Pabellón de España en la Expo 2010 en Shanghái

Spanish Pavilion for the Expo 2010 in Shanghai

Julio Martínez Calzón [(1)] **y Carlos Castañón Jiménez**[(2)]

Recibido | *Received:* 31-08-2012
Aceptado | *Accepted:* 16-01-2013

Resumen

El Pabellón de España para la Expo 2010 en Shanghái es el resultado de una estrecha colaboración entre Arquitectura y Estructura. Revestido de una inusual envoltura de mimbre, la forma libre fuertemente curvada ideada por el estudio de arquitectura Miralles–Tagliabue EMBT, es su principal característica. Una doble malla de tubos de acero, adecuadamente optimizados teniendo en cuenta tanto su comportamiento estructural como su fabricación y constructibilidad, resuelve la fachada estructural, que sustenta los paneles de mimbre por el exterior y un muro cortina por el interior, a la vez que es soporte de las plantas interiores y cubiertas. La fase de diseño exigió el desarrollo de unos procedimientos informáticos específicos y gran coordinación entre los equipos de arquitectura e ingeniería. Su fabricación y construcción asimismo requirieron procedimientos originales de curvado, corte y soldadura de tubos, así como un montaje en obra sistemático y preciso, que posibilitaron la construcción en un plazo muy estricto de este singular edificio.

Palabras Clave: Estructura tubular espacial curva, desmontable, modulación, curvatura variable, forma libre.

Abstract

The Spanish Pavilion for the Expo 2010 in Shanghai is the result of a close collaboration between Architecture and Structure. Along with an unusual wicker cover, the highly irregular curved free form of the building designed by the architecture office Miralles-Tagliabue EMBT, is its main characteristic. A double mesh of steel tubes, adequately defined in order to optimize both its structural behaviour and ease of manufacture and construction, forms the structural facade, which supports the wicker panels on the outside layer and a glass curtain wall on the inside, as well as bearing the floors and roofs of the building. The design process required special analysis procedures and specific software to be developed, as well as a good coordination between the architecture and engineering teams. The manufacture and construction required as well new and original processes in the curving, cutting and welding of the tubes, together with accurate and fast assembly procedures on-site, which allowed the remarkable building to be finished on a very short time.

Keywords: *Curved tubular 3D structure, disassemble, modulation, variable curvature, free form.*

(1) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería, S. L. (Madrid, España)
(2) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería, S. L. (Madrid, España)

Persona de contacto / *Corresponding author:* carlos.castanon@mc2.es

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

1. INTRODUCCIÓN

La Exposición Universal de Shanghái en 2010, siguiendo la progresión desbocada pero firme de China y el antecedente cercano de los Juegos Olímpicos de Pekín en 2008, ha sido la mayor exposición de las celebradas hasta el momento, con 234 países y organismos mundiales presentes, ocupando una extensión de 528 hectáreas, más de 20 veces la de la Expo de Zaragoza. Tuvo 73 millones de visitantes [1], aglutinando un despliegue de arquitectura y formas llamativas, entre ellas el Pabellón de España, del estudio de arquitectura Miralles – Tagliabue EMBT y con el diseño de la estructura llevado a cabo por MC2 Estudio de Ingeniería.

Con más de 7 millones de visitantes, más que la totalidad de los visitantes de la Expo de Zaragoza, fue el pabellón nacional más grande tras el Pabellón Chino, y uno de los pabellones mejor considerados por el público [1]. Ha recibido varios premios, tanto de arquitectura como de estructura y construcción, entre ellos el primer premio RIBA International Award 2010, el premio al mejor edificio para Exposiciones de la WAF World Architecture Festival Awards 2010, designado como uno de los tres mejores pabellones en diseño arquitectónico por la BIE Bureau International des Expositions, y la medalla de oro para la mejor estructura de acero de la China Construction Metal Structure Association [2].

La zona que ocupa, en pleno centro de Shanghai, en el distrito de Pudong, a orillas del río Huangpu, hasta 2008 albergaba el astillero más antiguo del mundo y, ya finalizada la Expo, los rascacielos han empezado a reemplazar a los pabellones de la exposición, con contadas excepciones, entre ellas el Pabellón de España, que ha sido uno de los tres pabellones "indultados" al finalizar la Exposición [2].

1. INTRODUCTION

Following the unrestrained but steady growth of China, and the recent antecedent of Beijing 2008 Olympic Games, Shanghai World Expo 2010 has been the largest World Fair of all time, with 234 countries and international organizations represented, covering 5.28 square km, 20 times more than Zaragoza Expo. It was visited by 73 million people [1], and brought together an array of striking architectures and forms, one of which was the Spanish Pavilion, by architecture firm Miralles – Tagliabue EMBT and structure design by MC2 Estudio de Ingeniería.

With more than 7 million visitors, more than all the visitors of the whole Zaragoza Expo, it was the largest national pavilion, only behind the Chinese Pavilion, and was one of the most acclaimed by the public [1]. It has won several awards, both for its architecture and for its structure and construction, including the First Prize RIBA International Award 2010, Best Exposition Building award of the WAF World Architecture Festival Awards 2010, designated as one of the three best Pavilions in architectural design from the BIE Bureau International des Expositions, and received the Gold Medal for the best steel structure from the China Construction Metal Structure Association [2].

The area where it sits, at the center of Shanghai, in Pudong District, by the river Huangpu, hosted until 2008 the largest shipyard in the world. Now that the Expo is over, skyscrapers have begun to replace and rise over the previous pavilions, with a few exceptions, among which is the Spanish Pavilion, which was one of the three pavilions "pardoned" when the Expo ended [2].

The architectural design intended to avoid the direct use of elements usually employed as representative of a country, to focus on a more abstract matter: the pavilion as a mirror of Spain's weather and how the later is treated by Architecture [2]. With this aim, a wicker cover was chosen:



Figura 1. Vista general del pabellón, con su singular piel de mimbre
Figure 1. General view of the pavilion, with its distinct wicker cover

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026



Figura 2. Vista general del pabellón en construcción, con la estructura de fachada completada
Figure 2. General view of the pavilion under construction, with the facade structure completed

El proyecto de arquitectura pretendía evitar la utilización directa de aquellos elementos prototípicos de representación de un país, para abordar un tema más abstracto: el pabellón como un reflejo del clima de España y de cómo éste se trata desde la arquitectura [2]. Para ello se recurrió a una envoltura de mimbre: artesanía y tradición globales compartidas por infinidad de culturas, entre ellas España y China.

Este material envolvente tan particular, junto con la forma sinuosa de la fachada son los principales aspectos que caracterizan al pabellón [3] (Figura 1).

Los trabajos en obra comenzaron en marzo de 2009, y en octubre de ese mismo año se había finalizado la estructura metálica. El 31 de marzo de 2010 se terminó la construcción del Pabellón para ser abierto al público el 1 de mayo, completándose por tanto en 12 meses esta espectacular obra de gran complejidad técnica [4].

Actualmente el Pabellón es propiedad del Ayuntamiento de Shanghái, tras su donación por parte de España, y está siendo remodelado para alojar un centro de intercambio cultural y comercial entre España y China.

2. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

La original configuración arquitectónica del Pabellón de España está constituida por un conjunto de superficies muy curvadas que generan una variedad de espacios interconectados, tanto en el interior como en el exterior, con un lenguaje arquitectónico muy expresivo.

Estas superficies están formalizadas por paneles de mimbre en el exterior –y parte del interior- que se apoyan sobre una estructura metálica reticular espacial, que se adapta a la geometría de doble curvatura ideada por Arquitectura (Figura 2).

El Pabellón tiene tres partes claramente diferenciadas: una zona de exposición (Oeste), que aloja tres salas

handcraft and tradition, both global affinities between many countries, among which are Spain and China.

This distinct cover material, together with the convoluted shape of the facade are the main aspects that characterize the pavilion [3] (Figure 1).

The works on site started on May 2009, and by October that same year, the steel tubular structure was already finished. On March 31st 2010 the works were completed, and the Pavilion was opened to the public the 1st of May. Thus, all the works of this complex building, were carried out in 12 months [4].

Currently, the Pavilion is owned by Shanghai City Hall, after its donation from Spain, and it is being refurbished in order to hold a Cultural and Commercial Exchange Center between Spain and China.

2. DESCRIPTION OF THE BUILDING

The original architectural configuration of the Spanish Pavilion, is formed by a system of different sharply curved spatial surfaces which generate a variety of concatenated areas, on the inside as well as on the outside, with a very expressive style.

These surfaces are formalized through wicker panels on the outside –and parts of the inside- which bear onto a spatial mesh of steel tubes, which blends into the double curvature conceived by Architecture (Figure 2).

The Pavilion has three clearly differentiated areas: an Exhibition Area (West), comprising three rooms free of columns, where the exposition contents will be displayed; an Offices Area (East), which also contains an auditorium and a restaurant; and an Open Plaza between both areas, embraced by the structural facade which at this point enters and expands into the building, forming an open space for the public (Figure 3).

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

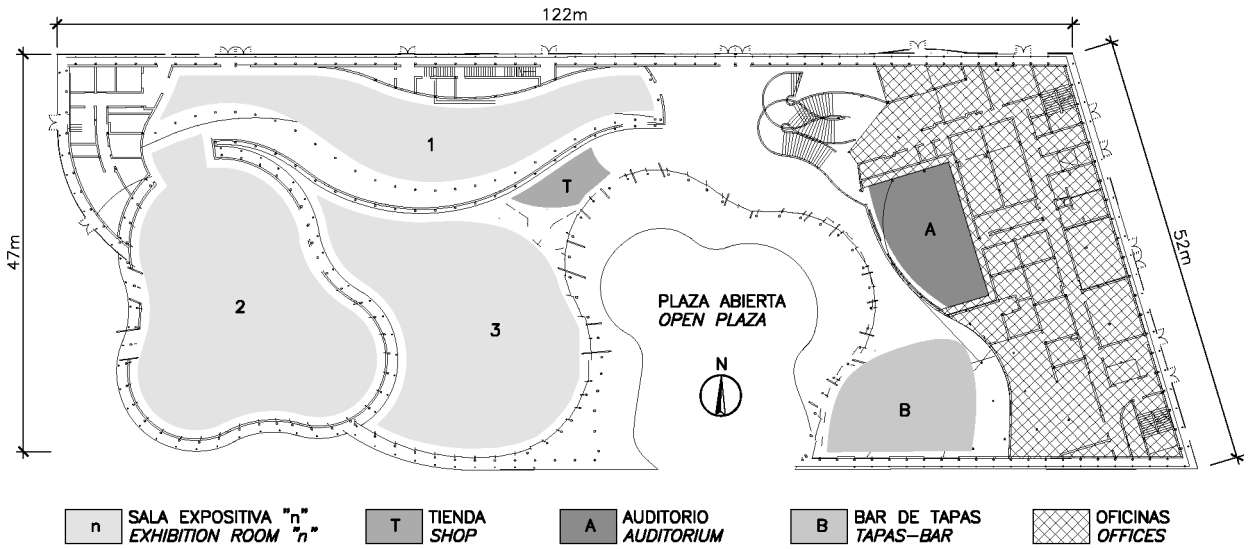

Figura 3. Dimensiones y distribución en planta
Figure 3. Dimensions and plan layout



Figura 4. Perspectiva general del pabellón en construcción, con el Puente Lupu de fondo
Figure 4. General perspective of the pavilion under construction, with Lupu Bridge in the background

diáfanas y una tienda; una zona de oficinas (Este), en la que también se encuentra un auditorio y un restaurante; y una plaza semicerrada articuladora de ambos espacios, abrazada casi totalmente por la fachada estructural, que en esta zona se pliega sobre sí misma dando lugar al espacio abierto al público (Figura 3).

La estructura del pabellón está compuesta por una doble malla ortogonal de tubos circulares curvos, que distan entre sí 80 cm y quedan unidos mediante elementos horizontales ("perchas") y, en ocasiones, elementos diagonales ("intradiagonales") (Figura 4). Esta doble malla soporta los forjados y cubiertas del edificio, y además sostiene, por el lado interior, el muro cortina o elementos de cerramiento opacos, y, por el exterior, la envoltura de paneles de mimbre.

The structure of the Pavilion is formed by two 80 cm distant meshes made out of orthogonally arranged circular tubes (Figure 4). Both meshes are connected through horizontal elements, named "hangers". This double mesh directly supports the floors and roofs of the building, while at the same time bearing the glass curtain wall or the blind cladding on the inner side and, on the outer side, an enclosure of large wicker panels that, while providing protection from direct sunlight, is permeable to light, air and rain; hence giving the whole a very organic external appearance (Figure 5).

The floors and roofs of the building bear onto the inner main mesh of the facade, and are carried out as composite slabs on top of a grillage of rolled steel profiles.

Vertical truss bracing systems, integrated into the partitions of the conventional lift and staircase cores, are

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

Esta envoltura protege de la radiación solar directa y es permeable a la luz, aire y lluvia, dando al conjunto una apariencia muy orgánica (Figura 5).

Los forjados y cubiertas del edificio se apoyan en la malla principal interior de la fachada y se han resuelto mediante forjados mixtos de chapa plegada sobre emparrillados de perfiles metálicos.

La estructura se arriostra mediante una serie de celosías verticales, integradas en los patios y en los huecos de ascensores, escaleras y de servicio. El conjunto completo formado por la fachada estructural curvilínea, los forjados y las antedichas celosías de arriostramiento configura un sistema interactivo global frente a la totalidad de las acciones gravitatorias, de viento, sísmicas, térmicas, etc. [5].

Aunque en un principio se barajó la posibilidad de partir el edificio en varios bloques independientes con complejas uniones entre sí, el edificio finalmente se planteó como un sistema completo constituido por el conjunto de las fachadas, integrando en su interior zonas parciales apoyadas en aquéllas y también en elementos propios adicionales exclusivamente en la zona Este correspondiente a las oficinas. Consiguientemente, y debido a la gran flexibilidad longitudinal de tales fachadas, se comprobó que los efectos térmicos y reológicos no afectaban sensiblemente a esta estructura y sin embargo la gran condición de forma que tales fachadas procuran, permitían establecer un único conjunto resistente adecuadamente capaz de hacer frente globalmente a todo este tipo de acciones [6].

Así pues, el diseño de la estructura se realizó en un único cuerpo, sin juntas de dilatación de ningún tipo.

El edificio no tiene sótanos, y está cimentado superficialmente en una losa de cimentación, sobre un terreno mejorado mediante una precarga. Una galería subterránea recorre longitudinalmente el edificio, sirviendo de paso de instalaciones, y bajo la mayor de las salas expositivas (la 2, ver Figura 3) existe un gran foso, de aproximadamente 20 m de diámetro, destinado a alojar la maquinaria de elevación de una gran plataforma que trasladaría a los visitantes al segundo piso en el recorrido de la exposición, pero que finalmente no se llevó a cabo, empleándose el hueco como plénum para inyectar aire fresco en la sala.

Existía la posibilidad de que, una vez finalizada la Exposición, el edificio fuese desmontado y trasladado a otra ubicación como edificio permanente. Esta posibilidad estaba incorporada en las premisas del diseño, y por este motivo la estructura principal fue diseñada mediante módulos atornillados entre sí, facilitando las operaciones de transporte, montaje y desmontaje –y vuelta a montar [7].

Aun cuando por la temporalidad de la Exposición el proyecto de la estructura podría haberse realizado con



Figura 5. Vista del pabellón acabado
Figure 5. View of the completed pavilion

connected to these slabs. The entire assembly, consisting of the curvilinear structural facade, slabs and trusses, forms an interactive, collaborating and bracing global structural system perfectly able to withstand the combined action of all loads to which it may be exposed to: gravitational, wind, seismic, thermal, etc. [5].

Although initially the possibility of breaking the building into several blocks connected through complex joints, it was finally defined as a single body, with the structural facade as main bearing system of the floors, which at the East –offices- area also bear on conventional columns. Thus, due to the flexibility of the facades, the thermal and reologic effects are adequately withstood, and the form that the facade takes allows establishing a single resisting system able to withstand globally all these forces [6].

Consequently, its structural concept is defined in terms of one and only body, without expansion joints of any kind.

The Pavilion has no basement, and it is directly built on a shallow foundation on top of an improved ground by means of pre-loading. An underground gallery crosses longitudinally the building, through which ducts and MEP services run. Under the main Exhibition Room (no. 2, see Figure 3) there is a great pit, of approximately 20 m in diameter, intended to locate the machinery for an elevating platform which would lift the visitors to the second floor of the exhibition, but which wasn't finally carried out; the pit was then employed as a plenum to inject fresh air into the room.

There was a possibility that at the end of the Exposition, the building had to be dismantled, transferred and rebuilt at another location for its use as a permanent building. This premise was incorporated in the design, and thus the main structure was designed to be carried out by means of large modular panels bolted together to facilitate the operations of transportation, assembly and disassembly –and assembly once again [7].

In view of the temporary nature of the Expo, the building project could have been conducted with a service lifetime criterion of less than 5 years and a 50-year return period for the loads considered. However, as there existed the possibility of later re-use of the building, finally a 50-year service lifetime was considered in the design of all the

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

el criterio de vida útil menor de 5 años, y un período de retorno para las acciones de valor 50 años, al estar prevista su reutilización posterior se tuvo finalmente en cuenta una vida útil de 50 años en el diseño de todos los elementos, si bien se previó la demolición de los forjados mixtos de hormigón, que deberían volver a ser hormigonados tras el montaje de la estructura metálica en una nueva ubicación.

Al término de la exposición y debido al éxito cosechado durante la misma, el Pabellón de España fue uno de los tres pabellones "indultados", al permitir las autoridades de la Expo conservar el edificio en su ubicación actual y ser dedicado para servir de plataforma de entretenimiento e intercambio cultural y comercial entre España y China. Actualmente se van a iniciar los trabajos de remodelación para albergar una gran exposición de turismo, un espectáculo de flamenco permanente, una exposición de un gran equipo de fútbol español, un restaurante y una tienda de productos españoles.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

3.1. Cimentación

El terreno en el que se ubica el Pabellón, sobre la llanura aluvial del río Huang Pu, es muy blando y arcilloso, por lo que requería una solución especial para su cimentación. Bajo una primera capa de rellenos antrópicos, de 2 a 3 metros de profundidad, hay una sucesión de capas arcillo-limosas de gran potencia y baja capacidad portante. A esta circunstancia se suma la escasa profundidad del nivel freático, que se encuentra a tan sólo 1 m de la superficie.

Además de la baja capacidad del suelo, se daban dos condicionantes fundamentales más:

— El edificio completo, incluyendo su cimentación, debía ser completamente demolido y retirado tras la Exposición

— Gran parte del Pabellón se encuentra en la zona de proximidad del Puente Lupu –puente arco con vano principal de 550 m, actualmente el segundo mayor del mundo de esa tipología– donde no está permitido llevar a cabo ninguna cimentación profunda para no afectar a la cimentación del propio puente

Como resultado del estudio de la documentación sobre el terreno y de los condicionantes adicionales, se estimó, confirmado por la consulta con una asesoría especializada en geotecnia, que la solución más adecuada de cimentación era la retirada y sustitución del relleno superficial, y la mejora del terreno por medio de una precarga temporal de 3 m de espesor de tierras. Con el fin de acelerar el efecto de la precarga se hincaron mechas drenantes en el terreno.

elements. The composite floors would nonetheless have to be demolished and later re-built after the re-assembly of the steel grillage on the new location.

When the Expo came to an end, and due to its success during the fair, the Spanish Pavilion was one of the three "pardoned" pavilions, and the Expo Authorities allowed the building to stay at its location and serve as an entertainment space, and a cultural and commercial exchange platform between Spain and China. At present, works are being carried out to refurbish the building so as to host a tourist center, a permanent flamenco dance show, an exhibition of an important Spanish football team, a restaurant and a shop of Spanish products.

3. STRUCTURE DESCRIPTION

3.1. Foundation

The soil under the Pavilion, on the Huang Pu river alluvial plain, is a very soft clay, requiring a special solution for its foundation. Under a first layer of fillings 2 to 3 m thick, there is a series of mucky silty clay layers of great depth and low bearing capacity. Furthermore, the groundwater table is very shallow, just 1 m deep.

Together with these poor conditions of the soil, there were two more aspects which conditioned greatly the foundation type chosen:

— *The foundations needed to be completely demolished and removed upon finishing the Expo*

— *A great area of the building is situated in the proximity of the Lupu Bridge –arch bridge with a main span of 550 m, currently the second longest in the world under this category-, where it is not allowed to drill deep piles in order not to disturb the foundation of the bridge*

From the study of the documentation on the ground and the additional constraints, it was deemed that the most adequate solution, confirmed by a geotechnical specialist consultant, could be the removal and replacement of the surface fill, together with a ground improvement of the soil by pre-loading with a 3 m surcharge. In order to accelerate the settlement process of the pre-loading, vertical drains were driven into the ground.

The pre-loading solution has merely superficial effects within the range of the previously existing stresses in the area. It enables the easy demolishment of the shallow slab and raft foundation upon the end of the Expo.

The mandatory constraints of the solely occupation of the strict limits of the precinct assigned to the pavilion, and the eventual interation with the existing perimeter conditions, made it necessary to employ sheet piles walls on the whole of the excavation perimeter.

This operation aimed at consolidating the soil by placing on its top a surcharge of approximately one and a half times

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

Esta solución determinaba en el terreno una afección en fase de servicio muy superficial, con acciones del mismo orden que las existentes con anterioridad en el lugar, permitiendo la ejecución de una cimentación superficial fácilmente retirable tras la finalización de la Expo.

Las obligadas condiciones de ocupación exclusiva dentro de los límites estrictos de la parcela reservada para la ubicación del Pabellón y la eventual interacción con las condiciones perimetrales existentes, determinaron la necesidad de emplear unas pantallas de tablestacas en la totalidad del perímetro de la excavación.

La operación buscaba consolidar el terreno de cimentación mediante la colocación sobre el mismo de una carga del orden de vez y media superior a las cargas máximas que el pabellón ejercería posteriormente sobre dicho terreno y doble de las cargas cuasipermanentes. De esta forma, al retirar dicha precarga tras un período apropiado, estimado en dos meses, y controlando el proceso deformativo del terreno bajo dicha solicitación, se contaría con unas condiciones de deformación por recarga muy favorables para la cimentación del edificio, y una total garantía de estabilidad de los estratos afectados.

Aunque esta forma de actuación no es muy usual en Shanghái y sus alrededores, ya que para el caso de circunstancias definitivas y altas cargas este procedimiento podría llegar a exigir tiempos de precarga y valores de ésta muy considerables, para el presente caso de cargas ligeras sobre el terreno y un tiempo de actuación limitado, la solución adoptada resultó muy favorable, permitiendo cumplir rigurosamente con las restantes condiciones impuestas por la organización de la Exposición. Esta solución fue empleada posteriormente, siguiendo nuestro ejemplo, en pabellones aledaños.

Durante la operación de precarga se monitorizaron dos veces por semana los asientos del terreno, así como su ascenso tras la retirada de la misma y comienzo de la cimentación; los valores resultaron algo menores de lo anticipado por el cálculo. Debido a un retraso en la fecha de inicio de los trabajos en obra la precarga se mantuvo un mes más de los dos meses estimados en el cálculo, favoreciendo la consolidación del terreno y reduciendo los posibles asientos futuros.

Se continuó monitorizando los movimientos de los puntos de control durante la ejecución del edificio, ya con una regularidad mensual, comprobando que a la finalización de la estructura los movimientos ascendentes ya se habían estabilizado, no observándose asientos ni ascensos significativos hasta la inauguración del pabellón.

La cimentación se realizó sobre un relleno granular compactado tras retirar el material de precarga. Los tubos de fachada arrancan de basas metálicas empo-

the maximum expected loads that the building would exert later on the said soil, and twice the quasi-permanent loads. Thus, after removing the surcharge after an appropriate period of time –estimated to be two months- and monitoring the settlement of the ground under that load, the ground would present a very favourable deformative condition for the foundation of the building, and a complete guaranty of stability of the affected strata.

Although this procedure is not very usual in Shanghai and its surroundings, as for definitive circumstances and high loads this process would require long periods of time and high values of loading, for the present case the moderate loads on the ground and the limited period of use the adopted solution resulted very favourable, allowing to meet all the remaining constraints imposed by the Expo Authorities. This solution was later employed on other pavilions, following our example.

During the pre-loading operation the ground settlement was monitored, obtaining readings twice a week. This monitoring followed after the removal of the surcharge and beginning of the foundation works, when the ground rose. The settlement readings resulted lower than theoretically expected. Due to a delay in the starting date of the foundation works, it was possible to keep the surcharge in place one more month than the two estimated from the analysis, favouring a greater consolidation of the soil and further reducing future settlements.

During the works of the rest of the building the control points were still monitored, although on a monthly basis, being able to ascertain that by the end of the structure works, the rising movement of the ground had stabilized, not observing any significant settlement or rise until the inauguration.

The foundation was carried out on a compacted granular fill, laid after removing the surcharge. The facade tubes rise from steel plates embedded on concrete foundation strips which follow the serpentine geometry of the facade. These strips are 0.80 m deep, with a variable thickness between 0.70 m and 1.20 m, and it is concreted together with the raft foundation 0.25 m deep which covers the rest of the plant of the pavilion, except for the offices area, where the columns rise from a foundation slab 0.50 m deep, also connected to the strips and the raft foundation.

3.2. Superstructure

The three exhibition rooms plus the open plaza are characterized by the absence of inner columns, being the curved structural facades the only support for the floors and roofs (Figure 6). The Offices area, although surrounded by the facades, has a more conventional structural system, with inner (straight) columns, and a grillage of beams on which the composite steel deck rest (Figure 7).

Figure 8 summarizes the disposition of the structural facade, both in plan view and elevation. The main orthogonal mesh, formed by meridians set on vertical planes, and

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

tradas en unas bandas corridas de hormigón armado que siguen el perímetro sinuoso de la fachada, de 0,80 m de canto y ancho variable entre 0,70 m y 1,20 m. Estas bandas se disponen unidas solidariamente a la solera, de 0,25 m de canto que cubre el resto de la planta del pabellón, salvo en la zona de oficinas, en donde los soportes arrancan sobre una losa de cimentación de 0,50 m de canto, unida a los sistemas antedichos.

3.2. Superestructura

Las tres salas de la exposición y la plaza abierta se caracterizan por la ausencia de soportes interiores, siendo la fachada el único elemento estructural de soporte de los forjados y cubiertas (Figura 6). La zona de oficinas, por el contrario, tiene una configuración más convencional, y aunque también está bordeada y sustentada por la fachada estructural, posee soportes interiores para apoyo de los emparrillados de vigas que soportan los forjados mixtos (Figura 7).

La Figura 8 esquematiza en planta y alzado la disposición de la fachada estructural. La malla ortogonal principal, compuesta por meridianos dispuestos en planos verticales y paralelos contenidos en planos horizontales, arranca de cimentación y sigue la geometría curva definida por arquitectura. Esta configuración, que procede de realizar cortes por planos verticales y horizontales sobre la geometría libre de doble curvatura ideada por arquitectura, permite transformar una doble curvatura en elementos de curvatura única, contenidos en planos. Así, un paralelo o un meridiano cualquiera puede seguir una curva sinuosa, pero estará siempre contenido en un plano, por lo que será de curvatura sencilla.

Paralela a esta malla ortogonal principal se dispone una malla secundaria, que no llega a apoyar en el terreno salvo en zonas especiales, con tubos de menor entidad, pero con la misma configuración, que además de su funcionalidad arquitectónica aporta una favorable mayor rigidez al conjunto. Ambas capas están separadas 0,80 m, aunque en la zona de la Plaza Abierta esta separación llega a alcanzar los 5,00 m. La unión entre ambas capas se realiza por medio de elementos rectos contenidos en planos horizontales, denominados "perchas", que formalizan un sistema pseudo-vierendeel. La peculiaridad de este sistema vierendeel proviene de que al ser un sistema espacial las dobles curvaturas hacen que estas perchas no siempre trabajen fundamentalmente a flexión.

En determinadas zonas muy solicitadas se dispone además una serie de "intradiagonales", contenidas en los mismos planos verticales de los meridianos y las perchas, creándose en tales zonas sistemas locales en celosía, mucho más rígidos y resistentes que el resto.

Los meridianos se disponen separados en planta aproximadamente 2,40 m, y los planos horizontales que contienen los paralelos y perchas tienen un espaciamiento constante en alzado de 1,20 m.



Figura 6. Sala Expositiva 3. La fuertemente curvada fachada estructural soporta la cubierta sin columnas interiores. La cubierta está compuesta por vigas triangulares, cajón perimetral, celosías y forjado mixto

Figure 6. Exhibition Room 3. The highly curved structural facades, without inner columns, support the roofs of the spacious exhibition rooms. The roof structure consists of triangular beams, edge box-beams, trusses and composite floors.

parallels set on horizontal planes, rises from the foundation strip and follows the curved geometry defined by architecture. This configuration, which comes from making cuts by vertical and horizontal planes on the double curvature free form designed by architecture, makes it possible to transform a double curvature into elements of single curva-



Figura 7. Área de oficinas. La fachada, junto con los soportes interiores, sustentan los forjados y cubiertas, resueltos con estructuras mixtas

Figure 7. Offices area. The curved structural facade and inner columns support the composite floors

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

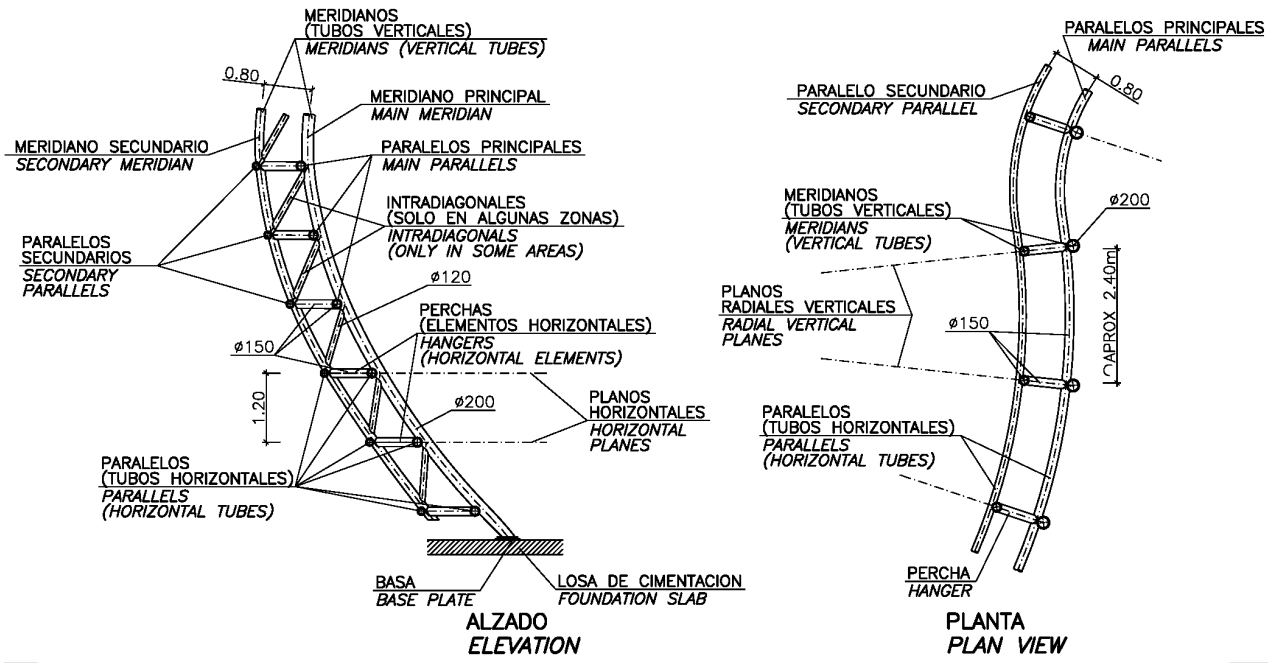

Figura 8. Estructura de fachada, compuesta por una doble malla ortogonal de tubos curvos. La malla principal se extiende hasta la cimentación, mientras que la malla secundaria se vincula a la principal por medio de "perchas", y en algunos casos, "intradiagonales".
Figure 8. Structural facade system, composed of a double mesh of orthogonally arranged curved tubes. The main mesh, of slightly greater dimensions, extends to the ground, while the secondary mesh is attached to the main one through horizontal "hangers", and in some cases, "intradiagonals"

Las uniones de las estructuras de las plantas con la capa principal vertical interior portante de la fachada, se efectúan mediante cartelas dobles con su plano de simetría contenido en uno de los planos radiales verticales, y vinculadas verticalmente con las vigas perimetrales limitadoras de las superficies de las plantas de piso (ver Apartado 3.6).

Dichas cartelas dobles de apoyo se empotran en las citadas piezas de contorno y se articulan a los tubos verticales radiales, también mediante cartelas únicas y uniones de bulón, y perfectamente soldadas en planos diametrales de los tubos, evitándose así todo tipo de acciones esviadas o anguladas sobre los sistemas de fachada (ver Apartados 3.6 y 3.7).

La unión entre los tubos horizontales (paralelos) y verticales (meridianos) de una misma familia (principal o secundaria) se realiza de forma excéntrica. En esta unión particular, que se describe en el Apartado 3.5, los tubos verticales de ambas capas de las fachadas son íntegros, continuos sin ningún tipo de taladro. En las intersecciones con los tubos horizontales, se han recortado únicamente los horizontales para maclarse y unirse apropiadamente con los verticales.

Dada la geometría tan variable a lo largo del edificio, con una disposición marcadamente espacial y el gran número de uniones a realizar, en total y tipos, desde los inicios del diseño se buscaron las posibilidades de sistematización y optimización estructural que potenciasen o facilitasen tanto su comportamiento estructural como su constructibilidad, desde los detalles más repetidos y estándares, hasta los más singulares y especiales.

ture, contained on planes. This way, any parallel or meridian may follow a sinuous geometry, but it will always belong to a plane, being thus of single curvature.

Parallel to the main orthogonal mesh there is a secondary mesh, which doesn't reach the foundation with the exception of some special areas. The tubes of the secondary mesh are smaller than those of the main mesh, but with the same configuration, which, besides its architectural purpose, it contributes a greater stiffness to the set. Both meshes are separated 0.80 m, although at the Open Plaza this separation reaches 5.00 m. The connection between the two meshes is formalized by straight elements contained in horizontal planes, named "hangers", which determine a pseudo-vierendeel system. The particularity of this vierendeel system is that, due to the spatial configuration of the double curvatures, these hangers aren't always subjected mainly to bending.

On certain areas with high loads, a series of "intradiagonals" are placed between the meshes, set in the same vertical planes as the meridians and the hangers, determining in such places local truss systems, much more stiffer and resistant than the rest.

The meridians are set every 2.40 m on plan view, approximately, and the horizontal planes that contain the parallels and hangers are set every 1.20 m on elevation.

The connection between the floor structure and the bearing main vertical layer of the facade is carried out through double ear-plates with the symmetry axis set on the vertical radial planes, and connected vertically to the perimeter beams which define the edge of the floors (see Paragraph 3.6).

The said double ear-plates are fully fixed against the edge beams, and pinned to the radial vertical facade tubes,

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

Así, por un lado, se limitó el número de tipos de tubos a emplear, en diámetros y espesores, adaptándose a los productos comerciales disponibles en China. Estos finalmente fueron tubos circulares de entre 6 mm y 20 mm de espesor, y diámetros entre 150 mm y 200 mm, con algunas zonas de hasta 300 mm:

- La malla principal portante (interior):
  - ϕ200 mm en los tubos contenidos en planos verticales (meridianos)
  - ϕ150 mm en los tubos contenidos en planos horizontales (paralelos)
  - ϕ300 mm en los tubos especiales en zonas de grandes solicitaciones
- La malla secundaria exterior:
  - ϕ150 mm en los tubos contenidos en planos verticales (meridianos)
  - ϕ120 mm en los tubos contenidos en planos horizontales (paralelos)

Aún aparentando curvaturas variables, cada elemento curvo de fachada se definió como formado únicamente por un conjunto de tramos de entre 14 radios de curvatura distintos, que se soldarían en prolongación en taller, simplificando su ejecución (ver Apartado 5.4.2).

Se realizó un estudio pormenorizado de la conexión entre las dos capas de tubos de las estructuras de fachada:

- En las zonas tipo, con montantes horizontales ("perchas")
- En las zonas más solicitadas, con "intradiagonales", en las que se requiere mayor rigidez: en puertas, huecos y casos muy especiales
- Triangulaciones locales de la capa interior

También se dan una serie de elementos específicos:

- Vigas cajón perimetrales, limitadoras de la superficie útil de las plantas motivada por el curvado de las paredes para su acoplamiento con las fachadas y sistemas de cartelas bulonadas semejantes a los anteriormente descritos, como conexión entre las vigas perimetrales y las fachadas (Apartado 3.7)
- Vigas de sección triangular conectadas a las vigas cajón perimetrales, en los casos de lucernarios (Apartado 3.8)
- Cargaderos en celosías de gran luz, para los emparrillados primarios de las cubiertas y zonas especiales.

3.3. Modulación

En la fase de diseño inicial se prestó especial atención a la fabricación de la estructura de fachada, concibien-

through single ear-plates and pin-bolt connections, perfectly welded following diametral planes of the tubes, thus avoiding all sorts of deviation forces on the structural facades (see Paragraphs 3.6 y 3.7).

The connection between the horizontal tubes (parallels) and vertical ones (meridians) of the same family (main or secondary) is carried out off-axis. On this singular connection, which is described in Paragraph 3.5, the vertical tubes of both layers are continuous, without any sort of opening. At the intersection with the horizontal tubes, only the horizontal tubes have been cut, in order to adequately merge and connect to the vertical ones.

On account of the markedly spatial arrangement of the building and the enormous quantities of these connections and the conditions of the interaction of the diverse tubular systems, it was considered indispensable to establish a series of systematic parametric conditions to reflect the different aspects of each detail in a simplified manner; from the most repeated and standard details up to the most singular ones.

Thus, on the one hand, the amount of different types of tubes to be used was restricted, both in diameters and thicknesses, adjusting to the available commercial products in China. These were finally circular hollow sections between 6 mm and 20 mm thick, and diameters between 150 mm and 200 mm, with some areas with up to 300 mm:

- *Main inner layer tube diameters:*
  - *ϕ200 mm tubes for the elements in vertical planes (meridians)*
  - *ϕ150 mm tubes for the elements in horizontal planes (parallels)*
  - *ϕ300 mm tubes for the areas carrying high loads*
- *Secondary outer layer tube diameters:*
  - *ϕ150 mm tubes for the elements in vertical planes (meridians)*
  - *ϕ120 mm tubes for the elements in horizontal planes (parallels)*

Even though each tube appeared to be of variable curvature, they were defined as formed by a combination of stretches from a set of 14 different curvature radii, which would be welded at the workshop, simplifying thus its construction (see Paragraph 5.4.2).

A thorough analysis of the connection arrangements between both layers of tubes of the structural facade was carried out:

- *Type connection areas, only by means of horizontal tubes ("hangers")*
- *Areas with "intra-diagonal", where a higher stiffness is required due to high stresses: doors, openings, special cases*
- *Local triangulations of the inner layer.*

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

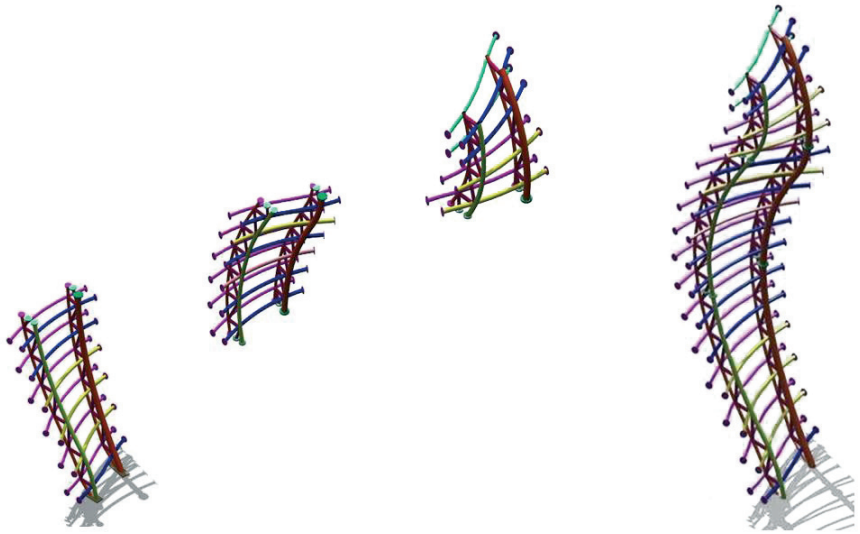

Figura 9. Modulación. Los tres módulos de la izquierda se unen mediante bridas atornilladas para formar el conjunto de la derecha
Figure 9. Modulation. The three modules at the left side are connected through bolted cleats, forming the set at the right

do un sistema modular en el que se fabricaban en taller paneles de dimensiones reducidas, cuyos tubos eran curvados, cortados y soldados para ser posteriormente transportados a obra, donde eran fácilmente manipulados y conectados unos con otros (Figura 9).

Se establecieron como paneles constructivos unidades de 4,80 m de anchura aproximada; es decir, constituidos por un módulo completo de 2,40 m, formado por dos costillas o piezas radiales, más dos mitades de módulo de los tubos horizontales a cada lado. La altura máxima prevista para estos paneles fue del orden de 7 m para facilitar el transporte y la colocación.

La conexión entre los módulos se diseñó para ser llevada a cabo mediante bridas atornilladas (descritas en el siguiente apartado) con una precisa ejecución en taller y cuidado posicionamiento en obra, de manera que los taladros de los tornillos estuviesen adecuadamente alineados.

Esta unión embridada atornillada facilitaría el desmontaje de la estructura, para ser transportada y volver a ser construida en otra ubicación en Shanghái, una vez finalizada la Expo, condición requerida en el diseño.

3.4. Uniones embridadas

Las uniones entre paneles estaban previstas mediante un sistema embridado de dos placas extremas circulares unidas entre sí por tornillos de alta resistencia, con objeto de facilitar el montaje y posterior desmontaje de los módulos que componen la estructura de fachada. Las bridas son circulares, en el caso de los tubos horizontales, y elípticas en las uniones entre los tubos verticales, para conseguir apoyos horizontales, más favorables durante el montaje (Figura 10, Figura 11 y Figura 12).

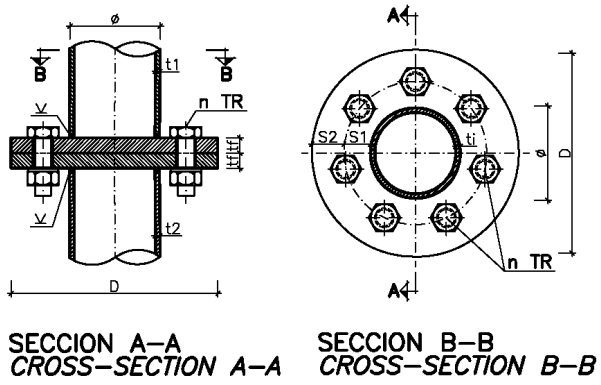

Figura 10. Croquis de unión embridada recta
Figure 10. Orthogonal cleat connection

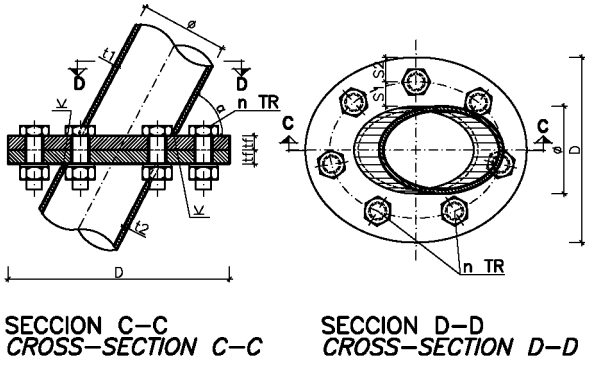

Figura 11. Croquis de unión embridada inclinada
Figure 11. Inclined cleat connection

Together with this, there are also special elements:

– *Floor circumscribing peripheral box beams which determine the surface of the floors due to the curvature of the facades, connected to the facades through pin-bolted earplates, similar to the ones previously described between the edge-beams and the facades (Paragraph 3.7)*

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026



Figura 12. Unión embridada
Figure 12. Cleat connection

Hay dos familias de bridas, una en planos horizontales, separando niveles de estructura de unos 7 m, y otra familia de bridas dispuestas en planos verticales cada 4,80 m aproximadamente. Todas las bridas de cada cara de un módulo debían estar situadas en un mismo plano, ya que de no ser así, no sería posible el ensamblaje de unos módulos con otros, al tener cada tubo orientaciones diferentes.

3.5. Intersección excéntrica de tubos

Quizás el detalle constructivo más particular del edificio sea la unión excéntrica entre los tubos verticales y horizontales que forman las mallas de fachada (Figura 13). La finalidad de esta peculiar disposición, en la que los tubos verticales son pasantes y a los horizontales se les practica una abertura lateral, fue a la vez un requerimiento arquitectónico como una disposición constructiva, para simplificar los procesos de curvado y corte de tubos, que de ser a ejes llevaría al despiece total y unión completa de una de las capas.

La disposición planteada pretende que la capa considerada secundaria en esfuerzos, los paralelos horizontales, intersecte sólo parcialmente a la ortogonal vertical, permitiendo que el contorno del tubo horizontal cortado pueda ser soldado en ángulo al vertical correspondiente, de manera que se garantice la transferencia de los esfuerzos que se produzcan en dicha unión.

– *Triangular box beams connecting the peripheral box-beams to the tubes of the facade in order to improve the entrance of light: skylight area (Paragraph 3.8)*

– *Truss beams of great span for the primary grillages of the roofs and special areas.*

3.3. Modulation

During the initial design, special attention was paid to the construction process of the structural facade: the tubes would be curved, cut and welded at the workshop, assembling small panels that could be transported and easily manipulated on site (Figure 9).

The width of these constructive panels was set to 4.80 m approximately; it is to say, consisting of a complete module of 2.40 m formed by two ribs or radial parts and two halves of the horizontal tubes module. The maximum height of these panels was about 7 m, in order to ease its transportation and manipulation.

The connection between panels was designed to be carried out vertically and horizontally by means of bolted cleats (described on the next paragraph), with a precise fabrication at the workshop and a careful positioning on site, so that the boring holes of the bolts were correctly aligned.

This bolted cleat connection would ease both the assembly and disassembly of these elements at the end of the Expo, to be transported and then again built on another location in Shanghai, as implemented in the design.

3.4. Cleat connections

The connections between the modules were devised to be carried out by means of bolted circular cleats with high strength bolts, in order to ease the assembly and later disassemble of the modules that form the structural facade. For the horizontal tubes, these cleats are circular (orthogonally placed), though wherever considered appropriate, elliptical cleats can alternatively be used for the joints of vertical tubes so to achieve horizontal bearings; hence facilitating the assembly (Figure 10, Figure 11 and Figure 12).

There are two families of cleat connections: one set on horizontal planes, dividing the structure into 7 m high layers; and a second family of cleats set on vertical planes every 4.80 m approximately. All the cleats of each border of a module had to be set at the same plane, as, had it not been this way, it would not be possible to assemble the modules one next or on top of the others, as each tube had different directions.

3.5. Off-axis tube intersection

Perhaps the most particular construction detail of the building is the off-axis connection between the vertical and

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

Consiguientemente los tubos verticales se disponen pasantes completos, mientras que los tubos horizontales se cortan adecuadamente (ver Apartado 5.4.2), para acoplarse a los tubos verticales en los nudos de cruce. Precisamente, el acoplamiento geométrico considerado ha consistido en lograr que el cruce de ambas familias de una capa se produzca con una distancia entre los ejes de sus tubos nunca nula, sino comprendida y limitada entre un valor mínimo de 25 mm y un máximo de 170 mm, estando el promedio en una separación de 120 mm (Figura 14).

Para los valores medios y el valor mínimo de esta separación el perímetro de corte y su unión soldada en taller con cordón en ángulo de 0,7 t de la chapa de menor espesor, determina una capacidad resistente válida para los esfuerzos que se presentan en dichas uniones.

Por el contrario, en el caso de la distancia máxima, el contorno ideal de contacto resulta insuficiente, debiendo ampliarse la profundidad de dicho corte de intersección del tubo horizontal a un mínimo de 60 mm, intercalándose en tales casos una chapa del espesor diferencia entre el valor teórico y los 60 mm mínimos. Esta chapa auxiliar se dispone cilíndrica, con su única curvatura en la posición apropiada para su unión al tubo horizontal con cordón en ángulo de 0,7 t_h.

Esta conexión requirió un análisis afinado del comportamiento de la unión por medio de un análisis de elementos finitos (Figura 15), determinando, para los diferentes rangos de separación, espesores y diámetros de tubos, las combinaciones de esfuerzos que era capaz de soportar cada unión.

Respecto a la fabricación, existen diversos programas comerciales para la definición automática de los cortes



Figura 13. Detalle de la unión excéntrica. Los tubos verticales son pasantes, mientras que los horizontales son cortados
Figure 13. Off-axis connection. The vertical tubes are continuous, while the horizontal ones are cut

horizontal tubes that form the structural facade meshes (Figure 13). This peculiar arrangement, in which the vertical tubes are continuous and the horizontal ones are cut laterally, was at the same time an architectural requirement and a construction disposition, with the aim of simplifying the curving and cutting processes of the tubes; had it been a cross-axis intersection it would have required a complete cut and assembly piece by piece of one of the layers.

This arrangement seeks to easing the transfer of stresses from the secondary layer, the horizontal parallels, to the main vertical layer, through a partial intersection, allowing the intersection outline on the horizontal tube to be welded against the continuous vertical one, guaranteeing this way an adequate transfer of stresses in the connection.

Consequently, the vertical tubes remain continuous through the connection, while the horizontal ones are

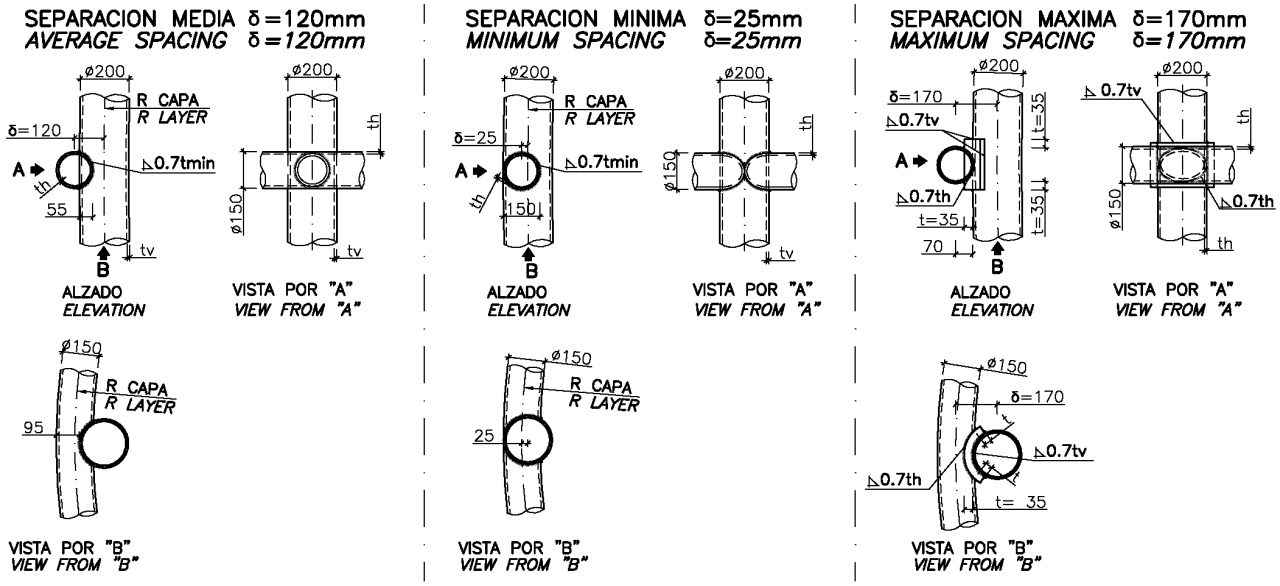

Figura 14. Detalle de la unión excéntrica, en los diferentes casos en función de la separación entre ejes
Figure 14. Detail of the off-axis connection, in different cases depending on the distance between axes

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

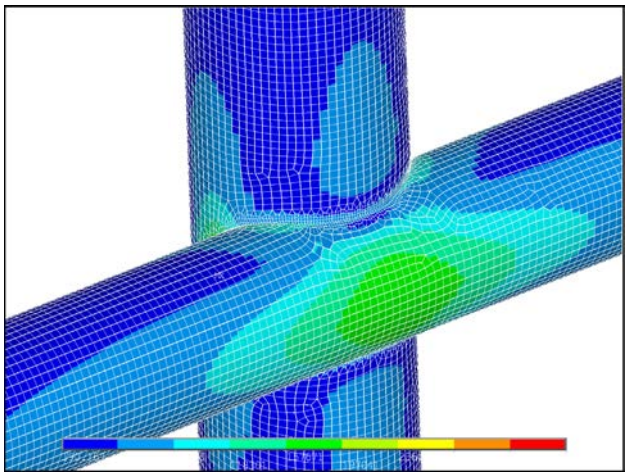

Figura 15. Estudio de tensiones de la unión excéntrica por MEF
Figure 15. Stress study by FEM and the off-axis connection

a realizar en dos tubos que se intersectan, conectados directamente con las máquinas de corte automático. Sin embargo, estos cortes están limitados a intersecciones de tubos rectos concéntricos. Para poder realizar los cortes de la intersección de tubos curvos excéntricos el taller metálico tuvo que desarrollar un software específico para este propósito [6] (Figura 16).

3.6. Uniones bulonadas

Se definen disposiciones sistemáticas de estas uniones entre la estructura portante de fachada y las plan-

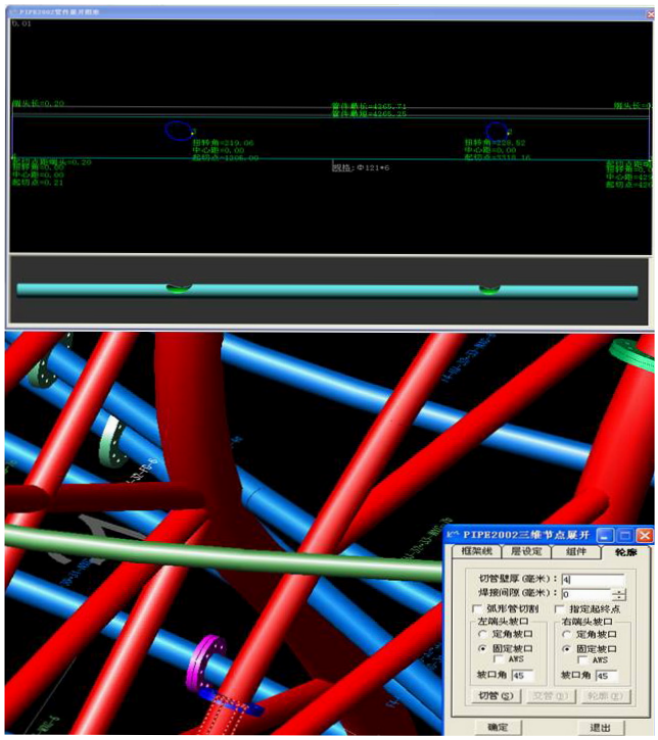

Figura 16. Interfaz del software desarrollado para el corte en intersección excéntrica de barras curvas
Figure 16. Interface of the software developed for automatic cut of curved tubes

adequately cut (see Paragraph 5.4.2), to merge with the vertical ones at the joints. The geometric attachment has managed to keep the separation between axis of both families of a layer at a variable distance, never null, between a minimum of 25 mm and a maximum of 170 mm, being the average distance between axis, 120 mm (Figure 14).

For average and lower values of the separation between layers, the cut outline of the tube is welded at workshop with fillet welds of 0.7 t of the tube with lower thickness. This weld provides sufficient capacity to withstand the stresses at the connection.

However, in the cases where the separation between axes is maximum, the intersection outline between the tubes is insufficient, requiring a deeper intersection of the horizontal tube, up to a minimum of 60 mm. In these cases, a supplementary plate is inserted between both tubes, with a thickness which makes up for the difference between the theoretical value and the minimum 60 mm required. This auxiliary plate is cylindrical, with its single curvature along the appropriate direction of the horizontal tube, to which it is fillet-welded with 0.7 t_h.

This connection required a precise analysis of its behaviour, through a FEM analysis (Figure 15) which determined, for different sets of separation between axis and tube diameters and thicknesses, the combination of stresses that the connection was able to withstand intersection.

Regarding its fabrication at workshop, there exists several commercial software which automatically define the cut outline between tubes which intersect. These programs are directly connected to the cutting machines. However, the cuts these programs are able to make require the intersection to be concentric. In order to be able to carry out automatic off-axis cuts, the steel workshop had to develop a specific new software for this purpose [6] (Figure 16).

3.6. Pin-bolt connections

Systematic arrangements of pin bearings are defined between the structural facades and the floors in order to assure that the transfer of the loads of the former onto the latter happens in the most favourable conditions for all the elements. The pin bolts are inserted between triangular gussets which are centered with the facade vertical tubes on one side, and to the edge beams on the other (Figure 17).

3.7. Edge beams

Edge beams are used to delimit the floors and roofs. These edge beams are generally C channels, where no torsional stiffness is required (Figure 17), or box sections where the loads are greater, such as at the main roofs.

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026



Figura 17. Unión bulonada en construcción, conectando viga de borde con tubo de fachada mediante orejetas
Figure 17. Pin-bolt connection under construction, connecting the floor edge beam to the facade tube through ear-plates

tas, para garantizar la transferencia de las reacciones de éstas sobre aquéllas en las condiciones más favorables para todos los elementos. Los bulones se insertan entre orejetas, única en los tubos verticales, centrada en su eje y contenida en su mismo plano vertical, y doble en las vigas de borde, entre las cuales se sitúa la anterior (Figura 17).

3.7. Vigas de borde

Las vigas de borde delimitan los contornos de los forjados y cubiertas. Generalmente son secciones abiertas en U, cuando no se requiere rigidez torsional (Figura 17), o piezas en cajón rectangular cuando las solicitaciones son mayores (en el caso de algunas de las cubiertas mayores).

Por el interior de estas vigas de borde acomete la estructura del emparrillado de vigas de los forjados, mientras que por el exterior se conecta a los tubos de fachada con las referidas uniones articuladas mediante bulones (Figura 18).

3.8. Vigas triangulares

Por motivos arquitectónicos, que requerían en algunas posiciones tener vigas muy esbeltas y visualmente atractivas, en especial en los lucernarios y en una zona de dobles alturas, se emplearon vigas triangulares (Figura 19).

Estas vigas conectan la estructura de cubierta (y una planta intermedia a modo de mezzanina) con los

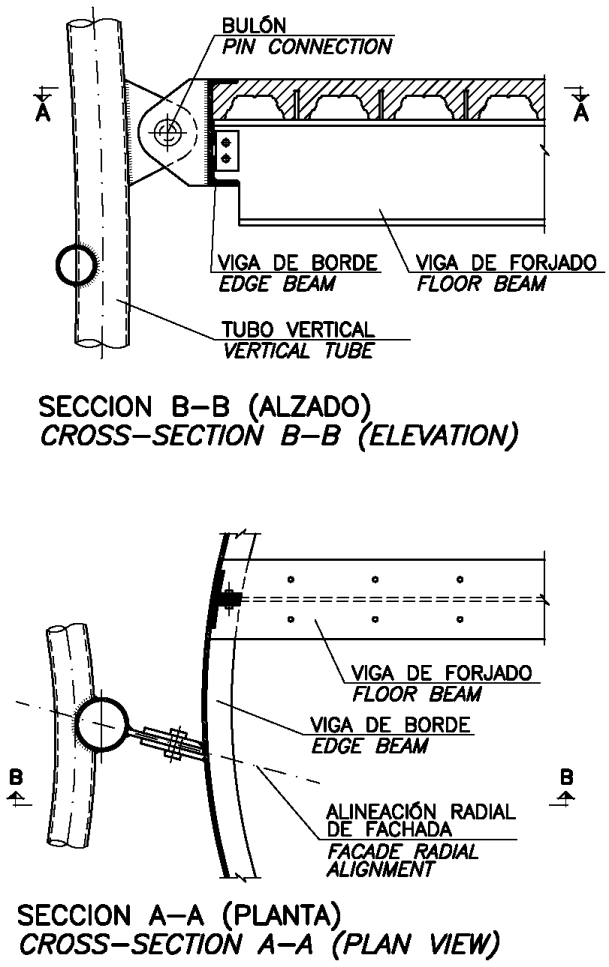

Figura 18. Croquis de unión de estructura interior con tubos de fachada
Figure 18. Sketch of the connection between the inside structure and the facade tubes

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026



Figura 19. Viga triangular en construcción en taller (tumbada)
Figure 19. Triangular beam under manufacture at the workshop (turned)



Figura 20. Detalle de la cubierta de la Sala Expositiva 2. Las vigas triangulares se unen por medio de bulones a la fachada, rigidizada por paneles en esa zona
Figure 20. Detail of the roof of Exhibition Room 2, where the triangular beams are connected through pin-bolts to the facade, reinforced in this area with plates

tubos verticales de la fachada estructural sobre la que se apoyan por medio de unas uniones articuladas (Figura 20).

Se formalizan mediante dos chapas laterales inclinadas y una horizontal superior, más un redondo longitudinal inferior, que garantiza un remate afinado y una visión cenital de gran calidad (Figura 21).

3.9. Escaleras curvas

Uno de los elementos más llamativos dentro del Pabellón es la escalera curva en voladizo en la zona de oficinas (Figura 22 y Figura 23). Esta escalera, de dos tramos entre cada una de las dos plantas a las que da acceso desde la planta baja, tiene dos descansillos en semicírculo volados. Sin apoyos intermedios, se resuelve por medio de vigas cajón curvas metálicas, de sección rectangular 400x150 mm y espesores entre 20 mm y 25 mm. Los importantes tiros y empujes son



Figura 21. Vista desde la que se puede apreciar la esbeltez de las vigas triangulares
Figure 21. View where the slenderness of the triangular beams may be grasped

The grillage of beams of the floors is connected to the inside of these edge-beams, while from the outside they are connected to the facade tubes through the previously mentioned pin-bolted connection (Figure 18).

3.8. Triangular beams

Due to architectural reasons, which required at certain places slender and visually attractive beams, especially at the skylights and mezzanines, triangular beams were employed (Figure 19).

These beams connect the roof structure (and an intermediate mezzanine floor) with the vertical tubes of the structural facade through pin-bolted connections (Figure 20).

They are carried out by means of lateral inclined steel plates and a top horizontal one, plus a lower longitudinal rod that assures a tuned finishing and an overhead view of great quality (Figure 21).

3.9. Curved stairs

One of the most remarking elements inside the Pavilion is the curved cantilever stairs at the offices area (Figure 22 and Figure 23). These stairs, of two flights between the two floors to which they allow access from the ground floor, have two landings of semi-circular shape. Without intermediate supports, it is solved through curved steel box-beams, with a cross-section of 400x150 mm and thicknesses between 20 mm and 25 mm. The considerable tension and compression forces transmitted through the floors (at these areas, full slabs) to the elevator cores, where one of the global bracing systems is located.

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

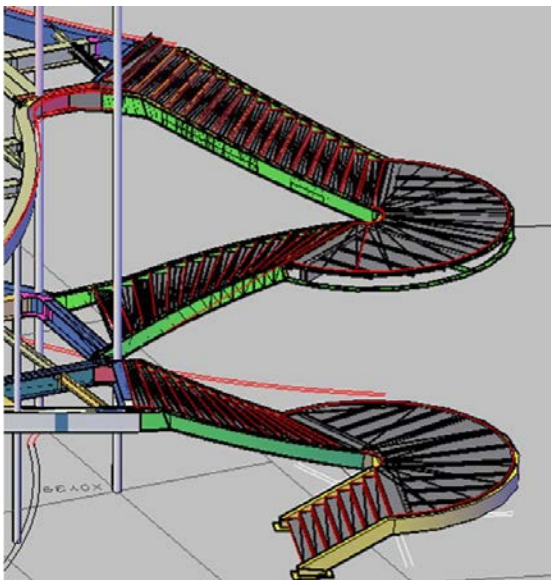

Figura 22. Modelo de la escalera curva volada
Figure 22. Model of the cantilever curved stairs



Figura 23. Escalera curva volada en construcción
Figure 23. Cantilever curved stairs under construction

transmitidos a través de los forjados de planta (en estas zonas, macizos) hasta los núcleos de ascensores donde se sitúa uno de los conjuntos de celosías de arriostramiento global.

4. PARTICULARIDADES DE CÁLCULO

4.1. Viento

Debido a la particular geometría libre que presenta el edificio, las cargas de viento no pueden ser determinadas siguiendo las indicaciones de las normativas. Con el fin de concretar estas acciones se llevaron a cabo estudios particulares de dinámica de fluidos por la Universidad de Tongji [8].

Partiendo del modelo tridimensional de arquitectura se modelizó el campo de flujo y se generó el modelo de CFD (Computational Fluid Dynamics) (Figura 24). Algunos detalles secundarios de las cubiertas fueron omitidos para simplificar el modelo. Las dimensiones del campo de flujo, de 2.400m x 1.800m x 200m, eran lo suficientemente grandes como para evitar efectos de compresión localizada, estando ubicado el edificio a un tercio de la dimensión del campo. La malla estaba compuesta por 400.000 elementos volumétricos, hexaédricos regulares en el contorno exterior, y más compactos y mixtos en las zonas cercanas al edificio.

De esta manera pudo estudiarse la presión del flujo y la distribución de velocidades, determinando los coeficientes de presión bajo distintas direcciones del viento (Figura 25).

Una vez determinados los coeficientes de presión a considerar, se introdujeron en el modelo de cálculo

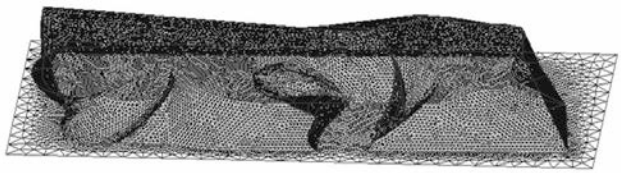

Figura 24. Modelo CFD para estudio de viento. Parte de la malla
Figure 24. CFD building grid model. Part of the mesh

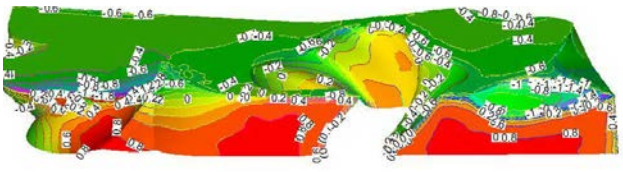

Figura 25. Coeficientes de presión sobre la fachada, viento de sentido Sur-Norte
Figure 25. Building surface wind pressure coefficient, wind coming from South to North

4. SPECIFIC ANALYTICAL FEATURES

4.1. Wind

Due to the particular free form of the building, the wind loads can not be directly determined following code specifications. In order to determine these loads, computational fluid dynamics analyses were carried out by Tongji University [8].

The flow field model for the CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis was created based on the three dimensional model provided by the Architecture team (Figure 24). Some trivial details on the top of the building were omitted during the modelling procedure. The flow field dimension should be large enough to avoid the local compression effect. The whole flow field model is set as 2400mx1800mx200m

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

las cargas equivalentes de viento para diversas direcciones con sus coeficientes de simultaneidad correspondientes para todas las situaciones de dimensionado pertinentes.

4.2. Sismo

Shanghái tiene una sismicidad relativamente baja, dentro de la variación extrema que se da en el país, con una aceleración sísmica básica del suelo de 0,1·g. El terreno sobre el que se asienta el edificio es una arcilla blanda con un período característico de tan sólo 0,9 s. La acción de sismo frecuente considerada en estado límite último supone una probabilidad de ser superada del 63,2% en 50 años. El período de servicio del pabellón era de 1 año, durante el cual la probabilidad de que ocurra un terremoto mayor al frecuente es de tan sólo un 2%. Aún así, debido a la afluencia masiva prevista y el gran impacto social de un posible terremoto, y al posible caso de uso futuro previsto del edificio en otra ubicación, se adoptó un período de servicio de 50 años para el diseño sísmico [8].

Se sometió al modelo a un análisis espectral según el espectro normalizado de respuesta elástica en la superficie libre del terreno, para aceleraciones horizontales según las direcciones X e Y.

Los períodos obtenidos para los tres primeros modos fueron: 1,00 s, 0,86 s y 0,67 s, correspondientes a formas modales según la dirección Y (transversal), X (longitudinal) y torsional.

Debido a las discontinuidades y disposición irregular de los forjados de las plantas, se supuso la hipótesis de diafragmas separados en el cálculo deformativo. En aquellas plantas con losas encima y debajo se determinó el desplome relativo, así como el desplome total como medida de la deformación lateral.

Del cálculo espectral se obtuvieron unos valores máximos de desplome de h/356 para el global, y de h/875 para el desplome relativo entre plantas. Ambos valores se encuentran dentro de los límites de la normativa: h/300.

También se llevó a cabo la comprobación de las barras en las diferentes combinaciones, incluyendo el sismo, quedando la gran mayoría de las mismas con un factor de seguridad por debajo de 0,8.

Es habitual en edificios con formas complejas el realizar un cálculo dinámico explícito, estudiando la respuesta del edificio a un determinado terremoto [8]. Se estudiaron tres terremotos: el de Tianjin, el de Loma Prieta (similares ambos en el tipo de terreno) y uno artificial (Figura 26 y Figura 27). En los tres casos los movimientos obtenidos del cálculo explícito fueron menores a los obtenidos del cálculo modal-espectral.

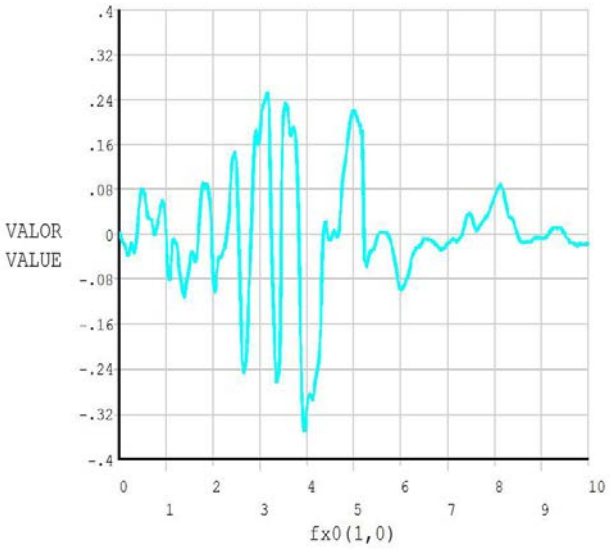

Figura 26. Función time history del terremoto de Loma Prieta
Figure 26. Time history of the Loma Prieta ground motion

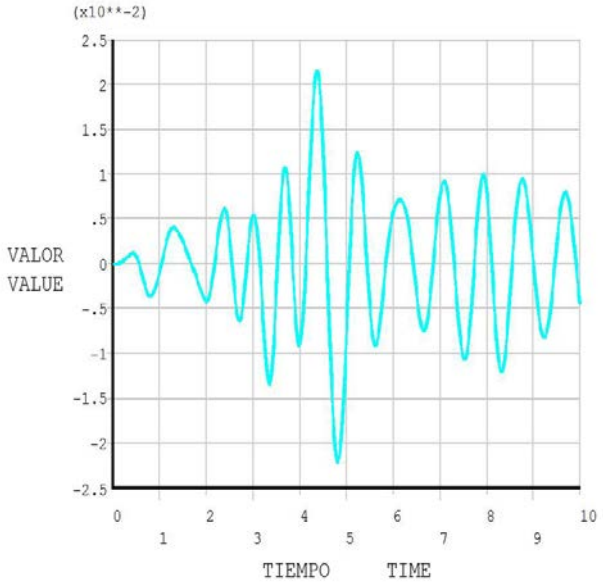

Figura 27. Desplazamiento de dirección X (longitudinal) en cubierta bajo el terremoto de Loma Prieta
Figure 27. Time history of the building roof in X direction, under Loma Prieta earthquake ground motion

and the pavilion is located in the 1/3 part of the flow field. Regularly arranged hexahedral grid is applied for the outer layers of the flow field, while compact mixed grid is applied for those areas close to the building. The final flow field model is composed of about 400,000 volume elements.

This way the flow pressure and velocity distribution were analysed, determining the wind pressure coefficients under different wind directions (Figure 25).

Once these pressure coefficients were set, they were introduced into the analytical model as equivalent forces for the different wind directions hypothesis, with their corresponding simultaneity coefficient under all the dimensioning load combinations to be taken into account.

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

5. DEL DISEÑO AL TALLER

5.1. Concepción

La necesidad de alcanzar un sistema adecuado a la forma libre del edificio concebida por la arquitectura requirió un intenso diálogo entre Arquitectura y Estructura, desde los inicios de la concepción del edificio en la fase de concurso.

En este diálogo, se operó con las principales variables que configuran el edificio, tratando de encontrar el sistema que mejor se adaptase a la forma libre del mismo, buscando la mayor coherencia estructural posible. La doble curvatura de las superficies de fachada fue tanto el reto como la solución a su estructura, ya que tales sistemas ofrecen un comportamiento deformativo-resistente extraordinariamente eficaz [9].

En el diseño arquitectónico y en el estructural los programas informáticos, tanto comerciales como de desarrollo propio, jugaron un papel fundamental. La forma definida por Arquitectura mediante superficies NURBS ("non-uniform rational B-Splines": B-splines racionales no uniformes) fue cortada por planos verticales y horizontales para definir los ejes de las mallas ortogonales de los tubos de fachada. Las curvaturas variables de estos ejes fueron adaptadas para limitarlas a un número pequeño, y simplificar la ejecución en taller. Del sistema 3D así tratado se generó el modelo estructural, sobre el cual fueron ajustadas en un proceso de tipo iterativo las dimensiones, resistencias y la propia forma. Para ello fue desarrollado un software específico que permitiera:

- Una rápida importación de los modelos CAD de Arquitectura
- Un análisis por elementos finitos no lineales
- Un post-proceso automático de los resultados

Este software permitió alcanzar una configuración optimizada que satisfacía tanto los requerimientos arquitectónicos como los estructurales y que, adicionalmente, fue luego empleado por el taller metálico para la construcción de todos los elementos, y lograr la gran precisión geométrica necesaria en su definición.

Partiendo del modelo así generado se definieron también los modelos del muro cortina y de disposición de los paneles de mimbre.

De este modo, un mismo modelo geométrico sirvió como medio de comunicación entre el diseño arquitectónico y de fachada, el diseño y análisis estructural, y la construcción en taller [10].

5.2. Constructibilidad

Inherente al diseño de cualquier estructura está la idea de que ésta ha de ser construible, tanto técnica como económicamente. En formas libres como la del

4.2. Earthquake

Shanghai is a relatively low seismic area, considering the extreme variation over the country, with a basic ground acceleration of 0.1·g. The project site has very soft soil and the characteristic period of the ground is only 0.9 s. The frequent earthquake action to be considered in the strength design has a probability of exceedance of 63.2% in 50 years. The service period for the Exposition is about 1 year, during which the probability of the occurence of the frequent earthquake is only 2%. Due to the predicted crowded visitors and the serious social impact under potential earthquakes, a service lifetime of 50 years was employed in the seismic design [8].

A spectral analysis was carried out on the model, following the normalized elastic response spectrum on the ground surface, for horizontal accelerations along X and Y directions.

The periods for the first three building modes are 1.00s, 0.86s and 0.67. The corresponding modal shapes are Y direction translational, X direction translational and torsional.

Due to the discontinuous and irregular arrangement of the floor slabs, separated diaphragm assumption was applied for the deformation analysis. For those floor slabs with upper and lower adjacent floor slabs, the relative story drift ratio was used to assess the lateral deformation.

According to the response spectrum analysis results, the calculated maximum global story drift ratio is 1/356, and the maximum relative story drift ratio is 1/875 under frequent earthquake. Both drift ratios are within the code story drift ratio of 1/300.

The stress ratios for all the structural members under the load combination with earthquake case included were also calculated using response spectrum analysis method. The stress ratios of most structural members were below 0.8.

Time history analysis method is commonly applied to assess the seismic performance for very complicated building structures [8]. Three earthquakes were studied: Tianjin, Loma Prieta (both with a similar ground type) and an artificial one (Figure 26 and Figure 27). It was found that the displacements calculated from time history analysis for all the three ground motions are smaller than those obtained by response spectrum analysis method.

5. FROM THE DESIGN TO THE WORKSHOP

5.1. Conception

The need to reach an adequate structural system that gave support to the free form of the building conceived by the architect required an intense dialog between Architecture and Engineering right from the early stages of the design.

In this dialog, the main variables which configure the building were considered, trying to find the structural system which best merged into the form and into an archetypal structural system, resulting in a coherent structure. The double curvature of the enveloping facade was both a chal-

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

Pabellón de España, la constructibilidad jugaba un papel fundamental en su diseño. Podría decirse que las formas *libres* son *prisioneras* del proceso constructivo, que condiciona su diseño y cuyas pautas han de necesariamente obedecer [11].

Todos los pasos de la construcción, en nada convencional, tuvieron que ser cuidadosamente anticipados para identificar los aspectos fundamentales que pudieran afectar al diseño.

Estas disposiciones estructurales en el diseño del proyecto fueron posteriormente discutidas con la empresa constructora y el taller, que aportaron importantes optimizaciones y mejoras que facilitaban tanto la fabricación en taller como el montaje en obra [12].

5.3. Modelos

Partiendo del modelo geométrico tridimensional de arquitectura (Figura 28), y siguiendo el procedimiento explicado en el apartado 5.1 se generó el modelo estructural, que fue manipulado y optimizado a través de herramientas informáticas de análisis tanto comerciales como desarrolladas específicamente (Figura 29).

El modelo así definido por los equipos de arquitectura y estructura fue posteriormente empleado por el constructor para definir el modelo de construcción 3D, que integraba todos los detalles de construcción metálica y a partir del cual se generaron los planos de taller (Figura 30).

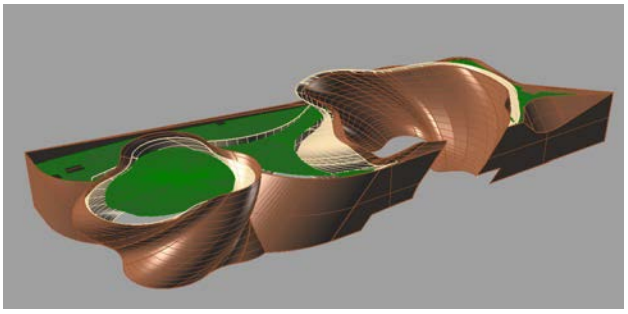

Figura 28. Modelo de geometría NURBS (arquitectura)
Figure 28. NURBS geometry model (architecture)

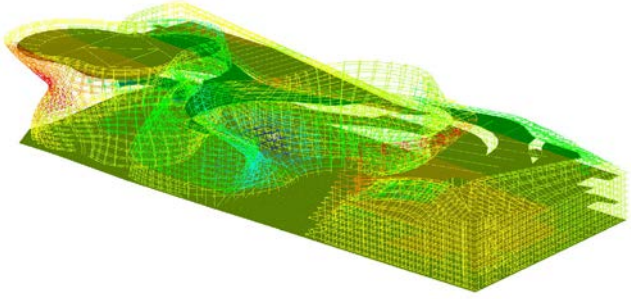

Figura 29. Modelo global de estructura de elementos finitos. Deformación vertical bajo cargas permanentes
Figure 29. Global Finite Element Method Model. Vertical deformation under permanent load

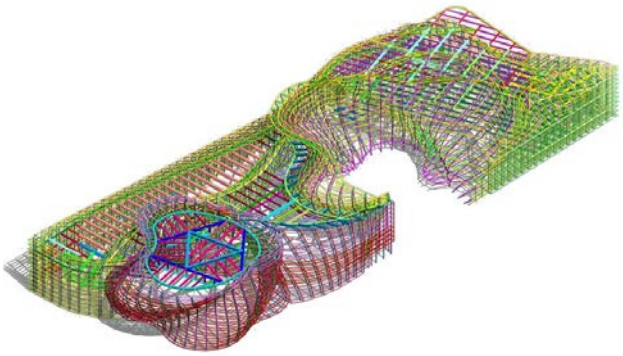

Figura 30. Modelo de construcción, con todos los detalles constructivos
Figure 30. Construction model, with all construction details

lenge and the solution to the structural system, as these shapes, when adequately configured, behave in an optimal structural way [9].

In the architectural and structural design, the role played by computer software, both commercial and specifically developed for this project, was essential. The form was first devised as geometric NURBS ("non-uniform rational B-splines") surfaces by the Architecture team. After manipulating the form, the surfaces were cut by vertical and horizontal planes which resulted in curves that defined the axes of the corresponding structural tubes. The variable curvatures of these axes were then transformed into stretches of single-curvature tubes, thus easing the steel workshop manufacture. From the 3D geometric model thus generated by Architecture, the structural model was generated, manipulated and analyzed, giving feedback to Architecture in an iterative process where the sizes, strengths and geometry of the different elements were adjusted. For this purpose, specifically developed structural analysis software was used, enabling:

- *A fast importing of the geometry from the CAD model*
- *Finite Element Method (FEM) non-linear analysis (ANSYS software)*
- *Automatic post-processing of the results*

This software allowed a versatile procedure to reach an optimized solution that both satisfied the structural and architectural requirements. The geometrical model was later used as well by the steel workshop in the construction of all the members, which required a precise geometrical definition.

From this same model, the geometric definition of the curtain wall and the wicker panels were created.

Thus, a unique geometric model served as the communication language between architectural and facade design, structural design & analysis, and workshop construction. [10].

5.2. Constructibility

Inherent to the design of any structure is the idea that it must be able to be built, both technically and economical-

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026



Figura 31. Curvado de tubos
Figure 31. Tube curving



Figura 32. Comparación de tubo curvado con una plantilla de madera
Figure 32. Curved tubes being checked against a wood template

Este procedimiento garantizaba que la geometría de los diferentes elementos estructurales se correspondía con la geometría variable definida en el proyecto de arquitectura. La visualización del conjunto en un modelo tridimensional también permitió detectar interferencias geométricas complicadas y resolver detalles especiales.

La manipulación minuciosa del modelo de construcción permitió la generación precisa de los planos de taller, a partir de los cuales se ejecutó la estructura metálica en el taller.

5.4. Fabricación en taller

No sólo la definición geométrica y el análisis de la estructura fueron complicados; la fabricación en taller, con el gran número de tubos a curvar, cortar y soldar según las uniones excéntricas, supuso un gran desafío.

Además de estas dificultades técnicas, se añadían los problemas de un plazo muy apretado, con la fecha de entrega final inamovible de la inauguración de la Expo.

5.4.1. Curvado de tubos

Para el curvado de tubos se emplearon curvadoras de control numérico (Figura 31), y la curvatura se iba comparando con plantillas de madera (Figura 32). Si bien la idea inicial era ir ensamblando tramos de curvatura diferentes, al cabo de unas semanas el taller fue

ly. With free forms as is the case of the Spanish Pavilion, the buildability played a fundamental role in the design. It may be said that free forms are in a certain way prisoners of the manufacture and construction process, which constrain the design, and whose rules they must ultimately obey [11].

Every step of the unconventional construction had to be carefully thought, trying to identify the key items which could affect the design itself.

These structural dispositions were later thoroughly discussed with the manufacturer, who provided specific building procedures and optimizations of the structure, which both eased the manufacture and structural behaviour of the building [12].

5.3. Models

From the 3D geometrical model generated by Architecture (Figure 28), following the process explained in Paragraph 5.1 the structural model was generated, manipulated and optimized through both commercial software and a series of specifically developed structural analysis software (Figure 29).

The model thus defined by the architectural and structural design teams was later employed by the manufacturer, who integrated into a single model all the steel construction details, and from which all the workshop drawings were generated (Figure 30).

This procedure guaranteed that all the different structural elements to be manufactured matched the variable geometry defined in the project. It also simplified and made possible the visualization and solving of the special areas and details.

A thorough and detailed work on this construction model allowed a precise generation of all the shop drawings, from which all the structural elements were manufactured at the workshop.

5.4. Workshop manufacture

Not only the geometrical definition and analysis of the structure of the pavilion was complex; the manufacture of the structure, with a great number of curved tubes, cuts and welding, together with an unusual off-axis connection between tubes, was a great challenge.

Together with this, there was a tight schedule with the pressing unmovable deadline of the Expo's inauguration.

5.4.1. Curving of tubes

Numerically Controlled bending machines were employed to curve the tubes (Figure 31), while the curvature was checked

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

capaz de realizar tramos con cambios de curvatura, realizando ajustes en la posición de los mandriles y sin desviarse significativamente de la geometría de proyecto. Estos tramos de dos o incluso tres curvaturas diferentes se soldaban en prolongación de otros tramos así curvados –o rectos–, pudiendo generarse un único meridiano vertical con muy pocas uniones soldadas.

5.4.2. Corte-curvado-corte de tubos

Tras probar diversos procedimientos para la realización de la unión excéntrica de tubos curvos, descrita en el apartado 3.5, se optó por el siguiente proceso.

Primero se realizaban unos cortes parciales en el tubo recto, previos al curvado, por medio de una máquina de corte de plasma de seis grados de libertad, por control numérico (Figura 33).

A continuación, se curvaba el tubo con las incisiones practicadas (Figura 31 y Figura 32), y una vez que el tubo presentaba la curvatura requerida se terminaba el corte con soplete (Figura 34). Este procedimiento permitía aprovechar las máquinas automáticas de corte (que sólo pueden realizar cortes sobre tubos rectos) y permitir el curvado de los tubos en las zonas con cortes requeridos para la intersección excéntrica, sin deformar el tubo.

5.4.3. Premontaje en taller

Los meridianos verticales, tanto principales como secundarios, se iban curvando según se ha expuesto en el apartado 5.4.1. Una vez estaban finalizados el



Figura 33. Corte parcial automático sobre el tubo recto
Figure 33. Automatic partial cut on straight tube



Figura 34. Corte completado con soplete sobre el tubo curvo
Figure 34. Intersection cut finished by hand after curving

against wood templates (Figure 32). Although the initial idea was to join stretches of single curvature tubes, after a few weeks the workshop was able to manufacture stretches of variable curvature, carrying out small adjustments in the position of the curving wheels without significant deviations from the geometry defined in the project. These stretches of two or even three different curvatures were then welded together against other curved –or straight– stretches, being able to manufacture a meridian with very few welded connections.

5.4.2. Cutting-curving-cutting of tubes

After trying out several procedures for the manufacture of the off-axis intersection of curved tubes, described in Paragraph 3.5, the following procedure was devised.

First, a partial cut was carried out on the straight tube, before bending, with a six-degrees-of-freedom numerically controlled Plasma Cutter (Figure 33).

Next, the straight tube with the partial cut was curved in the bending machines (Figure 31 and Figure 32), and once the desired curvature was obtained, the cut was finished by hand (Figure 34). This procedure allowed the use of automatic cutting machines (which can only perform cuts in straight tubes) and proceed with the curving of tubes at the areas with the cuts required for the off-axis intersection, without deforming the tube.

5.4.3. Assembly on workshop

The vertical meridians, both main and secondary, were curved as explained in Paragraph 5.4.1. Once a main meridian and its corresponding secondary meridian (parallel to this, generally at 0.80 m) were finished, they were placed on top of auxiliary tables. Previously, on the floor, the theoretical geometry of each meridian was drawn with chalk, and their geometry was adjusted by warming through local flame, checking against the drawn pattern on the floor by means of plumbs.

Next, the hangers and eventual intradiagonals were placed in position and welded (Figure 35). These plane subsystems formed by two meridians, hangers and intradiagonals were then prepared to be welded to other subsystems through horizontal bars (parallels). This assembly could take place either at the workshop, forming modules of two pairs of meridians, or at site.

6. ON-SITE CONSTRUCTION

The construction process of the pavilion, although of great technical complexity due to the highly irregular geometry and unusual systems employed, is relatively simple.

First, the slab and raft foundations were carried out, with a previous partial replacement and pre-loading of the soil for three months.

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

meridiano principal y su correspondiente meridiano secundario (paralelo a éste, generalmente a 0,80 m), se colocaban sobre unas camas de montaje. En el suelo previamente se había replanteado con tiza la forma curva de cada meridiano, y la curvatura de éstos se iba ajustando a la teórica con calentamientos localizados hasta ajustarse a la figura dibujada en el suelo, con la que se comparaba por medio de plomadas.

A continuación se colocaban y soldaban las perchas y eventuales intradiagonales (Figura 35). Estos conjuntos planos de dos meridianos, perchas e intradiagonales quedaban preparados para ser unidos a otros conjuntos a través de las barras horizontales (paralelos), unión que se realizaba bien en taller, formalizando módulos de dos parejas de meridianos, o en obra.

6. PROCESO CONSTRUCTIVO

El proceso constructivo, aunque de gran complejidad técnica debido a la irregularidad de la geometría, fue relativamente sencillo.

En primer lugar se ejecutó la losa de cimentación y solera, con la retirada previa y reemplazo de los rellenos antrópicos superficiales, y un período de tres meses de aplicación de la precarga.

A la vez que se estaban llevando a cabo estos trabajos de mejora del terreno y cimentación se comenzaron a ejecutar en el taller metálico los trabajos de corte, curvado y soldadura de los tubos de las fachadas estructurales, así como el ensamblaje de los diferentes módulos de la fachada, para su posterior transporte a la obra.

Una vez en obra se procedió a la unión de unos módulos con otros, mediante atornillado de las bridas descritas. Sin embargo, una vez comenzado tal ensamblaje el contratista prefirió adaptar sobre la marcha el sistema previsto por otro en el que los tubos de un módulo se unían mediante soldadura a su brida consiguiente en obra, estando ésta ya vinculada a su pareja. De esta manera se utilizaban al máximo las condiciones favorables locales y se mejoraba la rapidez y cualidad de la geometría con las tolerancias adecuadas, manteniéndose la facilidad de desmontaje y reensamblado futuro previsto (Figura 36).

A medida que la disposición de los módulos de fachada alcanzaban los niveles de los forjados, se iban ejecutando los emparrillados de los forjados y se conectaban con la fachada estructural, de manera que el sistema se iba cerrando por niveles y podía continuar el ensamblaje de los módulos superiores de fachada estructural en altura. Una vez realizada la conexión con la fachada se procedía al hormigonado de los forjados.

Las cubiertas de las salas de exposición, que no tienen soportes interiores, fueron ejecutadas mediante apeos provisionales que sustentaban las grandes celosías principales de las mismas. Estos apeos fueron retirados una vez que la totalidad de la estructura metálica de cubierta fue ejecutada y adecuadamente conec-



Figura 35. Celosía vertical en construcción
Figure 35. Vertical curved truss system under construction



Figura 36. Montaje de la Sala Expositiva 2
Figure 36. Exhibition Room 2 under construction

At the same time as the preloading of the soil and foundation works were taking place, at the steel workshop the curving and welding of the tubes was being carried out, assembling the different modules of the structure, which were later transported to the site.

Once on site, the modules were connected one to another through the bolted cleat connections. However, once the assembly works were started, the contractor changed along the process the planned procedure, welding on site the tubes against the bolted cleats, which came already joined to its corresponding cleat of the following module. This way, the local procedures were exploited and the speed and quality of the works improved, with adequate tolerances, and keeping the ease of the future disassembly and re-assembly of the structure (Figure 36).

Once each level of floors was reached by the assembly of the structural facades, the floor grillage was placed and connected to them, so that once the system was finished at one level the works could continue with the one on top, continuing with the assembly of the rising structural facade. Once all the connections to the structural facade were carried out, the concrete of the floors was casted.

The roofs of the exhibition rooms, with no inner columns, had to be carried out on temporary scaffolding bearing the roof trusses. These temporary props were removed once the

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026



Figura 37. Vista general del pabellón en construcción, tomada desde el Puente Lupu
Figure 37. General view of the pavilion under construction, taken from the Lupu Bridge

tada a la fachada estructural, garantizando un comportamiento conjunto, capaz de hacer frente a las acciones de peso propio y de construcción (Figura 37).

Desde el momento en que se comenzó la losa de cimentación hasta que se completó el edificio, transcurrieron únicamente 12 meses, un plazo realmente muy estricto, teniendo en cuenta la complejidad de la estructura [4].

7. CONCLUSIÓN

El Pabellón de España presenta varias singularidades, tanto en la manera de abordar el problema estructural de una forma libre, como en determinados detalles estructurales: la racionalización de una doble curvatura en elementos de curvatura sencilla, la asimilación de una curvatura variable por un número pequeño de curvaturas fijas, uniones excéntricas de tubos…

La búsqueda de la estructura que resuelva una forma libre requiere un planteamiento abierto a la hora de abordar su diseño, para tratar de encontrar la tipología estructural más conveniente que mejor se adapte a dicha forma, haciendo el máximo uso de la misma. Esta manera de abordar la estructura requiere un conocimiento profundo del comportamiento estructural inherente a la forma, un proceso que el empleo y desarrollo de herramientas informáticas flexibles facilita.

El Pabellón de España contiene una estructura innovadora, con diversas particularidades técnicas que requirieron un diseño que tuviese muy en cuenta su proceso constructivo, así como el desarrollo de nuevos procedimientos en taller para el curvado, corte y soldadura de los tubos que configuran su estructura.

La fecha inamovible de la inauguración de la Expo impuso un apretado calendario tanto en la fabricación en taller como en la construcción en obra, pero que no fue obstáculo para finalizar con éxito la construcción del pabellón.

whole roof structure was completed and adequately connected to the structural facade, as it required the work as a whole to be able to withstand its self weight and construction loads (Figure 37).

From the moment the foundation works started until the building structure was finished, just 12 months passed, a really strict time, taking into account the complexity of the structure [4].

7. CONCLUSION

The Spanish Pavilion presents several singularities, both in the way to approach the structural problem of a free form, as in certain structural details: the rationalization of a double curvature into elements of single curvature, the approximation of a variable curvature with a small number of single curvature stretches, off-axis connections…

The search of a structure that solves a free form requires an open-minded approach in order to establish the most suitable archetypal structural system which best merges into its geometry, making use of its own form. This approach is only possible through a deep understanding of the inherent structural behaviour a shape may give rise to, a process greatly aided through the use of flexible computer software.

The Spanish Pavilion is an innovative structure with a very challenging manufacture and construction, having required a design which inherently took into account its construction process, as well as devising at the workshop new original procedures in the curving, cutting and welding of the tubes which make up the structure of the pavilion.

The unavoidable deadline of the inauguration of the Expo pressed a tight schedule both in manufacture at the workshop and construction on site, which nevertheless resulted in an outstanding building carried out on time and with excellent quality.

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026

REFERENCIAS/*REFERENCES*

[1] Expo Shanghai 2010. [Disponible en: http://www.expo2010.cn/expo/expoenglish/oe/es/index.html]

[2] TAGLIABUE, B. Pabellón de España, Exposición Universal de Shanghái 2010. Valencia: Editorial Pencil, 2010. 208 p. ISBN: 978-84-938167-0-4.

[3] MARTÍNEZ CALZÓN, J.; CASTAÑÓN JIMÉNEZ, C. "Diseño de la estructura del Pabellón de España para la Expo 2010 en Shanghai". V Congreso de ACHE: Congreso Internacional de Estructuras, Barcelona, del 25 al 27 de octubre de 2011: comunicaciones. Madrid: Asociación Científica del Hormigón Estructural (ACHE), 2011. ISBN: 978-84-89670-73-0.

[4] KOSCHEL, I.; MARTÍNEZ CALZÓN, J.; CASTAÑÓN JIMÉNEZ, C. "Pabellón de España para Expo Shanghái 2010: Unión entre dos culturas". Cauce 2000, 2010, nº 151, p. 60 a 67.

[5] MARTÍNEZ CALZÓN, J.; CASTAÑÓN JIMÉNEZ, C. "Engineering free form: Spanish Pavilion for the Expo 2010 in Shanghai". Structures and Architecture. London: CRC Press/Balkema, 2010. ISBN: 978-0-415-49249-2.

[6] FANG, M. Y.; MARTÍNEZ CALZÓN, J.; CASTAÑÓN JIMÉNEZ, C. "Manufacture and construction of the Spanish Pavilion for the Expo 2010 in Shanghai". Proceedings of the 13th International Symposium on tubular structures. Hong Kong: CRC Press, 2010.

[7] MARTÍNEZ CALZÓN, J.; CASTAÑÓN JIMÉNEZ, C. "Fabricación y ejecución del Pabellón de España para la Expo 2010 en Shanghai". V Congreso de ACHE: Congreso Internacional de Estructuras, Barcelona, del 25 al 27 de octubre de 2011: comunicaciones. Madrid: Asociación Científica del Hormigón Estructural (ACHE), 2011. ISBN: 978-84-89670-73-0.

[8] MARTÍNEZ CALZÓN, J.; CASTAÑÓN JIMÉNEZ, C.; DING, J.M.; ZHAO, X. "Structural design of the Spanish Pavilion for the Expo 2010 in Shanghai". Proceedings of the 13th International Symposium on tubular structures. Hong Kong: CRC Press, 2010.

[9] MARTÍNEZ CALZÓN, J.; CASTAÑÓN JIMÉNEZ, C. "On weaving architecture: structuring the Spanish Pavilion, Expo 2010, Shanghai". AD Architectural Design. (Special Issue: The New Structuralism), 2010, vol. 80, nº 4, p. 52-59.

[10] EECKHOUT, M. Tubular Structures in Architecture. Geneva: CIDECT; TU: Delft, 2011. 224 p. ISBN: 978-94-90675-01-1.

[11] CASTAÑÓN, C.; LADRÓN DE GUEVARA, G.; SERRANO, A.; MARTÍNEZ-CALZÓN, J. "Arquitectura-estructura actual: prisioneros de las formas libres". Jornadas Internacionales de Investigación en Construcción: Hitos Estructurales de la Arquitectura y la Ingeniería, 17-18 de noviembre de 2011. Madrid: CSIC, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2011. Libro: ISBN 84-7292-401-7 CD: ISBN 84-7293-402-4

[12] CASTAÑÓN JIMÉNEZ, C.; MARTÍNEZ CALZÓN, J. "Behind the wicker lines: structuring the Spanish Pavilion". The Unbeatable. Contemporary Masterpieces: World Expo 2010 Shanghai. Singapore: Reveal Books, 2011. ISBN: 978-09-80612-35-6.

RELACIÓN DE PARTICIPANTES / *LIST OF PARTICIPANTS*

Propiedad / ***Owner:***
SEEI (Sociedad Estatal para Exposiciones Internacionales)

Proyecto de Arquitectura / ***Architecture Design:***
Miralles – Tagliabue EMBT

Proyecto de Estructura / ***Structural Engineering:***
MC2 Estudio de Ingeniería, S.L.

Dirección de Obra / ***Construction Management:***
Tongji Design / Tongji Supervision (entidades chinas)

Asistencia Técnica a la Dirección de Obra / ***Technical Assistance to Construction Management:***
MC2 Estudio de Ingeniería, S.L.

Empresa Constructora / ***General Contractor:***
INYPSA (Subcontratista chino: CCEED)

Taller metálico / ***Steel Workshop:***
Anhui FuHuang Steel Structure Group

Documento descargado de www.e-ache.com el 23/11/2026