

LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN: DEBILIDADES Y FORTALEZAS

Discurso leído en el acto de su recepción como
Académico Correspondiente en Madrid por

Prof. Dr. D. Enrique González Valle

el día 13 de julio de 2006

LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Debilidades y Fortalezas

Depósito Legal: M-28115-2006

Imprime:
Gráficas Loureiro, S.L.

LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Debilidades y Fortalezas

Discurso leído en el acto de su recepción como
Académico Correspondiente en Madrid por
Prof. Dr. D. **Enrique González Valle**
el día 13 de julio de 2006

Arrecife (Lanzarote), Hotel Lancelot

ÍNDICE

1. Introducción	7
2. La sostenibilidad del hormigón <i>in situ</i>	11
3. La fisuración y la deformabilidad del hormigón	27
4. La durabilidad de las estructuras de hormigón	33
5. Epílogo	43
6. Referencias	45

1. INTRODUCCIÓN

Este año, cumplidos ya los 65 años, cumplo mis 41 años de ejercicio profesional en los que las estructuras y más particularmente las realizadas con Hormigón Estructural, mediante aplicación de las técnicas del hormigón armado o pretensado, han ocupado un papel extraordinariamente relevante. Mi vocación por las estructuras fabricadas con este material no fue una vocación de niñez: mis referentes familiares estaban en la medicina y la farmacia. Pero como en los años cincuenta un componente ficticio de la vocación se situaba en el expediente académico del bachillerato, mi “vocación forzada”, si ello pudiese ser llamado vocación, estuvo asentada en el postulado aceptado por la opinión popular de que “si un chico era estudioso y sacaba buenas notas debía ir para ingeniero”.

Y para la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, única existente en aquellos momentos, me fui. Allí me encontré con maestros de la talla de los Profesores Alfredo Páez, Florencio del Pozo y Carlos Fernández Casado, que impulsaron mi afición por las estructuras: un recuerdo emocionado hacia estas personas que me contagiaron el cariño hacia ellas, a la vez que manifiesto públicamente mi gratitud por sus enseñanzas y por haber centrado mi vocación hasta esos momentos no descubierta y en consecuencia no cultivada.

Mis comienzos profesionales fueron asimismo aliciente para que mi vocación por las estructuras de hormigón se viese incrementada, esta vez también gracias a una gran persona, a la vez que formidable maestro y extraordinario especialista en estructuras: el Profesor José M^a Sáez de Benito, al

que tuve la oportunidad de conocer y la suerte de colaborar con él en mis primeros tres años de vida profesional.

A partir de ahí el resto de mi vida profesional, que suponen 38 años de mi existencia, se ha desarrollado en INTEMAC, donde encontré otra persona excepcional, la cual en principio me ofreció una propuesta de desarrollo profesional que me resultaba muy atractiva; luego depositó en mí su confianza técnica y a la vez que me ofrecía su amistad fue capaz de motivarme para aficionarme aún más por las estructuras de hormigón, enseñándome mucho, exigiéndome para que el trabajo se desarrollase de forma seria y rigurosa, basando en este rigor la pauta a la que debía ajustarse el trabajo técnico que en INTEMAC siempre hemos intentado desarrollar: me refiero a José Calavera, Académico de Honor de esta Academia, Profesor y amigo durante casi toda mi vida profesional, aquí presente y al cual quiero asimismo rendir tributo de agradecimiento, ya que probablemente sin él no estaría hoy ocupando esta tribuna.

Unido a lo expuesto, no tengo por menos que referirme al ejemplo de unos padres de familia numerosa que supieron inculcarnos desde pequeños que la formación, el trabajo, el afán de superación, la exigencia y la ética debían ser las coordenadas a las que se debía ajustar la vida de un profesional.

Y como no: también tengo que dirigirme a mi familia, mi mujer y mis hijos fuente de mi estabilidad personal y de inagotable cariño. Tengo que confesar que quiero mucho al Hormigón Estructural: con él he convivido si cabe más que con mi familia, y gracias a él he sido acreedor de algún que otro reconocimiento en el mundo de lo técnico. Pero esta circunstancia deja siempre un sabor agridulce porque tales reconocimientos han supuesto pagar el tributo de robar un tiempo que debía dedicar a mi familia, la cual siempre ha sabido disculpar el que el marido y padre no tuviese la dedicación hacia ellos que se merecían: ellos también son acreedores de este momento de honor por el nombramiento que la Academia ha tenido la deferencia de concederme y por lo cual les quedo profundamente agradecido.

Lo anterior, antesala de este discurso de toma de posesión en la Academia como Miembro Correspondiente en Madrid, era obligado exponerlo en prueba

de reconocimiento, porque si aquí me encuentro es porque han existido las personas citadas con las cuales, en unos casos en el emocionado recuerdo y en otros casos en el placer de su presencia, quiero compartir el honor del que soy objeto en estos momentos.

Mi cariño hacia el hormigón estructural, al que antes he hecho referencia, me ha llevado a plantear la intervención de una forma poco convencional: comentar sus debilidades aparentes para de ellas intentar sacar sus fortalezas. Y como tal me referiré a tres aspectos que en la opinión del profano hacen considerar como débil al hormigón estructural, frente a los cuales, si no se profundiza, el hormigón presenta aspectos muy negativos. Tales aspectos son: la sostenibilidad del hormigón *in situ*, la fisuración y la deformabilidad, y la durabilidad. Y esas debilidades vamos a intentar analizarlas resumidamente para deducir que en las aparentes debilidades se contienen aspectos positivos que traducen tales debilidades en fortalezas.

2. LA SOSTENIBILIDAD DEL HORMIGÓN *IN SITU*

Diríamos que la mayor parte de las grandes estructuras se construyen utilizando materiales naturales, extraídos de la naturaleza, usando medios auxiliares y mano de obra disponibles en las proximidades de las obras y además gran parte de las estructuras de hormigón se construyen *in situ*. Hoy en día los criterios ecológicos de no afección al medio ambiente hacen considerar al hormigón estructural como un depredador del medio ambiente, dada las afecciones medioambientales que pueden producir las canteras de extracción de áridos; el alto consumo energético de las industrias del cemento y del acero; las emisiones de gases, presumiblemente nocivos para el medio ambiente, que se producen en su fabricación; la producción de polvo, los ruidos, la suciedad; el consumo de agua, etc. Aspectos todos ellos que cuestionan la sostenibilidad de las construcciones de hormigón, hoy fundamentales y necesarias y sin sustituto previsible a corto y medio plazo. Es notable la mala prensa que tiene la construcción a la que se asigna una alta siniestralidad. Incluso se le achaca al hormigón el ser causa de enfermedades profesionales como la producida por la utilización de los vibradores.

Según el Profesor Meyer, de la Universidad de Columbia, la producción mundial de hormigón se cifra en unos 10.000 millones de toneladas, equivalentes aproximadamente a unos 4.000 millones de m³. Ello representaría el consumo de unos 1.200 millones de toneladas de cemento. Se estima que la producción de una tonelada de cemento Portland puede originar aproximadamente entre 0,75 y 1,00 toneladas de CO₂, gas que contribuye de una manera decisiva al calentamiento de la tierra, estimándose que a la producción de cemento le es atribuible la producción de una cantidad entre el

5% y el 7% del total de CO₂, que se produce en el mundo, según las fuentes que se consulten.

Realmente no podemos negar la importancia del problema que plantea la industria cementera en lo referente al control del cambio climático preconizado por el compromiso de Kyoto, sobre la reducción de emisiones nocivas a la atmósfera, problemas que son directamente repercutidos a la industria de hormigón.

Pero también es cierto que por el momento no existe un material sustitutivo del hormigón para dar los servicios que el ser humano necesita a través de las edificaciones y las obras civiles que hoy en día son necesarias para el desarrollo de la actividad humana, muchas de ellas, como las estaciones de depuración y de regulación, imprescindibles para la conservación de la naturaleza; otras como las presas, las centrales de producción de energía y las vías de comunicación, imprescindibles para garantizar la permanencia del estado del bienestar.

El consumo de cemento por persona ha ido creciendo en las dos últimas décadas, habiéndose alcanzado en los últimos años en el mundo una producción *per cápita* que se sitúa en unos 260 kg por persona, según se señala por el Profesor J. Ochsendorf y S. Chaturvedi del Massachusetts Institute of Technology. El ritmo de crecimiento demográfico y las necesidades de desarrollo de grandes zonas de la geografía terrestre, no permiten aventurar una reducción del consumo de cemento en las próximas décadas. Los análisis prospectivos sobre la evolución del consumo de cemento sitúan en el horizonte de 2050 un consumo que, para el más favorable de los supuestos, supondría 3.200 millones de toneladas, cifra que duplica los 1.600 millones de toneladas del consumo que se produjo en el año 2000.

Parece evidente que se precisa implementar estrategias para que la industria del hormigón, que es imprescindible para la actividad humana, se desarrolle según los cauces que marcan las estrategias de un desarrollo sostenible. Y estrategias de este tipo para hacer del hormigón un material que contribuya al desarrollo sostenible debemos señalar que, con un gran

desconocimiento por parte de la gente, ya se están implementando desde hace años.

El hormigón en sí, como material, es respetuoso con el medio ambiente. Su problema radica en que uno de sus componentes fundamentales, el cemento Portland lo es menos. La estrategia a seguir en tal sentido sería la utilización de la mayor cantidad de hormigón con el menor contenido posible de cemento Portland. Según el Profesor C. Meyer la estrategia a adoptar para hacer del hormigón un material que cumpla las exigencias de un desarrollo sostenible estaría basada en los puntos siguientes:

- *Incremento del empleo de materiales conglomerantes alternativos y que permitan reducir el contenido en cemento Portland, como por ejemplo las escorias y las cenizas volantes procedentes como subproductos de otras industrias*
- *El empleo de áridos reciclados de las demoliciones de estructuras de hormigón existentes*
- *Implementar las medidas para garantizar una durabilidad adecuada que permita incrementar la vida útil de nuestras estructuras de hormigón*
- *Incrementar las características mecánicas de los hormigones lo que permitiría alcanzar las condiciones funcionales de resistencia exigible a los elementos con menores secciones y consecuentemente con unos menos consumos de hormigón*
- *Ahorro de agua mediante reutilización del agua de lavado*

En general no se pone de relieve que la industria del hormigón está muy concienciada por todos estos aspectos en los que se han realizado avances enormes. Citemos por ejemplo el interés por las reposiciones medioambientales de las industrias extractivas de áridos; la gran cantidad de investigación

desarrollada para minimizar los consumos energéticos; el extraordinario control que se ejerce sobre las emisiones de gases para no dañar el medio ambiente; el continuo interés por reducir los consumos de cemento Portland empleando otros conglomerantes que son residuos de otros tipos de industria, como las escorias o las cenizas volantes; la mejora de la calidad de los hormigones para optimizar sus consumos en las estructuras; los avances en los equipos y procesos para controlar el ruido en las obras; las medidas implementadas para conseguir la reducción de polvo; la reutilización de aguas recicladas en las obras en las que los consumos son importantes, etc., actuaciones que se han venido implementando en las últimas décadas y que han venido siendo soportadas sin que el rendimiento económico de la utilización del hormigón se haya resentido de forma notable. Otras industrias emplean procesos que producen efectos nocivos en mayor grado que la construcción de estructuras de hormigón y se soportan en aras a conceptos de la necesidad de un desarrollo a veces tal vez menos sostenible, con menores condicionantes y sin obligar a que se realicen investigaciones para minimizar su impacto, no arbitrando la mejora de los procesos, procesos a los que sí se obliga a implementarlos en la industria del hormigón. La investigación incluso se ha preocupado por aspectos tales como el confort en los tajos y la seguridad de la ejecución, abordando la industrialización de los procesos de encofrado y ferralla haciéndolos más seguros, y la prevención de las enfermedades profesionales, como es el caso de empleo de hormigones autocompactantes para eliminar la necesidad de empleo de la vibración interna, evitando los ruidos y las enfermedades profesionales que de su empleo se pueden derivar.

Paralelamente a lo anterior debemos señalar que se asigna al hormigón el carácter de gran productor de residuos ante demoliciones de obras existentes. Pero consciente de ello la industria del hormigón, debemos citar el enorme interés que muestran campos de investigación tales como el correspondiente a los hormigones realizados con áridos reciclados, procedentes de demoliciones de obras existentes y que por problemas de durabilidad o funcionales han agotado su vida útil. Mediante los resultados de estas investigaciones se podrán

reducir en el futuro los volúmenes de residuos procedentes de la demolición de obras de hormigón, tal y como es una realidad en los reciclados de firmes.

Las obras *in situ* producen polvo y ruido: las regulaciones actuales han incidido sobre estos aspectos estableciendo disposiciones de obligado cumplimiento para reducir estos tipos de afecciones medioambientales. Incluso en algún país existe una certificación voluntaria regulada perfectamente que permite dotar del carácter de obra limpia y poco ruidosa, “obra aseada” la llamaríamos, a aquella que cumple una serie de condiciones medioambientales acreditada mediante el control de determinados parámetros que son medidos sistemáticamente.

Estas condiciones medioambientales obligan a esfuerzos que son exigidos a las obras de hormigón *in situ* y estoicamente la industria del hormigón estructural las ha soportado como un reto para mejorarla, asumiendo los costes de la investigación de las medidas necesarias para paliar sus efectos nocivos.

Pero ante tales mal llamadas debilidades ¿cuáles son las fortalezas del hormigón *in situ*?

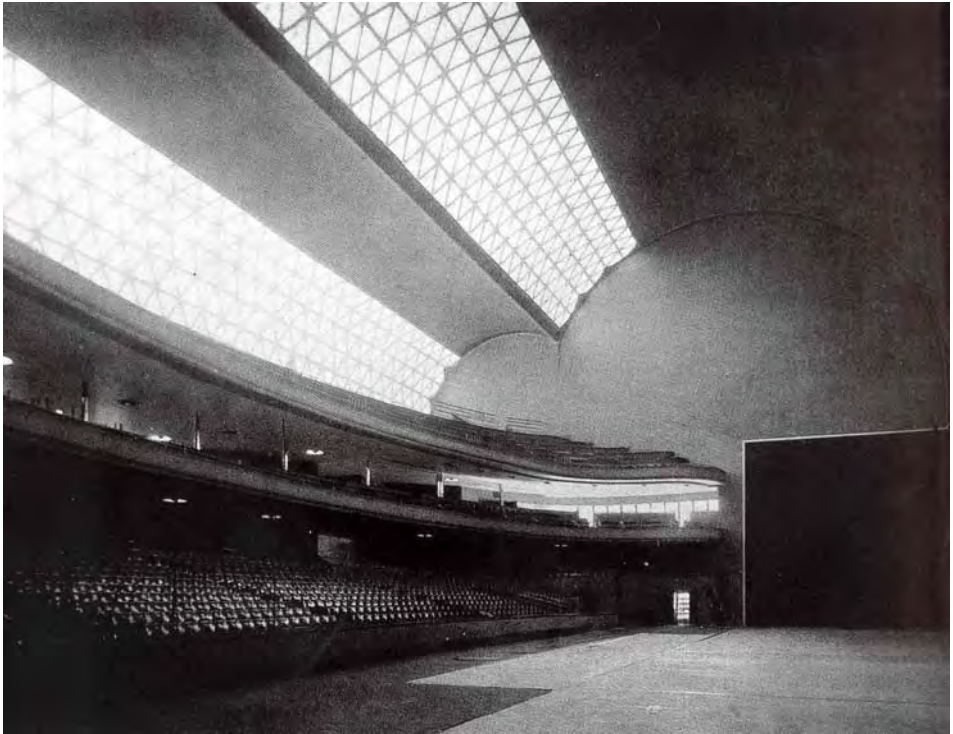
Citaremos, en primer lugar, la posibilidad de que con reducidos medios se hayan podido realizar grandes obras, gracias a que la técnica constructiva del hormigón aprovecha recursos que existen en todas las zonas geográficas, la mano de obra que se emplea no requiere una elevada especialización y los medios auxiliares para su elaboración y colocación son asimismo de fácil instalación y manejo. Siempre se ha considerado a la construcción en general y de las grandes infraestructuras de hormigón en particular, como un gran motor del empleo y éste es un aspecto que, aunque no sea técnico, sí tiene un gran impacto sociológico y económico en los países que precisan tasas elevadas de desarrollo y, en consecuencia, de crecimiento: allí donde la construcción está en alza el crecimiento económico va en paralelo, siendo de citar los casos tanto de nuestro país como de otros, tales como Chile, China, etc., donde la industria de la construcción en general y la ejecución de infraestructuras en particular han representado revulsivos inversores que han transformado la economía de áreas geográficas importantes.

Pero no son solo los aspectos económicos ni sociológicos los que me mueven a defender al hormigón estructural: frente a la pobreza de medios que se hacen precisos para realizar estructuras de hormigón, debemos señalar que no existe otro material equiparable en lo referente a su facilidad de moldeado *in situ*, en condiciones diríamos que naturales, lo que le ha hecho acreedor de un reconocimiento generalizado no sólo por parte de los técnicos, arquitectos e ingenieros, sino también incluso por parte de los artistas.

De las formas estructurales que aprovechan los recursos resistentes que ofrece el hormigón, muchas de ellas, las que corresponden con superficies regladas, conducen a estructuras de un innegable valor estético, con formas optimizadas que conducen a amplios ahorros de material, siendo en consecuencia económicas, para desarrollar obras de una gran envergadura. Insignes especialistas en estructuras, como Torroja, han sabido aprovechar y resaltar la importancia estructural de este humilde material para construir obras muy importantes desde hace tiempo: la cubierta del Mercado de Algeciras, el Frontón Recoletos o la Marquesina del Hipódromo de la Zarzuela son exponente de la generosidad del hormigón *in situ* para construir obras bellas y bien optimizadas desde los puntos de vista estructural y económico.

También en su facilidad para ser moldeado *in situ* está la posibilidad de que el hormigón sea el material idóneo para la ejecución de grandes estructuras: me refiero a estructuras tales como los puentes, las presas y los grandes edificios. Ingenieros españoles del prestigio de los Profesores Fernández Casado, Torroja, Manterola, del Pozo, Fernández Ordóñez, Arenas, y tantos otros en la mente de todos, pontífices consumados y eminentes estructuralistas, han dejado nuestra geografía plagada de vestigios de la potencialidad del hormigón para elevar al nivel de obra de arte las realizaciones de ingeniería civil relacionada con estos tipos de construcciones. En unos casos utilizando el material de una manera extraordinariamente sincera, aprovechando la belleza de la forma sin otras concesiones que las que sean obligadas por la tipología estructural seleccionada, los condicionantes del proceso constructivo para hacerlo viable y la correcta proporción de la geometría de la obra bien concebida, bien calculada y bien construida; en otras luciendo las posibilidades del hormigón para realizar obras

espectaculares en las que la frontera entre las exigencias del rendimiento estructural del material y de la forma quedan ocultas por las concesiones realizadas para asombrar al público en general por la espectacularidad de la construcción.



Frontón Recoletos.



Hipódromo de la Zarzuela.



Mercado de Abastos de Algeiras.



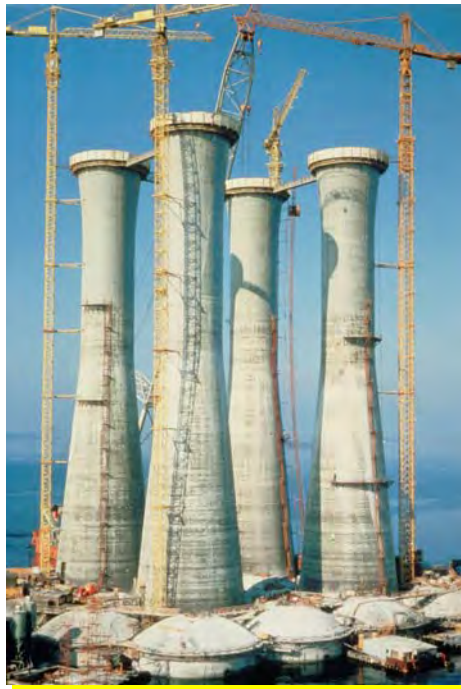
Puente Vasco de Gama.



Puente Ing. Carlos Fdez. Casado (Barrios de Luna).



Toronto Toser.



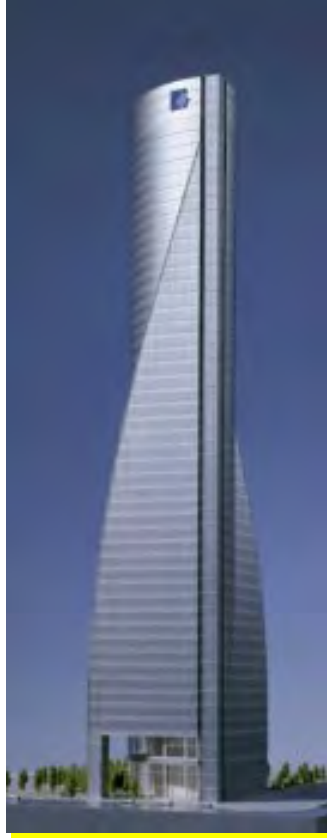
Plataforma Extraccion Noruega.



South Wacker Chicago Tower.



Petronas Tower.



Torre Espacio.

¿Y qué diríamos de los artistas?: siempre supieron elevar a nivel de arte la utilización de materiales que eran empleados en la construcción: valga como exponente el barro, la piedra, la madera y el hierro. Y también en este caso el hormigón ha facilitado la expresión artística debido a su carácter de excepcionalmente moldeable. Tal vez encontremos en Chillida la máxima expresión de la capacidad del hormigón para que el artista nos transmita sus

sensaciones, exclusivamente desde un punto de vista de expresión escultórica. Gaudí ya nos había transmitido la potencialidad del hormigón para elaborar obras bellas y a la vez funcionales desde el punto de vista de su utilización en edificaciones, y en los momentos actuales tal vez sea Santiago Calatrava, el Gaudí de nuestra época, el que ha sabido, tras encontrar a los mecenas adecuados, lucir este material, con tan excelentes condiciones de moldeabilidad, en sus espectaculares realizaciones.

Como resumen: el hormigón, tosco material, que se sirve de toscas materias primas, que se elabora con rudas manos de sufridos obreros que tienen que soportar inclemencias ambientales, que tiene una imagen negativa de depredador del medio ambiente, es un noble material que se preocupa por dar un servicio funcional ante diferentes utilidades, que está inmerso en un ambiente de tecnología e investigación que pretende, calladamente, minimizar y, hasta en algún caso, eliminar aquellos aspectos negativos que de su utilización pueden derivarse para el mundo al que sirve, y todo ello incluso a costa de resultar económicamente menos competitivo; que puesto a disposición del artista es capaz de colaborar con su moldeabilidad a producir obras de arte en su sentido estricto. Esta es la visión que quiero dar de la consideración de este primer aspecto: la sostenibilidad del hormigón *in situ*, con sus aspectos positivos frente al uso del hormigón.



Ciudad de las Artes y las Ciencias.



Elogio del Agua.



La Sirena Varada.

3. LA FISURACIÓN Y LA DEFORMABILIDAD DEL HORMIGÓN

El hormigón es un material estructural que presenta características mecánicas y reológicas a las que se le imputan connotaciones negativas.

Es un material, que como la piedra natural, presenta una buena resistencia a compresión la cual puede ser regulada e implementada en un determinado nivel jugando con la dosificación de sus componentes y en particular con el contenido de agua y cemento. Pero contrariamente presenta una resistencia a tracción significativamente más baja, en órdenes del 7% al 10% de su resistencia a compresión. De ello se deduce que ante solicitaciones en secciones estructurales que produzcan en parte o en toda la sección estados tensionales de tracción, (solicitaciones de flexión, cortante, torsión), las secciones precisan ser reforzadas y en consecuencia armadas con armaduras adheridas que absorban tales tracciones, técnica del hormigón armado, o bien, previamente a la aplicación de la sollicitación exterior, crear un estado de compresiones, en las zonas que se verán traccionadas, mediante la técnica del hormigón pretensado.

Por otra parte el hormigón presenta una particularidad de comportamiento a medio y largo plazo que le hace susceptible de verse sollicitado por tensiones de tracción: la retracción del hormigón, aspecto de su comportamiento reológico que se traduce en una falta de estabilidad dimensional que hace que el hormigón a lo largo de su vida experimente una contracción volumétrica cuya magnitud depende de diferentes factores tales como el contenido de cemento, las condiciones de curado, la humedad ambiental, el espesor de la pieza, etc.

Los estados tensionales de tracción creados bien por sollicitaciones debidas a acciones directas, bien por coacciones que impiden el libre

acortamiento del hormigón ante efectos de temperatura y retracción, fisuran las secciones de hormigón y tal vez sea la fisuración la connotación más negativa que tiene el hormigón cuando se le compara con otros materiales estructurales como el acero y la madera.

¿En qué afecta a la capacidad de una estructura de hormigón la aparición de fisuras?

Sabido es por los técnicos, y divulgado debe ser entre todos los usuarios, que las estructuras de hormigón armado se calculan sin contar con la resistencia a tracción del hormigón para garantizar su seguridad a rotura, lo que en el mundo estructural definimos como seguridad frente al estado límite último de resistencia. Luego desde este punto de vista la incidencia en la opinión pública de la aparición de fisuras debería ser nula. Aún apreciando la repercusión psicológica en los usuarios de las construcciones que correlacionan fisuración con debilidad estructural, debe ser divulgado que la fisuración no debería representar un aspecto tan negativo al valorar la idoneidad del comportamiento de las estructuras de hormigón.

La influencia de la fisuración en la durabilidad puede ser apreciable si los anchos de fisura son importantes hasta el punto de facilitar el ataque de los agentes agresivos a la armadura provocando su corrosión. Más tarde volveremos sobre este aspecto. Las normas obligan a limitar el ancho de fisuras a fin de garantizar que, bajo condiciones normales de servicio, se minimice este riesgo, todo ello mediante la comprobación del estado límite de servicio de fisuración. Las fisuras son en consecuencia diríamos que consustanciales con el hormigón armado y su presencia no debería representar indicio negativo de comportamiento estructural deficiente del hormigón, tampoco desde este punto de vista.

El tercer aspecto que puede quedar afectado por la fisuración del hormigón es la rigidez de la pieza. A las estructuras de hormigón armado se les pide que garanticen, con unos coeficientes de seguridad establecidos por las normas, unos determinados niveles de resistencia: capacidad frente al agotamiento resistente. Pero asimismo se les pide que bajo condiciones de servicio la deformación de los elementos quede limitada a unos determinados

valores los cuales deberán ser compatibles con las condiciones funcionales de servicio que se hayan establecido. En ciertos casos la exigencia de deformabilidad limitada, lo que conlleva a la exigencia paralela en la pieza de una rigidez determinada, habrá sido establecida para que se minimice el riesgo de aparición de daños en elementos soportados, tal como por ejemplo se exige para garantizar la ausencia de fisuras en las tabiquerías y cerramientos de las edificaciones de tipo residencial. En otros casos será la necesidad de limitar los efectos de segundo orden que se puedan inducir en la estructura, motivados por la deformabilidad, o la necesidad de acotar los parámetros que rigen su comportamiento dinámico que pueden quedar afectados por condicionantes de la rigidez de la pieza. Todo ello sin descartar los efectos aparentes de debilidad a que puede conducir la observación de una situación deformada en exceso de un elemento estructural y que puede afectar negativamente a los usuarios. Pero este tercer aspecto de afección a la rigidez tampoco ha pasado inadvertido en la reglamentación técnica relacionada con el proyecto de estructuras de hormigón, que obliga a que las comprobaciones de deformabilidad, así como la valoración de los efectos de segundo orden o la valoración de los parámetros que rigen su comportamiento dinámico y que puedan afectar a la estructura provocando efectos amplificadores de las sollicitaciones o problemas de resonancia, se haga considerando la rigidez de la pieza tras evaluar su estado de fisuración.

La fisuración del hormigón, que conduce a un incremento de la deformabilidad de las piezas ¿puede ser bajo algún punto de vista considerada como aspecto de apreciación positiva? Rotundamente hemos de señalar que sí. Las normas establecen que la cuantía mínima que debe llevar una pieza de hormigón armado, capaz de verse sollicitada en tracción parcial o totalmente, deberá ser tal que la armadura dispuesta en cualquier sección del elemento sea capaz de absorber los volúmenes de tracciones que sea capaz de soportar el hormigón en el momento de fisurarse. Es decir que toda la pieza antes de romperse, o lo que es lo mismo antes de alcanzar su agotamiento, deberá poder fisurarse pero garantizándose que la pieza así armada presentará una “fisuración de aviso” previa a la rotura. Uno de los aspectos que siempre he valorado del



Fisuras debidas a la deformabilidad.

hormigón armado o del hormigón pretensado es su nobleza: este tipo de material nos avisa antes de romperse fisurándose. El camino hacia el agotamiento de una estructura de hormigón queda marcado por unos cuantos hitos que suponen avisos, habiendo diferencia entre el hormigón armado y el pretensado.

Para el hormigón armado los hitos serían:

- Sin fisuración: situación aceptable
- Fisuración según los cálculos: situación prevista y aceptable
- Fisuración con ancho superior al calculado: situación de servicio sobrepasada y no aceptable, con riesgo de inseguridad que obliga a tomar medidas
- Rotura

En el hormigón pretensado los hitos serían ligeramente diferentes

- Sin fisuración: situación aceptable
- Aparición de fisuras: importancia según tipo de pieza y clase de pretensado en cálculo. Grave si en servicio se garantizaban compresiones, señalándonos que está sobrepasado el estado de servicio
- Fisuración según los cálculos: situación prevista y aceptable
- Fisuración con ancho superior al calculado: situación de servicio sobrepasada y no aceptable, con riesgo de inseguridad que obliga a tomar medidas
- Rotura

El análisis de los problemas patológicos de las estructuras de hormigón, cuyo proceso se asemeja a los análisis patológicos del cuerpo humano, presenta la particularidad de que en este caso el “paciente” no nos comunica sus síntomas, simplemente nos da indicios de sus problemas. En ocasiones yo he señalado que la forma de comunicarse las estructuras de hormigón con los técnicos es a través de la manifestación de su situación fisurada, siendo la

fisuración el lenguaje con el que nos hablan las estructuras de hormigón armado o pretensado. Los detractores de las estructuras de hormigón, en la defensa que hacen de las estructuras metálicas, siempre se refieren a dos aspectos: la fisuración y la baja ductilidad, señalando las desventajas que frente a tales aspectos presentan las estructuras de hormigón en relación con las estructuras metálicas. Nada más lejos de la realidad. También las estructuras metálicas se fisuran y cuando lo hacen, en general sin capacidad para poder ser observada su fisuración a simple vista, lo hacen en sus cordones de soldadura o en sus entallas, y el problema que de ello se deriva es en general muy grave, no pudiendo ser tal tipo de fisuración contemplada como un síntoma de nobleza y de aviso como resulta en el caso de las piezas flectadas de hormigón armado o pretensado.

La fisuración también puede tener una connotación positiva en lo referente a la capacidad de redistribución de esfuerzos de las estructuras hiperestáticas. Las secciones más solicitadas se fisuran antes y, si presentan la ductilidad adecuada, al perder rigidez se descargan, permitiendo que otras secciones menos solicitadas sufran incrementos de sollicitación sin poner en precario la seguridad del elemento. Dados los modelos de cálculo que hoy en día se emplean como métodos de proyecto, que parten de unas leyes de comportamiento de las secciones de carácter lineal, bastante alejadas del comportamiento real de las estructuras cuando se alcanzan niveles elevados de sollicitación en los que su comportamiento es de carácter marcadamente no lineal, el recurso de la redistribución, al que contribuye de forma decisiva sus condiciones de ductilidad, se logra en parte apreciable por la presencia de la fisuración, aspecto que, al igual que la ductilidad, merece una consideración positiva por permitir una desviación frente a la situación de proyecto en condiciones de seguridad aceptable para el elemento afectado. Creo que fue el profesor Tasios el que señaló en una ocasión que *“la ductilidad de las estructuras es un puente sobre nuestra ignorancia”*, porque permite que un error, o más bien una desviación frente a la situación del comportamiento calculado como previsto en fase de proyecto, no tenga las consecuencias graves e irreversibles a que conduciría la ausencia de capacidad de redistribución por falta de ductilidad.

4. LA DURABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

El desarrollo del hormigón armado en sus primeros años de utilización a escala industrial en nuestro país estuvo basado en patentes desarrolladas en Francia. Una de las patentes bajo las cuales se realizaron bastantes obras en los comienzos del siglo XX, la patente Hennebique, publicitaba la realización de estructuras de hormigón armado desarrolladas con su patente señalando:

*“Haga sus estructuras de Hormigón Armado. Un material incombustible,
imputrescible
y de duración ilimitada, prácticamente sin mantenimiento”*

Lo anterior se señalaba en clara alusión a las estructuras realizadas con materiales que eran sus competidores directos: las estructuras de madera, combustibles y putrescibles, y las de acero, corroibles y con clara afección a sus características mecánicas en caso de incendio si no se encuentran correctamente protegidas mediante los oportunos medios de aislamiento.

La historia del hormigón armado hizo mostrar el error de una publicidad que, si no podía considerarse engañosa para el estado del conocimiento en la época en la que se publicitaba, la experiencia de la utilización del material la hizo mostrar al menos como equivocada.

Todo material tiene sus limitaciones de empleo. El hormigón, que no es una excepción a tal respecto, es un buen material que precisa de especificaciones técnicas afectando al proyecto, a los materiales y a la ejecución



Corrosión de Armaduras.

para que sea durable, a la par que precisa de un mantenimiento adecuado para garantizar una vida útil que minimice el coste global de su utilización. Pero durante muchos años no se ha prestado la atención adecuada en las normas para contemplar los aspectos relacionados con la durabilidad, lo que ha conducido a la aparición de problemas en las estructuras de hormigón que en cierto modo han supuesto un desprestigio del material. Esta situación ha sido aprovechada por los materiales competidores en sus usos estructurales para presentarlo como un material más problemático a tal respecto.

Hoy en día se cuestiona la idoneidad del hormigón en lo que respecta a su comportamiento durable imputándole una serie de problemas de comportamiento derivados de una utilización errónea. Dos son los tipos de problemas frente a los cuales la imagen del hormigón está deteriorada, teniendo el carácter de un material débil: nos referimos fundamentalmente a su comportamiento frente a la corrosión y a su comportamiento frente a fuego.

Y resulta necesario restituir ante los usuarios la imagen real del hormigón, como material durable, con un buen comportamiento frente a la corrosión y con un buen comportamiento en situaciones de incendio, aspectos que más que debilidades son fortalezas.

La normativa actual de Hormigón Estructural, que contempla las especificaciones para garantizar la durabilidad del hormigón y su resistencia al fuego, permite garantizar un comportamiento adecuado del material ante ambas sollicitaciones.

En lo que se refiere a la corrosión de las armaduras, dos son los procesos de tipo electroquímico que la producen.

Desde un punto de vista simple y divulgativo, señalamos que el hormigón, con su carácter alcalino, representa una protección adecuada que permite mantener a las barras de la armadura en un medio en el que las reacciones que provocan la corrosión del acero no pueden tener lugar: el medio alcalino en el que las barras se encuentran inhiben de la corrosión en las primeras edades. La presencia de anhídrido carbónico en la atmósfera y su penetración a través de la red de poros del hormigón hace que por reacción con la cal convierta las partículas de cal en carbonato cálcico, pasando a convertirse

el medio alcalino en un medio neutro. Esta transformación que se inicia en la superficie de la pieza, y que se conoce como carbonatación, avanza en el interior de la pieza de forma que en determinado período de tiempo el frente de carbonatación puede llegar a la altura de la armadura, momento en el cual las barras quedarían sin la protección alcalina y siendo entonces susceptibles de sufrir fenómenos de corrosión, al igual que el acero expuesto a la acción de un medio exterior agresivo.

Aparte del proceso de corrosión antes expuesto existe otra forma de producirse la corrosión y es por la presencia de cloruros. La difusión del ión cloro en la masa del hormigón es susceptible de atacar y producir la destrucción puntual de la capa de protección pasiva de la barra que le proporciona la lechada de cemento, abriendo la posibilidad de que se inicie de forma puntual en el punto de ataque un fenómeno corrosivo cuya manifestación en este caso sería a base de picaduras en los puntos en los que se hubiera producido la eliminación de la capa pasiva.

Ante la corrosión los efectos estructurales que se producen son de varios tipos. En primer lugar señalaremos que al producirse óxido en el perímetro, una vez iniciado en la barra el proceso corrosivo, el espesor del óxido resultante es superior al del acero original: con ello se producen fuertes presiones sobre los recubrimientos de las barras que acaban por fisurar el hormigón y en ocasiones a desprender los recubrimientos. En estas condiciones de fuerte fisuración o de desprendimiento del recubrimiento, las barras quedarían sin protección eficaz y estarían expuestas a la agresión ambiental directa que aceleraría el proceso corrosivo de una manera grave. El segundo efecto de consecuencias estructurales graves es la reducción de la sección resistente de la barra ante la pérdida por corrosión, y cuyo efecto puede llegar a ser de extraordinaria gravedad para los elementos solicitados a flexión, cortante o tracción en los que su seguridad es función de la capacidad mecánica de la armadura y menos dependiente de la resistencia a compresión del hormigón. El tercer efecto que también puede tener incidencia grave en la seguridad de los elementos estructurales y que provoca la corrosión es la pérdida de adherencia de las

barras. Y complementariamente debemos señalar el efecto que las entallas pueden producir sobre la resistencia y ductilidad de las armaduras.

El que el hormigón haya tenido un mal comportamiento frente a corrosión ha sido debido a no habernos preocupado durante muchos años de los aspectos que potencian la protección de las armaduras y que fundamentalmente son:

- disponer dosificaciones con unos contenidos de cemento adecuados para que la alcalinidad esté garantizada
- emplear relaciones agua cemento moderadas que garanticen una reducida porosidad
- especificar espesores amplios del recubrimiento que supongan protecciones eficaces de las armaduras
- proceder a una compactación adecuada del hormigón que garantice una adecuada compacidad
- implementar procesos eficaces de curado, adecuados en tipo de proceso y duración para reducir la porosidad del recubrimiento aspecto que se vería seriamente afectado ante un proceso de curado defectuoso
- limitar los contenidos de cloruros que aportan los componentes del hormigón
- evitar la penetración de cloruros disponiendo barreras eficaces a tal fin
- disponer en casos extremos armaduras protegidas e incluso de acero inoxidable

Todas estas medidas han sido descuidadas en épocas precedentes en aquellas obras en las que se han detectado problemas de corrosión, habiéndose reforzado en las vigentes reglamentaciones concernientes al hormigón estructural todos los aspectos que condicionan la durabilidad. Hoy en día en las

ediciones actuales de estas reglamentaciones se contempla de forma concreta y operativa los aspectos concernientes a la vida útil con especificaciones que afectan tanto al material como a los diferentes aspectos de proyecto y ejecución antes citados y que involucran el comportamiento durable del hormigón estructural.

Puede señalarse que el hormigón estructural concebido, especificado, elaborado y puesto en obra de acuerdo con las especificaciones referidas no sólo no debe ser contemplado como un material problemático en lo que a los aspectos de la durabilidad se refiere, sino que resulta el material estructural más recomendable para su utilización en obras situadas en ambientes problemáticos, para los cuales deba ser garantizada, con fiabilidad, una determinada duración de su vida útil. Así se ha visto refrendado por las decisiones que se han tomado sobre selección del material en proyectos tan importantes como el Proyecto Oresund, conexión fija entre Suecia y Dinamarca, proyecto en el que se incorporaron gran cantidad de elementos de hormigón armado y pretensado, diseñado tomando en consideración especificaciones muy rigurosas de durabilidad, con lo que se tiene garantía de que la vida útil de las estructuras podrá superar los 125 años. Y como este proyecto podríamos citar dos realizaciones recientes, como son el Dique de Mónaco y la Estación GNL, en el Adriático Norte, ambas realizadas en España y transportadas a continuación a sus lugares de emplazamiento definitivo, con condiciones climáticas adversas, obras realizadas en hormigón estructural en las cuales las fuertes exigencias de durabilidad sólo han podido ser respondidas por el hormigón haciendo viable su realización con este material.

En resumen y en lo que a la durabilidad se refiere, podemos concluir que, aunque el hormigón estructural haya presentado un pasado en cierto modo problemático, derivado de haberse implementado algunas prácticas de proyecto o constructivas hoy en días evaluadas como erróneas, el hormigón estructural, realizado respetando las exigencias de durabilidad que se establecen en las reglamentaciones actuales, se muestra como un material con garantía fiable de durabilidad, presentando frente a otros materiales una mayor fortaleza, no debiéndosele considerar como un material débil.

En lo que se refiere a su resistencia en condiciones de incendio es curioso observar como el hormigón estructural, material que claramente presenta un mejor comportamiento que la madera y el acero laminado, se presenta muchas veces como un material débil.

La resistencia al fuego de una estructura se mide en general como el tiempo que es capaz de soportar las acciones que la solicitan tomando en consideración los efectos que sobre la resistencia de los materiales tiene la acción del fuego. A los elementos estructurales, aparte de su función como elemento resistente, pueden serle exigidas otras funciones como elemento separador, obligándole a cumplir condiciones de aislamiento térmico y de estanquidad ante el paso de llamas y gases calientes, funciones que son tan importantes como la propia resistencia estructural para poder mantener confinado el incendio en áreas reducidas.

El hormigón estructural permite cumplir con las tres funciones enunciadas sin unos fuertes condicionantes técnicos o económicos.

Es evidente que el fuego afecta a la resistencia mecánica de los materiales, hormigón y acero.

Para el hormigón, en función del tipo de árido empleado en su elaboración, temperaturas elevadas, en el rango de 300 a 500° C, pueden conducir a disminuciones significativas de sus resistencias mecánicas tanto a compresión como a tracción.

Para el acero la resistencia a tracción quedaría reducida a órdenes del 50% al alcanzarse la temperatura de transición de unos 500° C y en paralelo el módulo de deformación se ve asimismo reducido de modo semejante.



Daños por Incendio.

Pero dadas las características aislantes del hormigón la evolución de las temperaturas en el interior de las piezas es significativa, produciéndose una disminución apreciable según se penetra en la misma. De esta forma podemos comprobar que al cabo de un cierto período de tiempo de actuación del incendio, con temperaturas en la cara de la pieza que superan los 400° C, se habrá visto afectado de forma sensible por la temperatura un reducido espesor del hormigón, a la vez que la armadura se habrá visto protegida por el poder aislante del propio hormigón. Por ello uno de los procedimientos para garantizar el comportamiento resistente de una estructura en caso de incendio para los elementos solicitados a flexión, cuya seguridad depende de la capacidad mecánica de la armadura básicamente, consiste en disponer recubrimientos con espesor suficiente para garantizar que al cabo del tiempo requerido de resistencia al fuego no se hayan producido unas degradaciones de la resistencia del acero y del hormigón que pongan en cuestión la seguridad del elemento. En general los recubrimientos requeridos para garantizar el comportamiento resistente en condiciones de incendio del hormigón estructural no son excesivamente condicionantes frente a los valores establecidos por las exigencias de durabilidad o establecidas por consideraciones de mínimo en las normas vigentes.

Las características de aislamiento y estanquidad que se requieren para ejercer la función separadora en los muros y losas de hormigón se alcanzan con reducidos espesores de hormigón, menos condicionantes en general que los requeridos por aspectos resistentes o exigencias prácticas de ejecución.

También podemos en consecuencia señalar que frente al comportamiento en caso de incendio el hormigón estructural presenta fortalezas más que debilidades, constatándose la paradoja que en ocasiones una forma de garantizar el comportamiento frente a incendio de las estructuras realizadas con acero laminado es embebiendo sus elementos en secciones de hormigón.

Por último señalaremos que tal vez el mal concepto que se tiene de las estructuras de hormigón en lo referente a su comportamiento frente al fuego se deriva de la observación de la situación dañada que se presenta en ellas una vez ha sido extinguido el incendio. Es ésta una apreciación formulada sobre una

base errónea: lo que se pide de una estructura de hormigón es que soporte las cargas actuantes durante un tiempo preestablecido en las normas que regulan la resistencia en caso de incendio. No se pide el que la estructura quede indemne después de sufrir los choques térmicos a los que se someten los elementos estructurales en las tareas de extinción, que a menudo produce daños los cuales son, en apariencia al menos, de carácter más relevante a la vista que el propio efecto de la temperatura, ya que al crearse gradientes de temperatura superiores al enfriar las superficies se puede provocar la desaparición de los recubrimientos dejando a la estructura seriamente dañada.

5. EPÍLOGO

Las estructuras de hormigón presentan debilidades aparentes que nada tienen que ver con las debilidades reales a partir de las cuales deberían ser juzgadas.

Es más, tales debilidades aparentes se pueden considerar en muchos casos como fortalezas cuando se realiza un análisis comparativo de los elementos de hormigón estructural frente a otros materiales de uso común en el campo de las estructuras.

El hormigón es un material sostenible en sí y la mejora de los parámetros que marcan las directrices medioambientales y de sostenibilidad están siendo tomadas en consideración por la industria para mejorar el impacto, que no el hormigón en sí sino algunos de sus componentes como el cemento y alguno de sus procesos, pueden producir sobre las exigencias de desarrollo sostenible y medioambientales a las que deben ajustarse la realización de estructuras.

Por otra parte los juicios negativos que sobre su comportamiento estructural se establecen basados en la deformabilidad y capacidad de fisuración del hormigón estructural no tienen justificación técnica pudiendo derivarse de tales efectos fortalezas en lugar de debilidades.

Por último, el hormigón estructural tiene justificada ampliamente su capacidad para ser considerado como un material durable y resistente en caso de incendio. Han sido las prácticas erróneas en su fabricación y en los procesos de ejecución las que han conducido a que por parte de muchas personas se le asignen debilidades a tal respecto. Un análisis técnico de su potencial para soportar agresiones ambientales o por incendio le muestra como un material que

presenta evidentes fortalezas siempre que su fabricación y colocación se ajuste a las exigencias que en la actualidad se establecen por las normas de aplicación al hormigón estructural.

6. REFERENCIAS

CALAVERA RUIZ, J.: *“Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón”*. INTEMAC. 1999.

CEB BULLETIN 158-E: *“Cracking and Deformation”*. Comité Eurointernational du Béton (CEB). 1985.

CEB BULLETIN 183: *“Durable Concrete Structures”*. Design Guide. Comité Eurointernational du Béton (CEB). 1992.

CEB Bulletin 242: *“Ductility of Reinforced Concrete Structures”*. Comité Eurointernational du Béton (CEB). 1998.

CEB-FIP: Model Code 1990.

CHATURVEDI, S.; OCHSENDORF, J.: *“Global Environmental Impacts due to Cement and Steel”*. Structural Engineering International (IABSE). August 2004.

IZQUIERDO BERNALADO DE QUIRÓS, J.M.: *“Cálculo de Estructuras de Hormigón Frente al Fuego”*. Cuaderno INTEMAC Nº 23. 1996.

METHA P.K.; BURROWS, R.W.: *“Building Durable Structures in the 21st Century”*. Concrete International. Mars 2001.

MEYER, C.: *“Concrete Materials and Sustainable Development in the USA”*. Structural Engineering International (IABSE). August 2004.

PEREPÉREZ, B.; BARBERÁ, E.: *“Manual de Hormigón Estructural”*. 2005.

COLECCIÓN: DISCURSOS ACADÉMICOS

- 1.- *La Academia de Ciencias e Ingenierías de Lanzarote en el contexto histórico del movimiento académico.* (Académico de Número).
Francisco González de Posada. 20 de mayo de 2003.
Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
- 2.- *D. Blas Cabrera Topham y sus hijos.* (Académico de Número).
José E. Cabrera Ramírez. 21 de mayo de 2003.
Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
- 3.- *Buscando la materia oscura del Universo en forma de partículas elementales débiles.* (Académico de Honor).
Blas Cabrera Navarro. 7 de julio de 2003.
Amigos de la Cultura Científica.
- 4.- *El sistema de posicionamiento global (GPS): en torno a la Navegación.* (Académico de Número).
Abelardo Bethencourt Fernández. 16 de julio de 2003.
Amigos de la Cultura Científica.
- 5.- *Cálculos y conceptos en la historia del hormigón armado.* (Académico de Honor).
José Calavera Ruiz. 18 de julio de 2003.
INTEMAC.
- 6.- *Un modelo para la delimitación teórica, estructuración histórica y organización docente de las disciplinas científicas: el caso de la matemática.* (Académico de Número).
Francisco A. González Redondo. 23 de julio de 2003.
Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
- 7.- *Sistemas de información centrados en red.* (Académico de Número).
Silvano Corujo Rodríguez. 24 de julio de 2003.
Excmo. Ayuntamiento de San Bartolomé.
- 8.- *El exilio de Blas Cabrera.* (Académica de Número).
Dominga Trujillo Jacinto del Castillo. 18 de noviembre de 2003.
Departamento de Física Fundamental y Experimental, Electrónica y Sistemas. Universidad de La Laguna.
- 9.- *Tres productos históricos en la economía de Lanzarote: la orchilla, la barrilla y la cochinilla.* (Académico Correspondiente).
Agustín Pallarés Padilla. 20 de mayo de 2004.
Amigos de la Cultura Científica.
- 10.- *En torno a la nutrición: gordos y flacos en la pintura.* (Académico de Honor).
Amador Schüller Pérez. 5 de julio de 2004.
Real Academia Nacional de Medicina.

- 11.- *La etnografía de Lanzarote: "El Museo Tanit"*. (Académico Correspondiente).
José Ferrer Perdomo. 15 de julio de 2004.
Museo Etnográfico Tanit.
- 12.- *Mis pequeños dinosaurios. (Memorias de un joven naturalista)*. (Académico Correspondiente).
Rafael Arozarena Doblado. 17 diciembre 2004.
Amigos de la Cultura Científica.
- 13.- *Laudatio de D. Ramón Pérez Hernández y otros documentos relativos al*
Dr. José Molina Orosa. (Académico de Honor a título póstumo).
7 de marzo de 2005.
Amigos de la Cultura Científica.
- 14.- *Blas Cabrera y Albert Einstein*. (Acto de Nombramiento como Académico de Honor a título póstumo del Excmo. Sr. D. **Blas Cabrera Felipe**).
Francisco González de Posada. 20 de mayo de 2005.
Amigos de la Cultura Científica.
15. *La flora vascular de la isla de Lanzarote. Algunos problemas por resolver*. (Académico Correspondiente).
Jorge Alfredo Reyes Betancort. 5 de julio de 2005.
Jardín de aclimatación de La Orotava.
16. *El ecosistema agrario lanzaroteño*. (Académico Correspondiente).
Carlos Lahora Arán. 7 de julio de 2005.
Dirección Insular del Gobierno en Lanzarote.
17. *Lanzarote: características geoestratégicas*. (Académico Correspondiente).
Juan Antonio Carrasco Juan. 11 de julio de 2005.
Amigos de la Cultura Científica.
18. *En torno a lo fundamental: Naturaleza, Dios, Hombre*. (Académico Correspondiente).
Javier Cabrera Pinto. 22 de marzo de 2006.
Amigos de la Cultura Científica.
19. *Materiales, colores y elementos arquitectónicos de la obra de César Manrique*. (Acto de Nombramiento como Académico de Honor a título póstumo de **César Manrique**).
José Manuel Pérez Luzardo. 24 de abril de 2006.
Amigos de la Cultura Científica.
20. *La Medición del Tiempo y los Relojes de Sol*. (Académico Correspondiente).
Juan Vicente Pérez Ortiz. 7 de julio de 2006.
Caja de Ahorros del Mediterráneo.
21. *Las estructuras de hormigón. Debilidades y fortalezas*. (Académico Correspondiente).
Enrique González Valle. 13 de julio de 2006.
INTEMAC.

**HOTEL LANCELOT
ARRECIFE (LANZAROTE)**

Patrocina:



INTEMAC