



# La seguridad en el diseño de bandejas de protección contra caídas de objetos(\*)

RAMÓN IRLLES MÁS  
*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Profesor titular, Universidad de Alicante.*

ANTONIO MACÍA MATEU  
*Arquitecto. Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universidad de Alicante.*

## SUMARIO

*Los autores efectúan un pormenorizado estudio sobre las bandejas de protección que se instalan en las obras de construcción desde dos puntos de vista: el cinemático de su trayectoria y el dinámico del impacto sobre la bandeja, para comprobar que dichas bandejas deben ser capaces de retener un objeto caído desde una planta con la garantía de no ser atravesadas por él ni sufrir deformaciones tan grandes que pongan en peligro la vida de los viandantes.*

## INTRODUCCIÓN

Igual que sucede con las redes de seguridad para proteger a las personas en su caída, las bandejas de protección para retener objetos caídos durante la construcción de cualquier tipo de edificación están, en realidad, contempladas en la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo, aunque en términos muy generales e imprecisos.

Además, los dispositivos que ahora nos ocupan no sólo protegen al per-

**Palabras clave:** Construcción, bandejas de protección, caídas de objetos.

(\*) El contenido de este artículo está extractado de uno de los temas monográficos del Curso de Especialista en Seguridad e Higiene en el Proyecto y Ejecución de Estructuras, impartido por el primer autor en las Universidades Politécnica de Valencia (1995) y de Alicante (1996).





Figura 1.

sonal que interviene en la construcción, sino también a terceras personas, como son los transeúntes de las vías públicas, siendo su responsabilidad más amplia.

Efectivamente, los artículos 13.2, 15.3 y 16.5 de la Ordenanza General establecen algunas condiciones generales sobre la seguridad estructural de techos y pasillos, que pueden extenderse a las bandejas de protección. También en términos generales se expresa la Ordenanza de Trabajo de la Construcción, Vidrio y Cerámica, en sus artículos 183 y 190: «Se adoptarán en toda edificación en construcción las medidas convenientes para proteger a los trabajadores contra la caída o proyección violenta de materiales, herramientas y demás elementos de trabajo...» y 268: «Cuando se trabaje a diferentes alturas, se adoptarán las precauciones necesarias para la seguridad de los trabajadores ocupados en los niveles inferiores»; todas estas especificaciones pueden extenderse también a terceras personas.

El establecimiento y la regulación más específicos de su uso se deben, normalmente, a Ordenanzas Locales o normas de Planes Generales Municipales de Ordenación, que en algunos casos son más precisas que las

Generales, pero no lo suficientes para establecer unos criterios adecuados y seguros de diseño; siendo, además, poco uniformes.

Otras disposiciones, como las normas UNE 76-501/87 (Estructuras auxiliares y desmontables. Clasificación y definición) y UNE 76-502/90 (Andamios de servicio y de trabajo con elementos prefabricados), también contienen algunas consideraciones generales poco útiles para el objetivo que nos ocupa; en particular, hay que recordar que esta última establece específicamente el carácter estático de las cargas que contempla, mientras que el fenómeno que estudiamos es, evidentemente, un impacto.

Algunos autores sugieren para las bandejas una carga de diseño del orden de 600 Kp/m<sup>2</sup>, pero también de carácter estático.

En este artículo analizamos el fenómeno de la retención de un objeto caído de una obra desde dos puntos de vista: el cinemático de su trayectoria y el dinámico del impacto sobre la bandeja.

#### COMETIDO Y DISPOSICIONES USUALES

La finalidad de las bandejas o marquesinas a que hacemos referencia

es proteger a los transeúntes de las vías públicas de la eventual caída de objetos por la fachada de las edificaciones durante su construcción. Entendiéndose, por tanto, que la bandeja debe ser capaz de retener el objeto con garantías de no ser atravesada por el mismo ni sufrir deformaciones tan grandes que invadan la zona de paso de aquéllos, poniendo en peligro su integridad física.

Los gálibos de paso para viandantes o vehículos en estas estructuras no vienen indicados en ninguna disposición específica en nuestro país. Para los peatones podría adoptarse una altura libre garantizada de unos dos metros o ligeramente superior. En España es raro ver bandejas de protección para los vehículos, si bien la normativa de otros países sí considera esta posibilidad.

En cuanto al ancho, medido desde la fachada, parece razonable que la protección alcance, al menos, a toda la zona transitada por peatones, aunque más adelante analizaremos otros alcances en función de la caída del objeto.

Las disposiciones resistentes que se encuentran en la calle son variadas, desde las biapoyadas (Fig. 1) hasta las totalmente voladas (Fig. 2), pasando por las apoyadas con voladi-



zo (Fig. 3) [1]. El soporte vertical tiene la desventaja de que tiende a obstaculizar las vías para el tráfico rodado y peatonal, y presenta un cierto riesgo de ser impactado por algún vehículo en los casos de mayor alejamiento de la fachada.

En cuanto a la sección transversal de la bandeja propiamente dicha, se encuentran disposiciones con parapeto al vacío y sin él. Su presencia parece conveniente desde dos puntos de vista:

- Ofrecer protección a las personas que inevitablemente transitan por la plataforma (por tanto, con una altura próxima a un metro).

- Retener los fragmentos proyectados de objetos rotos por el impacto de la caída, o los eventuales pequeños rebotes de dichos objetos.

La presentación inclinada de este parapeto, manteniendo las anteriores funciones, prolonga un tanto el alcance de recogida de la bandeja.

Por lo que se refiere a materiales, la práctica totalidad se resuelven con elementos metálicos y/o de madera, aunque veremos posteriormente que los primeros parecen más adecuados debido a su ductilidad y capacidad de deformación plástica sin rotura.

Finalmente, la disposición en altura suele concentrarse siempre en la primera de forjado, y a lo sumo, en la segunda. En edificios de cierta altura, como comprobaremos a continuación, esto disminuye enormemente la eficacia de este medio de protección, tanto desde el punto de vista cinemático como del mecánico-resistente de la recogida.

## ASPECTOS CINEMÁTICOS DE LA CAÍDA DE UN CUERPO

### Trayectoria

La trayectoria que sigue un cuerpo grave en su caída libre hasta ser retenido por la bandeja es, aproximadamente, una parábola cóncava hacia tierra, que llega a ser una recta si no existe velocidad horizontal. Como resulta evidente, es esta última, multiplicada por el tiempo que dura la caída (que sólo depende de su recorrido y velocidad vertical inicial), la que determina la separación desde la fachada hasta el punto de impacto en el elemento de recogida. Ésta es la primera gran indeterminación del problema: ¿cuál es la velocidad horizontal inicial? (que será constante durante la caída si se desprecia el rozamiento con el aire y no hay rebotes).

Para el caso de caídas de personas sobre redes de seguridad, el Institut National de Recherche et Sécurité francés considera las velocidades horizontales de 2 m/s (correspondiente a un desplazamiento lento) y 3 m/s (correspondiente a un desplazamiento rápido).

Un cuerpo cualquiera que cayera (más bien diríamos que se lanzara) al vacío con tales velocidades horizontales y sin vertical inicial sigue, de forma simplificada, las trayectorias de la tabla 1.

Estas consideraciones podrían tomarse como referencia, si bien el cometido de las bandejas es distinto al de las redes de seguridad.

Pero, aunque el cuerpo no se lance con velocidad horizontal inicial, podemos estimar la alcanzada en un mecanismo de caída consistente en un basculamiento por simple pérdida de equilibrio de la siguiente forma (Fig. 4).

Consideremos, simplificado, el peso del cuerpo reducido a su centro de gravedad G. La energía potencial perdida en el proceso de basculamiento se convierte en energía cinética, con una velocidad lineal (tangente a la circunferencia descrita por dicho centro) que se expresa:



Figura 2.

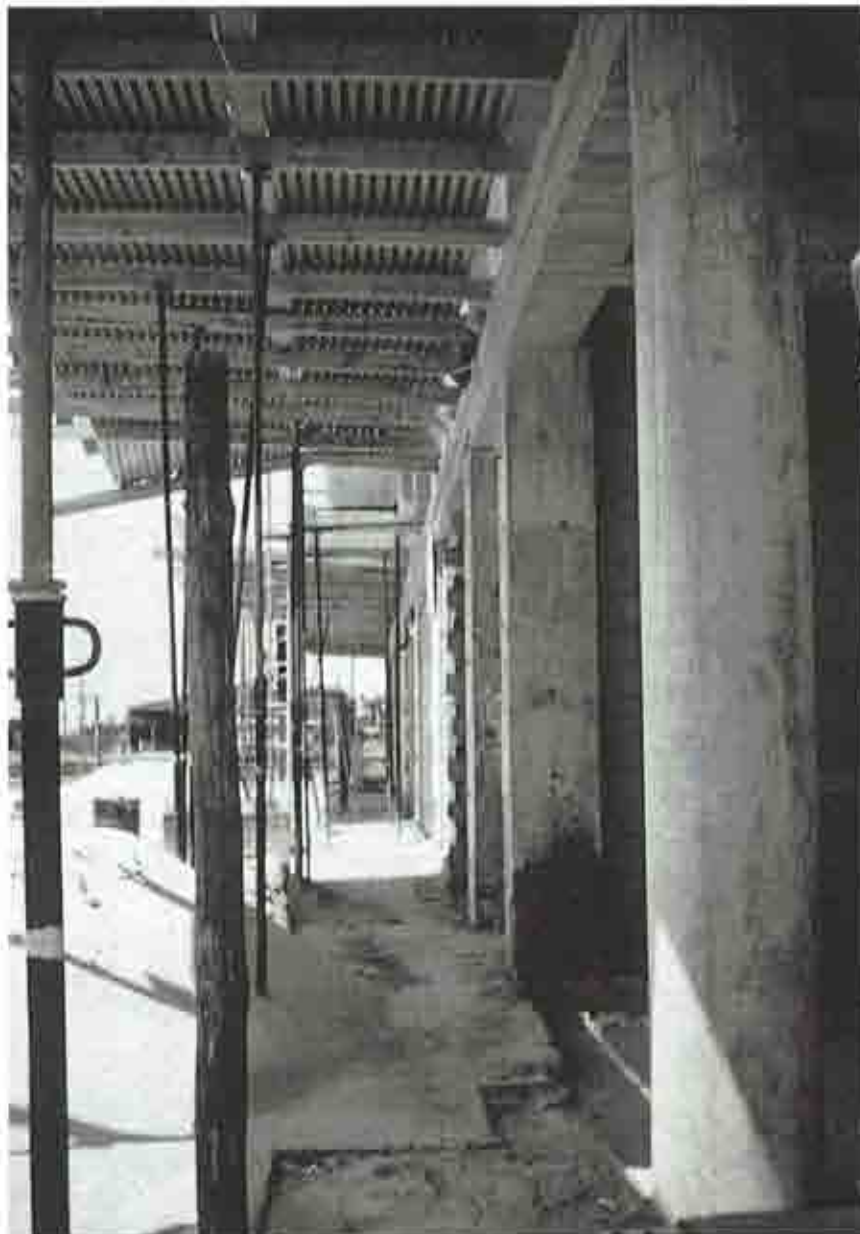


Figura 3.

$$v(\alpha) = \sqrt{2gh} = \sqrt{2gR(1 - \cos \alpha)}$$

siendo  $g$  la aceleración de la gravedad, y su componente horizontal:

$$v_h(\alpha) = v(\alpha) \cdot \cos \alpha = \sqrt{2gR} \cdot \sqrt{1 - \cos \alpha} \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

Supuesto el giro  $\alpha$  suficiente, esta componente presenta un máximo para una posición que anula la primera derivada de (1):

$$v'_h(\alpha) = 0 = \sqrt{2gR} \left[ \frac{\sin \alpha - \cos \alpha}{2\sqrt{1 - \cos \alpha}} - \sin \alpha \sqrt{1 - \cos \alpha} \right]$$

Tabla 1. Separación de fachada.

Velocidad Inicial	Número de forjados				
	1	2	3	4	5
2 m/s	1,77	2,36	2,83	3,24	3,60
3 m/s	2,66	3,54	4,25	4,86	5,39

que se satisface cuando:

$$\Rightarrow \begin{cases} \sin \alpha = 0 \rightarrow \alpha = 0 \\ \frac{\cos \alpha}{2\sqrt{1 - \cos \alpha}} - \sqrt{1 - \cos \alpha} = 0 \\ \rightarrow \alpha = \arcsin \frac{2}{3} = 48^\circ \end{cases}$$

Se comprueba fácilmente que la primera solución corresponde a un mínimo ( $v_h(0) = 0$ ), y la segunda, al máximo, que sustituyendo en (1) resulta:

$$v_h(\alpha_0) = 0,385 \cdot \sqrt{2gR}$$

En el supuesto, también orientativo, de que el cuerpo se separe de su apoyo aproximadamente en esa posición, se dispone del valor estimado de la velocidad horizontal adquirida, que depende de la altura  $R$  de su centro de gravedad.

El alejamiento  $d$  de la fachada se expresa en función del recorrido vertical  $H$ , a partir de la posición citada, en caída libre bajo la acción del campo gravitatorio y de la velocidad vertical inicial. En función del número  $n$  de forjados  $F$ :

$$\begin{aligned} H &= R \cos \alpha_0 + n \cdot F \\ v_{v0} &= \sqrt{2gR} \sqrt{1 - \cos \alpha_0} \quad \text{sen } \alpha_0 = \\ &= 0,430 \cdot \sqrt{2gR} \\ H &= v_{v0} \cdot t + \frac{1}{2} g t^2 \rightarrow t = \frac{\sqrt{v_{v0}^2 + 2gH} - v_{v0}}{g} \\ d &= R \text{sen } \alpha_0 + v_{v0} t = R \text{sen } \alpha_0 + \\ &+ 0,385 \sqrt{2gR} \frac{\sqrt{v_{v0}^2 + 2gH} - v_{v0}}{g} \end{aligned}$$

Sustituyendo la altura aproximada entre forjados,  $F = 3$  m, y el valor del ángulo  $\alpha_0$ , se obtiene

$$d = R \left[ 0,414 + \sqrt{0,505 + 1,78 \frac{n}{R}} \right]$$

expresión cuyo valor se indica en la tabla 2 para diversos cuerpos y número de forjados de la caída. Se separan con una línea los casos que probablemente recogería una bande-

ja de unos dos metros, como las habituales.

Finalmente, si el cuerpo presenta un mecanismo de caída más complejo, con rebote en algún punto de la estructura (Fig. 5), su trayectoria es muy difícil de predecir, y, desde luego, puede alcanzar alejamientos de fachada muchos mayores.



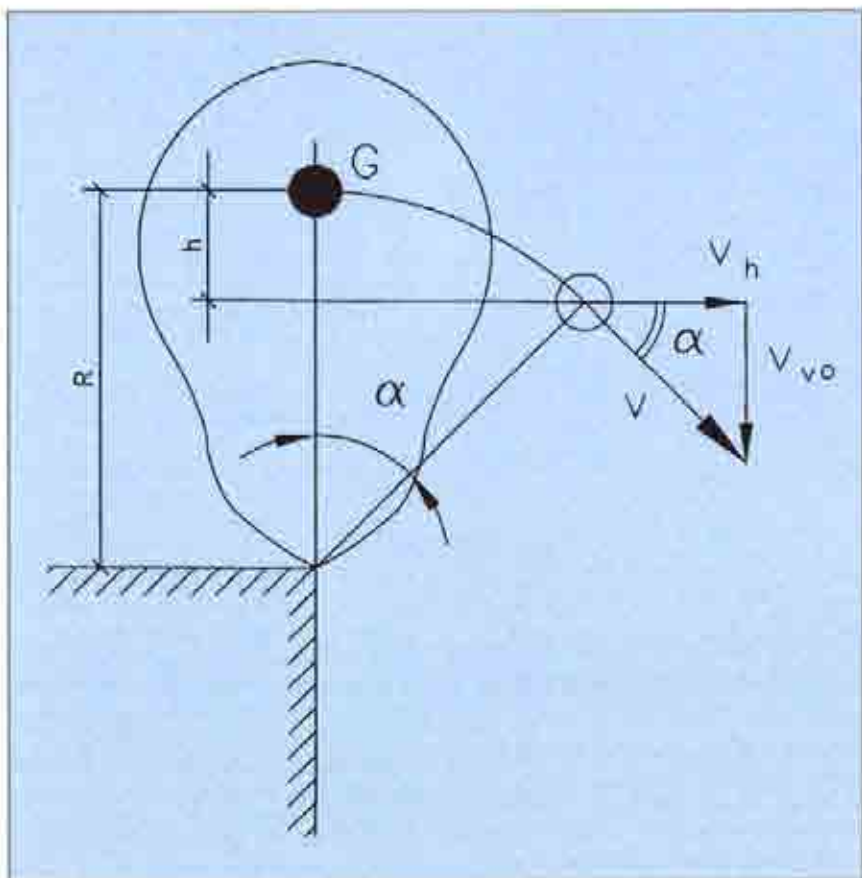


Figura 4.

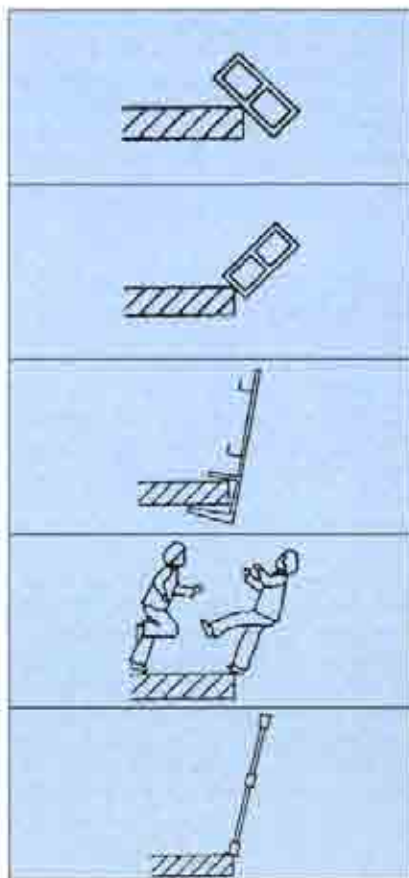


Figura Tabla 2.

Tabla 2. Valores de d(m) para el centro de gravedad.

Cuerpo grave	R (m)	v <sub>h</sub> (m/s)	v <sub>vo</sub> (m/s)	Número de forjados					
				1	2	3	4	5	6
Bloque plano	0,10	0,54	0,60	0,469	0,642	0,776	0,888	0,987	1,08
Bloque de pie	0,20	0,76	0,85	0,696	0,938	1,13	1,28	1,42	1,55
Poste baranda	0,45	1,14	1,27	1,14	1,49	1,77	2,00	2,21	2,40
Persona de pie	0,85	1,57	1,76	1,72	2,19	2,57	2,89	3,17	3,42
Puntal	1,50	2,09	2,34	2,57	3,17	3,65	4,06	4,43	4,76

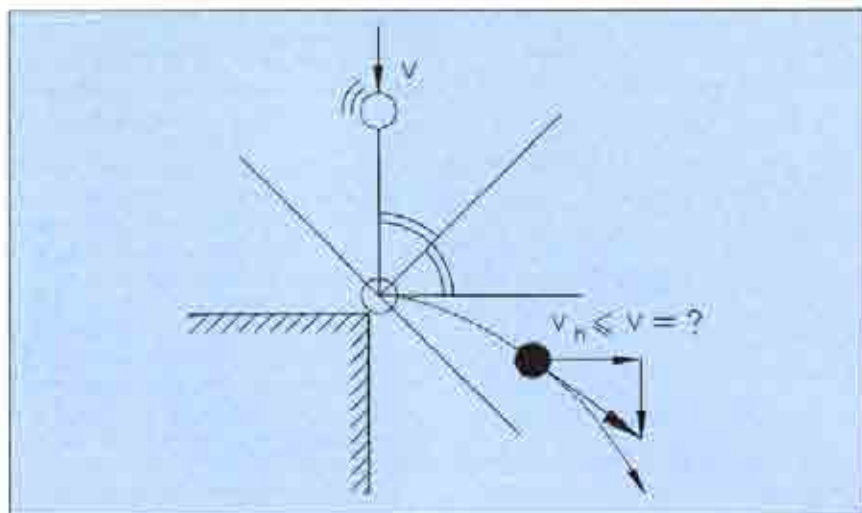


Figura 5.

### Repercusiones en el diseño

La observación de las trayectorias analizadas en el apartado anterior manifiesta que, si se disponen bandejas de un ancho relativamente reducido, del orden de dos metros o poco más, como es habitual, las caídas que pueden detener (desde el punto de vista exclusivamente cinemático) son muy limitadas y corresponden a muy pocas alturas de forjado. Dependen, además, de la altura del cuerpo que cae, en el caso de basculamiento por pérdida de equilibrio.

La situación se agrava todavía más en el caso de rebotes en fachada.

Todo esto indica la necesidad de limitar el recorrido vertical, si se quiere tener una probabilidad alta de reco-

ger el cuerpo que cae, y hacer una hipótesis sobre el tamaño del mismo y forma de caída que se pretende detener. A pesar de ello, la recogida nunca quedará garantizada, salvo que la bandeja se extienda hasta un ancho mayor, no determinable sin conocer las características de la caída.

## ASPECTOS MECÁNICOS DE LA RECOGIDA

### Resistencia estructural

Admitido que la bandeja es geoméricamente capaz de interceptar la trayectoria del cuerpo que cae, el fenómeno resistente que en la misma ocurre constituye precisamente, y de forma inevitable, un impacto. Aquél habrá transformado su energía potencial, propia del nivel donde se inició la caída, en energía cinética en el momento de impactar con el elemento de recogida. Esta dependerá, pues, de la masa  $m$  del cuerpo, del desnivel  $H$  recorrido en la caída y de la velocidad vertical de llegada, que ahora denotaremos sin el subíndice:

$$E_p = E_c \Rightarrow \frac{1}{2} m v^2 = m g H$$

Para evitar que esta energía, que puede adquirir valores muy importantes, se amortigüe contra algún viandante, causándole la muerte o lesiones graves, la bandeja debe ser capaz de resistir el impacto sin perforarse ni adquirir deformaciones excesivas que invadan la zona a proteger. Caben en este punto dos planteamientos:

1. Que la estructura de la bandeja resista en régimen elástico el impacto, por tanto, con unas deformaciones muy pequeñas y recuperables, sin sufrir daños importantes.

2. Que la estructura resista el impacto en régimen elastoplástico, con grandes deformaciones, en su mayoría no recuperables, produciéndose en este caso graves daños en la propia estructura si el impacto es de cierta entidad.

#### Régimen elástico

En esta opción podemos evaluar el factor de impacto de una forma similar a como se hizo para las redes de seguridad [2]:

$$\gamma = 1 + \sqrt{1 + \frac{K v^2}{P g}}$$

siendo  $K$  la rigidez del sistema en el punto de impacto; pero, en este caso,

*La finalidad de las bandejas o marquesinas a que hacemos referencia es proteger a los transeúntes de las vías públicas de la eventual caída de objetos por la fachada de las edificaciones durante su construcción.*

al no ser muy pequeña la masa  $m$ , del elemento de recogida respecto de la masa  $m$  que produce el impacto, es preciso establecer en el mismo la conservación de la cantidad de movimiento, ya que no coincide la velocidad

$$v \approx \sqrt{2 g H}$$

de llegada del cuerpo con la inicial  $v_1$  del conjunto en el proceso de detención:

$$m v = (m + \beta m_1) v_1 \Rightarrow v_1 = v \frac{m}{m + \beta m_1}$$

y la energía cinética que debe considerarse ahora, en lugar de

$$\frac{1}{2} (m v^2)$$

es:

$$\frac{1}{2} (m + \beta m_1) v_1^2 = \frac{\frac{1}{2} m v^2}{1 + \frac{\beta m_1}{m}}$$

Así pues:

$$\begin{aligned} \gamma &= 1 + \sqrt{1 + \frac{K v^2}{P g (1 + \frac{\beta m_1}{m})}} = \\ &= 1 + \sqrt{1 + \frac{2 K H}{P (1 + \frac{\beta m_1}{m})}} \end{aligned}$$

El coeficiente  $\beta < 1$ , que expresa la porción de masa total  $m$ , del elemento resistente (incluidas estructura, plataformas y barandillas) a la que

afecta la conservación de la cantidad de movimiento, se obtiene por consideraciones dinámicas [3], como:

$$\beta = \frac{\int_0^l y''(x) dx}{l y''(x_d)}$$

siendo  $y(x)$  la deformada de la directriz del elemento resistente bajo la acción de la carga estática  $P = mg$ , en el punto de impacto  $x_d$  y  $l$  su longitud.

A título orientativo, los valores de  $\beta$  que corresponden a impactos en el extremo de un voladizo y en el centro de un vano biapoyado son 0,25 y 0,50, aproximada y respectivamente.

En cuanto a los valores de la rigidez  $K$ , relación estática entre carga y movimiento de su punto de aplicación, éstos dependerán de la disposición geométrica del entramado de la estructura, de la rigidez de sus elementos y de la posición del punto de impacto, ya que la deformabilidad no es igual en toda su superficie, sino que depende de su proximidad a los elementos estructurales portantes y de su alejamiento de los apoyos.

Por ejemplo, para el caso particular de una simple viga apoyada en sus extremos, se obtiene el siguiente valor mínimo de diseño para el módulo resistente  $W$  del perfil:

$$W \geq \frac{1,5 P}{\sigma_e l} \sqrt{\frac{6 E I H l}{P (1 + \beta \frac{m_1}{m})}}$$

siendo:

$E$ : Módulo elástico.  
 $I$ : Momento de inercia a flexión.  
 $\sigma_e$ : Límite elástico.

#### Régimen plástico

En la opción «blanda», la energía potencial perdida (o cinética de llegada) no es acumulada de forma elástica en la estructura de la bandeja, sino que en su mayoría se invierte en una deformación plástica irre recuperable, alcanzando en uno o varios puntos el momento de plastificación de las secciones resistentes.

Para el estudio simplificado del fenómeno desde estos supuestos, suele sustituirse el diagrama tensión-deformación del material resistente por otro rígido-plástico; lo cual, cuando se movilizan grandes deformaciones, desvirtúa poco la energía absorbida, que corresponde al área rayada en la figura 6 (recuérdese que trabajo es el producto de fuerza por distancia, o sea, y salvo factores, tensión por deformación).

En este supuesto, la estructura es indeformable hasta que se alcanza el momento de plastificación en sufi-



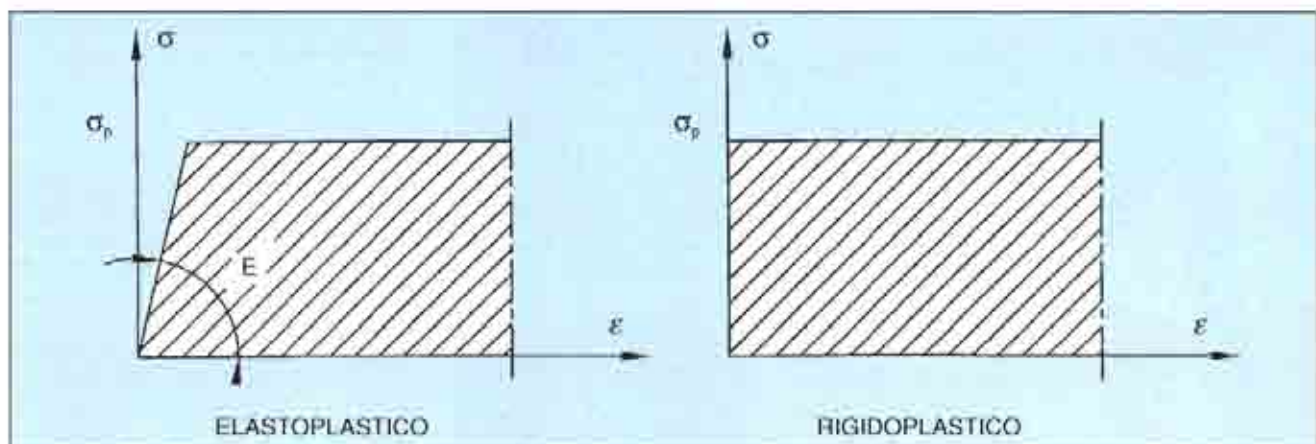


Figura 6.

cientos puntos para convertirla en mecanismo, y toda la deformación se acumula en estas «rótulas plásticas» o en los apoyos que le permiten el movimiento del correspondiente mecanismo de colapso.

Con los diagramas  $\sigma-\epsilon$  expresados, la distribución tensional de una sección flectada en el momento de convertirse en rótula plástica se indica en la figura 7, y la flexión correspondiente vale:

$$M_p = \int \int \sigma_p y dA = \sigma_p \int y dA = 2\sigma_p S_x$$

siendo  $S_x$  el momento estático de primer orden de media sección respecto del eje de flexión (valor que suelen facilitar las tablas de valores estáticos de los perfiles), y  $\sigma_p$  la tensión de plastificación.

Este valor de  $M_p$  depende, pues, del material utilizado y de la forma de la sección transversal.

Para el mismo ejemplo de la viga biapoyada se obtiene, en este caso, el siguiente valor mínimo de diseño del momento estático:

$$S_x \geq \frac{1,5PH}{2\sigma_p \operatorname{arctg} \frac{4ld}{l^2 - d^2}} \quad (4)$$

siendo  $d$  el movimiento transversal máximo permitido por deformación plástica del elemento de recogida.

Las correspondientes expresiones del factor de impacto manifiestan también la especial «dureza» de las posiciones de caída próximas a los apoyos al disminuir indefinidamente los denominadores.

Sin embargo, en estas posiciones, y al igual que en régimen elástico, el agotamiento de los elementos estructurales ya no viene predominantemente determinado por las tensiones normales de flexión, sino por las tangenciales de cortante, o una combinación de ambas, y el factor de impacto ya

no se expresa como en la figura. En estas zonas resulta más probable la rotura por corte de los elementos portantes, ya que no se desarrolla un mecanismo adecuado para una correcta absorción de la energía.

Estas evaluaciones del factor de impacto corresponden a las formas de agotamiento previstas, pudiendo ser menor si se produce algún tipo de inestabilidad estructural que debilite la estructura resistente.

Dentro de este segundo régimen, y en el mecanismo de agotamiento de flexión, la absorción de la energía adquirida por el cuerpo que cae se debe a las rotaciones finitas de las rótulas plásticas. Estas grandes flechas deberán ser convenientemente limitadas, lo cual equivale, si no se quieren dimensiones excesivas, a limitar la energía a absorber, es decir, el peso de los posibles objetos caídos y su altura sobre bodega (obsérvense los dos factores de proporcionalidad  $H$  y  $P$  en las correspondientes expresiones).

### Implicaciones en el diseño

El criterio adoptado entre los dos anteriores tiene inmediatas implicaciones en el diseño.

Esta opción conducirá sin duda, salvo que se limiten drásticamente las alturas de caída y los pesos de los objetos, a dimensiones más costosas que la plástica.

En el segundo caso se admite una probabilidad (tan pequeña como lo sea una caída de importancia) de causar un estropicio considerable en la estructura, aunque no su rotura. El factor de impacto será menor que el primer caso y se tendrán, a igualdad de energías a absorber, dimensiones más económicas; habrá que cuidar, en cambio, de garantizar que el mecanismo de colapso plástico sea posible y ocurra sin dar lugar a inestabilidades ni a desapeos debidos a los mayores cambios de geometría.

Cualquiera que sea el planteamiento, en las zonas de mayor rigidez, el impacto causará los mayores esfuerzos: por ello, y al igual que sucede con los paños de redes horizontales de seguridad, aunque las caídas sobre los contornos (donde frecuentemente crecen las rigideces [4]) son estadísticamente poco probables, son las que menores garantías tienen de ser resistidas con éxito y más probable resulta la rotura (por corte) de la estructura de recogida.

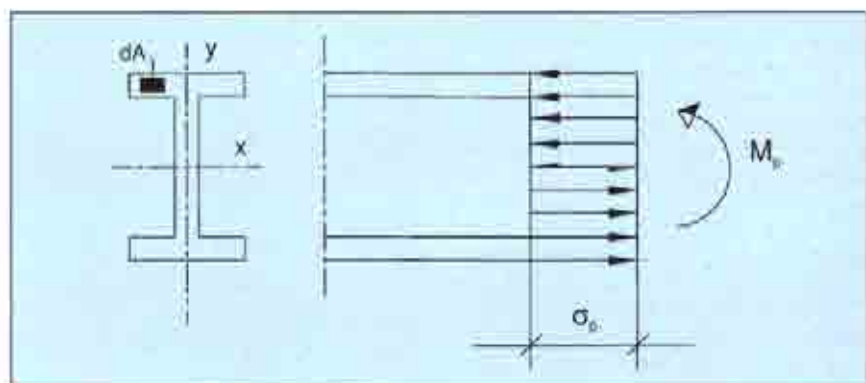


Figura 7.



Figura 8.

Otro aspecto importante para el diseño, en su versión plástica, es la ductilidad del material de dicha estructura, propiedad que se aprecia en la evolución de su diagrama tensión-deformación hasta rotura. Materiales metálicos, como el acero dulce, clásico en estas estructuras, resultan especialmente adecuados para el trabajo plástico sin rotura. Otros clásicos, como la madera, resultan menos aptos para dicho trabajo (Fig. 8) [5]; si bien para un diseño elástico ambos serían aptos igualmente.

En términos generales, parece más adecuado para el problema que nos ocupa el diseño plástico que el elástico, ya que en este último la pequeñez de los movimientos disponibles es simultáneamente causante de un mayor coeficiente de impacto que amplía los esfuerzos, y tanto más cuanto más rígida sea la estructura, entrando el proceso en una especie de círculo vicioso.

## APOYOS Y ANCLAJES

Para reducir el efecto de la rigidez de los puntos próximos a bordes y apoyos pueden adoptarse diseños mejorados, tendentes a flexibilizar éstos.

Una disposición que conseguiría este efecto sería la indicada en la figura 9, donde el apoyo en lado fachada se retranquea hacia dentro del edificio para alejar el punto «duro» de este borde de caída, y los apoyos exteriores se dotan de flexibilidad, dándoles, a su vez, la posibilidad de desarrollar rótulas plásticas.

En cualquier caso, también a éstos afecta el coeficiente de impacto, lo cual habrá de tenerse en cuenta para su adecuado diseño y dimensionamiento.

## PONDERACIÓN DE CARGAS

Otro aspecto a comentar, en relación con el diseño, es el factor de ponderación aplicable a las cargas, independientemente del factor de impacto. Dicho factor de ponderación se aplica, en general, en previsión de que la carga sea superior a la prevista; pero ¿cuál es la carga de diseño de las bandejas? Ésta es otra de las grandes indeterminaciones del problema. Será preciso hacer una hipótesis razonable, que deberá acompañarse de la imposibilidad física de caídas de cuerpos cuyo peso sea  $n$  veces el admitido, so pena de tener que utilizar un factor de ponderación de ese mismo orden. Y, supuesto que ello se ha cumplido, parecería aconsejable utilizar, en cualquier caso, los coeficientes habituales para los materiales utilizados (además del factor de impacto, por supuesto).

## EJEMPLO

Desarrollamos a continuación un supuesto ilustrativo de lo expuesto anteriormente, comparando los efectos

de una misma caída recogida en régimen elástico o plástico.

Considérese la caída accidental de un saco de cemento (50 Kp) desde una altura de un forjado superior a la de la bandeja (3 m aproximadamente) constituida por elementos metálicos con la disposición indicada en la figura 10, y que el impacto se produce en el centro del elemento paralelo a fachada. A efectos cualitativos, compararemos sólo las consecuencias del impacto, prescindiendo de los pesos propios de la bandeja, cuyos esfuerzos son comunes a ambos casos.

## Efectos de caída

### Régimen elástico

El valor del coeficiente  $\beta$  se obtiene sin dificultad a partir de la deformada elástica, suponiendo iguales todos los perfiles:

$$\beta = \frac{2 \int_0^l x^2 \left[ 3 - \frac{4}{l}x \right] dx}{l \left[ \frac{l}{2} \right]^2 \left[ 3 - 4 \frac{1}{2} \right]^2} = \frac{13}{35} = 0,37$$

La flecha elástica del punto de impacto sería:

$$f = \frac{p l^3}{48 E I} + \frac{\rho \left[ \frac{l}{2} \right]^3}{3 E I} = \frac{p l^3}{24 E I}$$

y, por tanto, la rigidez vale:

$$k = \frac{24 E I}{l^3}$$

El factor de impacto será (2):

$$\gamma = \sqrt{\frac{48 E I \cdot 300}{400^2 \cdot 50 \cdot \left[ 1 + 0,37 \cdot \frac{8 \cdot \rho}{50} \cdot 3 \right]}} = \sqrt{\frac{9,45 l}{1 + 0,1776 \rho}}$$

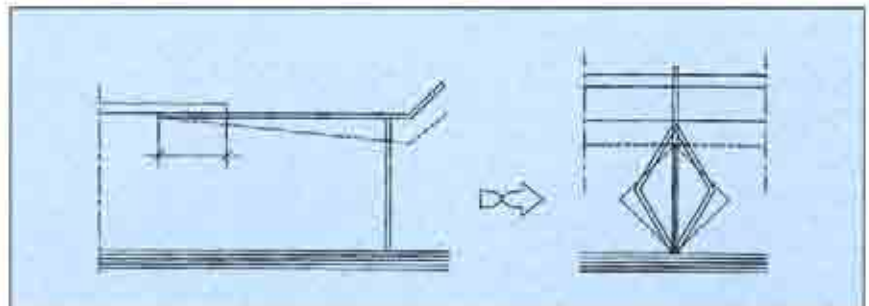


Figura 9.



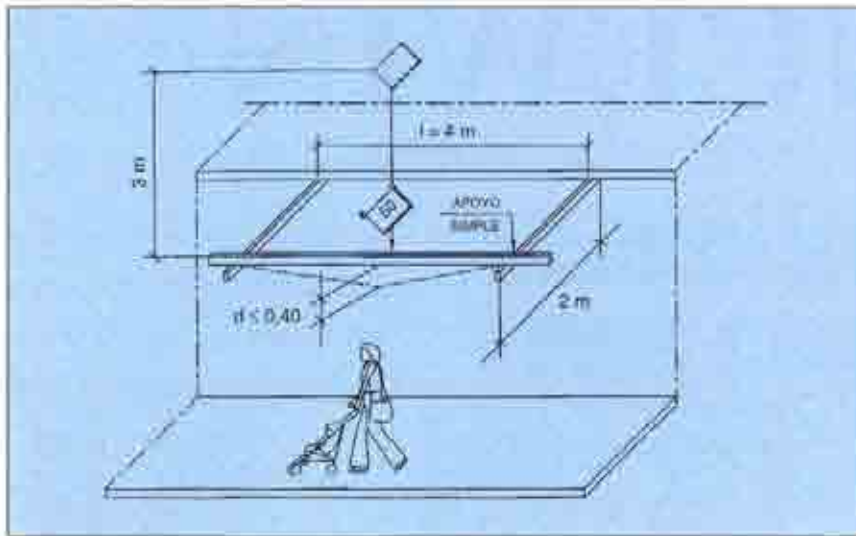


Figura 10.

siendo  $p$  el peso en  $Kp$  por metro de perfil, e incluyendo el factor 3 del paréntesis para englobar la masa total de la estructura resistente más la plataforma y barandilla, supuesta la masa de las últimas del orden del doble de la primera ( $1 + 2 = 3$ ).

Tras algunos tanteos con la condición de dimensionado (3), se requiere un perfil IPE 200 de acero A42:

$$I = 1.940 \text{ cm}^4$$

$$\rho = 22.4 \text{ Kp/m} \cdot l \quad \gamma = 60,7$$

$$W \geq \frac{1,5 \cdot 60,7 \cdot 50 \cdot \frac{400}{4}}{2.600} = 175 < 194 = W_{\text{máx}}$$

Con este perfil, las tensiones generadas por el impacto no alcanzan el límite elástico, y la flecha elástica producida será de:

$$f = \frac{\gamma p l^3}{24 E I} = 2 \text{ cm} \quad \text{en el punto de impacto.}$$

Observese el elevado factor de impacto  $\gamma$ , consecuencia de la rigidez del sistema (en realidad, el factor será algo menor, debido al aplastamiento o rotura del propio saco de cemento, que también disipará energía, pero ello no ocurriría en un objeto más rígido).

#### Régimen plástico

La energía potencial a absorber es, en este caso:

$$E_p = 1,5 \cdot 50 \cdot 300 = 22.500 \text{ Kp} \cdot \text{cm}$$

y limitando el descenso, por razones de seguridad para no invadir la zona transitada, a los 40 cm del supuesto, tendremos (4):

$$S_x \geq \frac{1,5 \cdot 50 \cdot 300}{2 \cdot 2.600 \cdot \frac{4 \cdot 400 \cdot 40}{400^2 - 40^2}}$$

$$= 10,7 \text{ cm}^3 (*) \Rightarrow \text{IPE 80 } (S_x = 11,6)$$

El momento de plastificación del perfil es

$$M_p = 2\sigma_s S_x = 80.320 \text{ Kp} \cdot \text{cm}$$

y el coeficiente de impacto, ahora:

$$\gamma = \frac{M_p}{p l} = 12,$$

muy inferior al correspondiente elástico, y que todavía podría ser menor si se pudiera permitir una mayor deformación (descenso  $d$ ).

Nótese la gran diferencia entre los perfiles necesarios para recoger la caída desde estos dos supuestos, del orden de cuatro a cinco veces más pesado en el primero. En realidad, si se incluye el efecto de los pesos propios, la ventaja no es tan grande, pero el ejemplo pone de manifiesto las diferencias de comportamiento.

#### CONCLUSIONES

La recogida de un objeto por este dispositivo de seguridad constituye un problema de absorción de ener-

gía, siendo, por tanto, los factores determinantes el peso y la altura de la caída ( $E_p = P \cdot H$ ).

Deberían ofrecerse garantías de que no pueden caer cargas superiores a la que se adopte como carga de diseño del elemento, que no aparece establecida en ninguna disposición.

Debería limitarse la altura de caída al objeto de acotar la energía citada y aumentar la probabilidad de recogida; ésta nunca quedará garantizada si se produce algún rebote o forma de caída imprevistos.

El ancho total de la de la plataforma mínimo razonable, para una altura de caída de dos o tres forjados, puede cifrarse en dos o tres metros.

El factor de impacto está en relación directa con la rigidez del sistema, y ésta es mayor cerca de los apoyos. En estas zonas puede llegar a producirse la rotura de la estructura por corte. Para su prevención sería posible diseñar unos apoyos más flexibles.

Tratándose de un problema de absorción de energía, resulta más adecuado y económico un planteamiento plástico que elástico en la mecánica de la recogida. Resultan, por tanto, idóneos los elementos resistentes metálicos, que presentan mayor ductibilidad que otros.

Las consideraciones y formulaciones expuestas en este artículo deben considerarse orientativas hasta que se lleve a cabo un estudio más riguroso del fenómeno; en particular, las realizadas en el ejemplo.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] CARPENA ORTEGA, J. V.; MARTÍNEZ BOTTALLA, J. R., y RODRÍGUEZ TRIVES, F.: «Seguridad en bandejas protectoras para tránsito peatonal y/o vial», trabajo fin de curso del Curso de Especialista en Seguridad e Higiene en el Proyecto y Ejecución de Estructuras. Universidad de Alicante, 1993.
- [2] IRLES MAS, R., y SAIZ NÚÑEZ, J.: «Soportes tipo pescante para redes verticales de seguridad en construcción», *Salud y Trabajo*, n.º 110, 1995.
- [3] FEODOSIEV, V. I.: *Resistencia de Materiales*, Ed. MIR, Moscú, 1980.
- [4] PAUREAU, J.: «Filets en grandes nappes. Efficacité, performances, règles de pose», *Cahiers de Notes Documentaires*, n.º 137, 1989.
- [5] ARCEÑEGUI PARRERO, G.: *Fotografía Documental*, G.S.H.T. Alicante.

(\*) Se ha hecho uso de la aproximación  $\theta = \text{tg} \theta$ , que es aceptable para valores no muy grandes del ángulo  $\theta$  (expresado en radianes); como el caso que nos ocupa.