

# Validez del coeficiente de amplificación dinámica como herramienta para predecir el comportamiento de tablas de madera sometidas a acciones de impacto

## M. N. González García

Dra., Profesora Titular, Dpto. Const. Arquitectónicas y su Control, Univ. Politécnica Madrid, España  
[mariadelasnieves.gonzalez@upm.es](mailto:mariadelasnieves.gonzalez@upm.es)



## A. Cobo Escamilla

Dr. Ing. Industrial, Catedrático, Dpto. Tecnología de la Edificación, Univer. Politécnica Madrid, España  
[alfonso.cobo@upm.es](mailto:alfonso.cobo@upm.es)



**Palabras clave** - Prevención, barandillas de madera, métodos de evaluación, protección de caída, obras de construcción, impacto.

**Keywords** - Prevention, wood guardrails, evaluation methods, fall protection, construction sites, impact.

## RESUMEN

Las tablas de madera se emplean usualmente en construcción como parte integrante de protecciones colectivas y medios auxiliares. En estos usos, las cargas a que están sometidas son fundamentalmente de tipo dinámico y suelen aplicarse en forma de impacto. Para estas aplicaciones, en la mayoría de las ocasiones, trabajan colocadas de cara.

El coeficiente de amplificación dinámica se ha usado desde hace decenios para evaluar analíticamente elementos sometidos a impacto. Sin embargo, la obtención de este coeficiente se basa en unas hipótesis que en ocasiones se alejan de la realidad.

En este trabajo se han sometido a distintos tipos de impacto tablas de madera aserrada de pino silvestre, colocadas de cara, y se han comparado los resultados obtenidos con el comportamiento analítico previsto en base al empleo del coeficiente de amplificación dinámica.

## ABSTRACT

The wooden boards are usually used in construction as part of collective protection and aids. In these applications, the loads to which they are subject are essentially dynamic type and are usually applied in the form of impact. For these applications, in most cases, work placed side.

The dynamic amplification factor has been used for decades to evaluate analytically elements subjected to impact. However, obtaining this coefficient is based on assumptions that are sometimes based in reality.

In this work have been subjected to various types of impact tables pine lumber, placed face, and compared the results with the behavior expected based on the analytical use of dynamic amplification factor.

## 1. Introducción

### 1.1. Carácter dinámico de las cargas

Las expresiones conocidas para el análisis de estructuras de edificación suponen que las cargas se aplican de forma infinitamente lenta (Salvador y Heller, 1987). Esta situación se reproduce de forma muy aproximada en la práctica: desde que se construye una estructura hasta que se aplican las cargas permanentes, transcurre un periodo de tiempo muy largo. No obstante, algunas acciones en edificación poseen un carácter dinámico como por ejemplo la acción del viento o el tráfico en un garaje. En estos casos se suele recurrir a transformar las cargas dinámicas en cargas estáticas equivalentes.

Las acciones que se producen sobre los elementos utilizados como protecciones colectivas en obras de construcción poseen un carácter dinámico. Piénsese, por ejemplo, en el caso de un trabajador que pisa sobre unos tablonos de madera que cubren el hueco de un forjado. La acción, el peso del trabajador, se aplica de forma instantánea sobre el tablón. En otras ocasiones, las cargas impactan con altas velocidades, como podría ser el caso de un objeto que cae desde un forjado a la cubrición de un paso protegido para peatones (Cobo, 1998).

Las acciones a considerar sobre las protecciones colectivas, se pueden introducir en los cálculos de las dos formas siguientes:

- Quando el carácter dinámico de la carga no es importante, se puede trabajar con cargas estáticas equivalentes.
- Quando no se puede obviar el carácter dinámico de la carga, se puede operar de una forma sencilla, transformando la energía del impacto en energía de deformación de la estructura que recoge al cuerpo que cae. Trabajando de esta forma se obtiene un factor que mayor la carga que cae y tiene en cuenta su efecto dinámico, es el coeficiente de amplificación dinámica.

## 1.2. Comportamiento de materiales bajo carga de impacto

Quando las estructuras reciben las cargas en forma de impacto o su velocidad de aplicación es alta, se modifica su respuesta estructural. En general, cuando se aumenta la velocidad de aplicación de la carga sobre un material, aumenta su tensión de rotura y su límite elástico mientras que su capacidad de deformación disminuye. El fenómeno se conoce como consolidación dinámica.

En la figura 1 (Feodosiev, 1980) se muestran de forma cualitativa los diagramas tensión deformación de una barra de acero ensayada a tracción cuando la carga se aplica lentamente y cuando se aplica con una variación muy rápida. Puede comprobarse que se modifica su comportamiento mecánico. Cuando la carga se aplica de modo estático el diagrama muestra un comportamiento típico dúctil, con escalón de cedencia, período de endurecimiento y grandes deformaciones antes de la rotura. Cuando la carga se aplica con una variación rápida, el comportamiento es como el de un acero conformado en frío, perdiéndose el escalón de cedencia, además aumenta la resistencia del acero y disminuye su capacidad de deformación.

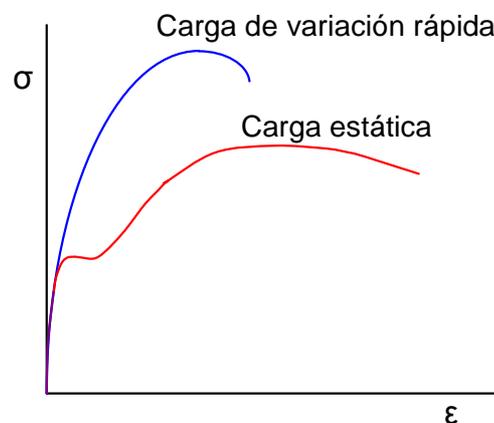


Figura 1 – Comparación de diagramas de tracción en un acero para cargas de variación lenta y cargas de variación rápida.

Experimentalmente se han encontrado expresiones analíticas para relacionar las características mecánicas de distintos tipos de aceros de armar con su velocidad de deformación (CEB, 1988). A modo de ejemplo, en aceros laminados en caliente, su tensión en el límite elástico varía desde 530 N/mm<sup>2</sup> cuando el ensayo a tracción se hace con una velocidad  $v = 10^{-5}$  ε/s hasta 630 N/mm<sup>2</sup> cuando la velocidad es  $v = 50$  ε/s.

En la madera este fenómeno es más acusado. La resistencia a la rotura depende del tiempo de aplicación de la carga. Cuando ésta se aplica en forma de impacto, la resistencia es aproximadamente el doble que cuando se aplica de forma infinitamente lenta (figura 2) (Götz et al, 1987; Argüelles, 1969).

El Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995-1-1: 2006. Eurocódigo 5) y el Código Técnico de la Edificación (Código Técnico de la Edificación. 2007) ofrecen valores para la resistencia de la madera que, además de depender de la duración de la carga, varían con el tipo de ambiente en el que se encuentra situado el elemento, asignando para cargas instantáneas prácticamente el doble de resistencia que para cargas permanentes.

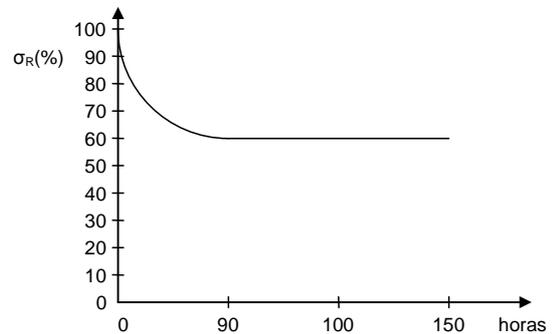


Figura 2 – Evolución de la resistencia de madera aserrada en función del tiempo de aplicación de la carga

### 1.3. Coeficiente de amplificación dinámica

Una técnica analítica sencilla para evaluar estructuras sometidas a acciones de impacto consiste en utilizar el coeficiente de amplificación dinámica o de impacto. El coeficiente de impacto es un factor por el que se multiplica la carga y mayor sus efectos. Una vez mayorada la carga se opera de manera idéntica al cálculo estático.

El coeficiente de amplificación dinámica se obtiene al igualar la energía de impacto a la energía de deformación de la estructura que recibe el impacto.

La energía de impacto se obtiene como el producto de la carga que cae por el máximo desplazamiento que experimenta.

La energía de deformación de la estructura se obtiene integrando la deformación de todas las partes que componen la estructura.

La obtención del coeficiente de amplificación dinámica de esta manera supone admitir las siguientes simplificaciones (Gere, 2002; Timoshenko, 1944):

- Se supone que toda la energía cinética de la masa que golpea se transforma en energía de deformación de la barra. Es decir, que no existen pérdidas de energía durante el impacto. Esta hipótesis queda del lado de la seguridad, al no considerar las pérdidas por calor o deformaciones locales de los materiales, tanto de los que reciben el impacto como de los que impactan.
- Se supone que en el momento del impacto, la masa que golpea queda fijada a la estructura que recibe el impacto y se desplaza junto a ella (el peso no rebota). Es más probable que esto suceda cuando la masa del elemento que golpea sea mucho mayor que la masa de la estructura que recibe el impacto.
- Se desprecia cualquier cambio en la energía potencial de la estructura (debido a su movimiento vertical) y no se tiene en cuenta la energía de deformación de la barra debido a su peso propio.
- Se supone que la distribución de tensiones y movimientos en la estructura es del mismo tipo a la que se obtiene cuando la carga es estática.
- Se supone que los materiales poseen el mismo comportamiento que cuando se someten a cargas estáticas.

En función del nivel de deformación que se establezca en el material de la estructura y del tipo de diagrama tensión-deformación que caracteriza al material estructural, pueden obtenerse coeficientes de amplificación dinámica en régimen elástico y lineal, elastoplásticos o plásticos.

Cuando se obtiene el coeficiente de amplificación dinámica en régimen elástico y lineal puede tenerse en cuenta o despreciarse la masa de la estructura que recibe el impacto. Además, en régimen elástico y lineal siempre es necesario predimensionar la estructura para poder obtener el coeficiente de amplificación dinámica.

La evaluación de protecciones colectivas mediante el coeficiente de impacto se ha usado en bandejas de protección contra caídas de objetos (Irlés y Maciá, 1997), soportes tipo pescante para redes de seguridad vertical (Irlés y Sáiz, 1995; Cobo y González, 2004) o soportes para redes de seguridad horizontales (González y Cobo, 2000).

Se han realizado numerosos estudios sobre el comportamiento estructural de elementos de madera de gran escuadría (Hermoso, 2001; Esteban, 2003) evaluando su resistencia a flexión (Calderoni et al, 2006; Boström, 1999), a cortante (Divos et al, 1998) o a compresión (Leijten et al, 2010) tanto bajo carga instantánea como mantenida en el tiempo (Bengtsson, 2001).

Sin embargo los estudios sobre piezas de madera de pequeña escuadría sometidos a cargas estáticas (Lozano et al, 2009) o de impacto (González, 2010) son menos numerosos.

## 2. Objetivos

En este trabajo se ha tratado de comprobar la eficacia de una evaluación analítica de tablas de madera de pino silvestre sometidas a acciones de impacto usando el coeficiente de amplificación dinámica en régimen elástico y lineal sin tener en cuenta la masa del elemento de recogida.

Para ello se han comprobado los resultados obtenidos analítica y experimentalmente.

## 3. Materiales y técnicas empleadas

Se han sometido a acciones de impacto tablas de madera de pino silvestre procedentes del Aserradero de El Espinar (Segovia, España). Se ha trabajado sobre elementos con escuadrías de 150x27 mm y 150x22 mm con longitudes de 2600 mm, lo que ha permitido colocar los elementos biapoyados con una luz libre de 2400 mm. Las tablas de espesor 22 mm se han ensayado después de dejarlas envejecer durante 1 año. Las tablas suministradas estaban clasificadas inicialmente por el Aserradero en tres calidades concretas: Como Cae (CC) que corresponde a especial, primera y segunda, Tercera (TA) y Cuarta (CA). Se procedió a la clasificación visual y resistente de las tablas obteniendo las clases ME1 (C27), ME2 (C18) y Rechazo.

En el Laboratorio de Materiales de Construcción de la EUAT de la UPM se han realizado pruebas de impacto sobre tablas de madera biapoyadas, dejando caer una masa de 300 N desde una altura de 0,6 m, lo que equivale a una energía de 180 J.

El peso de 300 N se ha materializado mediante la unión de dos sacos de pellets, que poseen una densidad similar a la del cuerpo humano. Se ha medido el desplazamiento producido después del impacto colocando una falsa escuadra debajo de la tabla (figuras 3 y 4). Las tablas se han colocado de cara (figura 4) que es el modo habitual en el que trabajan cuando forman parte de protecciones colectivas. Los sacos de pellets se han dispuesto uno encima de otro, conformando una masa paralelepípedica de dimensiones 50x25x25cm. El impacto se produce de modo que el centro de gravedad de la masa coincide con el punto central de la sección donde se impacta y sobre 25 cm de tabla (figuras 4 y 5).



Figura 3 – Falsa escuadra debajo de la tabla ensayada



Figura 4 – Ensayo de impacto con  $E = 180 J$

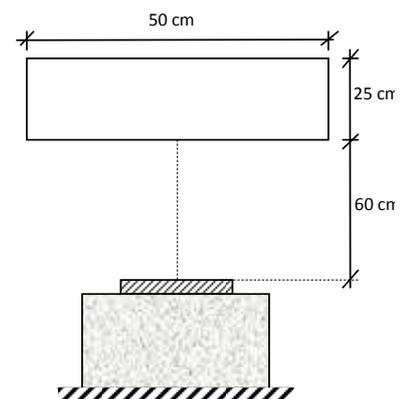


Figura 5 – Esquema del impacto producido con los sacos de pellets

Cuando el impacto se realiza sobre la tabla biapoyada sobre bloques de hormigón, sólo hay que tener en cuenta la rigidez de la tabla considerada como viga biapoyada con carga puntual.

En este caso, el coeficiente de amplificación dinámica  $\gamma$ , en régimen elástico y lineal, y sin tener en cuenta la masa del elemento de recogida, puede obtenerse como:

$$\gamma = 1 + \sqrt{1 + \frac{2K_b \cdot H}{P}} \quad (1)$$

Siendo  $K_b$  la rigidez de la tabla biapoyada,  $H$  la altura de caída del cuerpo que impacta y  $P$  su peso.

#### 4. Evaluación bajo carga de impacto con $E = 180 \text{ J}$

##### 4.1. Evaluación experimental

| TABLA      | CLASIFIC. VISUAL | CLASIFIC. RESIST. | DESPLAZAMIENTO (mm) | OBSERVACIONES                            |
|------------|------------------|-------------------|---------------------|--|
| CC 1 (27)  | ME1              | C27               | 191                 |  |
| CC 2 (27)  | ME1              | C27               | 260                 |  |
| CC 3 (27)  | ME1              | C27               | 220                 |  |
| CC 4 (27)  | ME1              | C27               | 196                 |  |
| CC 5 (27)  | ME1              | C27               | 233                 |  |
| CC 6 (27)  | R                | -                 | 222                 |  |
| CC 7 (27)  | ME1              | C27               | 270                 |  |
| CC 8 (27)  | ME1              | C27               | 245                 | Rompe en el centro                       |
| CC 9 (27)  | ME2              | C18               | 210                 |  |
| CC 10 (27) | ME2              | C18               | 200                 |  |
| CC 11 (27) | R                | -                 | 275                 |  |
| CC 12 (27) | ME1              | C27               | 262                 |  |
| CC 13 (27) | ME1              | C27               | 275                 |  |
| CC 14 (27) | ME1              | C27               | 354                 |  |
| TA 1 (27)  | R                | -                 | 256                 | Rotura casi imperceptible                |
| TA 2 (27)  | R                | -                 |                     | Rompe                                    |
| TA 5 (27)  | ME2              | C18               | 259                 | Rompe                                    |
| TA 6 (27)  | ME1              | C27               | 299                 |  |
| TA 7 (27)  | ME2              | C18               | 264                 | Rotura casi imperceptible                |
| TA 8 (27)  | ME2              | C18               | 240                 |  |
| TA 9 (27)  | R                | -                 |                     | Rompe                                    |
| TA 10 (27) | R                | -                 | 216                 |  |
| TA 11 (27) | R                | -                 |                     | Rompe por nudos                          |
| TA 12 (27) | R                | -                 |                     | Rompe por nudo                           |
| TA 13 (27) | R                | -                 |                     | Rompe fuera del tercio central           |
| TA 14 (27) | R                | -                 |                     | Rompe                                    |
| CA 1 (27)  | R                | -                 |                     | Rompe por nudos fuera del tercio central |
| CA 2 (27)  | ME2              | C18               |                     | Rompe por nudo central                   |
| CA 3 (27)  | R                | -                 |                     | Rompe                                    |
| CA 4 (27)  | ME2              | C18               |                     | Rompe por nudos                          |
| CA 5 (27)  | R                | -                 |                     | Rompe por nudos                          |
| CA 6 (27)  | R                | -                 |                     | Rompe por nudo                           |
| CA 7 (27)  | R                | -                 |                     | Rompe por nudo. Inicialmente revirada    |
| CA 8 (27)  | R                | -                 | 207                 |  |
| CA 10 (27) | R                | -                 | 255                 |  |
| CA 11 (27) | R                | -                 |                     | Rompe                                    |
| CA 12 (27) | R                | -                 | 277                 |  |
| CA 13 (27) | R                | -                 |                     | Rompe próximo a nudo                     |

Tabla 1 – Resultados en el ensayo a impacto de 180 J en tablas de madera de espesor 27 mm apoyadas en bloques de hormigón

En la tabla 1 se muestran los resultados después del impacto realizado sobre las tablas de espesor 27 mm.

El impacto se ha materializado mediante un paquete formado por dos sacos de pellets de peso 30 kg cayendo desde 0,60 m ( $E = 180 \text{ J}$ ).

Se ha indicado la clasificación visual de la tabla, su clase resistente, el desplazamiento máximo experimentado después del impacto y las observaciones apreciadas, cuando son relevantes.

En la tabla 2 se muestran los resultados después del impacto, con la técnica anterior, sobre tablas de espesor 22 mm que han experimentado un proceso de envejecimiento natural durante un año situadas a la intemperie en El Espinar (Segovia).

| TABLA     | CLASIFIC. VISUAL | CLASIFIC. RESIST. | DESPLAZAMIENTO (mm) | OBSERVACIONES                                 |
|-----------|------------------|-------------------|---------------------|---|
| CC 4 (22) | ME1              | C27               | 275                 |   |
| CC 6 (22) | ME2              | C18               |                     | Rompe fuera del tercio central                |
| TA 4 (22) | R                | -                 |                     | Rompe en el centro por nudo                   |
| TA 5 (22) | ME2              | C18               |                     | Rompe fuera del tercio central                |
| TA 6 (22) | R                | -                 |                     | Rompe   |
| CA 2 (22) | R                | -                 |                     | Rompe en el centro y fuera del tercio central |
| CA 5 (22) | R                | -                 |                     | Rompe en el centro                            |

Tabla 2 – Resultados en el ensayo a impacto de 180 J en tablas de madera de espesor 22 mm, envejecidas 1 año, apoyadas en bloques de hormigón

En la tabla 3 se muestran los resultados cuando una masa metálica de 30 kg de peso impacta desde una altura de 0,60 m sobre 8 tablas de madera que habían resistido el impacto de 180 J materializado con dos sacos de pellets. La masa metálica se ha materializado con un bloque de dimensiones 15x15x13,33 cm. El impacto se ha producido haciendo golpear la superficie de 15x15 cm con la tabla.

| TABLA      | CLASIFIC. VISUAL | CLASIFIC. RESIST. | DESPLAZAMIENTO (mm) | OBSERVACIONES               |
|------------|------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------|
| CC 4 (22)  | ME1              | C27               | 335                 |                             |
| CC 5 (27)  | ME1              | C27               | 303                 |                             |
| CC 14 (27) | ME1              | C27               | 374                 |                             |
| TA 6 (27)  | ME1              | C27               |                     | Rompe en el tercio exterior |
| TA 8 (27)  | ME2              | C18               | 317                 |                             |
| TA 10 (27) | R                | -                 | 301                 | Rompe sin partir la tabla   |
| CA 8 (27)  | R                | -                 | 274                 |                             |
| CA 12 (27) | R                | -                 | 300                 | Rompe pero sin partir       |

Tabla 3 – Resultados del ensayo de impacto ( $E = 180 \text{ J}$ ) materializado con masas de acero

En la tabla 4 se muestran los resultados sobre dos de las tablas anteriores que no rompieron y se sometieron a un ensayo de impacto golpeando con la masa de acero cerca del apoyo ( $E = 180 \text{ J}$ ). En este caso el centro de gravedad de la carga impactó a 45 cm del borde del apoyo.

| TABLA     | CLASIFIC. VISUAL | CLASIFIC. RESIST. | DESPLAZAMIENTO (mm) | OBSERVACIONES             |
|-----------|------------------|-------------------|---------------------|---------------------------|
| CC 4 (22) | ME1              | C27               | 205                 | Impacto a 18 cm del apoyo |
| TA 8 (27) | ME2              | C18               | 265                 | Impacto a 18 cm del apoyo |

Tabla 4 – Resultados del ensayo de impacto ( $E = 180 \text{ J}$ ) con masas de acero impactando cerca del apoyo

## 4.2. Evaluación analítica

La evaluación analítica sobre tablas de madera colocadas sobre bloques de hormigón, apoyos que se pueden suponer rígidos, se realiza utilizando el coeficiente de amplificación dinámica en régimen elástico y lineal, sin tener en cuenta la masa del elemento de recogida definido en el punto 2.1.

En la tabla 5 se muestra la obtención del coeficiente de amplificación dinámica para tablas de espesores 22 y 27 mm con clases resistentes C18 y C27:

| ESPESOR (MM)     | 22   |      | 27   |      |
|------------------|------|------|------|------|
|                  | C18  | C27  | C18  | C27  |
| Clase resistente |      |      |      |      |
| $K_b$ (N/mm)     | 4,16 | 5,31 | 7,69 | 9,82 |
| $\gamma$         | 5,2  | 5,7  | 6,6  | 7,3  |

Tabla 5 – Obtención del coeficiente de amplificación dinámica en tablas biapoyadas.

En la tabla 6 se muestra el cálculo resistente de las tablas de madera biapoyadas.

#### Cálculo a flexión

| ESPESOR (mm)                     | 22               |                  | 27               |                  |
|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                                  | C18              | C27              | C18              | C27              |
| Clase resistente                 |                  |                  |                  |                  |
| $M_R = W_e \cdot f_{m,K}$ (kN·m) | 0,22             | 0,33             | 0,33             | 0,49             |
| $\gamma$                         | 5,2              | 5,7              | 6,6              | 7,3              |
| $M'_S = \gamma \cdot M_S$        | 0,94             | 1,03             | 1,19             | 1,31             |
|                                  | $M'_S > M_R$     | $M'_S > M_R$     | $M'_S > M_R$     | $M'_S > M_R$     |
|                                  | <b>NO CUMPLE</b> | <b>NO CUMPLE</b> | <b>NO CUMPLE</b> | <b>NO CUMPLE</b> |

Tabla 6 – Evaluación analítica a flexión sobre tablas de madera con impacto  $E = 180$  J, punto medio de la tabla

#### Cálculo a cortante

| ESPESOR (mm)                 | 22            |               | 27            |               |
|------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                              | C18           | C27           | C18           | C27           |
| Clase resistente             |               |               |               |               |
| $V_R = A \cdot f_{v,K}$ (kN) | 11,22         | 13,20         | 13,77         | 16,20         |
| $\gamma$                     | 5,2           | 5,7           | 6,6           | 7,3           |
| $V'_S = \gamma \cdot V_S$    | 0,78          | 0,85          | 0,99          | 1,09          |
|                              | $V'_S < V_R$  | $V'_S < V_R$  | $V'_S < V_R$  | $V'_S < V_R$  |
|                              | <b>CUMPLE</b> | <b>CUMPLE</b> | <b>CUMPLE</b> | <b>CUMPLE</b> |

Tabla 7 – Evaluación analítica a cortante sobre tablas de madera con impacto  $E = 180$  J, punto medio de la tabla

Cuando el impacto se realiza sobre tablas de madera biapoyadas en bloques de hormigón 19 tablas no resisten el impacto, la mayoría de ellas (18) con clasificación resistente C18 o R.

Cuando el impacto se realiza sobre 7 tablas de espesor 22 mm, envejecidas durante 1 año (tabla 2), los resultados muestran que 6 de las 7 tablas no son capaces de resistir el impacto.

Se ha procedido al impacto con una energía de 180 J de una masa de acero, que prácticamente no se deforma durante el impacto y de este modo la energía del impacto la debe absorber la estructura resistente.

Los resultados obtenidos (tabla 3) muestran que cuando 8 tablas se someten a un impacto con masas de acero, cuatro de ellas no superan el impacto y rompen, comprobándose que efectivamente este impacto es más exigente que el materializado con los sacos de pellets.

Los resultados obtenidos cuando las masas de acero ( $E = 180$  J) se dejan caer cerca del apoyo muestran que las tablas



Figura 6 – Masas de acero ( $E = 180$  J) impactando sobre punto cercano al apoyo

resisten el impacto (figura 6).

Cuando el impacto se produce sobre tablas de madera apoyadas sobre bloques de hormigón, los coeficientes de amplificación dinámica obtenidos adquieren valores de entre 5,2 y 7,3. Se supera la evaluación a cortante pero no la de flexión.

## 5. Análisis y discusión de resultados

En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos sobre las tablas de espesor 27 mm en función de su clase resistente cuando se someten a un impacto de 180 J materializado con 2 sacos de pellets:

|     | Nº TABLAS | Nº TABLAS NO ROMPEN | % TABLAS NO ROMPEN |
|-----|-----------|---------------------|--------------------|
| C27 | 11        | 10                  | 91                 |
| C18 | 7         | 3                   | 43                 |
| R   | 20        | 6                   | 30                 |

Tabla 8 – Resultados del ensayo de impacto de 180 J sobre tablas de espesor 27 mm en función de la clase resistente

En las columnas de la tabla 8 se indican el número de tablas de cada clase resistente, el número de tablas que no rompen y su relación, en tanto por ciento, respecto al número de tablas total.

La clasificación resistente se ha obtenido fundamentalmente por la presencia de nudos. Puede apreciarse que prácticamente todas las tablas con clasificación resistente C27 son capaces de resistir el impacto y a medida que el número y el tamaño de los nudos aumenta el porcentaje de tablas que rompen después del impacto aumenta, poniéndose de manifiesto la enorme importancia que poseen los nudos en el comportamiento frente a impacto. Para comprobar si el efecto del nudo se debe únicamente a la pérdida de sección debido a la discontinuidad que se produce en la pieza cuando éste es saltadizo o su influencia es superior



Figura 7 – Tabla de Clasificación comercial CC, de espesor 27 mm con taladro circular de diámetro 65 mm

debido a las discontinuidades en la fibra que se produce a su alrededor, se ha procedido a realizar taladros circulares pasantes de diámetros variables en el centro de las tablas que han superado el impacto de 180 J. Posteriormente se han vuelto a someter al mismo impacto, comprobando que no se produce rotura de las tablas cuando el diámetro de los taladros supera prácticamente el doble del diámetro de los nudos presentes en las tablas que no han superado el ensayo. Lo anterior pone de manifiesto que el efecto del nudo en el comportamiento de tablas a impacto es superior al que se predice únicamente por su pérdida de sección (figura 7).

Cuando el impacto de 180 J se produce sobre tablas de espesor 22 mm envejecidas durante un año (tabla 2), rompen todas las tablas con clasificación C18 o rechazo y únicamente supera el ensayo una tabla de clasificación C27. Lamentablemente en este espesor el número de tablas ensayadas no es el suficiente como para poder extrapolar conclusiones de los ensayos realizados aunque si se puede decir que las seis tablas ensayadas que no poseen clasificación resistente C27 han roto.

Los impactos producidos poseen una energía de 180 J pero toda esa energía no la absorbe el elemento que recibe el impacto, parte de ella es absorbida por el elemento que impacta, fundamentalmente por la deformación que se produce en él durante el impacto (González, 2010).

Cuando el impacto de 180 J se materializa mediante masas de acero y se vuelve a impactar sobre tablas que habían superado el ensayo realizado con los sacos de pellets, se pone de manifiesto que el 37% de las tablas ensayadas rompen, no pudiendo absorber la energía de este impacto.

La superación de este ensayo supone la absorción por parte de la estructura de una energía muy próxima a los 180 J porque en este caso la absorción de energía de la masa que impacta y la disipación de energía es mínima. Por otra parte se puede apreciar el aumento que se produce en los desplazamientos después del impacto, como consecuencia del mayor efecto de éste.

Los impactos producidos cerca de los apoyos (tabla 4) muestran que el cortante no es determinante en los elementos ensayados con la configuración del ensayo.

La evaluación analítica utilizando el coeficiente de amplificación dinámica en régimen elástico y lineal sin tener en cuenta la masa del elemento de recogida, pone de manifiesto el orden de magnitud de los coeficientes de impacto obtenidos (tabla 5) que oscilan entre 5,2 y 7,3 dependiendo de la rigidez de los elementos analizados. A mayor canto corresponde mayor momento de inercia y, por tanto mayor rigidez. Lo mismo sucede cuando la clase resistente es superior, el módulo de elasticidad longitudinal correspondiente es mayor y, de nuevo, aumenta la rigidez. El incremento de la rigidez de las piezas supone aumento en el coeficiente de amplificación dinámica.

Con los coeficientes de amplificación dinámica obtenidos, el cálculo a flexión (tabla 6) no sale airoso, obteniéndose en todos los casos que en la sección central, el momento que solicita a la sección es superior al momento que es capaz de resistir la sección. Sin embargo el cálculo a cortante (tabla 7) da resultados satisfactorios en todos los casos estudiados.

Cuando el impacto se produce cerca del apoyo en vez de en el centro de la tabla, las posibilidades de absorber energía por parte de la tabla son mucho menores porque el desplazamiento que se produce en la misma es mucho menor y, por tanto, su rigidez es mucho mayor. Sin embargo, en ese caso el momento flector que se produce es mínimo y el cortante es máximo y ya se ha visto, que las tablas están muy lejos del agotamiento por cortante y es la flexión la sollicitación más desfavorable con la geometría de estos sistemas.

La comparación de los resultados analíticos con los experimentales permite afirmar que el análisis de este tipo de elementos utilizando el coeficiente de impacto en régimen elástico y lineal sin tener en cuenta la masa del elemento de recogida, ofrece resultados que quedan del lado de la seguridad. Con este procedimiento de análisis se supone que el material se comporta en todo momento dentro de su rango lineal y además se supone que toda la energía del impacto la absorbe la estructura impactada. Estas dos hipótesis quedan del lado de la seguridad ya den como resultado coeficientes de impacto superiores a los que realmente se dan en la práctica, lo cual no invalida el procedimiento de cálculo porque en muchas ocasiones puede emplearse como resultado que da una solución segura del problema o una dimensión máxima de la estructura.

## 6. Conclusiones

- Después del impacto de 180 J (materializado con dos sacos de pellets) sobre tablas de madera de pino silvestre de sección 150x27 mm y biapoyadas en bloques de hormigón separadas 2400 mm, prácticamente todas las tablas de clase resistente C27 superaron el ensayo. Más de la mitad de las tablas con clasificación C18 o Rechazo rompieron.
- El efecto de los nudos en el comportamiento a impacto es superior al que se predeciría únicamente por la pérdida de sección que provocan.
- Impactos materializados con masas de acero son más exigentes que los producidos con sacos de pellets, debido a la diferente deformación de estos elementos, lo que supone absorciones distintas de energía.
- Ensayos de 180 J sobre tablas envejecidas durante un año de espesor 22 mm, en las mismas condiciones que las tablas de espesor 27 mm, producen la rotura de todas las piezas cuando la clasificación resistente de las piezas es C18 o Rechazo.
- Ensayos de 180 J, impactando cerca de los apoyos son resistidos por las tablas de madera de espesor 27 mm.
- Utilizando el coeficiente de amplificación dinámica en régimen elástico y lineal sin tener en cuenta la masa del elemento de recogida, se obtienen soluciones analíticas que quedan del lado de la seguridad.

## Referencias Bibliográficas

- Bengtsson, C. (2001). "Mechano-sorptive bending creep of timber-influence of material parameters". *Holz als Roh und Werkstoff*, 59, pp. 229-236.
- Boström, L. (1999). "Determination of the modulus of elasticity in bending of structural timber-comparison of two methods". *Holz als Roh und Werkstoff*, 57, pp. 145-149.

- Calderoni, C.; Matteis, G.; Giubileu, C.; Mazzolani, F.M. (2006). "Flexural and shear behaviour of ancient wooden beams: Experimental and theoretical evaluation". *Engineering Structures*, 28, pp. 729-744.
- CEB Comité Euro-International du Béton. (1998). "Concrete Structures under impact and impulsive loading". N° 187. Cap. 3.4. Properties of Reinforcing and Prestressing steel.
- Cobo, A. (1998). "Aspectos dinámicos de cálculos en seguridad". *Libro de Actas y Abstractas del III Forum Europeo de Ciencia, Seguridad y Salud*, Oviedo, 529-534.
- Código Técnico de la Edificación. (2007). "Documento Básico SE, Seguridad Estructural-Estructuras de Madera". Ministerio de Fomento. Madrid.
- Divos F.; Tanaka T.; Nagao H.; Kato H. (1998) "Determination of shear modulus on construction size timber". *Wood Science and Technology*, 32, pp. 393-402.
- Esteban M. (2003). "Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de coníferas". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Feodosiev, V.I. (1980). "Resistencia de materiales". Ed. Mir, Moscú. 2ª edición. Pp. 77-78.
- Gere, J.M. (2002). "Resistencia de Materiales". 5ª ed., Thomson Editores, Spain Paraninfo, S.A. Madrid. Cap. 9.10. Deflexiones producidas por impacto, pp. 674-676.
- González, M.N. (2010). "Consideraciones respecto a los sistemas provisionales de protección de borde". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- González, M.N.; Cobo, A. (2000). "Evaluación de un sistema de protección colectiva de redes de seguridad sujetas a bandejas". II Convención Técnica y Tecnológica de la Arquitectura Técnica CONTART 00. Madrid, noviembre. Tomo II, pp. 207-212.
- Götz, K-H.; Hoor, D.; Möhler, K.; Natterer, J. (1987). "Construire en bois". Editions du Moniteur, Paris. Propriétés mécaniques, pp. 30.
- Hermoso, E. (2001). "Caracterización mecánica de la madera estructural de pinus sylvestris L." Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Irlés, R.; Maciá, A. (1997). "La seguridad en el diseño de bandejas de protección contra caídas de objetos". *Mapfre Seguridad*, nº 67, pp. 15-23.
- Irlés, R.; Sáiz, J. (1995). "Soportes tipo pescante para redes verticales de seguridad en construcción". *Salud y Trabajo*, nº 110, pp. 8-17.
- Leijten, A.J.M.; Larsen, H.J.; Van der Put, T.A.C.M. (2010). "Structural design for compression strength perpendicular to the grain". *Construction and Building Materials*, 24, pp. 252-257.
- Lozano, C.; González, M<sup>a</sup>.N.; Fuente, J.V.; Bresó, S.; Cobo, A. (2009). "Analytical and experimental evaluation of temporary edge protection systems (TEPS) built with wooden planks". CD y Libro de Abstracts del 1<sup>st</sup> International Conference on Construction & Building Research. Madrid, 24-26 junio.
- Pisarenko, G.S.; Yákoviev, A.P.; Matwéev, V.V. (1985). "Manual de Resistencia de Materiales". Ed. Mir, Moscú. Cap. 21. Cálculo por carga de impacto, pp. 578-588.
- Salvador, M.; Heller, R. (1987). "Estructuras para arquitectos". Editorial: CP67, Buenos Aires.
- Timoshenko, S. (1944). "Resistencia de Materiales". Tomo I, 15ª ed., Espasa Calpe, S.A. Madrid. Cap. 67. Flexión producida por choque, pp. 294-299.
- UNE-EN 1995-1-1:2006. Eurocódigo 5. (2006). "Proyecto de estructuras de madera". Asociación Española de Normalización (AENOR), Madrid. Capítulo 3: propiedades del material.