

# Las Exposiciones Universales. *Cinco enfoques estructurales*

## World Expos. *Five structural approaches*

### Resumen

**C**uando Frei Otto afirmó, con motivo de la Expo de Sevilla 1992, que una Exposición Universal es una oportunidad para hacer experimentos y mostrar caminos para el futuro, habían transcurrido casi 150 años desde la celebración de la primera Exposición Universal en Londres. Durante este largo período las Expos adoptaron un papel fundamental como lugar de ensayo de nuevos materiales y tipologías estructurales, constituyendo verdaderas fuentes de innovación que, vertiendo sus experiencias en edificaciones gestadas al margen de las mismas, se fueron erigiendo como componente intrínseco de la historia de los sistemas estructurales arquitectónicos. El presente artículo aporta una visión sintética de algunas de las principales aportaciones estructurales de las Exposiciones Universales, condensando la amplitud que supone el análisis de un período tan largo y fructífero de desarrollo estructural en cinco categorías básicas: prueba y error, fantasía y utopía, gérmenes tipológicos, el conjunto tipológico, generación normativa y producción científica.

**Palabras clave:** arquitectura, estructura, Exposiciones Universales, pabellones de exposición, tipos estructurales

#### **Abstract:**

When, on the occasion of Expo Seville 1992, Frei Otto declared that a World Expo is an opportunity to experiment and show the ways to the future, almost 150 years had gone by since the first World Fair held in London. Over the course of this long period, the World Expos took on a leading role as testing grounds for new structural materials and typologies; moreover, thanks to the fact that the experiences garnered in the World Expos were then applied to buildings that were created beyond them, they have become veritable sources of innovation that have risen to the forefront as an intrinsic component in the history of architectural structural systems. This paper offers a synthetic vision of some of the structural contributions of the World Expos, distilling the scope of an analysis of such a large and fruitful period of structural development into five basic categories: trial and error, fantasy and utopia, typological seeds, the typological set, generation of codes and scientific production.

**Keywords:** architecture, exhibition pavilions, structural types, structure, World Expos

*Autores:*  
**Isaac López- César**  
isaac.lopez@udc.es  
**Javier Estévez- Cimadevila**  
javier@udc.es

Universidad de A Coruña

España

Recibido: 28 Nov 2017  
Aceptado: 21 May 2018

## 1. Introducción

Desde la primera Exposición Universal celebrada en Londres en 1851 hasta la actualidad, las Expos han vivido períodos en los que han sido auténticos exponentes de la vanguardia del desarrollo tecnológico estructural.

Este papel de las Exposiciones ha venido suscitado por diversos motivos:

- En primer lugar, el intervalo cronológico en el que se han desarrollado constituye un período de enorme fecundidad estructural, jalonado de acontecimientos históricos fundamentales como el desarrollo de la arquitectura del hierro, la invención de las mallas espaciales, la aparición de la madera laminada encolada, el nacimiento de las redes de cables y de las membranas textiles o el desarrollo de las estructuras neumáticas.
- La competencia de las naciones por mostrar su poder tecnológico originaría una escalada en la que en cada exposición se pretendía superar los logros estructurales conseguidos en la anterior, lo que implicó notables avances en las luces alcanzadas, así como la experimentación con nuevos materiales y tipologías.
- Otros aspectos propiciaron una mayor libertad creativa desde el punto de vista estructural y proyectual. Así, el factor de temporalidad ligado a estos acontecimientos permitió obviar determinadas cuestiones como la durabilidad; la concepción únicamente representativa o simbólica de numerosos edificios, carentes de un programa especialmente rígido, y el hecho de que muchos de ellos se construyeran mediante concurso proyectual permitieron la materialización de investigaciones previas, la aplicación pionera de patentes o incluso la ejecución de ideas para las que no se contaba con el desarrollo o la experiencia tecnológica previa completa.
- Por otra parte, el carácter universal de estos acontecimientos propició, en general, una enorme difusión de las novedades estructurales, sustanciada tanto en la visita de millones de personas como en la publicación en revistas

especializadas de las realizaciones y de las propuestas presentadas a concurso.

Las Exposiciones Universales, como acontecimientos enriquecedores de la cultura colectiva, han sido estudiadas desde el punto de vista histórico general (Allwood, 1977; Findling, 1990). También han sido abordadas sus aportaciones arquitectónicas (Friebe, 1985; Elwall, 1992; Mattie, 1998; Garn et al., 2007; Schriefers, 2015). Además, han sido objeto de estudio por los autores de este artículo desde un punto de vista estructural (López-César, 2012; López-César, 2017).

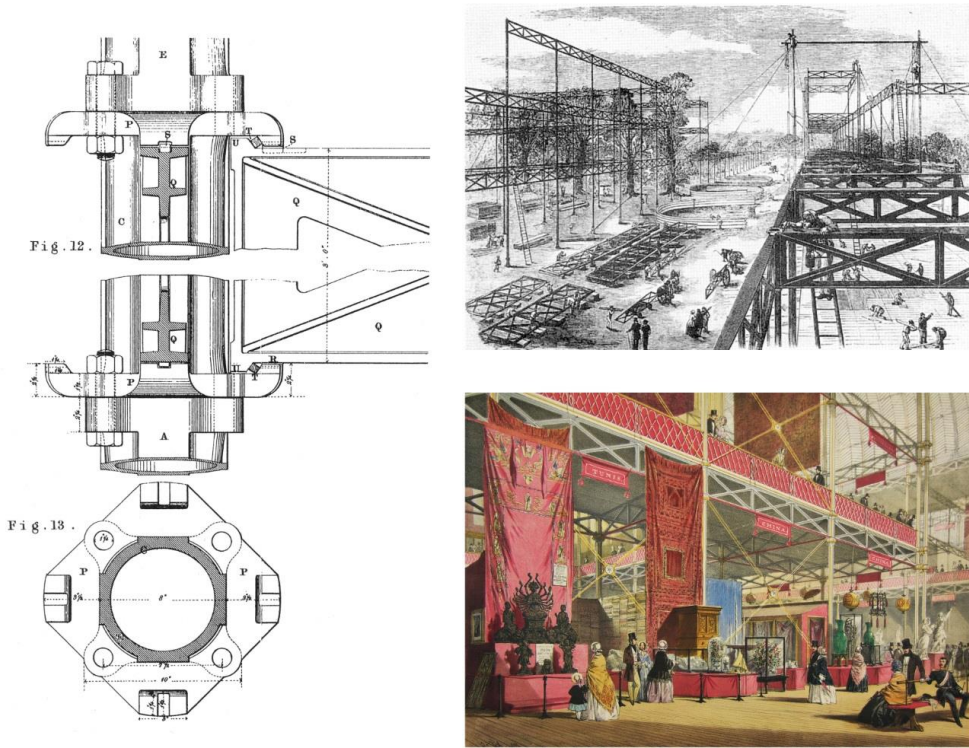
El presente artículo pretende aportar una visión sintética de algunas de las principales aportaciones estructurales de las Exposiciones Universales, condensando la amplitud que supone el análisis de un período tan largo y fructífero de desarrollo estructural en cinco categorías o conceptos fundamentales:

- Prueba y error.
- Fantasía y utopía.
- Gérmenes tipológicos
- El conjunto tipológico.
- Generación normativa y producción científica.

## 2. Prueba y error

Se refiere este concepto al papel de las Exposiciones Universales como lugar de experimentación técnica en el que se ensayaron nuevas tipologías estructurales y se fueron poniendo de manifiesto sus patologías asociadas. Este aspecto se evidencia especialmente en las Exposiciones del S.XIX, marcadas fundamentalmente por la consecución de grandes espacios diáfanos mediante el uso de nuevas tipologías estructurales metálicas. La materialización de estas primeras estructuras de hierro de dimensiones excepcionales mostraría dos de los problemas fundamentales inherentes a las mismas: la consecución de una adecuada estabilidad horizontal y la problemática de los movimientos térmicos derivados del uso a gran escala de un material con alto coeficiente de dilatación lineal.

El primer edificio que ejemplifica esta cuestión es el Crystal Palace de la Exposición Universal de Londres 1851 (Figura 1). Este edificio constituye una auténtica síntesis arquitectónica de la Revolución Industrial por cuanto realiza la estandarización de componentes propia del nuevo sistema productivo mecanizado a una escala sin precedentes, inaugurando el gigantismo arquitectónico



**Figura 1:** Crystal Palace. Paxton. Exposición Universal de Londres 1851. Izda: detalle del nudo tipo vigas-pilar. Drcha. arriba: operario acuñando un nudo. Drcha. Abajo: diagonales adicionales de arriostamiento.  
**Fuentes:** Mallet, 1862; Mattie, 1998; Dickinson, 1852.

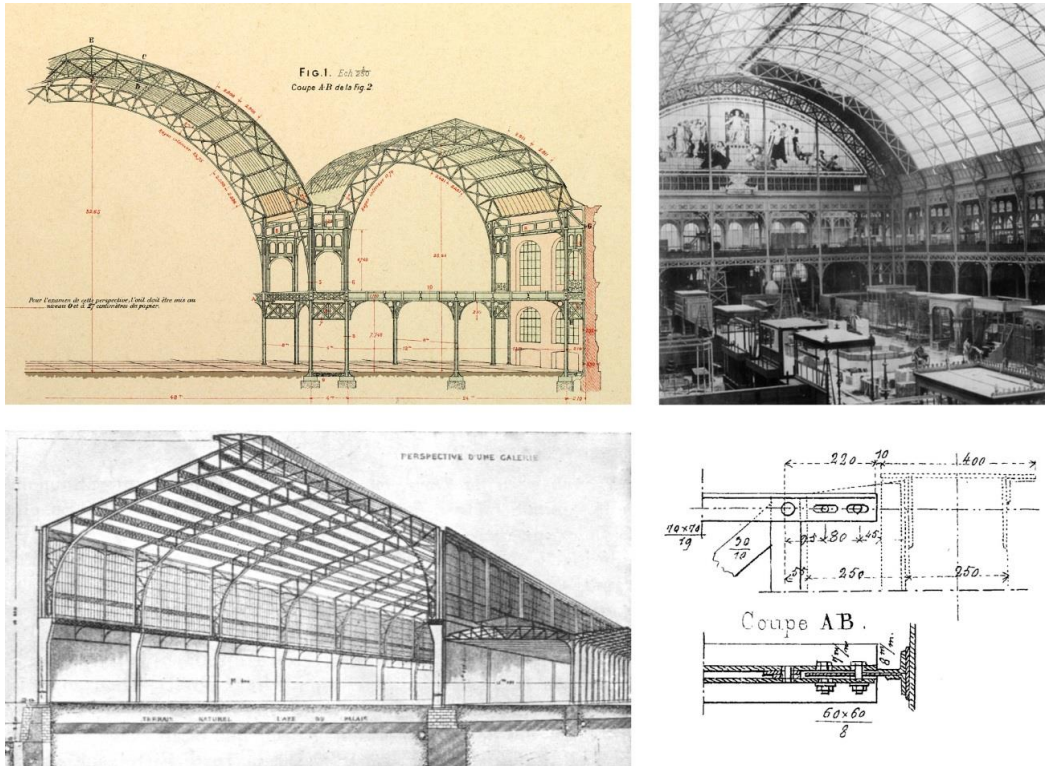
propio de las Exposiciones Universales del S.XIX. En este sentido, es conocido el problema de dilatación térmica que presentó este edificio de 563 metros de longitud y que dio lugar a grandes desplomes en los pilares (López-César, 2014). También Robert Mallet, en un artículo de 1862 documenta el problema de inestabilidad horizontal que sufrió debido a la baja rigidez de los nudos de conexión entre vigas y pilares, y que, tras haber sido reconstruido en Sidenham en 1854, provocó su colapso (Mallet, 1862).

Joseph Paxton diseña un nudo tipo en el que las vigas se conectan al pilar mediante cuatro engarces inferiores y cuatro superiores. Posteriormente la viga se fijaba contra los engarces mediante cuñas de madera (representadas en la Figura 1 con las letras S y T). Teóricamente este sistema resolvería la desmontabilidad del edificio, permitiría los movimientos térmicos de las vigas mediante la deformación de las cuñas y proporcionaría al nudo la rigidez necesaria propia de un sistema porticado. En la realidad, las cuñas de madera no se deformaron lo suficiente, provocando grandes desplomes en los pilares extremos del edificio (Mallet, 1862). El nudo tampoco resultó eficaz en cuanto a su rigidez, por lo que finalmente fue necesario disponer diagonales de arriostamiento en planos verticales (Wyatt, 1851).

En la Exposición Universal de París de 1855, Alexis Barrault y G. Bridel construyeron el Palais de L'Industrie, constituido por una sección transversal formada por tres

arcos de hierro en celosía, alcanzando el central una destacada luz de 48 metros (Figura 2). El edificio no alcanza el récord de luz en edificación establecido por la New Street Station de Birmingham (64,62 m) rematada unos meses antes (López-César y Estévez-Cimadevila, 2015). No obstante, destaca su diseño estructural en tres naves abovedadas, novedoso en la época para una estructura metálica. La longitud del edificio era de 250 metros. En este sentido, el propio Barrault, en el libro que escribió tras la finalización del edificio, documenta deficiencias en las bóvedas constituidas por miembros metálicos y cerramiento de vidrio, afirmando: "Los movimientos térmicos en las bóvedas provocaron incluso la rotura de vidrios y la abertura de juntas entre hierro y vidrio provocando goteras" (Barrault y Bridel, 1857, p.39).

Más allá del enorme logro de haber obtenido un espacio diáfano de semejante envergadura con un novedoso diseño estructural en hierro, una importante aportación del autor a la historia de los sistemas estructurales son las reflexiones que realiza tras la construcción del edificio y la observación de las citadas deficiencias. Indica Barrault que para la realización de una luz transversal de 50 metros, cada 100 metros de longitud del edificio, las viguetas deberían unirse a los arcos de forma que en estas uniones el movimiento de origen térmico no quede impedido (Barrault y Bridel, 1857).



**Figura 2:** Arriba: Palais de L'Industrie. Barrault, Bridel. Exposición Universal de París 1855, perspectiva seccionada y fotografía interior. Abajo: Galería de las Máquinas de la Exposición Universal de París 1878. De Dion. Perspectiva seccionada y detalle de unión de las viguetas de celosía con los pórticos de celosía. Obsérvese la disposición de orificios ovales en las viguetas para permitir los movimientos térmicos de las mismas

**Fuentes:** Vierendeel, 1902; <http://endforstart.blogspot.com.es/2011/08/universelle-de-1855.html>; Giedion, 1982; Exposition Universelle 1878, 1878.

Observamos, por tanto, que introduce el concepto de junta de dilatación. Aunque Barrault la fija a una generosa distancia de 100 metros para cubiertas de vidrio, lo relevante es, sin duda, la aparición de la idea y su plasmación en un texto técnico.

El siguiente gran edificio que ejemplifica este concepto de prueba y error es la Galería de las Máquinas de la Exposición Universal de París 1878, de Henri de Dion (Figura 2). Resuelta mediante pórticos en celosía de 35,84 m de luz, contaba con 645 m de longitud.

De Dion llevaba años dedicado al análisis de tipologías de pórticos metálicos para grandes luces. Este edificio le daría la posibilidad de aplicar uno de sus diseños y demostrar su eficacia. Durante la construcción se realizaron pruebas de carga en algunos pórticos, cargándolos con 200 KN en la zona de cumbrera, sin detectar problemas resistentes y registrándose una flecha del orden de 20 mm. La principal aportación estructural consiste en que de Dion adopta el sistema de libre dilatación de viguetas propuesto anteriormente por Barrault, disponiendo orificios ovales cada 60 metros en las uniones entre viguetas y pórticos (Figura 2). No obstante, parece que el detalle no habría funcionado correctamente debido al rozamiento. Así, Arthur

Vierendeel afirmaba en 1902: “Los movimientos térmicos se habían transmitido de tramo en tramo, a causa del rozamiento, acusándose desplomes significativos en los extremos del edificio que mismo llegaron a dislocar los cerramientos de fábrica de los extremos” (Vierendeel, 1902, p.155).

Verdaderamente, podemos afirmar que el primer edificio que resuelve satisfactoriamente tanto el problema de estabilización horizontal como el de los movimientos térmicos en las grandes estructuras metálicas de edificación es la Galería de las Máquinas de 1889, realizada por el arquitecto Ferdinand Dutert y el arquitecto Victor Contamin (Figura 3). Constituida por arcos de hierro forjado triarticulados, alcanzó los 110,60 m de luz medidos entre ejes de rótulas de arranque.

Estableció un nuevo hito arquitectónico en cuanto a la creación de un enorme espacio diáfano, superando ampliamente a la Estación londinense de St. Pancras — que, con 73 m, constituía el record de luz anterior— y propició que las luces de los edificios resueltos con arcos triarticulados prácticamente se duplicaran, pasando del orden de los 50 m, antes de la construcción de la Galería de las Máquinas, al entorno de los 100 m tras su construcción (López-César y Estévez-Cimadevila, 2015).



**Figura 3:** Galería de las Máquinas. Exposición Universal de París 1889

**Fuente:** Dunlop, 1999.

En este edificio, cada tres tramos se implementó el recurso de las viguetas unidas con agujeros ovales (Henard, 1891). No hay constancia en la documentación consultada de la existencia de patologías en este edificio, por lo que deducimos que su estructura habría funcionado correctamente.

Pero esta vertiente de prueba y error no se ciñe únicamente al S.XIX. Valgan como ejemplo el Seattle Center Coliseum de la Exposición de Seattle 1962, obra de Paul Thiry y Peter H. Hostmark, compuesto por un paraboloide hiperbólico de planta rectangular con 110 metros de lado formado por una red de cables pretensada (Figura 11). La progresiva pérdida de tensión de los cables hizo que la cubierta mostrara un flameo con movimientos verticales del orden de los 60 cm. Dennis Forsyth, director del proyecto de reforma alude a la gran magnitud de los movimientos verticales de la red de cables, que finalmente fue sustituida por una estructura convencional de vigas y viguetas:

La cubierta se movía más de dos pies (60,96 cm) arriba y abajo a causa del viento, por eso las goteras estaban garantizadas. La amplitud del movimiento vertical de la cubierta a causa del viento había provocado a lo largo del tiempo fallos en la estanqueidad entre paneles. Además numerosas fijaciones de paneles habían fallado. (Arens trades in cables for trusses, 1996, pp.42-47)

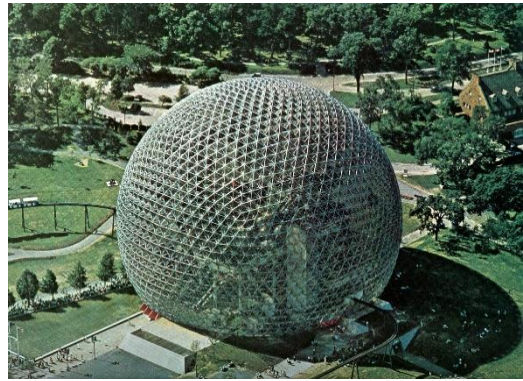
El Pabellón Alemán de la Exposición Universal de Montreal de 1967, realizado por Frei Otto, colapsó parcialmente debido a una nevada ocurrida en el invierno de 1976, solamente nueve años después de su construcción, tras lo cual fue desmantelado (Figura 10). Análogamente a lo sucedido con las grandes estructuras de hierro del S.XIX, esta experiencia fue considerada en edificios posteriores como, por ejemplo, en la cubierta textil del Denver International Airport, realizado en 1994 por Horst Berger. Este edificio está ubicado en una zona especialmente desfavorable para estas tipologías, caracterizada por importantes nevadas, fuertes granizadas y vientos de gran magnitud. Para su diseño se realizaron exhaustivos ensayos de sobrecarga de nieve sobre modelos reducidos (Berger, 1996).

### 3. Fantasía y utopía

Las Exposiciones Universales han sido en determinadas épocas catalizadoras y escenario de materialización de planteamientos utópicos y de fantasía estructural.

El desarrollo y enorme difusión de las mallas espaciales a partir de la década de 1940, como tipología capaz de alcanzar grandes luces, generó un gran optimismo que tendría también su correlato en la plasmación de planteamientos utópicos de generación urbana basados en megaestructuras espaciales.

Con respecto a lo anterior, debemos referirnos al Pabellón de los Estados Unidos de la Exposición Universal de Montreal 1967 (Figura 4). Esta cúpula vendría precedida de todos los proyectos, investigaciones y realizaciones de Richard Buckminster Fuller en cuanto a estructuras geodésicas.



**Figura 4:** Pabellón USA en la Exposición Universal de Montreal 1967. Fuller

**Fuente:** Nelson, 1968.

Pero, en el ámbito de la utopía, el antecedente fundamental es la propuesta planteada por Fuller en 1960 para cubrir con una cúpula geodésica parte de la Ciudad de Nueva York con la intención de establecer un control medioambiental o atmósfera artificial (Figura 5). Escribía Fuller:

Hemos calculado una cúpula de dos millas de diámetro para cubrir parte de Manhattan. Desde el interior habrá contacto ininterrumpido con el mundo exterior [...] pero los efectos no deseados del clima, calor, contaminación, microorganismos, deslumbramiento, etc. serán modulados por la piel. (Fuller, 1999, p.434)

En esta línea, observamos como la cúpula de Fuller construida siete años después en Montreal, con sus sistemas de control climático, es heredera directa de su visión anterior en cuanto a la construcción de atmósferas controladas. Aspectos como la visión ininterrumpida del mundo exterior, la independencia estructural de los elementos expositivos y de movilidad interiores frente a la piel estructural de cerramiento, el control de la irradiación solar por medio de diafragmas de aluminio

accionados informáticamente en función de la posición del sol, conectan en gran medida con la propuesta utópica de la Cúpula sobre Manhattan. El pabellón se convirtió, por tanto, en un elemento icónico, representativo no solamente de las posibilidades estructurales de la cúpula geodésica, sino también de las megaestructuras urbanas basadas en el control atmosférico. El apogeo de la carrera espacial, también habría tenido una influencia relevante en el interés de Fuller por establecer estas propuestas de atmósferas controladas que, al fin y al cabo, evocan la utopía del asentamiento humano en otros mundos.

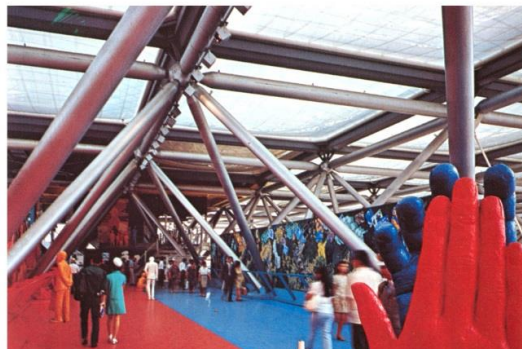
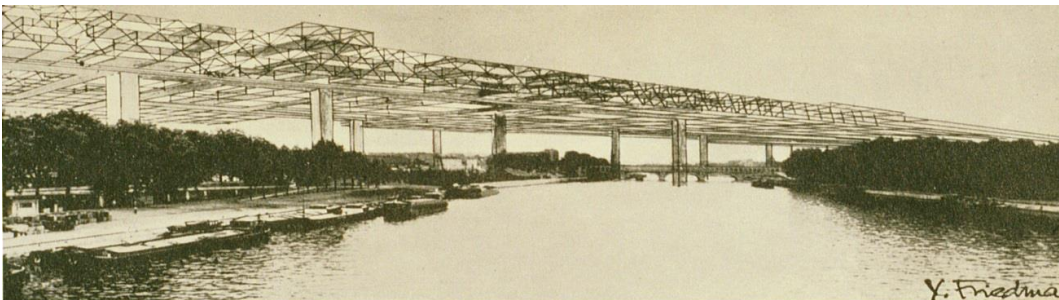


**Figura 5:** Imagen del proyecto de Cúpula sobre Manhattan. 1960. Fuller.  
**Fuente:** Fuller, 1999.

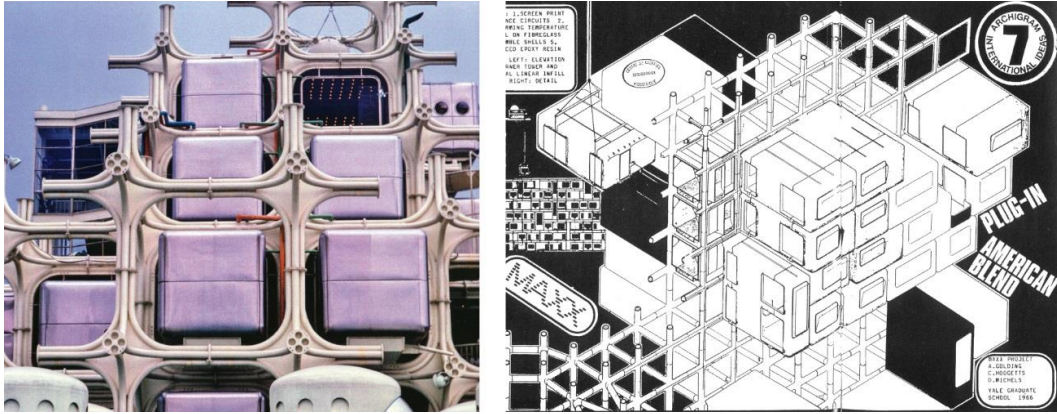
La idea del uso de la malla espacial para la resolución de propuestas urbanas ha tenido un representante fundamental en el arquitecto húngaro Yona Friedman. En 1960 Friedman propondría su "Ciudad Espacial", basada en una megaestructura espacial habitable que se podría ubicar sobre ríos, lagos o ciudades existentes (Figura 6). Estas propuestas tendrían una enorme influencia en el Grupo Metabolismo Japonés, fundado en 1960, y en el Grupo Archigram.

La Exposición Universal de Osaka 1970 constituirá un escenario de materialización de propuestas aproximativas a los planteamientos anteriores. Destaca la Festival Plaza, realizada por Kenzo Tange y Yoshikatsu Tsuboi (Figura 6). Megaestructura espacial caracterizada, por una parte, por alcanzar una escala sin precedentes que pretendía aproximarse a la urbana, no en vano el edificio llevaba el apelativo de Plaza; y por otra, por ser una malla que podía recorrerse en algunas zonas entre sus dos capas y, en definitiva, ser habitada.

El Takara Beutilion, obra de Kisho Kurokawa, consistía en una estructura espacial realizada a base de poliedros hexaédricos, que permitía un sistema de agregación en cápsulas habitacionales (Figura 7). Observamos cómo este edificio conecta con otras propuestas utópicas anteriores como la Archigram Network, propuesta por Peter Cook en 1966 (Figura 7). En dicha propuesta, el tejido urbano se iba configurando a base de megaestructuras espaciales a las que se agregaban cápsulas habitacionales prefabricadas. En este sentido, tal y como afirma Emilio Martín Gutiérrez:



**Figura 6:** Arriba: París Espacial. Yona Friedman. 1960. Superposición de una malla espacial sobre París. Abajo: Festival Plaza. Exposición Universal de Osaka 1970. Tange, Tsuboi. Obsérvese la zona habitable interior a la malla espacial.  
**Fuentes:** <http://theredlist.com>; Tange, Koichi, y Kawazae, 1970; *Japan World Exposition Osaka 1970: Official Report*, 1972.



**Figura 7:** Izquierda: Takara Beautillon. Kisho Kurokawa. Exposición Universal de Osaka 1970. Derecha: Archigram Network. Peter Cook. 1966

**Fuentes:** Garn, 2007; Emili, 2007.

Las propuestas metabólicas hunden sus raíces en la realidad cultural y sociológica japonesa de la época: una gran explosión demográfica; el espacio limitado en las ciudades de las islas; una población con alta movilidad geográfica, en la que entorno a un 10% cambiaba de ciudad cada año; así como la modulación característica de la arquitectura tradicional japonesa. Estos extremos dieron lugar a unas propuestas urbanas que reflejan esta realidad en continua mutación, en una analogía biológica de células cambiantes. (Martín-Gutiérrez, 1990, pp.15-21)

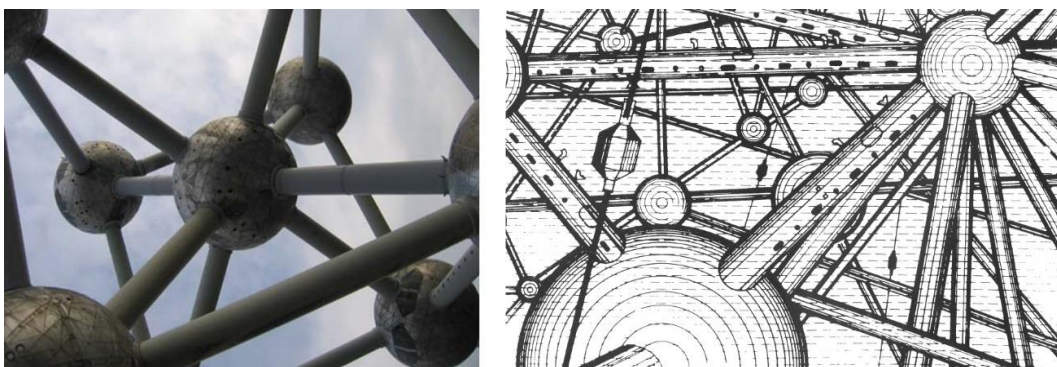
El Atomium, obra de André Waterkeyn, en la Exposición Universal de Bruselas 1958 constituye otra megaestructura espacial, con la singularidad de que las propias barras y nudos son los elementos habitables (Figura 8). A pesar de que resulta difícil documentar secuelas construidas de este singular edificio, sí que es posible relacionarlo con propuestas utópicas a escala urbana, como la propuesta hecha en 1964 por Warren Chalk —miembro del grupo Archigram— denominada *Underwater City* (Figura 8).

Quizás el ejemplo que mejor representa el concepto de malla espacial aplicada de un modo integral son los pabellones *Man the Explorer* y *Man the Producer*,

construidos en la Exposición Universal de Montreal 1967 (Figura 9). Los forjados, cerramientos y algunas superficies inclinadas interiores estaban constituidas por 400.000 barras y 100.000 nudos.

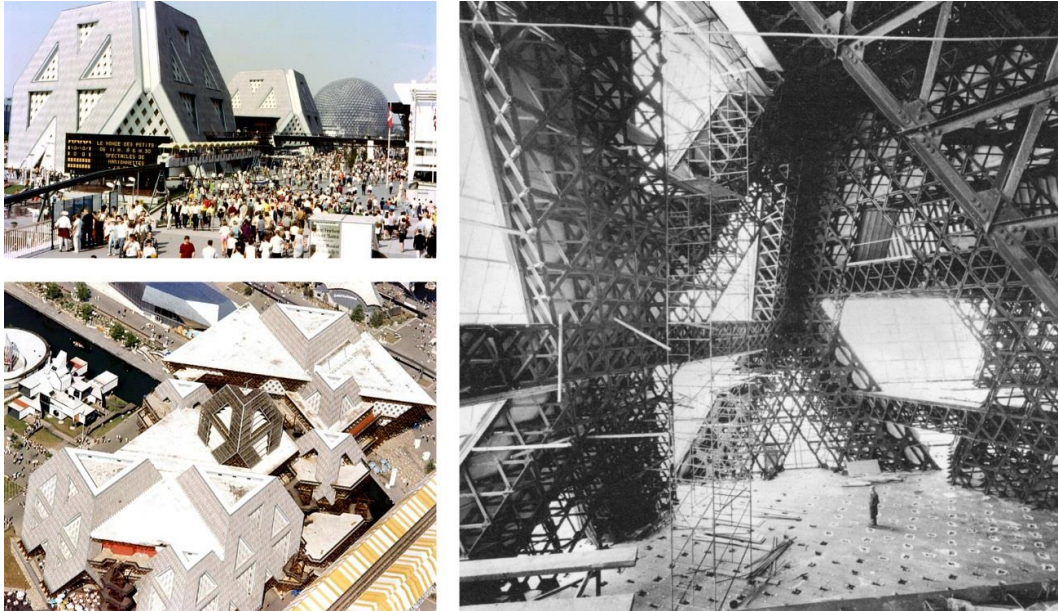
A pesar de la enorme complejidad resultante, uno de los valores de estas arquitecturas estriba en que constituyen manifestaciones tempranas de las posibilidades de las mallas espaciales para su uso integral en la resolución de propuestas arquitectónicas. En este sentido, resultan significativas las afirmaciones de Jeffrey Lindsay, consultor estructural de ambos pabellones:

En la Expo 67 se decidió investigar la viabilidad del uso de una estructura espacial que pudiera integrar coherentemente estructura, forjados, muros, cubiertas, etc. predeterminando, inherentemente el total de la arquitectura. Los estudios preliminares fueron positivos pero no conocíamos un sistema apropiado. Entonces tuvimos que desarrollar una estructura espacial original. [...] No todas las piezas son intercambiables y la estandarización no resultó tan precisa o extensiva como podríamos haber deseado. [...] La transición a la realidad hizo que el resultado fuera una compleja masa de acero, tornillos y chapas con un resultado relativamente antieconómico. (Kalin, 1967)

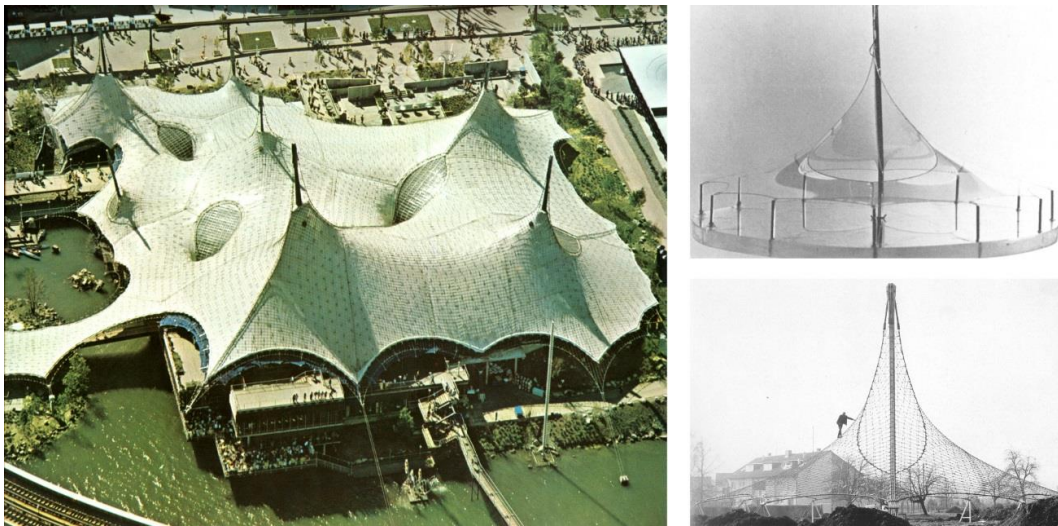


**Figura 8:** Izquierda: Atomium. André Waterkeyn. Exposición Universal de Bruselas 1958. Derecha: Underwater City. Estructura espacial habitable subacuática. Warren Chalk. 1964.

**Fuentes:** <http://www.brusselpictures.com/wp-content/photos/Atomium/>; Cook, Chalk, y Crompton, 1999.



**Figura 9:** Pabellones Man the Explorer y Man the Producer. Exposición Universal de Montreal 1967.  
**Fuentes:** Izda. Arriba: [www.tayloroakes.com/wp-content/galleries/2011/11/6243222716\\_3a485156eb\\_b.jpg](http://www.tayloroakes.com/wp-content/galleries/2011/11/6243222716_3a485156eb_b.jpg);  
Izda. Abajo: <http://expolounge.blogspot.com.es/2006/07/expo-architecture-theme-pavilions.html>;  
Drcha: Brilliantly ordered visual world: expo 67, 1967.



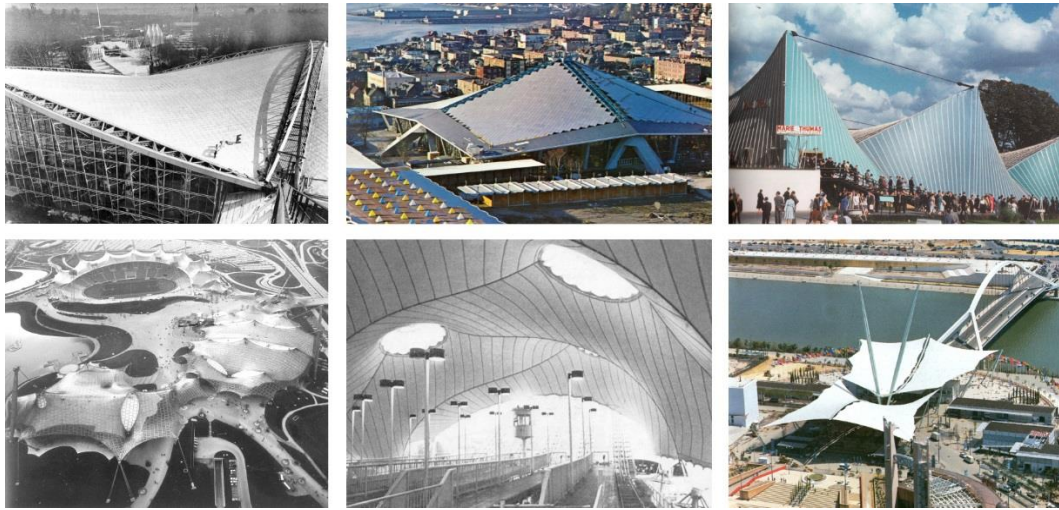
**Figura 10:** Pabellón Alemán en la Exposición Universal de Montreal 1967. Frei Otto. Modelo realizado mediante superficie equitensional jabonosa y primer prototipo a escala real.  
**Fuentes:** Nelson, 1968; Glaeser, 1977; Otto, 2005.

## 4. Gérmenes tipológicos

El germen tipológico condensa la idea de que en las Exposiciones Universales se han construido edificios icónicos desde el punto de vista estructural que han tenido numerosas secuelas materializadas fuera de las Exposiciones. Ejemplifica lo anterior el Pabellón Alemán

de la Exposición Universal de Montreal 1967, realizado por Frei Otto (Figura 10). Su construcción supuso un enorme salto conceptual en el diseño de las estructuras formadas por redes de cables, pasando desde la utilización de formas geoméricamente conocidas como el paraboloides o el conoide y generalmente enmarcadas por elementos rígidos, a formas libres, aparentemente aleatorias. Pero dicha aleatoriedad no es tal. El diseño inicial del pabellón se elaboró partiendo de una





**Figura 11:** Arriba: Redes de cables realizadas antes de la Expo de Montreal 1967, basadas en formas geométricas conocidas (paraboloide y conoide). Abajo: estructuras realizadas con posterioridad a la Expo 67, basadas en formas libres. De arriba a abajo y de izda. a drcha: Pabellón de Francia (Sarger) Bruselas 1958; Seattle Center Coliseum (Thiry, Hostmark) Seattle 1962; Pabellón Marie Thumas (Sarger) Bruselas 1958; Cubierta para los Juegos Olímpicos de Munich 1972 (Otto, Isler, Leonhard); Daidarasaurus Station (Oki, Aoki) Osaka 1970; Puerta Oleada (Mühlberger) Sevilla 1992.

**Fuentes:** De arriba a abajo y de izda. a drcha: Picon, 1997; Gandy, 1962; Devos, y Kooning, 2006; Otto, 2005; Ishii, 1995; Expo '92 Séville, *Architecture et design*, 1992.

superficie equitensional formada por un líquido jabonoso o de alta tensión superficial (Otto, 2005). En este sentido, es sabido que sumergiendo un esqueleto de borde en un líquido jabonoso se obtiene una superficie que tiene la cualidad física de ser equitensional, es decir, la tensión entre sus moléculas es igual en todos los puntos y en todas las direcciones. Esto evita la tendencia a formar arrugas. Además, la película jabonosa es una superficie mínima, es decir, materializa la menor área posible definida por dichos bordes. No obstante, no todas las superficies jabonosas son adecuadas como modelo inmediato de malla pretensada, ya que, dependiendo de la forma del esqueleto de borde, pueden originarse zonas de escasa curvatura que invaliden el modelo.

La búsqueda de la forma se complementó con modelos de malla reducidos y monitorizados. De esta manera, una de las grandes aportaciones de Otto estriba en haber dotado a estas estructuras de una enorme libertad formal, que no deriva de la aleatoriedad sino de la manifestación de los principios físicos que gobiernan estas tipologías, mediante la generación de lo que podemos denominar *autoformas naturales*. Afirmaba Otto: “Mi planteamiento no es estructural. Utilizo conceptos que están en la naturaleza. La naturaleza viva se mueve en la tracción y en el equilibrio dinámico” (Escrig, 1999, p.3).

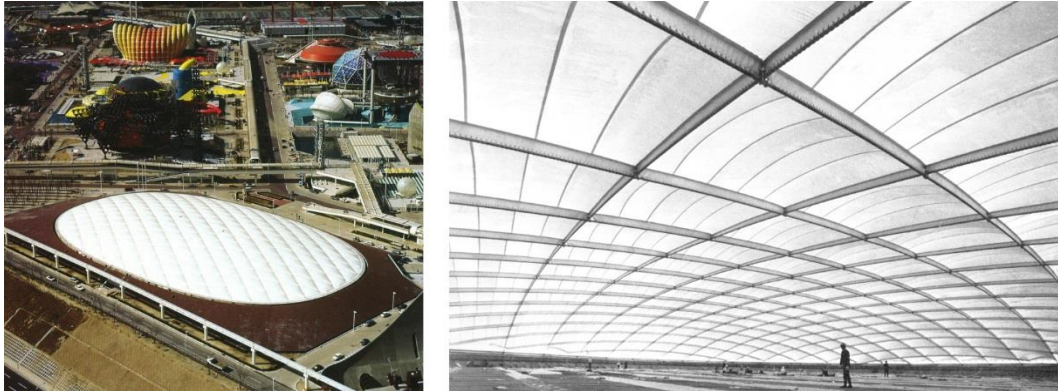
En este sentido podemos observar ejemplos muy significativos construidos en las Exposiciones Universales y al margen de las mismas con anterioridad y posterioridad al Pabellón Alemán, en los que se pone de manifiesto el paso de la rigidez formal de las primeras

redes de cables basadas en el paraboloide hiperbólico o el conoide, hacia esta nueva orientación que propiciaría una gran variedad formal, tanto en redes de cables como en membranas pretensadas (Figura 11).

Otro edificio que ejemplifica el papel de las Exposiciones Universales como lugar de construcción de edificios germinales con numerosas consecuencias es el Pabellón de los Estados Unidos, construido por David Geiger en la Exposición Universal de Osaka 1970 (Figura 12). Se trata de una nueva tipología estructural: la bóveda neumática de perfil bajo reforzada por cables. Alcanzaba unas dimensiones de 83,5 x 142 metros. Su gestación tipológica se debió precisamente a la importante magnitud de la acción eólica de Osaka. Afirmaba Geiger:

Es difícil diseñar una cubierta de gran luz a bajo coste para resistir vientos de 241 Km/h [...] Esto exigió una cubierta con una sección aerodinámica. Los cables hacen posible una cubierta de perfil muy bajo [...] Esta es la estructura de soporte de aire de mayor luz construida y la más ligera para la luz alcanzada jamás desarrollada. (Geiger, 1970)

En este sentido, para una misma presión interna, la tensión que desarrolla una membrana neumática es mayor cuanto menor es su curvatura. Por esta razón, en las bóvedas de pequeña curvatura o perfil muy bajo es necesaria la colocación de cables, debido a tres motivos fundamentales: absorben parte de las tensiones aumentando la resistencia del conjunto, reducen la deformación del textil y producen burbujas locales que aumentan la curvatura de la membrana textil y, por tanto, reducen su tensión.



**Figura 12:** Pabellón de los Estados Unidos en la Exposición Universal de Osaka 1970. David Geiger.  
**Fuentes:** Ishii, 1995; Herzog, 1977.

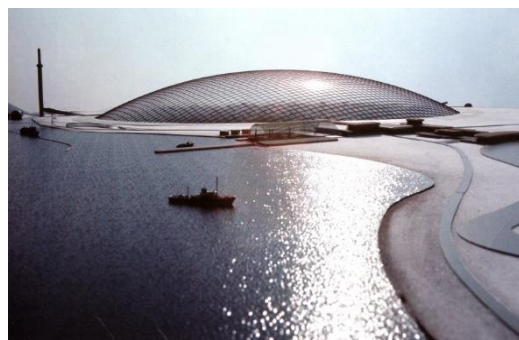


**Figura 13:** Algunos de los edificios consecuencia del Pabellón de los Estados Unidos en la Expo de Osaka 1970. De izda. a drcha: Pontiac Silverdome, David Geiger 1975; Estadio BC Place de Vancouver, David Geiger y Horst Berger, 1983; Tokio Dome, Sekkei, Komuten, 1988.  
**Fuentes:** Izda. y centro: <http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/domes.html>; Drcha: Ishii, 1995.

Las obras construidas al margen de las Exposiciones como consecuencia de este pabellón fueron numerosas, produciéndose también un notable incremento en las luces alcanzadas. Valgan como ejemplo la Pontiac Silverdome —Geiger 1975, 160 x 220 m—, el Estadio BC Place de Vancouver —Geiger, Berger, 1983, 190 x 232 m— o la Tokio Dome —Sekkei, Komuten, 1988, 180 x 180 m— (Figura 13). Aunque estos edificios fueron implementando notables avances tecnológicos (uso de tejidos mejorados, mecanismos para el derretido de nieve o sistemas informatizados para el control de la presión diferencial interior-externo) todos ellos se basan en la tipología originalmente creada en Osaka.

Por otra parte, se hace evidente la influencia del Pabellón USA de Osaka en diversos planteamientos para la consecución de asentamientos humanos en áreas inhóspitas, como la propuesta de Otto, Tange y Ove Arup para Ciudad en el Ártico (1971), consistente en una bóveda neumática de perfil bajo reforzada con cables (Figuras 14 y 15). Hoy estas propuestas las observamos desde una perspectiva utópica, que conecta con el punto

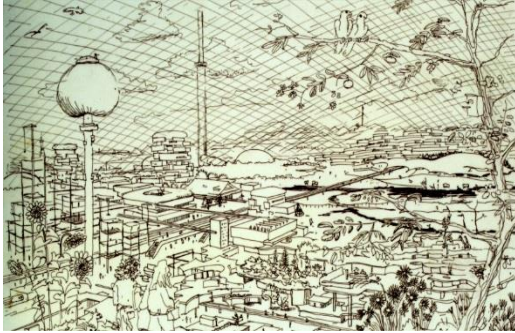
anterior, pero en 1970 la confianza en el desarrollo tecnológico y el optimismo energético, sin duda, propiciaron un pensamiento de grandes expectativas en este sentido.<sup>1</sup>



**Figura 14:** Propuesta para Ciudad en el Ártico. 1971. Frei Otto, Kenzo Tange y Ove Arup.  
**Fuente:** Otto, 2005.

<sup>1</sup> Nótese que entre 1945 y 1972 el consumo de petróleo en Occidente se había multiplicado, alcanzando cifras desconocidas hasta la época. Este incremento del consumo y el acceso barato a esta materia prima se hace patente especialmente en los Estados Unidos y en Japón. La primera crisis del petróleo se

producirá a mediados de 1973, debido a la decisión de la OPEP de no exportar más petróleo a los países que habían dado apoyo a Israel en la Guerra de Yom Kipur, con el consecuente incremento de su precio y la aceleración de la recesión económica mundial.



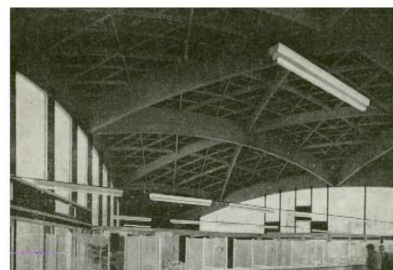
**Figura 15:** Propuesta para Ciudad en el Ártico. 1971. Frei Otto, Kenzo Tange y Ove Arup.  
**Fuente:** Otto, 2005.

## 5. El conjunto tipológico

Algunas Exposiciones Universales han constituido manifestaciones paradigmáticas como conjunto de una determinada tipología estructural o de un determinado material. Estas manifestaciones de conjunto fortalecen su influencia, contribuyendo la Exposición Universal al conocimiento, difusión y extensión de dichas tipologías o materiales.

De esta manera, la aparición en 1940 de la madera laminada encolada con colas sintéticas, de mayor durabilidad y resistencia al fuego que la elaborada con

colas naturales tipo caseína, provocó que en la siguiente Exposición Universal de relevancia, que fue la celebrada en Bruselas en 1958, se construyeran veinticinco pabellones con este material. A este hecho contribuyeron, sin duda, las campañas de promoción de la madera realizadas en Bélgica por el *Bureau d'Information sur le Bois* durante los años previos (Devos y de Kooning, 2006). El valor de estos pabellones estriba, no solo en haber constituido hitos individuales, sino en su valor como conjunto, mostrando las variadas posibilidades de este material en cuanto a la obtención de diversas geometrías, tanto elementos de directriz recta como curva y de secciones variables, así como su aplicación a diversas tipologías tales como estructuras porticadas, arcos, bóvedas o paraboloides hiperbólicos. Destaca especialmente el Pabellón de Información, realizado por René Sarger, constituyendo el primer ejemplo de estructura laminar de madera multicapa encolada en toda su extensión, recurso que sería empleado a partir del año siguiente a la exposición con gran profusión en Gran Bretaña (Figura 16). Nótese que entre 1957 y 1975 se construyeron en Gran Bretaña del orden de ciento cuarenta paraboloides hiperbólicos de madera. A partir de la construcción del Pabellón de Sarger en la Exposición Universal de Bruselas, la preferencia en la construcción de estas estructuras será el encolado de las tablas frente al claveteado (Both, 1997). En la misma Exposición encontramos el Pabellón de Correos, formado por una bóveda de planta triangular de 30 metros de lado resuelta mediante una estructura en retícula de miembros de madera laminada encolada



**Figura 16:** Ejemplos de tipologías estructurales resueltas con madera laminada encolada con colas sintéticas en la Exposición Universal de Bruselas 1958. Arriba de izda. a drcha: Pabellón de Información, René Sarger; Pabellón del Urbanismo. Abajo, izda. y drcha: Pabellón de Correos, bóveda compuesta por miembros de madera laminada  
**Fuentes:** Devos, y Kooning, 2006; Cassinello, 1959.

con colas sintéticas (Figura 16). O tipologías más convencionales como el Pabellón del Urbanismo realizado a base de pórticos de sección variable pero resueltos con este nuevo material (Figura 16).

En esta línea de la Exposición como conjunto tipológico destacó también la Exposición Universal de Osaka 1970 como lugar en el que las estructuras neumáticas alcanzaron el punto culminante en cuanto a creatividad estructural y dimensiones alcanzadas, constituyendo un conjunto variado e innovador de las posibilidades de estas tipologías. Esta exposición surgió tras la publicación ocho años antes del clásico libro de Frei Otto *Tensile Structures* (1962) en el que definía el estado de la técnica de las estructuras neumáticas y también tras el *Primer Congreso Internacional sobre Estructuras Neumáticas* celebrado en Stuttgart tres años antes (1967).

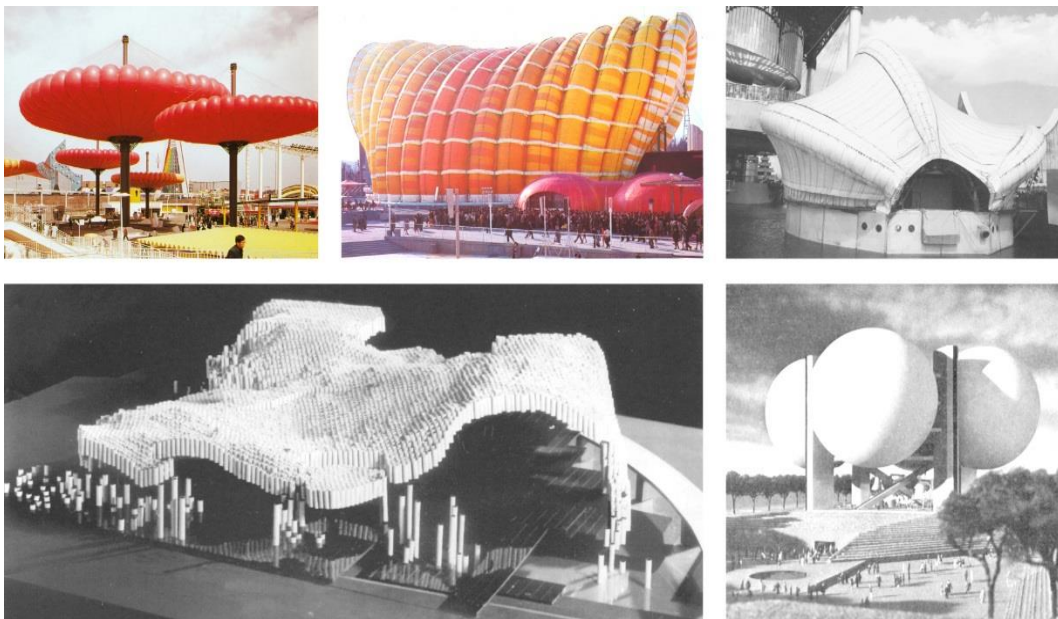
Por otra parte, el diseño de algunas de estas realizaciones tiene tan elevada singularidad que resulta difícil documentar antecedentes y secuelas de las mismas:

Tal es el caso del Pabellón Fuji —Mamoru Kawaguchi, Yutaka Murata—, que constituyó en su época la estructura neumática de alta presión de mayor tamaño jamás construida (Figura 17). Este hecho impulsó la investigación de nuevos materiales multicapa para estructuras neumáticas de alta presión, testando diversas combinaciones de materiales, incluyendo ensayos de fuego.

Los Mush-Ballons o paraguas neumáticos —Taneo Oki, Shigeru Aoki— constituyeron un original híbrido entre estructura desplegable y neumática (Figura 17).

El Teatro Flotante —Kawaguchi, Murata— que supuso una original innovación tipológico-estructural al combinar tres arcos de alta presión positiva entre los que se disponía una doble membrana de baja presión negativa (Figura 17). El propio Kawaguchi aludía todavía en 1992 a la singularidad de este pabellón: “El Teatro Flotante fue realmente un ejemplo único de estructura neumática que se caracterizaba por ser un híbrido compuesto por estructuras de alta presión positiva y de baja presión negativa” (Kawaguchi, 1992).

Destacan, además, no solamente las realizaciones sino también los proyectos presentados a concurso, en lo que vuelve a ser un ejemplo más de la Exposición Universal como catalizador de la creatividad estructural. Así, por ejemplo, el proyecto no construido para el Pabellón alemán —W. Rathke, E. Wiehe— resulta especialmente singular por su morfología agregativa a base de pequeñas células neumáticas (Figura 17). Alcanza también singularidad la propuesta para el pabellón de los Estados Unidos realizada por Brody Associates, formada por cuatro casquetes esféricos neumáticos vinculados a una estructura de hormigón armado (Figura 17). Cada uno de los casquetes era una sala de proyección.



**Figura 17:** Estructuras neumáticas singulares en la Expo de Osaka 1970. Arriba, de izda. a drcha: Mush-Ballons o paraguas neumáticos, Taneo Oki, Shigeru Aoki; Pabellón Fuji, Kawaguchi, Murata; Teatro Flotante, Kawaguchi, Murata. Abajo de izda. a drcha: proyecto no construido para el Pabellón alemán, Rathke, Wiehe, configurado por agregación de células neumáticas; Proyecto no construido para el Pabellón de los Estados Unidos, Brody Associates  
**Fuentes:** *Japan World Exposition, Osaka 1970. Official photo album*, 1971; Herzog, 1977; Sigel, 2000; *The U.S. at Osaka*, 1968; <http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/domes.html>

## 6. Generación normativa y producción científica

Podemos observar que, en ocasiones, ha sido tal la singularidad tipológico-estructural mostrada en una Exposición, que ésta actúa como un elemento germinal para la redacción de nuevas normativas. En este sentido, con motivo de los preparativos de la Exposición de Osaka 1970, las autoridades japonesas publicaron el primer código oficial para el diseño de estructuras neumáticas *The Standard for Structural Design of Pneumatic Structures* (Ishii, 1995).

Otro ejemplo es la propuesta de Sarger que, tras construir el Pabellón de Francia de la Exposición Universal de Bruselas 1958 (Figura 11), propone la creación de un cuerpo normativo. Afirma Sarger:

Ya en el desarrollo del Pabellón de Francia de la Exposición Universal de Bruselas 1958 y en el Estadio de Saint Ouen tuvimos que hacer ensayos en túnel de viento porque no existen reglas concernientes a los efectos del viento sobre superficies de doble curvatura inversa. Propongo que una comisión de la I.A.A.S. (International Association for Shell and Spatial Structures) analice los resultados de los ensayos realizados en todo el mundo y los publique con la intención de que alcancen fuerza de reglamento (Sarger, 1966).

Por otra parte, desde las Actas de la Comisión de Control para la construcción del Crystal Palace (Wyatt, 1851) o las ponencias de Eiffel o Contamin sobre distintos aspectos de la Torre o de la Galería de las Máquinas (Eiffel, 1887; Eiffel, Contamin y Fouquet 1889; Eiffel y Contamin, 1890) hasta las ponencias de Tsuboi sobre la estructura de la Festival Plaza (Tsuboi y Kawaguchi, 1971) o los informes oficiales sobre las distintas exposiciones, la producción científica propiciada por las Expos resulta muy extensa.<sup>2</sup>

## 7. A modo de Colofón

No obstante, y a modo de colofón, hemos de decir que, a pesar del enorme desarrollo tecnológico ejemplificado en los cinco puntos anteriores, han existido períodos en los que las Exposiciones Universales no tuvieron un papel dinamizador desde el punto de vista estructural. Especialmente, tras la Primera Guerra Mundial (1914-18), precisamente alargada y más cruenta debido al desarrollo armamentístico surgido de la Revolución Industrial, tiene lugar en Europa una crisis económica e ideológica. La idea de la industria como garante del bienestar y del progreso infinito se pone en cuestión. Las Exposiciones Universales abandonan el gigantismo arquitectónico anterior al que se asociaba el optimismo industrial y dan un giro hacia las artes decorativas,

diversificándose en múltiples pabellones de pequeño tamaño. Será tras la Segunda Guerra Mundial (1939-45) y, especialmente a partir de la Exposición de Bruselas de 1958, cuando las exposiciones recuperarán el papel vanguardista estructural que había languidecido en el período anterior.

Por otra parte, a finales del S.XX ocurren dos hechos fundamentales. En primer lugar, la sensibilización social en el respeto al entorno natural, derivada del calentamiento global y de la certeza del agotamiento de los combustibles fósiles, cristaliza en el surgimiento de nuevas corrientes arquitectónicas basadas en la sostenibilidad, el reciclaje o el uso de materiales cuya manufactura precisa de un menor consumo energético. En segundo lugar, se produce un enorme desarrollo tecnológico de los productos derivados de la madera. Ambos hechos confluyen en la primera Exposición Universal del S.XXI celebrada en Hannover en el año 2000, que titulada “Hombre, Naturaleza y Tecnología”, constituirá el marco ideológico ideal. Esta confluencia tiene uno de sus más brillantes exponentes en el Expo-Roof, —Thomas Herzog y Julius Natterer— que supone una brillante muestra de las grandes posibilidades estructurales de los productos derivados de la madera en sus múltiples variantes (rollizos, madera aserrada, madera laminada y microlaminada y tableros de distintos tipos) (Figura 18).



Figura 18: Expo-Roof (Herzog, Natterer). Exposición Universal de Hannover 2000  
Fuente: Herzog, 2001.

<sup>2</sup> Una gran parte de la extensa bibliografía existente sobre las Expos puede consultarse en: López-César, I. (2017). *World Expos. A history of structures. Exposiciones Universales. Una historia de*

*las estructuras*. Barcelona, Spain: By Architect Publications & Bureau International des Expositions (BIE).

Destaca, por otra parte, el Pabellón de Japón —Shigeru Ban y Frei Otto—, que constituyó la primera estructura realizada por Ban con tubos de cartón que adquieren directriz curva durante el proceso de montaje (Figura 19).



**Figura 19:** Pabellón de Japón. Expo Hannover 2000  
**Fuente:** McQuaid, 2003.

En los dos primeros decenios del S.XXI no ha habido desarrollos significativos fundamentales de nuevas tipologías estructurales arquitectónicas. Esencialmente, los edificios se sustentan mediante las mismas tipologías, si bien, con nuevos diseños y formalizaciones surgidos de la libertad que, en este sentido, proporcionan los nuevos recursos informáticos, alcanzando en muchas ocasiones la arquitectura una cierta vía de innovación plástica o escultórica.

Esta vertiente de experimentación formal no es nueva, y la arquitectura del pabellón expositivo se ha prestado a ella al aspirar, en muchas ocasiones, a producir un impacto en el público. Ocurre, que la limitación de los recursos de cálculo existentes anteriormente, conducía esta innovación hacia formas estructurales muy racionales, basadas en la lógica de los principios físicos que gobiernan nuestro mundo. Hoy, la informática ha propiciado recursos de cálculo, representación y fabricación prácticamente ilimitados, que permiten una exploración más alejada de esta racionalidad física.

En definitiva, el devenir de los tiempos ha dado lugar, en la arquitectura en general, a un manierismo favorecido por el ordenador al que la perspectiva histórica se encargará de otorgar su justo valor. Si bien este fenómeno resulta positivo desde el punto de vista de la experimentación plástica y la innovación en la creación de espacios, hemos de ser prudentes y no debemos olvidar que la máquina es solo un medio, pero el fin último de la arquitectura debe ser, indudablemente, el hombre.

## 8. Conclusiones

Las aportaciones principales de las Exposiciones Universales a la historia de los sistemas estructurales arquitectónicos se pueden sintetizar en los siguientes puntos:

En el S.XIX, a caballo de la Revolución Industrial, y con el desarrollo del hierro industrializado y posteriormente del acero, las Exposiciones constituyeron lugares en los que se ensayaron nuevas tipologías estructurales metálicas, en un proceso de prueba y error. Las Expos permitieron materializar ideas para las que no existía una experiencia previa completa, funcionando la Exposición, en esta época, como un elemento tractor del desarrollo arquitectónico-estructural.

La invención y desarrollo de ciertas tipologías estructurales en el S.XX, tales como las mallas espaciales, y paralelamente la aparición de posiciones de alto contenido utópico, tuvieron un correlato directo en las Exposiciones, que se convirtieron en lugares de materialización de propuestas aproximativas a estos planteamientos utópicos.

Se observa cómo en las Exposiciones se han construido edificios dotados de tipologías estructurales completamente novedosas. Dichos edificios actuaron como elementos germinales, volcando su influencia en la arquitectura realizada al margen de las Expos.

Determinadas Exposiciones Universales han constituido una auténtica muestra de un determinado material o tipología estructural, sirviendo la Exposición como un elemento relevante en la difusión de estos aspectos.

Las Exposiciones han funcionado también como elementos de generación normativa y literaria, contribuyendo ambas cuestiones, junto con la visita de millones de personas, a la difusión de los avances estructurales y al volcado de los mismos a la arquitectura en general.

En definitiva, las aportaciones estructurales de las Exposiciones Universales han sido numerosas, trascendentales y de enorme calado en cuanto a su influencia. Estos aspectos han hecho engranar a las Expos como elementos intrínsecos de la historia de las estructuras arquitectónicas.

Como citar este artículo/How to cite this article:  
López-César, I. & Estévez-Cimadevila, J. (2018). Las Exposiciones Universales. Cinco enfoques estructurales. *Estoa, Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 7(13), 7-22.  
doi:10.18537/est.v007.n013.a01

## Bibliografía

- Allwood, J. (1977). *The Great Exhibitions*. London, UK: Studio Vista.
- Arena trades in cables for trusses. (1996). *Architectural Record*, (184), 42-47.
- Barrault, A., y Bridel G. (1857). *Le Palais de l'Industrie et ses anexes: description raisonnée du système de construction*. Paris, France: Noblet. Recuperado de <http://www.e-rara.ch/zut/content/titleinfo/1628454>
- Berger, H. (1996). *Light structures, structures of light. The art and engineering of tensile architecture*. Basel, Boston, Berlín: Birkhäuser.
- Both, L.G. (1997). The design and construction of timber hyperbolic paraboloid shell roofs in Britain: 1957-1975. *Construction History*, (13), 67-90.
- Brilliantly ordered visual world: expo 67. (1967). *Architectural record* (142), 115-126.
- Cassinello, F. (1959). *Bruselas, alarde estructural*. Madrid, España: Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento.
- Chilton, J. (2000). *Space grid structures*. Oxford, UK: Oxford Architectural Press.
- Cook P., Chalk W., y Crompton D. (1999). *Archigram*. New York, USA: Princeton Architectural Press.
- Devos R., y Kooning M. (2006). *L'architecture moderne à l'Expo 58*. Bruxelles, Belgium: Dexia.
- Dickinson (1852). *Dickinson's comprehensive pictures of the great exhibition of 1851*. London, UK: Dickinson Brothers.
- Dunlop, B., y Hector, D. (1999). *3 Architecture*. London, UK: Phaidon.
- Eiffel, G. (1887). Communication de M. Eiffel sur les travaux de fondation de la Tour de 300 mètres. Communication de M. Contamin sur l'état d'avancement des travaux a executar au Champ de Mars. *Societe des ingénieurs civils, Séanse du 6 Mai 1887*. Paris, France: Imprimerie et Librairie Centrales des Chemins de Fer.
- Eiffel, G., Contamin, M.V., y Fouquet. (1889). Note sur les constructions métalliques, Exposition Universelle de 1889. *Congrès International des Procédés de Construction*. Paris, France: Imprimerie et Librairie Centrales des Chemins de Fer.
- Eiffel, G., y Contamin, M.V. (1890). Discours prononcés par M.G. Eiffel et M.V. Contamin. *Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils*. Paris.
- Elwall, R. (1992). *Pavilions near and far. The architecture of international exhibitions. 1929-1992*. London, UK: The building Centre Trust.
- Emili, A. (2007). *Richard Buckminster Fuller e le neoavanguardia*. Roma, Italy: Kappa.
- Escrig, F., y Sánchez, J. (1999). *Star. Structural architecture 5. Estructuras en tracción 1*. Sevilla, España: editor Félix Escrig.
- *Expo '92 Séville, Architecture et design*. (1992). Sevilla, España: Gallimard.
- Exposition Universelle 1878. (1878). *Nouvelles Annales de la Construction*, marzo 1878.
- Findling, J.E. (1990). *Historical dictionary of World's Fairs and Expositions, 1851-1988*. Westport, Connecticut, USA: Greenwood Press.
- Friebe, W. (1985). *Buildings of the world exhibitions*. Leipzig, Germany: Edition Leipzig.
- Fuller, R.B., Krausse, J. (Ed.), y Lichtenstein, C. (Ed.). (1999). *Your private sky. The art of design science*. Zürich, Suiza: Lars Müller Publishers.
- Gandy, J. (1962). *Seattle world's fair 1962: oficial souvenir program*. Washington, USA: Acme Publications.
- Garn A., Antonelli P., y Kultermann U. (2007). *Exit to tomorrow: World's Fairs architecture, design, fashion 1933-2005*. New York, USA: Universe Publishing.

- Geiger, D. (1970). U.S. Pavilion at Expo 70. *Civil Engineering-ASCE*. March. Recuperado de <http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/OSAKA/cable.html>
- Giedion, S. (1982). *Espacio, tiempo y arquitectura*. Madrid, España: Dossat.
- Glaeser, L. (1977). *The work of Frei Otto and his teams 1955-1976*. Stuttgart, Germany: Institut für leichte Flächentragwerke.
- Henard, E. (1891). *Exposition Universelle de 1889: Le Palais des Machines, Notice sur l'edifice et sur la Marche des Travaux*. Paris, France: Librairies Imprimeries Réunies.
- Herzog, T. (1977). *Construcciones neumáticas: manual de arquitectura hinchable*. Barcelona, España: GG.
- Herzog, V. (Ed.). (2001). *Thomas Herzog. Architecture + technology*. Munich, Germany: Prestel.
- Ishii, K. (1995). *Membrane structures in Japan*. Tokyo, Japan: SPS Publishing Company.
- Ishii, K. (Ed.). (1999). *Membrane designs and structures in the World*. Tokio, Japan: Shinkenchiku-sha Co.
- *Japan World Exposition, Osaka 1970. Official photo album*. (1971). Osaka, Japan: Commemorative Association for the Japan World Exposition.
- *Japan World Exposition Osaka 1970: Official Report*. (1972). Suita City, Osaka, Japan: Commemorative Association for the Japan World Exposition 1970.
- Kalin, I. (1969). *Expo '67. Survey of Building Materials, Systems and Techniques used at the Universal and International Exhibition of 1967 Montreal, Canada*. Ottawa, Canada: Department of Industry, Trade and Commerce.
- Kawaguchi, M. (1992). Mechanisms in lightweight spatial structures. En F. Sánchez (Presidencia), *I Encuentro Internacional Estructuras Ligeras para Grandes Luces*. Fundación Emilio Pérez Piñero. Sevilla, España.
- Laner, F. (1994). *Il legno lamellare: il progetto*. Brescia, Italy: Habitat Legno.
- López-César, I. (2012). *Las Exposiciones Universales. Laboratorio de Estructuras: aportación de los edificios construidos con motivo de las Exposiciones Universales a la historia de las tipologías estructurales de edificación* (Tesis Doctoral). Universidad de Coruña, España. Recuperado de <http://openarchive.icomos.org/1705/>
- López-César, I. (2014). The structural contribution of the Crystal Palace to the 1851 Great Exhibition held in London. An extension of the traditional historical approach. *RITA Revista Indexada de Textos Académicos*, (2), 76-83. Recuperado de <http://openarchive.icomos.org/1511/>
- López-César, I., y Estévez-Cimadevila, J. (2015). The Palais des Machines of 1889. Historical-structural reflections. *VLC arquitectura Research Journal*, 2(2), 1-30. doi: 10.4995/vlc.2015.3598
- López-César, I. (2017). *World Expos. A history of structures*. Exposiciones Universales. Una historia de las estructuras. Barcelona, Spain: By Architect Publications & Bureau International des Expositions (BIE).
- Mallet, R. (1862). *Record of the International Exhibition London 1851*. Glasgow, London: William Mackenzie.
- Martín-Gutiérrez, E. (1990). El movimiento metabolista: Kisho Kurokawa y la arquitectura de las cápsulas. *Boletín Académico. E.T.S. de Arquitectura de A Coruña*, (12). Recuperado de <http://hdl.handle.net/2183/5206>
- Mattie, E. (1998). *World's Fairs*. New York, USA: Princeton Architectural Press.
- McQuaid, M. (2003). *Shigeru Ban*. London, UK: Phaidon Press.
- Nelson, T. (Ed.). (1968). *The Memorial Album of the first category Universal and International Exhibition held in Montreal*. Toronto, Canada: T. Nelson.
- Otto, F. (1982). *Tensile structures, vol 1 + vol 2*. Massachusetts, USA: The MIT Press.
- Otto, F. (1992). Minimal architecture. En F. Sánchez (Presidencia), *I Encuentro Internacional Estructuras Ligeras para Grandes Luces*. Fundación Emilio Pérez Piñero. Sevilla, España.
- Otto, F. (2005). *Frei Otto complete works*. Boston, USA: Birkhäuser.
- Picon, A. (1997). *L'art de l'ingenieur*. Paris, France: Éditions du Centre Pompidou.
- Sarger, R. (1966). Couvertures de grandes portes. *Symposium on problems of interdependence of design and construction of large-span shells for industrial and civic buildings. (I.A.A.S.)*. 6-9 Septiembre 1966. Leningrado. U.S.S.R.
- Schriefers, T. (2015). *World Expo architecture*. Paris, France: Auma & Bureau International des Expositions (BIE).
- Sigel, P. (2000). *Exponiert: Deutsche Pavillons auf welttausstellungen*. Berlin, Germany: Verlag.
- The U.S. at Osaka. (1968). *Architectural forum*. October. Recuperado de <http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/OSAKA/publsh.html>
- Tange K., Koichi S., y Kawazae N. (1970). Osaka 70. *Architecture d'aujourd'hui* (152).
- Tsuboi, Y., y Kawaguchi, M. (1971). The space frame for the Symbol Zone of Expo 70. *IASS Pacific Symposium-Part II on tension structures and space frames*. 17-23 Octubre 1971. Tokio and Kyoto, Japan.
- Vierendeel, A. (1902). *La construction architecturale en fonte, fer et acier*. Brussels, Belgium: Dunod.
- Wyatt, M.D. (1851). On the construction of the building for the exhibition of Industry of all Nations. *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, (10), 127-191.