

## El Pabellón, Palacio del Regente

The Pavilion (El pabellón) marca la nueva entrada oeste hacia el Palacio del Regente (Regent's Place), un desarrollo de 13 acres en el centro de Londres que tiene algunos espacios públicos, otros para menudeo y algunos más para arrendamiento. Es una estructura hecha completamente en acero inoxidable en la que un campo de columnas verticales soporta la cubierta del techo de 8 m sobre el nivel de la calle. El pabellón es de 20 m por 5 m en plano con 258 secciones huecas rectangulares y muy delgadas que soportan un techo plano, reflejando la luz del sol durante el día y, en la noche, proyectando la luz proveniente de las lámparas integradas en el pavimento. La estructura fue abierta al público en el 2009 y ganó el premio Royal Institute of British Architects (RIBA) en el 2010 por su excelencia arquitectónica.

### Selección del Material

Se especificó una vida útil de 50 años para esta estructura. Inicialmente fue considerado el acero al carbono con un acabado pintado o galvanizado, pero se prefirió el acero inoxidable debido a que proporciona una durabilidad superior además de una atractiva apariencia.

El acero inoxidable dúplex grado 1.4362 (S32304) fue elegido, desde el inicio, para toda la estructura. Éste es un grado que combina elevada resistencia mecánica (aproximadamente 450 N/mm<sup>2</sup>) con excelente resistencia a la corrosión. Sin embargo, la combinación de secciones de dimensiones pequeñas y de pared relativamente gruesa, hacen que este grado no pudiera ser abastecido en las medidas de sección requeridas. Después fueron considerados los grados austeníticos y, finalmente, se eligió el grado 1.4404 (S31603). Este grado tiene resistencia a la corrosión similar a la del 1.4362 en exposición atmosférica, pero tiene una menor resistencia mecánica (aproximadamente 220 N/mm<sup>2</sup>). Esta resistencia menor lleva a un incremento de 15% en el peso general de la estructura.

Con el fin de especificar el acabado superficial requerido para las columnas y el techo, se llevaron a cabo pruebas de iluminación en una maqueta 1:1 y el acabado seleccionado fue un pulido de grano 320. El acabado fue aplicado en la fábrica lo cual significó que no se requirieron operaciones de acabados por terceros especialistas y, por lo tanto, se ahorraron costos.

### Diseño

El pabellón está completamente fabricado con acero inoxidable y comprende 258 columnas que están unidas por un techo rígido plano de 3 mm de espesor. Las columnas son de 7.8 m de largo, pero solamente de 50 mm<sup>2</sup> con un espesor de pared de 4 mm. La integridad estructural de las columnas es regida por el desempeño global de pandeo que tiene el pabellón. Las columnas han sido distribuidas de forma que éstas se protegen unas a otras de los vientos predominantes. Esto reduce la carga total del viento y permite a las columnas cargadas proporcionar, más ligeramente, la mayor resistencia total global al pandeo.

La inusual estrechez y altura de la columna fue posible solamente por un enfoque de diseño desarrollado a partir de los primeros principios que involucraron establecer criterios, específicos del proyecto, de carga, deflexión y aceleración.



Figura 1: El Pabellón del palacio del Regente, iluminado

## Análisis Estructural

El arrastre y la presión directa del viento impuestos sobre las columnas se transfieren al techo plano y se distribuyen a todos los elementos que actúan juntos como un marco contra-balanceo. La estructura es sensible al balanceo (factor bajo de carga crítica) y, por lo tanto, estuvo sujeta al análisis  $P-\Delta$  no lineal. Después, las fuerzas de este análisis fueron combinadas con las asociadas a los modos primarios de pandeo de tal forma que las capacidades de la sección no fueran excedidas.

A diferencia del acero al carbono, el acero inoxidable muestra características de esfuerzo-deformación no lineal sin límite de fluencia claramente definido. Esta reducción en la rigidez conforme el esfuerzo se aproxima a la resistencia de diseño (0.2% de resistencia de prueba) es conocida por ampliar las fuerzas asociadas con la no linealidad geométrica y fue considerada explícitamente en el diseño.

Las pruebas físicas descritas abajo mostraron que el nivel de amortiguamiento intrínseco fue muy bajo (cerca de 0.2% del crítico). Los amortiguadores fueron desarrollados para controlar la respuesta dinámica de la estructura de forma que su vida de fatiga (calculada según el estándar BS 7608 [1]) excede 50 años de vida útil.

Un académico independiente revisó los cálculos producidos por el diseñador y evaluó el desempeño estructural probable respecto a las recomendaciones de diseño de la norma EN 1993-1-4 [2].

## Amortiguamiento y Respuesta a la Fuerza del Viento

Desde la etapa inicial, la inestabilidad aeroelástica de las columnas individuales fue una preocupación importante y se realizaron pruebas de túnel de viento para investigar la respuesta de las columnas. Estas pruebas estudiaron la excitación de las oscilaciones de flexión transversales, la emisión de turbulencia y la emisión de turbulencia por interacción. Se encontró que –en la ausencia de amortiguamiento adicional– las columnas podrían comenzar a oscilar y resonar a la velocidad del viento de 8 m/s. (Éste es un efecto aeroelástico similar al que causó la falla del puente Tacoma Narrows en 1940). Debido a que ésta es una velocidad probable del viento para la ubicación, se llevaron a cabo más pruebas con el fin de determinar la cantidad de amortiguamiento adicional necesario para limitar la respuesta resonante a las velocidades del viento que exceden a las que probablemente ocurran ahí. Se descubrió que introducir 2% de amortiguamiento adicional podría incrementar la velocidad crítica del viento a 80 m/s.

Se propusieron los amortiguadores de impacto que podrían tomar la forma de varillas de acero al carbono revestidas de plástico y colgarlos dentro de cada columna. Conforme las columnas comienzan a vibrar, la barra choca contra la cara interna de la columna y al hacerlo absorbe la energía suficiente para controlar la respuesta de la columna.

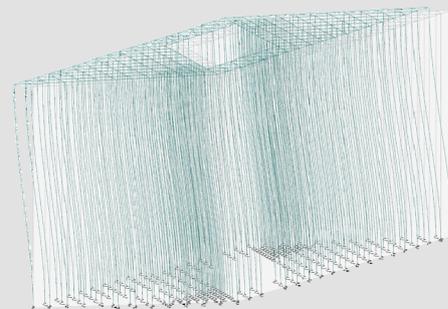


Figura 2: Análisis modal del pandeo



Figura 3: Maqueta del conector del techo



Figura 4: Vista de la parte inferior del techo



Figura 5: Modelo escala 1:1 de una parte del pabellón en el Building Research Establishment



Figura 6: Separador de los pernos antes del vertido del concreto

## Pruebas

Se construyó una maqueta parcial 1:1 en la instalación de pruebas del Building Research Establishment en Watford, Reino Unido, principalmente para probar la respuesta dinámica de la estructura, tanto con la inclusión de los amortiguadores de impacto como sin éstos. Pruebas estáticas también fueron llevadas a cabo en la maqueta para posibilitar que los modelos de elementos finitos fueran calibrados. La prueba dinámica consistió de un sacudidor que se unió a la columna a media altura. A partir de esas pruebas, se estimó que el amortiguamiento intrínseco para la estructura soldada fue tan bajo como 0.2% lo cual es significativamente menor que lo especificado en el estándar BS 6399-2 [3] para estructuras soldadas de acero (generalmente se adopta un valor de 0.4%). Las pruebas también hicieron posible demostrar la capacidad de la estructura para resistir escenarios en donde existan cargas por vandalismo, la metodología de construcción propuesta para ser probada, los acabados y la iluminación a ser determinados.

## Fabricación

Se utilizaron 1500 pernos de anclaje de acero inoxidable para colocar las columnas a tolerancias muy reducidas ( $\pm 1.5$  mm). Esto se logró por el uso de un “separador de pernos” (una red de ángulos y soleras de acero al carbono) colado en la losa, el cual actuó como refuerzo y sujetó los pernos en su posición conforme el concreto era vertido (Figura 6).

El acero inoxidable es altamente susceptible a la distorsión por soldadura. Para evitar los problemas surgidos de los elementos que estaban fuera de tolerancia, la superestructura completa fue fabricada para coincidir con las secciones enderezadas después de cada procedimiento de soldadura. Para hacer que los elementos fueran más manejables, el armazón del techo fue fabricado primero con pernos (para añadir la sección de la columna y del amortiguador) antes de entregarla en el sitio.

Los amortiguadores de impacto en las columnas controlan las resonancias inducidas por el viento a amplitudes de aproximadamente 4 mm; las columnas también mostraron algún movimiento inducido por el viento por debajo de esta amplitud. Por lo tanto, habrá algo de carga cíclica y daño potencial por fatiga de las soldaduras en los detalles de la base y la punta. Por consiguiente, se llevaron a cabo pruebas extra para confirmar que las soldaduras fueran de la clase asumida en los cálculos de fatiga. Se adoptaron tanto los procedimientos de prueba de líquidos penetrantes como los ultrasónicos con el fin de asegurar que la calidad de la soldadura se mantuviera desde el inicio y hasta el final.

## Ensamble

El pabellón ocupa un sitio muy limitado y requirió un programa cuidadosamente planeado con una secuencia de ensamble muy específica y el uso de grúa. Se desarrolló, junto con el fabricante, un documento sobre el método de ensamble del pabellón y se hicieron visualizaciones en tercera dimensión para ilustrar el procedimiento de ensamble al equipo de diseño y el cliente.

Se aplicó un recubrimiento protector de plástico adhesivo por todo lo largo de las columnas para protegerlas durante su transporte y montaje [4]. Después de la finalización de la construcción, se hicieron evidentes varios rayones en las columnas en el nivel alto. Se adaptó una pulidora para que pudiera subir y bajar automáticamente en lo alto de las columnas y eliminar cualquier defecto visible. Esta máquina fabricada con ese propósito fue apodada la “rata de drenaje” y aseguró que se lograra la belleza total de las elegantes columnas, increíblemente delgadas.

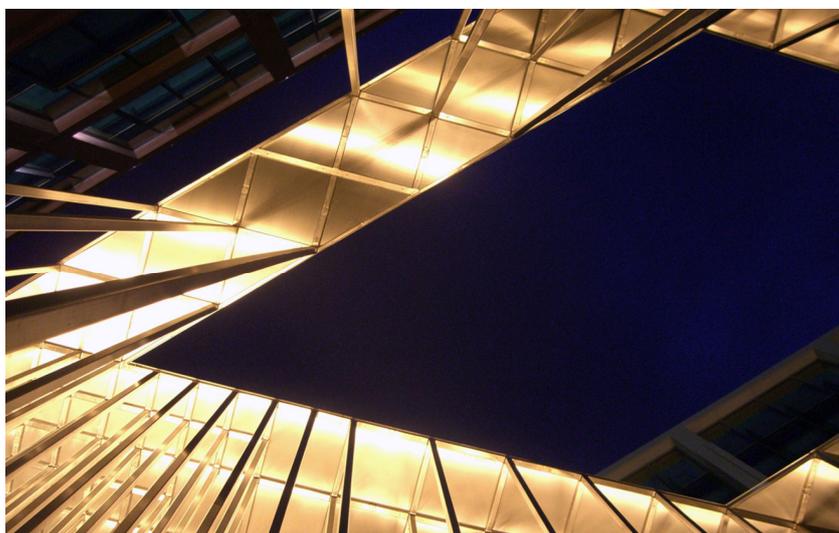


Figura 7: Vista de la parte inferior del techo iluminada



Figura 8: Pabellón en construcción



Figura 9: Pulidora en sitio (“rata de drenaje”)

La información para este caso de estudio fue amablemente proporcionada por Arup.

## Referencias y Bibliografía

- [1] BS 7608:1993 Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures
- [2] EN 1993-1-4: 2006 Eurocode 3. Design of steel structures. General rules. Supplementary rules for stainless steels
- [3] BS 6399-2:1997 Loading for buildings. Code of practice for wind loads
- [4] Erection and installation of stainless steel components, Euro Inox, 2006

Centro de Información en línea para el acero inoxidable en la construcción: [www.stainlessconstruction.com](http://www.stainlessconstruction.com)

## Obtención de Detalles

<b>Ciente:</b>	British Land
<b>Director del proyecto:</b>	M3C Consulting
<b>Arquitecto:</b>	Carmody Groarke
<b>Ingeniería estructural:</b>	Arup
<b>Contratista principal:</b>	Bovis
<b>Contratista de los productos de acero:</b>	Sheetfabs

Esta serie de Casos de Estudio de Acero Inoxidable Estructural es auspiciada por Team Stainless.

Translated by:

