

La fijación puntual de vidrios en la Arquitectura

Francesc Arbós Bellapart, Ing. Ind.
Albert Vidal Majoral, Ing. Ind.

Sumario— *El creciente uso del vidrio en la Arquitectura presenta nuevos retos en el diseño y en el campo de la investigación. El vidrio templado predomina en obras singulares, donde los sistemas de sujeción son mediante tornillos. Esta singularidad requiere una mayor resistencia mecánica por parte del vidrio y un diseño riguroso de las estructuras y fijaciones. Se presentan en este artículo los conceptos básicos de diseño y algunas innovaciones interesantes en este campo.*

1. Introducción

La tendencia de la arquitectura a proyectar estructuras esbeltas, minimizando el uso del acero y maximizando la luminosidad, conduce a diseños donde elementos de vidrio son sujetados por anclajes puntuales mediante taladros practicados en los mismos.

Desde hace tiempo es conocida la importante concentración de tensiones que conlleva la práctica de taladros en elementos estructurales [1]. Añadiendo a este fenómeno, la naturaleza frágil del vidrio, aparecen fijaciones rotuladas que permiten el giro y minimizan el momento flector en estos puntos de anclaje [2].

Aún así, en este tipo de estructuras es imprescindible el uso de vidrio tratado térmicamente, que presenta una resistencia mecánica mucho mayor que la del vidrio recocido.

No obstante, el dominio de las teorías de placas y láminas existentes, el conocimiento de las distintas fuentes de no linealidad que pueden afectar el comportamiento de las estructuras, el estado tenso-deformacional propio de cada tipo de condición de contorno y el correcto uso de las avanzadas técnicas de cálculo disponibles actualmente permite el desarrollo de nuevas alternativas de fijación puntual.

En el presente artículo se muestra la nueva fijación puntual GluepartTM [3] en base a adhesivos estructurales que, en aplicaciones concretas, presenta importantes ventajas tanto económicas como de estabilidad post-rotura.

2. Análisis de placas de vidrio

2.1. Marco teórico

Durante mucho tiempo los elementos de vidrio estructural han sido dimensionadas siguiendo la teoría clásica de placas delgadas de Kirchhoff [4]. Teoría basada en la geometría de las deformaciones y sostenida sobre cuatro hipótesis principales análogas a las de la teoría de flexión de vigas:

1. El desplazamiento del plano medio es pequeño comparado con el grosor de la placa.
2. El plano medio se mantiene libre de tensiones después de la flexión.
3. Los planos normales al plano medio se mantienen planos y normales a este después de la flexión. Esto implica desprestigiar las deformaciones verticales a cortante.
4. El esfuerzo normal al plano medio (σ_z) es pequeño en comparación al resto de componentes y puede ser despreciado.

En ciertos campos de la ingeniería, el error introducido al aceptar estas simplificaciones encuentra justificación en la disminución de complejidad que proporcionan; sin embargo, cuando los desplazamientos dejan de ser pequeños, aparecen deformaciones en el plano medio y las hipótesis 1 y 2 pierden validez. La única excepción existente se da en los casos en que la placa se deforma generando una superficie desplegable. En estas condiciones el plano medio de la placa se mantiene libre de tensiones hasta por desplazamientos iguales o superiores a su grosor.

Igual que en la teoría de flexión de vigas, cuando el grosor de la placa deja de ser pequeño en relación al resto de dimensiones, el efecto de los cortantes se ve incrementado.

Otra situación en la que algunas hipótesis de la teoría clásica de placas dejan de tener validez es en presencia de cargas puntuales. En este caso el efecto de los esfuerzos normales al plano medio y cortantes dejan de ser despreciable y su efecto sobre la deformación de la placa debe ser considerado en igual proporción.

Para estos casos, la teoría de placas de Reissner – Mindlin [4] se ha confirmado como la mejor alternativa. En esta, la hipótesis de ortogonalidad de la normal durante la deformación de la placa es relajada con la permisión del giro (figura 1).

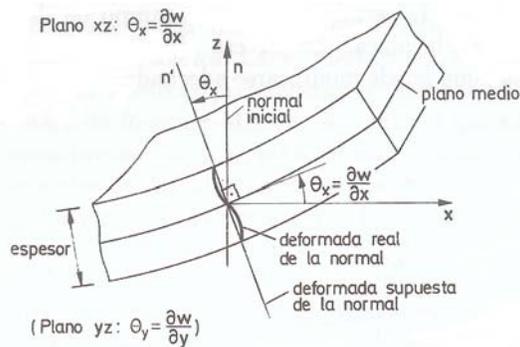


Fig. 1. Deformación real del plano medio de una placa delgada. Relajación de la hipótesis de ortogonalidad de la teoría clásica de placas.

No obstante, hay que tener en cuenta que, incluso por elementos delgados, es conveniente considerar los esfuerzos cortantes. Especialmente ante vibraciones.

En zonas próximas a esquinas de placas y alrededor de taladros con diámetro del mismo orden de magnitud que el grosor de la placa, el efecto de σ_z sobre la deformación pasa a ser secundario en comparación al efecto de los esfuerzos cortantes. En estos casos es necesario recurrir a las teorías de placas delgadas modificadas [5].

En los párrafos anteriores se ha hablado de placas con desplazamientos por debajo de su grosor; no obstante, en vidrio estructural, fácilmente se alcanzan deformaciones de varias veces el grosor de la placa. Bajo estas condiciones, el plano central se extiende desarrollando importantes esfuerzos a tensión que producen un efecto rigidizador sobre la placa y le proporcionan un aumento considerable de capacidad portante. Dicho fenómeno pasa totalmente desapercibido por la teoría de pequeñas deformaciones y la hace inaplicable a un

porcentaje importante de las placas de vidrio diseñadas hoy día.

El marco teórico a utilizar en estas circunstancias es el proporcionado por la teoría de placas con grandes deformaciones.

Dentro de esta deben distinguirse dos situaciones distintas en función de si la deformación del plano medio conduce a una geometría desplegable o no. En el primer de los casos, el comportamiento típico de las placas con grandes deformaciones puede darse solo mediante la restricción de la movilidad en las fijaciones; por el contrario, en los casos en que la geometría adquirida por el plano medio no es desplegable, el efecto rigidizador debido al trabajo a membrana se da independientemente de las condiciones de contorno y debe ser tenido en cuenta si quiere obtenerse resultados precisos.

En la figura 2 se muestra de forma esquemática el comportamiento típico de una placa sometida a grandes deformaciones.

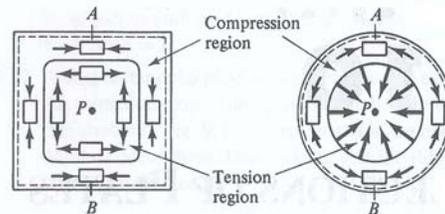


Fig. 2. Comportamiento típico de una placa sometida a grandes deformaciones.

2.2. Fuentes de no linealidad

Otro factor que añade complejidad al análisis estructural de elementos de vidrio es la existencia de distintas fuentes de no linealidad.

- No linealidad material

Si bien tratar la rigidez de los materiales desde un punto de vista lineal simplifica en gran medida los cálculos a realizar en la determinación del estado tenso-deformacional de un elemento, en un número de casos ni mucho menos despreciable, esta simplificación puede resultar en errores realmente significativos. Para hacer frente a esta fuente de errores, las aplicaciones disponibles actualmente no tan solo permiten trabajar con el comportamiento real tensión-deformación de cada material, sino que también permiten tener en cuenta fenómenos de no linealidad de los materiales en función del tiempo como la

viscoelasticidad. Fenómeno presente por ejemplo en el intercalario utilizado en paneles de vidrio laminados.

- No linealidad geométrica y de contorno.

Contrariamente a las no linealidades derivadas de la relación entre tensiones y deformaciones, las geométricas y de contorno son debidas a cambios significativos en la geometría de la estructura. De hecho, la geometría estructural puede cambiar hasta un punto en el que las ecuaciones de equilibrio del sistema formuladas inicialmente dejen de tener validez. En este caso el análisis lineal llevaría a unos resultados erróneos.

A fin de reproducir este hecho se ha simulado con métodos de cálculo lineal (figuras 3 y 5) y no lineal (figuras 4 y 6) la acción de una carga de servicio distribuida de 1308 N/m^2 (con coeficiente de mayoración en estado último de 1.5) sobre el modelo digital de una lámina de vidrio templado de $1574 \text{ mm} \times 1667 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ simplemente apoyada en todo su contorno.

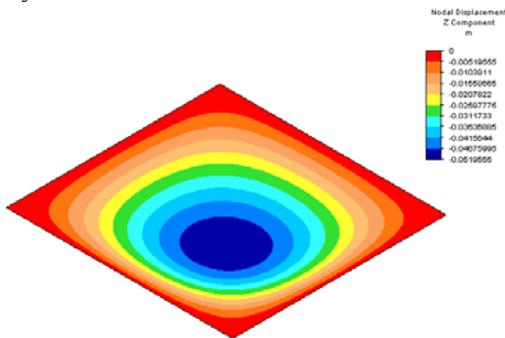


Fig. 3. Deformación obtenida mediante procedimientos de cálculo lineal.

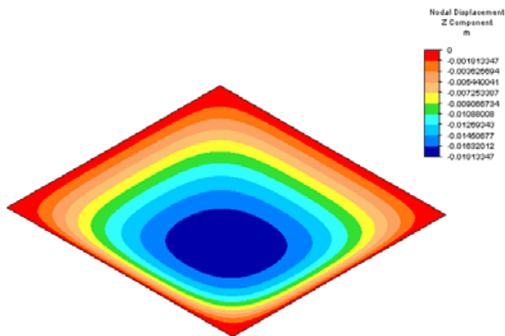


Fig. 4. Deformación obtenida mediante procedimientos de cálculo no lineal.

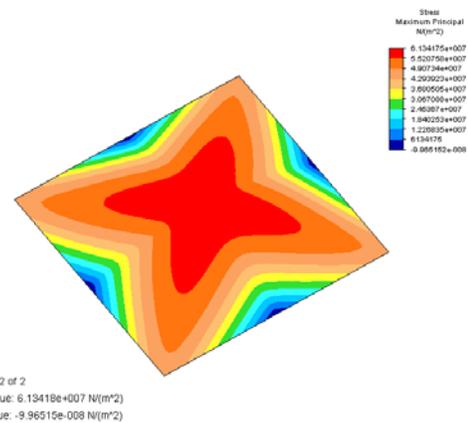


Fig. 5. Tensiones máximas principales en la cara de sotavento, obtenidas mediante procedimientos de cálculo lineal.

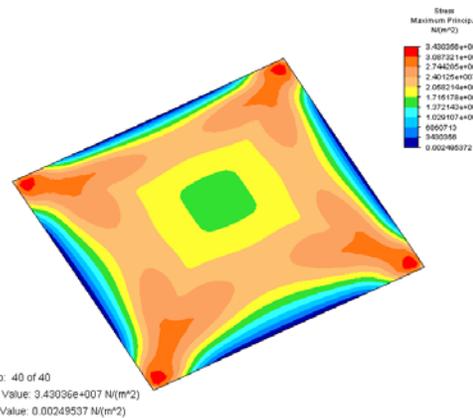


Fig. 6. Tensiones máximas principales en la cara de sotavento, obtenidas mediante procedimientos de cálculo no lineal.

Como puede observarse en la siguiente tabla de resultados (tabla 1), obviar las no linealidades geométricas y de contorno utilizando técnicas de cálculo lineales puede llevar a errores de cálculo importantísimos, incluso en las estructuras aparentemente más sencillas.

	Desplazamiento máximo en la dirección de la carga (mm)	Tensión principal máxima (MPa)
Cálculo lineal	51.95	61.34
Cálculo no lineal	18.13	34.30
Error cometido	186 %	78.8 %

Tabla 1. Tabla comparativa de los resultados obtenidos mediante técnicas de cálculo lineal y no lineal.

2.3. Efecto de las condiciones de contorno

Se ha comentado en apartados anteriores la concentración de tensiones que genera un taladro practicado en una lámina de vidrio. No obstante, hay que tener en cuenta que el propio hecho de trabajar con unas condiciones de contorno como las de uniones puntuales conlleva ya de por si un estado tenso-deformacional característico.

Existe una relación causa efecto entre una condición de contorno determinada y la distribución de tensiones y deformaciones sobre el elemento estructural sometido a ella. Conocer la distribución característica de las distintas condiciones de contorno proporciona una base de conocimiento indispensable para avanzar en el diseño de nuevas fijaciones puntuales capaces de aportar mejoras tanto en eficiencia como en seguridad.

Un ejemplo de la influencia de las condiciones de contorno sobre el comportamiento tenso-deformacional puede verse en las siguientes imágenes correspondientes a un elemento simplemente apoyado sobre cuatro fijaciones puntuales (figuras 7 y 8) y otro simplemente apoyado sobre su contorno (figuras 9).

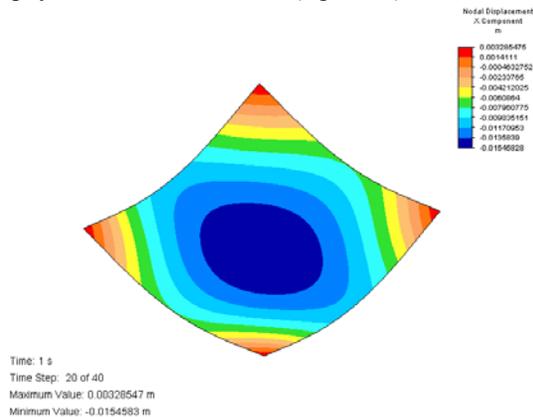


Fig. 7. Deformación de una placa de vidrio de 1574x1667x12 mm sometida a una sobrecarga de 1308 Pa (Coef. mayoración 1.5) y simplemente apoyada sobre cuatro fijaciones puntuales con taladros.

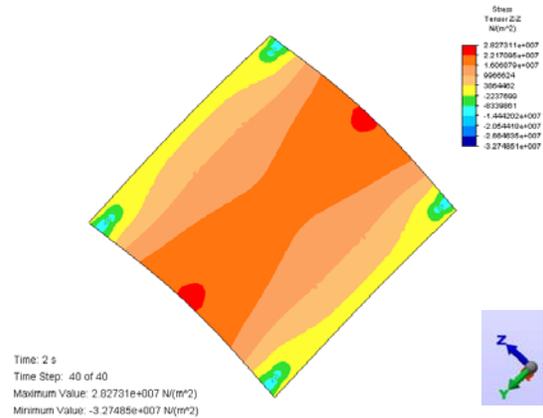


Fig. 8. Tensiones normales en Z de una placa de vidrio de 1574x1667x12 mm sometida a una sobrecarga de 1308 Pa (Coef. mayoración 1.5) y simplemente apoyada sobre cuatro fijaciones puntuales rotuladas.

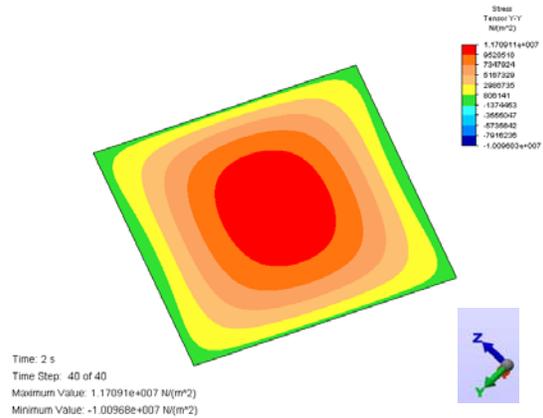


Fig. 9. Tensiones normales en Y de una placa de vidrio de 1574x1667x12 mm sometida a una sobrecarga de 1308 Pa (Coef. Mayoración 1.5) y simplemente apoyada sobre su contorno.

Como puede observarse en la figura 7, en una lamina sostenida por fijaciones puntuales, la zona que presenta un mayor desplazamiento es la central. El hecho que permite alcanzar este importante desplazamiento es la posibilidad de deformación de los laterales. Es precisamente en estas zonas de la placa donde tienen lugar la mayor curvatura y donde, en consecuencia, pueden encontrarse las máximas tensiones normales (figura 8).

Por el contrario, en láminas simplemente apoyadas sobre su contorno, las restricciones de movilidad de los laterales desplazan la mayor curvatura a la zona central (figura 4), coincidiendo en este caso con las mayores deformaciones y ascendiendo a máximos inferiores a los

encontrados en fijación puntual. Como es lógico, a diferencia que en el caso anterior, los mayores momentos flectores pasan a situarse también en la zona central (figura 9).

3. Nuevas propuestas

Gracias al dominio del marco teórico descrito anteriormente ha sido posible el desarrollo de la nueva fijación puntual Gluepart™ [3] (figura 10). Fijación puntual en base a adhesivos estructurales que, en situaciones concretas, puede proporcionar ventajas importantes tanto en eficiencia como en seguridad.

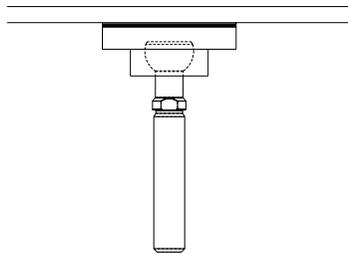


Fig. 10. Esquema de la fijación puntual Gluepart™.

A continuación se muestran de forma resumida los pasos seguidos en el diseño y aplicación de la nueva fijación puntual Gluepart™.

1. Determinación de solicitaciones en la estructura.

El primer paso en la etapa de diseño de una nueva fijación puntual para una aplicación concreta, consiste en la determinación de las solicitaciones a las que estas se verán sometidas. Con esta finalidad se han simulado mediante software de análisis computacional de fluidos las acciones climatológicas sobre la estructura de una marquesina de perfil curvo de 40 x 38 m (figura 11).

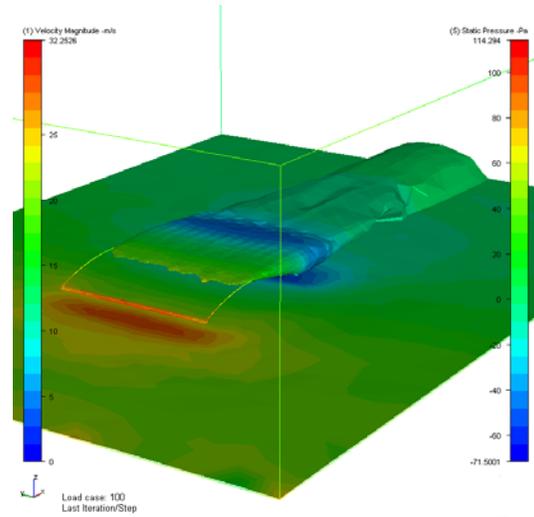


Fig. 11. Determinación mediante software de análisis computacional de fluidos de las cargas ejercidas por el viento sobre los distintos puntos de la superficie de las marquesinas de entrada de la Ciudad Financiera del BSCH.

Disponiendo de las acciones, se ha procedido a la determinación del estado tenso-deformacional de las placas de vidrio y elementos de fijación, mediante aplicaciones de cálculo por elementos finitos (figuras 12, 13 y 14).

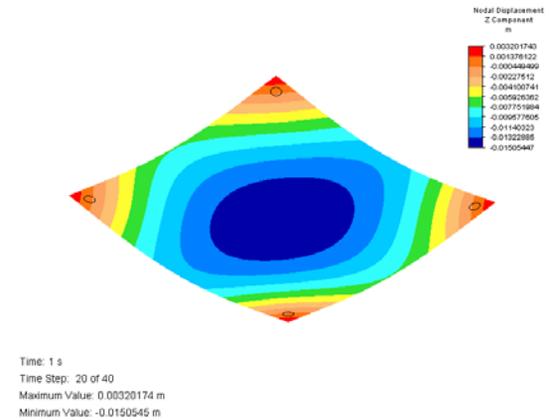


Fig. 12. Deformación de una placa de vidrio de 1574x1667x12 mm sostenida por cuatro fijaciones puntuales Gluepart™ y sometida a una sobrecarga de viento de 1308 Pa (Coef. mayoración 1.5).

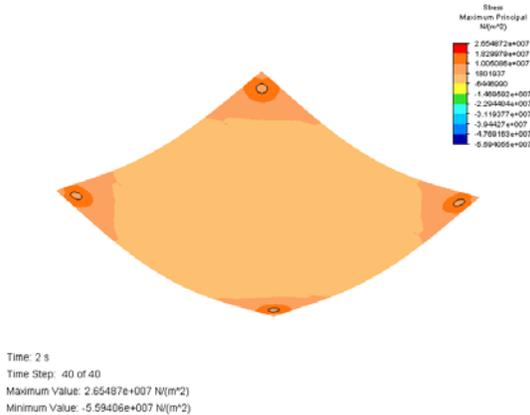


Fig. 13. Tensiones principales máximas a barlovento de una placa de vidrio de 1574x1667x12 mm sostenida por cuatro fijaciones puntuales Gluepart™ y sometida a una sobrecarga de viento de 1308 Pa (Coef. mayoración 1.5).

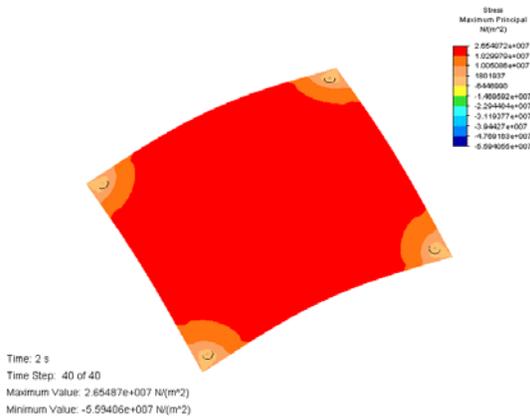


Fig. 14. Tensiones principales máximas a sotavento de una placa de vidrio de 1574x1667x12 mm sostenida por cuatro fijaciones puntuales Gluepart™ y sometida a una sobrecarga de viento de 1308 Pa (Coef. mayoración 1.5).

En la tabla 2 se comparan los resultados obtenidos con los correspondientes a placas sostenidas por fijaciones puntuales rotuladas con taladros.

	Fijaciones puntuales con taladro	Fijaciones puntuales Gluepart™
Desplazamiento máximo en la dirección de la carga (mm)	15.45	15.05
Tensión principal en la zona de anclaje MPa	30.28	16.4
Tensión principal máxima sobre la placa de vidrio (MPa)	30.28	26.55

Tabla 2. Comportamiento estructural de una placa de vidrio de 1574x1667x12 mm sometida a una sobrecarga de viento de 1308 Pa (Coef. mayoración 1.5).

Puede observarse como la nueva fijación puntual Gluepart™ proporciona, respecto a las fijaciones puntuales rotuladas con taladro, una disminución del 14 % en la máxima tensión principal generada sobre la placa de vidrio y un destacable 84.6 % en las tensiones principales en la zona de anclaje. Disminución conseguida gracias a la eliminación de fuentes de concertación de tensiones. (Ver figura 15 y 16).

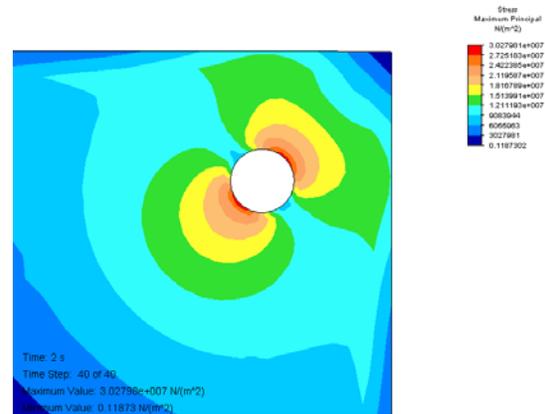


Fig. 15. Concentración de tensiones con fijaciones puntuales rotuladas con taladro.

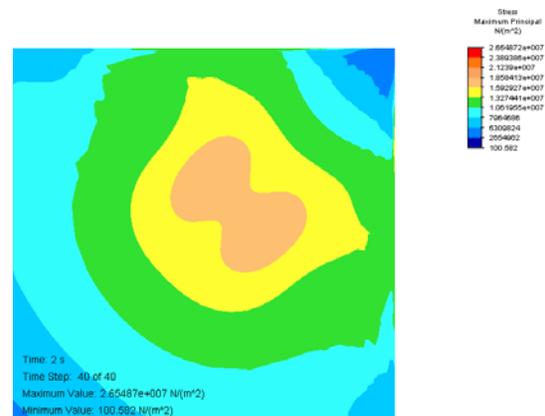


Fig. 16. Concentración de tensiones con la fijación puntual Gluepart™.

2. Investigación en el campo de los adhesivos estructurales.

Las solicitaciones a las que se ve sometida una fijación puntual hacen inviable el uso de adhesivos convencionales como la silicona estructural, habitual en el sector de la construcción.

Para cubrir las necesidades de los sectores aeronáuticos y de automoción se han desarrollado adhesivos estructurales con una resistencia más de 30 veces superior a la de la silicona estructural, con unos estándares de calidad muy exigentes y muchos casos exitosamente experimentados.

En un material adhesivo se dan dos tipos de fuerzas de igual importancia para el correcto comportamiento de la fijación; fuerzas adhesivas y fuerzas cohesivas (ver figura 17).

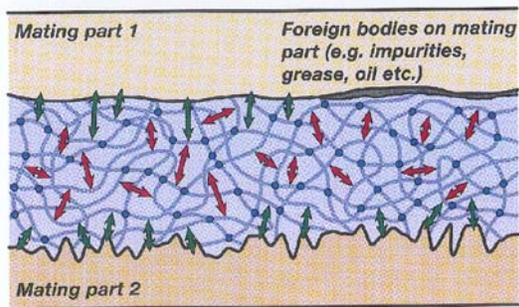


Fig. 17. Fuerzas adhesivas (en verde) y fuerzas cohesivas (en rojo) en adhesivos estructurales.

Un estado superficial inadecuado lleva a un trabajo deficiente de las fuerzas adhesivas, con el que puede llegarse a la ruptura sin agotar la capacidad de unión del material dada por las fuerzas cohesivas.

3. Tratamiento superficial, dosificación y control de calidad.

Si bien la correcta elección del adhesivo es de vital importancia, de nada sirven sus propiedades si las condiciones de aplicación no permiten su correcto comportamiento estructural. Por este motivo ha sido necesario investigar en los siguientes campos:

- Tratamientos superficiales capaces de potenciar el efecto interactivo entre las superficies a unir y el material adhesivo aumentando las fuerzas adhesivas.
- Sistemas de dosificación que permitan garantizar la correcta distribución tanto en superficie como en espesor de junta.
- Sistemas de control de calidad que permitan verificar a posteriori la correcta instalación de la fijación

4. Ensayos en fase de diseño.

Para poder garantizar el correcto funcionamiento de las nuevas fijaciones diseñadas, se han llevado a cabo los siguientes ensayos:

- Ensayos a tracción simple, tracción excéntrica y esfuerzo cortante a temperatura ambiente, a 40° C y a 80 ° C (figuras 18 y 19).
- Análogos ensayos después de un envejecimiento acelerado en laboratorio.
- Análogos ensayos después de la exposición a radiación ultravioleta.

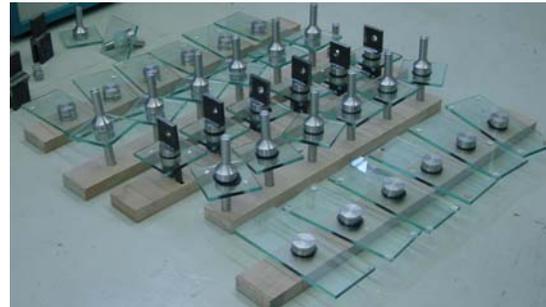


Fig.18. Probetas para los ensayos a tracción simple, tracción excéntrica y esfuerzo cortante.



Fig.19. Ensayo a esfuerzo cortante. Centro tecnológico IES-SEP La Garrotxa.

5. Construcción de prototipos.

Finalmente, como última etapa de diseño, se ha construido el prototipo de una de las células de la estructura espacial (figuras 20 y 21). Sobre este se han verificado las tolerancias, el sistema de montaje, el aspecto estético y finalmente la estabilidad post-rotura.



Fig.20. Prototipo de una de las células de las marquesinas de entrada de la Ciudad Financiera del BSCH equipada con fijaciones puntuales Gluepart™.

Una vez finalizadas las cinco etapas descritas, es posible afirmar que en los casos donde la nueva fijación puntual Gluepart™ sea aplicable, esta puede aportar importantes ventajas respecto a las fijaciones puntuales convencionales fijadas mediante taladros.

La inexistencia de taladros sobre las placas de vidrio elimina la concentración de tensiones con lo que resulta viable la utilización de vidrio termoendurecido. Vidrio que garantiza la estabilidad post-rotura y, al mismo tiempo, elimina un importante factor de riesgo típico de vidrios templados como es la ruptura espontánea debido a la presencia de inclusiones esféricas de Sulfuro de Níquel [6]. Adicionalmente se eliminan posibles problemas de estanquidad y se consigue una mejora estética notable.

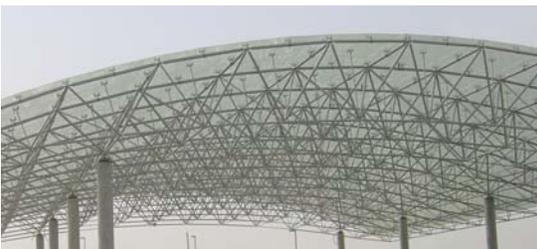


Fig. 21. Imagen de una de las marquesinas de entrada de la Ciudad Financiera del BSCH.

4. Conclusión

Aunque el uso de placas de vidrio sostenidas mediante fijaciones puntuales cuenta hoy día con una gran popularidad y se haya vulgarizado su aplicación, sigue desconociéndose, en muchos casos, el comportamiento real de las construcciones. Este hecho, debido principalmente a la gran influencia de las condiciones de contorno sobre su respuesta mecánica, puede generar disminuciones de los márgenes de seguridad por debajo de los niveles admisibles.

Por otra parte, la inversión en conocimiento básico pone los cimientos de futuros sistemas constructivos más fiables y novedosos para la arquitectura.

REFERENCIAS

- [1] Inglis, C.E. (1913). Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. *Engineering*, 95, 415.
- [2] Rice, Peter (1986). *The Serres at La Villette in Paris*.
- [3] Gluepart™ es una marca registrada de Bellapart S.A.
- [4] Oñate, Eugenio (1992). *Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos*.
- [5] Ugural, Ansel C. (1999). *Stresses in plates and shells*.
- [6] Arbós i Bellapart, Francesc (2002). *Estabilidad post-rotura en la fijación de vidrios laminados. PUNTpart Overhead Glazing*