

refrigeración

La refrigeración evaporativa en la edificación

El caso de la construcción de los Soportes Generadores de Microclimas

César Martín Gómez

Doctor Arquitecto. Departamento de Edificación. Escuela de Arquitectura. Universidad de Navarra.

Natalia Mambrilla*

Arquitecto.

La Exposición Internacional de Zaragoza 2008 estaba dedicada al agua y el Pabellón de España, como un elemento expositivo más, quería mostrar como se podía utilizar el propio agua como instrumento de acondicionamiento. Para ello se realizó una propuesta que conjuga el tradicional empleo de la cerámica y la refrigeración evaporativa, en una solución novedosa integrada en el propio edificio, denominada "Soportes Generadores de Microclimas". El objeto de este artículo es describir el desarrollo constructivo y los problemas existentes en la puesta en obra de dichos soportes pues, aunque el desarrollo teórico ha sido descrito en diversos artículos técnicos, es oportuno describir también los problemas y soluciones técnicas surgidos al construir lo que hasta ese momento no era más que un modelo teórico, así como reseñar los principales resultados del conjunto tras su puesta en marcha. Lamentablemente, los optimistas resultados conseguidos durante el tiempo en que estuvo en uso el pabellón, por motivos ligados a la seguridad del mismo, no pudieron conservarse, a lo que hay que añadir que diversas decisiones administrativas sobre el pabellón y otras académicas relacionadas con los autores de este artículo, han impedido hasta ahora su difusión en esta revista¹.

Figura 1. Vista del acceso al Pabellón



(*)Natalia Mambrilla está becada por el Gobierno Vasco a través del Programa de Formación de Investigadores del Departamento de Educación.

ANTECEDENTES

El Pabellón de España para la Exposición Internacional del agua de Zaragoza 2008 "Agua y desarrollo sostenible" surge fruto de un concurso celebrado en el año 2005, promovido por Sociedad Estatal para Exposiciones Internacionales de España, que fue ganado por el arquitecto navarro Francisco Mangado Beloqui y el Centro Nacional de Energías Renovables de España, actuando este organismo como colaborador técnico en las cuestiones relacionadas con el comportamiento energético y los principios de sostenibilidad aplicada en la edificación.

El edificio, tras su construcción, fue reconocido por la crítica arquitectónica con diversos premios, lo que avala su calidad en el ámbito de la innovación tecnológica y la sostenibilidad². Así, el pabellón presenta un bajo consumo energético tanto por los materiales y sistemas constructivos empleados, como también por la alta eficiencia de las instalaciones planteadas³.

Resumidamente, sobre la organización del pabellón, puede decirse que su planta se concibe como un entramado de pilares colocados sobre una superficie de agua perimetral, diseñada para proporcionar una importante reducción de las oscilaciones térmicas alrededor de los espacios

¹ El presente artículo es una versión resumida y en español del artículo presentado en "Energy and Buildings Journal".

² Los premios que ha recibido el Pabellón de España son los siguientes: Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos 2008. / 2008 Fernando García Mercadal Prize. / 2009 Technological Innovation Construmat Prize. / VII Architecture Ceramics Prize. / X Spanish Architecture and Urbanism Exhibition 2009 - Finalist. / The International Union of Architects and the Consiglio Nazionale degli Architetti, Paesaggisti, Pianificatori e Conservatori - Winner of the First Giancarlo Lus Gold Medal in the field of Sustainable Construction.

³ Cfr. Referencias bibliográficas finales.



Figura 2. Vista del exterior (Fot. P. Pegenaute).

principales del pabellón en el tórrido verano zaragozano.

DISEÑO TEÓRICO

El origen de la solución empleada en los Soportes Generadores de Microclimas (SGMs) está en la refrigeración evaporativa. Un efecto para reducir la temperatura ambiente, empleado desde hace siglos en climas como el mediterráneo, con veranos calurosos y secos.

Durante la fase del proyecto de ejecución del pabellón, se trató como un "elemento menor", que debía mostrar las posibilidades de refrigeración con el propio agua en la Exposición del Agua pero que, sin embargo, se convirtió en uno de los que mayor repercusión mediática tuvo, a pesar de su reducido aporte en el global del consumo energético del edificio.

La normativa española prohíbe el acondicionamiento de los espacios abiertos exteriores, salvo si se emplean fuentes de energía residuales. En este caso, los ventiladores obtenían su energía de los paneles fotovoltaicos ubicados en la cubierta del propio pabellón, mientras que el agua empleada provenía de los depósitos de aguas pluviales ubicados en el sótano del edificio.

Además, ha de tenerse en cuenta que el fin de los SGMs no era refrigerar un gran espacio exterior, sino tan sólo atemperar las calurosas

temperaturas en el área de espera de los visitantes, antes de que éstos accedieran a la primera exposición. Este comentario es necesario para comprender, posteriormente, los resultados obtenidos en el montaje final.

Resumidamente, el funcionamiento de los SGMs es el siguiente:

- ▶ Los SGMs están conformados por un núcleo estructural alrededor del cual se colocan piezas cerámicas. Se eligió la cerámica por su porosidad, resistencia y su escasa huella ecológica, al tener una larga vida útil.
- ▶ En la parte alta del pilar, unos rociadores de agua se encargan de humedecer la cara interna de las piezas cerámicas.
- ▶ La corriente de aire, introducida por la parte superior de los pilares, se enfría a medida que recorre el pilar a lo largo de sus 14'6 metros de longitud.
- ▶ En la parte inferior, una de las piezas cerámicas tiene unas rendijas de impulsión del aire tratado al ambiente exterior.

Dado que el objetivo principal de este artículo es el desarrollo constructivo de los SGMs y no el planteamiento teórico de su funcionamiento, se remite a la bibliografía final para obtener más información tanto de las condiciones exteriores de diseño, como de los cálculos teóricos y ensayos de fluidodinámica iniciales⁴.

EJECUCIÓN

La investigación en arquitectura, cuenta con una particularidad que la diferencia de otras ramas del saber: Si la investigación es demasiado innovadora o basada en planteamientos demasiado teóricos, puede que no se aplique nunca en un edificio; pero si se aplica cierta innovación en un edificio, aunque constituya un paso adelante en la ciencia edificatoria, puede que en determinados círculos científicos, no se considere una investigación relevante. Por todo ello, cobra especial importancia reseñar cuáles fueron los puntos más relevantes en la construcción real, en un edificio en un uso, de un modelo teórico como el que nos ocupa.

⁴ Concretamente, véase en detalle: D. Lanceta, F. Manteca, C. Martín Gómez, D. Martínez, F. Serna, J. Llorente. "Cooling of outdoor spaces by means of evaporative-cooling ceramic-pillars". 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, Septiembre 2007, Creta, Grecia.

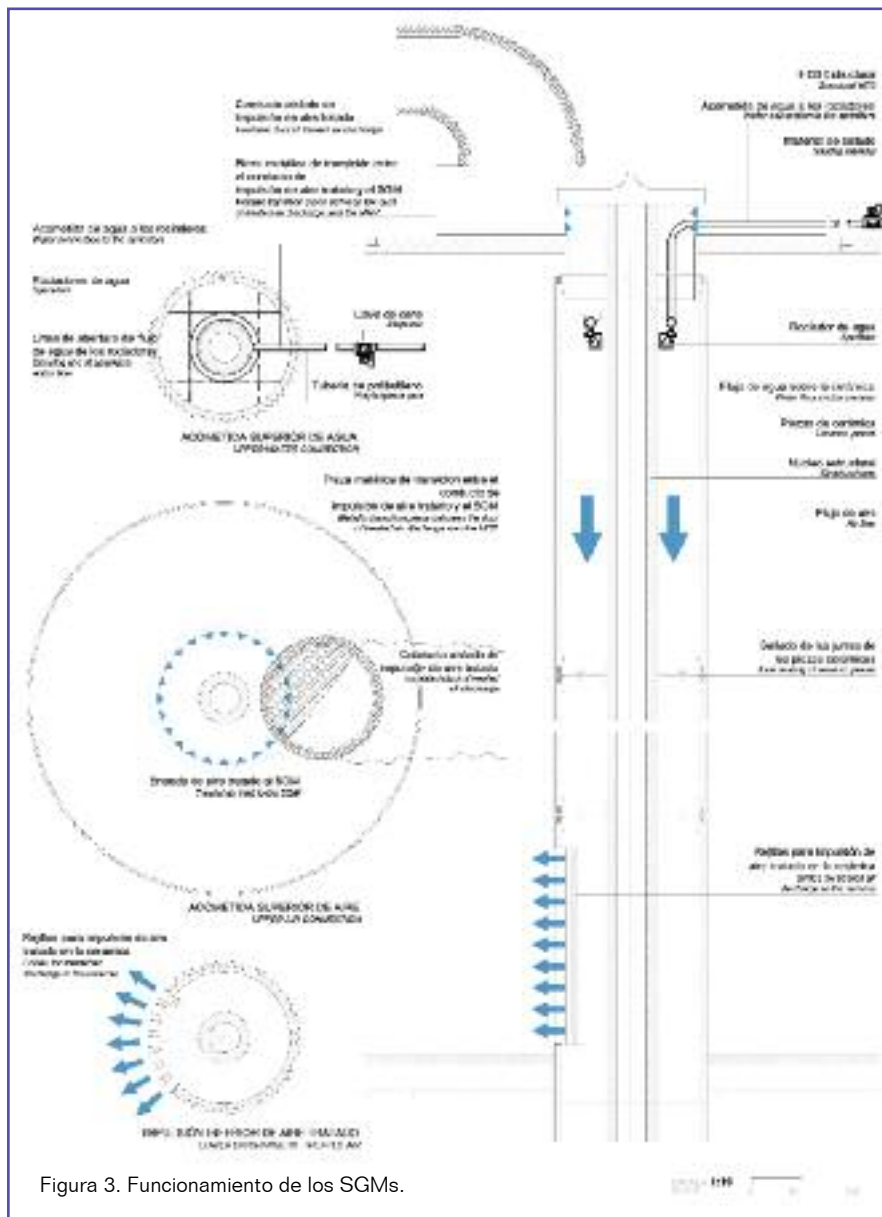


Figura 3. Funcionamiento de los SGMs.



Figura 4. Montaje de los SGMs. Pueden observarse los conductos flexibles de conexión entre el conducto principal y la parte superior de los SGMs (Fot. C. Martín Gómez).

CONSTRUCCIÓN

Uno de los aspectos más singulares de la construcción de los SGMs, fue la particular geometría del pabellón, que implicaba que todo el montaje se realizara en altura, con andamios de base reducida para facilitar su movimiento entre el “bosque” de pilares. Por todo ello, varias de las pruebas de montaje y funcionamiento primero se realizaron en la base del edificio y luego se trasladaron progresivamente de los pilares de más fácil acceso al resto, pues cualquier error hubiera implicado muchas horas de montaje y desmontaje, algo inadmisibles en un proyecto con unos márgenes de tiempo tan ajustados (Figura 4).

Las piezas cerámicas de todos los pilares se anclaron al núcleo estructural metálico, sin ningún tipo de sellado entre ellas, lo cual no era admisible en el caso de los SGMs, donde se debía asegurar que todo el caudal de aire llegase a las rejillas inferiores. Tras diversas pruebas, se optó por sellar las juntas con una silicona para exteriores de color negro (por motivos estéticos), que resultó complicada de colocar tanto por la geometría curva de las piezas como por el reducido espacio existente entre las piezas cerámicas, suficientemente grande para permitir la salida del aire y lo suficientemente pequeño para dificultar la introducción de las herramientas habituales para estos trabajos.

Durante las pruebas de funcionamiento, resultaron útiles los ensayos con gas trazador, que permitieron localizar los escasos fallos en el sellado (Figura 5).

INSTALACIONES

Respecto a las instalaciones que requieren los SGMs, pueden destacarse los siguientes componentes:

- ▶ Para forzar la circulación del aire exterior no tratado a través de las redes de conductos hasta llegar a los SGMs, se utilizaron dos ventiladores centrífugos montados en cajas de chapa galvanizada, con varia-



Denominación	Fabricante	Modelo	Flow (m³/h)	P. D. (mm.c.a)	Potencia (W)	Alimentación eléctrica
Impulsión 1	S&P	CVTT-22/22-650-5,5	18.000	35	5,5	400/III/50
Impulsión 2	S&P	CVTT-12/12-1050-1,1	5.000	35	1,1	400/III/50

Tabla 1. Características de los ventiladores de impulsión a los SGMs.

Figura 5. Prueba con gas trazador durante la puesta en marcha del sistema. Se puede comprobar como el aire se distribuye homogéneamente a la salida del SGM (Fot. C. Martín Gómez).

dor de frecuencia, instalados en la planta cubierta (tabla 1).

- ▶ 1 válvula motorizada para alimentación de agua a los SGMs.
- ▶ 5 sondas de temperatura ubicadas en pilar de muestra a distintas alturas.
- ▶ El transporte del aire exterior a los distintos SGMs se realizó mediante conductos fabricados de chapa de acero galvanizada.
- ▶ Se plantearon dos redes de conductos: una en el acceso principal al cine del pabellón; y otra entre la salida del cine y el acceso a la zona expositiva.



Figura 6. Rociadores de agua de los SGMs: prueba de mojado y montaje (Fot. C. Martín Gómez).

▶ Los reajustes de montaje de la estructura de acero del pabellón implicaron dos modificaciones respecto al diseño original:

- Por una parte, el modelo de rociador que debía humedecer la cerámica en la parte superior de los SGMs varió, pues el montaje definitivo implicaba cambios de distancia y altura con respecto al modelo teórico. Finalmente, se colocaron mini-aspersores de probada eficacia en el campo de la jardinería. Se realizaron diversos ensayos en obra del funcionamiento con esta solución y se pudo comprobar que humedecían correctamente las piezas de cerámica (figura 6).
- La pieza más delicada del conjunto la constituía la transición entre los conductos de chapa metálica provenientes del ventilador hasta la parte superior de los SGMs. En el proyecto se diseñó y evaluó con software de CFD una pieza metálica de fabricación especial, que se adaptaba al perfil en doble T de la estructura metálica y recibía dos conductos flexibles de conexión con el conducto principal de chapa. Finalmente, los ajustes en la estructura liberaron algunos centímetros de paso para los conductos y se pudo realizar la conexión con un único conducto flexible hasta la parte superior de los SGMs. Una solución que reducía considerablemente las pérdidas de carga con respecto a la pieza inicial (figura 7).

CONTROL

Todo el proyecto de instalaciones del pabellón lógicamente se concibió integrado en un Sistema de Gestión del Edificio (SGE), constituido por los siguientes elementos:



Figura 7. Pieza de transición entre el conducto de chapa y la parte superior del SGM (Fot. C. Martín Gómez).

- ▶ Centro de control.
- ▶ Controladores distribuidos.
- ▶ Elementos de campo (instrumentación), actuadores y válvulas motorizadas.
- ▶ Líneas eléctricas y de comunicaciones, con su conexionado.
- ▶ Cuadros para el alojamiento y protección mecánico-eléctrica del Centro de Control y los reguladores de las unidades terminales de climatización.

Las funcionalidades que proporciona el sistema de control sobre los SGMs son:

- ▶ Supervisión del estado de todas las instalaciones mediante la visualización de un esquema sinóptico, con cambios de color de los símbolos que representan cada equipo según el estado de éste.
- ▶ Recepción de cualquier alarma producida.
- ▶ Automatización de arranque y parada de equipos; registradores gráficos y numéricos para seguir la evolución histórica de las señales de la instalación; registro cronológico de eventos de alarmas de las diversas instalaciones y de comandos de usuario.
- ▶ Generación de informes de alarmas y sucesos.

El sistema de control debe permitir que desde el ordenador central pueda actuarse sobre la

electroválvula de alimentación de agua y sobre los ventiladores de diversas maneras:

- ▶ Manual para ambos elementos, para poder llevar a cabo pruebas y labores de mantenimiento.
- ▶ Temporización individual para ambos elementos.
- ▶ Actuación de ambos elementos ligada a las temperaturas que marquen las sondas interiores del SGM de muestra.
- ▶ Actuación conjunta entre ambos elementos de forma automática.

La descripción de la secuencia en modo automático sería la siguiente:

1. Cuando el sistema detecta una temperatura exterior elevada (definida en la puesta en marcha en 20°C) durante el horario de funcionamiento de 10 a 20 h, se pone en marcha el sistema de riego interior de la cerámica, abriéndose la electroválvula de la red de agua. Tras diversas pruebas, se consideró que el tiempo de mojado de la cerámica fuera de cinco minutos, pues era el tiempo en el que quedaba la cerámica empapada "suficientemente".
2. Se cierra la electroválvula.
3. Se ponen en marcha los ventiladores hasta que se detecta que el agua interior de los pilares se ha evaporado y se vuelven a empapar el interior de los SGMs, iniciándose de nuevo el proceso.

Como se observa, los valores de referencia de trabajo no se indican, pues éstos se fueron variando a lo largo de los tres meses que duró la Exposición (junio-agosto) en función del rendimiento del sistema. Esto es, aunque el sistema funcionó, los meses de funcionamiento coincidieron con los meses de pruebas de un sistema innovador que se ponía en marcha por primera vez. Durante este tiempo se conjugaron las necesidades arquitectónicas (por parte del estudio de arquitectura) con los valores teóricos iniciales de diseño (proporcionados por CENER), junto con los ajustes y calibraciones que debía realizar la empresa responsable del mantenimiento de la instalación.

MANTENIMIENTO

El Pabellón de España fue visitado por centenares de miles de personas durante la Expo, lo que implicó que en todo momento hubiera responsables de mantenimiento en el edificio, por lo que la instalación estuvo en todo momento funcionando, sin que ninguna anomalía grave supusiera la parada del sistema. Pero dadas las particularidades de la instalación, una consideración aparte era la prevención del riesgo de crecimiento de la bacteria "Legionella pneumophila".

A pesar de que se partía de una situación favorable por varias razones, ya que los enfriadores evaporativos no proporcionan las condiciones adecuadas para el crecimiento de la bacteria⁵ y que, además, la temperatura del agua se iba a mantener por debajo del rango de la temperatura de crecimiento de la Legionella, a lo que se suma que en los SGMs no se va a producir recirculación del agua, el equipo de arquitectura y la Administración responsable de la gestión del agua de Zaragoza se mostraron muy sensibles en todo momento a este problema.

Por tanto, aunque fuese raro que el crecimiento de Legionella se diera bajo las condiciones anteriores, debido a la dureza del agua de Zaragoza y a la formación de biocapas (inherente a los procesos que usan agua), se decidió realizar un prolijo protocolo de mantenimiento y tratamiento del agua (que incluía la dosificación cada cierto tiempo de cloro y polifosfatos a la red de agua que alimentaba los SGMs) para así reducir al mínimo posible los riesgos de crecimiento y transmisión de la Legionella.

RESULTADOS

En una Expo Internacional, la seguridad de las personas fue un principio de trabajo, y aún más en el pabellón del país organizador. Esta situación provocó que, aunque se tenía acceso diario al pabellón para comprobar el funcionamiento del sistema de acondicionamiento y, por ende del control de la instalación de los SGMs, los datos del PC del SGE no podían sacarse del pabellón. Esto, evidentemente, empobrece la investigación en términos científicos, pues no se puede demos-



Figura 8. Imagen de la pantalla de control (Fot. C. Martín Gómez).

Ventilador	
Temperatura exterior del aire	34,9°C
Humedad exterior del aire	33,6%
Potencia del motor	100%
Red de Agua	
Apertura de la electroválvula	0%
Sondas de Temperatura	
Sonda 1 - Superior	32,5°C
Sonda 2	31,1°C
Sonda 3	28,4°C
Sonda 4	27,9°C
Sonda 5 - Inferior	25,2°C

Tabla 2. Datos de una de las pruebas publicables del sistema.

trar todo lo que se afirma, pero quienes suscriben, opinan que es mejor esta comunicación de información parcial que el silencio.

No obstante, sí se ha tenido el permiso para reproducir en esta publicación una imagen de la pantalla del ordenador de control durante las fases de pruebas. En la prueba que se muestra, realizada a las 13 horas, el aire exterior de la calle tenía unas condiciones de 34,9° C y 33,6% de humedad⁶ y el aire que salía de los ventiladores estaba a 33,6° C.

Los valores resultantes se resumen en la Tabla 2, donde pueden observarse que el descenso de la temperatura entre la parte superior del SGM y la inferior es de 7,3° C y de 9,7° C con respecto al aire de la calle.

⁵ Como se afirma en el correspondiente capítulo "Evaporative Air Cooling Equipment" del "ASHRAE System and Equipment Handbook".

⁶ Ha de hacerse notar que, sin embargo, este no era el aire que se tomaba para los ventiladores, sino del aire que -aun siendo exterior- estaba bajo la cubierta del edificio, cercano a la lámina de agua y, por tanto, en unas condiciones más favorables tal y como puede observarse en la figura 8.

CONCLUSIONES

El principal problema al que se enfrentó esta investigación es que formaba parte de una compleja obra, en la que existían otros importantes problemas que resolver, como la estructura, los cerramientos, el novedoso sistema de cerámica, la colocación de los paneles fotovoltaicos, etc., con plazos de ejecución muy ajustados y un estricto control económico. Por todo ello, la investigación de los SGMs no constituía uno de los objetivos principales.

Además, en el equipo de trabajo del pabellón, no se pudo contar con ningún técnico que se dedicara, en exclusividad, a resolver las múltiples variables teóricas y técnicas que se dieron durante el montaje de los SGMs.

Por tanto, una primera conclusión la constituiría la necesidad de concienciar a la Propiedad de la importancia de la investigación en estas cuestiones y más en casos de edificios singulares como éste, donde los resultados (tanto si son buenos como si no) pueden tener una importante relevancia en su comunicación.

Asociado a esta cuestión, está el evidente problema de que era la primera vez que se ejecutaba este tipo de instalación y no se encontraron referencias con las que compararse, por lo que, dados

los cambios propiciados por otros condicionantes arquitectónicos y -fundamentalmente- los cortos plazos de ejecución, el factor suerte también ha de considerarse. Evidentemente, la unión y el trabajo de tantos buenos profesionales constituía la base necesaria para alcanzar un buen resultado pero, visto a posteriori, son muchas las cosas que podrían haber impedido llegar a buen puerto. Esta reflexión nos permite alcanzar una segunda conclusión: un buen trabajo de investigación en arquitectura, ha de coordinarse con los plazos de ejecución del proyecto en el que se incluye.

Tercera y última conclusión: Los resultados, aun siendo prometedores, solo son aplicables en áreas geográficas con condiciones climáticas similares a las de Zaragoza. En dichas áreas, lo expuesto en este artículo constituye una solución fácilmente replicable, que ha validado su comportamiento tras la visita de los centenares de miles de personas que accedieron al pabellón.

AGRADECIMIENTOS

- ▶ Arquitecto F. J. Mangado Beloqui.
- ▶ SEEI. Sociedad Estatal para Exposiciones Internacionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ▶ Guía 12-2000 de ASHRAE. "Minimizando el Riesgo de Legionelosis Asociado a las Instalaciones de Agua del Edificio". Documento traducido para ATECYR con autorización de ASHRAE por Iñaki Morcillo.
- ▶ "District Heating & Cooling de Expo Zaragoza". El Instalador, 450 marzo 2008, pp.30 y ss.
- ▶ VVAA. "A multi-stage down-draft evaporative cool tower for semi-enclosed spaces: Aerodynamic performance". Solar Energy 82 (2008) 420-429.
- ▶ VVAA. "Cooling of outdoor spaces by means of evaporative-cooling ceramic-pillars". 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, Septiembre 2007, Creta, Grecia.
- ▶ VVAA. "Documentos técnicos de instalaciones en la edificación. DTIE 9.01. Sistemas de climatización", ATECYR, 2001.
- ▶ VVAA. "Las energías renovables en España. Diagnóstico y perspectivas". Fundación Gas Natural, 2007. ■

Ficha técnica

Proyecto: Pabellón de España para la Exposición Internacional Zaragoza 2008.

Arquitecto: Francisco José Mangado Beloqui.

Superficie de actuación: 8.000 m².

Presupuesto: 18.502.000 €

Construcción: Noviembre 2006-Junio 2008

Ingeniería de estructuras: Jesús Jiménez Cañas, Alberto López. NB 35.

Dirección de obra: Cristina Chu y César Martín Gómez.

Constructora: Constructora San José.

Instalaciones y estudios de eficiencia energética: Fundación CENER-CIEMAT, Iturralde y Sagüés Ingenieros, César Martín.

Proyecto: José M^a Gastaldo, Richard Královic, Cristina Chu, Hugo Mónica.

Arquitecto técnico: Fernando Oliván y Vicente de Lucas.

Jefes de obra: José Manuel Ferreiroa, Antonio Ignacio Framiñan, Pedro López, Carlos Paz, Carlos Riveiro.