

El vidrio como material estructural

Tipologías estructurales del vidrio a través de un recorrido por obras significativas de los últimos años.

TRABAJO FIN DE GRADO
SILVIA NOVÁS PÉREZ

El vidrio como material estructural

Tipologías estructurales del vidrio a través de un recorrido por obras significativas de los últimos años.

TRABAJO FIN DE GRADO

SILVIA NOVÁS PÉREZ

DNI: 53613138-T Ref.: estr-37

Tutora: Dolores Otero Chans

Curso académico: 2015/2016

Fecha de entrega: 13/11/2015

Escola Técn. Sup. Arquitectura

Universidade da Coruña

RESUMEN

Este trabajo se centra en el estudio del vidrio como material estructural de primer orden, analizando las diferentes tipologías que se pueden encontrar en la construcción arquitectónica de los últimos años. Para ello, se analizan un conjunto de obras que han experimentado con las distintas posibilidades del material, consiguiendo diversos elementos que soportan en gran medida los esfuerzos de compresión y que se combinan con otros materiales, como el acero y la madera, para resolver su mayor debilidad, la escasa resistencia a los esfuerzos de tracción. A partir de los ejemplos expuestos, además de su tipología y su comportamiento estructural, se explican las fijaciones y conectores que existen actualmente en la construcción con vidrio. El punto central del análisis es una comparación entre las tipologías, en la que se muestra como a partir de unos elementos simples lineales se han llegado a conseguir estructuras superficiales y espaciales.

Palabras clave: vidrio, estructura, autoportante, tipología, arquitectura.

RESUMO

Este traballo céntrase no estudo do vidro como material estrutural de primeira orde, analizando as diferentes tipoloxías que se poden atopar na construción arquitectónica dos últimos anos. Para iso, analízanse un conxunto de obras que experimentaron coas distintas posibilidades do material, conseguindo diversos elementos que soportan en gran medida os esforzos de compresión e que se combinan con outros materiais, como o aceiro e a madeira, para resolver a súa maior debilidade, a escasa resistencia aos esforzos de tracción. A partir dos exemplos expostos, ademais da súa tipoloxía e o seu comportamento estrutural, explícanse as fixacións e conectores que existen actualmente na construción con vidro. O punto central da análise é unha comparación entre as tipoloxías, na que se mostra como a partir duns elementos simples lineais chegaronse a conseguir estruturas superficiais e espaciais.

Palabras chave: vidro, estrutura, autoportante, tipoloxía, arquitectura.

ABSTRACT

This work focuses on glass study as a structural material of the first order, analysing the different types that can be found in architectural construction in recent years. For this, a set of works that have experimented with the different possibilities of the material are analysed, getting various elements largely supporting compressive stresses and being combined with other materials, such as steel and timber, to solve its biggest weakness, the poor resistance to tensile stresses. From the examples given, besides their typology and their structural behaviour, attachment and connectors that currently exist in glass construction are explained. The focus of the analysis is a comparison between typologies, where it is shown how surface and spatial structures were get from simple linear elements.

Keywords: glass, structure, self-supporting, typology, architecture.

ÍNDICE	PÁG.
1. Introducción.....	09/63
2. Breve resumen de la evolución del vidrio.	10/63
3. El vidrio como material estructural.....	11/63
3.1. Vidrio de uso estructural. El vidrio flotado.	11/63
3.1.1. Vidrio endurecido.	11/63
3.1.2. Vidrio laminado.	12/63
3.1.3. Vidrio laminado endurecido.	13/63
3.2. Propiedades del vidrio.....	13/63
3.3. Tipologías estructurales.....	14/63
3.3.1. Elementos lineales.....	16/63
3.3.1.1. Horizontales. Vigas y arcos.	16/63
3.3.1.1.1. Vigas.....	16/63
3.3.1.1.2. Cerchas.....	22/63
3.3.1.1.3. Arcos.....	24/63
3.3.1.2. Verticales. Soportes.	26/63
3.3.1.2.1. Columnas o pilares.	27/63
3.3.1.2.2. Montantes.	31/63
3.3.1.3. Horizontales y verticales. Pórticos.	32/63
3.3.2. Elementos superficiales.	34/63
3.3.2.1. Horizontales. Suelos y cubiertas.....	35/63
3.3.2.1.1. Losas.	35/63
3.3.2.1.2. Estructuras de placas plegadas.	36/63
3.3.2.1.3. Emparrillados.	40/63
3.3.2.2. Verticales. Muros.	41/63
3.3.2.2.1. Construcción sándwich.	41/63
3.3.3. Elementos espaciales.	42/63
3.3.3.1. Prisma de vidrio como módulo estructural.	42/63
3.3.3.2. Estructura de entramado espacial.....	43/63
3.4. Resumen tipologías.....	45/63
3.5. Estructuras mixtas.	48/63
3.5.1. Vidrio y madera.	48/63
3.5.2. Vidrio y acero.	49/63
4. Conclusiones.	50/63
5. Referencias bibliográficas.....	52/63
5.1. Libros.	52/63
5.2. Disertaciones y tesis académicas.	52/63
6. Bibliografía.....	52/63
6.1. Libros.	52/63
6.2. Disertaciones y tesis académicas.	53/63
6.3. Artículos de revista.	53/63
6.4. Blogs.....	53/63
6.5. Webs.	54/63
7. Procedencia de ilustraciones.	55/63

1. Introducción.

El vidrio es un material que ha evolucionado a lo largo de los años. Comenzó formando parte de las envolventes de los edificios, como elemento secundario que necesitaba del soporte de otros materiales (carpinterías de madera o metálicas), para pasar a componer los muros cortina y por último consiguiendo elementos estructurales como pilares, vigas, cerchas... en lo que se conoce como uso estructural del vidrio.

La idea de que la fragilidad del vidrio no lo hace apto para su uso estructural es equivocada, puesto que este material, utilizado en la fachada de casi todos los edificios en altura, está soportando grandes acciones de viento, muchas veces añadiéndose el factor de que estos paños de vidrio son practicables, con lo que se demuestra la idea de que el vidrio no es sólo un material de revestimiento.

En la actualidad el vidrio se usa en infinidad de elementos. Esto ha llevado a que los requerimientos que se le piden sean distintos a los del pasado. Se exigen respuestas satisfactorias referentes a la radiación solar que provoca la entrada masiva de luz y calor, el efecto invernadero y el aislamiento térmico y acústico. Esto se resuelve mediante el tratamiento del vidrio con algún tipo de resinas que actúen como aislantes. También se demandan las mayores dimensiones en la fabricación y la mejor respuesta mecánica que se pueda lograr.

La construcción en vidrio se ha visto impulsada con las medidas de protección del medio ambiente. El desarrollo de la "passive house" ha motivado la realización de grandes superficies acristaladas para el calentamiento natural del interior de las construcciones. Además, el impacto visual de este material es menor que el presentado por otros tipos de estructuras, por lo que su uso en rehabilitación en los últimos años se ha visto incrementado.

2. Breve resumen de la evolución del vidrio.

La obtención del vidrio con la técnica del soplado, entre los siglos II y I a.C. por parte de los fenicios, supuso una revolución en la construcción.

Aunque el vidrio se utilizó en la arquitectura a partir de ese momento, hasta el siglo XIX no se empieza a producir en serie, la técnica de fabricación se perfecciona y llega a otra escala de la arquitectura. Sin embargo, es en el siglo XX cuando se empieza a conseguir en tamaños más grandes. Sus primeras aplicaciones se llevan a cabo en las construcciones industriales, como la fábrica Fagus de Walter Gropius y Adolf Meyer (1911-1913) (Fig. 1). En estos proyectos estructura y cerramiento son dos elementos separados, postulado del Movimiento Moderno, por lo que los muros pueden estar compuestos por una gran cantidad de huecos.



Fig. 1. Fábrica Fagus. W. Gropius, A. Meyer, 1911 - 1913.



Fig. 2. Terminal 1 Charles de Gaulle, P. Andreu, 1967 - 1974.

A partir de la década de 1960 se presenta un nuevo proceso de fabricación, el vidrio flotado, utilizado como vidrio estructural. Es en este momento cuando empiezan a aparecer las grandes fachadas de vidrio, los llamados muros cortina. El vidrio en estos casos siempre se encontraba supeditado a subestructuras metálicas. Existen multitud de obras, por ejemplo la terminal 1 del aeropuerto Charles de Gaulle en París, de Paul Andreu (1967-1974) (Fig. 2) proyectada con fachadas suspendidas en vigas y conectadas con perfiles y tornillos de acero.

En 1986 se construye la Ciudad de las Ciencias y de la Industria en el parque de La Villette de París (Fig. 3), proyecto de Adrien Fainsilber y Peter Rice (ingeniero estructural), quien experimentó con vidrio colgado. Esta obra es clave para entender el paso del vidrio de material estructural de segundo a primer orden.



Fig. 3. Ciudad de las Ciencias y de la Industria, A. Fainsilber, 1986.

El desarrollo de los muros cortina ha motivado que los elementos de acero se hayan convertido en componentes del sistema estructural que a nivel visual tienen un papel secundario. Se buscan superficies vidriadas de enormes proporciones en las que los cables tensores o las fijaciones puntuales en forma de araña tengan el menor tamaño requerido para la sustentación de la estructura. Como ejemplo se indica la estación de trenes de Berlín del estudio gmp, architekten von Gerkan, Marg und Partner (2002-2006) (Figs. 4-5).



Fig. 4. Vista exterior fachada estación de Berlín, estudio gmp, 2002 - 2006.



Fig. 5. Vista interior fachada estación de Berlín, estudio gmp, 2002 - 2006.

En los últimos años se ha investigado en el desarrollo de diferentes tipologías. Los elementos lineales más sencillos (vigas o pilares) se han combinado para formar cerchas y elementos superficiales. En muchos casos han sido prototipos experimentales, que poco a poco se han intentado incorporar a las obras de arquitectura. Finalmente se ha dado paso a los elementos espaciales, con estructuras que son al mismo tiempo cubierta, muro y suelo de vidrio.

Todas estas tipologías serán incluidas y explicadas en la clasificación que se desarrolla en el apartado 3.3 del presente trabajo.

3. El vidrio como material estructural

El tipo de vidrio utilizado como material estructural ha variado a lo largo de los años. Si se consultan publicaciones como "El vidrio estructural" (Paricio, 2000) aparece una clasificación (vidrio laminado, templado/endurecido y armado) que en la actualidad podría considerarse obsoleta. Se trata de un tema que se está investigando continuamente por lo que es necesario buscar en los manuales más recientes que se encuentren en el mercado. La clasificación que a continuación se muestra se ha basado en "Glass in structures" (Nijisse, 2003) y "Glass structures" (Wurm, 2007).

3.1. Vidrio de uso estructural. El vidrio flotado.

El vidrio flotado, también llamado vidrio plano es el utilizado como material estructural. El procedimiento para conseguir cualquier tipo de vidrio consiste en el enfriamiento controlado de una mezcla en estado líquido que al convertirse en sólido mantiene su estructura molecular. Para conseguir vidrio plano se aprovecha la viscosidad del material, resistencia a fluir como un líquido, para incorporarle propiedades específicas a través del calentamiento y posterior enfriamiento (Vázquez Zaldívar, 2006).

El proceso de fabricación del vidrio flotado consiste en un baño de estaño a 1100°C, pasando a estado sólido a los 600°C. Se consigue una superficie lisa y transparente con un espesor entre 2 y 19 mm y tamaño máximo de 3,31 m x 6,00 m. El proceso se puede completar con otras características que se requieran: estéticas (color), estructurales (vidrio de seguridad) o de control solar. Sobre todo aquellas características que mejoren su forma de rotura, ya que lo hace en elementos de gran tamaño con bordes muy afilados.

Debido a la fragilidad que presenta el material, éste debe ser tratado con métodos que aumenten el umbral de agrietamiento, o con la incorporación de materiales dúctiles que aumenten su capacidad resistente e impidan el fallo total del elemento cuando se produzca el agrietamiento. Para afrontar esto, existen dos técnicas: endurecimiento del vidrio y laminación o estratificación de los paneles de vidrio.

3.1.1. Vidrio endurecido.

El proceso de fabricación del vidrio endurecido, también llamado vidrio templado, consiste en la compresión de la piel exterior del panel de vidrio. Esto elimina grietas y compensa las tensiones de tracción.

Su principal ventaja es la forma de rotura, debido a las tensiones acumuladas en él durante el proceso de fabricación. Lo hará

en cubos de pequeño tamaño, menos peligrosos que la rotura de un vidrio convencional pero no por eso no dañinos si se produce su caída desde una cierta altura. Sus fijaciones tienen un tamaño bastante reducido (sistemas de fijación por rótulas). Además resiste tensiones superficiales mayores que las del vidrio común.

El coste de producción del vidrio endurecido y del vidrio laminado, que se explicará en el siguiente apartado, es prácticamente el mismo, sin embargo sus espesores tienen una relación de 1:1,625, con lo que se necesita mayor espesor de laminado para conseguir la misma capacidad mecánica. Por tanto, si el objetivo del diseño es la resistencia mecánica, el templado será el más económico.

Las piezas se realizan a medida y después de esto se templan por lo que no se pueden modificar posteriormente.

Este tipo de vidrio también se puede conseguir mediante el reforzado por calor, tratamiento similar pero con temperaturas más bajas, no utilizado en España con demasiada frecuencia. No estalla en pequeños cubos pero tampoco se puede manipular posteriormente.

3.1.2. Vidrio laminado.

El vidrio laminado está compuesto por varias hojas de vidrio flotado que se yuxtaponen unas a otras interponiendo una lámina plástica adhesiva, normalmente butiral de polivinilo.

Las capas intermedias de adhesivos aumentan la capacidad resistente del vidrio, pues permitirán que no se desprendan las piezas fragmentadas en caso de rotura del vidrio. Esto se puede comprobar en el siguiente gráfico de elaboración propia (Fig. 6), que se basa en el diagrama de distribución de tensiones normales en una sección transversal de vidrio laminado del manual de Wurm (2007, p. 66).

El proceso de fabricación consiste en un par de rodillos por los que se desplaza la masa fundida del mismo. Una vez que la cinta se enfría, se corta el panel conseguido. Se trata de una superficie lisa o con textura con un espesor entre 4 y 10 mm (se llega hasta los 19 mm en algunos casos) y tamaño máximo de 2,50 m x 4,50 m.

No admite perforaciones para su fijación porque se rompe al concentrarse tensiones en las proximidades de la perforación. La exposición directa al exterior produce el envejecimiento de los adhesivos utilizados en las capas intermedias, por lo que habrá que proteger los cantos del vidrio.

Existe un subtipo, el vidrio armado, en cuyo proceso de laminación se añade una malla metálica para aumentar su resistencia. Su espesor será de 7 o 9 mm.

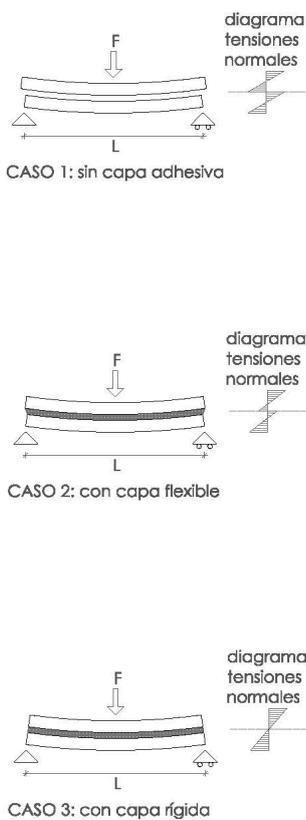


Fig. 6. Diferencias en el diagrama de distribución de tensiones según exista o no adhesivo y el tipo de éste en el vidrio laminado.

3.1.3. Vidrio laminado endurecido.

Para que un vidrio consiga la máxima seguridad se combinan los dos procesos que se han explicado, endurecido y laminado, dando lugar al vidrio laminado endurecido.

Este tipo de vidrio es el más recomendado para su uso como vidrio estructural debido a su buen comportamiento frente a los esfuerzos, otorgando seguridad en la construcción.

El proceso de fabricación, explicado a partir de los manuales consultados (Nijse, 2003, p. 13), se compone de 4 fases fundamentales que se explican a continuación (Figs. 7 a 10).

- Fase 1: se calienta el panel de vidrio flotado con todos los bordes y huecos pulidos.
- Fase 2: se ventila la piel exterior del panel para endurecerla.
- Fase 3: el interior queda caliente y la piel exterior endurecida.
- Fase 4: se comprime el panel produciendo tracciones en su interior.

3.2. Propiedades del vidrio

La propiedad que más caracteriza al vidrio es la fragilidad, es decir, la incapacidad de deformarse plásticamente para evitar la rotura ante tensiones localizadas demasiado elevadas. No tendrá la posibilidad de redistribuir la carga o absorber la energía de impacto, al contrario que otros materiales como el acero, con mucha resistencia para soportar las cargas.

Como comprobamos al estudiar el diagrama de tensión/deformación (Fig. 11), en el caso del vidrio no aparece el período plástico, que avisaría del fallo inminente del material. Por lo tanto es un material frágil, debido a la inexistencia de deformaciones elevadas que adviertan de la proximidad del fallo. Esto obliga a trabajar con un coeficiente de seguridad muy elevado.

Si el vidrio no está endurecido y se encuentra bajo carga permanente, es muy probable que se produzca el fallo estructural cuando se presente la primera grieta. Si está endurecido, las otras capas se encuentran en compresión y se contrarresta la tendencia que siempre tiene cualquier grieta a agrandarse en cuanto se produce.

Para la posible rotura también habrá que tener cuidado con el contacto del agua de manera prolongada, si es vidrio exterior, pues produce envejecimiento en el material. Y si se encuentra en posición horizontal, soportando "cargas permanentes que le producen fatiga" (Paricio, 2000, p. 17).

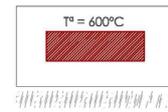


Fig. 7. Fase 1 del proceso de fabricación del vidrio laminado endurecido.

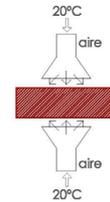


Fig. 8. Fase 2 del proceso de fabricación del vidrio laminado endurecido.

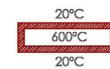


Fig. 9. Fase 3 del proceso de fabricación del vidrio laminado endurecido.

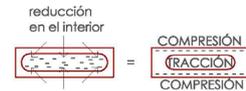


Fig. 10. Fase 4 del proceso de fabricación del vidrio laminado endurecido.

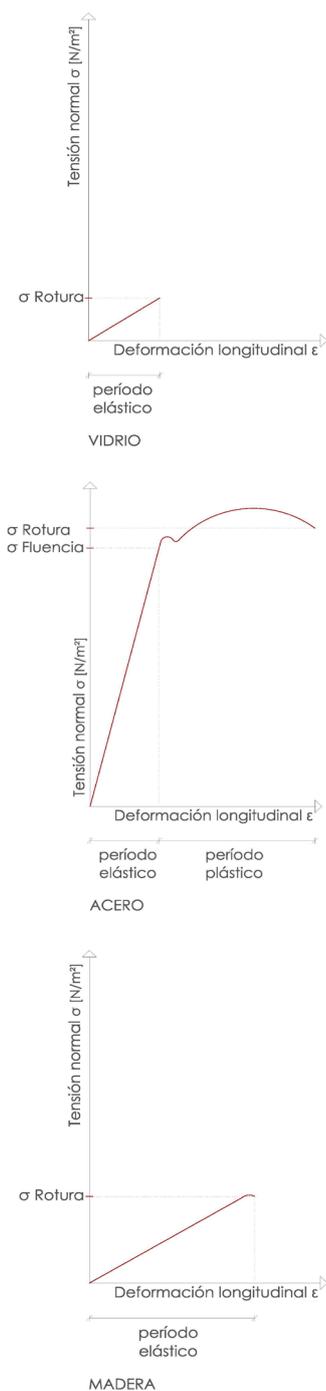


Fig. 11. Diagramas de tensión/deformación del vidrio, acero y madera en los que se indica la resistencia de estos materiales a la tracción (gráficos a escala).

Se trata de un excelente material para soportar compresiones, ya que por su comportamiento quebradizo la resistencia para tolerarlas es diez veces la de las tracciones. Además es isotrópico, el mismo comportamiento en las dos direcciones.

Según Winter et al. (2010), la compresión teórica soportada por el vidrio es de 700 a 900 N/mm², mientras que la tracción que aguanta es de aproximadamente 45 N/mm².

Su resistencia a largo plazo bajo carga permanente es alrededor de un tercio de su resistencia inicial a corto plazo. Esto es debido a la tendencia de las grietas a aumentar de tamaño.

Es muy apto para conformar la piel de los edificios por su alto grado de transparencia (absorbe y refleja la luz recibida) y su buen comportamiento químico ante agentes corrosivos (ácidos y sales). La sílice en disolución con ácido fluorhídrico se trata del único compuesto que es capaz de atacar su superficie (Wurm, 2007, p. 39).

Su durabilidad es bastante alta y el mantenimiento bajo, basado principalmente en la limpieza de sus superficies transparentes. Mientras que el espesor del vidrio suele ser pequeño en relación a su longitud y anchura.

Para el diseño de las uniones y soportes se buscará un material muy elástico, repartiendo las tensiones que se ejercen sobre el vidrio en una superficie de contacto suficientemente amplia.

3.3. Tipologías estructurales.

La presente clasificación tipológica se basa en las dimensiones de la geometría de la estructura. De una manera clara y simple, se dividen los elementos en lineales, superficiales o espaciales. Es decir, se realizará la clasificación atendiendo a los planos dimensionales en los que se presenten: 2D o 3D (Fig. 12).

Para entender mejor cada tipo estructural, se acompaña de una serie de obras construidas y de prototipos, en el caso de los elementos más novedosos. Además, cada categoría se dividirá en dos subcategorías según la colocación del elemento, en horizontal o vertical, pues se entiende que de esta manera trabajará de distinta forma.

Por último, se indica un cuadro comparativo de las diversas tipologías, pues como se ha explicado en el resumen del trabajo, a partir de los elementos simples lineales se consiguen las estructuras superficiales y espaciales. También se indicarán las similitudes de los distintos tipos estructurales, ya que en todos existen las limitaciones de luz por el tamaño de fabricación de los paneles de vidrio y se diseñan teniendo muy presente la fragilidad de éste, evitando la tracción y buscando la compresión de los elementos.

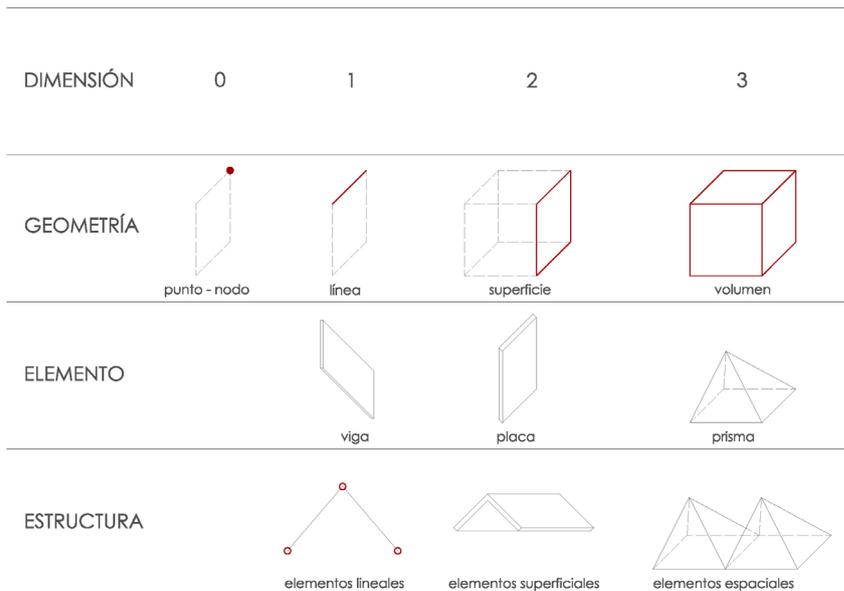


Fig. 12. Esquema explicativo de los tipos estructurales según la dimensión.

Antes de comenzar a analizar cada tipología, se explican los tipos más comunes de uniones entre los diversos elementos. Estas conexiones estarán presentes en los ejemplos aportados, indistintamente de la categoría (lineal, superficial, espacial) a la que pertenezcan.

– Agarre por fricción/conector de abrazadera: fue el tipo de unión que se utilizó en las primeras estructuras de vidrio, cerrando los bordes de los elementos a unir. Actualmente se evita su uso ya que tiene una alta presencia visual y no es posible utilizarla con vidrio laminado de seguridad al no poder mezclarse con adhesivo.



Fig. 14. Tipos de unión de agarre por fricción y conector de abrazadera.

– Conexiones con pernos/atornilladas: es el tipo de unión más recomendada. Los pernos pueden quedar encajados entre las dos piezas a unir, dejando enrasada la superficie, en forma de botón transpasando el elemento de vidrio o dejarse sin penetrar de todo. Estos dos casos se indican en las Fig. 15 y 17. En este grupo se incluyen las denominadas “arañas” de los muros cortina (Fig. 17).



Fig. 16. Tipos de conexión con pernos/ atornilladas: fijación de botón, avellanada y especial.



Fig. 13. Unión de agarre por fricción en el Sony Center, Berlín.



Fig. 15. Fijación atornillada avellanada en una casa en Barnes, Londres.

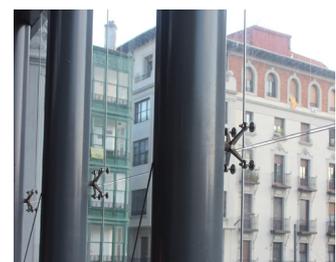


Fig. 17. Fijación de araña en la fachada del mercado de la Ribera, Bilbao. Rehabilitación de Emilio Puertas.



Fig. 18. Unión de las piezas de vidrio mediante adhesivo en la Garden Room, Coffey Architects.

– Adhesivos: es el tipo de unión más investigada en la actualidad. Al ser materiales elásticos aumentan las tensiones en ellos pero las reducen, de este modo, en el vidrio. Visualmente son muy solicitados ya que los bordes de las distintas piezas de vidrio van unidos directamente entre sí. Los tipos de adhesivos estructurales más habituales son los poliuretanos, los acrilatos, las resinas epoxi, las siliconas y los polímeros híbridos, siendo estos dos últimos los más aplicados en estructuras.

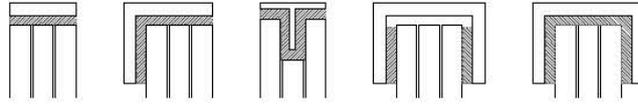


Fig. 19. Tipos de unión con adhesivo.

3.3.1. Elementos lineales.

Los elementos lineales son los componentes esenciales de cualquier estructura. A partir de la combinación y unión de distintos elementos lineales se conseguirán estructuras superficiales y espaciales.

Podrán colocarse en posición horizontal o vertical, consiguiendo así vigas, cerchas, arcos, pilares, montantes y pórticos. La posibilidad de pandeo es un factor muy importante a tener en cuenta, ya que se trata de piezas muy esbeltas. Tendrán mejor comportamiento si se encuentran en posición horizontal. En este caso el pandeo es lateral y la fuerza que lo produce es menor que en los elementos verticales, ya que a esta fuerza no se suma la originada por el peso propio del elemento, sino que actúa en la dirección perpendicular (Fig. 20 - 21).



Fig. 20. Pandeo en elemento lineal vertical.

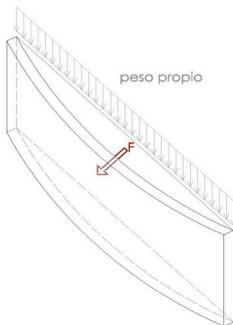


Fig. 21. Pandeo lateral en elemento lineal horizontal.

3.3.1.1. Horizontales. Vigas y arcos.

Los elementos horizontales son los más utilizados. Fueron los primeros en emplearse como estructurales por lo que su uso está extendido. A continuación se indican los elementos que se pueden conseguir con este material.

3.3.1.1.1. Vigas.

Al tratarse de elementos lineales han sido investigados desde que se comenzó a utilizar el vidrio como material estructural. Son numerosos los ejemplos que se podrían recoger en esta categoría, por lo que se han elegido casos diferentes entre sí. De este modo, se realiza una comparativa de las diferentes soluciones que nos encontramos en la actualidad.

La esbeltez frente a pandeo lateral de estas piezas suele ser elevada debido al poco espesor de las láminas de vidrio. La lon-

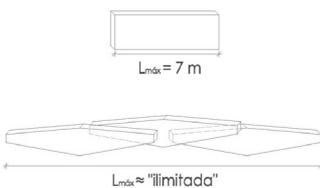


Fig. 22. Luces máximas de vigas según se compongan de una o varias piezas.

gitud máxima de una pieza de vidrio es de 7 metros debido a su producción. Sin embargo, existen casos, como la cubierta de vidrio para la International Chamber of Commerce (IHK) en Munich, proyecto de Betsch Architekten en 2003 (Fig. 23 - 24), en los que se combinan varias piezas independientes de vidrio con articulaciones a tope que permiten crear secciones transversales más rígidas, consiguiendo así mayores luces que las establecidas por la producción.

Se hace una clasificación de 4 tipos de vigas según el tipo de apoyo y si tienen o no voladizo. Cada una se explicará a partir de uno o dos ejemplos indicando datos como la luz, la esbeltez y las piezas que la componen.

– Tipo 1: viga biapoyada.

▪ Ejemplo analizado: Glass Link, James Vincent Czajka, JVC Architect, American Academy of Arts and Letters, Nueva York, EEUU, 2009.

En este caso, el vidrio es utilizado en una estructura que sirve de unión entre dos edificios existentes. Buena elección para su uso en rehabilitación, optar por un material que pase desapercibido para no restarle protagonismo a la construcción existente.

Con este ejemplo se puede comprobar la versatilidad del material, consiguiendo la forma requerida para el lugar (viga en forma triangular en relación con las formas de los frontones de los edificios existentes) y el tamaño necesario (luz de 3,80 m, la separación entre los edificios de la Academia).

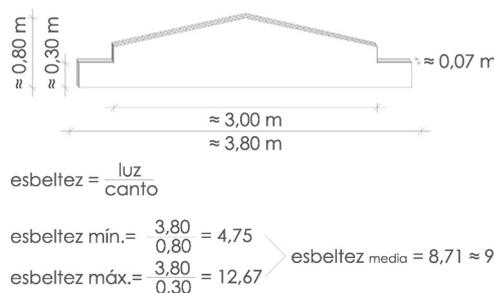


Fig. 27. Viga de vidrio de Glass Link. Relación entre la luz y el canto lográndose una esbeltez media de 9.

Se trata de un volumen compuesto de vidrio en su totalidad (cubierta, pared, suelo) a excepción de los perfiles de acero y bronce en contacto con el terreno, utilizados para la recogida de agua. Las paredes están formadas por 2 paneles individuales de un vidrio laminado con una altura de 4,88 m y 3,00 m de ancho. La cubierta se consigue con 2 láminas de vidrio encima de 3 vigas de vidrio, apoyadas a su vez en las paredes existentes de los edificios de la Academia, consiguiendo así el sistema biapoyado. El suelo también se decide hacer en vidrio, a partir de 16 paneles translúcidos que permiten iluminarlo desde abajo.



Fig. 23. Cubierta de IHK en Munich, Betsch Architekten, 2003.



Fig. 24. Unión de las vigas en la cubierta de IHK de Munich, Betsch Architekten, 2003.

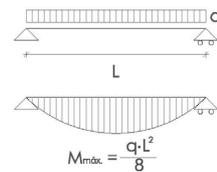


Fig. 25. Viga biapoyada. Esquema gráfico y diagrama de momentos.



Fig. 26. American Academy of Arts and Letters, 2009.



Fig. 28. Vigas de vidrio biapoyadas.

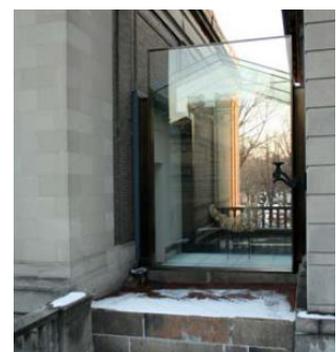


Fig. 29. Conexión de edificios.

Las uniones de los distintos elementos de vidrio se realizan con adhesivos. En la actualidad es el tipo de unión más utilizada, ya que reduce el peso de la conexión y distribuye mejor las cargas en las articulaciones.

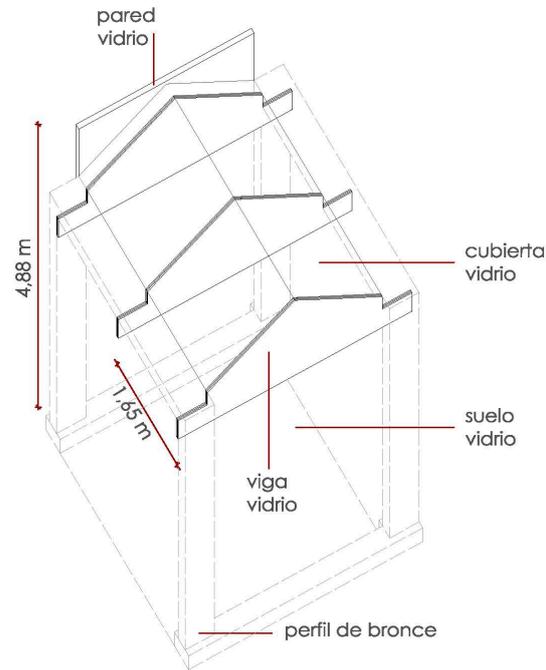


Fig. 30. Esquema del conjunto arquitectónico de Glass Link.



Fig. 31. Vista desde el interior de Middlemiss Flat.

A continuación, se añade otro ejemplo para indicar la gran gama de uniones existentes.

- Ejemplo analizado: Middlemiss Flat, Paul Archer & Fluid Structures, Londres, Reino Unido, 2003.

Se trata de otro volumen compuesto por cubierta y paredes de vidrio, siendo el suelo de pizarra.



Fig. 32. Vista de las 4 vigas de Middlemiss Flat.

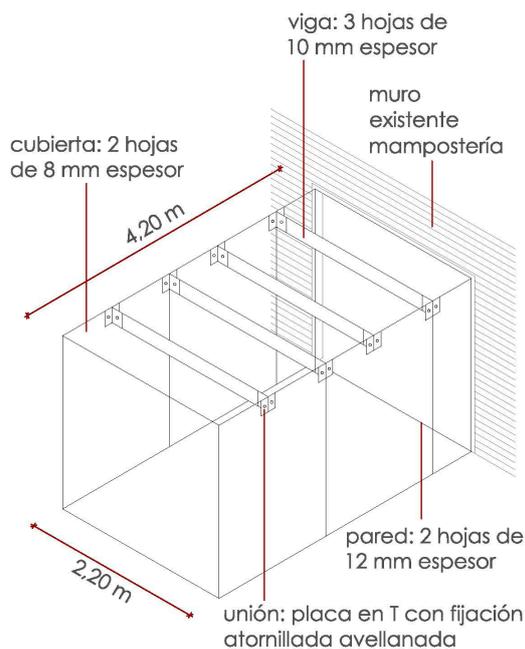


Fig. 33. Esquema del conjunto arquitectónico de Middlemiss Flat.

En este caso, las vigas se conectan a las paredes mediante una conexión con pernos avellanados y placa en T. De esta manera, el vidrio se combina con materiales duros y resistentes, como el acero inoxidable, mejorando la capacidad estructural.

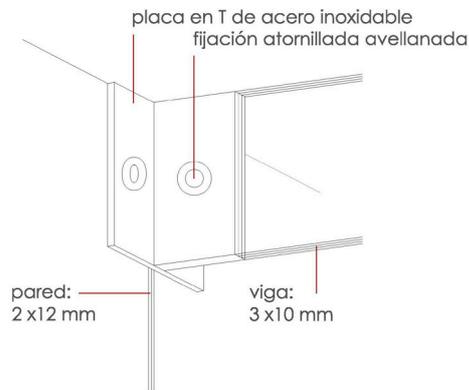


Fig. 34. Unión entre viga y pared en Middlemiss Flat.

– Tipo 2: viga apoyada empotrada.

▪ Ejemplo analizado: Church Cottage, Paul Archer & Fluid Structures, Bristol, Reino Unido, 2001.

El proyecto consistió en la realización de una estancia anexa a una casa rehabilitada del siglo XVII. Para ello se utilizó una cubierta formada por paneles de doble acristalamiento apoyados en una estructura compuesta por 5 vigas de vidrio templado.

La conexión entre piedra - vidrio y ladrillo - vidrio se realiza con mucha sutileza, quedando oculta la unión entre los materiales. Se logra la idea de una viga que flota, en la que no existen los apoyos.

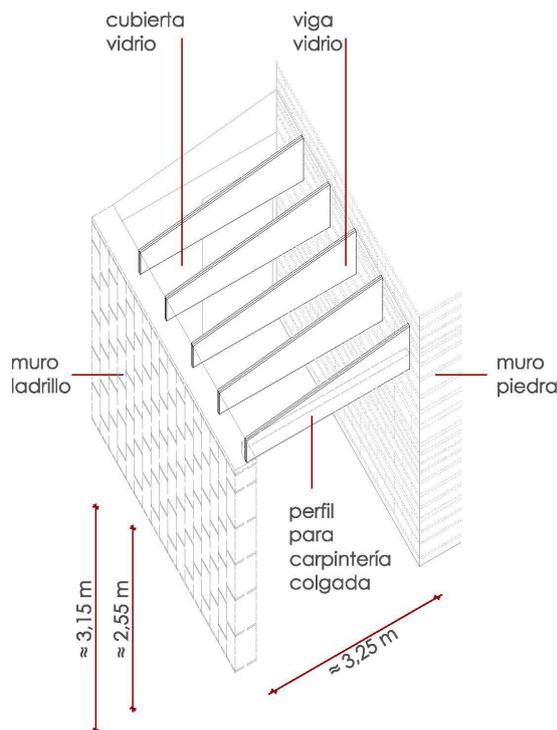
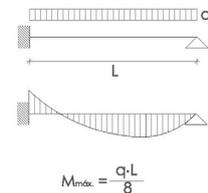


Fig. 38. Esquema del conjunto arquitectónico de Church Cottage.



Fig. 35. Vista exterior de Middlemiss Flat.



$$M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{8}$$

Fig. 36. Viga apoyada empotrada. Esquema gráfico y diagrama de momentos.



Fig. 37. Vista del anexo de Church Cottage.

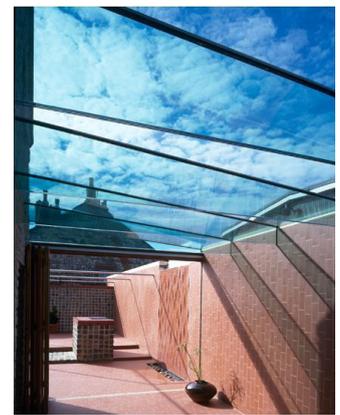


Fig. 39. Vigas de vidrio de Church Cottage.



Fig. 40. Construcción anexo Church Cottage.



$$\text{esbeltez} = \frac{\text{luz}}{\text{canto}}$$

$$\text{esbeltez m\u00edn.} = \frac{3,25}{0,60} = 5,42$$

$$\text{esbeltez m\u00e1x.} = \frac{3,25}{0,30} = 10,83$$

$$\text{esbeltez media} = 8,125 \approx 8$$

Fig. 41. Viga de vidrio de Church Cottage. Relaci\u00f3n entre la luz y el canto logrando una esbeltez media de 8.

– Tipo 3: viga en voladizo.

▪ Ejemplo analizado: Yurakucho Canopy, Rafael Vi\u00f1oly (dise\u00f1o) y Tim Macfarlane (estructura), Tokio, Jap\u00f3n, 1996.

El proyecto que se analiza a continuaci\u00f3n es la marquesina de acceso al metro en el Foro Internacional de Tokio, espacio destinado a espect\u00e1culos culturales y eventos de negocios. Se compone en su totalidad de vidrio, a excepci\u00f3n de los pernos de acero, con una dimensi\u00f3n de 35 x 16 pies, aproximadamente 5 x 11 metros.

La marquesina se realiza con 3 vigas de vidrio formadas por 7 l\u00e1minas triangulares, cada una compuesta por 2 hojas con un espesor total de 19 mm. El n\u00famero de l\u00e1minas aumenta hacia el apoyo en relaci\u00f3n con el momento de flexi\u00f3n que se produce y la conexi\u00f3n de \u00e9stas con el pasador. La uni\u00f3n entre las l\u00e1minas es atornillada y con un solapamiento de aproximadamente 2 metros desde el punto de conexi\u00f3n que minimiza el esfuerzo en este punto. De este modo se crean uniones a tope en la direcci\u00f3n longitudinal y secciones transversales m\u00e1s r\u00edgidas.

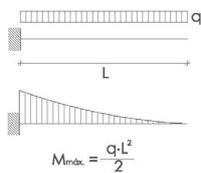


Fig. 42. Viga en voladizo. Esquema gr\u00e1fico y diagrama de momentos.



Fig. 43. Yurakucho Canopy, R. Vi\u00f1oly, 1996.

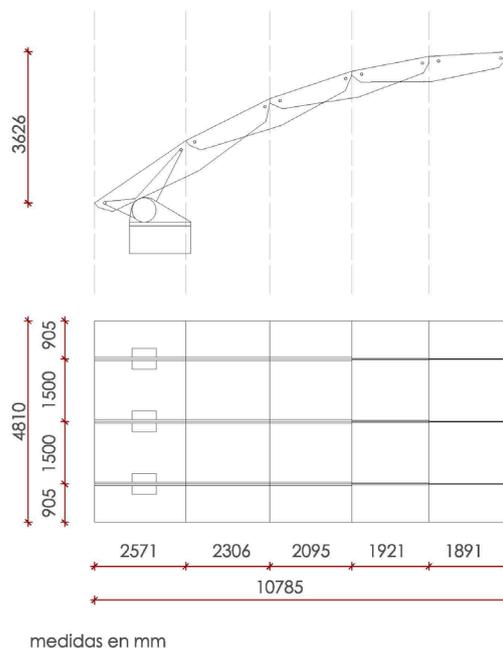


Fig. 44. Esquema de planta y alzado de Yurakucho Canopy.

El punto más interesante del proyecto es la manera en la que se hizo la unión de las distintas láminas. Se realizó con la máxima seguridad para evitar tensiones localizadas en este punto. Se perforó el vidrio con una broca de diamante para que el agujero tuviese bordes biselados exactos en cada cara del vidrio y conseguir un acabado perfectamente pulido.

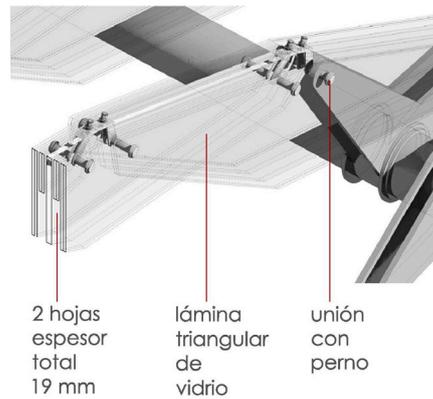


Fig. 46. Detalle de la unión de las distintas láminas de vidrio.

– Tipo 4: viga biapoyada con doble voladizo.

▪ Ejemplo analizado: Marquesina en la plaza de la Estación de Nijmegen, Holanda. 1997-1999.

La marquesina para la plaza de la estación de Nijmegen es una cubierta de vidrio en voladizo soportada por grandes perfiles de acero. El apoyo de ésta es una viga de acero HEA-300 colocada en posición transversal, sustentada por 2 columnas de acero. Sobre la HEA 300 se encuentran una serie de vigas de vidrio, compuestas por 3 capas de 10 mm de vidrio flotado laminado, colocadas en perpendicular al eje de la misma.

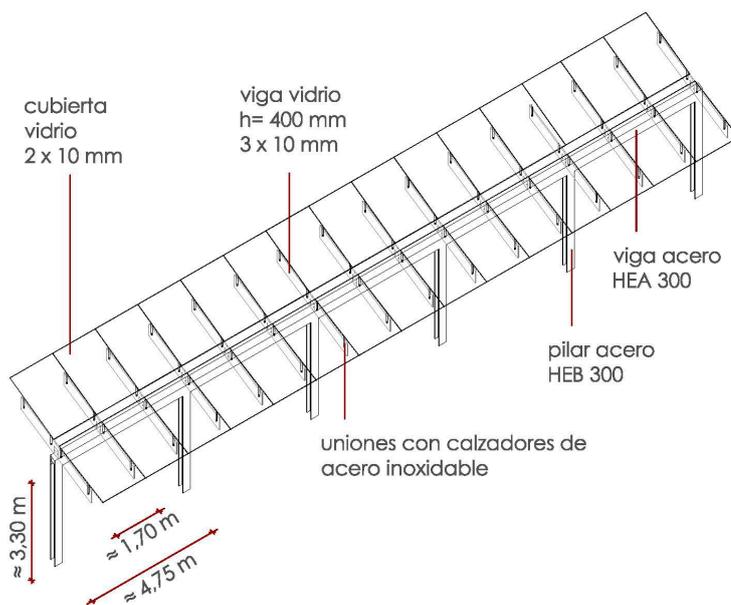


Fig. 49. Esquema del conjunto arquitectónico de la marquesina de la estación de Nijmegen.



Fig. 45. Yurakucho Canopy, R. Viñoly, 1996.

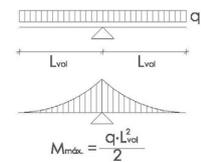


Fig. 47. Viga biapoyada con doble voladizo. Esquema gráfico y diagrama de momentos.



Fig. 48. Marquesina en construcción en la estación de Nijmegen.



Fig. 50. Marquesina en la actualidad con el refuerzo en acero.

La cubierta la conforman losas inclinadas de vidrio compuestas por 2 capas de 10 mm de vidrio flotado laminado que se conectan a las vigas con pequeños calzadores de acero inoxidable.

En el montaje de la marquesina, un pequeño orificio provocó una grieta que hizo romper los paneles, los cuales tuvieron que ser reemplazados. Esto provocó una gran incertidumbre sobre su seguridad entre los usuarios, motivando la inclusión en el proyecto de cables de acero y posteriormente vigas de acero (Fig. 50).

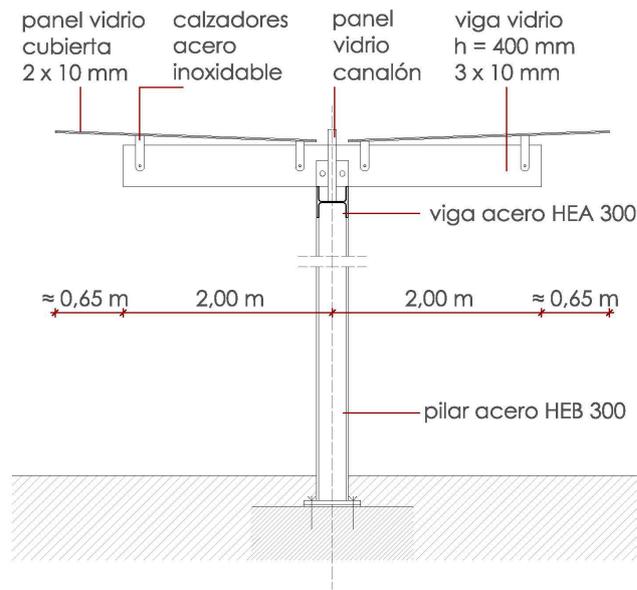


Fig. 51. Detalle de la solución de vidrio y acero de la estación de Nijmegen.

En todos los ejemplos aportados se comprueba que para la seguridad y mejor comportamiento del material se combinan varias hojas de vidrio para formar las vigas. El patrón más usual podría decirse que es 3 capas de 10 mm.

3.3.1.1.2. Cerchas.

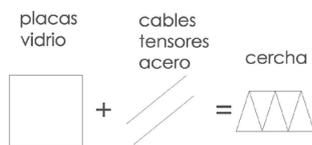


Fig. 52. Formación estructuras de placas en cercha.

Son estructuras compuestas por distintos elementos de vidrio y acero que combinados crean una celosía. Esta tipología se encuentra en prototipos investigados y no se ha aplicado en ningún edificio hasta la fecha. Surgió con la idea de mejorar las vigas, aumentando la luz que éstas podían lograr y evitando la iniciación y propagación de grietas causadas por las tensiones de tracción.

Los diversos elementos que forman cada celosía crean un "todo" que responde a cualquier situación de carga. Los patrones triangulares consiguen tensiones normales favorables y evitan esfuerzos de flexión desfavorables. La unión entre vidrio y acero es excelente ya que cada material está cargado con el esfuerzo más favorable a sí mismo, vidrio en compresión y acero a tracción.

– Los elementos más cortos resuelven el pandeo.

– Los elementos verticales y diagonales transmiten las fuerzas de corte o cizallamiento, que aumentan hacia los soportes. Según los tipos de viga serán fuerzas de compresión, en el cordón superior si la succión del viento es menor que el peso propio de la estructura, o tracción.

– Las diagonales son de materiales planos para evitar puntos de conexión y se hacen las articulaciones de bisagra en el cordón superior.

Como condicionantes para la realización de este tipo de estructuras nos encontramos con que las uniones son articuladas.

En la Universidad de Pisa, un equipo de investigación ha realizado 3 prototipos de vigas en cercha, TVT α , TVT β y TVT γ . A continuación se indican sus características principales.

- Ejemplo analizado: TVT - vigas tensegridad, Maurizio Froli, investigación Universidad de Pisa, Italia, 2006 y 2012.

El diseño de estas vigas en cercha se basa en el principio de tensegridad, estructuras con elementos aislados comprimidos dentro de una red tensada continua. Surge a partir de unos requisitos básicos de alta transparencia, modularidad, colapso no quebradizo, ductilidad y resistencia a prueba de fallos.

La modularidad se consigue creando un entramado de triángulos equiláteros con sólo 3 tipos de nudos en toda la celosía. Estos triángulos son individualizados, es decir, permiten en caso de rotura la sustitución individual de un panel y no de toda la viga.

Las conexiones entre los paneles de vidrio se caracterizan por la ausencia de agujeros, pernos y adhesivos que podrían causar concentración de tensiones en estos puntos. Se ensamblan entre sí con barras pretensadas longitudinales y diagonales de acero que empujan los vértices de los paneles hacia los nudos de acero.

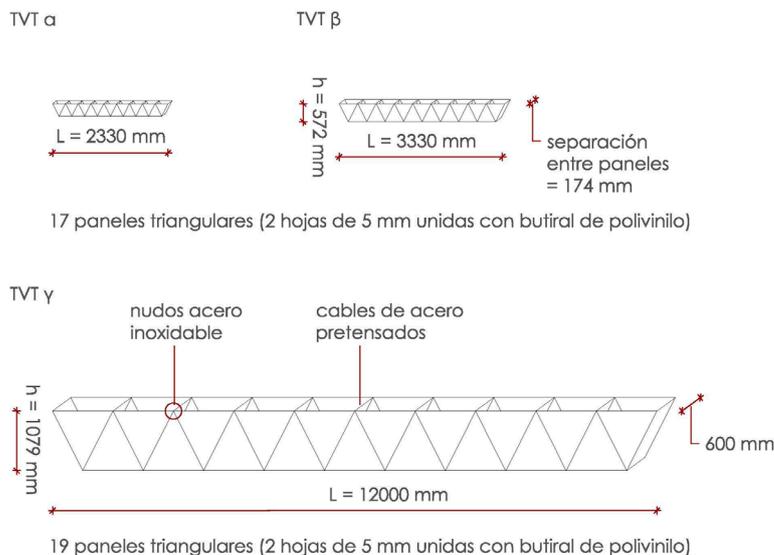


Fig. 56. Esquemas de los 3 prototipos de vigas en cercha TVT.

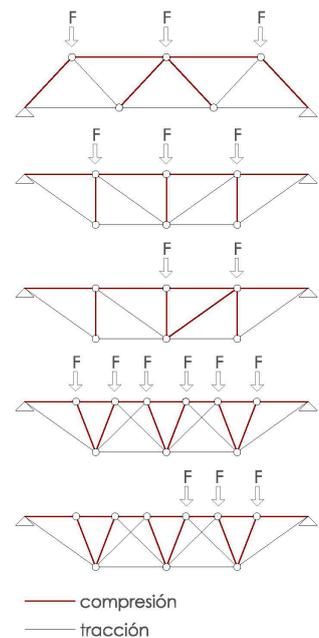


Fig. 53. Distribución de compresión y tracción en los elementos de una cercha.



Fig. 54. Vista del modelo TVT β , M. Froli, 2006.



Fig. 55. Nudo del modelo TVT β , M. Froli, 2006.



Fig. 57. Vista superior del modelo TVT β , M. Froli, 2006.

3.3.1.1.3. Arcos.



Fig. 58. Transformación de viga en arco.

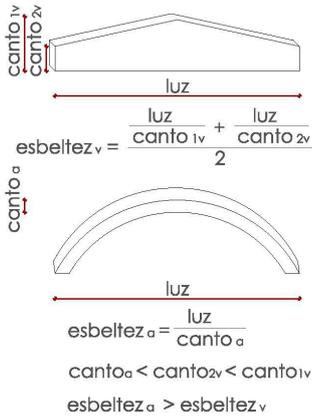
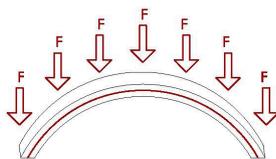


Fig. 59. Relación en la esbeltez entre vigas y arcos.



— deformación que se produce de acuerdo con su geometría

Fig. 60. Carga de compresión y deformación producida en el arco.



Fig. 61. Esquema gráfico arco tipo 1.



Fig. 62. Glasbogen 2, M. Kuttener y F. Meier, 1998.

La tipología estructural de arco se podría explicar de manera simplificada como una viga curva, como se indica en la Fig. 58. Se consigue una mayor altura en las piezas a la vez que se mantiene constante la esbeltez (relación entre luz y canto). Al contrario que en el caso de las vigas, donde para mayores alturas hay que recurrir a aumentar la esbeltez de la pieza (Fig. 59).

La forma convexa de esta tipología es la mejor para el uso del vidrio, ya que se encuentra cargada a compresión, siendo el efecto mejor soportado por el material. Las formas cóncavas y curvas en varias direcciones podrían producir cargas de tracción en los elementos de soporte de las cargas, provocando el colapso inminente de la estructura por rotura frágil a través de concentraciones de esfuerzos. Por lo tanto, los arcos presentan una serie de ventajas: buen comportamiento a la deformación, buenas tolerancias y buen comportamiento durante el levantamiento.

En los ejemplos que se exponen a continuación se comprueban los 2 tipos de arcos que se han realizado, dejando un tercero (el arco de 3 dimensiones) para su correspondiente apartado, estructuras espaciales. Se diferencian en si necesitan o no tensores de arriostramiento y en la dirección que tiene la unión de las diferentes láminas que lo conforman, existiendo los que se unen en la dirección transversal de las láminas (lado corto) y los que lo hacen en la longitudinal (lado largo).

– Tipo 1: arco de varias láminas unidas en dirección transversal y con tensores.

▪ Ejemplo analizado: Glasbogen 2, M. Kuttener y F. Meier, Düsseldorf, Alemania, 1998.

Este proyecto fue un prototipo realizado por la Universidad de Stuttgart y el departamento de investigación "Building with Glass" del Institute for Light Surface Structures para la exposición de Glasstec '98. Consistió en realizar un arco de vidrio para estudiar el comportamiento mecánico (resistencia a corte o cizalladura a largo plazo y a pandeo) que presentaba una superficie de vidrio comprimida.

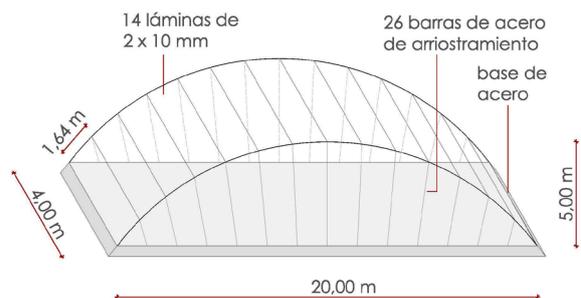


Fig. 63. Esquema del prototipo de arco Glasbogen II.

El arco se compone de 14 paneles de 4,00 x 1,64 m realizados con 2 capas de 10 mm de vidrio laminado triplex. La estabilización se consiguió mediante el arriostramiento hacia la base de acero a partir de la colocación de barras de acero y de reforzar las áreas de borde con 3 tiras de 160 x 12 mm de vidrio laminado triplex.

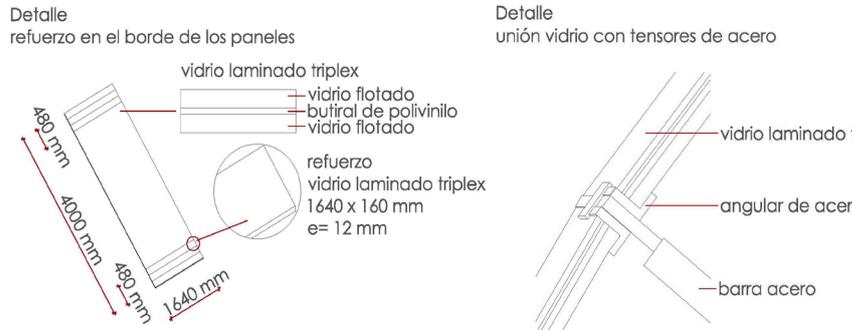


Fig. 64. Detalle del refuerzo en el borde de los paneles y de la unión entre tensor de acero y vidrio.

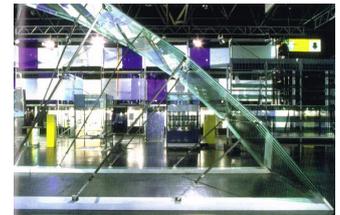


Fig. 65. Glasbogen 2. Arriostramiento del arco de vidrio con barras de acero, 1998.

- Tipo 2: arco de varias láminas unidas en dirección longitudinal y sin tensores.

▪ Ejemplo analizado: Glasbogen, proyecto para Glasig AG, FAT LAB (Andreas Fuchs), 2008.

Este arco de vidrio es un proyecto de Andreas Fuchs realizado en colaboración con Glasig AG y presentado en la exposición Glasstec en Düsseldorf en 2009. Se trata de un arco triarticulado, ya que las láminas de vidrio en forma de U se unen en el centro para conseguir mayor luz de la que se lograría con una sola lámina entre los apoyos.

Con este prototipo se aprecia el potencial que pueden tener las láminas de vidrio en forma de U en posición horizontal y para su uso en cubiertas.

Este arco consta de 20 segmentos curvos en forma de U, con una longitud de 7 m cada uno. El arco consigue así una luz libre de 12 m con un espesor de vidrio de 7 mm y un peso total de 555 kg.



Fig. 66. Esquema gráfico arco tipo 2.

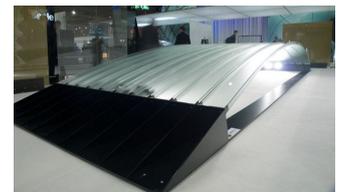


Fig. 67. Glasbogen, FAT LAB (Andreas Fuchs), 2008.

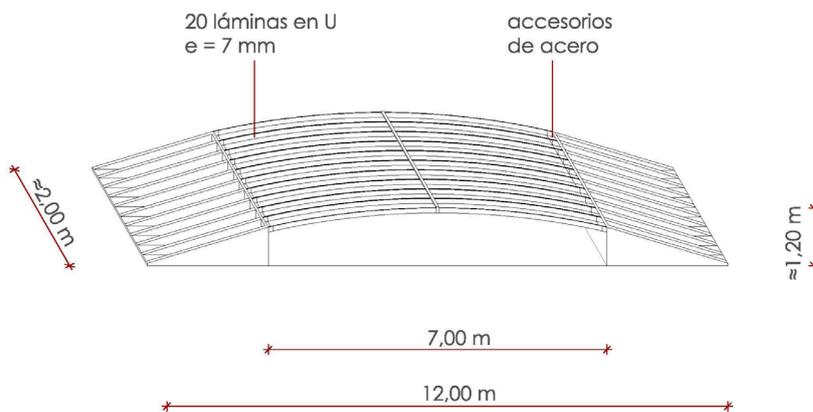


Fig. 68. Esquema del prototipo de arco realizado por A. Fuchs.

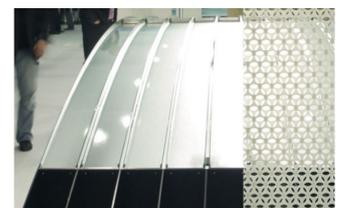


Fig. 69. Glasbogen. Unión longitudinal de los paneles, 2008.

Las hojas de vidrio se conectan entre sí con accesorios de acero. Se añade una capa elastomérica para acomodar las posibles desviaciones angulares.

Detalle
unión vidrio con accesorios de acero

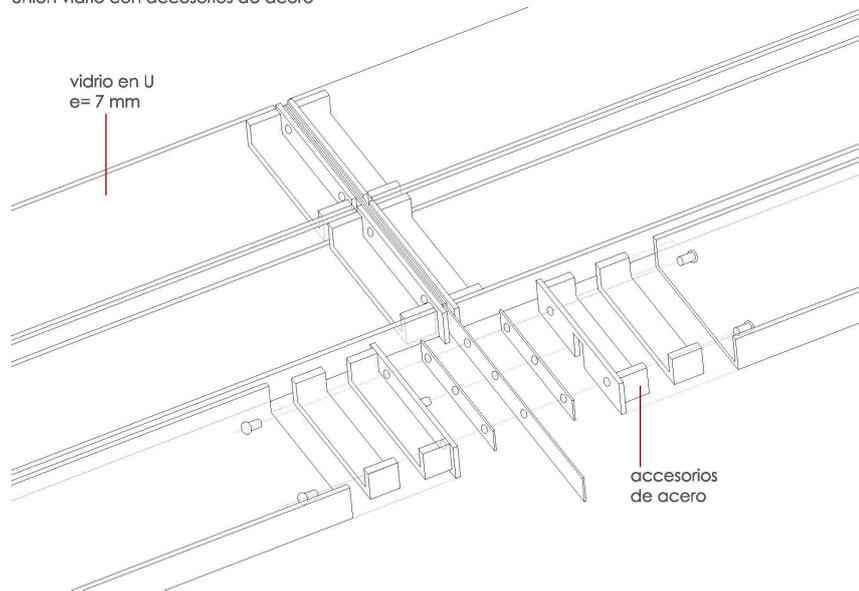


Fig. 70. Unión entre los panales de vidrio en forma de U con accesorios de acero.

3.3.1.2. Verticales. Soportes.

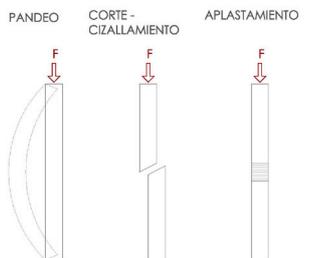


Fig. 71. Tipos de rotura en elementos verticales.

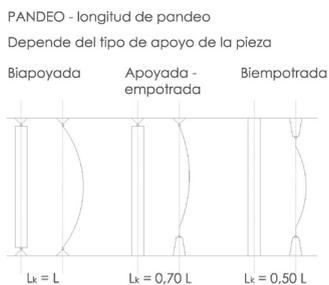


Fig. 72. Longitud de pandeo según el tipo de apoyo de la pieza.

Los soportes son elementos muy importantes en las edificaciones, ya que transmiten las cargas desde los planos horizontales hasta la cimentación. Se clasifican en dos grupos, los pilares y los montantes. Los pilares son elementos exentos dentro del conjunto estructural mientras que los montantes son piezas verticales que forman parte del entramado que compone un paramento vertical, como en el caso de un muro cortina. Por lo tanto, los pilares tendrán que soportar más cargas que los montantes.

Como se indicó en los esquemas de la página 16, el pandeo en elementos verticales es un valor relevante. Debido al reducido espesor de las piezas de vidrio, la esbeltez es muy elevada en relación con el pandeo fuera del plano. El pandeo vendrá provocado por fuerzas de compresión, frente a las que el vidrio presenta elevada resistencia pero que pueden producir rotura en el caso de esta tipología. Este fenómeno dará lugar a pequeñas tensiones de tracción que provocarán grietas en la pieza de vidrio. Es por este motivo que una columna de vidrio podría en un principio parecerse una mala solución como elemento estructural.

Las formas de colapso en una columna son 3, ordenadas de menor a mayor fuerza necesaria para producirse ese fenómeno:

– Pandeo: se trata del caso más crítico. De repente, se produce la rotura en el medio de la pieza debido a las tensiones de tracción generadas por el fallo por flexión de la pieza.

– Corte o cizallamiento: se desplaza una parte de la pieza con la otra produciéndose el fallo de la estructura.

– Aplastamiento: el elemento cargado a compresión va cediendo poco a poco hasta que se produce el derrumbamiento del elemento.

Todo esto ha motivado que no se hayan realizado muchas obras con pilares de vidrio, por el miedo del constructor al colapso. Sin embargo, poco a poco se están investigando distintas soluciones para en un futuro no muy lejano poder aplicarse esta tipología en edificios de varias alturas.

Dentro de la distinción que se hace en este apartado entre pilares y montantes también se realiza una clasificación según la geometría de los mismos, existiendo los tipos que se indican a continuación.

3.3.1.2.1. Columnas o pilares.

Según se explica en el libro "Glass in structures" (Nijse, 2003, p. 69), una columna de vidrio que sea segura se puede conseguir de tres formas distintas: pegando varias barras masivas de vidrio, con varios cilindros de vidrio unidos o con varios paneles rectangulares (Fig. 73). En todos los casos se componen de varias placas de vidrio, para evitar el pandeo que se produciría en elementos tan esbeltos. Existe otro tipo en el que se combina un tubo de vidrio con placas de acero en el apoyo de cada uno de éstos.

Esta metodología se acompaña de un caso práctico, una casa experimental en Holanda en 1993, caso "Holten", en la que se probaron los 3 tipos de columna aquí explicados. Este pilar, con una altura de 2,90 m, debería soportar una carga de 35 kN y las 3 opciones investigadas se indican en la Fig. 74.

Por lo tanto, existen dos grandes grupos de tipos de columnas, las cilíndricas y las prismáticas, en las que habrá diferentes modelos de cada una.

– Tipo 1: cilíndricas.

Este grupo de tipos de columnas se compone por aquellas que se obtienen de la unión de un tubo de vidrio con otros materiales como el acero, de la unión de varias barras masivas de vidrio mediante pegamento UV-activo o con varios cilindros concéntricos separados por un material adhesivo que normalmente es una resina epoxi. En los tres ejemplos que se exponen a continuación se podrá entender estas diferencias.

– Unión de vidrio con acero.

▪ Ejemplo analizado: escultura vidrio Tensegridad, Stefan Gose y Patrick Teuffel, exposición Glasstec '96, Düsseldorf, 1996.

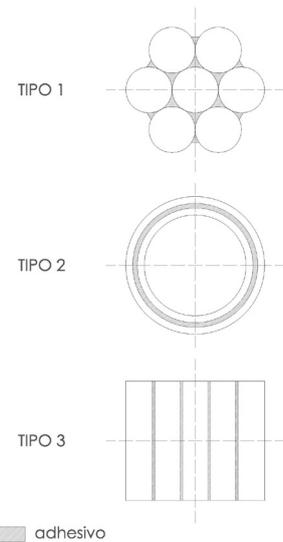


Fig. 73. Formación de los diversos tipos de columnas.

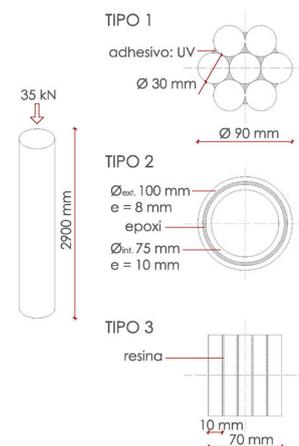


Fig. 74. Sección transversal de los diversos tipos de columnas "Holten".

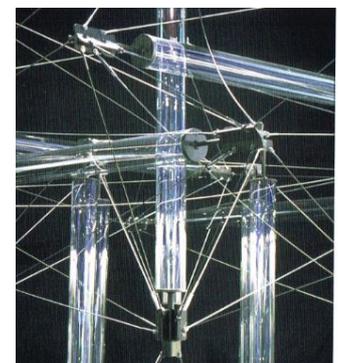


Fig. 75. Escultura de vidrio de tensegridad realizada por los estudiantes Gose y Teuffel, 1996.

En esta escultura se utilizó el principio de la tensegridad, estructuras con elementos aislados comprimidos dentro de una red tensada continua. Los miembros comprimidos serán barras, tubos de vidrio tipo Schott, que no se tocan y quedan unidas mediante cables (elementos traccionados) que en este caso son de acero.

El tubo se apoya sobre una placa de acero y la unión de los dos materiales (vidrio y acero) se plantea mediante un adhesivo de poliuretano o de resina epoxi. Al final esta unión no resultó adecuada y fue necesario la unión atornillada con pernos roscados.

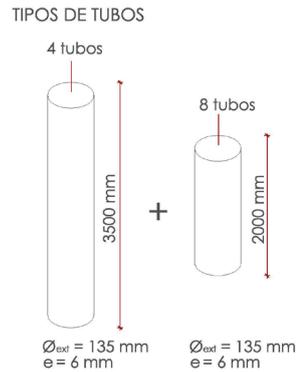


Fig. 76. Dimensiones de los tubos que componen la escultura de tensegridad.

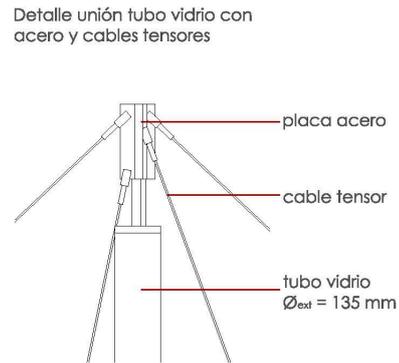


Fig. 77. Detalle de la unión del tubo de vidrio con la placa de acero y los cables tensores que lo unen con el resto de barras.

– Unión barras macizas.

TIPO 1

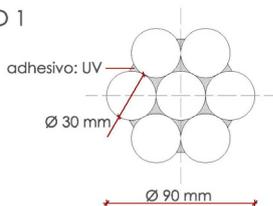


Fig. 78. Esquema de las columnas del edificio de oficinas de ABT-architekten.

▪ Ejemplo analizado: edificio de oficinas, ABT-architekten, Velp, Holanda, 2000.

Se trata de una columna formada por 7 barras masivas de 30 mm de diámetro (barra central rodeada por otras 6) que se encuentran unidas por adhesivo UV activo. De este modo se obtiene una sección mixta que aumenta la resistencia a pandeo de las barras.

– Unión cilindros concéntricos.

▪ Ejemplo analizado: columna "Corea" para el Museo Samsung de Seúl, Seúl, Corea del Sur, 1997.

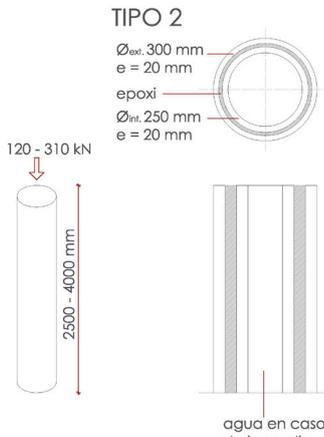


Fig. 79. Esquema de las columnas tipo Corea.

Este tipo de columna no se llega a realizar por motivos económicos. Con una longitud entre 2,50 y 4,00 m, estaría compuesta por dos cilindros de vidrio (exterior de 300 mm de diámetro y 20 mm de espesor, interior de 250 mm de diámetro y 20 mm de espesor) unidos con adhesivo epoxi. Las cargas soportadas irían desde los 120 kN hasta los 310 kN (Fig. 79).

En este caso iba asociada a una columna de hormigón por motivos de seguridad. Si se produjese el fallo de la de vidrio las cargas serían distribuidas al resto de la estructura (hormigón) sin producirse el colapso.

Como innovación se cita el sistema ignífugo incluido en el prototipo. En caso de fuego, a través de la columna circula agua que

mantiene la estructura a una buena temperatura, preservando su integridad (Fig. 79).

- Tipo 1: prismáticas.
- Unión paneles rectangulares.

En este caso se puede hablar de columnas cruciformes y de un prototipo realizado experimentalmente llamado "supercolumna".

- Cruciformes.

- Ejemplo analizado: centro administrativo, Brunet-Saunier, Saint-Germain-en-Laye, Francia, 1994.

La tipología cruciforme se empleó por primera vez en esta obra. Se trata de columnas de vidrio soportando vigas de acero que sostienen el techo, formado también por paneles de vidrio. Cada ala de la cruz está conformada por 3 paneles (10+15+10 mm) quedando el panel del medio retrasado y protegido por los exteriores.

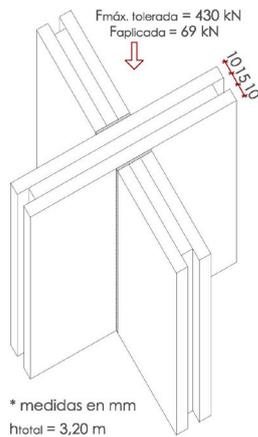


Fig. 82. Sección pilar cruciforme.

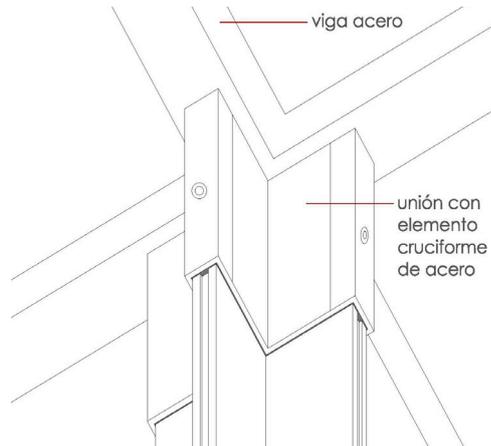


Fig. 83. Unión pilar cruciforme de vidrio con vigas de acero de cubierta.

La seguridad en esta construcción, al tratarse de un edificio público, fue un factor decisivo. Para eso se empleó un coeficiente de seguridad del vidrio de 3,50 y de fatiga del 2,50 dando un coeficiente de seguridad de 8,80 (Chaunac, Serruys, 1997, p. 200).

- Ejemplo analizado: edificio de oficinas para la empresa Danfoss, Schmidt Hammer Lassen architects y Anne Bagger (ingeniero estructural), Nordborg, Dinamarca, 2005.

Este proyecto es un anexo de 500 m² que se añadió al edificio de la sede de Danfoss. La estructura se compone de 12 columnas de vidrio con una altura de 6 m. Cada una puede resistir cargas de hasta 30 toneladas, de acuerdo con las pruebas experimentales realizadas (Fig. 85).

En este proyecto se ha doblado la altura con respecto al de las oficinas de Saint-Germain-en-Laye, pasándose de los 3,20 m a los 6,00 m de columna. Sin embargo, aún no se han realizado edificios con columnas y varios forjados en las que éstas sean de vidrio.



Fig. 80. Vista del interior de las oficinas de Saint-Germain-en-Laye, 1994.

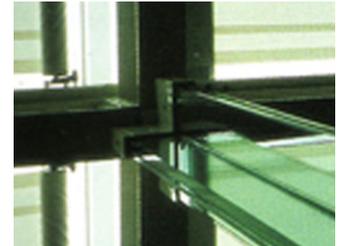


Fig. 81. Unión de la columna de vidrio con las vigas de acero del techo.



Fig. 84. Columna tipo.



Fig. 85. Columna de vidrio en el test de resistencia de cargas.

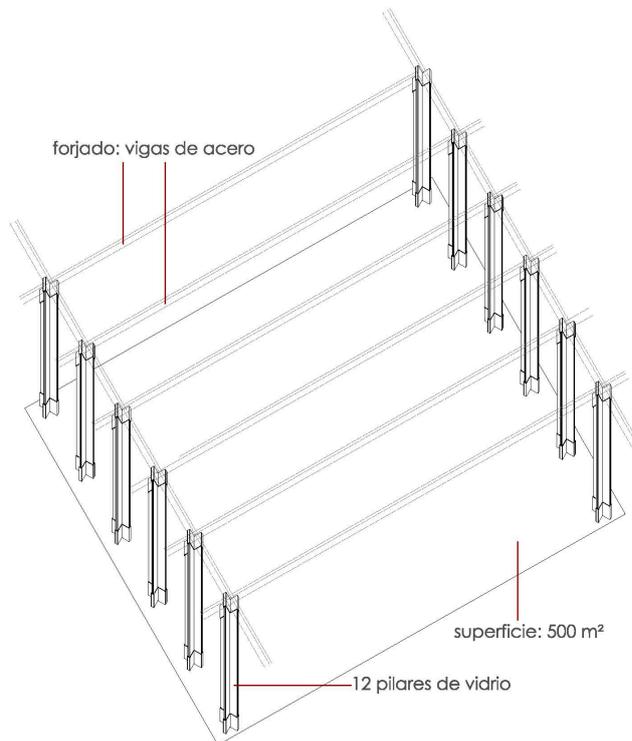


Fig. 86. Esquema del conjunto arquitectónico de la recepción de oficinas Danfoss.

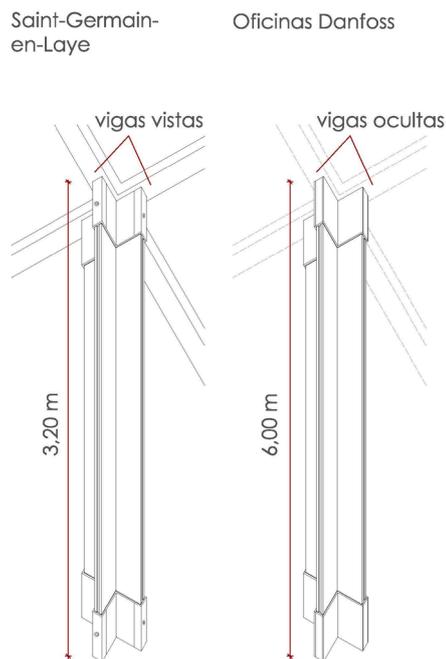


Fig. 88. Comparación entre los pilares cruciformes analizados.



Fig. 87. Vista interior de las columnas de la recepción de la empresa Danfoss, 2005.

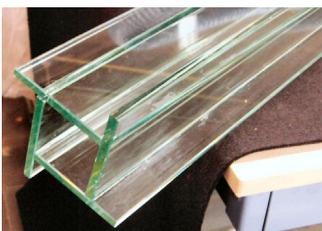


Fig. 89. Sección de la columna de vidrio, prototipo de Veer y van Nieuwenhuijzen, 2005.

Se han realizado otras investigaciones, por ejemplo la desarrollada desde el año 1999 por el profesor F.A. Veer de la Facultad de Arquitectura de Delft. Junto con el estudiante J.R. Pastunink, consiguió un prototipo formado con placas rectangulares ensambladas por un adhesivo (Fig. 90). Este modelo no tuvo el resultado estructural esperado y se siguió investigando. Apareció así el segundo prototipo en el año 2005 (Fig. 89), en este caso junto al estudiante E.J. van Nieuwenhuijzen. La diferencia con el modelo

anterior es que en este caso se utilizó vidrio plano y no laminado. La resistencia conseguida por este tipo de columna es similar a la que tendría una de acero con las mismas dimensiones.

– Supercolumna.

Otra investigación en esta tipología fue la "Supercolumna" en el año 1996. Fue un prototipo teórico formado por 3 materiales: agua, vidrio y el llamado "súperhilo" (Nijse, 2003, p. 81), material de fibras artificiales como el twaron o el kevlar. De cada elemento se tomarían las mejores propiedades:

- Agua: material no compresible para la carga vertical de la columna.

- Vidrio: el cilindro mantiene el agua en su interior, propiedad impermeable.

- Fibras artificiales: refuerzan el cilindro de vidrio. Absorben las tensiones del anillo de tracción causadas por la gran carga vertical que baja.

Estas fibras artificiales van enrolladas al cilindro de vidrio, idea que se tomó de las estructuras del ingeniero ruso Shukhov de finales del siglo XIX y comienzos del XX (Fig. 92).

3.3.1.2.2. Montantes.

Esta tipología se compone de elementos verticales que forman parte de un entramado junto con otras piezas de vidrio, componiendo así los conocidos como muros cortina, fachadas completamente de vidrio. Su función es la de actuar como rigidizadores.

Se pueden clasificar en dos grupos según el tipo de unión que tengan con los paneles de vidrio que componen los paramentos de la fachada. Esta unión podrá ser mediante conectores de acero o a partir de adhesivos, con lo que se consigue un vínculo totalmente transparente.

– Tipo 1: uniones con piezas de acero.

▪ Ejemplo analizado: Flint River Center, Antoine Predock y Robins Bell Kreher, Albany, Georgia, EEUU, 1997/2004.

Esta obra es un museo en el que se muestran exposiciones de diseño inspiradas en la biología, geología e hidrología del suroeste de Georgia. El vidrio aquí se entendió necesario para indicar la relación entre el edificio y el espacio que lo rodea, el lugar entra en la construcción.

Para eso se ejecutaron distintas fachadas de vidrio dependiendo de la zonas que se quisiesen relacionar. Aparece así el contacto con el espacio verde del exterior (Fig. 94) o el del agua del río Flint (Fig. 95). En este último caso los montantes sirven de división



Fig. 90. Zappi glass column, prototipo de Veer y Pastunink, 1999.

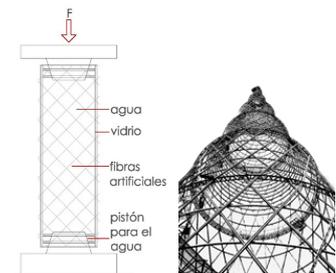


Fig. 91. Esquema del prototipo "Supercolumna". Fig. 92. Toma del prototipo "Supercolumna" de Shukhov, 1919-1922.

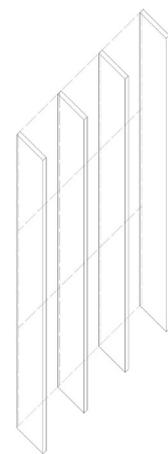


Fig. 93. Esquema de montantes en fachada.



Fig. 94. Vista interior de una de las fachadas de vidrio del Flint River Center, 2004.



Fig. 95. Vista interior de los montantes que componen la fachada en contacto con el río Flint, Flint River Center, 2004.



Fig. 96. Vista desde el espacio interior de piedra del cubo de vidrio, 2012.



Fig. 97. Detalle de los montantes en el cubo de vidrio, 2012.

para los bancos que se generan en el basamento de la fachada. Las uniones se realizan con conexiones metálicas atornilladas que ya se han explicado al inicio del capítulo 3 (página 15, Fig. 16).

– Tipo 2: uniones con adhesivos.

▪ Ejemplo analizado: oficinas para la Junta de Castilla y León, Alberto Campo Baeza, Zamora, España, 2012.

Este proyecto se trata de un cubo de vidrio que se coloca en un espacio cerrado por unos muros de piedra, es decir, una caja opaca que cierra una caja transparente.

La caja transparente se compone de paneles de vidrio laminado “extraclaro” de 6000 x 3000 mm unidos mediante silicona estructural. Estos paneles formarán la fachada y la cubierta ya que lo que se busca en el proyecto es conseguir que el tiedro de cubierta sea completamente transparente. Los montantes, que servirán de rigidizadores de los demás paneles, tendrán una anchura de 750 mm.

3.3.1.3. Horizontales y verticales. Pórticos.

Se trata de estructuras que añaden elementos verticales y horizontales conectados entre sí trabajando conjuntamente formando un todo. Al estar formados por varios elementos que funcionan juntos de una manera estática presentan una serie de ventajas, al igual que los arcos: buen comportamiento a la deformación, buenas tolerancias y buen comportamiento durante el levantamiento.

La clasificación que se puede hacer en esta tipología es similar a la de las vigas, según el tipo de apoyo (biempotrado, biapoyado), el tipo de carga (repartida horizontal o vertical, puntual) o si el dintel es horizontal o inclinado. En este caso, debido a que las posibles combinaciones son muy elevadas, se opta por una clasificación a partir de las distintas uniones y conexiones entre los elementos que componen el pórtico. Pueden ser con adhesivos, ensamblando las mismas como en las construcciones de madera (unión de espiga con mortaja, junta de solape) o con conexiones con otros materiales como los pernos y pasadores de acero.

– Tipo 1: piezas ensambladas mediante adhesivos.

▪ Ejemplo analizado: Broadfield House Glass Museum, Richards and Dabell (Antenna Design), Kingswinford, Reino Unido, 1994.

Esta obra es un anexo que se incorporó al Museo Broadfield para resolver el acceso al mismo. Se trata de un espacio de vidrio adosado a un muro de ladrillo del siglo XVIII.

En este proyecto se buscó la máxima transparencia en la construcción por lo que los elementos que la componen (cubierta,

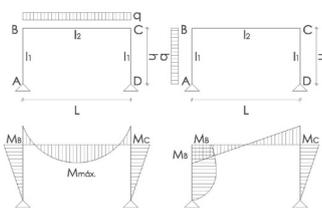


Fig. 98. Pórtico simple biapoyado con carga repartida vertical u horizontal. Esquema gráfico y diagrama de momentos.

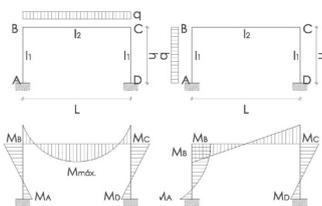


Fig. 99. Pórtico simple biempotrado con carga repartida vertical u horizontal. Esquema gráfico y diagrama de momentos.

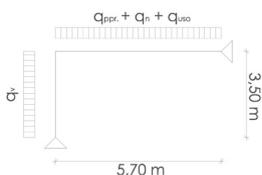


Fig. 100. Esquema gráfico del pórtico de Broadfield House Glass Museum.

vigas, columnas y paneles de fachada) son de vidrio y la unión entre ellos se realiza con esquinas totalmente transparentes y rígidas. Se superponen elementos de vidrio llegando a conseguir una unión adhesiva en un área grande. La unión entre viga y columna se resuelve con junta de espiga con mortaja. La de los paneles de cubierta con el resto de la estructura se realiza con una junta sellante estructural.



Fig. 101. Vista interior del recinto de acceso a Broadfield House Glass Museum, 1994.

Como principales ventajas de este tipo de conexiones están la transparencia, ninguna perforación de agujeros, conexión rígida y transferencia de carga amplia y constante. Como desventajas están su difícil ejecución y la necesidad de ser realizadas bajo condiciones climáticas controladas.

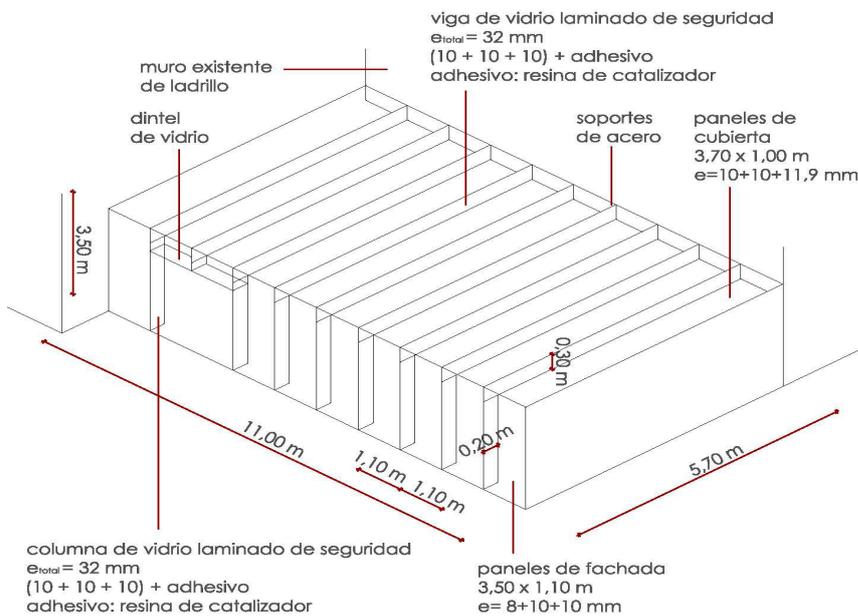


Fig. 102. Esquema del conjunto arquitectónico de Broadfield House Glass Museum.

Cada elemento de vidrio está formado por 3 hojas quedando la intermedia detrás o extendida en toda la profundidad de la sección, para que los elementos de soporte de carga se puedan deslizar uno dentro del otro hasta que todas las superficies de la junta estén en contacto entre sí (Fig. 103).

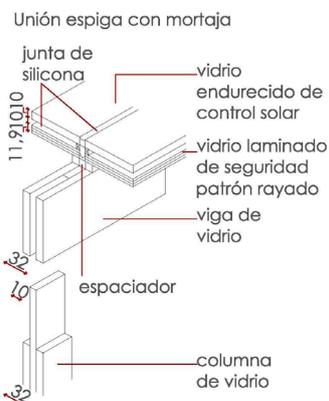


Fig. 103. Detalle de la unión de espiga con mortaja entre vigas y columnas.

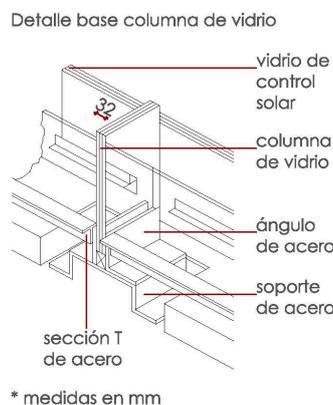


Fig. 104. Detalle de la base de la columna de vidrio con elementos de acero.



Fig. 105. Detalle de la unión entre vigas y columnas.

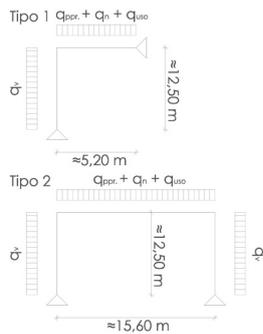


Fig. 106. Esquema gráfico de los tipos de pórtico en Apple Store Pudong.



Fig. 107. Vista exterior Apple Store Pudong, 2010.



Fig. 108. Vista superior Apple Store Pudong, 2010.



Fig. 109. Vista interior Apple Store Pudong, 2010.



Fig. 110. Detalle de las uniones de vigas y columnas.

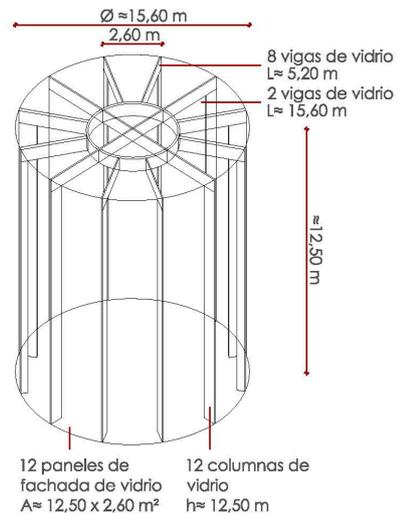


Fig. 111. Esquema del conjunto arquitectónico de Apple Store Pudong.

– Tipo 2: piezas unidas con conectores metálicos.

▪ Ejemplo analizado: Apple Store Pudong, Bohlin Cywinski Jackson Architects, Shangai, China, 2010.

La empresa Apple tiene como uno de sus valores la modernidad. Esto también lo aplica en las construcciones de todas sus tiendas y oficinas por eso apuesta por el uso del vidrio estructural, al tratarse de una aplicación novedosa.

El proyecto para la tienda de Shangai es similar a la de Nueva York del año 2006 (Fig. 176 - 177 y 178). En este caso se trata de un cilindro completamente de vidrio que realiza las uniones de los distintos elementos con fijaciones de acero inoxidable. Éstas son puntuales, es decir, no se perfora el vidrio. De esta manera el área que se une es pequeña, con una fuerza necesaria alta.

La parte más innovadora de este proyecto es que los paneles de cubierta que se colocan entre las vigas tienen un borde curvo, consiguiendo la superficie de un cilindro con este pórtico.

3.3.2. Elementos superficiales.

Los elementos superficiales se componen a partir de placas y nos permiten realizar un espacio cerrado con una estructura única de vidrio, como si se tratase de una carcasa. Las placas son propensas a que se produzca pandeo. La manera de evitarlo es conectándolas entre sí por el borde, ya que aumentan la rigidez (Fig. 112).

A continuación se presenta la clasificación realizada dependiendo si estas placas forman superficies horizontales, en las que inciden acciones verticales (peso propio, sobrecarga de uso, nieve en el caso de cubiertas) o superficies verticales en las que además recaen acciones tipo viento.

3.3.2.1. Horizontales. Suelos y cubiertas.

Las superficies horizontales darán lugar a suelos y cubiertas. Para garantizar mayor seguridad se realizan con varias capas del material, funcionando mejor 2 hojas gruesas que 3 más finas.

Esto también se indica en el artículo de Tim Macfarlane (1999, p. 474), en el que se aconseja utilizar vidrio laminado recocido en varias capas, ya que si una se agrieta todavía quedan las otras para resistir los esfuerzos. Se comportan mejor con una geometría cuadrada, no superando la proporción de 2:1 si es rectangular. El vidrio reforzado por calor también se puede utilizar pero recomiendo que no todas las hojas sean templadas, por riesgo a colapsar.

Los elementos horizontales se dividen según el tipo de superficie que creen en losas, estructuras de placas plegadas y emparrillados. En el caso de las primeras componen ellas mismas la superficie de suelo o cubierta, sin embargo los emparrillados crean una malla superficial en la que se podrán insertar otras piezas como paneles de vidrio para formar el suelo o cubierta.

En este apartado también se podría añadir la construcción sándwich, una tipología utilizada en posición horizontal y vertical pero que habitualmente se coloca en vertical, por lo que se incluye en ese apartado (página 41).

RIGIDIZACIÓN EN PLACAS

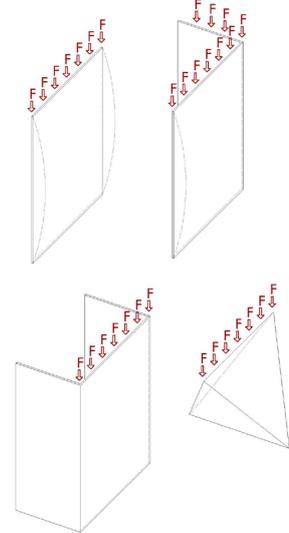


Fig. 112. Rigidización en placas para evitar pandeo

3.3.2.1.1. Losas.

Las losas son elementos bidireccionales formados por la unión de placas rectangulares conectadas por adhesivos o fijaciones de acero que crean una superficie.

▪ Ejemplo analizado: Marquesina en Lincoln Center, Diller Scofidio + Renfro, Nueva York, EEUU, 2009.

Se trata de 2 marquesinas de acceso al Lincoln Center. Se apoyan en dos vigas y columnas en Y de acero. Tienen una superficie perfectamente horizontal con un voladizo de casi 14 metros.

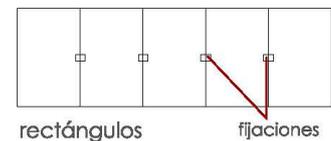


Fig. 113. Esquema de losa con malla rectangular.

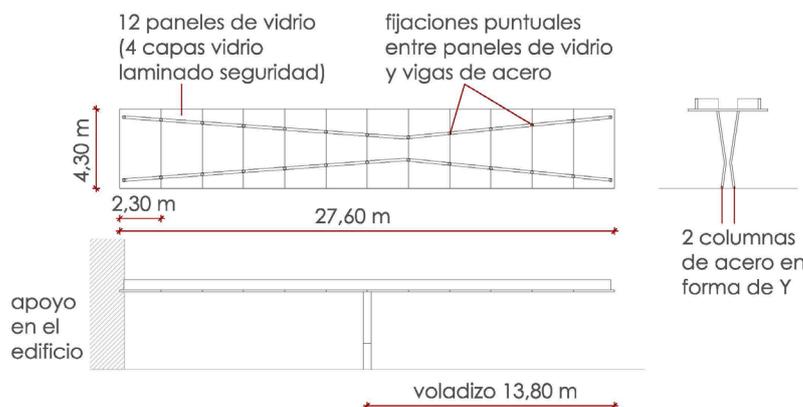


Fig. 114. Esquema en planta y alzado de las marquesinas de Lincoln Center.



Fig. 115. Marquesina en Lincoln Center, Scofidio + Renfro, 2009.



Fig. 116. Crystal Palace, J. Paxton, 1851.

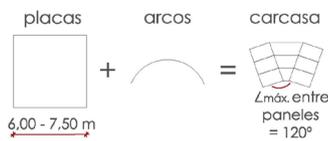


Fig. 117. Formación estructuras de placas plegadas.

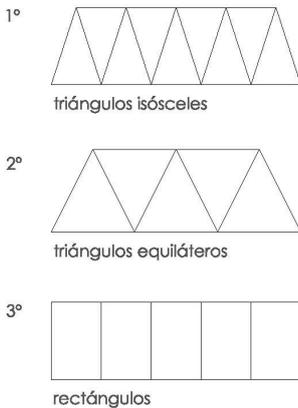


Fig. 118. Opciones de mallas para la formación de estructuras de placas plegadas.

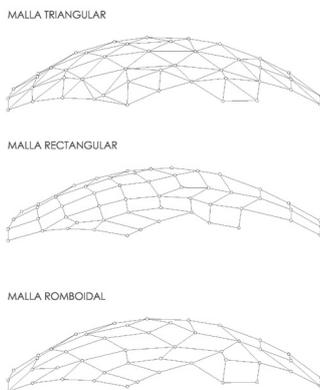


Fig. 119. Tipos de cúpulas plegadas según la geometría de la malla empleada.

Los paneles de vidrio, al igual que en la del Brooklyn Center (Fig. 130), sirven para estabilizar las columnas contra el movimiento lateral. La unión entre vidrio y acero se hace con articulaciones semi-rígidas con accesorios puntuales perforando el vidrio. Los vidrios laminados de cada panel están unidos por resina ionoplástica que reduce el espesor total del panel en comparación con el butiral de polivinilo, el adhesivo más utilizado. Esta resina de reciente investigación y aplicación tiene resultados muy satisfactorios de resistencia a la rotura y excelentes propiedades acústicas.

3.3.2.1.2. Estructuras de placas plegadas.

Son estructuras compuestas por planos y elementos de curvado resistentes al esfuerzo de corte o cizallamiento que podría causar el colapso de la estructura. Estos elementos son cónicos cortos con un ángulo máximo entre ellos de 120°, evitándose siempre los ángulos muy planos. Esta unión y los tamaños máximos de placas se indica en la Fig. 117.

Un ejemplo primigenio de esta tipología es el Crystal Palace de J. Paxton de 1851 (Fig. 116), en el que los paneles inclinados en direcciones opuestas ejercían de apoyo mutuo. Actualmente, estas estructuras se componen de placas plegadas en forma de acordeón reforzadas y soportadas transversalmente a los pliegues.

Existe el peligro de pérdida de rigidez si se trata de rejillas bidireccionales con paneles rectangulares planos fijados con múltiples conexiones. Mientras que si se ponen paneles triangulares formarán una cuadrícula de costillas rígidas que le aportarán al conjunto mayor rigidez. Dentro de las formas triangulares dan mejores resultados los triángulos isósceles que los equiláteros (Fig. 118).

Se pueden dividir en dos grandes grupos según la superficie resultante sea recta o curva.

– Tipo 1: Cúpulas plegadas. Cáscara "shell".

Este tipo de estructuras son adecuadas para vanos grandes debido a su doble curvatura dando mejor resultado que las barras plegadas. Las mallas que la forman podrán ser triangulares, rectangulares o romboidales ("Técnica Zollinger").

Sin embargo, se componen de delgadas secciones transversales que hacen cuestionar la luz recomendable, ya que podrá producirse pandeo y las cargas estarán concentradas en los nudos. Por lo tanto, es fundamental la estabilización de la sección transversal a través de conexiones resistentes al corte o cizallamiento entre las barras y las placas.

Estas conexiones se pueden realizar de 3 formas distintas: unión de fricción, adhesivo con las placas separadas y adhesivo con junta a tope (Fig. 120).

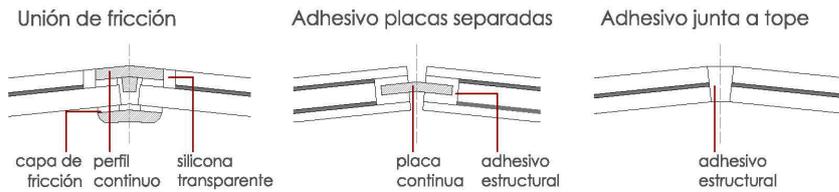


Fig. 120. Tipos de unión entre las placas de las estructuras plegables: fricción, adhesivo con placas separadas, adhesivo con junta a tope.

▪ Ejemplo analizado: Lens Ceiling en Phoenix Federal Courthouse, Richard Meier & Partners, Arizona, EEUU, 1999.

En este proyecto la cáscara "shell" se utiliza para realizar el techo de la sala del tribunal del Palacio de Justicia de Phoenix. La superficie esférica queda suspendida de la cubierta del edificio con cables.

Se compone de vidrio laminado, acero inoxidable y aluminio anodizado que permiten la entrada de luz en la sala. Las distintas placas se conectan con vigas de anillo que le otorgan un marco perimetral a cada una, quedando la superficie en compresión.

Esta estructura se encuentra en un lugar con riesgo sísmico por lo que se manifiesta la seguridad que se puede alcanzar con el vidrio. En el caso de un terremoto actúa de diafragma, transfiriendo las fuerzas laterales a la estructura del edificio. Además se colocó una capa intermedia en el vidrio laminado que evitaría su caída en el caso de rotura. También se resuelve la instalación antiincendios con la estructura, pudiendo sustituir los cables por rociadores.



Fig. 121. Vista interior de Lens Ceiling, Meier & Partners, 1999.



Fig. 122. Detalle unión entre paneles y cables en Lens Ceiling, Meier & Partners, 1999.

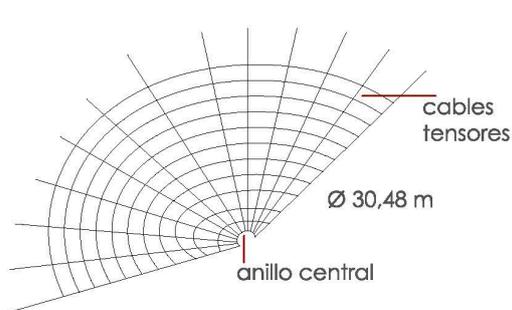


Fig. 123. Esquema del techo de la sala del tribunal del Palacio de Justicia de Phoenix.

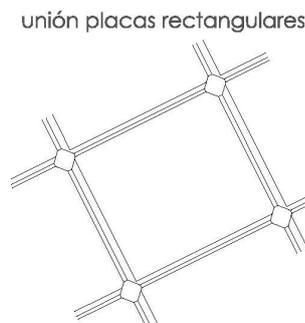


Fig. 124. Detalle de unión de las placas rectangulares.

▪ Ejemplo analizado: Stuttgarter Glasschale, Werner Sobek y Lucio Blandini, Stuttgart, Alemania, 2003.

Se trata del segundo prototipo de cúpula realizado por la Universidad de Stuttgart. En este caso se aumentó 1,76 m de diámetro respecto del primer prototipo, realizado en el año 2002.

La finalidad de estas investigaciones fue construir una cúpula enteramente de vidrio, sin la necesidad de conectores metálicos, como los existentes en el anterior ejemplo analizado.



Fig. 125. Vista exterior de Stuttgarter Glasschale, Sobek y Blandini, 2003.

Los paneles se forman con vidrio laminado curvado de 10 mm de espesor total (8+2). Se conectan mediante adhesivo epoxi con junta a tope. El tipo de junta hace que no se pueda reemplazar por otro un panel que se encuentre dañado.

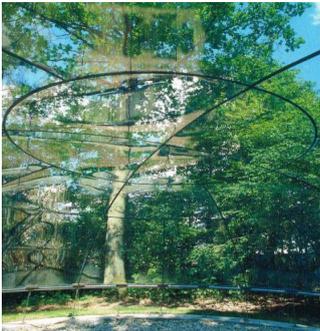


Fig. 126. Vista interior de Stuttgarter Glasschale, Sobek y Blandini, 2003.

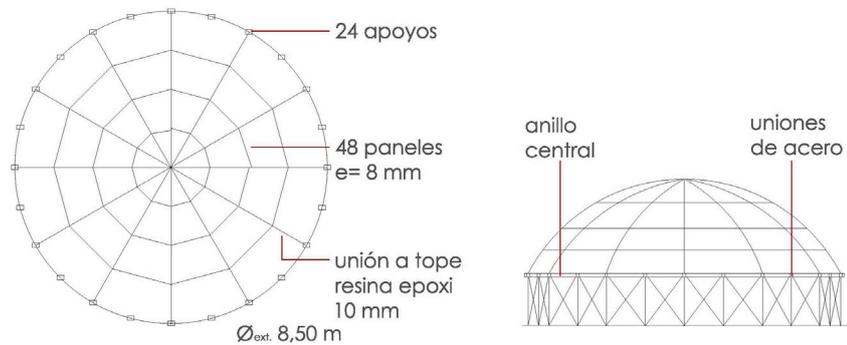


Fig. 127. Esquema en planta y alzado de Stuttgarter Glasschale.

– Tipo 2: Planos plegados.



Fig. 128. Efectos cargas en placas plegadas.

Esta tipología cuenta con un alto grado de prefabricación y geometría estandarizada y su resultado es mejor que el de las vigas y las losas.

El plegado es muy eficaz ya que es la suma de una losa y una placa. La losa absorbe los efectos de flexión en el vidrio y la placa las fuerzas de compresión (Fig. 128). Mientras que los bordes doblados, que actúan como transmisores de carga entre las placas, transfieren compresión, tracción y corte o cizallamiento.

La conexión entre las placas debe ser lineal y articulada, evitándose las fijaciones puntuales que podrían ocasionar zonas de concentración de tensiones. También se deben colocar el número mínimo de juntas abisagradas.

Los 3 ejemplos analizados responden a los tipos indicados en la página 36 (Fig. 118) según la geometría de los paneles que los forman (triángulos isósceles, triángulos equiláteros, rectángulos).

- Ejemplo analizado: Marquesina en Brooklyn Academy of Music, H3 Hardy Collaboration Architecture, Nueva York, EEUU, 2004.

Esta marquesina se engloba dentro del proyecto de restauración del edificio realizado por Herts & Tallant en 1861. Como en otros ejemplos ya indicados, se utiliza el vidrio como material muy recomendable para las restauraciones, ya que su carácter no pesado no le resta protagonismo al edificio existente.

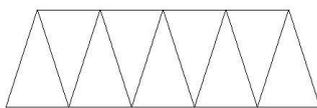


Fig. 129. Placas con malla de triángulos isósceles.



Fig. 130. Marquesina de Brooklyn Academy of Music, H3 Hardy, 2004.

La marquesina compuesta por 65 placas triangulares de vidrio se apoya sobre tubos de acero inoxidable logrando una superficie ondulada. Cada panel tiene 3 puntos de fijación a los tubos. La carga es transmitida del conjunto triangular a los tubos y de éstos a columnas de acero que descargan sobre los muros existentes del edificio. Para evitar el contacto directo entre acero y vidrio se han colocado arandelas de nylon.

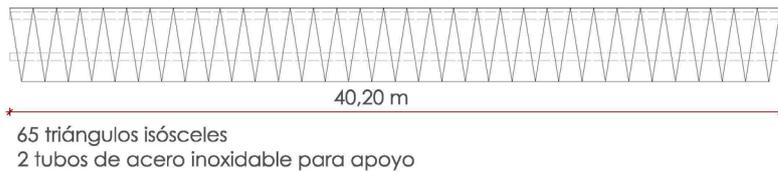


Fig. 131. Esquema en planta de la marquesina de Brooklyn Academy.

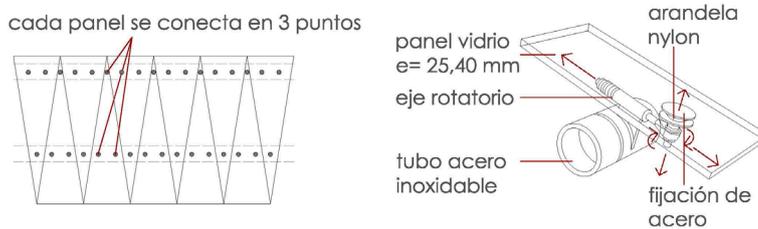


Fig. 132. Disposición en planta y detalle de la unión de los paneles de vidrio al tubo estructural de acero inoxidable.

▪ Ejemplo analizado: Taller del Té, Antonio Yemail, Bogotá, Colombia, 2012.

El proyecto consistió en darle un nuevo uso a una casa de los años 40. La estructura de vidrio aparece para conseguir dos cubiertas translúcidas en el patio existente. Éstas se componen de triángulos equiláteros agrupados cada 8 formando un cuadrado rígido, como se puede comprobar en la Fig. 135.

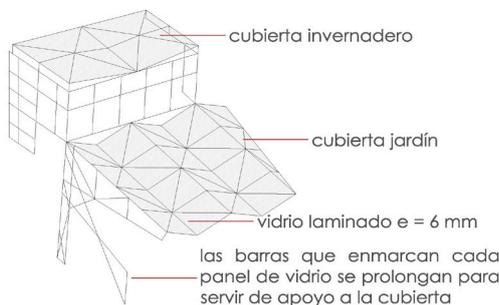


Fig. 135. Esquema de las cubiertas de placas plegables del Taller del té.

▪ Ejemplo analizado: Marquesina para un centro comunitario, Ulrich Knaack, Thomas Link y estudiantes del seminario "Konstruktiver Glasbau", Aachen, Alemania, 1999.

Esta marquesina se construyó para cubrir la entrada de una comunidad evangélica en la ciudad de Aachen. Se compone de paneles de vidrio, dos pilares de acero en forma de V, perfiles de acero uniendo los paneles y cables de acero.

Los cables de acero se encadenan entre los apoyos, debajo del pliegue, para proporcionar seguridad mecánica en caso de rotura (Wurm, 2007, p. 181).

Los paneles de vidrio son 6. Tienen diferentes dimensiones, como se puede apreciar en la Fig. 138, siendo el de mayor tamaño de 5,70 x 1,32 m.



Fig. 133. Vista de la unión de los paneles de vidrio con los tubos de acero en la marquesina de Brooklyn Academy of Music, 2004.

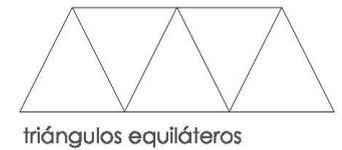


Fig. 134. Placas con malla de triángulos equiláteros



Fig. 136. Vista interior y exterior de la cubierta del patio del Taller del Té, 2012.



Fig. 137. Placas con malla de rectángulos.



Fig. 138. Marquesina en Aachen, Knaack, Link y estudiantes, 1999.

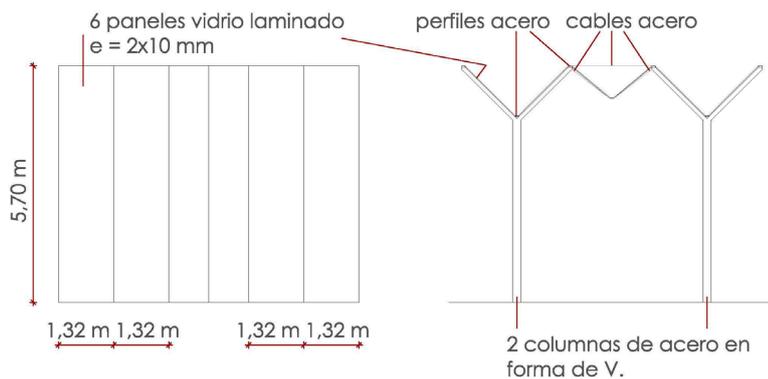


Fig. 139. Esquema en planta y alzado de la marquesina del centro comunitario en Aachen.

3.3.2.1.3. Emparrillados.

Esta tipología se compone de las estructuras que forman un entramado transfiriendo las cargas en dos ejes. Para que su respuesta sea isotrópica ante la carga deberán tener la misma rigidez en las dos direcciones.

Si se duplican las secciones transversales tendremos una serie de módulos cuadrados, es decir 4 vigas y una placa de vidrio unidas en sus bordes superiores, llamado "conjunto de cassette" (Wurm, 2003, p. 153). Los bordes superiores estarán en compresión y la parte inferior a tracción. La tracción podrá mitigarse con una red de cables pretensados entre las vigas.

En cada intersección, las vigas de vidrio se deben conectar con tornillos o conexiones de agarre por fricción para así transmitir momentos de flexión.

- Ejemplo analizado: Refectorio de la Technical University Dresden, Maedebach, Redeleit & Partner architects, Dresden, Alemania, 2006.

Este proyecto es un anexo que se añade a un edificio ya existente, por lo tanto, como en varios ejemplos expuestos, queda patente el uso que tiene el vidrio en la restauración arquitectónica.

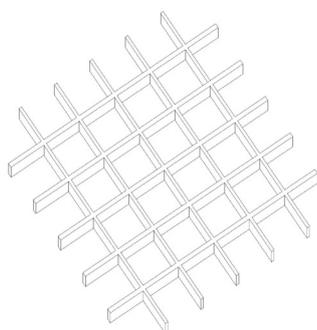


Fig. 140. Esquema de montaje en forma de parrilla bidireccional.



Fig. 141. Construcción del refectorio de la TU Dresden, Maedebach & Redeleit, 2006.



Fig. 142. Emparrillado de la cubierta del refectorio de la TU Dresden, Maedebach & Redeleit, 2006.

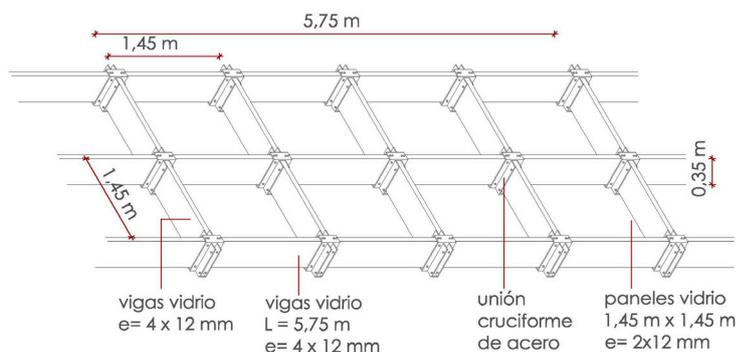


Fig. 143. Esquema del emparrillado de cubierta del refectorio TU Dresden.

Se construye con vigas de 5,75 m en una dirección y elementos de 1,45 m en la otra que es la dimensión de cada panel de vidrio que compone la cubierta. Se diseñan uniones cruciformes que combinan los elementos para conseguir el trabajo bidireccional.

3.3.2.2. Verticales. Muros.

Los superficies verticales ya se han indicado al tratar el tema de los muros cortina, pues crean una fachada a partir de varios elementos. Sin embargo en este apartado se quiere introducir una tipología que crea un "todo" sin notarse la unión de los diversos elementos.

3.3.2.2.1. Construcción sándwich.

La construcción sándwich es un tipo de estructura cuya formación es similar a la de un vidrio laminado de seguridad: capas con poco espesor unidas rigidizando el conjunto. Las capas externas, de recubrimiento, resisten esfuerzos de tracción y compresión y protegen a la capa interior, de núcleo. Se crean así fachadas de varias capas en las que también se puede incluir material aislante.

La conexión de corte o cizallamiento entre las capas individuales consigue un sistema con rigidez. De esta manera se reducen las tensiones y la deformación de los componentes.

El elemento de la capa núcleo está sometido fundamentalmente a esfuerzos de corte. Esta capa garantiza el trabajo solidario de los demás elementos.

La rigidez depende también de la carga. Según sean cargas dinámicas a corto plazo (viento) o cargas permanentes (peso propio). En el caso de permanentes la capa intermedia, compuesta por un viscoelástico, puede provocar pérdida de la acción compuesta de las capas.

La conexión entre partes puede ser elástica, siendo una conexión parcial, o una unión rígida, tratándose en este caso de una unión completa.

- Ejemplo analizado: Prototipo para fachada con protección solar integrada, Christof Helmus y Marc Mevissen, Aachen, Alemania, 2002-2003.

Este proyecto consistió en crear un panel autoportante formado por 2 hojas de vidrio aislante unidas con perfiles de plástico reforzado con fibra de vidrio (GFRP). Estos materiales se combinan muy bien al tener un comportamiento a la expansión y deformación similar.

Para esta investigación se realizaron 5 prototipos, en los que se



* si son componentes sándwich no simétricos y heterogéneos las placas de vidrio pueden ir en la zona de compresión

Fig. 144. Tipos de construcción sándwich.



Fig. 145. Esquema de las tensiones que resultan en el sándwich a partir del momento de flexión.



Fig. 146. Prototipos 1, 2 y 4 de Helmus y Mevissen, 2002-2003.



Fig. 147. Simulación de la entrada de luz con una fachada compuesta por el prototipo.

varió la geometría del perfil (C, I, tubulares), como se indica en la Fig. 148.

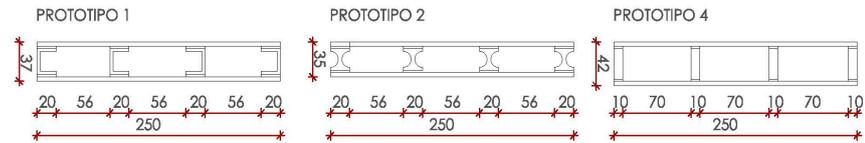


Fig. 148. Prototipos 1, 2 y 4 de Helmus y Mevissen para fachada de construcción sándwich.

El resultado fue reconfortante para los investigadores, ya que se consiguió crear una fachada de control solar que podría también ser usada como cubierta. Por lo tanto, aunque se coloca esta tipología en elementos verticales, se podría decir que es un sistema de uso mixto (muro o cubierta).

3.3.3. Elementos espaciales.

Es una tipología estructural todavía no muy investigada que consiste en realizar cuerpos de vidrio tridimensionales. Se crean a partir de la unión de varios módulos idénticos o similares formados por un conjunto de placas de vidrio individuales.

Se pueden clasificar en dos grupos dependiendo del tipo de módulo base y del poliedro resultante.

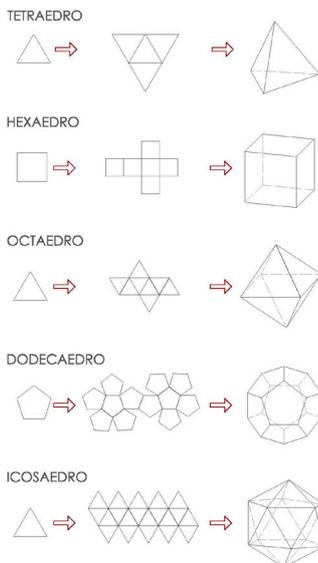


Fig. 149. Formación de los 5 tipos de poliedros regulares.

3.3.3.1. Prisma de vidrio como módulo estructural.

El elemento geométrico principal de cada composición es un poliedro regular: tetraedro, hexaedro, octaedro, dodecaedro e icosaedro (Fig. 149).

Son estructuras plegadas, es decir, formadas por 2 componentes planos y un borde en común. El pliegue podrá ser piramidal o prismático. Las conexiones entre los diversos paneles se realizan con adhesivos o soldadas.

- Ejemplo analizado: Prototipo de tetraarco con sistema de carga curvado, Nicola Bogatzki, Tobias Glitsch, Ralf Herkrath, Nadine Reuters, Daniel Stuttmann, Thorsten Weimar y James Wong (concepto y diseño), Jan Wurm y Wilfried Führer (directores del proyecto), 2000.

Las placas que forman los tetraedros se apoyan en tres lados, pero la placa superior, propensa al pandeo, solamente se apoya en dos.

Se podría decir que es un arco pretensado como resultado de sólo estar sujeto a cargas de compresión.

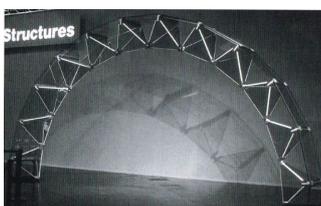


Fig. 150. Tetraarco, 2000.

FORMACIÓN TETRAARCO

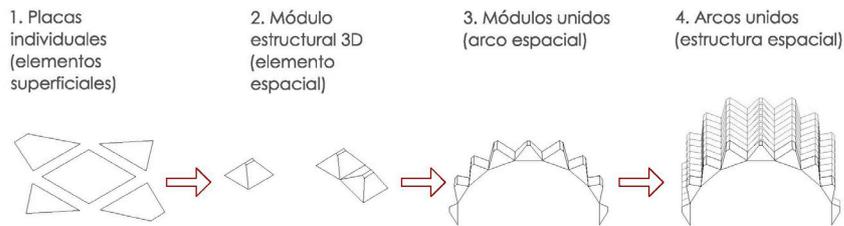


Fig. 151. Formación tetraarco a partir del desplegable de un tetraedro.

Este prototipo fue probado con hipótesis de carga permanente (g), de nieve (s) y de pretensado (v). Quedando en todos los casos en forma de compresión. Sin embargo, si sólo se aplican cargas permanentes y de nieve la línea de esfuerzo ya no es sólo compresión, también tracción. Si sólo actúa viento la línea que resulta es idéntica a la geometría del sistema (Fig. 153).



Fig. 152. Secuencia de tetraarcos formando un espacio cerrado, 2000.

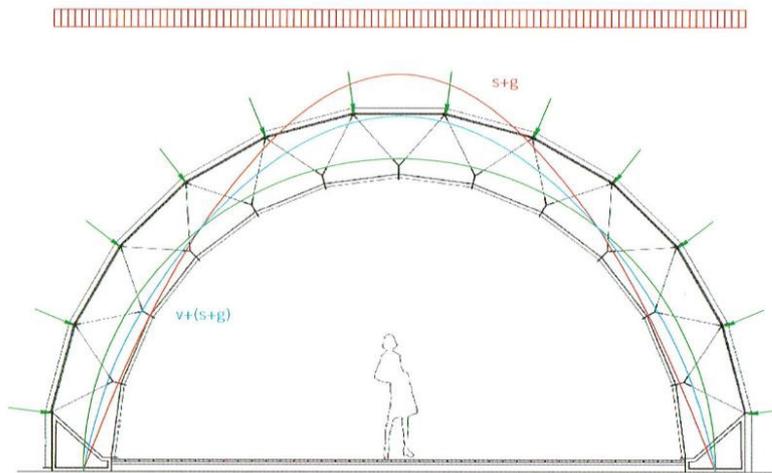


Fig. 153. Deformación del Tetraarco ante carga permanente (g), nieve (s) y pretensado (v).

3.3.3.2. Estructura de entramado espacial.

El elemento geométrico principal es un tetraedro o un medio octaedro, es decir, módulos estructurales celulares. De esta manera se obtienen vigas o arcos atados que permiten crear cualquier elemento estructural: cerchas, losas, emparrillados, cúpulas... esto es, sistemas biaxiales.

En este caso las diagonales se encuentran a compresión y el pandeo se evita con el efecto de refuerzo de los elementos planos adyacentes de cada tetraedro o medio octaedro.

Son estructuras en las que se aplican las soluciones más novedosas obtenidas de las recientes investigaciones. Por lo tanto, las conexiones entre elementos se hacen mediante adhesivos, solución más aconsejable en los últimos años.

Los ejemplos que se han recopilado a continuación hacen re-

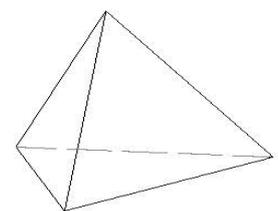


Fig. 154. Tetraedro, poliedro base para las estructuras de entramado espacial.

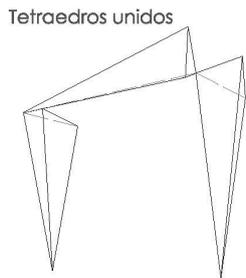


Fig. 155. Formación del Glasfaltwerk a partir de la unión de varios tetraedros.



Fig. 156. Fotomontaje de Glasfaltwerk, FAT LAB, 2009-2010.



Fig. 157. Prototipo SVT, M. Froli, 2013.

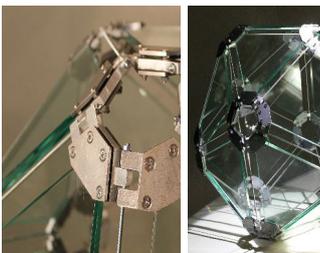


Fig. 158. Vista del nudo que forman las placas del prototipo, M. Froli, 2013.



Fig. 160. Vista exterior del Glass Pavilion Prototype, USC, 2013.

ferencia a proyectos de investigación y prototipos, ya que es un tipo de estructuras de máxima investigación en la actualidad.

- Ejemplo analizado: Glasfaltwerk, proyecto para Glashütte Lamberts, FAT LAB (Daniel Gerber, Mario Schneider), 2009-2010.

FAT LAB es una plataforma de investigación con el objetivo de la innovación y proporcionar nuevas soluciones en la arquitectura. Por lo tanto, uno de sus campos de investigación es el vidrio como material estructural.

Este proyecto se compone de placas dobladas, es decir, grandes paneles de vidrio flotado. Debido a la rigidez inherente de la estructura plegada se puede prescindir de una estructura de acero adicional.

Ejemplo analizado: Prototipo SVT, Maurizio Froli, investigación Universidad de Pisa, Italia, 2013.

Este prototipo toma como base la viga en cercha TVT, analizada en la página 23, y la lleva a la dimensión espacial con forma de tetraedro.

El nudo que enlaza las 6 placas se denominó "HEXAMAK" y tiene un ángulo de apertura de 60°. Se trata de un pasador de bisagras cilíndricas constituido por las mismas barras, tubos o cables del pretensado. Con este dispositivo mecánico, el nudo puede adoptar numerosas configuraciones que se ajustan espacialmente a las distintas geometrías de nudos espaciales haciendo así posible la realización de distintos sólidos SVT.

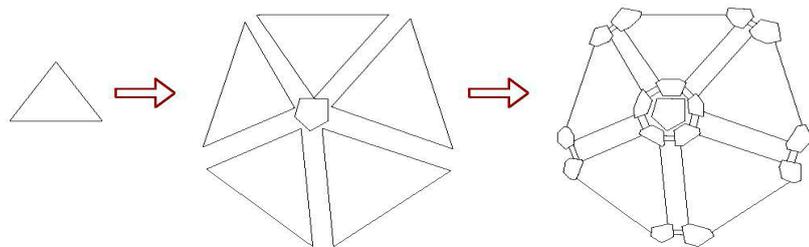


Fig. 159. Formación del tetraedro del prototipo SVT, unión de los triángulos de vidrio con placas de acero.

- Ejemplo analizado: Glass Pavilion Prototype, K. Amrine, M. Camp, M. Feng, S. Fu, S. Ghods, P. Jeung, J. Lee, A. Mendoza, D. Nicholson, K. Prabhakaran, Z. Sakaamini, E. Su, V. Wong y G. Wood, University of Southern California, California, EEUU, 2013.

Este prototipo se realizó por un equipo de estudiantes dirigidos por el profesor Roland Wahlroos-Ritter de la Universidad del Sur de California. Forma parte de la investigación realizada por estos alumnos para entender el comportamiento del vidrio como material estructural en elementos espaciales. La idea era llevar a la práctica los diseños proyectados sobre el papel pero por problemas de tiempo no fue posible realizarlo en vidrio, cambiándose

por policarbonato de 6 mm. Se podría decir que se realizó una maqueta a escala 1:1 en la que se comprobaron los resultados obtenidos teóricamente.

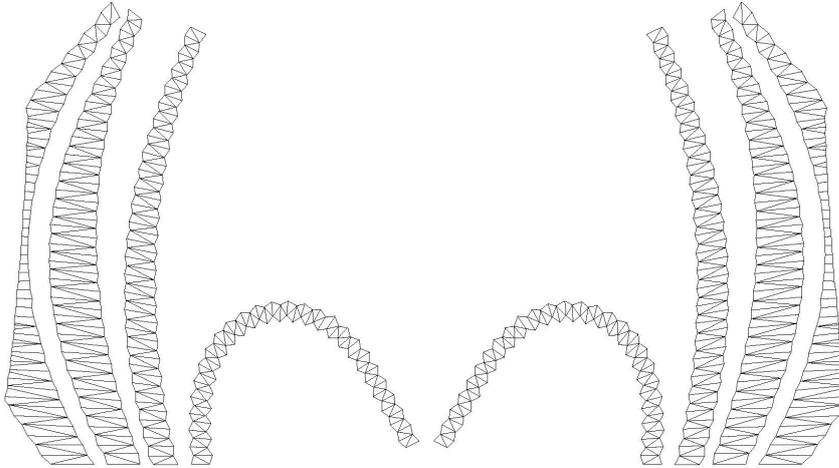


Fig. 161. Despiece del mallado de tetraedros del Glass Pavilion Prototype.



Fig. 162. Vista interior del Glass Pavilion Prototype, USC, 2013.

3.4. Resumen tipologías.

A modo de resumen se puede decir que con el vidrio es posible resistir a todos los tipos de carga. Según el esfuerzo al que se encuentre sometida la estructura aparecerán distintas tipologías, dependiendo de cual lo soporte mejor.

Por lo tanto, a continuación se muestra un cuadro resumen con las diversas tipologías estructurales y las relaciones que existen entre ellas. Como a partir de unos elementos fueron apareciendo los otros, por combinación de los mismos.

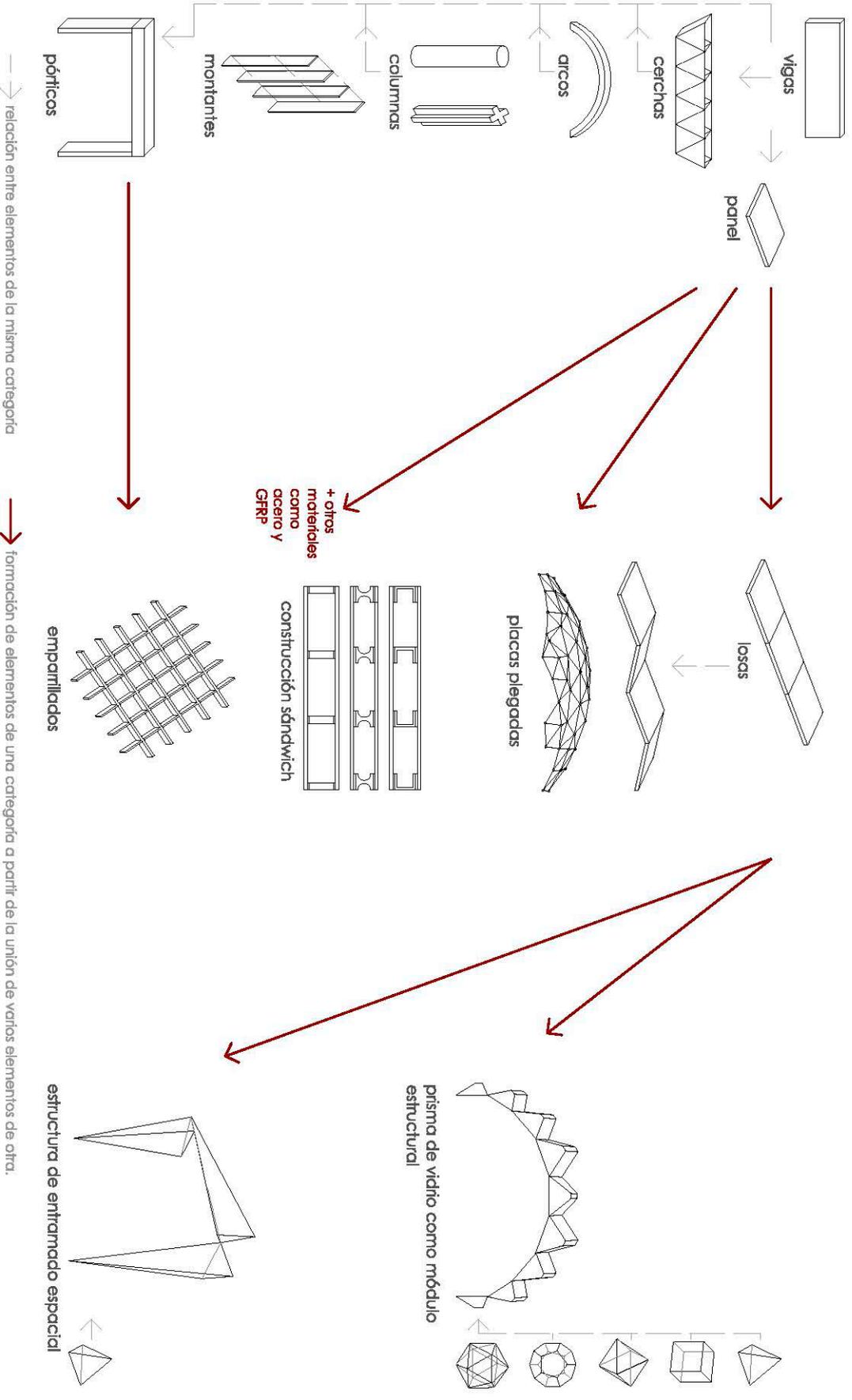


Fig. 143. Esquema de las tipologías estructurales del vidrio y las relaciones que existen entre ellas.

3.5. Estructuras mixtas.

Como se ha explicado previamente, la fragilidad presente en el vidrio implica que aparezcan dudas en su seguridad como material estructural. Esto ha motivado el planteamiento de su uso en combinación con otros materiales, destacando la madera y el acero como los más óptimos. Al combinar varios materiales siempre se pueden lograr mejores resultados que teniendo un único material, ya que se optimizan las propiedades de cada uno.

A continuación se explican las características que reúnen los sistemas mixtos y algunos ejemplos de su aplicación.

3.5.1. Vidrio y madera.

Las estructuras mixtas de vidrio y madera se pueden utilizar de dos maneras: como estructuras autoportantes o como estructuras de refuerzo acompañando a otros sistemas estructurales.

La unión entre estos dos materiales se empezó a investigar desde la década de 1990. Los mayores esfuerzos se centran en la investigación y desarrollo de adhesivos adecuados ya que la unión de estos sistemas debe ser elástica, en contraposición con la unión rígida que se realiza en las estructuras de madera.

La resistencia a la compresión del vidrio se combina con la resistencia a la tracción de la madera (en la dirección de la fibra), aportándole a ésta mayor rigidez. Con este sistema la durabilidad de la madera aumenta, al encontrarse protegida por la piel de vidrio.

Como ejemplo de sistema mixto vidrio-madera se puede indicar la Glass Tower de la empresa Schindler en Alemania (2004) construida con paneles mixtos de vidrio y madera (Fig. 164).

Otro caso de paneles mixtos son los fabricadas en el estudio experimental de la Universidade do Minho (Cruz, Pequeno, 2008b). Este sistema constructivo se compone de paneles autosustentantes formados por dos vidrios laminados unidos en ambas caras al elemento de madera, realizado con 4 tableros de Pinus Sylvestris con 200 x 30 mm² de sección transversal (Fig. 165). Se caracteriza por su polivalencia, ya que pueden utilizarse como elementos horizontales, con mejor comportamiento estructural, o verticales.

El fallo de este sistema se evita con el vidrio y el adhesivo (colapso de la madera por esfuerzo de tracción), con varillas de acero roscado (colapso producido por pandeo de los tableros de madera hacia el exterior) y con cubos de madera maciza (colapso debido al pandeo de los tableros de madera hacia el interior).

Este panel se aplicó en un prototipo de vivienda (Fig. 166).

Los mismos investigadores (Cruz, Pequeno, 2008a) realizaron un



Fig. 164. Vista exterior e interior de la Glass Tower en Alemania, Schindler (2004).



Fig. 165. Vista de un panel mixto de vidrio y madera de pino realizado por el equipo de investigación de la Universidade do Minho.



Fig. 166. Prototipo de vivienda realizado con panel mixto de vidrio y madera de pino. Equipo de investigación de la Universidade do Minho.

estudio de vigas mixtas de vidrio y madera de *Pseudotsuga Menziesii*, abeto de Douglas. Estas vigas se componen por vidrio laminado de 500 mm de altura y una sección transversal de madera de 100 x 70 mm², alcanzando los 550 mm de altura.

La viga que se logra al unir estos dos materiales permite combinar dos características de los mismos. El vidrio mejora la rigidez de la madera, material que ante una carga es muy flexible, y viceversa, la madera permite tener cierta ductilidad al vidrio, una deformación previa al colapso. Es decir, se logra un perfecto equilibrio.

3.5.2. Vidrio y acero.

Las estructuras mixtas de vidrio y acero son bastante comunes ya que el acero es un material que se utiliza como conector de los paneles de vidrio (cables tensores, pernos, pasadores...).

Las investigaciones más recientes han creado prototipos de vigas que combinan estos dos materiales, como el estudio realizado por Netusil y Eliasova (2011) en la Universidad de Praga. Se consiguió una viga de 4,25 m de luz con una sección de acero en T y un panel de vidrio unidos mediante adhesivo. La característica que aporta el acero a esta combinación es la ductilidad, además de su resistencia a la tracción, mucho mayor que la del vidrio o madera, como se comprobó en los esquemas de la página 14 (Fig. 11).

Como obras construidas se puede indicar la estación de metro Kaulbachstraße en Nuremberg de Haid + Partner Architekten del 2011 (Fig. 169). En esta obra se combinan 3 materiales, vidrio, acero y hormigón, consiguiendo un efecto muy deseado en el espectador. El vidrio es un material muy utilizado en estaciones de metro (Bilbao proyecto de Foster), ya que le permite la entrada de luz a un espacio que por naturaleza es oscuro. En la de Nuremberg entre los paneles de hormigón se colocan aletas de vidrio que actúan de soporte, con una dimensión de 70 cm de ancho y 4,45 m de longitud. El techo también se compone de paneles de vidrio. La fijación se hace con uniones puntuales y arriostradas por medio de cables tensores.

Otro caso de sistema mixto es el utilizado en la Sede del departamento de Sanidad del Gobierno Vasco, proyecto de Coll-Barreu del 2008 (Fig. 170). En esta obra la fachada se compone de placas de vidrio con un marco de acero perimetral (Fig. 171).



Fig. 167. Viga mixta de vidrio y madera de abeto de Douglas realizada por el equipo de investigación de la Universidade do Minho.



Fig. 168. Viga mixta, Netusil y Eliasova, 2011.



Fig. 169. Vista interior de las vigas de cubierta del acceso a la estación de metro de Nuremberg, Haid + Partner, 2011.



Fig. 170. Vista exterior Sede del departamento de Sanidad del Gobierno Vasco, Coll-Barreu, 2008.



Fig. 171. Detalle de la unión de los distintos paneles de vidrio de fachada, Coll-Barreu, 2008.

4. Conclusiones.



Fig. 172. Construcción de Guangzhou Opera House, Zaha Hadid, 2010.

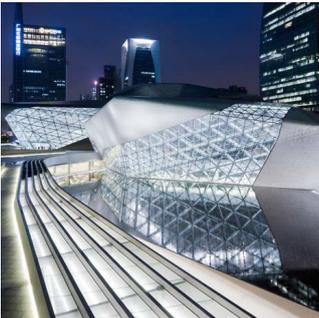


Fig. 173. Vista exterior de Guangzhou Opera House, Zaha Hadid, 2010.



Fig. 174. Vista interior de Guangzhou Opera House, Zaha Hadid, 2010.



Fig. 175. Pasarela de vidrio en Rotterdam, Kraaijvanger and Urbis architects, 1993.

El vidrio es utilizado desde hace siglos, sin embargo no se entiende tradicionalmente como material estructural, lo que ha motivado que hasta los años más recientes no se haya impulsado su uso en este campo de aplicación. Esto implica que no se estudie como tal y no exista normativa específica de uso estructural, al contrario que el acero (DB SE-A), madera (DB SE-M) o fábrica (DB SE-F). Con la información recopilada, se llega a la conclusión de que es un material con propiedades excelentes (resistencia a los esfuerzos de compresión, alta durabilidad, bajo mantenimiento) para su uso como elemento estructural en obra nueva y en rehabilitaciones, como han indicado los ejemplos aportados.

Al analizar las diversas obras y prototipos realizados se comprueba que los sistemas estructurales de vidrio no tienen limitación tipológica y reúnen las características exigidas a cualquier sistema: eficiencia material, geométrica, espacial, funcional y formal. Se consiguen estructuras autoportantes, estables, térmicamente adecuadas y funcionales.

La estética que logra tiene un gran abanico de posibilidades, debido a los tonos y texturas diversas que se le añaden en su fabricación. Esta propiedad puede tener una gran aplicación en la actualidad, ya que muchas estructuras han pasado de ser soporte a convertirse en decorado, como en el caso de los montantes de una cercha. Es un elemento de diseño y a la vez estructura, sin la necesidad de ocultar ésta última, como sucede en muchas obras que la enmascaran. A la vez, otorga la idea de liviandad, que tanto se busca últimamente en las construcciones. Por ejemplo, en obras como Guangzhou Opera House de Zaha Hadid (China, 2010), se consiguen superficies onduladas (espacio interior de butacas) que tienen la sensación de flotar en el vacío (Fig. 174), sin embargo, están soportadas por un gran entramado que se oculta a la vista del espectador (Fig. 172). Esa cualidad de ingravidez se alcanza con el vidrio, la sensación que despierta en el usuario un pilar de vidrio que mantiene una cubierta en voladizo, o una pasarela construida en su totalidad con vidrio (Fig. 175). Asimismo, el vidrio permite mostrar el material tal cual es y no rehuir de él. De esta manera, dejando la estructura de vidrio vista se consigue lógica y coherencia en la construcción, unión entre el diseño de la arquitectura y de la estructura.

Una vez que se ha investigado en este tema, se encuentra la similitud que presenta el vidrio con otros materiales estructurales como el acero y la madera. Las luces que se alcanzan son moderadas y el abanico tipológico es muy amplio. La diferencia aparece con el hormigón armado ya que es una estructura de tipo jerárquico o direccional, es decir, los elementos que la componen tienen diferentes funciones. Hay elementos primarios soportando todas las cargas, aquéllos que con su fallo se produce el colapso de toda la estructura, elementos secundarios que transmiten su

carga a los anteriores y los terciarios, de complemento. Éste es el lugar que ocupó el vidrio durante mucho tiempo, componiendo el revestimiento de las fachadas. Sin embargo, en la actualidad se ha convertido en un elemento que ayuda a la estabilidad del conjunto estructural, como se ha explicado en el caso analizado del Lincoln Center (páginas 35 - 36).

Estudiadas las tipologías, se verifica que los elementos lineales se van combinando entre sí dando como resultado sistemas superficiales y espaciales que componen un todo en 3D. Los elementos lineales son muy esbeltos, por lo que el riesgo de producirse pandeo es elevado al actuar fuerzas de compresión en sentido transversal al elemento. Éste es, por tanto, un factor determinante en el diseño de los elementos verticales. Para mejorar el comportamiento a pandeo se opta por el plegado o la agrupación de piezas proporcionando rigidez tridimensional con elementos adyacentes. Aparecen así cerchas, pórticos, placas plegadas, emparrillados...

Debido a la fragilidad del vidrio, su máximo rendimiento se obtiene con un sistema no jerárquico o no direccional, aquél con un gran número de elementos idénticos interconectados en una cuadrícula, ya que si falla uno de estos componentes lo resuelve el conjunto de la estructura. Esto se ha comprobado en los ejemplos del apartado 3.3, ya que las estructuras que más han prosperado son las que agrupan diversas piezas, como el caso de la tienda de Apple en Nueva York, proyecto de Bohlin Cywinski Jackson (2006).

Su respuesta frágil se puede mejorar con soluciones mixtas, es decir, combinándolo con otros materiales como madera y acero. Se consigue un sistema estructural que responde a cualquier tipo de esfuerzo (apartado 3.5). También aparece esta combinación en estructuras en las que el elemento principal es el vidrio y las uniones (tornillos, pernos, cables tensores) son de estos materiales.

Su papel en la arquitectura actual es de máximo interés. Esto es debido a su fabricación y montaje, a través de elementos prefabricados, con dimensiones normalizadas y en la que las uniones se hacen con adhesivos, facilitando su ensamblaje y disminuyendo el coste (si se tratase de perfiles metálicos aumentaría su precio). Y además, se puede considerar un sistema eficiente al poder reutilizarse en futuras construcciones, fundiendo de nuevo el material.

Por último, indicar que el acero y el hormigón armado, actualmente tan extendidos en la construcción, son materiales "nuevos" en la historia, unos 200 y 100 años respectivamente. Esto también puede ocurrir con el vidrio, ya que su investigación ha comenzado en los últimos treinta años y en ellos se han conseguido grandes avances, como se evidencia con la amplia gama de tipologías existentes. Sus posibilidades son extensas gracias a sus propiedades diversas (estructurales, acústicas, térmicas, estéticas...), convirtiéndolo en un material atractivo para el proyectista y el usuario.



Fig. 176. Tienda Apple Nueva York, B. C. Jackson, 2006.



Fig. 177. Vista de los pórticos de la tienda Apple Nueva York, B. C. Jackson, 2006.



Fig. 178. Unión de vigas en la tienda Apple Nueva York, B. C. Jackson, 2006.

5. Referencias bibliográficas.

5.1. Libros.

- Nijse, R. (2003) Glass in structures. Birkhäuser Publishers, Basel.
- Paricio, I. (2000) El vidrio estructural. Editorial Bisagra, Barcelona.
- Vázquez Zaldívar, C. (2006) El vidrio, arquitectura y técnica. Serie Arquitectura y Técnica, vol. 1, Ediciones ARQ, Escuela de Arquitectura Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.
- Wurm, J. (2007) Glass structures. Design and construction of self-supporting skins. Birkhäuser Verlag AG, Basel.

5.2. Disertaciones y tesis académicas.

- Chaunac, M. y Serruys, F. (1997). Glass as a structural element. Session 3. Glass Processing Days, 13–15 September '97. Páginas 197 a 202. Disponible en: <http://www.glassfiles.com/articles/glass-structural-element>. [Consulta: 26 de octubre de 2015].
- Cruz, P. y Pequeno, J. (2008). Timber-Glass Composite Beams: Mechanical Behaviour & Architectural Solutions. University of Minho. Engineering Department, Portugal.
- Cruz, P. y Pequeno, J. (2008). Timber-Glass Composite Structural Panels: Experimental Studies & Architectural Applications. University of Minho. Engineering Department, Portugal.
- Macfarlane, T. (1999). Construction Details for Structural Glass Assemblies. Sesión 10 - Glass Processing Days, 13–16 June '99. Páginas 474 a 476. Disponible en: <http://www.glassfiles.com/articles/construction-details-structural-glass-assemblies>. [Consulta: 26 de octubre de 2015].
- Netušil, M. y Eliasova, M. (2011). Hybrid steel-glass beams with polymer adhesive. Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering. Disponible en: <http://www.glassfiles.com/articles/hybrid-steel-glass-beams-polymer-adhesive>. [Consulta: 2 de noviembre de 2015].
- Winter, W., Hochhauser, W. y Kreher, K. (2010). Load bearing and stiffening Timber-Glass-Composites (TGC). World Conference on Timber Engineering. Disponible en: <https://www.yumpu.com/en/document/view/5337305/load-bearing-and-stiffening-timber-glass-composites-tgc>. [Consulta: 15 de septiembre de 2015].

6. Bibliografía.

6.1. Libros.

- Behling, S. y Behling, S. (1999) Glass. Konstruktion und Technologie in der Architektur. Structure and Technology in Architecture. Prestel Verlag, München.
- Compagno, A. (2002) Intelligente Glasfassaden. Material Anwendung Gestaltung. Intelligent Glass Façades. Material Practice Design. Birkhäuser Publishers, Basel.

- Krampen, M. y Schempp, D. (1999) Glasarchitekten. Konzepte, Bauten, Perspektiven. Glass Architects. Concepts, Buildings, Perspectives. AV edition, Stuttgart.
- Krewinkel, H. W. (1998) Glass Buildings. Material, Structure and Detail. Birkhäuser, Basel, Berlin, Boston.
- Rice, P. y Dutton H. (1995) Structural Glass. E & F Spon, Chapman & Hall, London.
- Tschumi, B. y Dutton, H. (2001) Glass Ramps/ Glass Wall. Deviations from the Normative. AA Publications, Architectural Association, London.

6.2. Disertaciones y tesis académicas.

- Bagger, A. (2010). Plate shell structures of glass. Studies leading to guidelines for structural design. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark.
- Consolini, L. (2011). Structural glass between design, test and models. Scuola di dottorato in Scienze dell'Ingegneria, Università Politecnica Delle Marche. Disponible en: <http://openarchive.univpm.it/jspui/bitstream/123456789/50/1/Tesi.Consolini.pdf>. [Consulta: 10 de septiembre de 2015].
- Fu, L. (2010). Glass beam design for architects: brief introduction to the most critical factors of glass beams and easy computer tool. Faculty of the USC School of Architecture University of Southern California. Disponible en: <http://digitallibrary.usc.edu/cdm/ref/collection/p15799coll127/id/15570>. [Consulta: 14 de septiembre de 2015].
- Ouwerkerk, E. (2011). Glass columns, Delft University of Technology. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft. Disponible en: https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCEQFjAAahUKEwiyudHS5ezHAhWG2RoKHWv3Cs0&url=http%3A%2F%2Frepository.tudelft.nl%2Fassets%2Fuuid%3Aac8266da-8de9-4d99-be98-c1c1e5a06f8f%2FEindrapport_Eline.pdf&usq=AFQjCNFGjNYgWYSDY1uA0zXTe7ukPozZZQ&vm=bv.102022582,d.d2s&cad=rja. [Consulta: 10 de septiembre de 2015].

6.3. Artículos de revista.

- De la cierva, P. y Arroyo, L. (1963) "La superficie del vidrio" en Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, vol. 2, nº 2, marzo-abril 1963, pp. 95-102.
- Gerfen, K. (2009) "Glass link" en Architect [en línea], 3 de agosto de 2009. Disponible en: http://www.architectmagazine.com/technology/detail/glass-link_o. [Consulta: 7 de septiembre de 2015].
- "Glass extension in London" en Detail [en línea], revista 01+02/2007, 1 de enero de 2007. Disponible en: <http://www.detail-online.com/inspiration/glass-extension-in-london-103254.html>. [Consulta: 7 de septiembre de 2015].

6.4. Blogs.

- Amrine, Katie y Mendoza, Andrea (2013) "Endeavor", 2B Glass Pavilion, 20 de marzo. Disponible en: <http://glasspavilion.blogspot.com.es/2013/03/endeavor.html>. [Consulta: 15 de septiembre de 2015].

- Elviraeb (2013) "Glass Store Architecture", Glass design, 3 de junio. Disponible en: <https://glassdesignpage.wordpress.com/2013/06/03/glass-store-architecture/>. [Consulta: 7 de septiembre de 2015].

6.5. Webs.

- ArchDaily (2008). "Basque Health Department Headquarters in Bilbao / Coll-Barreu Arquitectos" en ArchDaily [en línea], 3 de octubre. Disponible en: <http://www.archdaily.com/7093/basque-health-department-headquarters-in-bilbao-coll-barreu-arquitectos>. [Consulta: 15 de septiembre de 2015].

- Coffey architects. "Garden Room" en Coffey architects [en línea]. Disponible en: <http://coffeyarchitects.com/garden-room/>. [Consulta: 2 de septiembre de 2015].

- Culmax. "Glass Structures" en Culmax [en línea]. Disponible en: <http://www.culmax.co.uk/glass/>. [Consulta: 2 de septiembre de 2015].

- FAT LAB. "U - Glasbogen" en FAT LAB [en línea]. Disponible en: <http://www.fat-lab.de/archive/portfolio/u-glasbogen>. [Consulta: 26 de octubre de 2015].

- Glass solutions Saint-Gobain. "System for insulated glass with point-fixings on the inner sheet only" en Glass solutions [en línea]. Disponible en: http://www.glassolutions.at/en/produkte/systeme/litewall_iso/index.aspx. [Consulta: 17 de agosto de 2015].

- Ludvik, Michael (2012). "Lincoln Center Canopies – Glass Supporting Steel" en Glass on Web [en línea], febrero. Disponible en: <http://www.glassonweb.com/articles/article/766/>. [Consulta: 2 de noviembre de 2015].

- Oficina Informal de Arquitectura. "Taller del Té" en Oficina Informal de Arquitectura [en línea]. Disponible en: <http://www.oficinainformal.com/index.php?/projects/taller-del-te/>. [Consulta: 14 de septiembre de 2015].

- Patently Apple (2012). "Apple Files Patent for Shanghai's Apple Store Glass Panel Design" en Patently Apple [en línea], 19 de abril. Disponible en: <http://www.patentlyapple.com/patently-apple/2012/04/apple-files-patent-for-shanghais-apple-store-glass-panel-design.html>. [Consulta: 31 de octubre de 2015].

- Paul archer design. "Church Cottage" en Paul archer design [en línea]. Disponible en: http://www.paularcherdesign.co.uk/project/7/church_cottage. [Consulta: 14 de septiembre de 2015].

- Paul archer design. "Middlemiss Flat" en Paul archer design [en línea]. Disponible en: http://www.paularcherdesign.co.uk/project/16/middlemiss_flat. [Consulta: 14 de septiembre de 2015].

- Santarsiero, Manuel (2013). "Novel Laminated Connections" en Glass on Web [en línea], febrero. Disponible en: <http://www.glassonweb.com/articles/article/846/>. [Consulta: 17 de agosto de 2015].

- Trombé. The architecture of glass. "Structural glazing" en Trombé [en línea]. Disponible en: <http://www.trombe.co.uk/#!listed-buildings/cpw4>. [Consulta: 14 de septiembre de 2015].

7. Procedencia de ilustraciones.

- Fig. 1: Disponible en: <http://triangulomag.com/2013/04/19/bauhaus/>. [Consulta: 25 de septiembre de 2015].
- Fig. 2: Disponible en: <http://www.editorialvirtual-mapp.com/AEROPUERTO.html>. [Consulta: 25 de septiembre de 2015].
- Fig. 3: Disponible en: <http://renatocilento.blogspot.com.es/2011/04/peter-rice-1935-1992.html>. [Consulta: 27 de septiembre de 2015].
- Fig. 4: Disponible en: http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Archivo:Estac_tren_berlin_24.jpg. [Consulta: 19 de septiembre de 2015].
- Fig. 5: Disponible en: <http://es.dreamstime.com/fotograf%C3%ADa-de-archivo-libre-de-regal%C3%ADas-fachada-de-cristal-de-alta-tecnolog%C3%ADa-image2220027>. [Consulta: 19 de septiembre de 2015].
- Fig. 6: Elaboración propia.
- Fig. 7: Elaboración propia.
- Fig. 8: Elaboración propia.
- Fig. 9: Elaboración propia.
- Fig. 10: Elaboración propia.
- Fig. 11: Elaboración propia.
- Fig. 12: Elaboración propia.
- Fig. 13: Fotografía propia del día 31 de agosto de 2014.
- Fig. 14: Elaboración propia.
- Fig. 15: Disponible en: <http://www.culmax.co.uk/gallery/project2/1-8-77/>. [Consulta: 18 de septiembre de 2015].
- Fig. 16: Elaboración propia.
- Fig. 17: Fotografía propia del día 3 de octubre de 2015.
- Fig. 18: Disponible en: <http://coffeyarchitects.com/garden-room/>. [Consulta: 18 de septiembre de 2015].
- Fig. 19: Elaboración propia.
- Fig. 20: Elaboración propia.
- Fig. 21: Elaboración propia.
- Fig. 22: Elaboración propia.
- Fig. 23: Wurm, J. (2007) Glass structures. Design and construction of self-supporting skins. Birkhäuser Verlag AG, Basel, p. 172.
- Fig. 24: Wurm, J. (2007) Glass structures. Design and construction of self-supporting skins. Birkhäuser Verlag AG, Basel, p. 172.

- Fig. 25: Elaboración propia.
- Fig. 26: Disponible en: http://www.architectmagazine.com/technology/detail/glass-link_o. [Consulta: 10 de septiembre de 2015].
- Fig. 27: Elaboración propia.
- Fig. 28: Disponible en: http://www.architectmagazine.com/technology/detail/glass-link_o. [Consulta: 10 de septiembre de 2015].
- Fig. 29: Disponible en: http://www.architectmagazine.com/technology/detail/glass-link_o. [Consulta: 10 de septiembre de 2015].
- Fig. 30: Elaboración propia.
- Fig. 31: Disponible en: <http://www.detail-online.com/inspiration/glass-extension-in-london-103254.html>. [Consulta: 18 de septiembre de 2015].
- Fig. 32: Disponible en: <http://www.detail-online.com/inspiration/glass-extension-in-london-103254.html>. [Consulta: 18 de septiembre de 2015].
- Fig. 33: Elaboración propia.
- Fig. 34: Elaboración propia.
- Fig. 35: Disponible en: http://www.paularcherdesign.co.uk/project/16/middlemiss_flat. [Consulta: 18 de septiembre de 2015].
- Fig. 36: Elaboración propia.
- Fig. 37: Disponible en: http://www.paularcherdesign.co.uk/project/7/church_cottage. [Consulta: 18 de septiembre de 2015].
- Fig. 38: Elaboración propia.
- Fig. 39: Disponible en: <http://www.fluidstructures.com/html/glass/churchcottage.html>. [Consulta: 19 de octubre de 2015].
- Fig. 40: Disponible en: <http://www.fluidstructures.com/html/glass/churchcottage.html>. [Consulta: 19 de octubre de 2015].
- Fig. 41: Elaboración propia.
- Fig. 42: Elaboración propia.
- Fig. 43: Disponible en: http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Archivo:FIT_3.jpg. [Consulta: 26 de octubre de 2015].
- Fig. 44: Elaboración propia.
- Fig. 45: Behling, S. y Behling, S. (1999) Glass. Konstruktion und Technologie in der Architektur. Structure and Technology in Architecture. Prestel Verlag, München, p. 83.
- Fig. 46: Elaboración propia.
- Fig. 47: Elaboración propia.
- Fig. 48: Elaboración propia.

- Fig. 49: Nijse, R. (2003) Glass in structures. Birkhäuser Publishers, Basel, p. 41.
- Fig. 50: Disponible en: http://straatkaart.nl/6512AA-Stationsplein/media_fotos/ck-station-nijmegen-O3h/. [Consulta: 25 de octubre de 2015].
- Fig. 51: Elaboración propia.
- Fig. 52: Elaboración propia.
- Fig. 53: Elaboración propia.
- Fig. 54: Disponible en: <http://www.mauriziofrolì.it/lang/en-us/strutture-in-vetro-e-acciaio/travi-vitree-tensegrity/prototipi-tvt-alfa-e-beta/gallery/>. [Consulta: 21 de septiembre de 2015].
- Fig. 55: Disponible en: <http://www.mauriziofrolì.it/lang/en-us/strutture-in-vetro-e-acciaio/travi-vitree-tensegrity/prototipi-tvt-alfa-e-beta/gallery/>. [Consulta: 21 de septiembre de 2015].
- Fig. 56: Elaboración propia.
- Fig. 57: Disponible en: <http://www.mauriziofrolì.it/lang/en-us/strutture-in-vetro-e-acciaio/travi-vitree-tensegrity/prototipi-tvt-alfa-e-beta/gallery/>. [Consulta: 21 de septiembre de 2015].
- Fig. 58: Elaboración propia.
- Fig. 59: Elaboración propia.
- Fig. 60: Elaboración propia.
- Fig. 61: Elaboración propia.
- Fig. 62: Behling, S. y Behling, S. (1999) Glass. Konstruktion und Technologie in der Architektur. Structure and Technology in Architecture. Prestel Verlag, München, p. 112 - 113.
- Fig. 63: Elaboración propia.
- Fig. 64: Elaboración propia.
- Fig. 65: Behling, S. y Behling, S. (1999) Glass. Konstruktion und Technologie in der Architektur. Structure and Technology in Architecture. Prestel Verlag, München, p. 111.
- Fig. 66: Elaboración propia.
- Fig. 67: Disponible en: <http://www.fat-lab.de/archive/portfolio/u-glasbogen>. [Consulta: 26 de octubre de 2015].
- Fig. 68: Elaboración propia.
- Fig. 69: Disponible en: <http://www.fat-lab.de/archive/portfolio/u-glasbogen>. [Consulta: 26 de octubre de 2015].
- Fig. 70: Elaboración propia.
- Fig. 71: Elaboración propia.
- Fig. 72: Elaboración propia.

- Fig. 73: Elaboración propia.
- Fig. 74: Elaboración propia.
- Fig. 75: Behling, S. y Behling, S. (1999) Glass. Konstruktion und Technologie in der Architektur. Structure and Technology in Architecture. Prestel Verlag, München, p. 116 - 117.
- Fig. 76: Elaboración propia.
- Fig. 77: Elaboración propia.
- Fig. 78: Elaboración propia.
- Fig. 79: Elaboración propia.
- Fig. 80: Disponible en: http://www.brunet-saunier.com/fr/projets/1259-centre_administratif_de_saint-germain-en-laye.html. [Consulta: 19 de septiembre de 2015].
- Fig. 81: Consolini, L. (2011). Structural glass between design, test and models. Scuola di dottorato in Scienze dell'Ingegneria, Universita Politecnica Delle Marche, p. 17.
- Fig. 82: Elaboración propia.
- Fig. 83: Elaboración propia.
- Fig. 84: Disponible en: <http://www.annebagger.dk/uk/projects/glass-columns-at-danfoss.html>. [Consulta: 31 de octubre de 2015].
- Fig. 85: Disponible en: <http://www.annebagger.dk/uk/projects/glass-columns-at-danfoss.html>. [Consulta: 31 de octubre de 2015].
- Fig. 86: Elaboración propia.
- Fig. 87: Disponible en: <http://www.annebagger.dk/uk/projects/glass-columns-at-danfoss.html>. [Consulta: 31 de octubre de 2015].
- Fig. 88: Elaboración propia.
- Fig. 89: Ouwerkerk, E. (2011). Glass columns, Delft University of Technology. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, p. 22.
- Fig. 90: Ouwerkerk, E. (2011). Glass columns, Delft University of Technology. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, p. 22.
- Fig. 91: Elaboración propia.
- Fig. 92: Disponible en: <http://www.shukhov.org/tower.html>. [Consulta: 31 de octubre de 2015].
- Fig. 93: Elaboración propia.
- Fig. 94: Disponible en: <http://www.predock.com/Flint/Flint.html>. [Consulta: 19 de septiembre de 2015].
- Fig. 95: Disponible en: <http://www.predock.com/Flint/Flint.html>. [Consulta: 19 de septiembre de 2015].
- Fig. 96: Disponible en: <http://www.campobaeza.com/offices-for-the-junta-de-castilla-y-leon/?type=catalogue>. [Consulta: 20 de septiembre de 2015].

- Fig. 97: Disponible en: <http://www.campobaeza.com/offices-for-the-junta-de-castilla-y-leon/?type=catalogue>. [Consulta: 20 de septiembre de 2015].
- Fig. 98: Elaboración propia.
- Fig. 99: Elaboración propia.
- Fig. 100: Elaboración propia.
- Fig. 101: Disponible en: <http://www.spirit-architects.london/broadfield-house-glass-museum/>. [Consulta: 20 de septiembre de 2015].
- Fig. 102: Elaboración propia.
- Fig. 103: Elaboración propia.
- Fig. 104: Elaboración propia.
- Fig. 105: Disponible en: <http://www.ryan-hughes.net/ArchDetailsMuseumFrameset.htm>. [Consulta: 20 de septiembre de 2015].
- Fig. 106: Elaboración propia.
- Fig. 107: Disponible en: <http://bcj.com/projects/apple-pudong/>. [Consulta: 1 de noviembre de 2015].
- Fig. 108: Disponible en: <http://bcj.com/projects/apple-pudong/>. [Consulta: 1 de noviembre de 2015].
- Fig. 109: Disponible en: <http://gallerygogopix.net/apple+store+shanghai+pudong>. [Consulta: 18 de septiembre de 2015].
- Fig. 110: Elaboración propia.
- Fig. 111: Elaboración propia.
- Fig. 112: Elaboración propia.
- Fig. 113: Elaboración propia.
- Fig. 114: Elaboración propia.
- Fig. 115: Disponible en: <http://designerscollaborativenyc.com/clean-shot-a-great-architectural-photographer/>. [Consulta: 18 de septiembre de 2015].
- Fig. 116: Disponible en: [https://heyjoenyc.tour.wordpress.com/2014/09/15/3-bryant-park/10-interior-of-the-crystal-palace-by-thoms-paxton-1851- /](https://heyjoenyc.tour.wordpress.com/2014/09/15/3-bryant-park/10-interior-of-the-crystal-palace-by-thoms-paxton-1851-/). [Consulta: 2 de noviembre de 2015].
- Fig. 117: Elaboración propia.
- Fig. 118: Elaboración propia.
- Fig. 119: Elaboración propia.
- Fig. 120: Elaboración propia.
- Fig. 121: Disponible en: http://carpenterlowings.com/portfolio_page/lens-ceiling/. [Consulta: 2 de noviembre de 2015].

- Fig. 122: Disponible en: http://carpenterlowings.com/portfolio_page/lens-ceiling/. [Consulta: 2 de noviembre de 2015].
- Fig. 123: Elaboración propia.
- Fig. 124: Elaboración propia.
- Fig. 125: Wurm, J. (2007) Glass structures. Design and construction of self-supporting skins. Birkhäuser Verlag AG, Basel, p. 228.
- Fig. 126: Wurm, J. (2007) Glass structures. Design and construction of self-supporting skins. Birkhäuser Verlag AG, Basel, p. 228.
- Fig. 127: Elaboración propia.
- Fig. 128: Elaboración propia.
- Fig. 129: Elaboración propia.
- Fig. 130: Disponible en: <http://architizer.com/projects/brooklyn-academy-of-music-peter-jay-sharp-building-restoration/>. [Consulta: 18 de septiembre de 2015].
- Fig. 131: Elaboración propia.
- Fig. 132: Elaboración propia.
- Fig. 133: Disponible en: <http://architizer.com/projects/brooklyn-academy-of-music-peter-jay-sharp-building-restoration/>. [Consulta: 18 de septiembre de 2015].
- Fig. 134: Elaboración propia.
- Fig. 135: Elaboración propia.
- Fig. 136: Disponible en: <http://www.oficinainformal.com/index.php?/projects/taller-del-te/>. [Consulta: 14 de septiembre de 2015].
- Fig. 137: Elaboración propia.
- Fig. 138: Wurm, J. (2007) Glass structures. Design and construction of self-supporting skins. Birkhäuser Verlag AG, Basel, p. 181.
- Fig. 139: Elaboración propia.
- Fig. 140: Elaboración propia.
- Fig. 141: Disponible en: http://www.archi-europe.com/files_mod/architects/22986493_Maedebach%20Redeleit%20&%20Partners%20buildings%20and%20projects%202000-2006.pdf. [Consulta: 22 de septiembre de 2015].
- Fig. 142: Disponible en: http://www.archi-europe.com/files_mod/architects/22986493_Maedebach%20Redeleit%20&%20Partners%20buildings%20and%20projects%202000-2006.pdf. [Consulta: 22 de septiembre de 2015].
- Fig. 143: Elaboración propia.
- Fig. 144: Elaboración propia.
- Fig. 145: Elaboración propia.

- Fig. 146: Wurm, J. (2007) Glass structures. Design and construction of self-supporting skins. Birkhäuser Verlag AG, Basel, p. 188.
- Fig. 147: Wurm, J. (2007) Glass structures. Design and construction of self-supporting skins. Birkhäuser Verlag AG, Basel, p. 190.
- Fig. 148: Elaboración propia.
- Fig. 149: Elaboración propia.
- Fig. 150: Wurm, J. (2007) Glass structures. Design and construction of self-supporting skins. Birkhäuser Verlag AG, Basel, p. 219.
- Fig. 151: Elaboración propia.
- Fig. 152: Wurm, J. (2007) Glass structures. Design and construction of self-supporting skins. Birkhäuser Verlag AG, Basel, p. 219.
- Fig. 153: Wurm, J. (2007) Glass structures. Design and construction of self-supporting skins. Birkhäuser Verlag AG, Basel, p. 146.
- Fig. 154: Elaboración propia.
- Fig. 155: Elaboración propia.
- Fig. 156: Disponible en: <http://www.fat-lab.de/archive/portfolio/glasfaltwerk>. [Consulta: 26 de octubre de 2015].
- Fig. 157: Disponible en: <http://www.mauriziofroli.it/lang/en-us/strutture-in-vetro-e-acciaio/sistema-costruttivo-svt-solidi-vitrei-tensegrity/>. [Consulta: 21 de septiembre de 2015].
- Fig. 158: Disponible en: <http://www.mauriziofroli.it/lang/en-us/strutture-in-vetro-e-acciaio/sistema-costruttivo-svt-solidi-vitrei-tensegrity/>. [Consulta: 21 de septiembre de 2015].
- Fig. 159: Elaboración propia.
- Fig. 160: Disponible en: <http://www.suckerpunchdaily.com/2013/04/09/glass-pavilion-prototype/>. [Consulta: 18 de septiembre de 2015].
- Fig. 161: Elaboración propia.
- Fig. 162: Disponible en: <http://www.suckerpunchdaily.com/2013/04/09/glass-pavilion-prototype/>. [Consulta: 18 de septiembre de 2015].
- Fig. 163: Elaboración propia.
- Fig. 164: Disponible en: <http://www.scielo.cl/pdf/arg/n84/art14.pdf>. [Consulta: 17 de septiembre de 2015].
- Fig. 165: Cruz, P. y Pequeno, J. Timber-Glass Composite Structural Panels: Experimental Studies & Architectural Applications. (2008). University of Minho. Engineering Department, Portugal, p. 2.
- Fig. 166: Cruz, P. y Pequeno, J. Timber-Glass Composite Structural Panels: Experimental Studies & Architectural Applications. (2008). University of Minho. Engineering Department, Portugal, p. 3.
- Fig. 167: Cruz, P. y Pequeno, J. Timber-Glass Composite Beams: Mechanical Behaviour &

- Architectural Solutions. (2008). University of Minho. Engineering Department, Portugal, p. 2.
- Fig. 168: Netusil, M. y Eliasova, M. (2011). Hybrid steel-glass beams with polymer adhesive. Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, p. 295. Disponible en: <http://www.glassfiles.com/articles/hybrid-steel-glass-beams-polymer-adhesive>. [Consulta: 2 de noviembre de 2015].
 - Fig. 169: Disponible en: <http://www.poolima.de/bauwerke/kaulbachplatz/hg440-0088.php>. [Consulta: 25 de octubre de 2015].
 - Fig. 170: Fotografía propia del día 3 de octubre de 2015.
 - Fig. 171: Fotografía propia del día 3 de octubre de 2015.
 - Fig. 172: Disponible en: <http://www.e-architect.co.uk/guangzhou/guangzhou-opera-house-building>. [Consulta: 1 de octubre de 2015].
 - Fig. 173: Disponible en: <http://www.dezeen.com/2011/02/25/guangzhou-opera-house-by-zaha-hadid-architects/>. [Consulta: 1 de octubre de 2015].
 - Fig. 174: Disponible en: <http://www.dezeen.com/2011/02/25/guangzhou-opera-house-by-zaha-hadid-architects/>. [Consulta: 1 de octubre de 2015].
 - Fig. 175: Compagno, A. (2002) Intelligente Glasfassaden. Material Anwendung Gestaltung. Intelligent Glass Façades. Material Practice Design. Birkhäuser Publishers, Basel, p. 26.
 - Fig. 176: Disponible en: <https://glassdesignpage.wordpress.com/2013/06/03/glass-store-architecture/>. [Consulta: 10 de septiembre de 2015].
 - Fig. 177: Disponible en: <http://architecture.org.nz/2011/11/07/apple-strudel/>. [Consulta: 20 de septiembre de 2015].
 - Fig. 178: Disponible en: <https://glassdesignpage.wordpress.com/2013/06/03/glass-store-architecture/>. [Consulta: 10 de septiembre de 2015].

