

ANÁLISIS DE SISTEMAS PROVISIONALES DE PROTECCIÓN DE BORDE SOMETIDOS A ACCIONES DE IMPACTO

Alfonso COBO ESCAMILLA

Doctor Ingeniero Industrial, Arquitecto, Arq. Técnico.
Dpto. Tecnología de la Edificación. UPM. CEU.
Grupo Investigación UPM: PEPCMAE
alfonso.cobo@upm.es

María de las Nieves GONZÁLEZ GARCÍA

Doctora UPM. Arquitecto Técnico
Dpto. Const. Architect. y su Control. UPM. PTU.
Grupo Investigación UPM: PEPCMAE
mariadelasnieves.gonzalez@upm.es

RESUMEN

Con este trabajo se evalúan sistemas provisionales de protección de borde (SPPB), con los mismos materiales y las mismas dimensiones que los habitualmente empleados en obras de construcción bajo un impacto de 180 J, que corresponde muy aproximadamente a una energía que puede ser la que resulta como consecuencia de una situación real después de la caída de un trabajador. Los resultados demuestran que todos los sistemas analizados son capaces de superar el impacto. Sin embargo, en algunos casos, como consecuencia del impacto, las barandillas o los postes experimentan deformaciones elásticas o plásticas que dan lugar a movimientos lo suficientemente importantes como para producir la caída del trabajador al vacío al bascular sobre la protección.

PALABRAS CLAVE: seguridad, barandillas, impacto, protección colectiva, caída en altura

1. Introducción

Las acciones producidas sobre elementos que sirven de protecciones colectivas siempre son de carácter dinámico. En ocasiones el carácter dinámico de la carga es de pequeña entidad y las normas admiten, para la evaluación de las protecciones, su sustitución por cargas estáticas equivalentes, que incorporan el efecto dinámico.

Las normas, reglamentos y documentos técnicos que regulan en distintos países SPPB [1,2,3,4,5,6,7], son coincidentes en su planteamiento general: un SPPB debe estar diseñado y construido para resistir el impacto de un trabajador que camina, tropieza y cae sobre él. Sin embargo estos documentos difieren significativamente en los requisitos mecánicos que se exigen a estos sistemas para cumplir su misión.

La mayoría de los documentos consultados exigen la comprobación de SPPB frente a cargas estáticas y solo unos pocos especifican una evaluación frente a carga de impacto.

Para la evaluación a impacto es usual emplear una energía de aproximadamente 180 J que equivale al peso de un trabajador de 90 kilos que, caminando a una velocidad de 2m/s, cae contra la protección [8].

La norma UNE-EN 13374 clasifica los SPPB en tres clases (A, B y C), en función de la inclinación de la superficie de trabajo y de la altura de caída de la persona a proteger (Figura 1). La norma

indica los requisitos, en términos geométricos y mecánicos, que deben superar los SPPB en función de la clase a la que pertenecen.

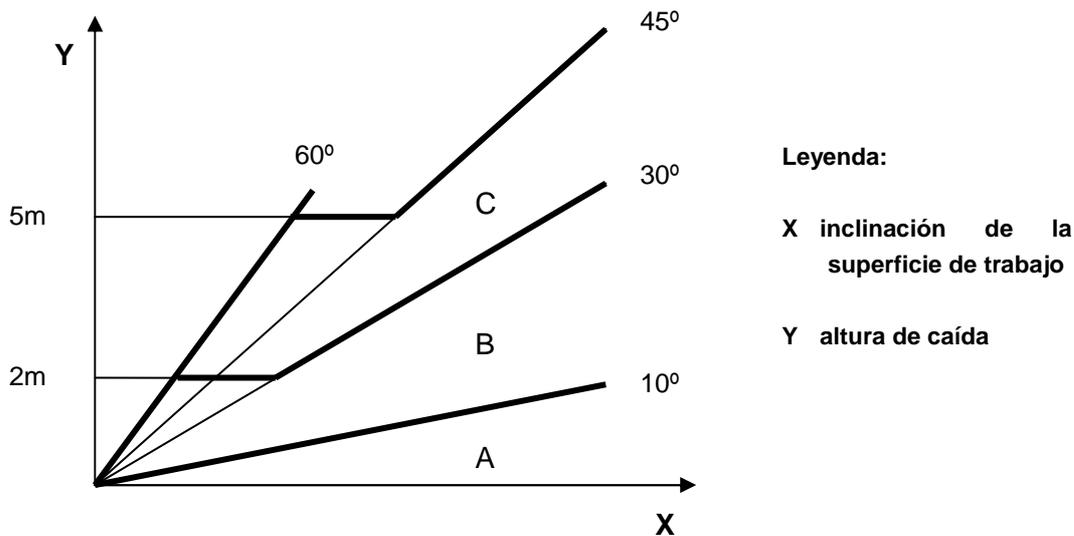


Figura 1. Clasificación de los SPPB según la norma UNE-EN 13374

Los sistemas clase A, que son los más empleados, sólo se pueden utilizar cuando el ángulo de inclinación de la superficie de trabajo es menor de 10° . Se evalúan bajo cargas estáticas equivalentes. Para inclinaciones superiores del forjado, los sistemas se clasifican en clases B y C, siendo necesario para su evaluación el empleo de cargas dinámicas aplicadas en forma de impacto.

La evaluación mediante cargas estáticas de los sistemas clase A según UNE-EN 13374 o la utilización de las acciones de carácter estático de otras normas supone, tal como se ha comentado anteriormente, que las cargas estáticas indicadas por estos documentos son equivalentes a las cargas de impacto que deberían resistir los SPPB en el caso de accidentes reales. Sin embargo no se han encontrado trabajos analíticos o experimentales que soporten esa afirmación.

Con este trabajo se pretende determinar si la utilización de los sistemas de cargas estáticas equivalentes especificados por las normas supone absorber un impacto de un trabajador cuando tropieza y golpea contra un SPPB.

Para conseguir este objetivo se ha utilizado como carga dinámica, la equivalente al impacto con una energía de 180 J y, como cargas estáticas equivalentes, se han empleado las indicadas por la norma EN 13374. Se han ensayado SPPB con postes de acero de sección tubular y barandillas de tablas de madera y de tubo de acero de sección circular, utilizando cargas estáticas y de impacto para comparar posteriormente los resultados obtenidos.

2. Sistemas ensayados

Se han analizado siete SPPB con luz entre postes de 2400 mm y una altura de 1000 mm, medida desde el nivel de referencia hasta el borde superior de la barandilla principal. El poste de todos los sistemas se ha resuelto con sección tubular de 40 mm de diámetro y 1,5 mm de espesor (40-1,5) de acero S 235. Las orejetas de los postes son de acero S 275.

Dos sistemas se han resuelto con barandillas de acero S 235 de sección tubular circular 25·1,5 (S1) y 40·1,5 (S2).

Cinco SPPB se han fabricado con barandillas de madera de pino silvestre suministrada por el Aserradero de El Espinar en Segovia (España). Las tablas de los 5 sistemas de madera ensayados poseen una sección rectangular de 150 mm de altura. Los sistemas S3 y S4 están formados por tablas de espesor 22 mm, mientras que en los sistemas S5, S6 y S7 el espesor es de 27 mm. Para las tablas de espesor 27 mm se han usado elementos de madera con clasificación visual ME1, a la que corresponde una clase resistente C27; ME2, a la que corresponde una clase resistente C18; y Rechazo. Para las tablas de espesor 22 mm se han empleado clasificaciones visuales ME1 y Rechazo. La clasificación visual y las clases resistentes de las tablas de madera empleadas se han obtenido según lo indicado en la norma UNE 56544 [9].

Las características geométricas de las secciones de los siete sistemas ensayados (S1-S7) y del poste (P1) junto con la clasificación visual y resistente de las tablas de madera se indican en la Tabla 1.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	P1
SECCIÓN	25·1,5	40·1,5	150X22	150X22	150X27	150X27	150X27	40·1,5
VISUAL	-	-	ME1	R	ME1	ME2	R	-
RESISTENCIA	S235	S235	C27	-	C27	C18	-	S235

Tabla 1. Características geométricas y resistentes de las secciones de los siete sistemas y de los postes ensayados

Los siete sistemas se han anclado a una viga de hormigón armado en la que se han embebido cartuchos de PVC preparados para alojar los postes de sección circular. En la Figura 1 se muestra a modo de ejemplo la disposición y las características geométricas del sistema 1 ensayado.

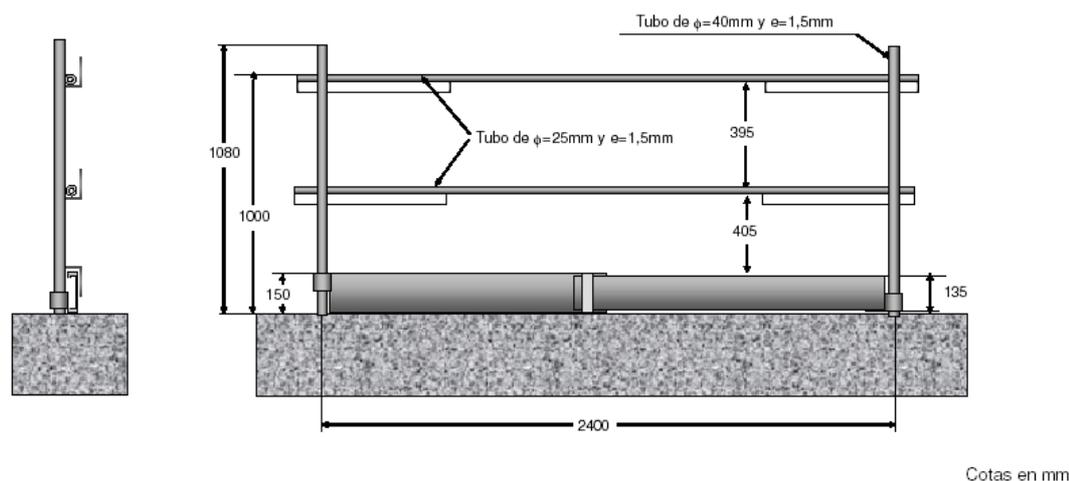


Figura 1. Geometría del sistema 1

3. Técnicas empleadas

3.1. Ensayos estáticos

La evaluación de los SPPB bajo cargas estáticas se ha realizado según la norma EN-13374, analizando tres situaciones críticas: Estado Límite Último (ELU), Estado Límite de Servicio (ELS) y

Carga Accidental (CA). La superación de cada una de las situaciones implica que $S_d \leq R_d$, donde S_d es el valor de cálculo del efecto de las acciones y R_d es la resistencia de cálculo correspondiente.

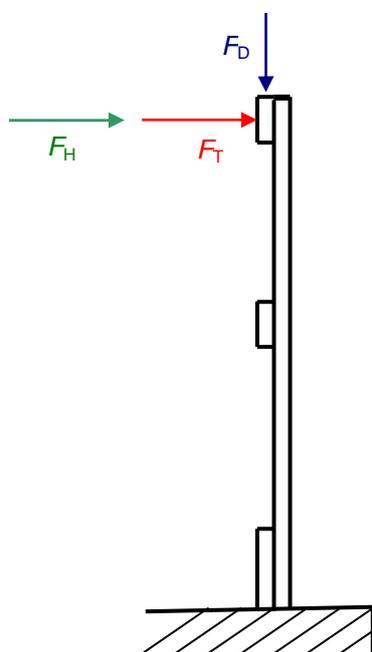
En ELU se comprueba que las barandillas y el poste deben estar diseñados para resistir una carga de 0,30 kN aplicada perpendicularmente al plano del sistema en los puntos más desfavorables. Para la evaluación frente a este estado límite, debe emplearse un coeficiente de mayoración de acciones γ_F de valor 1,5 para todas las cargas y un coeficiente de minoración de la resistencia del material γ_M , que en el caso del acero es $\gamma_M = 1,1$ y para la madera toma el valor $\gamma_M = 1,3$. Con estos valores, la acción a aplicar en el caso de la comprobación de un elemento de acero es $F_H = 0,30 \cdot 1,5 \cdot 1,1 = 0,5 \text{ kN}$ mientras que en el caso de elementos de madera, la carga a emplear es $F_H = 0,30 \cdot 1,5 \cdot 1,3 = 0,6 \text{ kN}$.

Para superar el ELS, la flecha no debe ser mayor de 55 mm cuando se aplica una carga horizontal puntual al sistema de valor $F_{T1} = 0,30 \text{ kN}$, en el punto más desfavorable.

Para la comprobación a carga accidental, se indica que las barandillas deben resistir una carga puntual gravitatoria $F_D = 1,25 \text{ kN}$. Esta carga debe aplicarse en la posición más desfavorable del SPPB, dentro de un sector inclinado $\pm 10^\circ$ respecto de la vertical.

Para la evaluación frente a ELS y carga accidental, los coeficientes de mayoración de acciones y de minoración de la resistencia de los materiales toman el valor unidad.

En la Figura 2 se indican las cargas a aplicar sobre la barandilla principal y el poste de un SPPB para evaluarlo frente a ELU, ELS y CA.



F_D Carga accidental

$F_D = 1,25 \text{ kN}$

F_T Fuerza aplicada para cumplir los requisitos de flecha (aplicada a las barandillas y postes, perpendicularmente al plano del sistema)

$F_T = 0,3 \text{ kN}$ (flecha máxima 55 mm)

F_H Fuerza aplicada para cumplir los requisitos de resistencia (aplicada en un punto cualquiera perpendicularmente al plano del sistema, excepto los plintos)

$F_H = 0,5 \text{ kN}$ (acero)

$F_H = 0,6 \text{ kN}$ (madera)

Figura 2. Cargas puntuales, horizontales y verticales, aplicadas a la barandilla principal y al poste

3.2. Ensayos de impacto

Se han sometido a un ensayo dinámico con una energía de 180 J, SPPB constituidos por postes metálicos y barandillas de tubo metálico o tablas de madera. Los ensayos se han realizado en el

Laboratorio de Elementos de Seguridad del Instituto Tecnológico de la Construcción (AIDICO), haciendo impactar un saco esferocónico, con la composición y geometría indicados en la norma EN-596 [10] con una altura de caída para que la energía del impacto resulte ser de 180 J (180 J / 500 N = 0.36 m).

Los impactos se han producido haciendo golpear al saco sobre la sección central de las barandillas principales de los 7 sistemas y sobre el extremo volado del poste.

Después del impacto se han comprobado visualmente los elementos para detectar posibles plastificaciones o roturas y se han colocado sobre una mesa para poder medir sus movimientos permanentes. Dos postes idénticos a los sometidos a impacto se han ensayado bajo carga estática horizontal aplicada en su extremo volado y se ha obtenido su diagrama carga-desplazamiento. Durante el ensayo los postes se han anclado mediante un cartucho de plástico a una viga de hormigón, de manera similar al anclaje existente en el momento del impacto.

4. Resultados obtenidos

4.1. Ensayos estáticos

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de flecha y resistencia sobre los sistemas y el poste estudiados cuando las cargas se aplican sobre la sección central de la barandilla principal y el extremo superior del poste.

ELEMENTO	SISTEMA	FLECHA		RESISTENCIA			
		F_T (kN)	δ (mm)	F_H (kN)	δ_{\max} (mm)	δ_{res} (mm)	R_u (kN)
Barandilla acero	S1	0,30	66,67	0,50	138,24	30,27	0,57
	S2	0,30	27,81	0,50	47,76	1,31	>0,60
Barandilla madera	S3	0,30	93,69	0,60	202,98		>0,72
	S4	0,30	101,69	0,60	227,98		>0,72
	S5	0,30	39,69	0,60	81,98	2,00	>0,72
	S6	0,30	47,69	0,60	98,98	3,06	>0,72
	S7	0,30	55,54	0,60	111,83	10,06	>0,72
Poste	P1	0,30	20,98	0,50	28,62	1,60	>0.60

F_T : Carga aplicada en la comprobación de flecha (ELS).

δ : Desplazamiento del sistema.

F_H : Carga aplicada en la comprobación de resistencia (ELU).

R_u : Carga aplicada en la comprobación de resistencia última.

δ_{\max} : Desplazamiento máximo.

δ_{res} : Desplazamiento residual tras la carga máxima aplicada.

Tabla 2. Resultados de los ensayos de flecha y resistencia

La carga accidental se evaluó sobre dos puntos diferentes de la barandilla: la sección central donde el momento flector es máximo, y en una sección muy próxima al apoyo, donde el cortante es máximo.

Los valores marcados en negrita en la Tabla 2 indican el no cumplimiento de los requisitos indicados en la norma EN 13374.

En las Figuras 3 y 4 se muestran los resultados correspondientes a los ensayos de flecha y de resistencia cuando la carga se aplica sobre el punto central de la barandilla principal.

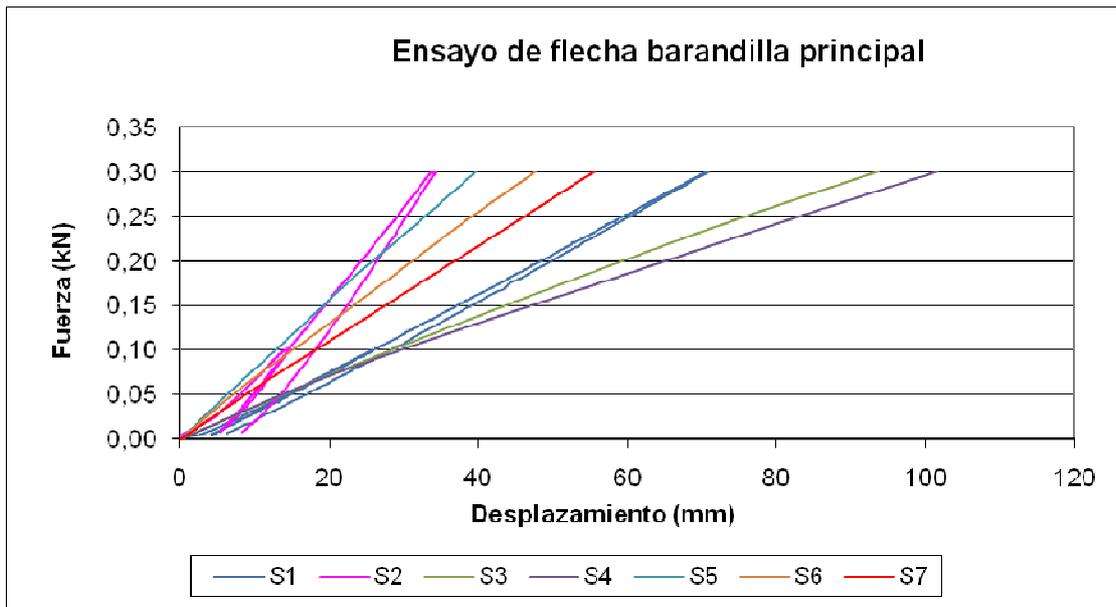


Figura 3. Resultados del ensayo de flecha. Carga aplicada en la sección central de la barandilla principal

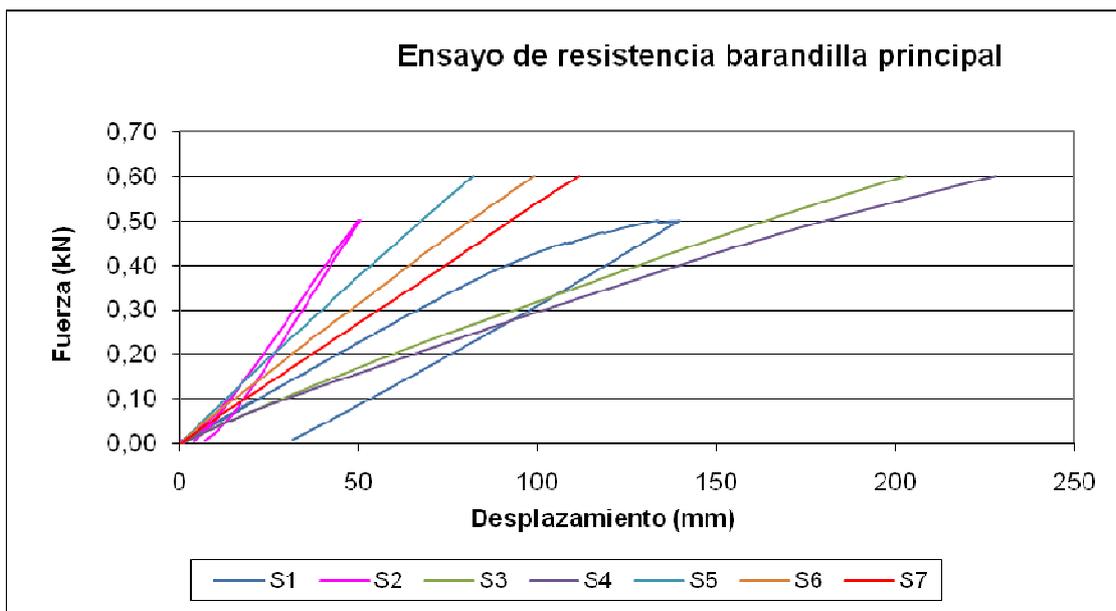


Figura 4. Resultados del ensayo de resistencia. Carga aplicada en la sección central de la barandilla principal

De los siete sistemas ensayados únicamente el sistema 1 no ha superado el ensayo de Carga Accidental.

4.2. Ensayos dinámicos con carga de impacto

Si bien tanto los siete sistemas ensayados bajo un impacto con $E = 180$ J como el poste, son capaces de retener el saco esferocónico y resistir, por tanto, un impacto con esa energía, la respuesta estructural de los distintos sistemas y elementos es muy distinta.

La barandilla principal del sistema S1, después del impacto (Figura 5), experimenta deformaciones plásticas quedando con la geometría indicada en la Figura 6, con un desplazamiento remanente de 115,01 mm, lo que supone un giro en la rótula plástica producida de 11° .



Figura 5. Máximo desplazamiento de la barandilla de S1 en el momento del impacto

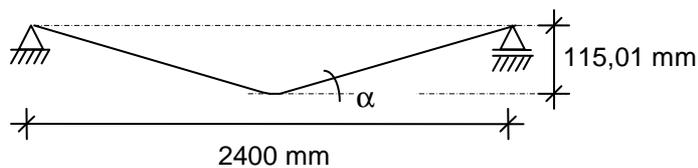


Figura 6. Estado de la barandilla de S1 después del impacto

El resto de los sistemas no experimentan deformaciones plásticas en ninguno de sus elementos (barandillas principales o postes), cuando el impacto se produce en el centro de la barandilla principal, recuperando totalmente las deformaciones producidas durante el impacto.

Al producirse el impacto con $E = 180 \text{ J}$ sobre la parte superior del poste P1, el poste experimenta deformaciones plásticas a la altura de su sujeción al forjado, quedando con una flecha residual de 61,05 mm y con un ángulo permanente girado respecto de la vertical de $3,5^\circ$. El poste retiene el saco en el momento del impacto.

5. Análisis y discusión

5.1. Ensayos estáticos

Los resultados indicados en la Tabla 2 muestran que únicamente los sistemas 2 y 5 son capaces de superar los requisitos indicados por la norma EN 13374 para su evaluación experimental. El sistema 1, utilizado de forma habitual en obras en España, no supera los requisitos de flecha ni de resistencia. Los sistemas 3, 4, 6 y 7 no superan el ensayo de flecha. Únicamente el sistema 1 no supera el ensayo de Carga Accidental.

En la Figura 3 puede comprobarse que el comportamiento durante el ensayo de flecha de los 7 sistemas es prácticamente elástico y lineal. La diferencia entre las rigideces de las barandillas se pone de manifiesto por la distinta pendiente de los diagramas obtenidos.

En la Figura 4 se vuelven a poner de manifiesto las distintas rigideces de los tres sistemas. En el sistema 1 el diagrama es lineal hasta aproximadamente una carga de 0,40 kN, a partir de ese punto se pierde la linealidad y los movimientos crecen más rápidamente que las fuerzas, perdiendo el sistema rigidez de forma paulatina, como consecuencia de la plastificación que está produciendo en el sistema. Al alcanzar la máxima carga y descargar, la descarga se produce por una recta paralela a la de aplicación de las cargas y queda una flecha residual de aproximadamente 30 mm (30,07 mm). En este caso el sistema resiste la máxima carga de ensayo pero no cumple los otros dos requisitos de la norma: la flecha residual es superior al 10% de la

máxima instantánea en las barandillas principal e intermedia y la resistencia última (0,57 kN) no es superior a 1,2 veces la máxima carga de ensayo, 0,60 kN, (Tabla 2 y Figura 4).

El comportamiento de los sistemas 2-7 es lineal, no apreciándose prácticamente deformaciones remanentes. Se cumplen los tres puntos indicados por la norma para la superación del requisito de resistencia (Tabla 2 y Figura 4).

5.2. Ensayos de impacto

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados muestran que todos los sistemas son capaces de retener un saco esferocónico que impacta con una energía de 180 J. Cuando el impacto se produce en el centro de la barandilla principal, únicamente aparecen deformaciones plásticas en la sección central de la barandilla del sistema S1. El resto de los sistemas recuperan las deformaciones producidas durante el impacto.

Los resultados experimentales obtenidos sobre los sistemas S3-S7 muestran que en todos los casos se supera el ensayo con $E = 180 \text{ J}$ y además no se producen ni roturas ni plastificaciones en ninguno de los elementos que forman los sistemas. Incluso sistemas formados por tablas de espesor 22 mm con defectos (sistema S4) son capaces de resistir el impacto.

Cuando estos sistemas se evalúan bajo cargas estáticas, los resultados muestran que los sistemas S3 y S4 (tablas de espesores 22 mm de cualquier calidad) y S6 y S7 (Tablas de espesor 27 mm con clasificación visual ME2 o Rechazo) no son capaces de superar el requisito de flecha, obteniéndose valores de desplazamiento que, en el caso de las tablas de espesor 22 mm, casi duplican los máximos permitidos. Los ensayos realizados sobre sistemas con tablas de espesor 27 mm superan los requisitos para carga estática de la norma EN 13374, pero el desplazamiento obtenido en el ensayo de flecha queda muy cerca del valor de flecha admisible permitido por la norma.

Estos resultados permiten afirmar que el ensayo bajo carga estática definido por la norma EN 13374 es más exigente que el impacto con una energía de 180 J, cuando los sistemas están formados por barandillas de sección tubular de acero o de madera apoyadas en postes metálicos con separación entre ejes de 2400 mm.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos sobre SPPB con barandillas de acero y de madera muestran que los sistemas son capaces de retener el saco esferocónico, definido por la norma EN 596, cuando impacta con una energía de 180 J, pero en algunos casos no superan los requisitos de carga estática establecidos por la norma UNE-EN 13374 para ser evaluados como clase A. De esto se desprende que para los sistemas estudiados, la evaluación estática de la norma UNE-EN 13374 es más exigente que el impacto con energía 180 J.

Referencias

- [1] AENOR-CEN. "UNE-EN 13374: Sistemas provisionales de protección de borde. Especificaciones del producto, métodos de ensayo". *Asociación Española de Normalización* (AENOR), 2004.
- [2] ASTM E 985-87. "Standard Specification for Permanent Metal Railing Systems and Rail for Buildings". *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, PA, 1987.
- [3] eLCOSH. "Guiones orientadores para la protección anticaída de alturas". *Biblioteca Electrónica de Salud y Seguridad Ocupacional en la Construcción*. Disponible en:

<http://www.cdc.gov/elcosh/docs/d0100/d000052/d000052-s.html> [Consulta: 10 marzo 2008].

- [4] OPPBTP. "Mémo-pratique B1 F 01 93. Protections Collectives pour empêcher les chutes d'hauteur dans le bâtiment et les travaux publics". *Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics*. France, 1993.
- [5] OSHA. "Part 1926 Subpart M CFR 1926.502 Fall protection Systems criteria and practices". *Occupational Safety & Health Administration*. US Department of Labor, Washington, D.C, 1998.
- [6] "Québec Safety Code for the Construction Industry. S-2.1, r.6, 2001". Les Publications du Québec, Gouvernement du Québec, Québec, 2001.
- [7] Australian Standard "Fixed platforms, walkways, stairways and ladders - Design, construction and installation". Standards Association of Australia, 1992.
- [8] "Pr NF P 93-355. (2009). Equipements de chantier. Protection périphérique temporaire pour travaux d'étanchéité en toiture. Spécification du produit, méthode d'essai Protection temporaire". Avant-projet de norme soumis à enquête probatoire jusqu'au : 5 décembre 2009. AFNOR. Normalisation.
- [9] AENOR-CEN. "UNE-EN 56544: Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas". *Asociación Española de Normalización (AENOR)*, 2003.
- [10] EN 596: 1995. Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Ensayo de choque por cuerpo blando sobre entramados de madera. Comité Europeo de Normalización (CEN), 1995.