

## ANÁLISIS DE LA FUNCIONALIDAD EN NUDOS DE ANCLAJE PARA LOS SISTEMAS DE ACCESO Y POSICIONAMIENTO MEDIANTE CUERDAS

*P. I. Sáez Menchacatorre<sup>1</sup>, E. A. Carrión Jackson<sup>1</sup>, E. García González<sup>1</sup>, L. Blanco Bartolomé<sup>1</sup>, J. F. Monge Ivars<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Universidad de Alicante, San Vicente Del Raspeig, España

<sup>2</sup> Universidad Miguel Hernández, Elche, España

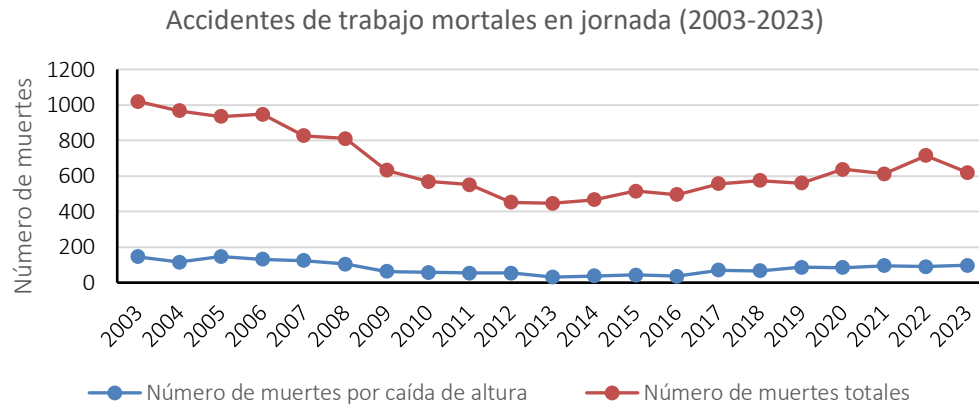
### RESUMEN

El nudo es el único elemento no certificado por los fabricantes en los sistemas de acceso mediante cuerda, desde el principio de los trabajos verticales también ha constituido un elemento principal en las instalaciones de los sistemas de protección anticaídas. Actualmente existen múltiples estudios sobre nudos, ensayos estáticos y dinámicos, tipologías, análisis de las características técnicas de la cuerda y eficiencia del nudo sobre la resistencia de la cuerda. Algunos autores hacen referencia a la importancia de las cargas aplicadas sobre el nudo y a la complejidad de deshacerlos una vez sometidos a esfuerzos, es decir a lo que en esta investigación llamaremos funcionalidad del nudo. Sin embargo, a día de hoy no constan datos fiables que permitan cuantificar hasta qué punto son relevantes esas cargas aplicadas sobre el nudo, y por ende se desconocen cuestiones de seguridad relacionadas con la funcionalidad del mismo. En esta investigación se plantea obtener un mayor número de datos empíricos fiables. Se estudian cinco tipos de nudos de anclaje sobre cuerdas semiestáticas tipo A. La investigación analiza cómo afectan las distintas cargas y tiene por objeto determinar la idoneidad de los nudos a emplear, entendiendo que resultan tanto más seguros, cuanto más fácil resultan de desatar una vez sometidos a esfuerzos. Se realizaron setenta ensayos para cada uno de los cinco tipos de nudos seleccionados y un total de 350 test, se evalúan estadísticamente los parámetros obtenidos cuantificando la eficiencia. Los resultados, en cuanto a la funcionalidad, señalan la idoneidad del nudo tipo ocho. La prevención de accidentes, así como la mejora de la seguridad de los trabajadores se verá beneficiada con el conocimiento más profundo sobre los nudos a utilizar en los trabajos verticales, así como en los sistemas de protección contra caídas.

**PALABRAS CLAVE:** nudos para trabajos verticales, sistemas de acceso y posicionamiento mediante cuerdas, seguridad en el trabajo.

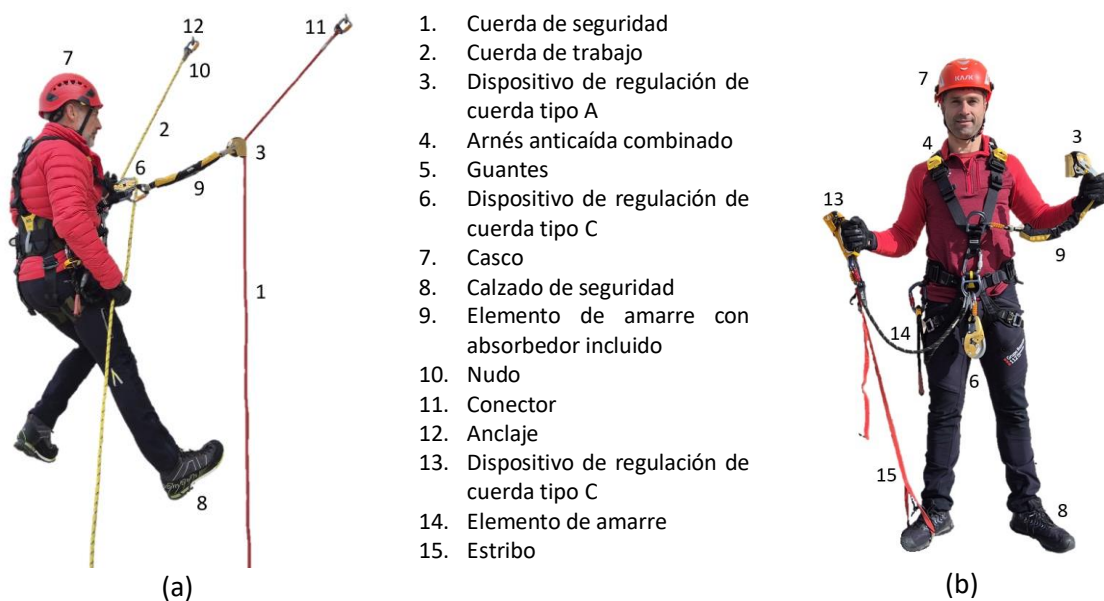
## 1. INTRODUCCIÓN

Las caídas de altura continúan siendo una de las principales causas de mortalidad laboral. En España “Figura 1”, en 2023 se registraron 97 muertes por caída de altura, representando el 15,67 % de los accidentes laborales mortales [1]. Datos similares se observan en Estados Unidos., Australia y Reino Unido, donde las caídas constituyen una de las primeras causas de fallecimiento en el ámbito laboral, especialmente en el sector de la construcción [2] - [6].



**Figura 1.** Número de accidentes mortales en España durante el periodo 2003-2023 (ámbito laboral)

La norma UNE-EN 363 [7] regula los sistemas de protección individual contra caídas (SPICC); dentro de estos, el sistema de acceso mediante cuerda (SAC) es uno de los más complejos, ya que el trabajador se posiciona directamente suspendido mediante cuerdas “Figura 2”. En estos sistemas, los nudos permiten generar terminales de anclaje adecuados cuando no se emplean terminales manufacturados



**Figura 2.** Principales componentes y equipos de protección individual (EPI) de un SAC

Los denominados nudos de cabecera, nudos de carga o también conocidos como nudos de anclaje unen la cuerda con la estructura portante [8] - [10], son el objeto de estudio en la presente investigación. En general, los nudos han sido utilizados en culturas diferentes desde la antigüedad [10], [11]. Ashley realizó un completo estudio donde se catalogó y referenció 3800 nudos diferentes [12]. En las últimas décadas su uso se ha extendido ampliamente al ámbito laboral, especialmente en trabajos singulares de altura dentro de la industria y la construcción [13] - [26].

El nudo es el único elemento del sistema no certificado por fabricante, lo que lo convierte en un posible punto crítico de seguridad. Estudios previos han analizado principalmente la pérdida de resistencia de la cuerda debido al nudo. Sin embargo, la dificultad de desatado tras carga, clave en rescate y autosocorro, carece aún de datos cuantitativos objetivos.

### 1.1. Hipótesis inicial

Diversos autores han señalado que ciertos nudos pueden volverse extremadamente difíciles de desatar tras soportar cargas elevadas. No obstante, dichas afirmaciones son mayoritariamente cualitativas [8], [27] - [33]. En la actualidad, no se dispone de datos empíricos fiables que permitan cuantificar de forma objetiva la influencia de las cargas aplicadas sobre la capacidad de deshacer el nudo, lo que genera un vacío de conocimiento en relación con aspectos clave de la seguridad operativa.

Esta carencia resulta especialmente relevante en contextos de trabajo en altura y sistemas anticaídas, donde la posibilidad de liberar un nudo en un intervalo de tiempo reducido puede condicionar la eficacia de las maniobras de rescate y autosocorro, tal y como exigen los principios preventivos y el marco normativo vigente.

En esta investigación se define la funcionalidad del nudo ( $\varphi$ ) como:

$$\varphi (F) = \frac{t}{F} \quad (1)$$

Donde  $t$  representa el tiempo de desatado en segundos (s), y  $F$  la carga aplicada sobre el nudo en kilonewtons (kN).

La hipótesis de partida establece que todo nudo sometido a carga incrementa su dificultad de desatado en función de la magnitud del esfuerzo aplicado.

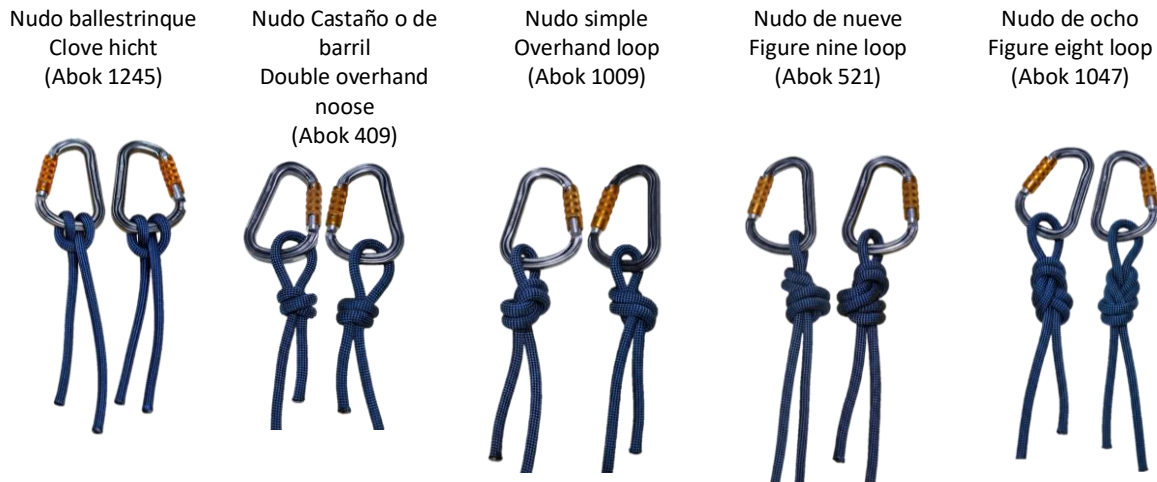
La relevancia práctica es evidente en situaciones de rescate. La permanencia prolongada en suspensión puede provocar síndrome del arnés, con consecuencias potencialmente fatales en pocos minutos [34] y [35]. La normativa europea exige intervención inmediata en caso de accidente [36], lo que refuerza la importancia de la funcionalidad operativa del nudo.

### 1.2. Objetivo

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo obtener datos empíricos cuantificables sobre la funcionalidad de los nudos de anclaje más utilizados en SAC, evaluando: la influencia de la carga aplicada, la influencia del nivel de experiencia del usuario y la interacción entre tipo de nudo y perfil del operador.

## 2. DESARROLLO / METODOLOGÍA

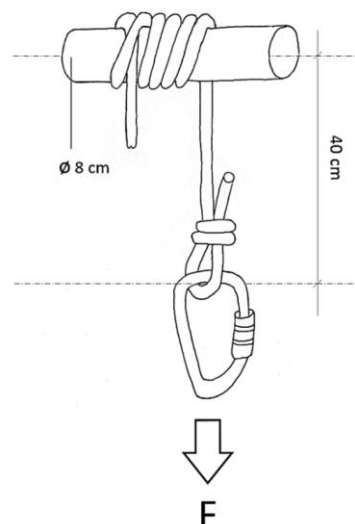
Se realizaron en laboratorio un total de 350 ensayos de carga sobre cinco nudos de anclaje: ballestrinque, castaño o nudo de barril, simple, nudo de nueve y nudo de ocho “Figura 3”.



**Figura 3.** Principales nudos empleados en los SAC

Se confeccionaron probetas utilizando cuerda semiestática de 11 mm de diámetro, modelo Axis del fabricante Petzl, compuesta de poliéster/poliamida y conforme a la norma EN 1891 tipo A [37].

Cada nudo fue sometido a cargas estáticas progresivas de: 1, 2, 3, 4 y 5 kN, aplicadas durante 30 segundos y se realizaron cinco repeticiones por combinación “Figura 4”.



**Figura 4.** Procedimiento experimental, probeta sobre bastidor cilíndrico

Las condiciones de ensayo se realizaron conforme a la norma ISO 139:2005/A1 [38]: temperatura:  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa:  $65\% \pm 4\%$  y acondicionamiento previo de 72 h.

Las variables analizadas fueron el tiempo de ejecución del nudo, el tiempo de desatado, la carga aplicada y el nivel del usuario (medio / avanzado).

Los nudos fueron ensayados aplicando la carga en sentido longitudinal al eje de la cuerda (standard load), confeccionándose con geometría en I (tractora superior), de acuerdo con la configuración habitual empleada en los SAC, y bajo un sentido de torsión dextro-rotatorio [39].

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los ensayos destinados a evaluar la funcionalidad de los nudos, se analizó la dificultad asociada al desatado de los cinco tipos de nudos seleccionados tras haber sido sometidos a distintos niveles de carga. Los resultados evidencian que los distintos nudos no presentan un comportamiento homogéneo frente a la aplicación de carga; no obstante, se observa de forma consistente como, a medida que aumenta la carga aplicada, se incrementa el esfuerzo necesario para proceder a su desatado.

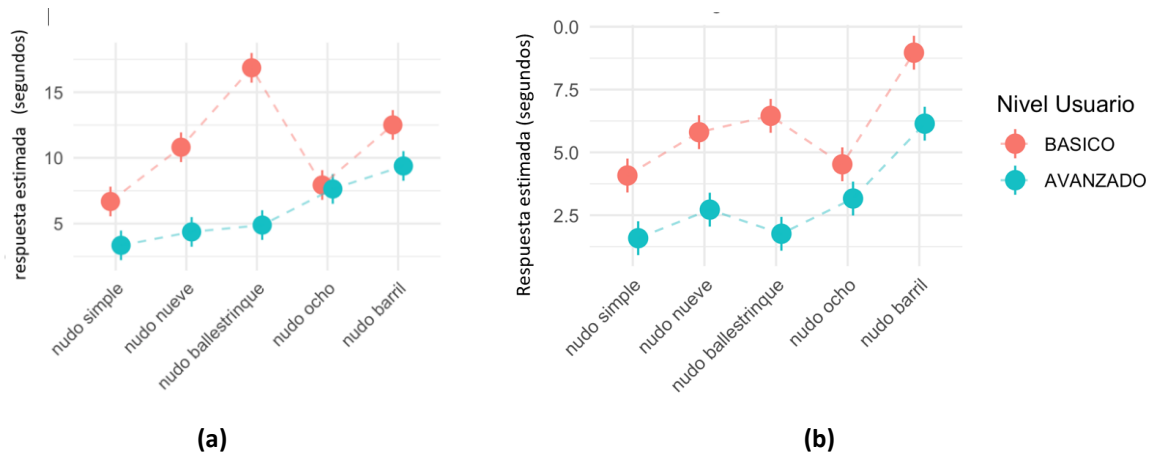
Se establece como valor límite operativo un tiempo máximo de desatado (T límite) de 90 segundos, a partir del cual un nudo deja de considerarse funcional desde el punto de vista operativo. Superado este umbral, la experiencia del usuario pierde relevancia práctica debido a la excesiva fuerza necesaria para liberar el nudo.

En investigaciones previas, como las realizadas por Šimon [27], Castaño y García [8] y Gómez [40] aparece el mismo enfoque metodológico, con la confección dextro rotatoria del nudo y geometría en I (tractora superior). No obstante, una revisión crítica de la literatura pone de manifiesto que en numerosos estudios anteriores no describen de forma explícita este aspecto metodológico, a pesar de su relevancia en el comportamiento mecánico de los nudos. La ausencia de esta información limita la comparabilidad de los resultados y dificulta la reproducción experimental. En este sentido, se considera necesario que investigaciones futuras amplíen los ensayos experimentales con el fin de corroborar la hipótesis relativa a la influencia de la confección del nudo y su geometría sobre su desempeño bajo carga.

#### 3.1. Nudos sin carga

El análisis estadístico mostró que el modelo resulta altamente significativo: para la ejecución de los nudos “Figura 5a” el coeficiente de determinación ( $R^2 = 0,9249$ ) indica que el 92,49 % de la variabilidad de la variable dependiente (tiempo en la realización del nudo) es explicada por el modelo; para el desatado de los nudos carga “Figura 5b”, el modelo es también altamente significativo con un coeficiente de determinación ( $R^2 = 0,9173$ ).

Existen diferencias relevantes entre tipos de nudo y usuarios, así como interacción entre ambos factores. El ballestrinque mostró gran dependencia del nivel de experiencia. El nudo de ocho presentó comportamiento estable entre usuarios.



**Figura 5.** Comparación de nudos por tipo de usuario: medias marginales estimadas con IC del 95 %.

**(a)** Tiempos de ejecución de los nudos. **(b)** Tiempos de desatado de los distintos nudos sin carga

### 3.2. Nudos sometidos a carga

Se observa incremento progresivo del tiempo de desatado conforme aumenta la carga.

**Nudo de nueve:** tras la aplicación de una carga de 4 kN, se observó que el usuario con perfil medio no fue capaz de desatar el nudo en un tiempo inferior a 5 minutos. De igual modo, el usuario con perfil avanzado registró, en las cinco repeticiones realizadas, tiempos de desatado superiores a 3,5 minutos. Estos resultados contradicen lo descrito por otros autores en estudios previos Šimon et al [27], Tyson y Loomis [41], en los que se afirma que el nudo de nueve presenta una mayor facilidad de desanudado en comparación con el nudo de ocho.

**Nudo de ocho:** tras la aplicación de una carga de 5 kN, los resultados evidencian que este nudo se encuentra entre los que presentan mayor facilidad de desatado dentro del conjunto de nudos ensayados. En particular, los usuarios con perfil experimentado fueron capaces de desatar el nudo sometido a una carga de 4 kN en un tiempo inferior a 25 segundos. Asimismo, el nudo de ocho fue el único que pudo ser desatado por un usuario experto en todos los casos ensayados en menos de un minuto bajo una carga de 5 kN. Contradice estudios que lo consideraban altamente bloqueable: Šimon [27], Diamond, [30], Marbach y Tourte [10], Ashley [12], Tyson y Loomis [41] y Long [42].

**Nudo castaño o de barril:** bajo una carga de hasta 4 kN, un usuario con perfil experimentado puede desatar el nudo en un tiempo inferior a 40 segundos. Por el contrario, al aplicar una carga de 5 kN, la dificultad para deshacer el nudo aumenta de manera considerable, superando en numerosos casos los 5 minutos, lo que evidencia una pérdida significativa de funcionalidad bajo cargas elevadas. Suele ser poco utilizado en cabeceras sometidas a cargas elevadas debido a la creencia, reportada por autores como Merchant [28], Ashley [12], Tyson [41], Long [42] o Luebben [43], de que tiende a ajustarse fuertemente contra el conector, dificultando la inserción de nuevos conectores en la gaza y complicando su desatado tras la aplicación de cargas.

**Nudo simple:** presenta una dificultad crítica para su desatado a partir de una carga de 3 kN, lo que lo convierte, desde el punto de vista de la funcionalidad, en una opción nada recomendable como nudo de anclaje. Con carga de 5 kN ni el usuario medio, ni el avanzado fueron capaces de deshacer el nudo.

Nudo ballestrinque: buen comportamiento hasta 4 kN puede ser desatado por un usuario con perfil medio en un tiempo inferior a 41 s, mientras que un usuario experimentado logra realizar la misma operación en un tiempo inferior a 22 s. Muestra pérdida significativa de funcionalidad a 5 kN. Este comportamiento concuerda con estudios previos donde se indica que el ballestrinque, a cargas moderadas, conserva una buena manipulación en comparación con otros nudos de anclaje [41] - [44].

Se puede establecer una taxonomía en función de la carga aplicada. Para 4 kN (de mejor a peor funcionalidad): 1 ballestrinque, 2 nudo de ocho, 3 nudo castaño, 4 simple y 5 nudo de nueve. Los nudos nueve y simple superan ampliamente el límite operativo recomendado de 90 segundos. Para 5 kN: el usuario medio no puede desatar ningún nudo y el avanzado únicamente el nudo de ocho. Cabe indicar que una carga de 5 kN puede alcanzarse fácilmente en caída factor 2 con trabajador de 80 kg, por lo que la sobrecarga compromete seriamente la operatividad del sistema.

Los resultados obtenidos en el presente estudio son aplicables exclusivamente a los equipos y a las condiciones de los ensayos descritos en el apartado de metodología. En consecuencia, los valores obtenidos no deben considerarse extrapolables a cuerdas de diferente tipología, diámetro o resistencia mecánica. Del mismo modo, las conclusiones alcanzadas no pueden generalizarse a los mismos tipos de nudos cuando se emplean configuraciones de carga distintas ni cuando se modifica el sentido de anudado a levo-rotatorio, dado que estas variaciones podrían alterar de manera significativa el comportamiento mecánico y los tiempos de ejecución y desanudado del nudo.

#### 4. CONCLUSIONES

La funcionalidad del nudo puede cuantificarse objetivamente mediante el parámetro  $\varphi$  (F).

El tipo de nudo influye significativamente en la facilidad de desatado.

El nivel de experiencia del usuario es determinante.

Existe interacción significativa entre tipo de nudo y perfil del operador.

A 4 kN, el nudo de ocho presenta comportamiento altamente favorable.

A 5 kN, únicamente el nudo de ocho mantiene operatividad parcial.

Los nudos simple y nueve no son recomendables como nudos de anclaje bajo cargas moderadas-altas.

Este estudio aporta evidencia cuantitativa que puede contribuir a la revisión de criterios técnicos en sistemas anticaídas y mejorar la seguridad en trabajos verticales, rescate y actividades deportivas que emplean cuerda.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

[1] Ministerio de Trabajo y Economía Social (MITES), *Estadísticas de Accidentes de Trabajo*. [Online]. Available: <https://www.mites.gob.es/es/estadisticas/contenidos/anuario.htm>. [Accessed: Jan. 8, 2026].

[2] U.S. Bureau of Labor Statistics, *National Census of Fatal Occupational Injuries (CFOI)*. [Online]. Available: <https://www.bls.gov/news.release/pdf/cfoi.pdf>. [Accessed: Jan. 21, 2026].

- [3] Occupational Safety and Health Administration (OSHA), *CPL 03-00-025: Enforcement and Guidance for Rope Descent Systems*. [Online]. Available: [https://www.osha.gov/sites/default/files/enforcement/directives/CPL\\_03-00-025.pdf](https://www.osha.gov/sites/default/files/enforcement/directives/CPL_03-00-025.pdf). [Accessed: Apr. 24, 2025].
- [4] U.S. Bureau of Labor Statistics, *Nonfatal Occupational Injuries and Illnesses*. [Online]. Available: <https://www.bls.gov/iif/nonfatal-injuries-and-illnesses-tables.htm#summary>. [Accessed: Jan. 8, 2026].
- [5] Safe Work Australia, *Key Work Health and Safety Statistics Australia 2024*. [Online]. Available: <https://www.safeworkaustralia.gov.au/media-centre/news/key-work-health-and-safety-statistics-2024>. [Accessed: Sep. 17, 2024].
- [6] Health and Safety Executive (HSE), *Work-Related Fatal Injuries in Great Britain, 2025*. [Online]. Available: <https://www.hse.gov.uk/statistics/assets/docs/fatalinjuries.pdf>. [Accessed: Jul. 2, 2025].
- [7] Asociación Española de Normalización (AENOR), *UNE-EN 363:2009 Personal Fall Protection Equipment—Personal Fall Protection Systems*. Madrid, Spain: AENOR, 2009.
- [8] J. J. Castaño Lacruz and S. García-Dils de la Vega, “Algunas notas sobre nudos,” *Subterránea. Revista de Espeleología*, no. 23, pp. 42–44, 2005.
- [9] S. Guinot and P. I. Sáez, *Sistemas de protección individual contra caídas en bomberos*. Madrid, Spain: Ediciones Desnivel, 2015.
- [10] G. Marbach and B. Tourte, *Técnicas de espeleología alpina: Una guía completa de espeleología segura y eficiente*. Switzerland: Proyectos Speleo, 2002.
- [11] J. C. Turner, P. Van Griend, and C. Warner, *History and Science of Knots*. Singapore: World Scientific, 1996.
- [12] C. W. Ashley, *The Ashley Book of Knots*, 12th ed. New York, NY, USA: Doubleday & Company, 1944.
- [13] BEAL-Planet, “BEAL,” [Online]. Available: <https://www.beal-planet.com/en>. [Accessed: Jan. 8, 2026].
- [14] S. C. Hervé, *From the Deep: The Petzl Adventure*. France: Guérin, 2012.
- [15] Mine Safety Appliances, *Protección anticaída de MSA*. [Online]. Available: <https://pdf.directindustry.es/pdf/msa/proteccion-anticaida-msa/15740-755026.html>. [Accessed: Jan. 8, 2026].
- [16] PETZL, *Professional Catalog 2026*. PETZL Crolles, Isère, France. [Online]. Available: <https://www.petzl.com/ES/es/Profesional>. [Accessed: Jan. 10, 2026].
- [17] K. Boron *et al.*, “Utilizing knots to reduce dynamic loads in fire service rope systems,” *J. Dyn. Behav. Mater.*, vol. 1, pp. 433–439, Sep. 2012.
- [18] A. Brown and A. J. McLaren, “The strength of knots in dynamic climbing rope,” *M.Eng. thesis*, Univ. of Strathclyde, Glasgow, Scotland, 2008.
- [19] E. Carrión Jackson, P. Sáez Menchacatorre, y R. Mora-García, *Sistemas de protección individual contra caídas*. Alicante, Spain: Univ. de Alicante, 2014.
- [20] E. Á. Carrión *et al.*, “Sistemas de protección individual anticaídas sometidos a impacto. Simulaciones numéricas”, *Inf. Constr.*, vol. 68, no. 542, junio 2016.

- [21] E. Á. Carrión *et al.*, “Average force of deployment and maximum arrest force of energy absorber lanyards,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, art. no. 7647, October 2020, doi: 10.3390/ijerph17207647
- [22] E. Á. Carrión *et al.*, “Minimum clearance distance in fall arrest systems with energy absorber lanyards,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, art. no. 5823, May 2021, doi: 10.3390/ijerph18115823
- [23] M. Á. Jiménez Fernández *et al.*, *Análisis del riesgo de caídas de altura en obras de construcción*, Tech. Rep. MN-44, Instituto de Seguridad y Salud Laboral, Murcia, Spain, 2010. [Online]. Available: <https://www.carm.es/web/pagina?IDCONTENIDO=64795>.
- [24] D. A. Martin *et al.*, “Feasibility of knots to reduce the maximum dynamic arresting load in rope systems,” *J. Dyn. Behav. Mater.*, vol. 1, (2) pp. 214–224, Apr. 07, 2015.
- [25] J. C. Pomares *et al.*, “Experimental tests on personal safety devices for height fall,” in *Proc. 15th Int. Conf. on Structures Under Shock and Impact*, Seville, Spain, 2018, pp. 69–81.
- [26] J. C. Pomares *et al.*, “Optimization on personal fall arrest systems: Experimental dynamic studies on lanyard prototypes,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, (3), art. no. 1107, February 2020, doi: 10.3390/ijerph17031107
- [27] J. Šimon, V. Dekýš, and P. Palček, “Revision of commonly used loop knots efficiencies,” *Acta Physica Polonica A*, vol. 138, (3), pp. 404–420, April 2020, doi: 10.12693/APhysPolA.138.404
- [28] D. Merchant, *Life on a Line*. North Wales, U.K.: Lulu Enterprises, 2007.
- [29] P. Pieranski *et al.*, “Localization of breakage points in knotted strings,” *New J. Phys.*, vol. 3, (1), pp. 10, Jun 01, 2001.
- [30] W. Diamond, “An Assessment of the Strength of Rope Splices and Knots in Sailing Ropes”. *MEng Aero-Mechanical Engineering University*, 2007.
- [31] B. F. G. Aymon *et al.*, “Self-locking and stability of the bowline knot,” *Extreme Mechanics Letters*, vol. 81, pp. 102413, October 2025, doi: 10.1016/j.eml.2025.102413
- [32] GOER, “Técnica: Nudos recomendados por la UIAA,” [Online]. Available: <https://rescategoer.blogspot.com/2007/06/tecnica-nudos-recomendados-por-la-uiaa.html>. [Accessed: Jun. 3, 2007].
- [33] R. G. Birch, *Predicting and Measuring Knot Strength and Security*, Practical Knot Theory, ver. 2.0, 2022. [Online]. Available: [https://scithings.id.au/Practical\\_Knot\\_Theory.pdf](https://scithings.id.au/Practical_Knot_Theory.pdf). [Accessed: Jan. 22, 2025].
- [34] S. A. Weber *et al.*, “Suspension trauma: A clinical review,” *Cureus*, vol. 12, no. 6, e8514, June 2020, doi: 10.7759/cureus.8514
- [35] S. Rauch *et al.*, “Suspension syndrome: A scoping review and recommendations from the ICAR MEDCOM,” *Scand. J. Trauma Resusc. Emerg. Med.*, vol. 31, art. no. 95, December 2023, doi: 10.1186/s13049-023-01164-z
- [36] European Parliament and Council, *Directive 2001/45/EC*, OJ L 195, pp. 46–48, Jul. 18, 2001.
- [37] Asociación Española de Normalización (AENOR), *UNE-EN 1891: Low stretch kernmantel ropes*. Madrid, Spain: AENOR, 1998.

- [38] ISO, *ISO 139:2005/A1 Textiles—Standard atmospheres for conditioning and testing—Amendment 1*. Geneva, Switzerland, 2005.
- [39] P. I. Sáez *et al.*, “Determining the safest anchoring knot in a fall arrest system by means of static tests,” *Symmetry*, vol. 16, (2), art. no. 167, January 2024, doi: 10.3390/sym16020167
- [40] P. Gómez, *Rompiendo nudos*, 2nd ed. Valencia, Spain: Escuela Valenciana de Espeleología, 2016.
- [41] A. Tyson and M. Loomis, *Climbing Self Rescue*. Seattle, WA, USA: Mountaineers Books, 2006.
- [42] J. Long, *Climbing Anchors*. Guilford, CT, USA: Falcon Guides, 2006.
- [43] C. Luebben, *Rock Climbing: Mastering Basic Skills*. Guilford, CT, USA: Falcon Guides, 2004.
- [44] D. J. Fasulo, *Escalada en roca: técnicas y maniobras*, 2nd ed. Madrid, Spain: Ediciones Desnivel, 2007.