

Estimación de la aceleración producida sobre cuerpos que impactan sobre barandillas de seguridad

RESUMEN / ABSTRACT

Las normas que regulan los sistemas provisionales de protección de borde especifican las cargas que deben resistir los sistemas y los máximos desplazamientos que pueden experimentar. Sin embargo, no se ocupan del posible efecto sobre el trabajador cuando impacta sobre uno de estos sistemas. Habitualmente se considera que aceleraciones superiores a 8g o 10g suponen lesiones peligrosas para el cuerpo humano. En este trabajo se ha hecho impactar elementos que simulan cuerpos humanos contra barandillas de seguridad y se han medido las aceleraciones producidas en éstos cuando varía la rigidez de los sistemas sobre los que se impacta y la energía del impacto. Los resultados permiten determinar qué sistemas y qué energías de impacto son seguras para los trabajadores.

PALABRAS CLAVE / KEYWORDS

Construcción; Seguridad; Barandillas; Impacto; Aceleración; ORP Conference

AUTORES / AUTHORS

Nuria Llauradó Pérez

Universidad Politécnica de Madrid/Escuela Técnica Superior de Edificación
nuria.laurado@upm.es

María de las Nieves González García

Universidad Politécnica de Madrid/Escuela Técnica Superior de Edificación
mariadelasnieves.gonzalez@upm.es

Ángel Castaño Cabañas

Universidad Politécnica de Madrid/Escuela Técnica Superior de Edificación
angel.castano@upm.es

Alfonso Cobo Escamilla

Universidad Politécnica de Madrid/Escuela Técnica Superior de Edificación
alfonso.cobo@upm.es

Introducción

Los accidentes en construcción debidos a las caídas en altura suponen un alto porcentaje del total de los ocurridos en el sector. Internacionalmente, las normas y reglamentos consultados limitan la altura de caída con el fin de prevenir lesiones y daños a los trabajadores [1] [2] [3] [4] [5].

La estrategia preventiva frente al riesgo de caída en altura establece el siguiente orden de actuación: en primer lugar eliminar los riesgos en el origen; si no es posible, la altura de caída debe ser limitada mediante protecciones colectivas; en último lugar hay que dotar a los trabajadores de equipos de protección individual frente a la caída [6].

La eliminación de los riesgos en el origen se puede conseguir planificando la ejecución de la obra, ejecutando la obra con medidas de protección integradas en la propia estructura o instalando protecciones colectivas que impidan la caída.

Los sistemas que limitan la altura de caída suelen estar formados por redes que transmiten la energía del impacto a la estructura en construcción, a través de elementos más rígidos, generalmente metálicos. En Europa gran parte de estos sistemas están normalizados [7] [8] [9]. Algunas tipologías como las redes sobre pescante, se vienen empleando en España desde hace decenios. Sin embargo, aspectos esenciales acerca de su comportamiento, como puede ser la máxima aceleración experimentada por el cuerpo después del impacto sobre la red, no se han conocido hasta la realización de trabajos recientes [10] [11].

La utilización de equipos de protección individual supone generalmente la realización de anclajes a la estructura. Un punto crítico de estos sistemas es la resistencia al arrancamiento del anclaje en el punto donde se amarra [12] [13] [14]. La influencia del peso del trabajador [15] y de las condiciones ambientales sobre el comportamiento de los absorbedores de energía son cuestiones que condicionan su comportamiento [16].

La protección frente a caída en altura mediante sistemas provisionales de protección de borde (SPPB) constituye un sistema eficaz porque elimina el riesgo en el origen, impidiendo la caída y evitando por tanto la posibilidad de sufrir lesiones cuando un trabajador impacta contra otro sistema que solo limita la altura de caída. Estudios previos han mostrado que el empleo apropiado de SPPB puede prevenir una buena cantidad de accidentes y de caídas desde altura [17] [18] [19] [20]. Otros estudios han evaluado el comportamiento de SPPB fabricados en madera frente a cargas estáticas y/o de impacto [21] [22] [23].

Los documentos consultados que regulan los SPPB [24] [25] [26] [27] [28] [4] [5] exigen la superación, por parte de éstos, de requisitos de tipo geométrico y de tipo mecánico. Los requisitos de tipo geométrico establecen las dimensiones de los SPPB para que el trabajador no rebase el sistema y caiga, o los objetos no pasen desde el forjado al vacío. Los requisitos de tipo mecánico exigen una determinada resistencia al sistema y limitan sus desplazamientos frente a unas cargas dadas. El objetivo de establecer una limitación de la flecha se basa en impedir que el trabajador pueda bascular sobre el SPPB y caer al vacío [22].

Una de las misiones fundamentales de un SPPB es detener a un trabajador que caminando por la obra tropieza, cae y golpea contra el SPPB. Esta acción es de naturaleza dinámica y se aplica en forma de impacto. También existen documentos que para la comprobación de SPPB, especifican cargas dinámicas, modelizando el choque de un trabajador contra un SPPB mediante un impacto con una determinada energía.

Cuando un el SPPB cumple la misión para la que ha sido diseñado, el accidentado no cae al vacío pero, la energía acumulada hasta colisionar con el SPPB tiene que ser absorbida por los dos elementos implicados en el impacto. Las tablas de madera, la configuración del sistema y el resto de elementos que componen el sistema (en especial los anclajes), tienen un comportamiento elástico que será capaz de absorber parte de ella, el resto tiene que ser absorbido por el cuerpo humano y dependiendo de su magnitud, puede llegar a límites intolerables para ser disipadas sin provocar lesiones.

Los límites máximos de energía que pueden ser tolerados por el cuerpo humano dependen, en gran medida, de las condiciones físicas del individuo, de la zona corporal afectada, de la superficie de contacto que recibe el impacto y de otros muchos factores, por tanto, establecer un valor máximo tolerable resulta muy difícil. En este sentido, se han realizado muchas investigaciones, la mayoría en el ámbito de la seguridad vial, y se ha alcanzado un consenso que oscila entre una horquilla de valores máximos de 160 y 180J.

El método de ensayo del Institut National de Recherche et de Sécurité [22] [29] indica un impacto de un cuerpo de 80 kg de peso que golpea con una velocidad de 2m/s ($E = 160J$). Otros documentos [30] especifican un impacto con un peso de 90 kg y la velocidad anterior ($E = 180J$).

Metodología

En el sector de la construcción se utilizan de manera muy generalizada, piezas de madera aserrada de pequeña escuadría como elementos de medios auxiliares y de protecciones colectivas. Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, resulta necesario determinar el comportamiento de estos elementos frente al impacto, para poder predecir los eventuales daños ocasionados a un operario en caso de accidente.

La evaluación de estos elementos a impacto se realiza en muchas ocasiones, de una manera sencilla, mediante el coeficiente de amplificación dinámica. Este procedimiento ha dado buenos resultados en el análisis de pescantes de acero que sostienen redes de seguridad o en barandillas de acero, situaciones en las que se han contrastado los resultados analíticos con los obtenidos experimentalmente. Sin embargo la validez del procedimiento no se ha contrastado en elementos de madera de pequeña escuadría, muy empleados en el sector de la construcción, por ejemplo en barandillas de seguridad para sistemas de protección de borde de forjado, andamios o plataformas de descarga.

En este trabajo se han ensayado a flexión, bajo cargas estáticas y de impacto, tablas de madera de distintos espesores y calidades. Las tablas se han instrumentado mediante galgas extensométricas para medir las deformaciones y transductores para obtener el valor de los desplazamientos. La comparación entre los resultados obtenidos en los ensayos estáticos frente a los dinámicos nos permitirá evaluar la validez de la Hipótesis de Rayleigh empleada en el cálculo dinámico clásico según la cual, la deformada estática y dinámica son semejantes. Además los resultados permiten comparar las aceleraciones producidas con las máximas aceleraciones que puede asumir el cuerpo humano sin sufrir lesiones de tipo irreversible.

Materiales, técnicas empleadas y trabajo experimental realizado

Se ha trabajado sobre tablas de madera de pino silvestre del Aserradero de El Espinar (Segovia-España). Las tablas ensayadas son de la misma calidad y geometría que las habitualmente suministradas por el aserradero para trabajos en el sector de la construcción como elementos para formar parte de medios auxiliares o protecciones colectivas. Las tablas se han escogido de distintos espesores y calidades, para comprobar la posible influencia de estas variables en los resultados obtenidos.

Todas las tablas se han ensayado previamente a flexión, como biapoyadas, con una carga puntual en el centro y una luz entre apoyos de 2400 mm.

Se han colocado galgas extensométricas en la parte superior e inferior de la tabla, en secciones distantes, respectivamente, 400 mm, 800 mm y 1200 mm (sección central) de uno de los apoyos.

Se ha evaluado el momento teórico de rotura utilizando la formulación del Eurocódigo 5. Para ello se ha empleado, como tensión de rotura a flexión de la madera, la proporcionada por la clase resistente, medida en la zona del tercio central de la pieza. A partir del momento teórico de rotura, se ha obtenido la carga de rotura y se ha realizado el ensayo bajo cargas estáticas, llegando solo hasta el 60% de la carga de rotura, para evitar plastificaciones o daños locales de las piezas que pudieran influir en su comportamiento ante posteriores ensayos. El ensayo se ha realizado disponiendo las tablas biapoyadas y cargándolas de forma puntual en la sección central hasta 1080N de peso. Durante la realización del ensayo se han registrado las deformaciones en las seis galgas.

A continuación, las tablas biapoyadas se han sometido a impactos de 120J y 180J mediante sacos de pellets de 300N que se han dejado caer desde alturas de 0.40m y 0.60m, respectivamente. Durante el impacto se han registrado las deformaciones y el máximo desplazamiento experimentado en las mismas secciones que en los ensayos estáticos.

Resultados obtenidos

En la Figura 1 se muestran, a modo de ejemplo, las deformaciones experimentadas por una de las tablas ensayadas en las tres secciones instrumentadas. En la parte superior de la figura se indican las deformaciones en la cara superior (U), mientras que en la parte inferior se muestran las de la cara inferior (D). Las secciones a 0.40 m, 0.80 m y 1.20 m del apoyo se han designado como a, b y c, respectivamente. Las deformaciones se producen por aplicación de pesos sucesivos, colocándose en el centro del vano hasta 18 piezas superpuestas, de 6 kg cada una, resultando un total aplicado de 108 kg.

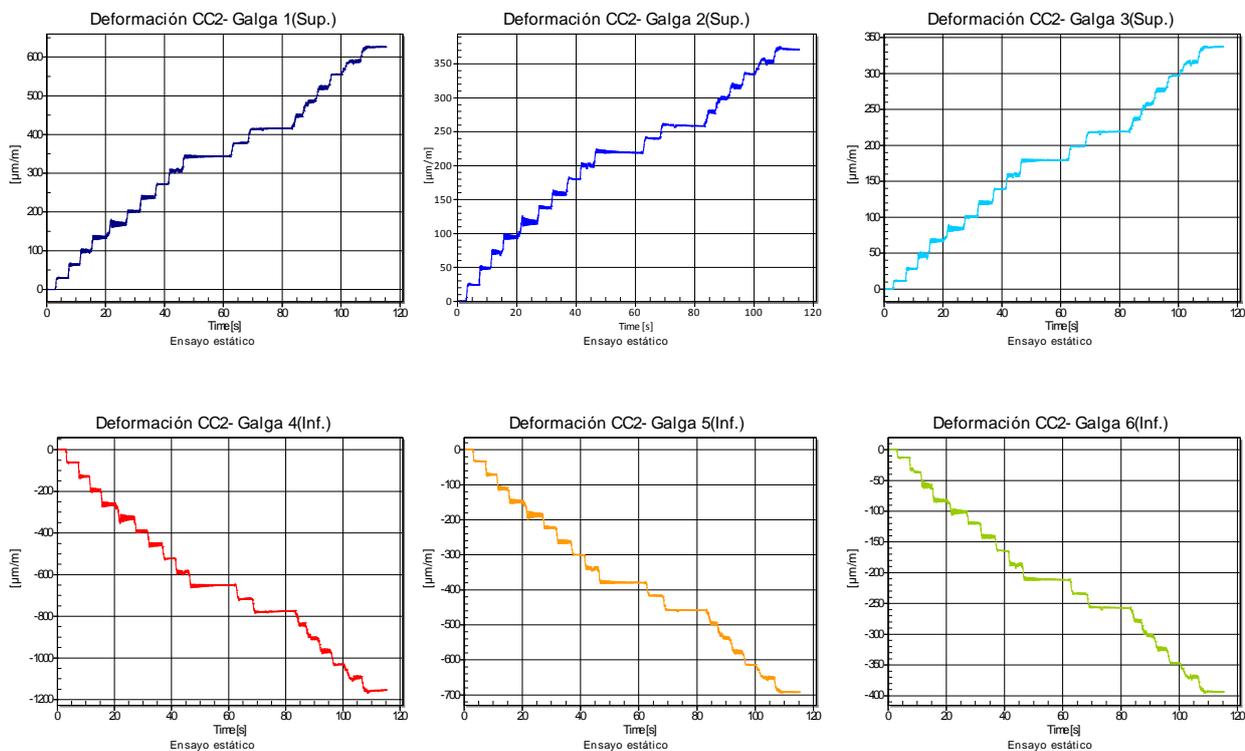


Figura 1. Deformaciones experimentadas durante los ensayos estáticos.

Las Figuras 2 y 3 contienen los datos relativos a las deformaciones experimentadas por una de las tablas bajo los impactos de 120J y 180J, respectivamente. El código de subíndices empleado en las figuras 2 y 3 coincide con el empleado en la figura 1.

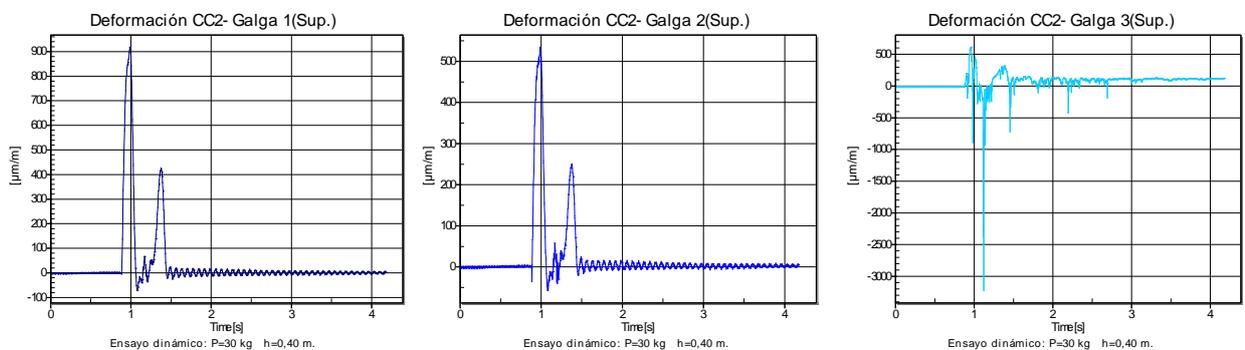




Figura 2. Deformaciones experimentadas durante el ensayo de impacto (120J).

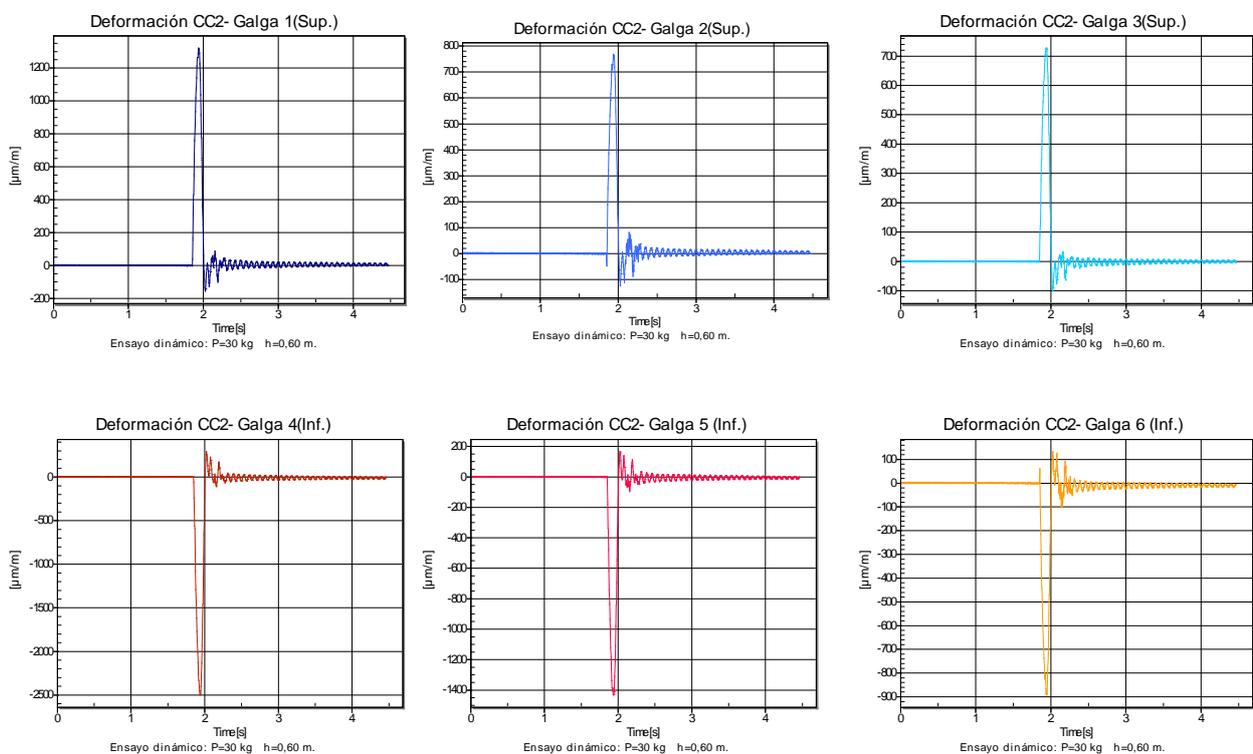


Figura 3. Deformaciones experimentadas durante el ensayo de impacto (180J).

En la Tabla 1 se indican los máximos valores de deformación (microdeformaciones) experimentados en el ensayo estático y en los dos ensayos de impacto en las seis fibras de la tabla ensayada.

Ensayo	Posición	Sección a	Sección b	Sección c
Estático	(U)	630	370	335
1080 N	(D)	1175	695	390
Estático	(U)	170	120	85
1080 N	(D)	360	185	100

Impacto	(U)	920	540	520
120 J	(D)	780	-	615
Impacto	(U)	1250	760	720
180 J	(D)	2500	1420	900

Tabla 1. Máximos valores de deformación (microdeformaciones) durante los ensayos realizados.

Análisis y discusión de los resultados

Los resultados muestran que tanto en los ensayos estáticos como en los ensayos dinámicos, la deformación producida en la fibra inferior es muy superior a la producida en la fibra superior. Esto indica que, manteniendo la hipótesis de secciones planas antes y después de la deformación, la línea neutra se desplaza por encima del centro de gravedad de la sección.

En la tabla 2 se indica la relación entre la deformación de la fibra superior y de la fibra inferior obtenida durante la realización de los ensayos en todas las secciones estudiadas.

<i>ENSAYO</i>	Sección a	Sección b	Sección c
Estático 1080N	1.86	1.87	1.16
Estático 300N	2.11	1.54	1.18
Impacto 120 J	1.93	-	1.18
Impacto 180 J	2.00	1.87	1.25

Tabla 2. Relación entre las deformaciones de las fibras inferior y superior.

Puede comprobarse que existe una buena concordancia entre la relación de las deformaciones obtenidas en régimen dinámico (carga de impacto) y en régimen estático, lo que apunta a que la Hipótesis de Rayleigh, empleada en el cálculo dinámico clásico según la cual la deformada estática y dinámica son semejantes, puede ser empleada para obtener el efecto dinámico de la carga mediante la aplicación del coeficiente de impacto. Si se toma como parámetro para determinar el efecto dinámico de la carga la máxima deformación obtenida en cada ensayo, se obtendrían valores de coeficiente de impacto para las alturas de 60cm y 40cm de 6.9 y 4.9. Analíticamente, los valores obtenidos serían 6.3 y 5.2 lo que demuestra que puede emplearse la teoría clásica de impacto para evaluar barandillas de seguridad realizadas con tablas de madera y sometidas a acciones de impacto.

Las máximas aceleraciones producidas sobre los cuerpos que impactan (que simulan muy aproximadamente la densidad del cuerpo humano) han sido 16g y 12g, valores muy superiores a los admitidos por las recomendaciones internacionales como asumibles por el cuerpo humano sin sufrir lesiones graves.

Conclusiones

Puede emplearse la Hipótesis de Rayleigh para calcular barandillas de seguridad compuestas con tablas de madera en sus elementos horizontales.

No todos los sistemas son válidos como barandillas de seguridad, sería preciso realizar un estudio acerca de las aceleraciones que se producirían en el cuerpo en caso de impactar contra ellos (máximo 180J).

Las normas deberían especificar rigideces máximas de los elementos que reciben los impactos en los casos de accidentes para así limitar los efectos nocivos sobre los trabajadores accidentados.

Referencias bibliográficas

1. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. *VI Encuesta Nacional de condiciones de trabajo*. NIPO: 211-07-057-0.
2. Ministerio de la Presidencia. *Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción*. Boletín Oficial del Estado, 25 de octubre de 1997, nº 256. Anexo IV. *Disposiciones de seguridad y salud que deberán aplicarse a las obras. Parte C. Disposiciones mínimas específicas relativas a puestos de trabajo en las obras en el exterior de los locales. 3. Caídas de altura*.
3. Ministerio de Empleo y Seguridad Social. *V Convenio colectivo del sector de la construcción*. Resolución de 28 de febrero de 2012. Boletín Oficial del Estado, 15 de marzo de 2012, nº 64. Libro II: *Aspectos relativos a la seguridad y salud en el sector de la Construcción. Título IV. Disposiciones mínimas de seguridad y salud aplicables a las obras de construcción*.
4. OSHA. Part 1926 Subpart M CFR 1926.500 - *Fall Protection for the Construction Industry*. Occupational Safety & Health Administration. US Department of Labor, Washington, DC, 1998.
5. *Québec Safety Code for the Construction Industry. S-2.1, r.6, 2001*. Les Publications du Québec, Gouvernement du Québec, Québec, 2001.
6. OPPBTP. Mémo-pratique B1 M 01 94. *Les montants de garde-corps provisoires de chantier*. Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics. Boulogne-Billancourt, France, 1994.
7. Jefatura del Estado: *Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales*. Boletín Oficial del Estado, 10 de noviembre de 1995, nº 269.
8. AENOR-CEN. UNE-EN 1263-1: *Redes de seguridad. Parte 1: Requisitos de seguridad, métodos de ensayo*. Asociación Española de Normalización (AENOR), 2004.
9. AENOR-CEN. UNE-EN 1263-2: *Redes de seguridad. Parte 2: Requisitos de seguridad para la instalación de redes de seguridad*. Asociación Española de Normalización (AENOR), 2004.
10. Irlés, R.; González, A.; Segovia, E.; Maciá, A. *Las redes verticales de seguridad en la construcción de edificios. I*. Informes de la Construcción, Vol. 53, nº 477 (2002), pp. 21-29. doi: 10.3989/ic.2002.v53.i477.
11. Segovia, E.; Irlés, R.; González, A.; Maciá, A.; Pomares, J. *Las redes verticales de seguridad en la construcción de edificios. II*. Informes de la Construcción, Vol. 59, nº 505 (2007), pp. 37-51. doi: 10.3989/ic.2007.v59.i505.
12. García, J.; Irlés, R.; Segovia, E.; Pomares, J. C. *Definición de ensayos a realizar sobre anclajes de seguridad en redes y EPI's*. IV Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural. Valencia. 24 al 27 de noviembre, 2008.
13. AENOR-CEN. UNE-EN 795: *Protección contra caídas de altura. Dispositivos de anclaje. Requisitos y ensayos*. Asociación Española de Normalización (AENOR), 1997.
14. AENOR-CEN. UNE-EN 795/A1: *Protección contra caídas de altura. Dispositivos de anclaje. Requisitos y ensayos*. Asociación Española de Normalización (AENOR), 2001.
15. Goh, Y.M., Love, P.E.D., 2010. *Adequacy of personal fall arrest energy absorbers in relation to heavy workers*. Safety Science 48, 747-754.
16. Baszczyński, K., 2004. *Influence of weather conditions on the performance of energy absorbers and guided type fall arresters on a flexible anchorage line during fall arresting*. Safety Science 42, 519-536.
17. Johnson H., Singh A. *Fall protection analysis for workers on residential roofs*. Journal of Construction Engineering and Management, 1998, vol. 124, nº5, pp. 418-428.
18. Personick M.E. Profiles in safety and health: roofing and sheet metal work. Monthly Labor Review of Bureau of Labor Statistics, 1990, vol. 113, pp. 27-32.
19. Suruda A., Fosbroke D., Braddee R., 1995. *Fatal work-related falls from roofs*. Journal of Safety Research, vol. 26, nº1, pp.1-8.
20. OSHA 2005. U.S. Department of Labor. *Occupational Safety and Health Topics*. Retrieved January.
21. González García, M.N. *Consideraciones respecto a los sistemas provisionales de protección de borde*. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Madrid. 2010.

22. Lan A., Daigle R., 2009. *Development and validation of a method for evaluating temporary wooden guardrails built and installed on construction sites*. Safety Science 47, 215-226.
23. Bobick, T.G., McKenzie Jr, E.A., Kau, T.Y., 2010. *Evaluation of guardrail systems for preventing falls through roof and floor holes*. Journal of Safety Research 41, 203-2011.
24. eLCOSH. *Guiones orientadores para la protección anticaída de alturas*. Biblioteca Electrónica de Salud y Seguridad Ocupacional en la Construcción.
25. OPPBTP. Mémo-pratique B1 F 01 93. *Protections Collectives pour empecher les chutes d'hauteur dans le bâtiment et les travaux publics*. Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics. France, 1993.
26. ASTM E 985-87. *Standard Specification for Permanent Metal Railing Systems and Rail for Buildings*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1987.
27. CEN. EN 13374: *Temporary edge protection system. Product specification, test methods*. European Committee for Standardization (CEN), 2013.
28. Australian Standard *Fixed platforms, walkways, stairways and ladders - Design, construction and installation*. Standards Association of Australia, 1992.
29. Jacmin, M; Mayer, A. *Écran garde-corps- Protection contre les chutes de grande hauteur*
30. AFNOR. Pr NF P 93-355. *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, 2009.