

COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS PROVISIONALES DE PROTECCIÓN DE BORDE SOMETIDOS A CARGAS ESTÁTICAS

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

Alfonso COBO ESCAMILLA

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

RESUMEN

En este trabajo se compara el comportamiento frente a cargas estáticas de sistemas provisionales de protección de borde (SPPB) fabricados con postes de tubo de acero y barandillas de dos tipos: de tubo acero y de tablas de madera de pino silvestre. Se han evaluado según la norma UNE-EN 13374 “Sistemas Provisionales de Protección de Borde. Especificaciones del producto. Métodos de ensayo” para sistemas clase A, obteniendo los diagramas carga-desplazamiento en los ensayos de flecha y de resistencia. Los resultados muestran que una parte importante de los SPPB, utilizados en las obras de construcción, no son capaces de superar los requisitos de la norma UNE-EN 13374 cuando se evalúan experimentalmente. Asimismo, para una luz entre postes de 2400 mm, los requisitos de flecha indicados por la norma son más exigentes que los requisitos de resistencia para los SPPB ensayados.

PALABRAS CLAVE: seguridad, barandillas, carga estática, protección colectiva, caída en altura

1. Introducción

Las estadísticas demuestran que los fallos debidos a caídas en altura son una de las causas principales de los accidentes graves, muy graves y mortales producidos en el sector de la construcción [1,2,3]. El empleo de sistemas provisionales de protección de borde (SPPB) es una medida eficaz para prevenir las caídas en altura. Esto se debe a que estos sistemas impiden la caída en vez de limitarla y reducir los daños después de la caída del trabajador, como sucede con otro tipo de protecciones colectivas como por ejemplo en el caso de las redes sobre pescantes (tipo horca).

En este trabajo se compara el comportamiento frente a cargas estáticas de SPPB fabricados con postes de tubo de acero y barandillas de dos tipos: de tubo circular de acero y de tablas de madera de pino silvestre. La evaluación se ha realizado siguiendo las prescripciones de la norma UNE-EN 13374 “Sistemas Provisionales de Protección de Borde. Especificaciones del producto. Métodos de ensayo” [4], para sistemas clase A.

Los sistemas se han anclado a una viga de hormigón y se han sometido a las acciones indicadas por la norma UNE-EN 13374, obteniendo los correspondientes diagramas carga-desplazamiento en los ensayos de flecha y de resistencia.

Los resultados muestran que una parte importante de los SPPB utilizados en la práctica, en las obras de construcción, no son capaces de superar los requisitos indicados por la norma UNE-EN 13374 cuando se evalúan experimentalmente. Asimismo, para una luz entre postes de 2400 mm, los requisitos de flecha indicados por la norma son más exigentes que los requisitos de resistencia para SPPB con barandillas de acero de sección tubular circular [5] o barandillas de tablas de madera de pino silvestre [6].

2. 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 $F_H = 0,30 \cdot 1,5 \cdot 1,1 = 0,5kN$ mientras que en el caso de elementos de madera, la carga a emplear es $F_H = 0,30 \cdot 1,5 \cdot 1,3 = 0,6kN$

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

Para la comprobación a carga accidental, se indica que las barandillas deben resistir una carga puntual gravitatoria $F_D = 1,25$ 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.

3. Evaluación como SPPB clase A fabricados con tubo de acero

3.1. Elementos ensayados

Se han analizado tres SPPB como clase A 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. En todos los casos se ha empleado como único material el acero. También en los tres casos el rodapié ha sido idéntico, telescópico y fabricado con chapa de acero conformado en frío. Las barandillas principal e intermedia y el poste se han resuelto con secciones tubulares de acero S235. Las orejetas de los postes son de acero S275.

	Sistema 1 (S1)	Sistema 2 (S2)	Sistema 3 (S3)
Barandillas	○ 25 · 1,5 mm	○ 40 · 1,5 mm	○ 40 · 2 mm
Postes verticales	○ 40 · 1,5 mm	□ 35 · 1,5 mm	○ 40 · 2 mm
Rodapié	telescópico, fabricado en chapa metálica		

Tabla 1. Características geométricas de las secciones de los tres sistemas ensayados

En la Tabla 1 se detallan las características geométricas de las secciones empleadas en los tres sistemas.

Los tres sistemas se han anclado a una viga de hormigón armado en la que se han embebido cartuchos de PVC preparados para alojar tanto los postes de sección cuadrada de 35 mm de lado, como los postes de sección circular de 40 mm de diámetro.

En la Figura 1 se muestra la disposición y las características geométricas de uno de los sistemas ensayados.

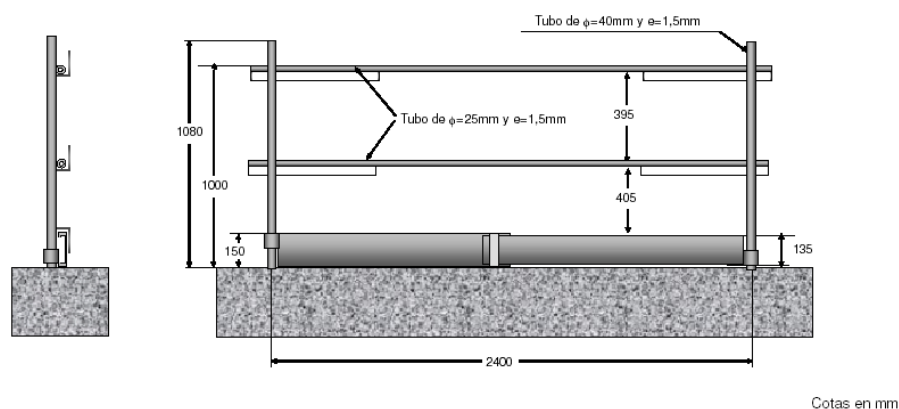


Figura 1. Disposición de elementos del SPPB 1 de acero

3.2. Resultados obtenidos

ELEMENTO	SISTEMA	FLECHA		RESISTENCIA			
		F_{T1} (kN)	δ (mm)	F_{H1} (kN)	R_u (kN)	δ_{\max} (mm)	δ_{res} (mm)
Barandilla principal	S1	0,30	66,67	0,50	0,57	138,24	30,27
	S2	0,30	28,87	0,50	1,34	46,69	3,17
	S3	0,30	21,66	0,50	1,94	37,20	1,20
Barandilla intermedia	S1	0,30	56,67	0,50	-	112,39	17,67
	S3	0,30	14,56	0,50	-	23,62	0,31
Poste	S1	0,30	20,98	0,50	1,08	28,62	1,60
	S2	0,30	19,48	0,50	0,82	34,12	6,25
	S3	0,30	14,97	0,50	1,41	23,15	1,32
Rodapié	S1	0,20	13,43	0,35	0,63	30,18	2,25

F_{T1} : Carga aplicada en la comprobación de flecha.

δ : Desplazamiento del sistema.

F_{H1} : Carga aplicada en la comprobación de resistencia.

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

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de flecha y resistencia sobre los 3 sistemas estudiados cuando las cargas se aplican en los puntos más desfavorables del

sistema, es decir, en el centro de las barandillas superior e inferior y del rodapié y en el extremo superior del poste.

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

Los resultados del ensayo de resistencia se adjuntan en las Figuras 2 y 3, cuando la carga se aplica sobre el punto central de la barandilla principal y sobre el extremo volado del poste, respectivamente.

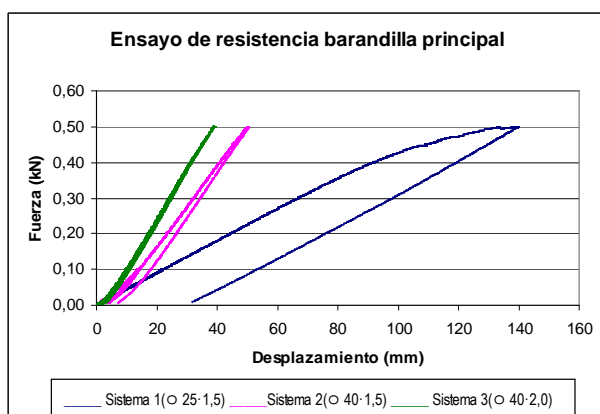


Figura 2. Ensayo de resistencia. Carga aplicada en la sección central de la barandilla principal

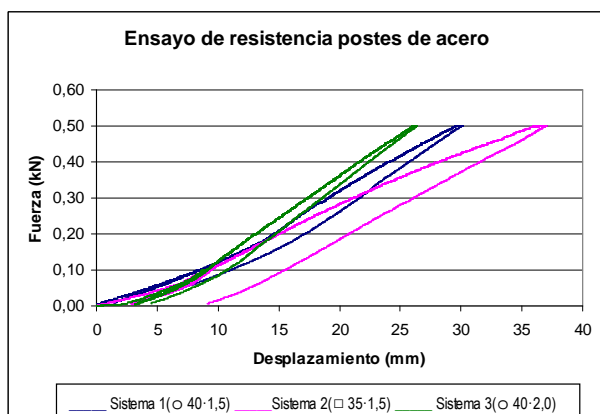


Figura 3. Ensayo de resistencia. Carga aplicada en la sección superior del poste

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

3.3. Análisis de los resultados obtenidos

Los resultados indicados en la Tabla 2 muestran que únicamente el sistema 3 es capaz de superar los requisitos indicados por la norma UNE-EN 13374 para su evaluación experimental. El sistema 1, utilizado de forma habitual en obras, no supera los requisitos de flecha ni de resistencia. El sistema 2, que se utiliza en obras de forma excepcional, no supera el ensayo de resistencia. Únicamente el sistema 1 no supera el ensayo de Carga Accidental.

El sistema 1 no cumple el requisito de flecha. El mayor nivel de desplazamiento se obtiene cuando la carga se aplica en el centro de la barandilla principal. Cuando se aplica una fuerza de 0,30 kN en el punto central de la barandilla principal, se obtiene un movimiento superior al límite establecido por la norma: 66,67 mm frente a 55 mm (Tabla 2).

El movimiento del poste cuando se aplica la carga sobre la barandilla, se puede obtener en la Figura 3, donde para una carga de 0,15 kN, se obtiene un movimiento de aproximadamente 13,07 mm. De modo que la barandilla experimenta una flecha de $66,77 - 13,07 = 53,60$ mm, muy cercano a 55 mm. Esto quiere decir que incluso siendo el poste infinitamente rígido (supuesto imposible), la barandilla por sí sola experimenta un movimiento igual al máximo admitido para el sistema, invalidando esta barandilla para cualquier SPPB con una luz de 2400 mm. Los resultados del ensayo de flecha sobre la barandilla intermedia (Tabla 2) confirman lo anterior.

Por otra parte, el poste experimenta un movimiento de 20,98 mm (Tabla 2) al aplicar la totalidad de la carga sobre él, lo que indica que con una barandilla lo suficientemente rígida, podría superar el ensayo de flecha. En concreto y para superar este ensayo, la barandilla podría desplazarse $55,00 - 13,07 = 41,93$ mm.

El rodapié, con un movimiento de 13,43 mm, cumple el requisito de flecha (Tabla 2).

Al aumentar la rigidez de la barandilla, el sistema 2 es capaz de cumplir el requisito de flecha. En la tabla 2 se puede comprobar que la flecha del sistema al aplicar la carga en el centro de la barandilla principal es inferior al límite establecido por la norma (28,87 mm frente a 55 mm). Ocurre lo mismo en el sistema 3 cuya flecha máxima del sistema (21,66 mm) es todavía inferior a la del sistema 2.

La flecha del poste del sistema 2 se mantiene en valores similares a los del sistema 1.

El aumento de la rigidez de las secciones de barandilla y poste han dado como resultado movimientos significativamente menores en el sistema 3.

Las gráficas de la Figura 3 muestran en los tres postes un comportamiento inicial anómalo, consecuencia de las deformaciones provocadas en el cartucho de plástico al aplicar la carga, lo que conduce a gráficas no lineales y con rigidización bajo carga. Superada aproximadamente la mitad de la carga de ensayo, el comportamiento es lineal. La descarga se produce de forma elástica, siguiendo muy aproximadamente la curva correspondiente a la carga. En cualquiera de los postes se obtiene un movimiento inferior al límite permitido por la norma.

En referencia a la respuesta mecánica del sistema, obtenida en las pruebas realizadas para comprobar los requisitos de resistencia, en todos los casos, para cada uno de los puntos del sistema evaluado, se alcanza la carga máxima de ensayo especificada sin que se aprecien desplazamientos remanentes.

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).

El comportamiento de los sistemas 2 y 3 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 2).

En la gráfica carga-desplazamiento correspondiente al poste del sistema 1 (Figura 3), de nuevo se vuelve a apreciar un comportamiento anómalo según aumenta la carga, con un incremento de la rigidez del sistema, motivado por las deformaciones entre el cartucho de plástico embebido en la viga y el poste metálico. Cuando finalizan esas deformaciones (aproximadamente para 0,20 kN), el comportamiento corresponde a la rigidez del poste. Se alcanza la máxima carga de ensayo, produciéndose la descarga de forma similar a la carga, lo que significa que las deformaciones producidas en el cartucho de plástico se recuperan y que el comportamiento del poste es elástico. El poste supera el ensayo de resistencia.

Cuando la carga se aplica sobre el poste del sistema 2, a partir de aproximadamente 0,32 kN (Figura 3), se pierde la linealidad y aunque el poste es capaz de resistir la carga máxima de ensayo sin rotura y la carga última es superior al valor especificado, la deformación remanente supera al 10% de la instantánea y, por tanto, el sistema debe considerarse como no válido (Tabla 2).

En cuanto al poste del sistema 3, se comprueba que de nuevo el comportamiento es elástico y se vuelven a superar los requisitos de la norma (Figura 3).

En el caso del rodapié, se superan los ensayos de flecha y de resistencia (Tabla 2).

4. Evaluación como SPPB clase A fabricados con postes de acero y barandillas de madera

4.1. Elementos ensayados

Se han ensayado 3 SPPB clase A, de espesor 22 mm, conforme a la norma UNE-EN 13374. De los 3 sistemas, uno corresponde a madera C 27, otro a madera C 18 y otro a rechazo (REC).

4.2. Resultados obtenidos

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos para los diferentes puntos de los sistemas ensayados en el ensayo de flecha:

		F_{T1} (kN)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)
Barandilla principal	C27 (22)	0,30	2,23	83,05	80,82
	C18 (22)	0,30	2,68	63,29	60,61
	REC (22)	0,30	3,64	92,23	88,59
Barandilla intermedia	C27 (22)	0,30	1,52	54,28	52,76
	C 18 (22)	0,30	4,20	64,92	60,72
	REC (22)	0,30	1,83	67,20	65,37
Rodapié	C27 (22)	0,20	11,90	39,76	27,86
	C18 (22)	0,20	3,59	43,74	40,15
	REC (22)	0,20	3,94	49,04	45,10

F_{T1} : Carga aplicada en la comprobación de flecha.

δ_1 : Flecha de referencia.

δ_2 : Máxima flecha alcanzada durante el ensayo.

$\delta_{m\acute{a}x}$: Flecha del sistema.

Tabla 3. Resultados de desplazamiento para los sistemas de espesor 22 mm

En la Tabla 4 se resumen los resultados del ensayo de resistencia obtenidos en los sistemas ensayados:

		F_{H1} (kN)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	δ_{res} (mm)
Barandilla principal	C27 (22)	0,60	-	-	-	-
	C18 (22)	0,60	1,39	121,70	120,31	5,00
	REC (22)	0,60	3,35	181,66	178,31	-
Barandilla intermedia	C27 (22)	0,60	2,25	110,56	108,31	5,93
	C18 (22)	0,60	3,14	128,00	124,86	9,39
	REC (22)	0,60	3,26	139,57	136,31	9,20
Rodapié	C27 (22)	0,40	24,32	83,87	59,55	-
	C18 (22)	0,40	3,97	88,99	85,02	6,75
	REC (22)	0,40	2,15	99,06	96,91	5,87

F_{H1} : Carga aplicada en la comprobación de resistencia.

δ_1 : Flecha de referencia.

δ_2 : Máxima flecha alcanzada durante el ensayo.

$\delta_{m\acute{a}x}$: Flecha del sistema.

δ_{res} : Desplazamiento residual.

Tabla 4. Resultados de resistencia para los sistemas de espesor 22 mm

4.3. Análisis de los resultados obtenidos

En la barandilla principal del sistema REC no se pudo obtener la medición total del desplazamiento máximo debido a que el dispositivo de ensayo llegó antes de alcanzar la carga máxima de ensayo de 0,60 kN, al final de su recorrido, tomándose el valor de δ_2 para una carga de 0,59 kN. Por esta razón no se pudo obtener el valor del desplazamiento residual de la barandilla principal.

Se puede comprobar en la Figura 4 que cuando se someten los sistemas con tablas de madera de espesor 22 mm al ensayo de flecha, el comportamiento de los tres sistemas es muy lineal y prácticamente elástico, no quedando apenas flecha residual. El sistema con la tabla REC resulta menos rígido que el resto, demostrando la escasa validez de la clasificación comercial a efectos de comportamiento estructural. Las flechas máximas superan en los tres casos el valor de 55 mm, no superando por tanto el ensayo prescrito en la norma UNE-EN 13374.

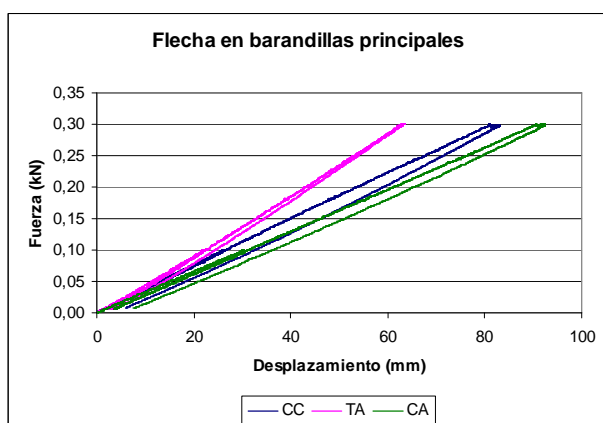


Figura 4. Diagrama carga desplazamiento en el ensayo de flecha de barandillas principales de tablas de 22 mm de espesor.

Cuando la carga se aplica en el centro de la barandilla intermedia, el comportamiento estructural es muy similar al que se produce cuando se carga sobre la barandilla principal. En este caso se miden menores desplazamientos debido a que el movimiento del poste es menor. Únicamente el sistema montado con la tabla C27 es capaz de superar el ensayo. La rigidez de las tablas C18 y REC es menor y la flecha de estos sistemas supera el valor de la flecha admisible (Tabla 3).

Las tres tablas usadas como rodapié experimentan una flecha menor a la admisible, superando el ensayo (Tabla 3).

Debido a los grandes desplazamientos experimentados por los sistemas, cuando se realiza el ensayo de resistencia sobre el punto central de la barandilla superior, únicamente se puede completar el ensayo en la tabla TA, en las tablas CC y CA, antes de llegar a la carga de 0.60 kN, el desplazamiento experimentado por el sistema supera al máximo recorrido del gato. En las gráficas de las tablas TA y CA puede comprobarse que el comportamiento es prácticamente lineal y en la gráfica de la tabla TA se puede apreciar que también es muy elástico, sin prácticamente flecha residual (Figura 5).

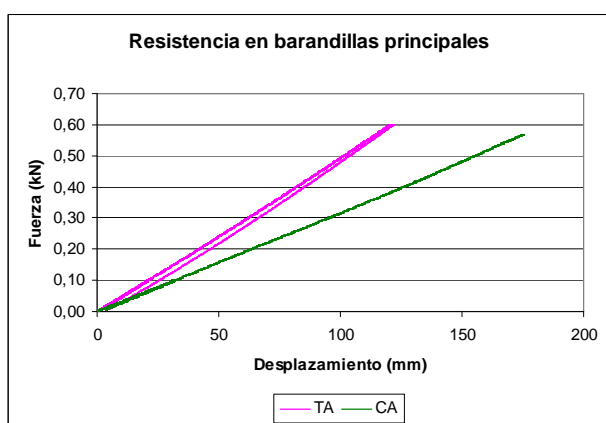


Figura 5. Diagrama carga desplazamiento en el ensayo de resistencia de barandillas principales de tablas de 22 mm de espesor.

Los resultados obtenidos sobre los rodapiés permiten afirmar que los tres sistemas alcanzan la carga del ensayo con una flecha residual muy reducida.

La comprobación de resistencia última no ha sido posible realizarla en el pódico de ensayos prácticamente para ningún elemento, debido al problema antes mencionado de los enormes desplazamientos experimentados por los sistemas, incompatibles con las posibilidades de los dispositivos. Los ensayos se han realizado en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la EUATM, comprobando que superaban en todos los casos el ensayo de resistencia, alcanzando la carga de ensayo sin plastificaciones ni roturas, con una flecha residual inferior al 10% de la flecha máxima y resistiendo una carga un 20 % superior a la del ensayo.

Los resultados obtenidos sobre sistemas clase A fabricados con tablas de madera de espesor 22 mm permiten decir que:

- Para cualquier calidad de la madera las tablas pueden colocarse como rodapiés superando todos los ensayos permitidos por la norma UNE-EN 13374.
- Para cualquier calidad de la madera las tablas no pueden colocarse como barandilla principal.

- Como barandilla intermedia, únicamente la tabla CC ha sido capaz de superar los ensayos indicados por la norma, quedando muy cerca del límite establecido para la comprobación de flecha. Las calidades TA y CA no son capaces de superar la norma.
- Todas las tablas ensayadas han sido capaces de superar el ensayo de resistencia. El ensayo de flecha con una luz de 2400 mm entre postes ha sido más restrictivo. Para poder usar tablas de este espesor como barandillas, sería necesario disminuir la distancia entre los postes.

Adicionalmente se han realizado los mismos ensayos utilizando tablas de espesores 27, 30 y 40 mm. Los resultados permiten afirmar que únicamente las tablas de espesores 30 y 40 mm, en cualquier calidad han sido capaces de superar la evaluación de cargas estáticas de la norma UNE-EN 13374. Las tablas de espesor 27 mm no han superado el ensayo de flecha ni tan siquiera cuando su clasificación resistente ha sido C27.

5. Conclusiones

La mayoría de los SPPB utilizados habitualmente en obras no cumplen los requisitos exigidos por la norma UNE-EN 13374 cuando se evalúan experimentalmente.

La barandilla formada por tubo 25·1,5 no es capaz de superar los requisitos de la norma experimentalmente.

El poste de sección tubular cuadrada 35·1,5 no es capaz de superar el ensayo de resistencia de la norma UNE-EN 13374.

El sistema formado por tubo de acero 40·2 para el poste y la barandilla es capaz de superar satisfactoriamente las exigencias de la norma UNE-EN 13374 por vía experimental.

Sistemas formados por barandilla y poste de sección tubular 40·1,5 también serían capaces de superar los requisitos de la norma. El poste 40·1,5 es capaz de superar los requisitos de la norma experimentalmente.

Con luces entre postes de 2400 mm, la tabla de madera de pino silvestre de 150 mm de ancho y espesor 22 no es capaz de superar la exigencia de la norma UNE-EN 13374 usada como barandilla, siendo necesario recurrir a espesores de 30 mm.

La tabla de 150 x 22 mm de cualquier calidad es capaz de superar la exigencia de la norma usada como rodapié.

En las tablas de 22 la condición de flecha es más restrictiva que la condición de resistencia para luces entre postes de 2400 mm.

6. Referencias

- [1] OSHA. "Analysis of Construction Fatalities". The OSHA Data Base 1985-1989. U.S. Department of Labor, Washington, DC, 1990.
- [2] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. VI Encuesta Nacional de condiciones de trabajo. <http://www.mtas.es/insht/statistics/viencuesta.pdf>. 2008. Consulta 02/06/2008.
- [3] SESS. Service d'expertise et soutien statistique, IRSST-Sources: Base de données de l'INFOCENTRE de la CSST, mise à jour au 1 mai 1999, 1999.
- [4] AENOR-CEN. "UNE-EN 13374: Sistemas provisionales de protección de borde. Especificaciones del producto, métodos de ensayo". *Asociación Española de Normalización*

(AENOR), 2004.

- [5] GONZÁLEZ, M.N., COBO, A., FUENTE, J.V., BRESÓ, S. y LOZANO, C. “Comportamiento bajo cargas estáticas de sistemas provisionales de protección de borde realizados con elementos de acero”, *Informes de la Construcción*, Vol. 63, No. 521, 2011, pp. 57-67.
- [6] GONZÁLEZ, M.N. “Consideraciones respecto de los sistemas provisionales de protección de borde”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 2010.