

## CABLES DE ACERO: MONITOREO DE SU INTEGRIDAD MEDIANTE LA TÉCNICA DE EMISIÓN ACÚSTICA

Pablo G. Varela <sup>1</sup>, Rodrigo E. de Prada <sup>2</sup>, Leandro D. Giorgetti <sup>3</sup>,  
Martín A. Kunusch Micone <sup>4</sup>, Diego D. Gallo <sup>5</sup>, Ariel H. Manelli <sup>6</sup>

Laboratorio de Ensayos de Materiales – Fac. de Ingeniería – Universidad Nac. de Río Cuarto

<sup>1</sup> pvarela@ing.unrc.edu.ar.

<sup>2</sup> rodrigodeprada@ing.unrc.edu.ar

<sup>3</sup> lgiorgetti@ing.unrc.edu.ar

<sup>4</sup> mkunusch@ing.unrc.edu.ar

Laboratorio de Máquinas Térmicas – Fac. de Ingeniería – Universidad Nac. de Río Cuarto

<sup>5</sup> dgallo@ing.unrc.edu.ar

<sup>6</sup> amanelli@ing.unrc.edu.ar

Ruta Nac. 36 km. 601, Río Cuarto (Cba.), Argentina

### RESUMEN

Los cables de acero utilizados para izaje son elementos estructurales que tienen diversas aplicaciones tanto en el ámbito de la ingeniería industrial, como la marítima y civil. En general, consisten de varios alambres de acero trenzado que forman una estructura con enormes propiedades mecánicas que combinan resistencia axial, rigidez y flexibilidad.

En la mayoría de sus aplicaciones, los cables se encuentran sometidos a diferentes esfuerzos y sollicitaciones, los cuales pueden provocar la prematura avería de los componentes del cable y consecuentemente, la falla repentina e inesperada del mismo.

La rotura de un cable implica problemas serios de seguridad, que pueden afectar la vida de personas, como así también provocar daños en los elementos que son izados.

El presente trabajo propone el empleo de la técnica de Emisión Acústica (EA) para realizar el monitoreo y la detección de fallas en cables de acero durante ensayos de tracción. Para ello se efectuaron diferentes experiencias que involucraron someter probetas de cables de acero a ensayos de tracción, y simultáneamente realizar el monitoreo mediante la técnica de Emisión Acústica.

Las experiencias permitieron comprobar las enormes ventajas del empleo de la Técnica de Emisión Acústica ya que posibilita efectuar el monitoreo en tiempo real y predecir el instante en que ocurre la rotura de diversos alambres componentes del cable de acero; lo que puede provocar la falla de todo el cable, pudiéndose evitar esto último, y las nefastas consecuencias que ello puede acarrear.

**Palabras Clave:** Cables de acero, Cables de Izaje, Emisión Acústica

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso efectivo de los cables de acero se remonta al año 1836 gracias a los trabajos del ingeniero Wilhelm Albert. Desde entonces, el uso de estos cables ha experimentado un gran crecimiento y ha tenido efectos significativos en diversas aplicaciones industriales, como la elevación de cargas, puentes colgantes, ascensores, remolques de embarcaciones, etc. Tienen enormes propiedades mecánicas que combinan una capacidad para soportar importantes cargas axiales, una rigidez torsional y flexibilidad a la flexión [1]. Además, a diferencia de otras estructuras como las barras, los cables metálicos constan de varios elementos; su composición ofrece la ventaja de no romperse repentinamente [2]. Por lo tanto, pueden cumplir su tarea a pesar de tener algún daño en uno o más componentes. Este punto es muy importante para asegurar que el cable sea resistente en el sentido de que sea tolerable a sufrir daños locales que se manifiestan, principalmente, en hilos o hebras rotos [3].

Tradicionalmente, los cables de acero se ponen en marcha con la aplicación de una carga de prueba de pretensado inicial y se recalifican mediante una inspección periódica de prueba. Durante el servicio, el operador utiliza el cable a la carga de trabajo segura (SWL - Safe Working Load) predeterminada, normalmente el 50 % de la carga de prueba, durante un período de tiempo específico. Luego se lleva a cabo una inspección periódica, seguida de la aplicación adicional de una carga de prueba. La práctica industrial actual establece que si un cable resiste un porcentaje de sobrecarga establecido de su SWL, entonces ese cable se considera "adecuado para el propósito" y seguro para un uso continuado [4].

El principio general de la carga de prueba se basa en la idea de que, si una estructura contiene una falla críticamente significativa, durante la aplicación de una carga de prueba, la estructura fallará catastróficamente. En razón de ello, si la prueba se realiza a intervalos periódicos, se puede usar para eliminar estructuras débiles. La literatura varía ampliamente en su opinión sobre las pruebas de calidad, puesto que hay autores que aseguran que las pruebas a menudo proporcionan una sensación de confianza infundada en una estructura; mientras que otros investigadores informan que las pruebas periódicas aumentaron sustancialmente la vida útil a la fatiga, en Cables de Acero [4].

Existe un factor adicional relacionado con lo expuesto. Efectivamente, las propiedades mecánicas y la vida útil de los cables de acero están determinadas por las condiciones en las que se operan los dichos cables. El empleo de cables de acero como componentes clave de varios equipos marinos ha traído además de la amplia gama de beneficios también una serie de nuevos problemas. Una preocupación son los problemas asociados a la corrosión que surgen debido al ambiente agresivo en el que trabajan los cables de acero. El comportamiento mecánico de los cables expuestos a ambientes corrosivos, como agua de mar o productos químicos, puede verse alterado por la corrosión en la medida en que dejen de ser fiables bajo carga y su fallo

puede acarrear graves consecuencias. Los cables de acero se utilizan a menudo en entornos corrosivos, por ejemplo ambiente costero o marino, donde es común el deterioro por humedad del aire, y agua de mar agresiva. Además, los cables expuestos a la corrosión también están muy solicitados mecánicamente. Debido a la corrosión los cables sufren una rápida degradación y es necesario conocer su comportamiento frente a agentes corrosivos, para garantizar su funcionamiento seguro. La corrosión y degradación de los materiales de acero ha sido objeto de varios estudios y proyectos de investigación.

Para la realización de las pruebas mecánicas, existen normas nacionales e internacionales. Por ejemplo, en normas nacionales: Norma IRAM 3923-1, relacionada con la seguridad en equipos de izaje; inspecciones, métodos de ensayo y mantenimiento [5]; y Norma IRAM 3920:1999, que trata sobre seguridad en equipos de izaje, condiciones generales para la operación y la calificación del personal [6]. Ejemplos de normas internacionales son: Norma ASME B30.10-2005, relacionada con seguridad para cablecarriles, grúas, derrick (cabrias), elevadores, ganchos, gatos y eslingas [7]; y Norma ISO 4344, que establece requisitos mínimos para cables de acero para ascensores [8].

Además de las pruebas con la aplicación de cargas mecánicas mencionadas precedentemente, otras técnicas han sido desarrolladas. Un ejemplo de ello es la técnica de ensayo de medición de flujo magnético. Este método se usa ampliamente para la inspección de acero pretensado y postensado y para la verificación de cables de acero, a los efectos de determinar el número de alambres dañados. Este método asegura alta precisión y sensibilidad y es una técnica de inspección muy confiable para cables de acero. Sin embargo, la técnica solo es aplicable a la prueba de cables de acero relativamente delgados (de diámetros de hasta unos pocos centímetros) y es muy sensible a la forma en que se ha magnetizado el cable de acero.

Un método prometedor para la inspección de cables de acero puede ser la aplicación de ondas guiadas ultrasónicas (UGW - Ultrasonic Guided Waves), ya que se propagan largas distancias incluso en materiales de alta atenuación y son sensibles a los defectos superficiales e internos [9]. Los cambios en las propiedades de los cables metálicos afectan las formas de onda de las señales ultrasónicas capturadas desde la estructura. Aun así, la investigación ultrasónica de cables de acero es una tarea desafiante de Ensayo No destructivo (END) que es bastante complicada. Múltiples capas y diferentes números de alambres en distintas cuerdas pueden causar fenómenos como la dispersión y la existencia de muchos modos de onda diferentes; Resolver el problema requiere una comprensión de la propagación de ondas en estructuras helicoidales cilíndricas complicadas e interacciones de ondas con defectos. Determinar si solo se inspecciona la capa externa o las capas externa y más profunda del cable depende de cómo se excitan las ondas en una hebra.

Otro método muy interesante para verificación de cables, perteneciente al grupo de ensayos no destructivos, es la técnica de Emisión Acústica. Efectivamente, se han efectuado pruebas de carga ascendente y pruebas de fatiga en cables de acero, y se encontró que se podía obtener advertencia de falla inminente en ambas condiciones [4]; realizándose al mismo tiempo, esfuerzos tendientes a discriminar entre las señales de emisión acústica genuinas y el ruido de fondo. Se concluyó que las señales de Emisión Acústica de gran amplitud podrían estar asociados con fracturas, obteniéndose una correlación entre dichas señales y las roturas de cables. Además, se sugirió que el contenido de energía de las señales de los transductores acústicos resultantes de roturas de cables no se atenuaría mucho a lo largo de un cable y debería ser detectable desde una distancia de 30 m. Sin embargo, los estudios de emisión acústica en cables metálicos se ven complicados por los diversos modos de propagación de ondas elásticas, asociado con que la fricción entre hebras en los cables podría causar un ruido de baja amplitud excesivo y, por lo tanto, interferencia. Sin embargo, las técnicas modernas de procesamiento de señales, pueden resolver el problema, logrando separar aquellas señales que no acarrean información útil.

La literatura reporta numerosas experiencias realizadas en laboratorio, con equipamiento de Emisión Acústica destinado para tal fin. En virtud de lo expuesto, la investigación experimental expresada en este documento buscó mejorar los procedimientos de prueba de calidad al incluir equipamiento de laboratorio, y equipamiento portátil de Emisión Acústica. Se realizaron experiencias sometiendo a varios cables a estado tensional de tracción, monitoreando el procedimiento con dichos equipos de Emisión Acústica, empleando diversos transductores acústicos situados en la máquina de ensayos. El objetivo inicial era establecer vínculos entre las señales acústicas durante un ensayo de carga de prueba y la presencia de defectos en el cable.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

A los efectos de cumplir con el objetivo planteado, la parte experimental consistió en la realización de ensayos de tracción sobre muestras de cables de aluminio y de acero. Dichos cables fueron situados en una máquina universal de ensayos marca Amsler, modelo 6PZD 1406, para aplicar esfuerzos de tracción, tal como se muestra en la Figura 1.

Se procedió entonces a la realización de los ensayos de tracción, en cada cable; y al mismo tiempo, la instrumentación con equipos de Emisión Acústica.

Para la obtención de señales de Emisión Acústica, fueron utilizados dos equipos: uno de laboratorio y otro portátil.

El equipo de laboratorio utilizó a su vez, dos sensores comerciales de EA para este estudio, los modelos R15I y WDI de Physical Acoustics Corporation. Los sensores fueron anclados al sistema

de mordazas de la máquina de ensayo utilizando cera sintética para asegurar una fijación adecuada. Los sensores fueron conectados a un sistema de adquisición de datos para Emisión Acústica marca Physical Acoustics Corporation, modelo "PCI-2 Based AE System". El sensor R15I fue conectado directamente a la placa, mientras que el sensor WDI requirió de un preamplificador externo.



Figura 1: Montaje del cable en la máquina de ensayos. Se observan los sensores de EA

El equipo portátil utilizó un sensor comercial de EA modelo GIS35 de QingCheng AE Institute (Guangzhou) Co., Ltd. Dicho sensor también fue anclado a la máquina de ensayo con en los anteriores para asegurar una fijación adecuada. El sensor fue conectado a un equipo de la citada marca QingCheng AE Institute (Guangzhou) Co., Ltd., modelo SVLD1, que es un equipo originalmente desarrollado para la detección de fugas en válvulas. El mencionado sensor fue conectado directamente al equipo portátil. El equipo empleado se puede apreciar en la Figura 2.



Figura 2: Equipo portátil de EA para detección de fugas en válvulas

Un evento de Emisión Acústica (hit) idealizado se muestra en la Figura 3. Características tales como: conteo de ondas, conteo de eventos, análisis de frecuencia y análisis de amplitud, han sido utilizados a los efectos de decodificar la información que posiblemente los eventos de Emisión Acústica lleven con ellos.

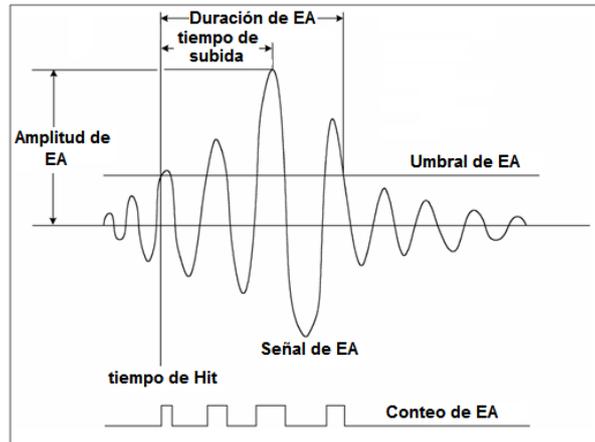


Figura 3: Diagrama de extracción de características de un Hit de Emisión Acústica

Con esta configuración y empleando el equipo de laboratorio, se pudo registrar en un ordenador personal, el número de eventos, sus amplitudes y el número de ondas de cada evento. Las ondas elásticas generadas cuando la muestra reacciona a los efectos de disminuir su energía interna, viajan como señales acústicas en todas las direcciones y pueden detectarse por los sensores instalados, los cuales convierten las ondas acústicas en tensión eléctrica de baja amplitud. Las señales de ambos sensores fueron pre-amplificadas. El contenido no correlacionado debido a ruido asociado a defectos de acoplamiento en el montaje, vibraciones mecánicas de la máquina de ensayos, ruido electrónico y ambiente, etc., fue filtrado.

El procesamiento de las señales de Emisión Acústica obtenidas con el equipo de laboratorio, fue realizado con el software "AEWIN", que almacena los datos en forma digital, en función del tiempo. El sistema provee información sobre amplitud de hit y número de ondas por evento.

Cada evento se define cuando se cumplen las condiciones de superar el umbral de tensión establecido, y un tiempo muerto fijo (por ejemplo, el tiempo transcurrido sin superar el umbral de tensión, con el cual se evita la medición de reflexiones y ondas de arribo tardío, mientras que el cruce de umbral próximo define el comienzo de un nuevo evento). De esta manera cada vez que la señal de Emisión Acústica excede el umbral de tensión, se registra un evento, y el siguiente evento será registrado si dentro de la duración del hit establecida y del tiempo de rearmado del sistema de adquisición no hay otro cruce de umbral. El sistema tiene una memoria que cuenta y registra la cantidad de eventos, mientras que otra almacena las amplitudes máximas.

Por su parte, el equipo portátil cuenta con alarma sonora y visual, que cuando se supera el umbral pre-fijado, es accionada, y permite la detección en tiempo real de la aparición de eventos de Emisión Acústica, lo cual refleja la aparición y propagación de defectos en la pieza estudiada, en este caso el cable.

### 3. RESULTADOS

Con la configuración ya mencionada, fueron registradas las actividades de Emisión Acústica producidas por la carga de las probetas. El monitoreo de los eventos de EA de las muestras bajo carga, puede dividirse en dos etapas. En la primera etapa, el daño (una discontinuidad activa) dentro de la muestra produce un evento acústico (la emisión de energía acústica) que propaga a través del material y llega al transductor (sensor). En la segunda etapa, la onda acústica se convierte en una señal electrónica equivalente, y finalmente en una cuenta de Emisión Acústica. Para el caso de los cables analizados, por efecto de la carga tensional aplicada, sería de esperar que aparezca una primera fisura en la hebra del cable, cuya propagación produciría la rotura de dicha hebra. Este fenómeno sobrecargaría las restantes hebras, repitiéndose el fenómeno anterior en cada hebra, hasta la rotura total del cable. Todos estos fenómenos mencionados generan ondas mecánicas que pueden ser detectadas por los sensores de Emisión Acústica, con los equipos debidamente calibrados.

La máquina universal de ensayos, por el esfuerzo aplicado de tracción, permite obtener las curvas de esfuerzo/deformación correspondientes. Al mismo tiempo, el equipo de Emisión Acústica de laboratorio registrar los conteos acumulados de Emisión Acústica. Por su parte, el equipo de Emisión Acústica portátil, es capaz de registrar una sumatoria instantánea importante de eventos de Emisión Acústica.

En todos los casos, se sujetó el cable en la máquina universal de ensayos, mediante las mordazas adecuadas. Como se ha expresado precedentemente, los sensores fueron anclados a la máquina universal de ensayos utilizando cera sintética. Si bien las ondas mecánicas son originadas por eventos que ocurren en el interior del cable, las ondas se propagan a las mordazas, y de allí al resto de la parte de acción de la máquina de ensayos, razón por la cual son detectadas por los sensores. Las muestras fueron ensayadas con 200 mm. de distancia entre mordazas, y en todos los casos las roturas se produjeron en el tercio central de la probeta, sin influencia de las mordazas. Fueron realizadas tres experiencias, como se detalla a continuación:

#### 3.1. Experiencia #1: Cable de acero de 3 hebras

Se realizó la carga de tracción de un cable de acero de 3 hebras confeccionado de acuerdo a la Norma NBR 8121 [10] (diámetro de hebras: 3,26 mm.), obteniéndose las curvas que se pueden

observar en la Figura 4. En este caso, una vez que rompió una hebra, se detuvo la aplicación de la carga, y también el registro de conteo de Emisión Acústica.

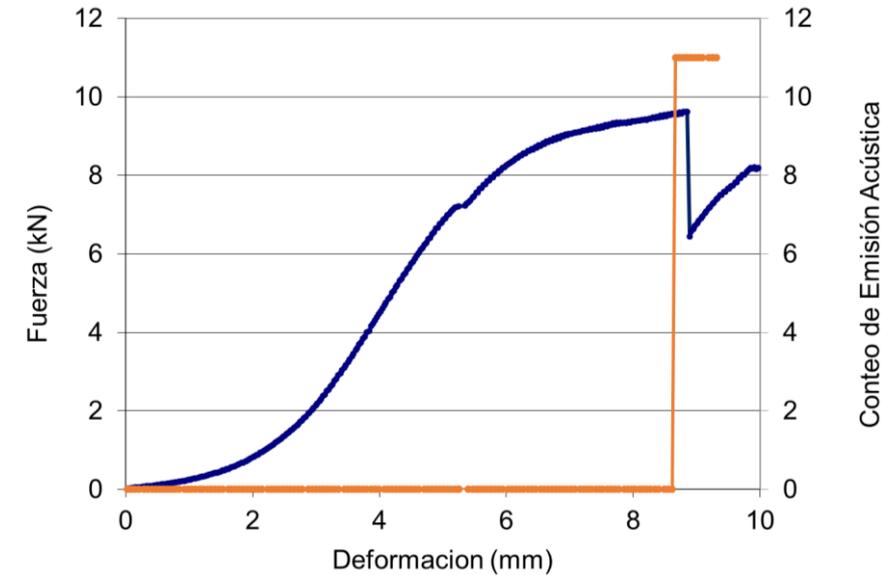


Figura 4: Curva esfuerzo/deformación y conteo de EA de cable de acero de 3 hebras

### 3.2. Experiencia #2: Cable de aluminio de 3 hebras

Se realizó la carga de tracción de un cable de aluminio de 3 hebras según Norma ASTM B549-22 [11] (diámetro de hebras: 3,27 mm.), obteniéndose las curvas que se pueden observar en la Figura 5. En este caso se continuó aplicando la carga hasta la rotura total de la segunda hebra del cable, registrándose también el conteo de Emisión Acústica correspondiente.

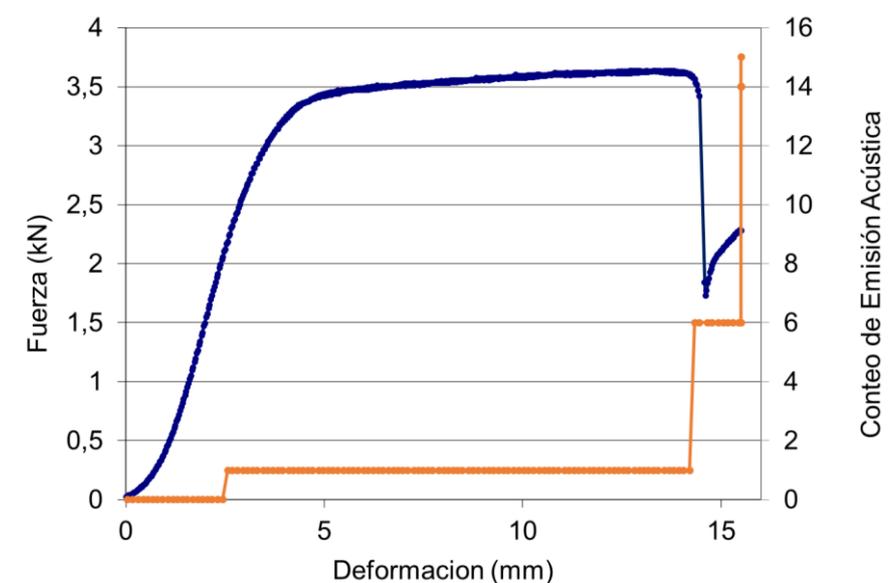


Figura 5: Curva esfuerzo/deformación y conteo de EA de cable de aluminio de 3 hebras

### 3.3. Experiencia #3: Cable de acero de 6 hebras

Se realizó la carga de tracción de un cable de acero de 6 hebras, según Norma IRAM 547 [12] (diámetro de hebras: 2 mm.), obteniéndose las curvas que se pueden observar en la Figura 6. Como en el caso anterior, se continuó aplicando la carga hasta la rotura total del cable.

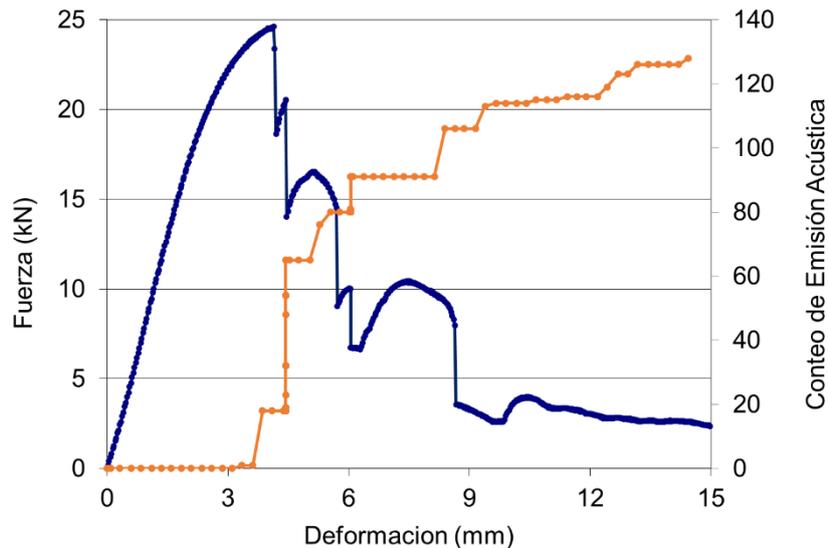


Figura 6: Curva esfuerzo/deformación y conteo de EA de cable de acero de 6 hebras

## 4. DISCUSION

Observando la Figura 4, se puede apreciar que la primera hebra rompió con un estiramiento del cable de algo menos de 9 mm., y con un esfuerzo aplicado de aproximadamente 9,5 kN. La rotura queda puesta de manifiesto por la caída del esfuerzo aplicado, puesto que todos los ensayos fueron realizados con incremento de deformación a velocidad constante. También se puede observar en la citada figura, que antes de que ocurra la rotura de la hebra, ya aparece un importante conteo de Emisión Acústica. Es decir, los instrumentos de Emisión Acústica son capaces de anticipar la rotura de una hebra. Ello se debe a que se produce un acomodamiento de dislocaciones en la hebra, lo cual da origen a una pequeña fisura, la cual se propaga. Todos estos hechos producen ondas mecánicas que son detectadas por los sensores. El equipo de laboratorio de Emisión Acústica es el que registra los datos y permite realizar la gráfica. Por su parte, el equipo portátil de Emisión Acústica acciona en esas instancias, la alarma correspondiente.

Analizando cuidadosamente la Figura 5, se puede apreciar, como en el caso anterior, que el instrumental de Emisión Acústica es capaz de predecir con una pequeña anticipación, la rotura de una hebra del cable. Como este cable tiene 3 hebras, se estudió hasta la rotura de la segunda

hebra. Como en el caso anterior, las roturas quedan en evidencia por la caída del valor del esfuerzo aplicado, y además, por el aumento del conteo de Emisión Acústica.

Por su parte, la Figura 6, que representa el ensayo de un cable de acero de 6 hebras, permite aseverar lo expresado en los ensayos anteriores.

Se han ensayado cables de acero y de aluminio, con comportamientos mecánicos diferentes, y sin embargo se evidencian comportamientos similares de Emisión Acústica.

Sumado a lo anteriormente expuesto, y teniendo en cuenta que el equipo portátil conectado con un pequeño sensor, puede accionar alarma, se tiene un conjunto que puede estar destinado al monitoreo de la integridad de cables sometidos a tensión mecánica.

## 5. CONCLUSIONES

Han sido ensayados tres cables diferentes, incluso de distinto material (acero y aluminio), sometiéndolos a esfuerzo de tracción; y simultáneamente se ha registrado la actividad de Emisión Acústica que dichas probetas generaban, con dos tipos de equipos: uno de laboratorio y otro portátil.

En todos los casos, los equipos de Emisión Acústica fueron capaces de predecir la rotura de una hebra del cable, puesto que se incrementaba notablemente el conteo, en instantes previos a la falla.

Se comprueba las ventajas de la utilización de Emisión Acústica, puesto que dicha técnica permite predecir con una ligera anticipación, la pérdida de integridad mecánica de un cable sometido a tensión.

Se puede afirmar que el empleo de la técnica de Emisión Acústica, utilizando equipos de laboratorio o portátiles, permite realizar un monitoreo de la integridad mecánica de un cable sometido a tensión, lo cual redundará en una mayor seguridad de su operación, y a la vez puede complementar perfectamente a los ensayos de rutina que se realizan en los cables.

En un trabajo futuro se podrían realizar ensayos sobre otros tipos y medidas de cables, lo cual permitirá extender la validez de los ensayos realizados en este artículo.

## REFERENCIAS

- [1] H. Mouradi, A. El Barkany, A. Biyaali. *Investigation on the main degradation mechanisms of steel wire ropes: a literature review*, J. Eng. Appl. Sci. 11, 6, 1206–1217, 2016. [docsdrive.com/pdfs/medwelljournals/jeasci/2016/1206-1217.pdf](https://docsdrive.com/pdfs/medwelljournals/jeasci/2016/1206-1217.pdf).

- [2] M. Giglio, A. Manes. *Life prediction of a wire rope subjected to axial and bending loads*. Eng. Fail. Anal. 12, 4, 549–568, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.09.002>.
- [3] Houda Mouradi, Abdellah El Barkany, Ahmed El Biyaali. *Steel wire ropes failure analysis: Experimental study*, Engineering Failure Analysis, 91, 234–242, 2018.
- [4] G. Drummond, J.F. Watson, P.P. Acarnley. *Acoustic emission from wire ropes during proof load and fatigue testing*, NDT&E International, 40, 94–101, 2007.
- [5] Norma IRAM 3923-1. *Seguridad en equipos de izaje. Inspecciones, métodos de ensayo y mantenimiento. Parte 1 - Grúas móviles y su construcción y operación*. Instituto Argentino de Normalización. 2009.
- [6] Norma IRAM 3920. *Calificación del personal de equipos de izaje y de equipos de elevación de cargas o de personas*. Requisitos. Instituto Argentino de Normalización. 2022.
- [7] Norma ASME B30.10-2019. *Ganchos. Normas de seguridad para cablecarriles, grúas, derricks (cabrias), elevadores, ganchos, gatos y eslingas*. The American Society of Mechanical Engineers. 2019.
- [8] Norma ISO 4344:2022. *Steel wire ropes for lifts — Minimum requirements*. The International Organization for Standardization. 2022.
- [9] Renaldas Raisutis, Rymantas Kazys, Liudas Mazeika, Egidijus Zukauskas, Vykintas Samaitis, Audrius Jankauskas. *Ultrasonic guided wave-based testing technique for inspection of multi-wire rope structures*. NDT&E International 62, 40–49, 2014.
- [10] Norma Brasileira ABNT NBR 8121. *Cabos de fios de aço revestidos de cobre, nus, para fins elétricos – Especificação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2021.
- [11] Norma ASTM B549-22. *Standard Specification for Concentric-Lay-Stranded Aluminum Conductors, Aluminum-Clad Steel Reinforced for Use in Overhead Electrical Conductors*. American Society for Testing and Materials. 2022.
- [12] Norma IRAM 547. *Cables de acero para usos generales*. Instituto Argentino de Normalización. 2013.