

NUEVOS CONCEPTOS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE VIDRIO: VIGAS PRETENSADAS

Cerezo Miguel, J.M.

Núñez Díaz, M.A.

Lauret Aguirregabiria, B.

Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

Correo electrónico: jmcerezo@envolventesarquitectonicas.es

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 OBJETIVOS
- 3 HIPÓTESIS
- 4 DESARROLLO DE LA HIPÓTESIS
- 5 ESTADO DE LA TÉCNICA
- 6 DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
 - 6.1 Dimensionamiento analítico de la viga
 - 6.2 Método elegido
 - 6.3 Problemas y dificultades
- 7 RESULTADOS
 - 7.1 Método de elementos finitos
 - 7.2 Método experimental
- 8 CONCLUSIONES
- 9 BIBLIOGRAFIA

1 INTRODUCCIÓN

Este estudio está dentro de una investigación más amplia sobre un nuevo concepto de casa solar, la cual incluye una caja de vidrio sostenible; por ello nuestra investigación está acotada y tiene un objetivo prioritario que es servir al proyecto directriz de la casa solar.

En el proyecto de la caja de vidrio se plantea la necesidad de utilizar los pórticos resistentes de vidrio para soportar la cubierta horizontal del mismo material, de manera que éste ha sido el punto de partida para la realización de prototipos.

El vidrio es un material muy atractivo para la arquitectura por su transparencia y pese a su falta de uso como elemento estructural, es un material con un comportamiento tremendamente eficaz para resistir los esfuerzos de compresión, aunque su principal problema se encuentra en la resistencia a tracción, que realmente es baja sobre todo ante cargas permanentes.

Además del problema de la resistencia a tracción del vidrio, nos encontramos con que los valores de resistencia del vidrio están basados en la estadística, ya que debido a que se trata de un material frágil posee un gran número de roturas de diversa índole que no pueden llegar a explicarse de manera categórica. Alcanzando el límite elástico se pasa directamente a la rotura sin pasar previamente por un estado plástico de deformación permanente.

El vidrio es un material muy utilizado en la arquitectura, sobre todo en la actualidad; aunque su uso habitual es como parte del cerramiento de los edificios y no en el sistema estructural de los mismos.

En los últimos años, el vidrio se está empezando a utilizar en la arquitectura de manera estructural, como soporte del propio cerramiento, es decir, realizando grandes fachadas acristaladas en las que es el vidrio el elemento de cerramiento y también el resistente, imitando elementos de fachada de acero o aluminio que traspassen las cargas de esfuerzos horizontales (no permanentes) a la estructura portante del edificio.

También se están empezando a utilizar elementos de vidrio para formar vigas o pilares de pequeños pabellones, salas, lucernarios o invernaderos, pero siempre de manera muy puntual y en elementos de poca importancia estructural.

Actualmente son ya referencias nombradas en los libros sobre el vidrio en la arquitectura, tipos de edificaciones y elementos sobre los que también hemos estudiado y que son los siguientes según el orden de aparición:

- Pabellón de vidrio para la exposición de Arte Sonsbeek en Arnhem.
- Pabellón de entrada al museo de vidrio en Kingswinford
- Puente de vidrio en Kraaijvanger. Urbis. Rotterdam, Arq. Dirk Jan Postel
- Marquesina de vidrio del Foro Internacional de Tokio Arq. R. Viñoly
- Memorial 11-M en Madrid. Estudio FAM.

En todos ellos los elementos de vigas de vidrio están soportando también techos de vidrio con cargas permanentes, no cargas eventuales como en fachadas.

2 OBJETIVOS

- Realizar vigas pretensadas de vidrio aprovechando las ventajas que tiene este material en su resistencia a los esfuerzos a compresión.
- Optimizar las secciones de vidrio consiguiendo menores cantos en las vigas para resistir los mismos esfuerzos precomprimiendo las mismas.
- Integrar los refuerzos metálicos de acero para la precompresión en las propias vigas.
- Realizar distintos ensayos con distintos elementos para conseguir el modelo ideal de la precompresión de las mismas vigas.

3 HIPÓTESIS

La hipótesis principal del estudio que se llevará a cabo es que la precompresión de las vigas de vidrio evitan las tracciones inferiores producidas por la flexión de las vigas, consiguiendo una optimización de las secciones.

4 DESARROLLO DE LA HIPÓTESIS

Los elementos constructivos, vigas, cuando se someten a esfuerzos de flexión simple reaccionan en sus secciones internas con una tensión de compresión en la parte superior y una tensión de tracción en la parte inferior, que son más importantes en las fibras extremas de la sección y van disminuyendo hasta su punto de encuentro en la fibra neutra de la propia sección. Este reparto de compresiones y tracciones en secciones homogéneas y simétricas se realiza de manera igualada para mantener el equilibrio en todos los puntos de la sección.

En el caso del vidrio la resistencia a la tracción es muy inferior comparada a su gran resistencia a compresión, lo que hace que las vigas se tengan que dimensionar al máximo esfuerzo de tracción que pueda resistir, mientras que la zona comprimida estaría muy por debajo de sus posibilidades reales de resistencia. Debemos tener en cuenta que la resistencia a compresión de un vidrio recocido es de 10000 kg/cm^2 , mientras que su resistencia a tracción es de 400 kg/cm^2 , 25 veces menor.



Fig. 1 Esquema de compresiones y tracciones en una viga en comparación con la resistencia del vidrio.

Para igualar esta circunstancia y conseguir un mayor aprovechamiento de la resistencia a compresión del vidrio y por consiguiente minimizar las secciones de los elementos, se propone la precompresión de las vigas de vidrio, consiguiendo así que las tracciones producidas por la flexión en la parte inferior sean compensadas con la precompresión de manera que puedan soportar una mayor carga.

La precompresión penalizará los esfuerzos a compresión de la parte superior de la viga pero debido a su gran resistencia a compresión siempre será más favorable para el resultado final del elemento que las posibles tracciones de la parte inferior.

El siguiente paso en la evolución será la compresión parcial de la viga, es decir sólo de la parte inferior, para evitar la penalización de la parte superior. Esta situación puede provocar problemas en la fibra neutra y será uno de los puntos a comprobar mediante las simulaciones de elementos finitos.

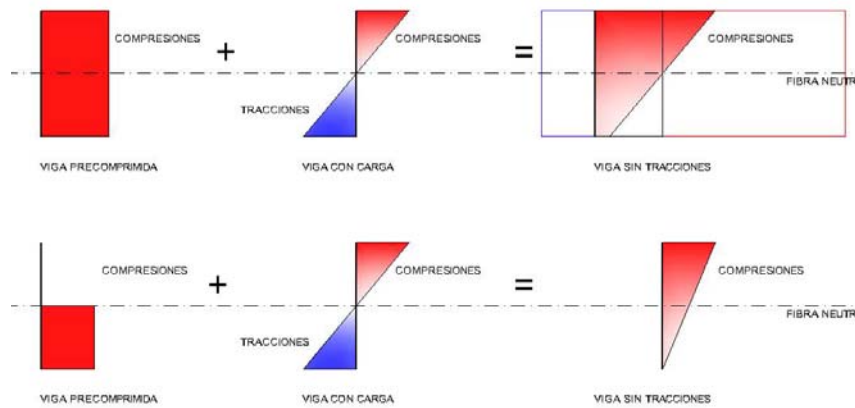


Fig. 2 Esquema de funcionamiento de la precompresión en la sección central de la viga.

5 ESTADO DE LA TÉCNICA

Debido a la gran importancia de este campo de trabajo y a la innovación que suponen estos elementos actualmente, se están desarrollando ciertos avances en el campo de la seguridad de estos elementos para conseguir una mayor fiabilidad de los mismos, evitando así riesgos en los espacios en los que se disponen.

Actualmente se están llevando a cabo varias investigaciones sobre este tipo de elementos. Los más importantes se están llevando a cabo en la Universidad de Delft. No obstante sus ensayos e investigaciones se desarrollan más en el aspecto de la seguridad que en el de la resistencia. Se están realizando elementos estructurales de vidrio reforzados con acero pero como elemento de seguridad diseñado para resistir los esfuerzos de tracción cuando las vigas de vidrio hayan colapsado o se encuentren en una situación desfavorable.

La mayor parte de sus estudios utilizan los refuerzos metálicos sin incluir una pretensión en los mismos, en algún caso si se utiliza pero se basan en su utilización como pilares que se precomprimen para que sean capaces de admitir pequeñas flexiones y esfuerzos excéntricos.

Sobre este tema existen dos variantes en la manera de realizar estos elementos, desde el punto de vista de la composición de las vigas de vidrio ante la carga a resistir. Esto implica que el agrupamiento de láminas de vidrio entre elementos se produzcan de manera paralela a la carga o de manera perpendicular, lo que implica un mayor número de elementos.

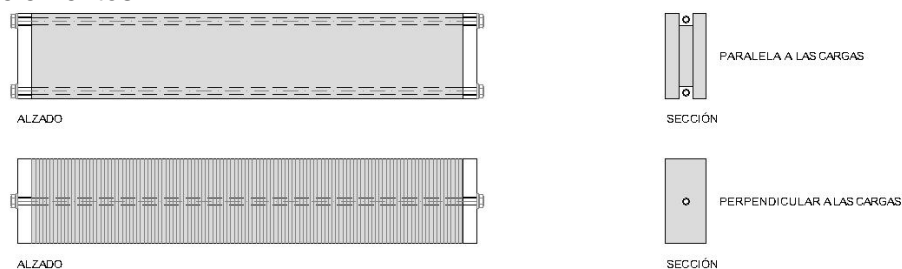


Fig. 3 Esquemas de distintas variantes de vigas precomprimidas

Mientras que en la primera manera la compresión a introducir es menor debido a que el propio elemento ya posee una inercia de partida y una resistencia al cortante, en la segunda manera la compresión a utilizar es mayor, ya que hay que contrarrestar con ésta el esfuerzo a cortante.

Las referencias bibliográficas sobre esta línea de trabajo se basan en los artículos de Jan Wurm "Apilamiento de vidrio, estructuras y esculturas" publicado en el congreso del GPD (Glass Performance Days, 2007) y en los artículos de Christian Louter, en la misma publicación, de la Universidad de Tecnología de Delft en los que se trabaja con el vidrio laminado y el acero.

6 DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

6.1 Dimensionamiento analítico de la viga

6.1.1 Hipótesis de carga

La caja solar diseñada tiene un ancho de 3,60 m con pórticos cada 1,20 m, de manera que éstas serán nuestras dimensiones de partida, con una sobrecarga horizontal de 150 kg/m², que engloba tanto el peso propio como las posibles sobrecargas de uso, nieve o viento que se puedan dar en la cubierta del edificio.

Las vigas se plantean como elementos biapoyados con articulaciones en los extremos evitando los empotramientos que puedan provocar tensiones más elevadas en los propios elementos.

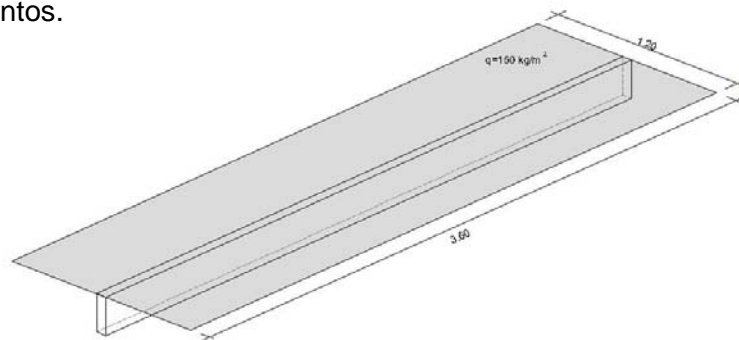


Fig. 4 Hipótesis de carga sobre la viga

6.1.2 Cálculo analítico de la viga

Tomamos una hipótesis de viga biapoyada y calculamos el momento flector que se produce en el centro del vano y el cortante que se produce en los extremos para realizar el dimensionamiento.

Mediante los cálculos estáticos obtenemos las siguientes expresiones, de la que deducimos las acciones a las que está sometido nuestro elemento:

$$M^* = \frac{qL^2}{8} \quad V^* = \frac{qL}{2}$$

$$M^* = \frac{(180 \cdot 1.5) \cdot 3.6^2}{8} = 437.4 \text{ kg} \cdot \text{m} = 43740 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

$$V^* = \frac{(180 \cdot 1.5) \cdot 3.6}{2} = 486 \text{ kg}$$

Para el predimensionado optaremos en el diseño por L/15, por lo que obtenemos:

$$b = \frac{L}{15} = \frac{360}{15} = 24cm$$

Para el dimensionado debemos obtener el módulo resistente y área necesarias para resistir los esfuerzos a los que está sometida manteniendo siempre la tensión por debajo de los 100 kg/cm² de tensión de comparación para el vidrio recocido en situación horizontal para cargas permanentes según se dice en los manuales de referencia del vidrio, SGG.

Una vez establecido el canto dimensionaremos el ancho de la viga mediante el momento flector máximo que debe resistir:

$$\sigma = \frac{M^*}{W_x} = \frac{43740kg \cdot cm}{W_x} \leq 100kg/cm^2 \Rightarrow W_x \geq \frac{43740kg \cdot cm}{100kg/cm^2} \geq 437.40cm^3$$

$$W_x = \frac{a \cdot b^2}{6} \Rightarrow 437.40cm^3 = \frac{a \cdot (24cm)^2}{6} \Rightarrow a = \frac{437.40cm^3 \cdot 6}{(24cm)^2} = 4.55cm$$

Este espesor trasladado a espesores comerciales se puede llegar a utilizar 4 vidrios de 12 mm de espesor lo que daría un espesor total de 48 mm. Por seguridad ante la rotura de alguna de ellas se opta por pensar en 5 vidrios de 12 mm teniendo un margen de seguridad en uno de ellos por lo que el espesor total será de 60 mm, quedando como resultado una sección de viga de 24x6 cm.

Las características de la sección serán las siguientes:

$$A = 144 cm^2 \quad W_x = 576 cm^3 \quad I_x = 6912 cm^4$$

Ahora realizaremos la comprobación a cortante y a deformación:

$$\sigma = \frac{V^*}{A} = \frac{486kg}{144cm^2} = 3.375kg/cm^2 \leq 100kg/cm^2$$

$$\delta = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{5 \cdot 1.8kg/cm \cdot (360cm)^4}{384 \cdot 730000kg/cm^2 \cdot 6912cm^4} = 0.078cm = 0.78mm < \frac{360}{500} = 0.72cm = 7.2mm$$

Por lo tanto el dimensionado es correcto.

6.1.3 Dimensionado de las tracciones de la viga

Para la realización de la investigación es necesario determinar la tracción que le debemos conferir a las barras para realizar la precompresión de la viga.

La tracción que deben tener, según la hipótesis planteada en un principio, debe ser al menos para que la tracción en la fibra inferior desaparezca anulándose con la precompresión en la sección central del vano.

Para ello lo que debemos hacer es descomponer el momento flector máximo resultante en un par de fuerzas, que provoca compresiones en la fibra superior de la

viga y tracciones en la fibra inferior. Serán éstas las que deben ser eliminadas para convertirlas en 0 o en compresiones.

El momento flector máximo se debe descomponer en dos fuerzas contrarias separadas una distancia h , que será el canto útil de la viga.

El canto útil en una viga de material homogéneo y carga constante en una sección determinada será $2/3$ del canto total según se muestra en el gráfico. Por lo tanto en nuestro caso h será 16 cm, lo que conlleva una carga a tracción y compresión de 2719.875 kg.

$$\sigma = \frac{M^*}{H} = \frac{43740 \text{ kg} \cdot \text{cm}}{16 \text{ cm}} = 2719.875 \text{ kg}$$

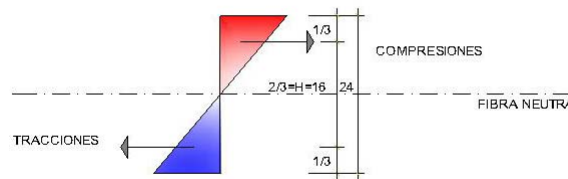


Fig. 5 Canto útil de la viga

6.2 Método elegido

Se han evaluado dos métodos diferentes pero complementarios, en primer lugar se han realizado unas simulaciones mediante el programa de elementos finitos, Pro-engineer Wildfire 3.0, en el que se han obtenido unos resultados.

Por otro lado se han realizado una serie de ensayos reales con probetas a escala 1/3 sobre los que se han obtenido una serie de resultados.

6.2.1 Método de elementos finitos

Mediante el programa de cálculo se realizan unas simulaciones para contrastar los resultados de las distintas hipótesis barajadas. Estos resultados nos servirán para realizar mejoras y avances sobre las probetas de ensayo a estudiar.

6.2.1.1 Simulaciones a realizar

En un primer paso se realizará la comprobación del cálculo analítico realizado para comprobar mediante el sistema de elementos finitos la viabilidad del elemento y la semejanza entre el cálculo analítico y la simulación, más cercana a la realidad.

Posteriormente realizaremos una simulación del mismo elemento pero a la escala de la probeta, es decir, a 1/3, con la carga repartida homogéneamente.

Por último se calcularán las distintas hipótesis de precompresión para poder analizar los resultados obtenidos.

Según se expone en la hipótesis lo más efectivo sería exclusivamente comprimir en la viga en la parte inferior para de esta manera no penalizar la parte comprimida de la viga y evitar flechas previas. Éste hecho lo comprobaremos también en las

simulaciones, para intentar sacar resultados que podamos aplicar en las probetas reales.

6.2.1.2 Hipótesis de cálculo

Para el cálculo con elementos finitos se ha simplificado la solución, utilizando un único material, el vidrio, sin tener en cuenta los elementos metálicos utilizados en los ensayos reales para conseguir las hipótesis.

En la simulación la viga se entiende como un único elemento macizo del mismo material apoyado en sus aristas inferiores, permitiendo los giros en las mismas y el desplazamiento horizontal, de manera que se considera como un apoyo simple, lo más parecido al cálculo analítico y a la realidad.

La precompresión se realizará directamente sobre las caras de los elementos sin introducir ningún material entre ellos.

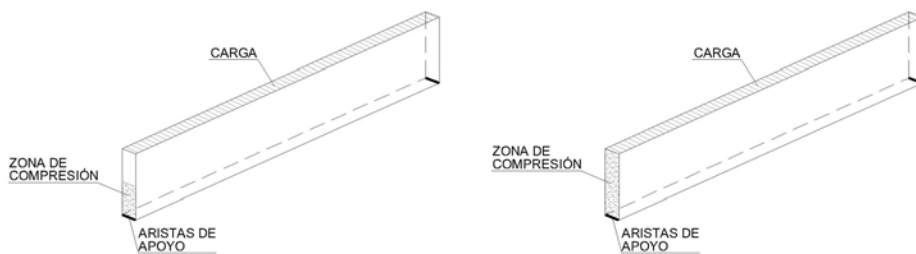


Fig. 11 Hipótesis de carga en simulación de elementos finitos

Se realizarán las simulaciones con la viga real de dimensiones 240x60 mm, y posteriormente se utilizarán las vigas a escala con unas dimensiones de 80x20 mm como patrón de referencia y las optimizaciones de 60x20 mm. En estas últimas se realizarán distintas pruebas de precompresiones, tanto en carga, se probará con 200 y 400 kg, como en geometría, se realizará una simulación con toda la superficie y otra sólo con la mitad de la superficie del canto de la viga.

6.2.1.3 Resultados obtenidos

En la simulación por elementos finitos obtendremos los resultados en gráficas sobre el propio modelo de las tensiones de comparación de von Mises y la deformación obtenida.

Los resultados de tensión según von Mises se deberán estudiar en la zona central de la viga, ya que los resultados obtenidos en los apoyos no son reales, debidos a puntos de discontinuidad por la simplificación de la simulación. En esta se impide el movimiento en una arista, y por ello en ella se elevan las tensiones, pero éste hecho en la realidad no se produce ya que el apoyo se reparte más homogéneamente.

6.2.2 Método experimental de vigas a escala

6.2.2.1 Vigas a escala

Como ya se ha comentado en otras ponencias en muchos ámbitos de la ciencia y la tecnología se realizan modelos a escala de los elementos reales para comprobar en ellos resultados que de otra manera o en dimensiones reales serían muy costosos de

realizar. En este sentido se realizarán probetas a escala de las vigas a utilizar para poder realizar más ensayos que de otra manera serían excesivamente costosos.

Las probetas se han realizado a escala 1/3, la elección de la escala se debe a la facilidad de manufactura en el vidrio a una escala mayor, ya que los espesores comerciales existentes no permiten ir a unos espesores menores con garantías.

6.2.2.2 Método experimental

El método experimental consiste en la comprobación de los efectos que producen diferentes acciones sobre diferentes objetos (vigas). En este tipo de métodos se disponen una serie de variables controladas para poder medir los efectos que producen.

En nuestro caso vamos a estudiar 4 variables:

- Carga
- Características geométricas de la sección de la viga
- Situación de las varillas que comprimen los especímenes
- Deformación de la viga

La variable fija será la carga que se mantendrá invariable para todos los casos; las variables estímulo o independientes serán las características geométricas y la situación de los elementos que comprimen las probetas; y por último la variable dependiente que vamos a estudiar y nos dará los resultados y conclusiones de los ensayos será la flecha que se produzca en las distintas probetas.

Para validar los resultados y objetivos marcados al comienzo de esta investigación marcaremos a una de las probetas como espécimen de referencia o espécimen patrón que marcará los resultados obtenidos en el resto.

6.2.2.3 Probetas

Esta probeta patrón, probeta A, es el traspaso literal de la viga calculada analíticamente a la escala de trabajo, sin haber realizado sobre ella ningún tipo de acción. Las dimensiones de esta probeta es el resultado del traspaso directo de las dimensiones originales 240x60 mm a la escala de actuación. Se compone de una viga de sección rectangular compuesta por 2 vidrios de 6 mm y un vidrio central de 8 mm, es decir un ancho total de 20 mm, todos ellos con un mismo canto de 80 mm.

Como el objetivo de la investigación es la optimización de los elementos, los siguientes especímenes, Probeta B, C y D, serán probetas que reducirán el canto, por lo que tendrán la misma composición de vidrios pero con un canto más reducido, 60 mm, y con distintos tipos de compresión.

Todas las probetas se han realizado mediante la laminación de los distintos vidrios utilizando butirales o PVB.

Por otro lado también se ha experimentado con la otra línea de investigación de este tipo de elementos, probeta E, que consiste en el apilamiento de elementos de vidrio en sentido transversal a la dirección de la viga.

Para éste caso se ha tomado una forma especial de probeta en lugar de ortogonal, con una forma preparada para repartir mejor la carga, teniendo una base superior mayor que sea capaz de recoger mejor los posibles apoyos de las placas de vidrio

superiores y aumentar el área de la sección sometida a compresión, minimizando el área de sección sometida a tracción. Esta probeta se ha realizado con 300 piezas de 4 mm de espesor que dan un resultado total de 1200 mm, y se han comprimido por medio de 4 barras exteriores, ya que por las dimensiones de la pieza, 60 mm de ancho y 80 mm de canto, no se han podido realizar taladros en su interior. Todas las piezas de vidrios han sido apiladas sin ningún tipo de adhesivos entre ellas.

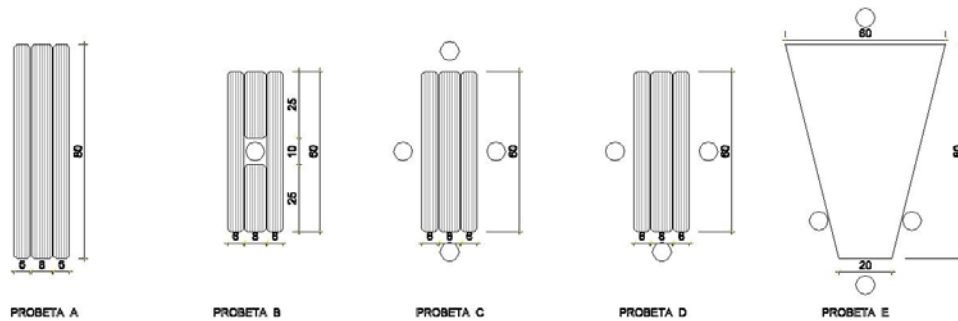


Fig. 6 Esquema de distintas probetas

Todas ellas tendrán una longitud entre apoyos de 1200 mm y una carga total de 75 kg, siendo su sistema de apoyo exactamente igual en todas las probetas.

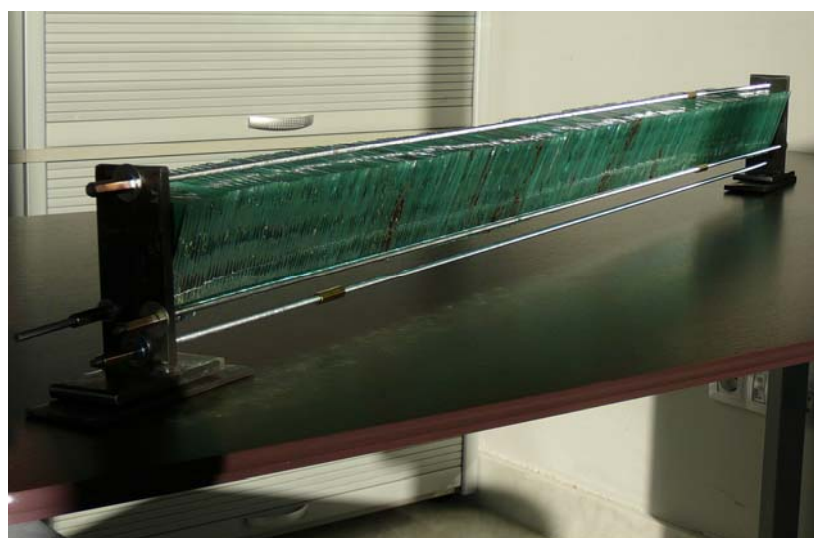


Fig. 7 Imagen de alguna de las probetas

Están son los primeros estudios preliminares, posteriormente se realizarán más ensayos con distintas probetas en las que se cambiarán espesores y dimensiones para comparar resultados y ver en que manera influye otra variable, el ancho de la probeta.

6.2.2.4 Banco de ensayo

Para la realización del ensayo se ha realizado un banco rígido y estable en un mismo tubo de acero, sobre el que se dispondrán los elementos necesarios para la fijación de las probetas, su puesta en carga y la posterior medición de las deformaciones como resultados.

El banco está formado por una estructura de tubos horizontales cuya base en forma de "H" se asienta sobre el suelo, sobre esta plataforma se levantan verticalmente cuatro tubos verticales separados 60 mm entre sí para alojar las probetas en su parte intermedia, apoyadas sobre unos espárragos roscados que los unen.

En la parte superior se dispondrá sobre la probeta un tubo horizontal sobre el que se dispondrá la carga y se repartirá ésta uniformemente en dos puntos sobre la probeta.

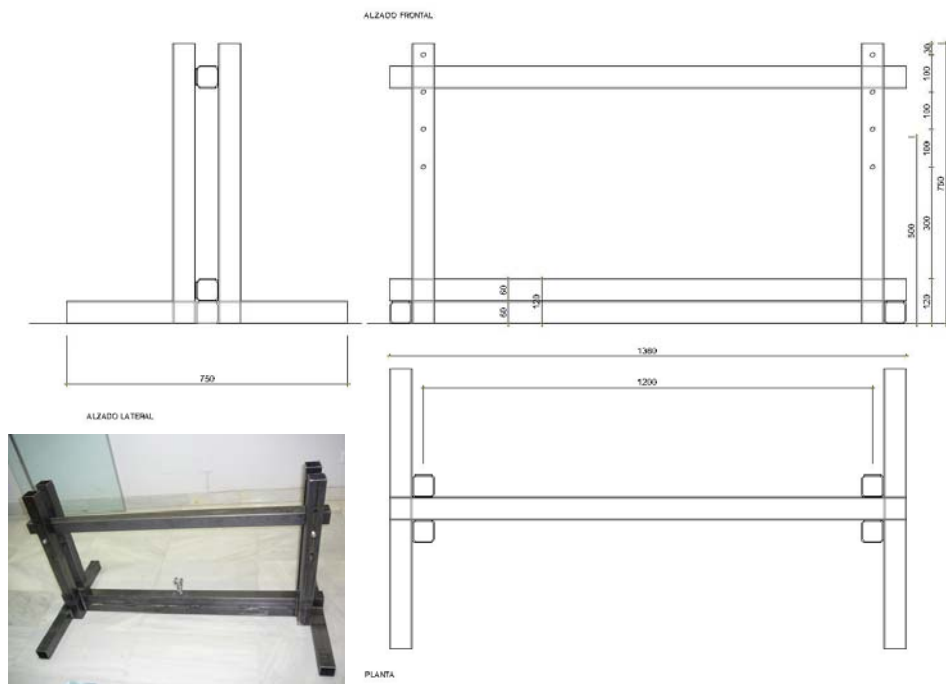


Fig. 8 Banco de ensayo

6.2.2.5 Carga de la probeta

Como todos los ensayos se realizarán para determinar deformaciones y no tensiones; la carga nunca será mayorada por coeficientes de seguridad.

La carga se traspasará a la probeta por medio de dos apoyos situados a $L/4$ de los extremos, de esta manera se puede conseguir una mejor simulación de una carga repartida, ya que ésta es difícil de conseguir de manera homogénea evitando que la carga se traspase por los apoyos.

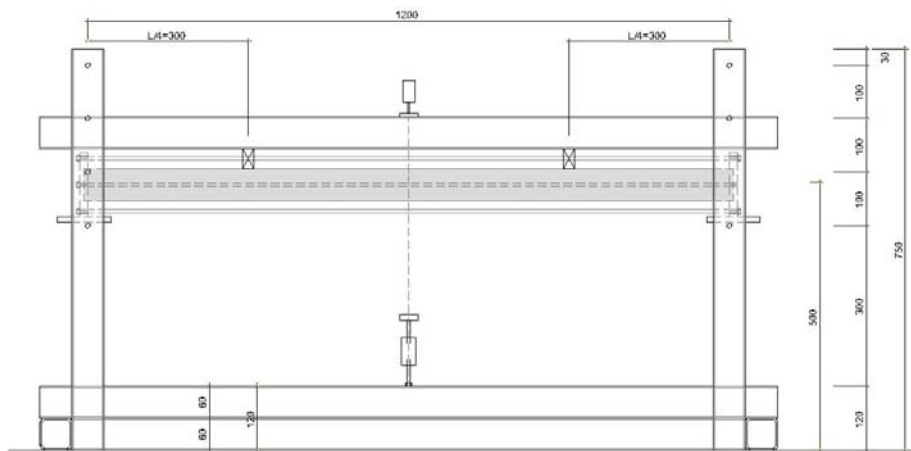


Fig. 9 Esquema de carga de las probetas

En el siguiente gráfico se comparan los gráficos de momentos de ambas hipótesis observándose la poca diferencia entre ambas. Los apoyos se realizarán con dos piezas de plástico con distintas durezas, para evitar el contacto entre el vidrio y el acero.

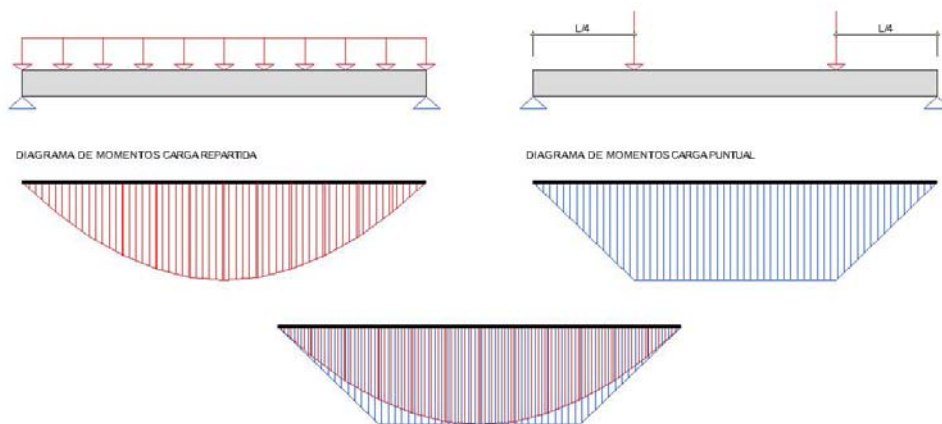


Fig.10 Esquema de gráficos de momentos

La preparación de las probetas para su apoyo se realiza colocando unos elementos de acero en forma de "T", que se colocan en las testas de las probetas. Dichas piezas se utilizan para el apoyo sobre los vástagos de unión de los tubos verticales, y para alojar los distintos cables de precompresión.



Fig. 11 Diferentes placas de apoyo

En cuanto a la carga a emplear es acorde a las nuevas dimensiones de las probetas, debemos pasar la carga real a nuestra maqueta a escala, por ello, la carga lineal de 180 kg/ml, producida por la carga repartida de 150 kg/m², se convierte en nuestro caso en 60 kg/ml. Esto se debe a que la carga está en función de la longitud y por tanto dividimos directamente entre 3 al igual que las magnitudes. Esto implica un total de carga de 72 kg, que para los ensayos redondearemos a 75 kg.

La carga se introduce en el centro del tubo superior mediante un cable que se tensa en la base del banco mediante el giro de una tuerca que produce una medición en un dinamómetro situado en la parte central. La carga se introducirá en tres escalones 25 kg, 50 kg y 75 kg, y se tomarán medidas de flecha de los tres escalones de carga. Se deberá tener en cuenta el peso propio del tubo que es de 7 kg.

6.2.2.6 Tracción longitudinal de las vigas

En los elementos de apoyo de las probetas se dispondrán una serie de taladros de Ø=7 mm sobre los que se introducirá unas varillas de Ø= 5 mm. Para dotar de tensión a las barras con la tensión apropiada se disponen unas tuercas por la zona exterior de las placas de apoyo que se apretaran mediante una llave dinamométrica para conseguir la tensión necesaria.

La tensión que se le deberá aplicar a las vigas se calculará según se ha expresado anteriormente. En nuestro caso el canto útil h será de 5.33 cm, lo que conlleva una tensión de tracción y compresión de 202,5 kg.

Esta tensión puede equivaler aproximadamente a un par de apriete de las tuercas de 2 N·m, según se expresa en el punto 3.6.2.3 de la norma de acero EA-95 dónde aparece la siguiente expresión:

$$M_a = k \cdot d \cdot N_o = 0.18 \cdot 0.005m \cdot 2025N = 1.82N \cdot m \approx 2N \cdot m$$

Dónde:

- k Coeficiente de los tornillos que se puede estimar 0,18
- d Diámetro nominal del tornillo
- N_o Esfuerzo axial de tracción en la espiga del tornillo

6.2.2.7 Resultados

La medición se realizará en la parte inferior mediante un calibre digital, que se encontrará fijado a la propia probeta.

Los resultados los ordenaremos según la siguiente tabla, siempre comparando los resultados al patrón de referencia:

| CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA | | | | ESCALONES DE CARGA (kg) | | | | | | DEFORMACIÓN N (mm) |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|----|----|-----|-----|-----|-----------------------|
| Probeta | Composición (mm) | Dimensiones (mm) | Tipo de Compresión | 25 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

Tabla 1. Tabla de resultados

6.3 Problemas y dificultades

6.3.1 Pandeo lateral

El máximo problema encontrado a priori en este tipo de elementos es el pandeo lateral de las propias vigas debido a su esbeltez en su sentido transversal.

Este pandeo lateral se puede ocasionar en dos momentos por causas diferentes. En primer lugar se puede presentar en el momento de la precompresión produciendo alabeos en las probetas en su sentido transversal. Posteriormente, este problema se puede dar en el momento de aplicar la carga en la viga. En este caso se debe evitar causar excentricidades en el momento de la carga.

En la realidad este efecto es menos problemática porque los distintos pórticos se encontraran arriostrados con el mismo material de cobertura de la cubierta, muy ligado a los propios pórticos.

6.3.2 Medición de resultados

Otro problema con el que nos hemos encontrado es con la medición de resultados. En este caso sólo podemos medir resultados de deformación, ya que no es posible medir las tensiones a las que se encuentra trabajando el vidrio.

7 RESULTADOS

7.1 Método Elementos finitos

7.1.1 Tabla de resultados

| Simulación | Dimensiones (mm) | Tipo de Compresión | TENSIÓN SUPERIOR (MPa) | TENSIÓN INFERIOR (MPa) | DEFORMACIÓN MÁXIMA (mm) |
|------------|------------------|--------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 1 | 240x60 | NINGUNA | 3.57 | 2.03 | 0.37 |
| 2 | 80x20 | NINGUNA | 3.57 | 2.05 | 0.12 |
| 3 | 60x20 | TOTAL 200kg | 8.66 | 3.28 | 0.38 |
| 4 | 60x20 | TOTAL 400 kg | 12.06 | 3.51 | 0.50 |
| 5 | 60x20 | INFERIOR 400 kg | 9.05 | 2.95 | 0.35 |
| 6 | 80x60x20 | TOTAL 200 kg | 2.48 | 1.27 | 0.08 |

Tabla 2. Resultados de elementos finitos

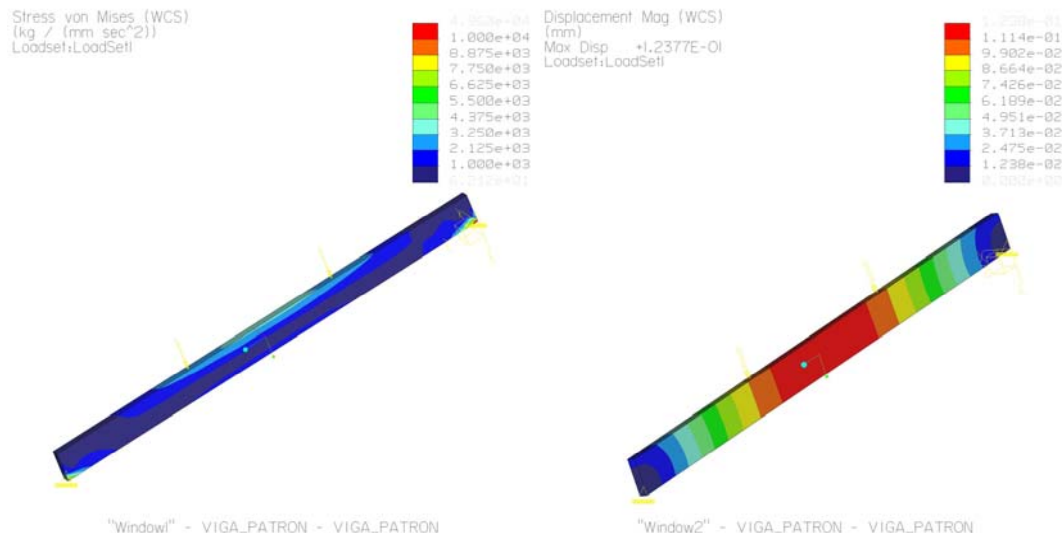


Fig 12. Viga patrón a escala 1/3

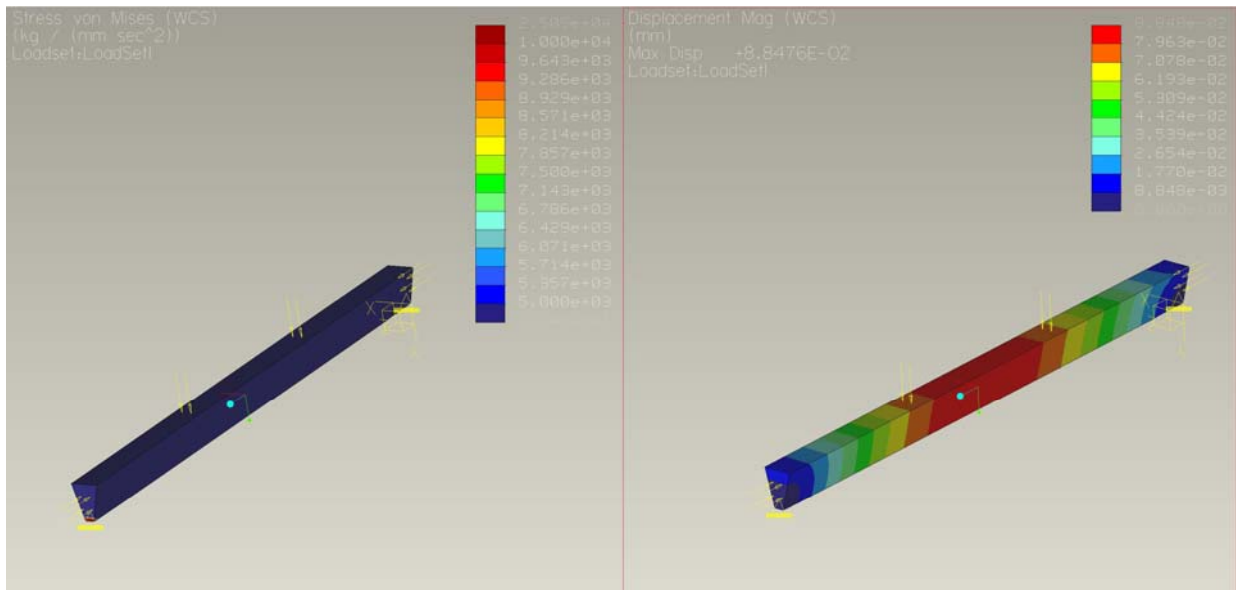


Fig. 13 Resultados en viga a escala triangular.

7.1.2 Análisis de resultados

- Las simulaciones por elementos finitos obtienen resultados de deformación inferiores a los resultados analíticos.
- La viga patrón a escala obtiene los mismos esfuerzos que la viga real y deformaciones proporcionales.
- La precompresión mejora los aspectos tensionales, pero perjudica las deformaciones.
- Una mayor precompresión en toda la superficie no mejora dichas deformaciones.
- En cambio, una precompresión sólo en la zona inferior, mejora tanto los aspectos tensionales como las deformaciones obtenidas.
- La viga precomprimida en forma triangular obtiene los mejores resultados tanto en tensión como en deformación.

7.2 Método experimental

7.2.1 Tabla de resultados

| CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA | | | | ESCALONES DE CARGA (kg) | | | | | | DEFORMACIÓN (mm) |
|-------------------------------|------------------|------------------|--------------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------------------|
| Probeta | Composición (mm) | Dimensiones (mm) | Tipo de Compresión | 25 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | |
| A | 6/8/6 | 80x20 | NINGUNA | 0.90 | 1.26 | 1.44 | | | | |
| B1 | 6/8/6 | 60x20 | CENTRAL 2Nm | 0.41 | 1.44 | 2.01 | 2.42 | | | |
| B2 | 6/8/6 | 60x20 | CENTRAL 4Nm | 0.46 | 0.90 | 1.28 | 1.71 | | | |
| B3 | 6/8/6 | 60x20 | CENTRAL 6Nm | 0.41 | 0.84 | 1.31 | 1.69 | | | |
| B4 | 6/8/6 | 60x20 | CENTRAL 8Nm | 0.42 | 0.92 | 1.31 | 1.72 | | | |
| C | 6/8/6 | 60x20 | PERIMETRAL 4Nm | 0.79 | 1.80 | 3.36 | | | | |
| D | 6/8/6 | 60x20 | TRES CABLES 4Nm | 1.04 | 2.05 | 3.40 | | | | |
| E | 300*4 | 80x60 | PERIMETRAL 2Nm | 0 | 0 | 0.01 | 0.14 | 0.47 | 2.38 | |

Tabla 3. Resultados obtenidos

7.2.2 Gráfica de resultados

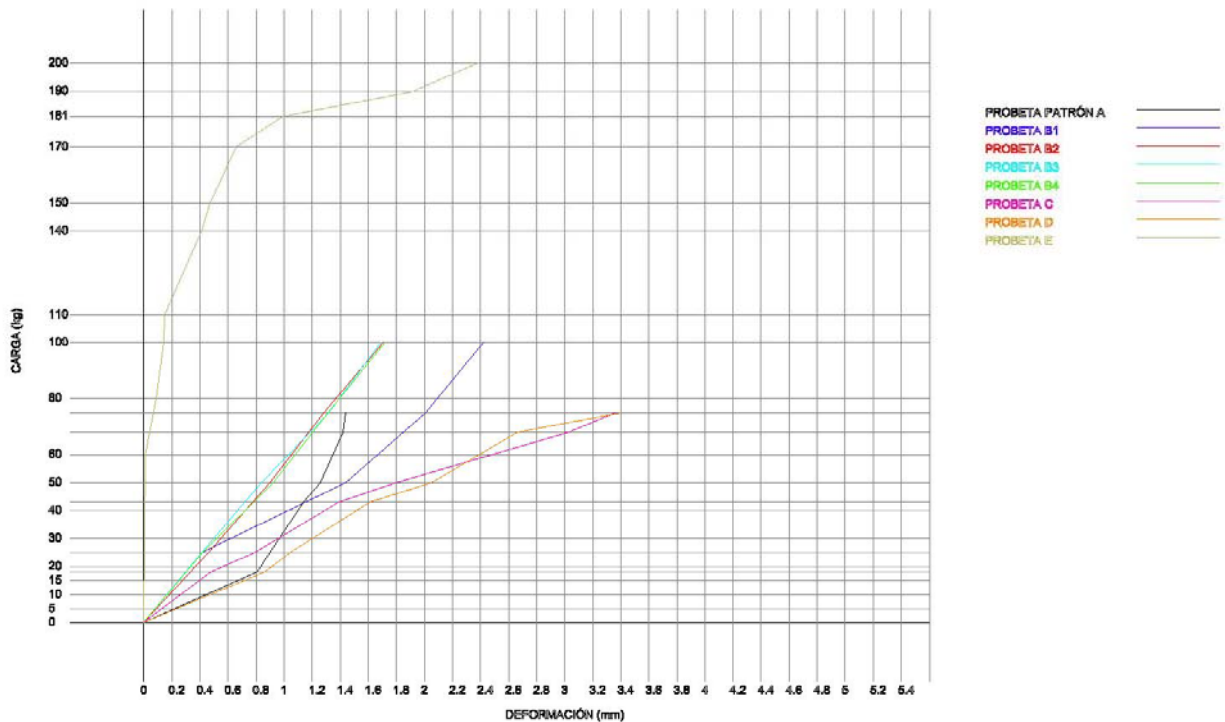


Fig. 14 Gráfico de resultados

7.2.3 *Análisis de resultados*

- La probeta patrón ha obtenido una flecha máxima a 75 kg peor de lo esperado en el cálculo analítico.
- En la probeta B1 todavía no se mejoran los resultados de la probeta patrón.
- La probeta B2 a mayor precompresión ha mejorado los resultados de flecha de la probeta anterior y la patrón.
- Las probetas B3 y B4 con mayor compresión cada una, no mejoran proporcionalmente los resultados anteriores.
- La probeta C, obtiene unos resultados peores que la patrón y las tipo B.
- La probeta D no mejora a la anterior no cumpliendo las expectativas.
- La probeta E es la que obtiene un mejor comportamiento a deformación.

8 CONCLUSIONES

- Se confirma que los ensayos a escala transcriben fielmente los efectos producidos en los elementos de tamaño real.
- Se confirma que la precompresión en las vigas de vidrio favorece la optimización de secciones tanto por tensión como por deformación.
- Una precompresión excesiva puede penalizar la flecha, no siendo proporcional la mejora producida en la tensión provocada por la carga. Sin embargo, situar la precompresión en la parte inferior de la viga mejora notablemente las situaciones de tensión y deformación conduciendo la flecha en la dirección favorable.
- La viga formada por “apilamiento” de láminas de vidrio ha sido la que mejor resultados ha obtenido, no obstante, estos resultados no son comparables ya que esta viga no supone una optimización de la sección porque tiene más sección.
- Debido a su buen comportamiento, se realizarán próximamente nuevos estudios con este sistema pero minimizando las secciones.

9 BIBLIOGRAFÍA

BOS, F. "Hybrid glass - acrylic façade struts" En *Glass Performance Days 10th International Conference on Architectural and Automotive Glass*. Tampere, 2007. Pp.-222-226.

BOS, F. P., VEER, F.A., HOBBELMAN, G.J. Y LOUTER P.C. *Stainless steel reinforced and post-tensioned glass beams*. <http://www.bk.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=f0a881cb-ecc3-4577-b941-d18231d97dad&lang=en> [Consulta: 7 de abril de 2008]

CITAV. (2001). *Manual del vidrio*. Madrid. CITAV

DUBOIS, M. "Glass bearing walls - a case study". En *Glass Performance Days 10th International Conference on Architectural and Automotive Glass*. Tampere, 2007. Pp.-179-183.

LOUTER, C. "Experimental research on scale 1:4 models of an 18m reinforced glass beam, part i". En *Glass Performance Days 10th International Conference on Architectural and Automotive Glass*. Tampere, 2007. Pp.-87-92.

LOUTER, C. "Reinforcing glass, effects of reinforcement geometry and bonding technology". En *Glass Performance Days 10th International Conference on Architectural and Automotive Glass*. Tampere, 2007. Pp.-93-97.

NIJSSE, R.(2003). *Glass in structures* . Basel, Berlin, Boston: Birhäuser Publishers.

Norma Basica de la Edificacion. Estructuras de Acero en edificacion. NBE-EA 95 1995. Madrid: Ministerio de Obras Públicas.

VASILCHENCO-MALISHEV, "G Structural use of stacked annealed glass" .En *Glass Performance Days 10th International Conference on Architectural and Automotive Glass*. Tampere, 2007. Pp.- 161-165.

VEER, F.A. "Stacking glass elements, how to build a glass tower".En *Glass Performance Days 10th International Conference on Architectural and Automotive Glass*. Tampere, 2007. Pp.- 166-169.

VEER, F.A. "Staking glass elements, building a glass tower". En *Glass Performance Days 10th International Conference on Architectural and Automotive Glass*. Tampere, 2007. Pp.-170-173.