

Seguridad ante impacto humano de acristalamientos en edificaciones

R. CLARAMUNT, S. POSTIGO, R. PERERA, A. PACIOS, A. ROS Y C. HUERTA

Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales, E. T. S. de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid. C/ José Gutiérrez Abascal, 2, Madrid 28006, España

El Código Técnico de la Edificación (CTE) establece las exigencias básicas que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad. El Documento Básico de Seguridad de Utilización (DB-SU) del CTE, identifica unas áreas críticas en las que el impacto con elementos frágiles supondría un riesgo para el usuario. El DB-SU establece los niveles de impacto que deben resistir los vidrios en dichas zonas, según el procedimiento de norma UNE-EN 12600:2003. Sin embargo este procedimiento no facilita información acerca de las características del equipo de ensayo, lo que ocasiona que los resultados obtenidos sean dispersos y muy dependientes del equipo de ensayo.

En este artículo se presenta el procedimiento seguido para caracterizar el péndulo de impacto, de manera que se pueda garantizar que durante el impacto se excita únicamente el vidrio. Para ello, ha sido necesario estimar en primer lugar la duración de la excitación durante el impacto. Posteriormente, se ha determinado la frecuencia natural de los vidrios para distintas configuraciones constructivas, geometría y espesores. Finalmente se han determinado los modos de vibración de la estructura soporte del vidrio en el péndulo según distintas fijaciones al suelo.

Cabe destacar como conclusión que la frecuencia natural del péndulo varía de una manera importante al modificar las condiciones de contorno, tales como puntos de fijación con la base, fijación del marco, etc.

Palabras clave: Vidrios de seguridad, Péndulo de impacto, Códigos prestacionales, Elementos finitos

Safety for human impact in glazing of buildings

The Spanish Building Code (CTE) specifies the demands that should comply the buildings in relation to the essential requirements of safety and habitability. The Fundamental Document of Safety in Use (DB-SU) of the CTE identifies some critical areas where the impact with fragile elements would suppose a risk for the user. The DB-SU establishes the impact levels that glazing should resist, according to the procedure of UNE-EN 12600:2003. However, since this procedure does not give information about characteristics of the testing equipment, results obtained are dispersed and variable with the equipment. This paper presents the procedure followed to characterize the impact pendulum test, so it can be guaranteed that only the glazing response is measured during the impact. First, it has been necessary to estimate the duration of the impact. Then, the glazing natural frequency of different constructive configurations, geometry and thickness has been determined. Finally, vibration modes of the glazing supporting structure from the pendulum, according to different fixing points to the floor is estimated. It should be noted, as a conclusion, that the natural frequency of the pendulum differs in a important way when border conditions are modified, such as fixing points to floor, etc.

Keywords: Safety glazing, Impact pendulum, Performance-based codes, Finite Element Analysis.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con los RD 1630/1992 (1) y RD 1328/1995 (2) por los que se dictan y modifican respectivamente, las disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, en aplicación de la Directiva 89/106/CEE (3), los productos de construcción sólo podrán comercializarse si son idóneos para el uso al que se destinan. A este respecto establece los requisitos esenciales que, en su caso, deben satisfacer los edificios a los que se incorporen productos de construcción, así como las características que los mismos deben cumplir para obtener la Marca CE. Uno de los requisitos esenciales es el de seguridad de utilización, cuyo contenido: "Las obras deberán proyectarse y construirse de forma que su utilización o funcionamiento no supongan riesgos inadmisibles de accidentes como resbalones, caídas, colisiones, quemaduras,

electrocución o heridas originadas por explosión" se recoge en el Anejo 1 de los RD anteriormente mencionados.

El 6 de mayo de 2000 entró en vigor la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE). La Ley tiene por objeto "regular en sus aspectos esenciales el proceso de la edificación,..., con el fin de asegurar la calidad mediante el cumplimiento de los requisitos básicos de los edificios y la adecuada protección de los intereses de los usuarios" (4). En su Disposición Final Segunda, la LOE autoriza al Gobierno para la aprobación de un Código Técnico de la Edificación (CTE) que establezca las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad.

El atractivo estético del vidrio incita a los proyectistas y propietarios a su empleo indiscriminado, apareciendo situaciones de riesgo potencial en caso de rotura. En principio, y respecto al vidrio en sí, los usuarios exigirán el nivel más resistente, es decir, aquellos vidrios que resistan una mayor energía de impacto. Sin embargo, exigir un nivel resistente elevado puede encarecer la edificación y afectar al mercado, ya que por ello mejor necesitarían el nivel de seguridad, pero con un montaje, dimensiones y una sujeción apropiados, resulte una suficiente capacidad de absorción de energía.

Para responder al requisito de seguridad de impacto con elementos frágiles, aparecerán reflejadas en el Documento Básico de Seguridad de Utilización (en adelante DB-SU) del CTE las zonas acristaladas críticas de un edificio en las cuales, por su riesgo potencial, deben ser instalados vidrios denominados "de seguridad" (5). El DB-SU establece como método de referencia el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12600:2003.

La inexistencia de soluciones aceptables que se ajusten a la exigencia movió al grupo investigador autor de este artículo a plantearse la realización de un estudio que condujera a la obtención de las mismas, bien sea por experimentación o mediante un modelo matemático. Para ello será necesario construir un péndulo de impacto, que cumpliendo con la norma, permita adaptar las distintas configuraciones constructivas que los acristalamientos presentan en los edificios y medir variables que alimenten el modelo matemático.

2. ESTADO DEL ARTE

Desde los inicios muchas han sido las discusiones en referencia al estudio del tipo de impactador en el ensayo con péndulo tales como los realizados por los Grupos de Trabajo de los Comités Técnicos de CEN (TC 129) y de ISO (TC160), buscando que el procedimiento sea reproducible y representativo de un impacto humano. Por un lado los trabajos de CEN se han orientado hacia un impactador con doble neumático frente a los de ISO que apuestan por un impactador de piel con forma de gota relleno de arena, vidrio o perdigones de plomo.

Según Serruys et al. (6) la elección del impactador de neumáticos está justificada por sus resultados favorables en ensayos y por eliminar los problemas de contaminación por empleo de plomo en la fabricación del impactador tipo gota. Sin embargo, posteriormente Jacob et al. (7) defiende el impactador tipo gota, siempre que se haya fabricado correctamente (según JIS (8)), debido a la dificultad, para los impactadores de neumáticos, de romper vidrios templados con tensiones superficiales inducidas de compresión superiores a 100 MPa. Ambos estudios aseguran que sus procedimientos son de mayor reproducibilidad y repetibilidad. Esta diferencia en las cabezas de impacto se refleja en las distintas normas, la europea UNE-EN 12600 (9) y la norma Japonesa (8).

Ante la dificultad de consenso demostrada por ambas partes y la diferencia clara entre los impactos de las distintas cabezas del péndulo (energía, área de contacto, rigidez del impactador, etc), Oketani (10) establece concordancias entre los dos impactadores. Para igualar las deformaciones verticales producidas en los vidrios impactados se debe, por debajo de 400mm de altura de caída, aumentar las alturas de caída del péndulo de gota y por encima disminuirlas, mientras que para

las deformaciones horizontales el límite corresponde a 650mm de altura de caída.

A pesar de este interés por conocer la deformación final no se han realizado muchos estudios acerca de la disipación energética en la estructura de sujeción del vidrio, aspecto éste de gran relevancia. Sólo algunos autores han referido esta preocupación (7).

3. METODOLOGÍA DE DISEÑO

La norma UNE-EN 12600 (9) describe un procedimiento de ensayo pendular que permite clasificar los vidrios de seguridad en función del nivel de energía resistido y la forma característica de rotura. Las alturas de caída de 190, 450 y 1200mm determinarán los niveles de impacto. Con el fin de poder determinar con rigor la energía absorbida por el vidrio ensayado, la estructura soporte del vidrio no deberá vibrar ante el impacto, para así no absorber y disipar energía.

Podremos decir que la estructura se comporta de forma estática y no vibrará durante el ensayo, cuando las frecuencias naturales de la estructura que soporta al vidrio se encuentran fuera del rango de las frecuencias de excitación o bien, los modos de vibración con frecuencias naturales dentro de este rango no sean fácilmente excitables por la forma del impacto.

Adicionalmente, para poder caracterizar un modelo estructural del vidrio y conseguir un método de verificación, las frecuencias naturales de los vidrios y de la estructura soporte deberán estar desacopladas en el rango de frecuencias de la excitación, facilitando así la identificación de ambas en ensayos experimentales.

Será necesario por tanto, previamente a realizar un nuevo diseño de péndulo de impacto, conocer: el rango de frecuencias de la excitación o impacto, las frecuencias naturales de placas de vidrio con distintas condiciones de contorno y las frecuencias naturales de la estructura que soporta al vidrio en el impacto.

3.1.-Determinación del rango de frecuencias de la excitación

En el péndulo que se analiza la intensidad y duración de un impacto dependen principalmente de la altura de caída del péndulo y de las rigideces del impactador y del conjunto formado por la estructura soporte y el vidrio.

Diversos autores han realizado estudios sobre análisis transitorios de impactos humanos reales (6), impactos con "dummies" (11,12), cálculos con métodos de elementos finitos (11,13) y análisis de diferentes cabezas de impacto (6,7,10). Serruys (6), por ejemplo, determina que un impactador tipo "gota" sin compactar, para una altura de caída de 200mm sobre un vidrio templado de 10mm de espesor, produce un impacto de fuerza máxima 2.6 kN con un tiempo de duración de 60ms; bajo las mismas condiciones un impactador tipo "gota" compactado produce una fuerza máxima de 4.1 kN con un tiempo de duración de 50 ms. Por otro lado impactos de un solo neumático con distintas presiones de inflado presentan diferentes comportamientos: a 0 bar de presión la fuerza máxima es de 2.5 kN con un tiempo de duración de 95 ms mientras que a 2.5 bar de presión la fuerza máxima es de 3.9 kN con un tiempo de duración de 60 ms. A su vez Foss (11) y Bohmann (13) predicen el tiempo de impacto en 45 ms. De los estudios anteriores se constata que el tiempo de duración del impacto estará entre 45 y 95 ms.

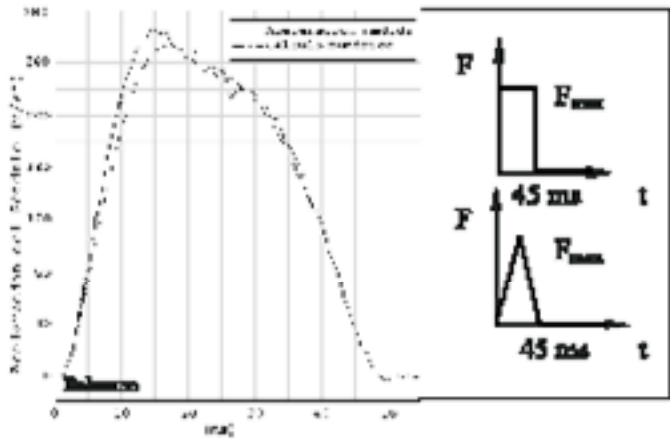


Fig. 1- Respuesta característica de un impacto de péndulo.

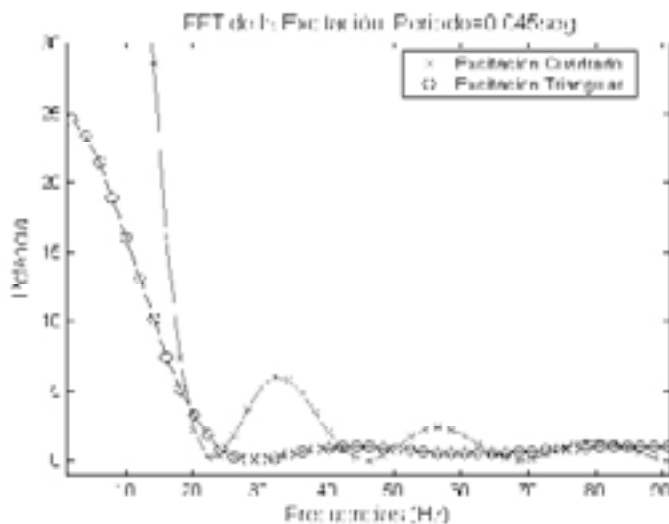


Fig. 2- Excitación en el dominio de la frecuencia

La figura 1 muestra los estudios numéricos y experimentales realizados por Bohmann; en ella se aprecia el aspecto característico de las curvas de impacto. En una primera aproximación la señal de excitación se puede simplificar como la comprendida entre un pulso cuadrado y uno triangular, con la duración más desfavorable (45 ms) del rango obtenido anteriormente (45 a 95 ms). Esta señal se considera representativa de los posibles accidentes que se puedan dar en la edificación.

La figura 2 muestra la transformada de Fourier rápida (FFT) de las señales pulso cuadrado y triangular antes determinadas. Se observa como el contenido en frecuencia de la señal de impacto es poco significativo a partir de los 40 Hz, por lo que se puede concluir, que el rango de frecuencias de la excitación de un péndulo que reproduce un impacto humano, está comprendido entre 0 y 40 Hz y por lo tanto sólo vibrarían

tras el impacto vidrios con frecuencias naturales dentro de este rango.

3.2.- Estudio de las frecuencias naturales del vidrio

Como ya se introdujo en este mismo apartado, es necesario conocer las frecuencias naturales propias de los vidrios sin que éstas estén influenciadas por la estructura que los soporta. La obtención de las frecuencias naturales de una placa es un problema ya resuelto que se encuentra en la literatura (14). La figura 3 muestra las frecuencias naturales del primer modo de vibración para un vidrio de espesor de 4 mm (entre los mínimos empleados en construcción), diferentes condiciones de contorno (bordes empotrados, bordes apoyados y placa apoyada en esquinas), ancho fijo y altura variable. Para contornos apoyados y empotrados los resultados muestran tendencias similares, con frecuencias mayores en las placas de contorno empotrado. La situación real de la condición de apoyo de las placas de vidrio en la máquina de ensayos estará en compromiso entre la situaciones idealizadas apoyada y empotrada, aunque más cercana a la situación de apoyo ideal.

Adicionalmente se indica que la ecuación [1] permite el cálculo de la frecuencia del primer modo a un espesor distinto de 4mm.

$$f_{ne} = f_{n4} \frac{e}{4} \quad [1]$$

Donde e es el espesor del vidrio de interés en mm, f_{n4} es la frecuencia del primer modo de vibración en Hz para la placa de vidrio de 4 mm de espesor a las dimensiones de interés y f_{ne} es la frecuencia del primer modo de vibración de la placa de vidrio con el espesor y dimensiones de interés.

La figura 4 muestra las frecuencias naturales del primer modo de vibración para un vidrio de espesor de 10 mm (entre los máximos empleados en construcción), diferentes condiciones de contorno (bordes empotrados, bordes apoyados y placa apoyada en esquinas), ancho fijo y altura variable. De ambas figuras se deduce que para un impacto con un rango de frecuencias comprendido entre 0 y 40 Hz los vidrios de 10 mm de espesor se excitarán dinámicamente si su altura es superior a 2000mm, mientras que para vidrios de 4 mm de espesor esto ocurrirá a partir de 630mm de altura.

El caso más desfavorable que se podría encontrar en las soluciones constructivas habituales corresponde a vidrios de 10 mm de espesor y alturas de 1100 mm. Para independizar los modos de vibración de la máquina soporte y el vidrio, será necesario que la frecuencia natural mínima de la estructura soporte sea de 60Hz como se observa en la figura 4.

3.3.- Cálculo y análisis de las frecuencias naturales de la estructura soporte

Para poder determinar las frecuencias naturales de la estructura soporte con análisis modal numérico, se requiere conocer en detalle la configuración de la misma. La figura 5 muestra un esquema de la configuración de la estructura soporte que propone la norma UNE-EN 12600:2003. Sin embargo, dicha norma no propone ningún perfil determinado, ni en cuanto a secciones o dimensiones, dejando la aceptación del péndulo a la calibración final del mismo, es decir, que una vez construido el péndulo puede no ser útil para su fin.

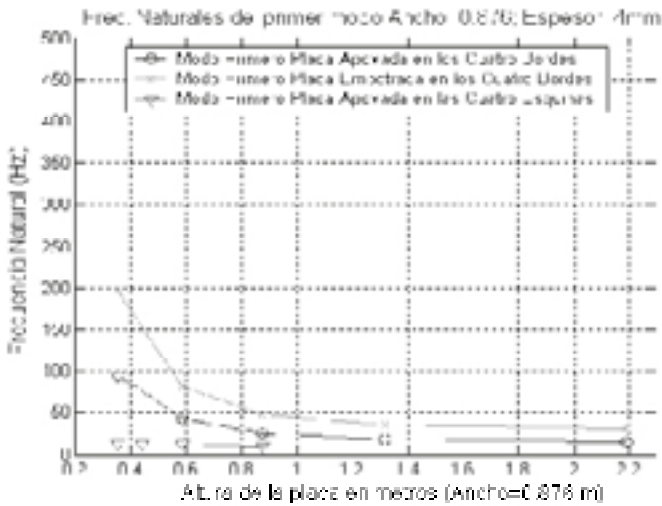


Fig. 3- Frecuencias naturales del primer modo de vibración en placas de vidrio con espesores de 4 mm.

Los péndulos fabricados según norma emplean para el marco de sujeción un perfil hueco de dimensiones 100.50.8 (UNE EN 10210-2:2002), para el marco principal un doble perfil compuesto de un UPN 100 (UNE 36522:2001) y un perfil hueco 100.50.8. Puesto que no existe información acerca de los perfiles que se emplean en los tirantes y patines de sujeción, se ha optado en el modelo por el empleo de perfiles UPN 100 en los mismos. Todos los perfiles empleados son de acero S 275 JR. Las cintas de goma que impiden el contacto directo entre el vidrio y el acero de los perfiles, sí están especificadas en la norma, siendo de sección llena rectangular de 10 x 20 mm, de caucho de dureza de 60 IRDH (de acuerdo Norma ISO 48:94). El documento normativo de la UNE-EN 12600:2003 establece que la deformación máxima de la cinta de caucho es del 20% de su espesor. Los anejos informativos de la norma refieren seis fijaciones entre los marcos, tres a cada lado. El número de fijaciones se respeta ya que se observa en análisis numéricos

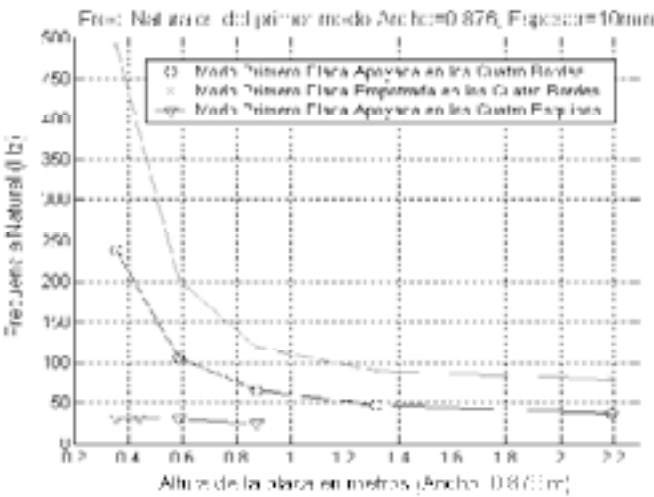


Fig. 4- Frecuencias naturales del primer modo de vibración en placas de vidrio con espesores de 10 mm.

que no se incluyen en este documento una deformación uniforme en las cintas de goma.

Con estos perfiles, se realiza un modelo de elementos finitos con el software Ansys 5.5 según se expresa en la tabla I.

La figura 5 muestra el modelo de elementos finitos compuesto de 90 elementos Beam4, 128 elementos Shell63 y 48 elementos tipo Matrix27, que se propone para la configuración del péndulo de impacto. Las seis fijaciones entre los marcos se han modelado igualando los desplazamientos U_x , U_y y U_z entre los nodos donde se sitúan éstas.

Para completar este modelo es necesario determinar las condiciones de contorno, es decir, la fijación de la estructura al suelo. Dado que este aspecto no está especificado en la norma UNE EN-12600, siendo de suma importancia, se han estudiado distintas posibilidades. La figura 6 muestra las frecuencias naturales de flexión en el plano XY y distintos modos de fijación, empleando 2 o 5 fijaciones infinitamente rígidas en cada patín. Se puede observar que para dos puntos de anclaje al suelo por patín, separados 940mm (cuatro en total) la frecuencia del modo de flexión principal de la estructura en el plano XY es de $f_n=18.8\text{Hz}$, frecuencia que se encuentra en el rango de excitación del impacto. Sin embargo, si se añaden 6 puntos más de anclaje aproximadamente equidistantes, tres en cada patín de sujeción, la frecuencia natural aumenta hasta $f_n=50.1\text{Hz}$, desplazándose el modo de vibración principal fuera del rango de frecuencias de la excitación, aspecto que se debe conseguir para que la estructura que soporta al cristal no vibre y se realice un reparto correcto de energías en el impacto.

TABLA I. ELEMENTOS UTILIZADOS POR EL MODELO PARA LOS DISTINTOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

ELEMENTO ESTRUCTURA	PERFILES (Dimensiones en mm)	ELEMENTO MODELO	NODOS
Marco Principal	UPN 100 + 100.50.8	Lineal 3D Elástico (Beam4)	2
Marco de sujeción	100.50.8		2
Tirantes	UPN 100		2
Patines de sujeción	UPN 100		2
Cintas de goma	20x40	Matriz Rigidez (Matrix27)	2
Cristal	1938x876	Superficie 3D Elástica (Shell63)	4

4. CONCLUSIONES

Al estudiar la normativa internacional y proyecto de norma nacional que aborda la seguridad ante impacto humano de los acristalamientos en edificaciones, se identifica la necesidad de disponer de un método de verificación fiable que permita la determinación de un conjunto de soluciones aceptadas que garanticen el cumplimiento de las exigencia de dichas normas.

La norma UNE-EN 12600:2003 debería concretar a priori las características de la máquina pendular de ensayos de

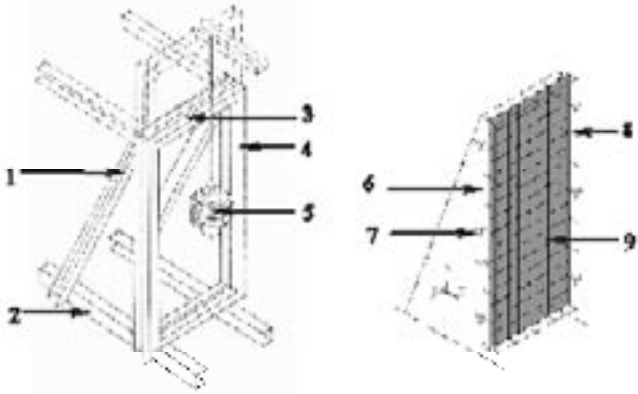


Fig. 5- Configuración y modelado del péndulo de impacto.

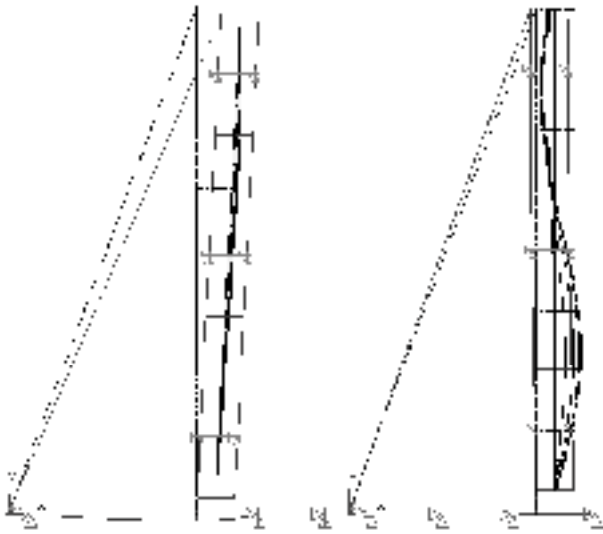


Fig. 6- Modos de vibración de flexión del modelo con distintas condiciones de contorno.

impactos humanos y no dejar su posible validez sólo a expensas de una calibración posterior a su construcción.

Para ensayar los vidrios empleados en la construcción es necesario que la frecuencia natural mínima de la máquina de ensayos sea de 60 Hz.

La concreción en el anclaje de la estructura que soporta el vidrio a ensayar, es un aspecto de suma importancia que debería incluirse en futuros anexos de la norma UNE EN 12600:2003.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está siendo financiado con el proyecto BIA 2003-07022 del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

1. REAL DECRETO 1630/1992, de 29 de diciembre, por el que se dictan disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, en aplicación de la Directiva 89/106/CEE (B.O.E. 9-2-93)
2. REAL DECRETO 1328/1995, de 28 de julio, por el que se modifican, en aplicación de la Directiva 93/68/CEE las disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, aprobadas por el Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre. (B.O.E. 19.8.95)
3. Directiva 89/106/CEE del Consejo, de 21 de diciembre de 1988, relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros sobre los productos de construcción [Diario Oficial L 40 de 11.02.1989].
4. Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la edificación (LOE), BOE de 6 de noviembre de 1999.
5. Código Técnico de la edificación – Seguridad de utilización, Borrador del Segundo Proyecto, Noviembre 2003.
6. Mr. Francis Serruys et al. "CEN-Impact test prEN 12600". Glass Processing Days, pp: 451-454 13-16 June 1999.
7. Leon Jacob et al. "ISO Safety glass impact test developments". Glass Processing Days, pp: 725-728, 15-18 June 2003.
8. Japanese Industrial Standard (JIS R 3205:1998): Laminated Glass.
9. UNE-EN 12600:2003. Vidrio para la edificación. Ensayo pendular. Método de ensayo al impacto y clasificación para vidrio plano.
10. Yukihiro Oketani et al. "Experimental study of shot bag impactors for international standardization". Glass Processing Days, pp: 740-742, 15-18 June 2003.
11. Ray V. Foss, Takahiro Murakami et al. "Safety glass testing: human head impactor simulation by dynamic transient analysis". Glass Processing Days, pp: 444-450, 13-16 June 1999.
12. Robbins, D. H. "Comparative testing of anthropomorphic dummy and a standardized impactor for glazing material" UM-HSRI. Document Number 35897. Univ. of Michigan Highway Safety Research Institute (UMTRI, Ann Arbor). October 15, 1976.
13. Dr.-Ing. Dirk Bohmann. "FEM_ New ways in glass design and engineering". Glass Processing Days, 18-21 June 2001.
14. Robert D. Blevins Ph.D. "Plates" pp: 233-290 "Formulas for natural frequency and mode shape". Litton Educational Publishing, Inc. 1979.

Recibido: 09.01.05

Aceptado: 14.07.05