

## 1. INTRODUCCIÓN

Los cambios en la tecnología de la industria del vidrio han proporcionado un material de construcción cada vez más interesante entre arquitectos e ingenieros y con mayor presencia en elementos estructurales. La combinación única de transparencia, durabilidad y buena relación calidad-precio han hecho del vidrio un material tanto para el diseño de fachadas ligeras como para el diseño de estructuras livianas y atractivas con distinto grado de complejidad como, por ejemplo, puentes, pasarelas, miradores y por supuesto cerramientos.

La utilización del vidrio a lo largo de la historia ha sido cuanto menos relevante, y su calidad, acabados y dimensiones han estado muy vinculados a la evolución de los procesos de fabricación y transformación.

A partir de la segunda mitad del siglo xx, gracias a los progresos en el campo de la automatización de la producción y a la instalación de hornos de fuego continuo, la fabricación del vidrio se convirtió en una industria de masas con el desarrollo de una producción en grandes series.

A partir de principios del 2007, con el retroceso progresivo de la actividad en el sector de la construcción, disminuye su consumo. Sin embargo, el uso del vidrio en la construcción singular no se ve tan afectado debido a que los avances tecnológicos en esta industria han dado pie a su uso en aplicaciones con nuevas funcionalidades.

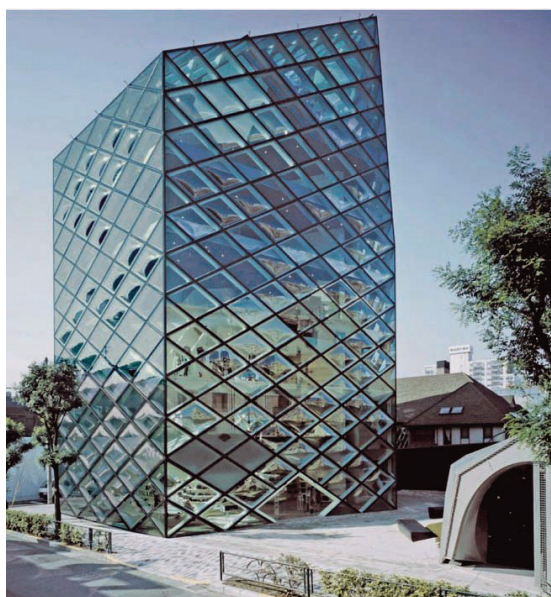
Se hace mención a algunas referencias singulares, por distintas razones: complejidad técnica, repercusión mediática o ambos (Figura 1.1, Figura 1.2).

- El puente levadizo de vidrio más grande del mundo diseñado por el arquitecto israelí Haim Dotan, provincia de Zhangjiajie en China (Figura 1.1), con 430 metros de largo, está preparado para soportar el peso de unas ochocientas personas. El tablero de vidrio está dispuesto sobre una estructura de seis metros de luz y tiene un espesor de cinco centímetros [1].
- Cartelas (glass fins) de hasta quince metros de longitud del Apple Store de Nueva York diseñado por Bohlin Cywinski Jackson con vigas vidrio laminado de cinco capas de vidrio templado de doce milímetros de  $3,25 \times 15$  metros [2].
- Grandes complejos comerciales, como la tienda de Prada situada en Tokio diseñada por Herzog & de Meuron en 2003, con paneles de vidrio curvo, transparente o translúcido en forma de diamante.
- La Nordpark Railway Station en Innsbruck, Austria, diseñada por Zaha Hadid en el año 2007, con paneles de vidrio con doble curvatura templados térmicamente.

El diseño de cerramientos ha versado en la creación de estructuras portante transparentes como cartelas (*glass fins*) o vigas de vidrio, así como en el desarrollo de las fachadas atirantadas mediante cables. Este último ha sido un gran avance en cuanto a la estructura portante, puesto que los cables tensados son hoy en día capaces de resistir cargas de viento, entre otras, gracias a las diferentes



**Figura 1.1.** Izquierda, Puente Zhangjiajie en China, julio de 2016 [1]; derecha, Apple Store de Nueva York, 2011 [2].



**Figura 1.2.** Izquierda, Tienda de Prada en Tokio, 2003; derecha, Nordpark Railway Station en Innsbruck, 2007.

estabilizaciones y rigideces dotadas a la estructura. Sin duda ha sido importante la homogeneización de los resultados obtenidos en los hornos de templado y laminado que hace posible encontrar en el mercado láminas rectangulares de hasta 15 m.

No solo se ha experimentado un cambio en la estructura portante, sino también en los conectores estructurales de las láminas de vidrio. Los sistemas de fijación abotonados o por puntos han evolucionado desde la perforación de la lámina de vidrio que se requería inicialmente hasta la perforación de media lámina o la no perforación, es decir, la conexión química mediante adhesivos estructurales. Con este cambio se consigue mejor adaptación a la evolución del empleo de vidrios monolíticos, mayoritariamente utilizados en los años treinta, en los vidrios aislantes.

La viabilidad técnica de las soluciones singulares requiere del empleo de nuevos modelos de comportamiento. La Figura 1.3 muestra ejemplos de últimas realizaciones en las que la fabricación de prototipos es imprescindible para validar el diseño; en esta Figura se presentan también imágenes de últimas investigaciones innovadoras. El Hospital *Stead Family Children* de la Universidad de Iowa diseñado por Foster y Partners utiliza un vidrio curvo aislante diseñado para ser resistente a los tornados, cuya configuración final ha requerido mucho tiempo y dinero, además de la colaboración entre cliente, fabricante del intercalador y fabricante del vidrio curvo. La configuración final es un vidrio aislante (UVA) con vidrio laminado en el exterior e interior formado por dos capas de vidrio templado de

12 mm unidos por intercalador ionoplástico de 4 mm y una cámara de aire de 12 mm [3]. En el área de la investigación se está estudiando la capacidad portante del vidrio curvo aprovechando la geometría. La imagen inferior izquierda de la Figura 1.3 valida con un prototipo el estudio teórico con distintas configuraciones de acciones junto con la temperatura [4]. También se están investigando prototipos y se está trabajando en el empleo de vidrios de espesores reducidos —entre 0,5 mm y 2 mm— en fachadas adaptativas que se muevan en función de los cambios del entorno, y tener así una mejor respuesta energética [5]. Para llegar a este punto ha sido necesario un desarrollo de la tecnología de la fabricación del vidrio y de las conexiones. La validación de cualquier elemento singular ha de realizarse por experimentación, puesto que no se dispone todavía de conocimiento para poder desarrollar modelos de comportamiento fiables.

Resumiendo, las principales innovaciones tecnológicas en los últimos veinte años se pueden concretar en:

- Mejora de los procesos de transformación del vidrio (templado y laminado) que permiten obtener elementos de mayor calidad y dimensiones, y por lo tanto desarrollo de nuevas aplicaciones estructurales.
- Innovadores sistemas de conexión de vidrios, tanto mecánicos como químicos.
- Mejora de las características ópticas y energéticas con el desarrollo de nuevos intercaladores y de capas.



**Figura 1.3.** Aplicaciones de vidrio estructural [3] [4] [5].

Estas innovaciones tecnológicas junto con el desarrollo de conocimiento científico sobre la caracterización mecánica, modelos de daño y los avances en el desarrollo de normalización, como ya se ha mencionado, han dado un impulso al empleo del vidrio en construcciones y elementos singulares.

Esta monografía se plantea, para integrar en un único documento, una revisión de elementos constructivos con vidrio y las prestaciones especia-

les que les diferencian de otra tecnología de materiales. Precisamente por la transparencia y fragilidad del vidrio, el impacto de cuerpo blando es una prestación diferenciadora, y se debe comprobar en el diseño de los elementos que, cuando fallen, la consecuencia no sea la pérdida de la vida humana. En este documento se presentan también los resultados de los trabajos realizados para mejorar el conocimiento del impacto humano.