrógeno (HCl), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), agua y una gran variedad de compuestos orgánicos, entre los que destacan los hidrocarburos aromáticos y alifáticos, incluyendo compuestos organoclorados (8). Las proporciones cuantitativas de estos gases dependen de las condiciones en que se produce la pirólisis, en especial de la presencia o ausencia de oxígeno (8, 9). No obstante, cabe destacar que el HCl es el componente mayoritario producido en la descomposición térmica del PVC (8). La toxicidad de los gases de combustión del PVC se debe fundamentalmente a su contenido en CO y HCl. Este último compuesto, además de ser un irritante pulmonar y del tracto respiratorio superior (4, 10), tiene efectos corrosivos sobre los metales y componentes electrónicos, debidos al carácter ácido fuerte del HCl, que han sido reconocidos hace tiempo (11, 12).

En la actualidad existe una viva polémica en torno a los ensayos destinados a evaluar la toxicidad y la corrosividad de los productos de combustión de los plásticos halogenados y a los intentos de limitar el uso de dichos materiales (7, 13, 14). Se ha argumentado que dichos efectos, en particular la corrosividad, son sobreestimados al medirse en muchos casos las cantidades totales de gases ácidos generados en la pirólisis en condiciones diferentes a las que pueden concurrir en incendios reales (7). Además, es preciso considerar en cualquier caso el mejor comportamiento al fuego de los plásticos halogenados (menores facilidad de ignición, inflamabilidad y difusividad térmica) frente a otros materiales plásticos (7). Por ello es importante conocer las cantidades de HCl que se pueden generar en incendios reales que afecten a productos de PVC, la cinética de los procesos de liberación de HCl, la variación de la concentración de dicho gas con el tiempo y la corrosividad de dichos gases estimada directamente por exposición de probetas de los diferentes materiales a estudiar.



HCl GENERADO EN LA COMBUSTIÓN DEL PVC

La deshidrocloración del PVC, es decir, la liberación de HCl, es rápida y prácticamente cuantitativa a temperaturas entre 250 y 300° C, debiendo destacar que dicho proceso no requiere una combustión con llama, sino que se trata esencialmente de una descomposición térmica (15). La presencia de oxígeno facilita el comienzo de la deshidrocloración. Sin embargo, se alcanzan rendimientos de HCl entre el 93 y el 97 por 100 referidos a la cantidad de cloro total en el material de partida, para calentamientos de muestras de PVC durante nueve minutos a 300° C, tanto en aire como en atmósfera de nitrógeno (8). Por tanto, la liberación de HCl por degradación térmica del PVC puede ser importante, teniendo en cuenta el contenido de cloro de dicho material, incluso sin combustión directa. No obstante, en un incendio real pueden tener incidencia otros factores; por ejemplo, la carbonización superficial de objetos o

recubrimientos de PVC de gran espesor puede aislar térmicamente el resto del material e impedir su deshidrocloración completa. Por otra parte, la presencia de plastificantes puede favorecer la combustión del PVC.

Una serie de trabajos realizados por los grupos de investigación del Vinyl Institute y la BFGoodrich Co. (16-19) han puesto de manifiesto que, en la atmósfera de un recinto en el que se ha producido la combustión de objetos fabricados con PVC, la concentración de HCl alcanza un valor máximo y posteriormente decae por absorción y reacción sobre superficies porosas, tales como el hormigón, escayola, etc. La máxima concentración de HCl, que corresponde aproximadamente a un 35 por 100 del cloro total contenido en el PVC se alcanza a los diez minutos. A partir de este punto, el contenido de HCl de la atmósfera decae, alcanzándose valores menores del 25 por 100 de la concentración máxima al cabo de unos treinta minutos (16). Parte del HCl generado es absorbido por el

carbonato cálcico utilizado como carga en la formulación de los cables. Los metales a elevada temperatura, por ejemplo, el cobre de los conductores, reaccionan también con el HCl, fijándolo en cierta medida (19).

LOS IONES Cl⁻ EN EL HORMIGÓN

El cloruro de hidrógeno gaseoso generado en la combustión del PVC, por su carácter ácido fuerte, puede atacar a diversos materiales de construcción, tales como la piedra caliza y el hormigón, dando lugar a compuestos solubles. Considerando las cantidades de HCl que pueden producirse en tales incendios no es previsible una degradación profunda de la masa del hormigón por dicha reacción. Sin embargo, pueden producirse efectos corrosivos más sutiles sobre el acero utilizado como refuerzo en el hormigón armado y pretensado debido a dos factores:

a) La reacción del HCl con la reserva alcalina del hormigón, constitui-

da por el hidróxido cálcico, puede rebajar el pH del electrolito interno de la red de poros del hormigón, desde sus valores habituales del orden de 13,5 a valores inferiores. En el caso de que este frente de reducción de la alcalinidad alcance las zonas donde se encuentra el acero, puede producirse una despasivación del metal, dando lugar a una corrosión generalizada del mismo si el hormigón está húmedo y hay oxígeno presente (20).

b) La absorción y reacción del HCl en el seno del hormigón libera iones cloruro (Cl^-). Dichos iones pueden, en principio, migrar por difusión hacia el interior de la masa del hormigón en virtud de un gradiente de concentración. El acero se despasiva localmente si se alcanzan concentraciones de Cl^- elevadas en sus inmediaciones, con lo que puede desencadenarse la corrosión localizada por picaduras. En ellas, el metal se disuelve a velocidad apreciable, pudiendo llegar a la perforación o rotura de la armadura o alambre. Esta situación es particularmente peligrosa en el caso del hormigón pretensado, donde la concurrencia de la

El cloruro de hidrógeno gaseoso generado en la combustión del PVC puede reaccionar con el hormigón, neutralizando su reserva alcalina y liberando iones de cloruro que pueden desencadenar la corrosión del acero utilizado como refuerzo.

elevada tensión a que está sometido el acero y los procesos de corrosión localizada pueden dar lugar a bruscos y espectaculares accidentes (2).

No existe un límite universalmente aceptado, en cuanto a la concentración de Cl^- en el hormigón, por debajo de la cual no exista riesgo de corrosión del acero, ya que este umbral depende de muchas variables: tipo y contenido de cemento, relación agua/cemento, humedad del hormigón, etc. (2). Un valor medio ampliamente aceptado es el del 0,4 por 100 en relación al peso de cemento (0,05 a 0,1 por 100 referido al peso del hormigón). Este valor es el límite que impone la normativa española relativa al hormigón armado (21), en cuanto al aporte máximo de Cl^- a través de las materias primas del hormigón. En el caso del hormigón pretensado, y para cubrir el riesgo adicional de rotura frágil brusca del metal por corrosión bajo tensión, se rebaja el umbral de Cl^- al 0,2 por 100 en relación al peso de cemento, es decir, 0,025 a 0,05 por 100 referido al peso de hormigón (22).



Por lo expuesto anteriormente consideramos interesante:

1. Realizar una estimación de las cantidades de PVC que pueden verse involucradas en incendios de ámbito doméstico (viviendas) y de ámbito comercial o industrial.

2. Poner a punto un sistema a escala reducida para la exposición de probetas de hormigón a los gases de combustión del PVC.

3. Estudiar el grado de contaminación por Cl⁻ de diferentes hormigones expuestos a los productos de combustión del PVC, estudiando la influencia de las siguientes variables:

- Situación de las probetas con respecto al foco de combustión.
- Cantidad de PVC quemado en relación a la superficie de hormigón expuesta.
- Calidad del hormigón, controlada a través de su porosidad, contenido de cemento y relación agua/cemento.

ESTIMACIÓN DE LA RELACIÓN (MASA PVC QUEMADO/SUPERFICIE ABSORBENTE)

En el presente trabajo se ha elegido como parámetro de estudio la relación entre la masa de PVC quemado y la superficie absorbente expuesta (PVC/S). Una estimación de los valores de dicha relación en viviendas y en recintos comerciales o industriales, donde existan cantidades grandes de PVC, permitiría la simulación en ensayos a escala reducida de las condiciones que probablemente se dan en incendios que afecten a objetos de PVC en dichos ámbitos. En el caso de una vivienda es difícil estimar la cantidad de PVC contenido, ya que dicho material se utiliza en muy diversas aplicaciones, como ya mencionamos. Sin embargo, se puede realizar una estimación **mínima** de la relación (PVC/S) atendiendo a las instalaciones fijas de PVC en una vivienda, como son las tuberías, cables y conducciones de protección de cables, frente a la superficie absorbente total constituida por techos y suelos.

Estimación de la cantidad de PVC contenido en una vivienda

Se realizó una estimación de la cantidad de PVC existente en base al cálculo de las instalaciones de una vivienda de tipo de 90 m² de superficie útil, que incluiría:

- Tuberías de PVC rígido de 50 y 110 mm de diámetro exterior con un contenido de, aproximadamente, 90 por 100 de resina de PVC (6).

La enorme difusión del hormigón armado se debe al complemento de propiedades de dos materiales relativamente baratos: el acero y el hormigón, que, reunidos en un material compuesto, le dotan de la resistencia a la tracción del primero y a la compresión del segundo.

- Tubos de protección flexible para instalación eléctrica de 13, 16, 23 y 29 mm de diámetro exterior (contenido de resina del 50 por 100 aproximadamente).

- Cables de 1,5, 2,5, 4, 6 y 10 mm² de sección del conductor con un contenido aproximado del 50 por 100 de resina de PVC (6, 16).

La suma de todas estas contribuciones conduce a una masa total del orden de 25 kg de resina pura de PVC por vivienda tipo en estas instalaciones.

Estimación de la superficie absorbente total de una vivienda

Por mediciones sobre plano real de tres viviendas tipo de unos 90 m² se determina la superficie absorbente constituida por (techos + paredes + suelos) - (ventanas + puertas), considerando que todos los materiales y superficies (incluso suelos) absorben y lo hacen en la misma medida.

Con todo lo anterior y refiriendo los cálculos a viviendas de 90 m² se obtiene la relación definitiva de (PVC/S) de 5,4 mg PVC/cm², que utilizaremos como referencia para nuestros ensayos. Por ello se decidió realizar las experiencias de exposición de probetas de hormigón a los gases de combustión del PVC, utilizando las relaciones de (PVC/S) de 5,4, 54 y 270 mg PVC/cm² (1, 10 y 50 veces la relación obtenida). La primera sería re-

presentativa de un incendio en ámbito doméstico, y las otras, de incendios en recintos comerciales e industriales.

ESTUDIO DE LA CORROSIVIDAD DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN DEL PVC

Aparatos y materiales

Cloruro de polivinilo (PVC)

Debido a la gran variedad de formulaciones de los productos comerciales fabricados con este material se decidió utilizar resina pura de PVC, lo que facilita referenciar los resultados a cantidades conocidas de PVC puro descompuesto.

Probetas de hormigón

Las probetas utilizadas en los ensayos de exposición a los productos de combustión del PVC han sido obtenidas de hormigones comerciales a fin de hacer el trabajo más representativo de las consecuencias de incendios sobre materiales reales. Para ello hemos dispuesto de probetas prismáticas, de dimensiones aproximadas 4 × 4 × 15 cm, extraídas de:

- Hormigón en masa de probetas cilíndricas de laboratorio de control en tomas efectuadas en cimentación de una obra en curso, siguiendo la normativa UNE vigente.

- Viguetas prefabricadas armadas.
- Viguetas prefabricadas pretensadas.

Los valores de las porosidades y densidades de los tres materiales, calculados como la media de valores para diversas probetas de cada tipo, se recogen en la Tabla 1. Las relaciones agua/cemento y los contenidos de cemento han sido proporcionados por el fabricante en las viguetas y obtenidos por ensayo en laboratorio en el caso del hormigón.

Cámara de combustión

Tras un estudio teórico de las cantidades de PVC a descomponer, concentraciones potencialmente generadas de HCl(g), resistencia de distintos materiales a estas y otras especies agresivas y a elevaciones de temperatura a la vez que consideraciones técnicas de fabricación y seguimiento de los ensayos, se construyó en los Servicios Técnicos de la Universidad de Alicante una cámara inerte, transparente y estanca de lámina de

TABLA 1. Características de los materiales de ensayo

	Densidad real (g/cm ³)	Densidad aparente (g/cm ³)	Relación agua/cemento	Contenido cemento (kg/m ³)	Porosidad D (%)
Hormigón	2,625	2,209	0,85	270	15,85
Vigueta pretensada	2,593	2,241	0,26	368	13,55
Vigueta armada	2,691	2,215	0,72	335	17,69

polimetilmetacrilato (PMMA) de 14 mm de espesor y de dimensiones 40 × 40 × 80 cm. Este recinto es semejante a la cámara utilizada en el test de toxicidad de la NBS (16).

Sistema de descomposición térmica del PVC

El procedimiento elegido para la descomposición térmica de la muestra fue la calefacción mediante una placa cerámica vitrificada con resistencia plana protegida con fibra de vidrio. Este procedimiento presenta ventajas, en cuanto a la superficie de calentamiento disponible, y mínimos problemas de absorción por superficies metálicas a elevadas temperaturas (19), al tiempo que es capaz de desarrollar una potencia suficiente para la descomposición del PVC en su fase de generación de HCl(g).

Como recipiente soporte de la muestra se utilizan placas de Petri en vidrio Pyrex que se han mostrado adecuadas por contener la cantidad de muestra requerida y soportar las condiciones de ensayo.

Se realizó un calibrado de la placa calefactora para fijar la potencia de trabajo y tiempo de funcionamiento que permitiesen una descomposición térmica completa del PVC, evitando alcanzar temperaturas excesivamente altas que pusiesen en peligro la integridad del material constituyente de la cámara. Con ello se seleccionó una potencia media de trabajo que permitía alcanzar los 300° C en doce minutos. En este momento se desconectaba el regulador, alcanzándose a los quince minutos la temperatura máxima de 335° C. A partir de este punto, la temperatura comenzaba a decaer, manteniéndose en valores superiores a 300° C hasta los veinte minutos, y adquiriendo un valor en torno a los 210° C a los treinta minutos de comenzada la calefacción.

Exposición de las probetas de hormigón a los gases de combustión del PVC

Se sitúan las probetas en la cámara

ra y la muestra de resina de PVC en el recipiente Pyrex sobre la placa calefactora. La cámara se cierra y se comienza la calefacción de la muestra. A los treinta minutos se inunda el fondo de la cámara, sin que el agua llegue a tocar las probetas, y se deja en estas condiciones veinticuatro horas, con lo que la mayor parte del HCl(g) es absorbido por la fase acuosa, quedando el hormigón sometido a una atmósfera húmeda. Pasado este tiempo se abre la cámara y se extraen las probetas. Con este programa se ha pretendido reproducir las situaciones de incendio sin actuación

El PVC rígido, sin plastificantes, se utiliza para fabricar semiproductos y piezas moldeadas; sin embargo, el PVC plastificado permite la obtención de objetos flexibles.

directa del fuego sobre el hormigón y posterior extinción húmeda.

Toma de muestras y ensayos

Se tomaron muestras de hormigón para analizar cuantitativamente el grado de contaminación por Cl⁻ de las probetas a diferentes profundidades desde la superficie expuesta con la intención de discernir las concentraciones de Cl⁻ en las zonas donde se hallan ubicados los aceros en los hormigones armado y pretensado. El procedimiento elegido para la extracción de las muestras fue el taladro en seco, utilizando brocas adecuadas, de modo que el material extraído en la penetración de la broca se considera representativo del trayecto recorrido por ésta. Se efectuaron las siguientes tomas:

- De 0 a 5 mm, con broca de 12 mm de diámetro.
- De 0 a 10 mm, con broca de 12 mm.
- De 10 a 20 mm, con broca de 8 mm, sobre la perforación de 0 a 10 mm.
- De 5 a 10 mm, con broca de 8 mm, sobre la perforación de 0 a 5 mm.

Se intentó en todos los casos realizar el máximo número de perforaciones de cada tipo (como mínimo tres) en función de la superficie expuesta, de forma que, al homogeneizar el material correspondiente a todas las perforaciones de un mismo tipo, se obtuviera una muestra lo más representativa posible del hormigón existente en dicho intervalo de profundidades. Los análisis de ion cloruro se realizaron mediante un electrodo selectivo. Previamente a los ensayos se analizaron también probetas blanco, no expuestas a los productos de combustión, de cada material para determinar su contenido inicial de Cl⁻. Todos los resultados de los análisis presentados están corregidos por su correspondiente ensayo en blanco.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Influencia de la situación de las probetas

En este apartado se estudió la influencia que la altura, distancia y posición de las probetas respecto al foco de generación de HCl(g) pudieran tener en la absorción de Cl⁻.

Se colocaron para ello seis probetas del mismo material (vigueta pre-

tensada) con una sola cara absorbente y con áreas similares en la disposición que se refleja en la figura 1 y tabla 2 y se analizaron, después de sometidas a ensayo con una relación de (PVC/S) de 5,4 mg/cm², las tomas de los cinco primeros milímetros.

TABLA 2. Contaminación por Cl⁻, expresada como tanto por ciento referido al peso de hormigón.

Probeta	Situación	Cl (%) 0-5 mm
a	Centro/techo	0,227
b	Medio/suelo	0,041
c	Medio/techo	0,101
d	Fondo/media	0,080
e	Medio/media	0,085
f	Esquina/suelo	0,035

Como era de esperar, la contaminación por Cl⁻ es máxima en la zona superior y en la vertical del foco de generación de HCl (posición a). Conforme nos alejamos de la vertical, aun en posiciones elevadas, el descenso es notorio (posición c). A alturas intermedias, en una de las mitades libres en que la placa calefactora divide a la cámara (posiciones d y e), se obtienen resultados del 80 al 85 por 100 del valor correspondiente a la posición c. Las probetas situadas en el suelo absorbieron bastante menos HCl que las restantes.

El orden creciente de absorción de HCl para las probetas situadas en la cámara utilizada en este trabajo es: suelo < pared < techo. Este resultado, lógico teniendo en cuenta el carácter gaseoso del producto de combustión, no es extrapolable directamente al caso de incendios reales, donde la influencia de variables tales como la ventilación, presiones diferenciales, etc., puede crear situaciones muy diferentes. La absorción es obviamente máxima en las zonas que reciben directamente el HCl(g) generado (posición a), hecho a tener en cuenta en los casos de combustiones de PVC localizadas con generación de cantidades de HCl no muy grandes y sin efectos de corrientes de gas, como puede ser el caso de la descomposición térmica de cables conteniendo PVC en pequeños recintos cerrados.

A raíz de los resultados obtenidos en este apartado se tomó la decisión de efectuar los siguientes ensayos colocando las probetas en posiciones equivalentes [equidistantes del foco

FIGURA 1. Esquema de la disposición de las probetas en la cámara. * = posición de la placa calefactora.

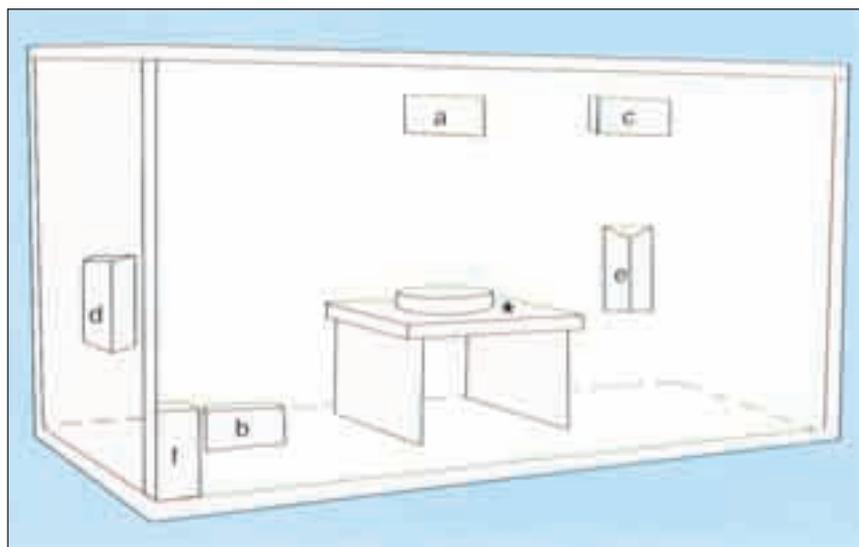


FIGURA 2. Vigüeta armada. (PVC/S) = 5,4 mg/cm².

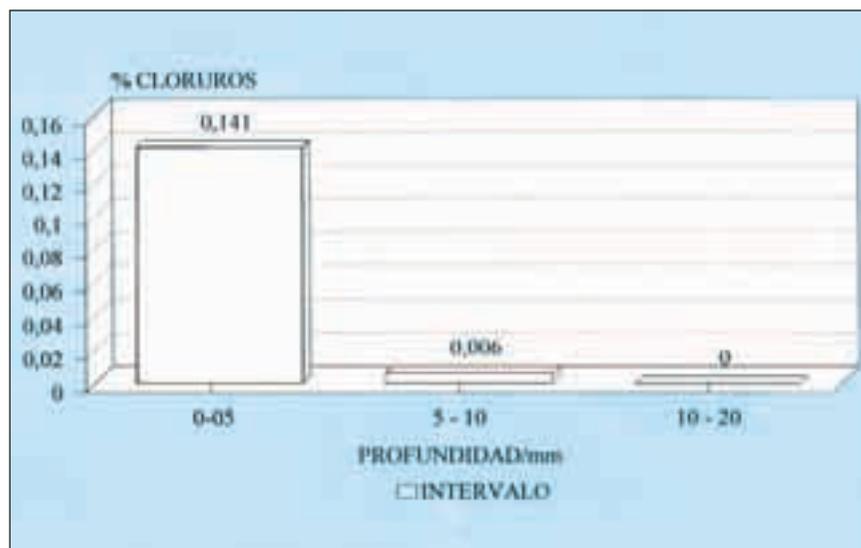


FIGURA 3. Hormigón. (PVC/S) = 5,4 mg/cm².

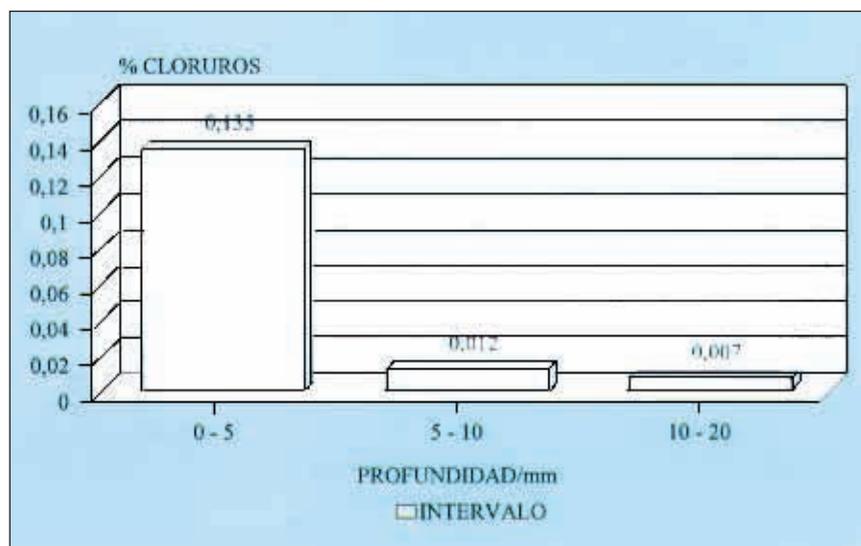
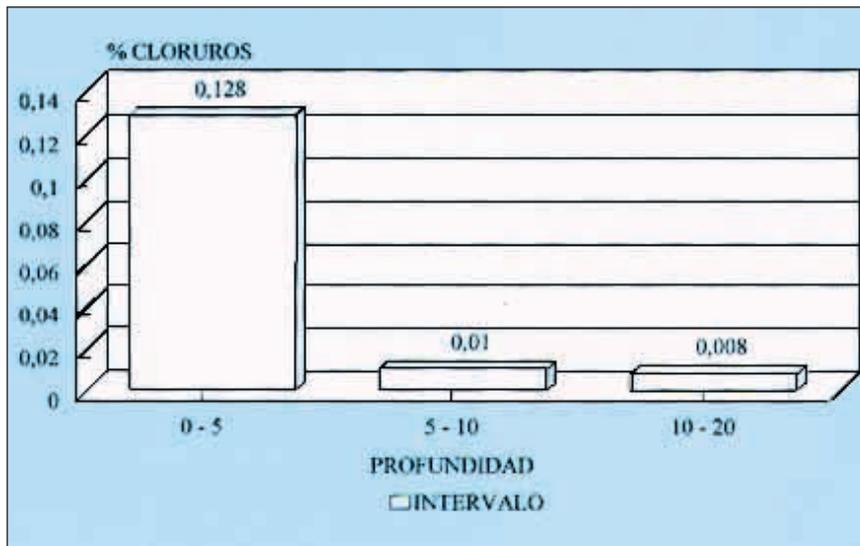


FIGURA 4. Vigueta pretensada. (PVC/S) = 5,4 mg/cm².



destacar que los recubrimientos mínimos de las armaduras o alambres de acero que prescribe la normativa española son de 20 mm en el caso del hormigón armado (21) para interiores o exteriores con poca humedad, y de 8 a 10 mm para el hormigón pretensado (22) en las mismas condiciones de exposición. Por ello, las concentraciones de Cl⁻ en los intervalos 5-10 y 10-20 mm pueden tomarse como representativas de los valores que alcanza dicha variable en las inmediaciones del acero para el hormigón pretensado y armado, respectivamente.

Las figuras 2 a 10 recogen los contenidos de Cl⁻, expresados como tanto por ciento, referido al peso de hormigón, para las tres relaciones (PVC/S) en forma de gráficos de barras.

de generación de HCl(g)] «medias», semejantes a la posición e, dado que el grado de absorción en ellas no difiere mucho del que se produce en las posiciones del techo (exceptuando el punto singular a). Este hecho facilita la colocación de las probetas para los ensayos.

Influencia de la relación (PVC/S)

Se realizaron series de ensayos utilizando los valores de la relación (PVC/S) de 5,4, 54 y 270 mg/cm² para determinar la influencia de dicha relación sobre la contaminación por Cl⁻ de las probetas expuestas.

Después de sometidas a ensayo se hicieron las tomas de muestra de las probetas por taladro en seco. Es de

FIGURA 5. Vigueta armada. (PVC/S) = 54 mg/cm².

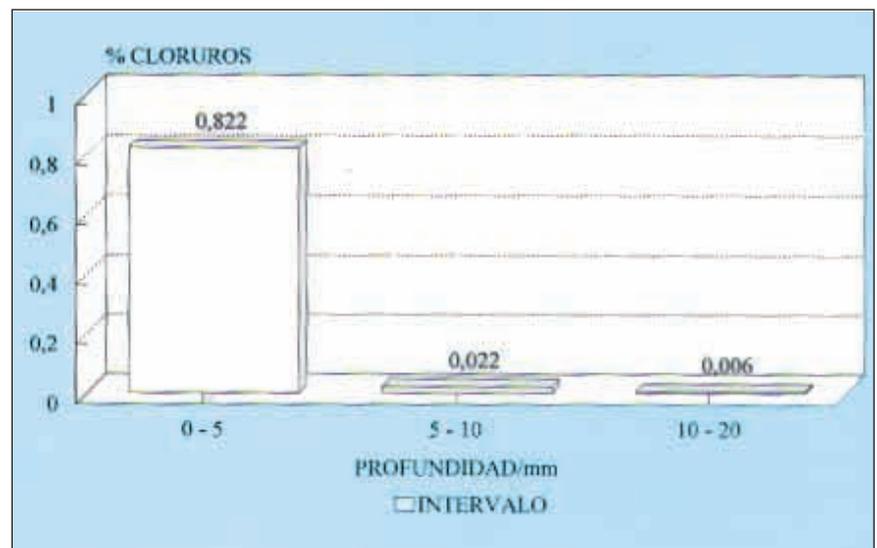
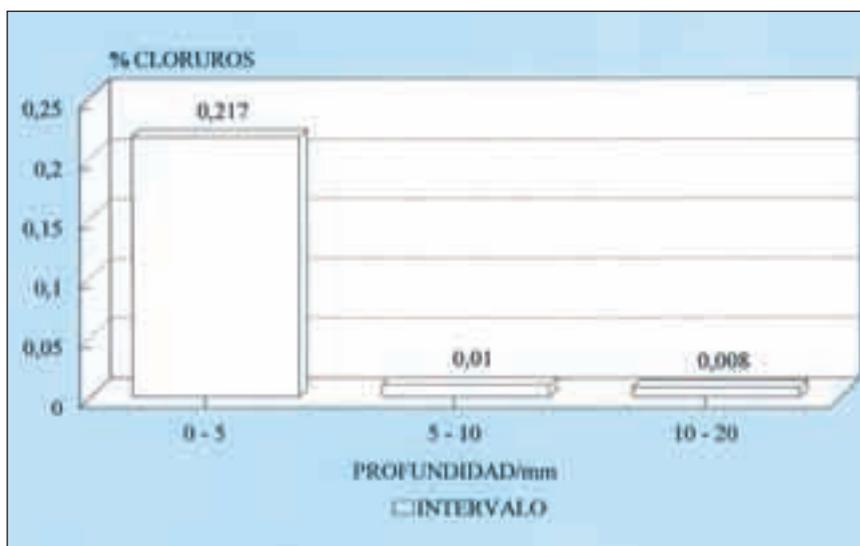


FIGURA 6. Hormigón. (PVC/S) = 54 mg/cm².



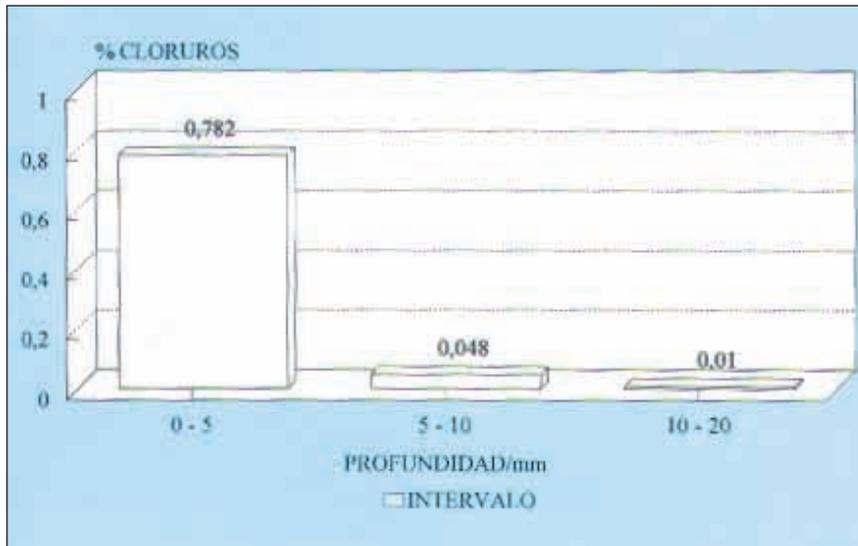
Con una relación (PVC/S) de 5,4 mg/cm² la absorción superficial de Cl⁻ (entre 0 y 5 mm) es superior al 0,1 por 100 y muy similar para los tres materiales (Figs. 2-4).

Al aumentar la relación (PVC/S) hasta 54 y 270 mg/cm² (Figs. 5-10) se incrementa la contaminación por cloruros, si bien este efecto es más notorio en las tomas superficiales y más amortiguado en las interiores. Las muestras de vigueta armada siempre presentan la máxima absorción de Cl⁻, alcanzando para una relación (PVC/S) de 54 mg/cm² valores del 0,8 por 100 en los cinco primeros mm (Fig. 5). Esta última concentración parece responder a un máximo debido a saturación, ya que un aumento de PVC/S a 270 mg/cm² no implica

incremento en las concentraciones de cloruro (Fig. 8).

Las concentraciones de Cl^- en las inmediaciones de los aceros son siempre inferiores a los umbrales considerados como desencadenantes de la corrosión, excepto para el hormigón pretensado con relación (PVC/S) de 54 y 270 mg/cm^2 , que presenta valores de 0,016 y 0,023 por 100, que están muy próximos al umbral de corrosión correspondiente, que es de 0,025 a 0,05 por 100 respecto al peso de hormigón. En estas condiciones podrían producirse efectos corrosivos a corto plazo para este último material. En el resto de los casos existe la posibilidad de corrosión a más largo plazo en función de incrementos en el contenido de Cl^- por difusión de dicha especie en el seno del hormigón.

FIGURA 8. Vigueta armada. (PVC/S) = 270 mg/cm^2 .

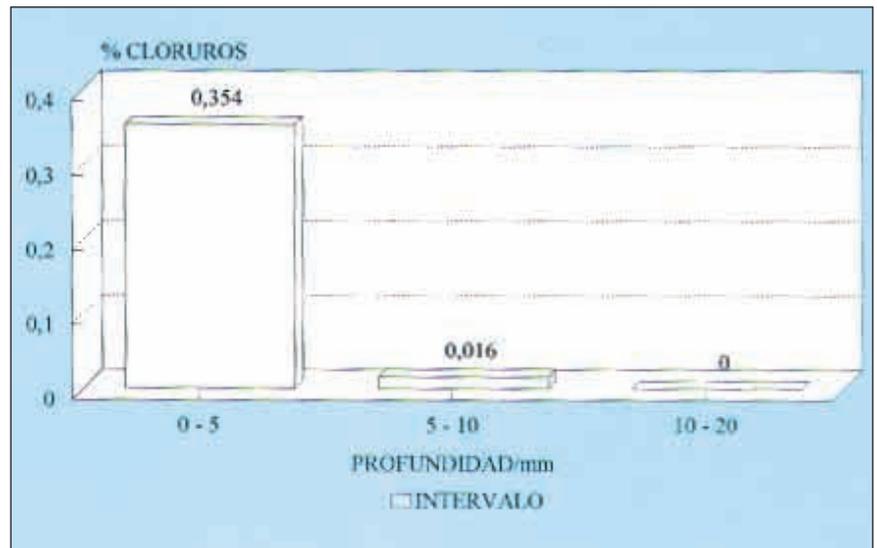


Influencia de la porosidad

Con la finalidad de estudiar la influencia que tiene la calidad del hormigón sobre el grado de contaminación por cloruro, tras estar expuesto a los gases de combustión del PVC, se han representado las concentraciones de Cl^- en los intervalos 0-5 y 5-10 m (Figs. 11 y 12), respectivamente, en función de la porosidad. Se ha elegido esta última variable como representante de la calidad del hormigón, ya que tanto la dosificación como el cuidado en la fabricación de dicho material se reflejan normalmente en la porosidad y compacidad del producto final (23).

Puede observarse un comportamiento anómalo del hormigón en masa con respecto a la tendencia esperada, que sería la de obtener mayor

FIGURA 7. Vigueta pretensada. (PVC/S) = 54 mg/cm^2 .



grado de contaminación por Cl^- cuanto mayor es la porosidad del material expuesto. Sin embargo, este efecto puede explicarse por la distinta naturaleza de las caras expuestas al $HCl(g)$ generado: superficies naturales para las viguetas y superficies de corte para el hormigón en masa. Las caras naturales, generadas por contacto con el molde, presentan una zona superficial rica en lechada de cemento, que exuda el hormigón durante el fraguado; además, no presentan árido grueso superficial, a diferencia de las caras de corte. Estos hechos explicarían que estas caras de las viguetas fueran más absorbentes y reactivas frente al $HCl(g)$.

Exceptuando el comportamiento anómalo del hormigón en masa anteriormente mencionado, la absorción de HCl y penetración de iones Cl^- en el interior de la masa del hormigón es

FIGURA 9. Hormigón. (PVC/S) = 270 mg/cm^2 .

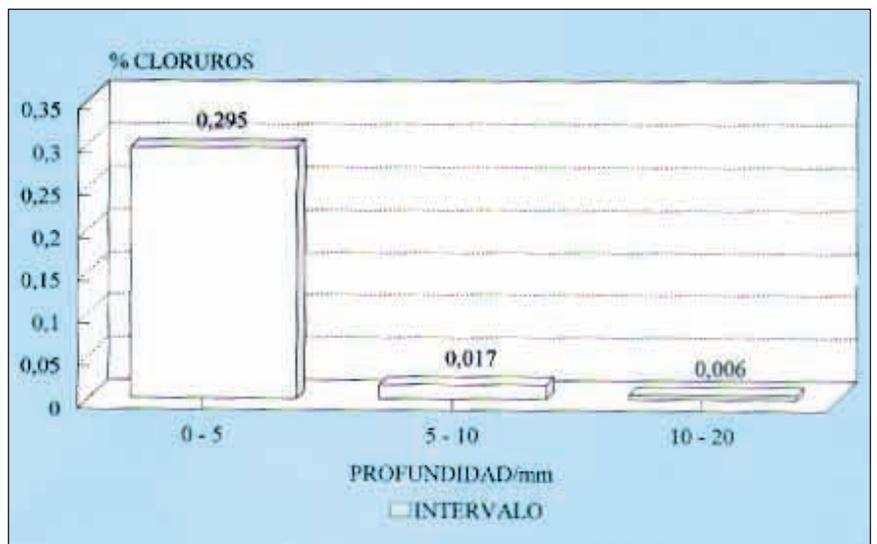
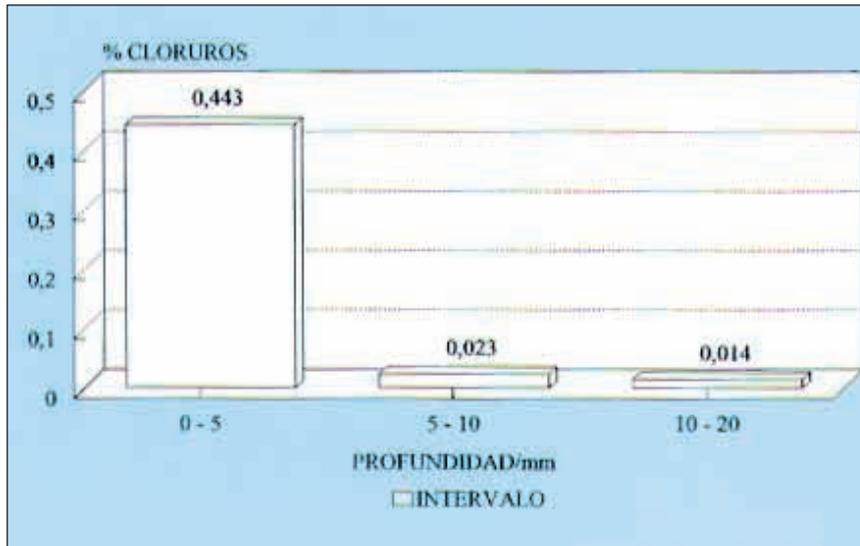


FIGURA 10. Vigueta pretensada. (PVC/S) = 270 mg/cm².



tanto mayor cuanto más poroso es el material.

CONCLUSIONES

De los ensayos efectuados sobre los hormigones expuestos a los gases de combustión del PVC en el presente trabajo se extraen las siguientes conclusiones:

1.ª La absorción de cloruro de hidrógeno depende de la situación de las probetas de hormigón con respecto al foco de combustión del PVC, mostrando la siguiente tendencia: suelo < pared < techo.

2.ª Todos los hormigones expuestos muestran un importante gradiente de concentración de Cl⁻ con la profundidad. La mayor parte del Cl⁻ detectable en el hormigón se encuentra en la

FIGURA 11. Efecto de la porosidad del hormigón en la penetración de cloruros entre 0 y 5 mm de profundidad.

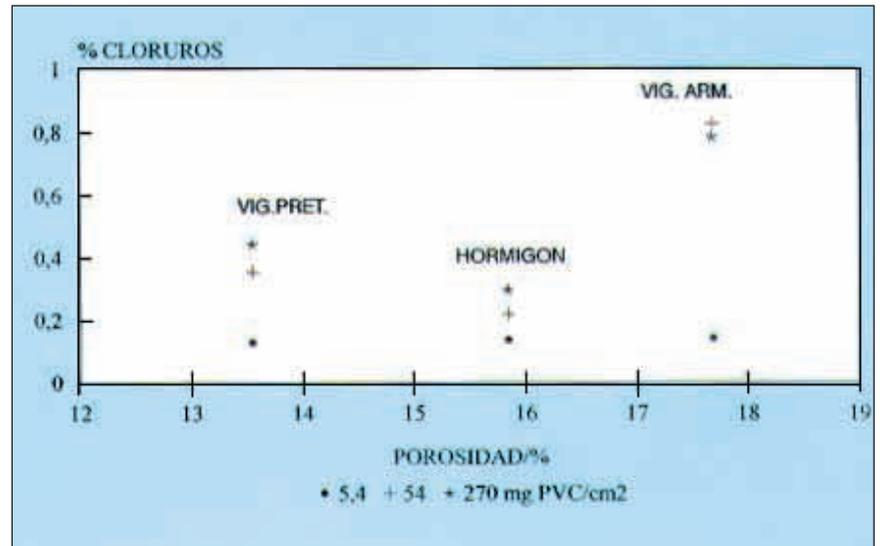
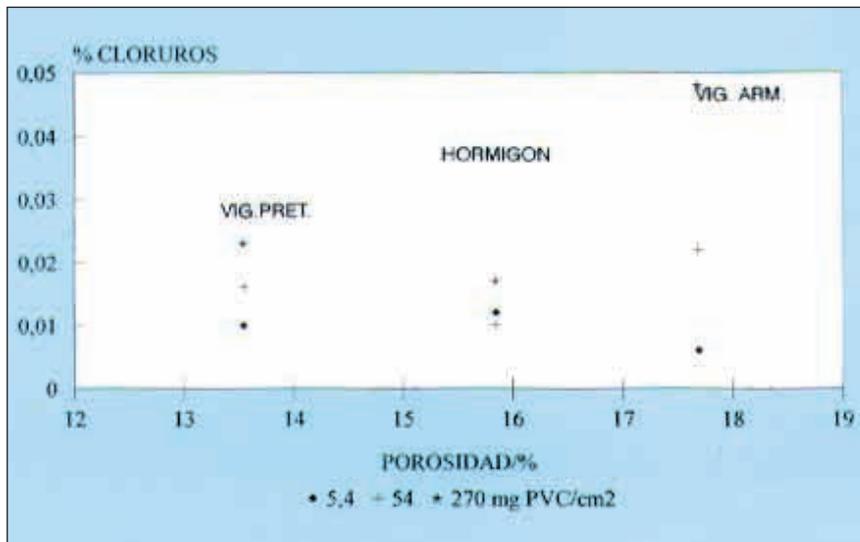


FIGURA 12. Efecto de la porosidad del hormigón en la penetración de cloruros entre 5 y 10 mm de profundidad.



zona más superficial de la probeta a profundidades menores de 5 mm.

3.ª El grado de contaminación por cloruros de los hormigones expuestos aumenta con la relación (PVC/S).

4.ª Para una relación (PVC/S) de 5,4 mg/cm², propia de incendios de ámbito doméstico, las concentraciones superficiales (cinco primeros milímetros) de ion Cl⁻ son menores del 0,15 por 100 con respecto al peso de hormigón. Sin embargo, para relaciones (PVC/S) de 54 y 270 mg/cm², propias de incendios en recintos comerciales o industriales, se alcanzan contenidos superficiales de 0,8 por 100 para hormigón armado y 0,4 por 100 para hormigón pretensado.

5.ª Las concentraciones de Cl⁻ en las inmediaciones de los aceros son siempre inferiores a los umbrales considerados como desencadenantes

de la corrosión, excepto para el hormigón pretensado con valores elevados de la relación (PVC/S), que presenta un contenido de Cl⁻ en dicha zona capaz de producir efectos corrosivos a corto plazo. En el resto de los casos podrían producirse corrosiones a más largo plazo si se produjera migración de iones Cl⁻ por difusión hacia el seno del hormigón.

6.ª La absorción de HCl y la penetración de Cl⁻ en el interior del hormigón es tanto mayor cuanto más poroso es este último.

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo se ha realizado gracias a una **ayuda a la investigación** concedida por la Fundación MAPFRE.



BIBLIOGRAFÍA

- (1) PEREPÉREZ, B., y BARBERÁ, E. (1993): «Patología de las estructuras expuestas al fuego». *Curso de especialista en seguridad e higiene en la prevención y protección contra incendios*, 1.ª edición, Alicante.
- (2) GONZÁLEZ, J. A., y ANDRADE, C. (1984): «La corrosión en estructuras de hormigón armado. Formas de prevenirla y evaluarla». *Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión*, Ed. CSIC, Madrid.
- (3) SAECHTLING, H. (1978): *Los plásticos en la construcción*, Ed. G. Gili, Barcelona.
- (4) HUGGETT, C., y LEVIN, B. C. (1987): *Fire and Materials*, núm. 11, pp. 131-142.
- (5) ANAIP (Confederación Española de Empresarios de Plásticos) (1993): *Los plásticos de España*.
- (6) NASS y HEIBERGER (1986): *Encyclopedia of PVC*, 2ª ed., vol. II «Compound Design and Additives», M. Dekker, Nueva York.
- (7) O'NEILL, T. J. (1988): *MAPFRE Seguridad*, núm. 32, pp. 45-50.
- (8) WOOLLEY, W. D. (1971): *British Polymers Journal*, núm. 3, pp. 186-193.
- (9) LACOSTA, J. M. (1993): «Reacción al fuego de los materiales de construcción: El comportamiento de los materiales plásticos», *Curso de especialista en seguridad e higiene en la*

Las probetas utilizadas en los ensayos de exposición a los productos de combustión del PVC han sido obtenidas de hormigones comerciales a fin de hacer el trabajo más representativo de las consecuencias de incendios sobre materias reales.

- prevención y protección contra incendios*, 1.ª ed., Alicante.
- (10) BARROW, C. S.; ALARIE, Y., y STOCK, M. F. (1976): *Fire and Materials*, núm. 1, pp. 147-153.
 - (11) EFFERTZ, P. H.; GRUPP, H., y JACH, W. (1970): *Der Maschinenschaden*, núm. 43, pp. 89-99.
 - (12) LACOSTA, J. M. (1987): *MAPFRE Seguridad*, núm. 26, pp. 3-11.

- (13) DE LA ROSA, T. (1982): *MAPFRE Seguridad*, núm. 5, pp. 31-39.
- (14) O'NEILL, T. J., y SCHORR, S. (1990): *MAPFRE Seguridad*, núm. 37, pp. 47-53.
- (15) WOOLLEY, W. D. (1972): *Plastics and Polymers*, núm. 40, pp. 203-208.
- (16) BEITEL, J. J.; BERTELO, C. A.; CARROLL, W. F.; GARDNER, R. O.; GRAND, A. F.; HIRSCHLER, M. M., y SMITH, G. F. (1986): *J. Fire Sciences*, núm. 4, pp. 15-41.
- (17) BEITEL, J. J.; BERTELO, C. A.; CARROLL, W. F.; GRAND, A. F.; HIRSCHLER, M. M., y SMITH, G. F. (1987): *J. Fire Sciences*, núm. 5, pp. 105-145.
- (18) GALLOWAY, F. M., y HIRSCHLER, M. M. (1987): *Eur. Polym. J.*, núm. 23, pp. 667-676.
- (19) GALLOWAY, F. M.; HIRSCHLER, M. M., y SMITH, G. F. (1989): *Eur. Polym. J.*, núm. 25, pp. 149-158.
- (20) GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C., y ESCUDERO, M. L. (1984): *Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección*, XV, núm. 11.
- (21) Instrucción para el Proyecto y Ejecución de Obras de Hormigón Armado (EH-91).
- (22) Instrucción para el Proyecto y Ejecución de Obras de Hormigón Pretensado (EP-93).
- (23) ANDRADE, C. (1989): *Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras*, Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, CSIC, Madrid.