WIRE ROPE
TECHNOLOGY AACHEN

Lo que podemos aprender de las roturas de los cables de acero

Lo que podemos aprender de las roturas de los cables de acero: Fallas predecibles y no predecibles

por el Dipl.-Ing. Roland Verreet
traducido y comentado por el Ing. Ricardo Muñiz

Índice

1. Fallas predecibles del cable de acero 4

2. Roturas impredecibles (catastróficas) 14

3. Resumen 26

4. Referencias 27

© 2005, 2014, 2018, 2023 Ingenieurbüro für Drahtseiltechnik Wire Rope Technology Aachen GmbH
Caricatura de tapa: Rolf Bunse
Maquetado: Benedikt Dolzer, Aachen
Traducción y notas en español: Ing. Ricardo Muñiz
Reproducción, parcial o total, solo con permiso por escrito del autor

Introduction

Todo cable de acero sometido a corrosión, abrasión o fatiga fallará algún día si no se lo retira de servicio a tiempo. Los sofisticados criterios de descarte existentes nos ayudan a evaluar el estado de nuestro cable, pero los accidentes siguen ocurriendo. Por lo tanto, es importante analizar la causa de cada rotura de cable para evitar que vuelvan a ocurrir accidentes similares.

1. Fallas predecibles del cable de acero

Si no hay corrosión, calor excesivo, daños mecánicos o químicos, el cable fallará en la zona sometida a mayor fatiga y abrasión. Para muchas aplicaciones, esto significa que se puede predecir la zona más probable en la que se producirá la falla del cable.

1.1. ¿Dónde es más probable que un cable falle?

La distribución de la fatiga a lo largo del cable depende tanto del diseño como del tipo de operación del sistema de reenvíos.[1]

La Fig. 1 muestra cómo se distribuye la fatiga por flexión en cada ciclo de elevación (una elevación y un descenso) de cuatro puentes grúa con cuatro líneas de cable[2] que elevan repetitivamente cargas desde el suelo hasta el 25%, 50%, 75% y 100% de la altura máxima de elevación, respectivamente.

Si el cable de la segunda grúa no se retira de servicio a tiempo, un día se romperá a una distancia de entre 40 y 46 m del terminal con cuña.

Si el cable de la cuarta grúa no se retira de servicio a tiempo, un día se romperá a una distancia de entre 8 y 24 m del terminal (en la llamada “línea muerta”).[3]

1.2. Se puede escuchar la rotura del cable cuando está llegando

Si el estado de descarte no es detectado o es ignorado por el usuario, el cable se romperá un día en la zona más deteriorada, pero no sin antes haber anunciado su próxima falla mediante un gran número de roturas individuales de alambre.

1 En castellano no tenemos una palabra tan específica como la inglesa *reeving system*, que se aplica exclusivamente a cables y sogas. La traduciremos indistintamente como *sistema de enrollado* (que se referiría más al cable en el tambor) o *sistema de reenvíos* (que se referiría más al cable entre las poleas) o simplemente *sistema de cables o cableado* (cuando no se preste a confusión). (NdT)

2 El autor usa la expresión *4-parts crane*, que debe ser traducida como *grúa con 4 líneas de cable*. En algunos países se usa *4 partes*, una traducción literal del inglés que a menudo lleva a confusiones. Como sea, el Autor se refiere a la cantidad de secciones de cable que soportan la carga. En este caso son las 4 líneas de una pasteca de dos poleas. (NdT)

3 “*Línea muerta*” es la parte del cable conectada directamente al terminal con cuña (que es el “punto muerto”), así como “línea viva” es la parte del cable que va entrando en el tambor. Como ambas son expresiones corrientes en castellano, en adelante omitiremos el entrecomillado que el autor usa todas las veces. (NdT)

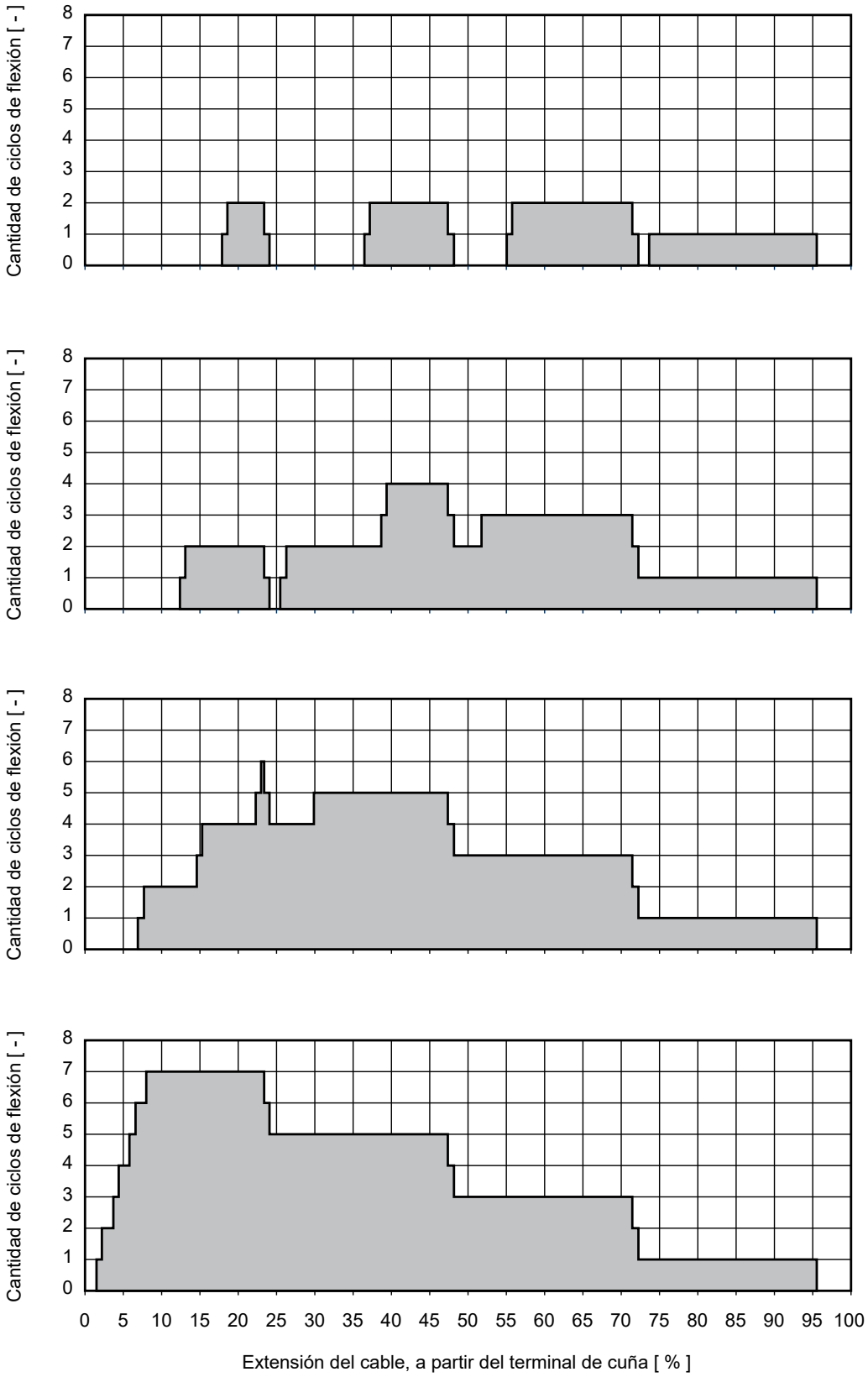

Fig. 1: Distribución de la fatiga por flexión en cada ciclo de elevación (una elevación y un descenso) de cuatro diferentes puentes grúa, todos con cuatro líneas de cable

Algunos videos grabados durante izajes que terminaron con una rotura del cable muestran que el cable había anunciado su inminente rotura mediante un gran número de roturas individuales de alambres, a menudo con pocos segundos de diferencia entre sí, que llegaron a prolongarse hasta diez minutos. Si el operador de la máquina hubiera entendido las señales de advertencia, en muchos casos habría tenido tiempo de sobra para detener la operación.

1.3. Inspección del cable de acero

Las inspecciones de cables de acero deben realizarse a intervalos regulares para poder descartar el cable antes de que llegue a una condición insegura. Y aun así se producen muchos accidentes, a veces porque el cable se inspecciona en los lugares equivocados, a veces porque la rotura se produce desde dentro hacia fuera.

1.3.1. Inspección en el lugar equivocado (1): Movimiento repetitivo

Los sistemas de reenvío que repiten la misma operación una y otra vez son críticos con respecto a la inspección del cable. Si, por ejemplo, el cable de la primera grúa mostrada en la Fig. 1 se inspecciona siempre a 10 m y 30 m del terminal de cuña (porque estas secciones del cable son quizá más accesibles que otras), nunca se detectará un deterioro creciente del cable a los 20 m, 40 m y 60 m. Entonces, un día el cable se romperá, por ejemplo a los 20 m, sin que el inspector haya detectado antes ni una sola rotura de alambre.

1.3.2. Inspección en el lugar equivocado (2): La línea muerta

En los sistemas de múltiples reenvíos, muchas de las roturas del cable, si no la mayoría, se producen en la línea muerta. Las líneas del cable más alejadas del terminal con cuña se mueven más rápido que la línea muerta. Pero cuando la pasteca se desplaza normalmente a grandes alturas, la mayor cantidad de fatiga no se acumula sobre esas líneas rápidas, sino sobre la comparativamente lenta línea muerta.

Esto por sí solo no sería un problema grave, puesto que el deterioro del cable podría detectarse durante una inspección adecuada del mismo. Pero la mayoría de los inspectores de cables piensa que la línea muerta que se desplaza lentamente no estará sometida a una gran fatiga. Por lo tanto, preferirán dedicar su tiempo a inspeccionar las líneas „rápidas“ en las que a menudo, como en la cuarta grúa de la Fig. 1, se acumulan muchos menos daños por fatiga.

Línea “muerta” significa: “La muerte te espera ahí”

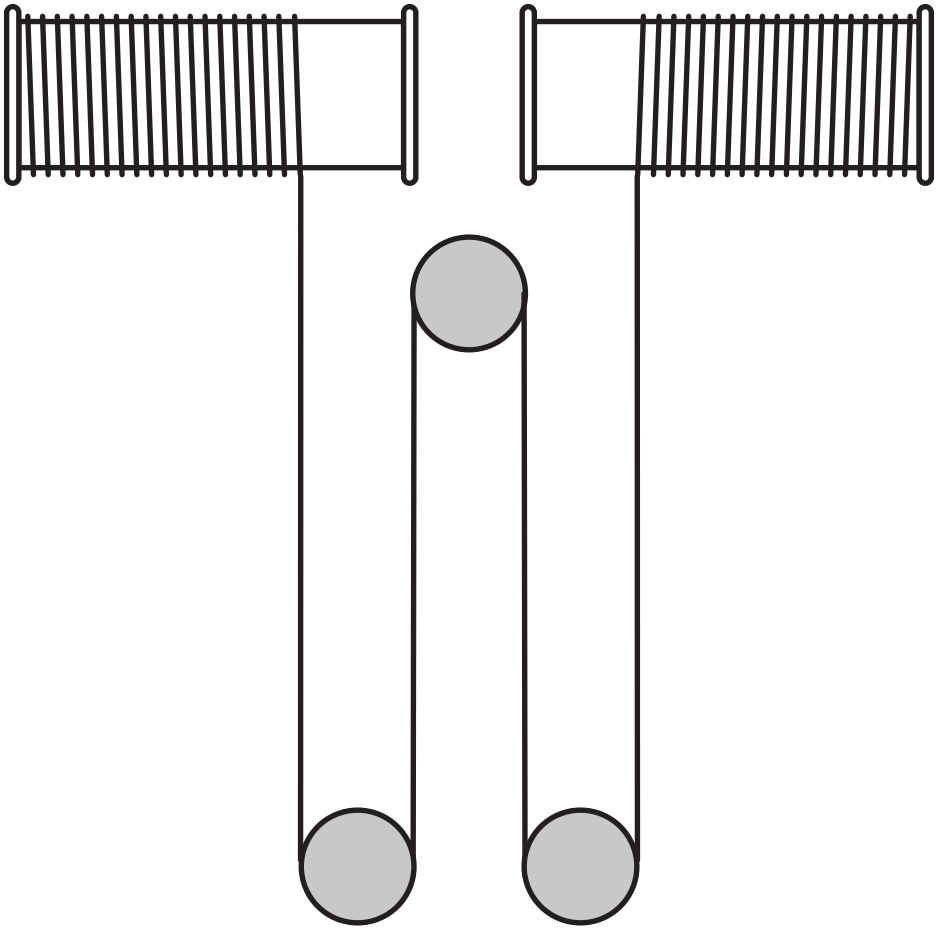

Fig. 2: Esquema de una grúa con doble tambor y polea compensadora (la más pequeña, en el centro)

1.3.3. Inspecting at the wrong location (3): The equalizer sheave

Los dos puntos de entrada del cable en la polea compensadora[4] de los puentes-grúa son los lugares más críticos para que se produzca una falla en el cable de acero. La Fig. 2 muestra un dibujo esquemático de una grúa de doble tambor con una polea compensadora de este tipo.

Típicamente durante la elevación, estas secciones del cable en la polea de compensación no estarán sometidas a flexión. Esa es la razón por la que los diseñadores de grúas creen que se les debería permitir hacer las poleas de compensación más pequeñas que las demás poleas del sistema.

Sin embargo, durante el traslado de la carga, entre la elevación y su nuevo descenso, la carga oscilará bajo la grúa. Esta oscilación de la carga obligará a estas secciones críticas a entrar y salir continuamente de la polea ecualizadora, sufriendo así una gran cantidad de ciclos de flexión.

4 En inglés *equalizer sheave*. La traducción más correcta sería *polea ecualizadora*, pero vamos a poner *polea compensadora*, que es más común. (NdT)

Durante la misma oscilación de la carga, también hay otras secciones de cable situadas en los puntos de entrada en las otras poleas de la grúa se verán sometidas al mismo número de ciclos de flexión. Sin embargo, debido a la constante variación de la altura de elevación, cada vez se verán afectadas diferentes secciones de cable, mientras que en la polea de compensación serán siempre las mismas secciones.

El hecho de que la polea de compensación tenga a menudo un diámetro inferior al de las demás poleas aumenta los daños por fatiga en esta zona, y el hecho de que la polea de compensación sea a menudo la menos accesible hace aún más improbable la detección de una falla del cable en este lugar.

1.4. Roturas de alambre internas (1): Fatiga por tracción

Los cables sometidos a una fuerte fatiga por tracción y a poca o ninguna fatiga por flexión tienden a fallar desde adentro hacia afuera.[5]

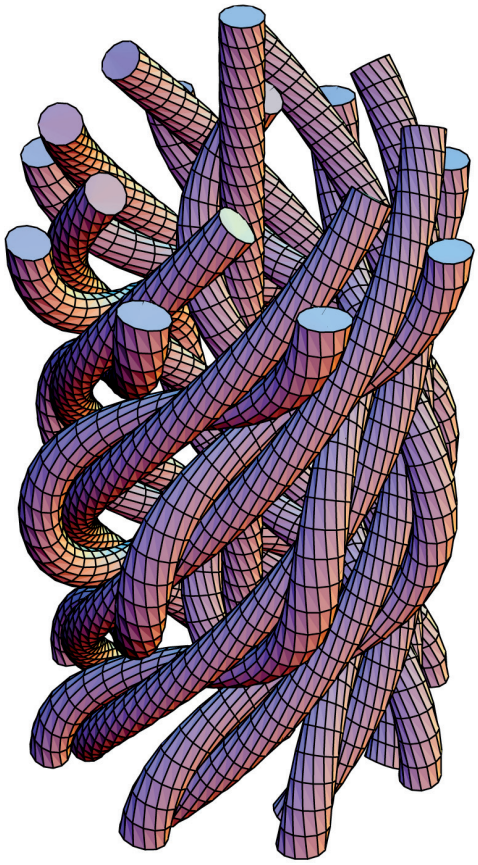

Fig. 3: 14 de los 49 alambres de un cable de diseño simple 7×7.

5 Por ejemplo, el cable levante de pluma, los tensores de pluma y, especialmente, los cables estáticos. (NdT)

La Fig. 3 muestra 14 de los 49 alambres de un cable de una simple construcción 7×7. En un cable de este tipo, hay un alambre central que es recto, 12 alambres que forman una hélice y 36 alambres que forman una hélice alrededor de otra hélice. Si este cable se alargara, por ejemplo, 1 cm, el alambre central recto tendría que alargarse 1 cm, mientras que todos los demás alambres se adaptarían a la nueva longitud, en parte estirándose y en parte simplemente cambiando su ángulo. Normalmente, las hélices se estirarían más que las dobles hélices.

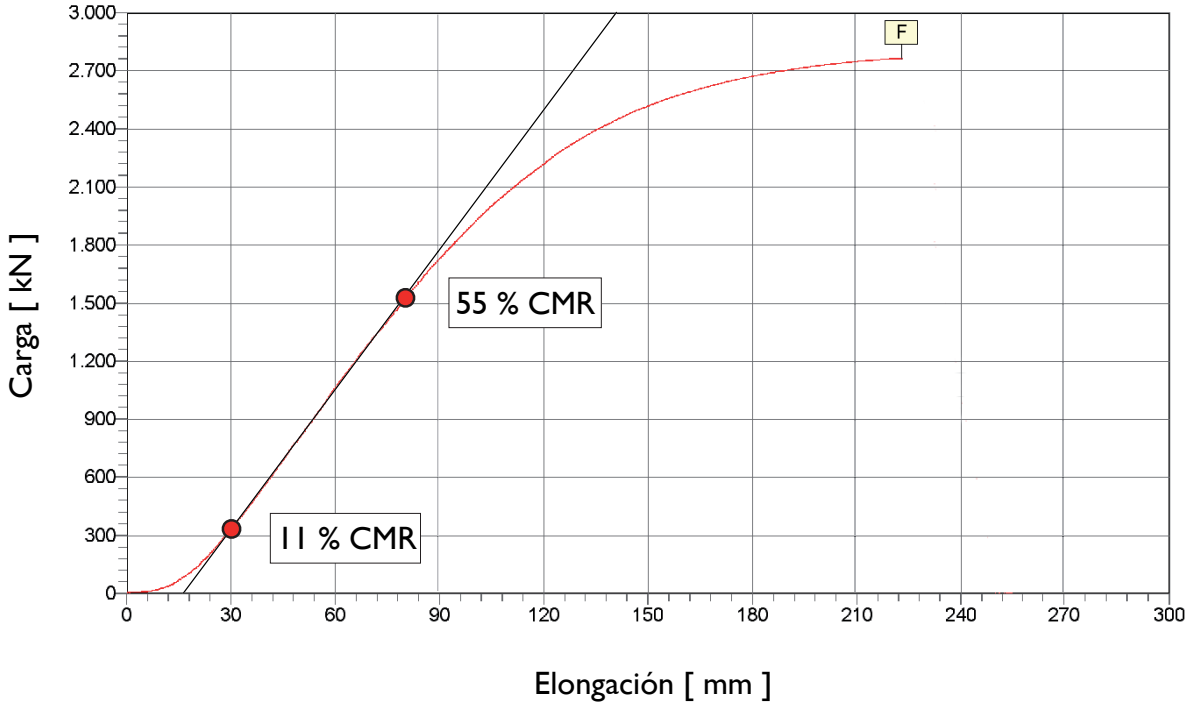

Fig. 4: Diagrama carga – elongación de un cable de acero típico.

En un cable de acero típico, el diagrama carga-elongación (Fig. 4) se caracteriza por tener tres zonas: una zona no lineal en la que los elementos más cortos soportan la mayor parte de la carga del cable (desde 0 hasta aproximadamente el 11% de la CMR[6]), una zona lineal en la que todos los elementos del cable comparten la carga (desde aproximadamente el 11% hasta aproximadamente el 55% de la CMR) y otra zona no lineal en la que cada vez ceden más elementos del cable (desde aproximadamente el 55% de la CMR hasta la rotura del cable).

6 CMR es la abreviatura más usual para *Carga Mínima de Rotura*, en inglés *MBL (Minimum Braking Load)*. (NdT)

Si el cable se somete a cargas preponderantemente de tracción inferiores a aproximadamente el 11% de su CMR, lo más probable es que falle desde dentro hacia fuera.

Esto significa que, especialmente en instalaciones „muy seguras“ (que funcionan con una tracción relativamente baja, o sea „factores de seguridad“ elevados), el inspector de cables no tendrá ninguna posibilidad de detectar un deterioro creciente del cable.

1.5. Roturas de alambre internas (2): Torsión inducida externamente al cable

Muy a menudo no se detecta una falla en el cable porque la misma se produce desde adentro hacia afuera.

Normalmente, los cables de acero se diseñan de forma que el alma de acero y los cordones[7] exteriores compartan la carga en proporción a su sección transversal metálica. Sin embargo, la torsión inducida al cable (durante la producción, durante la instalación, por la máquina o por el propio peso del cable) puede provocar un cambio en la distribución de la carga que sobrecargará el alma.

Este efecto es aún más pronunciado en los cables antigiratorios. Dado que en estos cables el alma de acero tiene un sentido de torsión opuesto al de la capa de cordones exteriores, un giro del cable en el sentido de destorcer (alargar) la capa exterior provocará un acortamiento del alma, y por lo tanto una transferencia de carga de los cordones exteriores al alma. Por eso, estos desbalanceos de la carga entre los cordones exteriores y el alma del cable son mucho más probables en los cables antigiratorios.

El gran número de fallos de cables (especialmente antigiratorios) con 12 o aproximadamente 12 cordones exteriores indica que el número de cordones exteriores del cable tiene una gran influencia sobre si este desplazamiento de carga provocará o no la rotura del cable.

Al aumentar el número de cordones exteriores, disminuye la participación de éstos en la sección metálica del cable y aumenta la del alma (Fig. 5).

La Fig. 6 muestra el porcentaje que representa el alma en la sección transversal metálica del cable.

Supongamos ahora que el cable funciona con un factor de diseño de 4. Esto significa que la sección transversal del cable estará sometida a una tracción que representa el 25% de la carga de rotura.

7 En todo este artículo debe entenderse que la palabra *alma* se refiere a un alma de acero de tipo cable independiente (IWRC). El autor usa indistintamente la palabra *core* o la sigla IWRC. En cuanto a la palabra *cordón*, la adoptamos como traducción de la palabra inglesa *strand*. En verdad hay dos traducciones posibles para strand: *cordón* y *torón*. En España, Argentina, Uruguay, Paraguay y Bolivia se usa más *cordón*. En cambio, en toda la costa del Pacífico de Latinoamérica desde Chile hasta México, más Venezuela y Caribe, se usa preferentemente *torón*. Ambas palabras son correctas y significan exactamente lo mismo. En cambio, no recomiendo usar la palabra *hebra*, que puede confundirse con un solo alambre. (NdT)

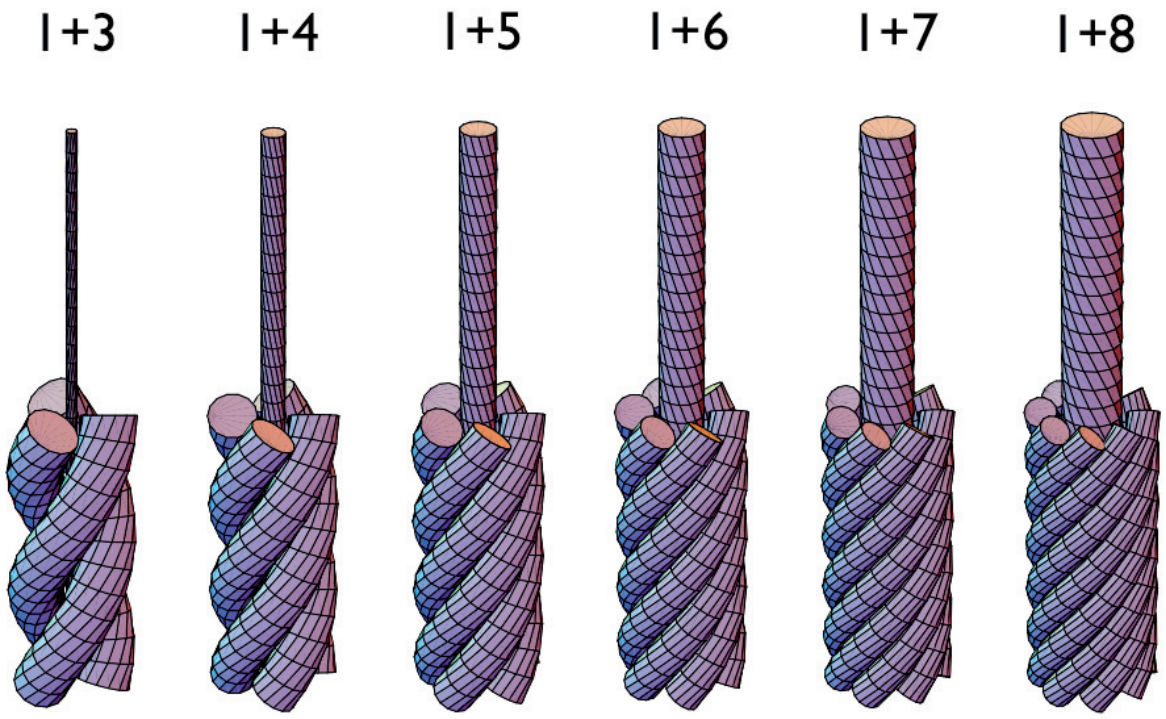

Fig. 5: Relación entre la cantidad de cordones exteriores y el tamaño del alma en un cable.

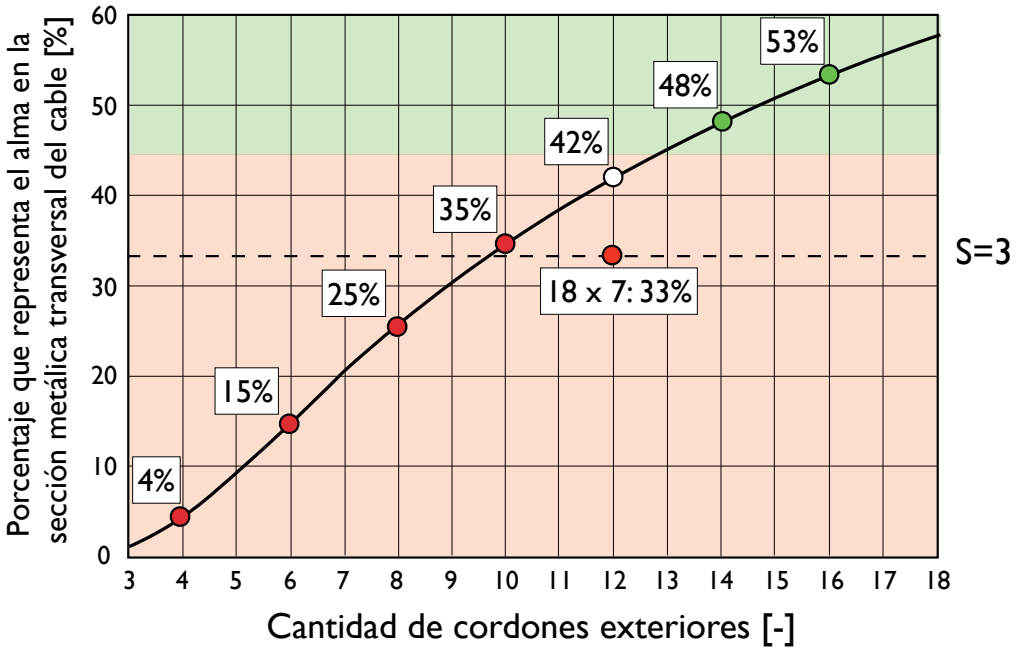

Fig. 6: Porcentaje que representa el alma en la sección metálica transversal del cable.

1.5.1. El cable de 4 cordones

Si, debido a una torsión, los cordones exteriores de un cable de 4 cordones se descargaran y el alma (que representa el 4% de la sección transversal del cable) tuviera que soportar toda la carga, se rompería inmediatamente. Pero no pasaría nada grave: la carga se transferiría a los cordones exteriores, y el 96% restante de la sección transversal del cable la soportaría con seguridad.

1.5.2. El cable de 18 cordones exteriores

Si, debido a una torsión, los cordones exteriores de un cable de 18 cordones exteriores se descargaran y el alma (que representa el 55% de la sección transversal del cable) tuviera que soportar toda la carga, la capacidad del alma sería el doble de la carga aplicada y por lo tanto no se rompería. Los cordones exteriores se aflojarían y con el tiempo seguramente formarían una jaula de pájaro, pero eso no provocaría una catástrofe.[8]

1.5.3. Y entre medio: el cable de 12 cordones exteriores

En un cable típico de 12 cordones exteriores[9], el alma contiene entre el 33 y el 40% de la sección metálica del cable. Si, debido a la torsión, los 12 cordones exteriores se descargaran y el alma tuviera que soportar toda la carga, la capacidad del alma sólo sería ligeramente mayor que la fuerza aplicada y, por lo tanto, al principio podría soportar la carga. Sin embargo, se estiraría lo suficiente como para impedir la formación de una jaula de pájaro, o sea que no habría un indicador del estado inseguro. Y luego se deterioraría muy rápidamente. Una vez que se rompiera el alma, los cordones exteriores se verían sometidos a la carga completa como carga de impacto y se romperían también.

Podemos hacer los mismos razonamientos para un caso en el que el factor de diseño sea 3, que es el mínimo permitido para grúas. Este factor de diseño S=3 se puede ver también en la Fig. 6. Los cables con puntos verdes son seguros inclusive si se forma una jaula de pájaro, ya que el alma que representa el 48% o el 53% de la sección transversal del cable no se va a romper con una carga del 33% de la CMR. El cable de 12 cordones con el 42% podría romperse debido a la carga de impacto adicional; pero el cable de 12 cordones con sólo el 33% sección en el alma, se romperá sin ninguna duda, lo mismo que el resto de cables con puntos rojos.

8 El autor se refiere típicamente al cable 40x7, con 18 cordones exteriores. En el cable 35x7, más difundido en Latinoamérica, que tiene 16 cordones exteriores, se aplica exactamente el mismo razonamiento (el alma ocupa el 53% del área metálica) (NdT)

9 Por ejemplo el clásico 19x7 o 18x7, cuyo uso va dejándose de lado de a poco. (NdT)

En general, en cualquier cable, un giro provocado externamente en el sentido de destorcerlo (abrir los cordones) va a alargar la capa exterior y el alma en distintas proporciones.

Entonces, la diferencia de largos va a provocar una transferencia y un desbalanceo de la carga entre las capas.

1.6. Corrosión

La corrosión, y especialmente la corrosión interna, es una causa frecuente de rotura de los cables de acero.

Uno de los accidentes de cable más caros que se han producido se debió a la corrosión interna (Fig. 7). El cable, no galvanizado, se había fabricado con muy poca lubricación y había funcionado como cable de elevación en una plataforma offshore [10] durante varios años.

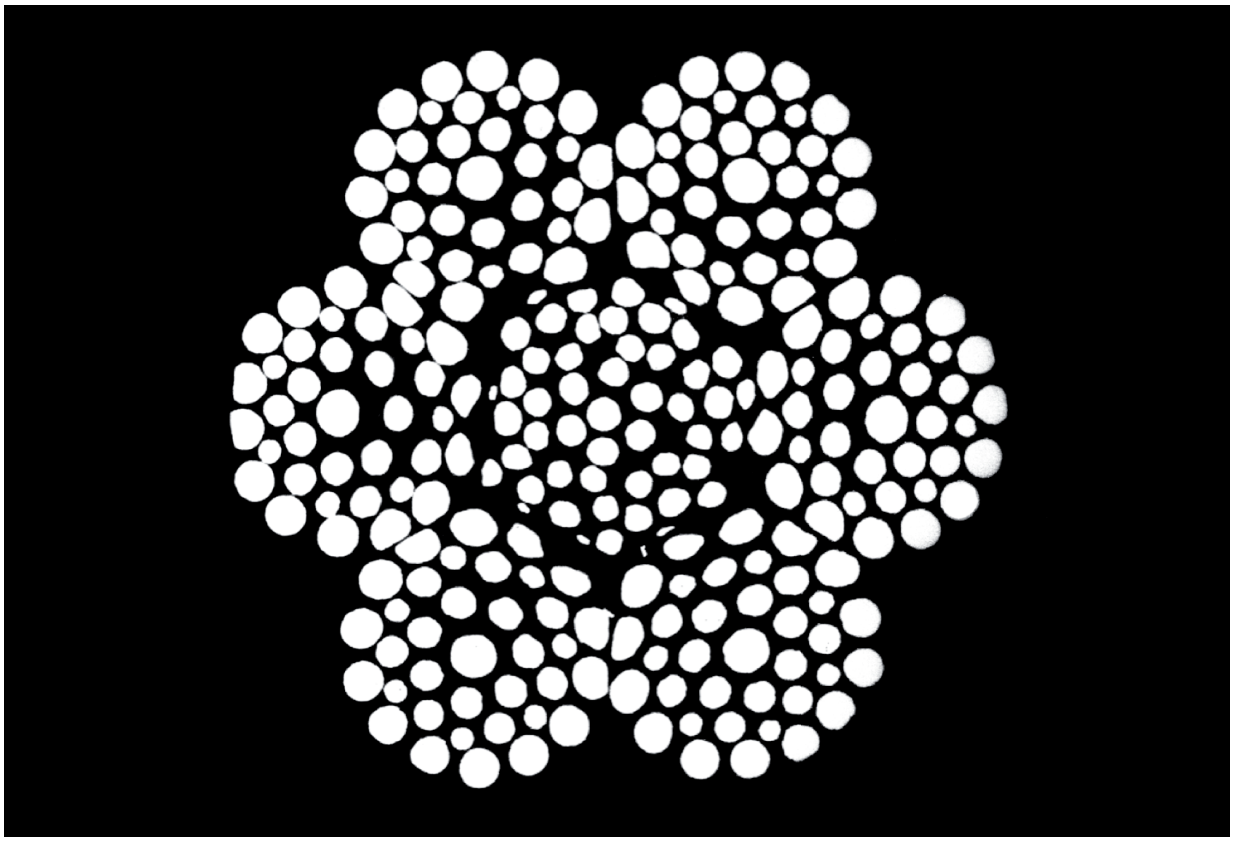

Fig. 7: Este cable muestra una severa corrosión y abrasión interna, mientras que el exterior aparenta estar bueno

10 Dejamos sin traducir la palabra *offshore* debido al amplio uso que tiene para definir la industria completa de la explotación petrolera marítima, mejor que cualquier traducción como podría ser *costa afuera*. (NdT)

Para proteger el cable del ambiente corrosivo, se lo relubricaba externamente. Sin embargo, el lubricante no penetraba en el interior del cable[11]. Por lo tanto, la corrosión y la abrasión destruyeron el cable internamente, mientras que el exterior impedía que el inspector viera el problema.

Finalmente, el cable se rompió durante un levantamiento pesado, provocando graves daños.

2. Roturas impredecibles (catastróficas)

A diferencia de las fallas predecibles de los cables, que suelen producirse al final de la vida útil normal de un cable de acero, las roturas catastróficas pueden producirse más o menos en cualquier momento de la vida útil del cable.

2.1. El cable que "se cae de la polea"

Probablemente, la causa más frecuente de una rotura catastrófica del cable es que éste „se caiga de la polea"[12]. En realidad, la expresión no está bien elegida porque lo que ocurre no es que el cable se cae de la polea ni que salta, sino que no alcanza a entrar en ella. Hay varias causas que pueden provocar una falla de este tipo.

2.1.1. Causa 1: Ángulos de desvío excesivos[13]

Cuanto mayor sea el ángulo con el que el cable de acero ataca la polea, mayor será la probabilidad de que el cable no consiga entrar en ella. Esta es una de las razones por las que se limitan los ángulos de desvío en los sistemas de reenvío.

11 El lubricante puede no penetrar por mal procedimiento, pero más a menudo ocurre por usar un lubricante no específico o adecuado para cable de acero. (NdT)

12 La expresión que usa literalmente el autor es "*jumps the sheave*" o sea "*salta de la polea*". En el Cono Sur usamos la expresión "*se cae de la polea*". Cualquiera que sea, se entiende el significado figurado. Y cualquiera que usemos de las dos, no es la más feliz, como explica el autor unas líneas más abajo. (NdT)

13 El ángulo de desvío (*fleet angle*) es el ángulo que forma la línea o eje del cable con el plano principal de la polea o tambor (o sea el plano perpendicular al eje de giro). La expresión completa *fleet angle*, tal cual la definimos aquí, aparece únicamente en los diccionarios de Ingeniería. Una traducción mejor sería *ángulo de ataque*, como se usa en México, pero dejamos *ángulo de desvío* porque es mucho más común en la bibliografía en castellano. Para que un sistema de reenvíos funcione bien se requieren ángulos de desvío pequeños. (NdT)

2.1.2. Causa 2: Ángulos de garganta demasiado pequeños[14]

Por otro lado, cuanto menor sea el ángulo de la garganta[15] de la polea, más probable será que el cable no consiga entrar en ella.

En EE.UU., es más probable que un cable „se caiga de la polea“ que en otros países, ya que la norma estadounidense exige un ángulo de garganta de 30°.

La norma alemana DIN 15061 exige un ángulo de garganta mínimo de 45°, y la británica BS 6570 exige 52°. En estos países es mucho menos probable que un cable „se caiga de la polea“. Basándose en nuevos estudios, la última versión de la norma ISO 4308 permite específicamente ángulos de garganta de hasta 60°.

La Fig. 8 muestra ángulos de garganta de 30° (EE.UU.), 45° (Alemania) y 60° (ISO).

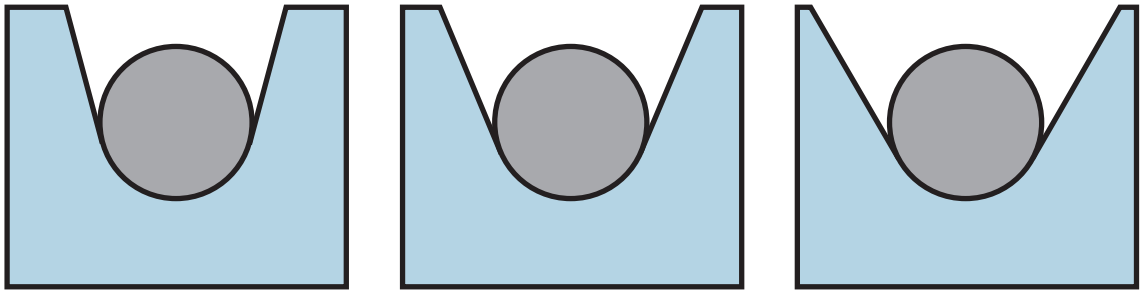

Fig. 8: Ángulos de garganta de 30° (EE.UU.), 45° (Alemania) y 60° (ISO).

2.1.3. Diámetros de garganta demasiado grandes para el diámetro de cable

Durante los últimos años, el autor ha analizado muchos accidentes causados por cables que “se cayeron de la polea”. En retrospectiva, encontró que en la mayoría de los casos el diámetro de la garganta de la polea era mucho mayor que el diámetro del cable (Fig. 9, derecha).

14 El ángulo de la garganta (*groove angle*) es el ángulo entre sus dos paredes, medido en un plano perpendicular al eje del cable. (NdT)

15 La palabra original en inglés es groove, que admite varias traducciones. Aquí optaremos por garganta cuando se refiere a la polea o canaleta cuando se refiere a un tambor. Evitamos la palabra ranura, aunque también se usa, pero es menos específica. (NdT)

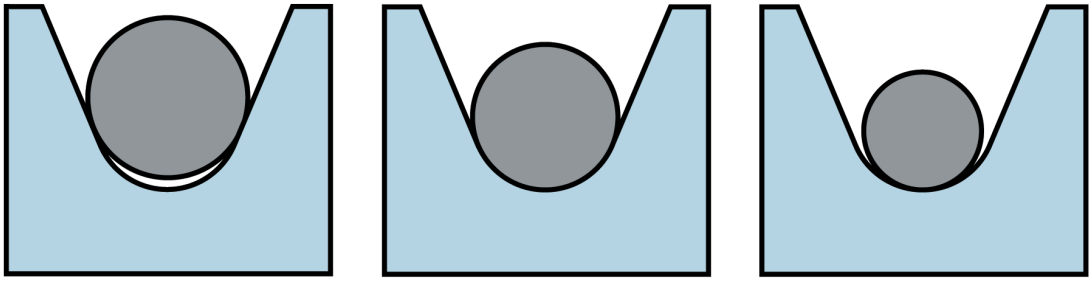

Fig. 9: Esquema mostrando el asiento de tres diferentes cables en un mismo diámetro de garganta de polea

También descubrió que los cables enrollados en tambores monocapa[16] con radios de canaleta demasiado grandes tenían tendencia a saltar por encima del borde de la canaleta hacia la espira vecina (que es lo mismo que „caerse de la polea“, excepto por el hecho de que esto no causa inmediatamente una rotura del cable).

La Fig. 10 muestra una superficie típica de rotura del alambre exterior de un cable „caído de la polea“ (fotografía del autor tomada con un microscopio electrónico de barrido).

El hecho de que la garganta fuera demasiado amplia para el cable aumentó la presión sobre una menor cantidad de alambres exteriores que apoyan sobre la garganta. Así se inició una rotura por fatiga en la parte inferior de la superficie de rotura.

A continuación, la zona de fatiga (en forma de lenteja) se propagó hacia el interior de la sección transversal del alambre hasta que el evento catastrófico creó una superficie de rotura residual mucho mayor.

Debido a que el cable no quedaba firmemente sujeto a sus lados después de entrar en la polea (como habría ocurrido en una garganta adecuada o estrecha), cualquier vibración u oscilación del cable fuera de la polea podía hacerlo rodar a uno y otro lado de la garganta demasiado amplia y así ganar impulso para el „salto final“ (Fig. 11).

En la parte inferior de la superficie de rotura de la Fig. 10, la banda aplanada a lo largo de la rotura fue causada por el balanceo del cable hacia uno y otro lado de la esa garganta demasiado grande.

16 Llamamos *tambor monocapa* (como traducción de *single layer drum*) al tambor en el cual todo el cable se enrolla sobre el cilindro metálico, o sea no hay una segunda camada de cable que se encima sobre la primera, típicamente los tambores helicoidales de los puentes-grúa. (NdT)

Fig. 10: Superficie típica de rotura del alambre exterior de un cable „caído de la polea“ (fotografía del autor tomada con un microscopio electrónico de barrido).

Fig. 11: Esquema mostrando cómo las vibraciones u oscilaciones del cable fuera de la polea pueden hacerlo rodar a uno y otro lado en una garganta demasiado amplia y así ganar impulso para el „salto final“

2.2. Un rayo

Durante la construcción de una torre de radio de 300 pies (100 m), todos los días se izaba a los trabajadores hasta lo alto de la torre en una barquilla[17]. Una mañana se rompió el cable de elevación y murieron cinco trabajadores.

Un análisis del cable mostró que en el lugar de la rotura y en otros dos puntos del cable varios alambres individuales habían resultado soldados entre sí (Fig. 12).

Fig. 12: Alambres individuales de un cable soldados entre sí como resultado de la descarga de un rayo a través del cable.

La reconstrucción del accidente mostró lo siguiente:

El sistema de elevación estaba compuesto por la guindola, un cable de 9,5 mm de diámetro, una polea que se sujetaba a la torre mediante una eslinga de fibra sintética y un tambor. La Fig. 13a muestra el elevador de personas en funcionamiento.

Cuando el elevador de personas no estaba en funcionamiento, el cable de elevación quedaba flojo y apoyado en la estructura de reticulado[18] de la torre.

Una noche cayó un rayo en la torre. Como ésta estaba aislada del suelo, la electricidad viajó a lo largo del cable y el tambor (que era la única conexión con tierra), fundiendo los alambres en los puntos de contacto entre el alambre y la torre (Fig. 13b). A la mañana siguiente, cuando se volvió a utilizar el montacargas, nadie estaba al tanto de los tres tramos de cable dañados por el rayo.

17 *Guindola* es como se la denomina en el Cono Sur y en España. En otros países también se usa *barquilla* o *canasta*. (NdT)

18 O estructura de *celosía*, como se la denomina en algunos países. (NdT)

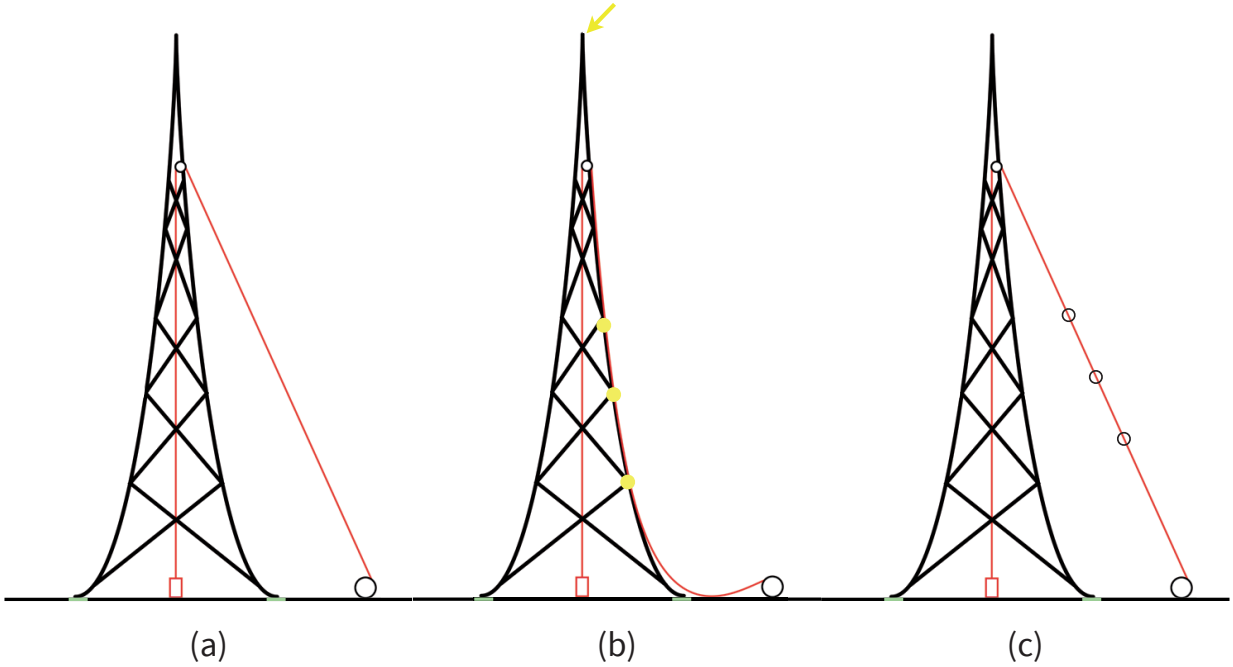

Fig. 13: Secuencia de los eventos que llevaron al daño del cable de la guindola de elevación de personal en una torre de radio.

Durante el primer izaje, cuando una de las partes dañadas entró flexionándose en el tambor, el cable se rompió.

Una inspección minuciosa de toda la extensión del cable que se hubiera realizado esa misma mañana probablemente habría revelado los daños, pero las probabilidades estaban claramente en contra. Si un cable es alcanzado por un rayo, la estructura del alambre se recristaliza (Fig. 14) y el alambre pierde aproximadamente 2/3 de su resistencia a la tracción. Pero ése no es el principal problema. Si los alambres vecinos se funden entre sí, el cable se vuelve muy rígido y los alambres se rompen instantáneamente cuando el cable se dobla alrededor de una polea o tambor.

Un cable de acero puede funcionar en un entorno muy caliente (Fig. 15) siempre que pueda conducir el calor al que está sometido a zonas más frías de la grúa. En Alemania, por ejemplo, alrededor del 80% de las grúas de cuchara funcionan incluso con cables de acero con relleno plástico[19] entre los cordones exteriores y el alma.

Pero si los cables permanecen al calor sólo un minuto de más, el material del alambre sufre un recocido y el cable se vuelve peligroso[20] (Fig. 16).

19 Otras maneras de denominar esta característica de diseño de los cables pueden ser, por ejemplo: *capa plástica intermedia, alma termoplastificada*, y varias más. Ocurre lo mismo en inglés, debido a que distintos desarrolladores y fabricantes le han puesto distintos nombres. Una buena explicación del tema se puede ver en el artículo del Ing. Verreet “Cables de acero y Sistemas de enrollado: Los últimos 40 años”, publicado en la página del autor. (NdT)

20 O sea, el cable sufre efectos similares a los que produciría un tratamiento térmico de recocido y el material pierde su resistencia de fabricación (NdT)

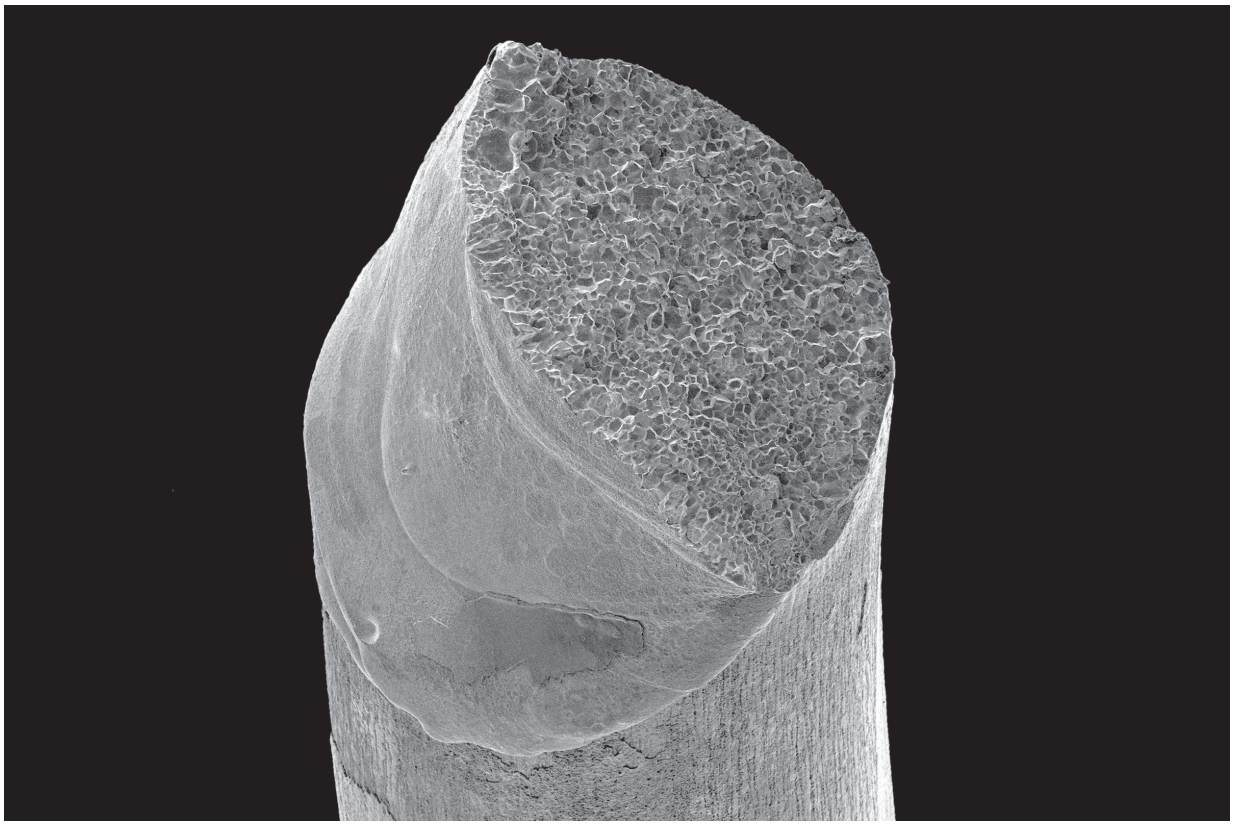

Fig. 14: Recristalización de la microestructura del alambre producida cuando el cable fue alcanzado por un rayo

Fig. 15: Cable de acero operando en una grúa de cuchara en una acería.

Fig. 16: Los alambres de este cable se calentaron demasiado y sufrieron un recocido

2.3. Fragilización por hidrógeno

Las líneas de vida de acero inoxidable a las que los trabajadores enganchan sus arneses de seguridad cuando caminan sobre la viga de una grúa se instalan normalmente con una pretensión relativamente moderada. Por lo tanto, fue una gran sorpresa que un día uno de estos cables se rompiera sin ninguna carga adicional.

Un análisis microscópico de los alambres del cable reveló un gran número de grietas en las proximidades del punto de rotura. A lo largo de su longitud cada grieta se había dividido en dos grietas que un poco más allá se habían vuelto a dividir (Fig. 17).

Un análisis con microscopio de barrido electrónico mostró que en cada punto de bifurcación la superficie del alambre se había partido como si el material fuera muy frágil (Fig. 18).

También en los extremos de la rotura los alambres mostraban una topografía típica de material frágil, muy poco habitual en el dúctil alambre de un cable de acero (Fig. 19).

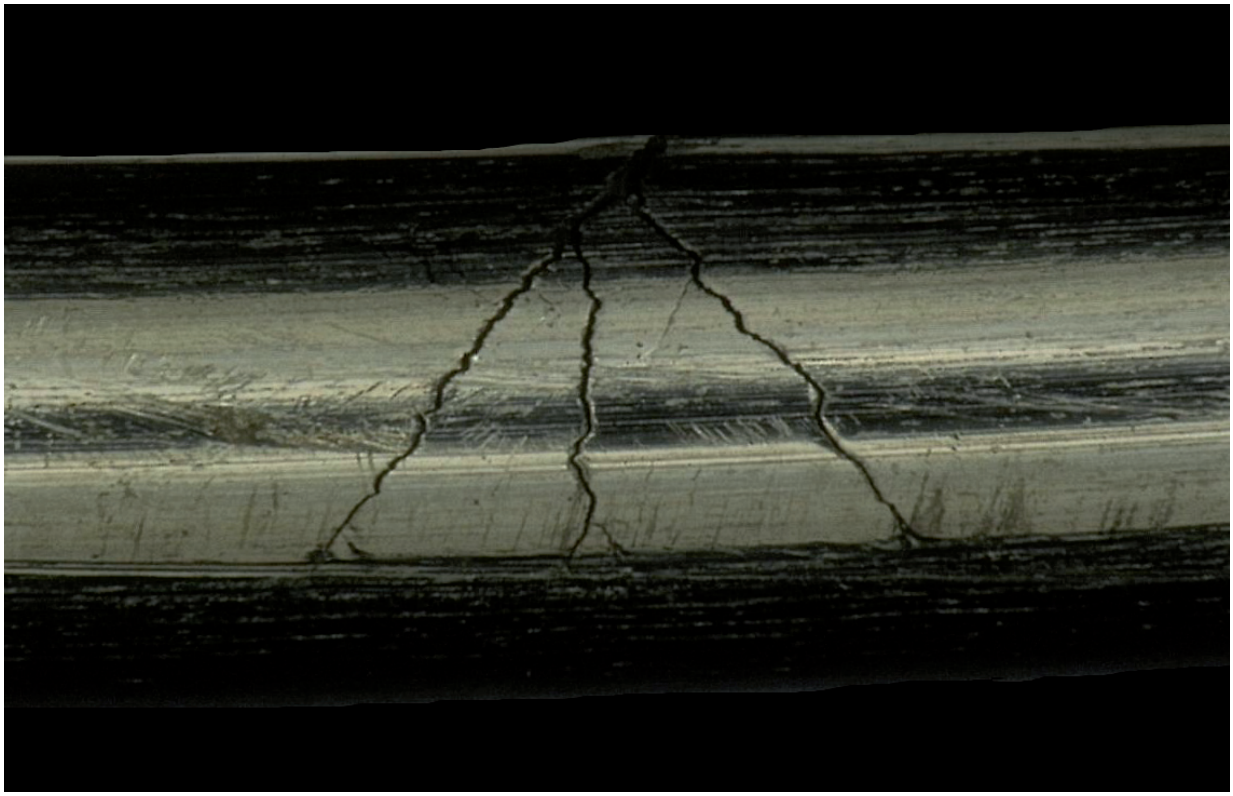

Fig. 17: Grietas en un alambre de acero inoxidable en las inmediaciones de la rotura del cable.

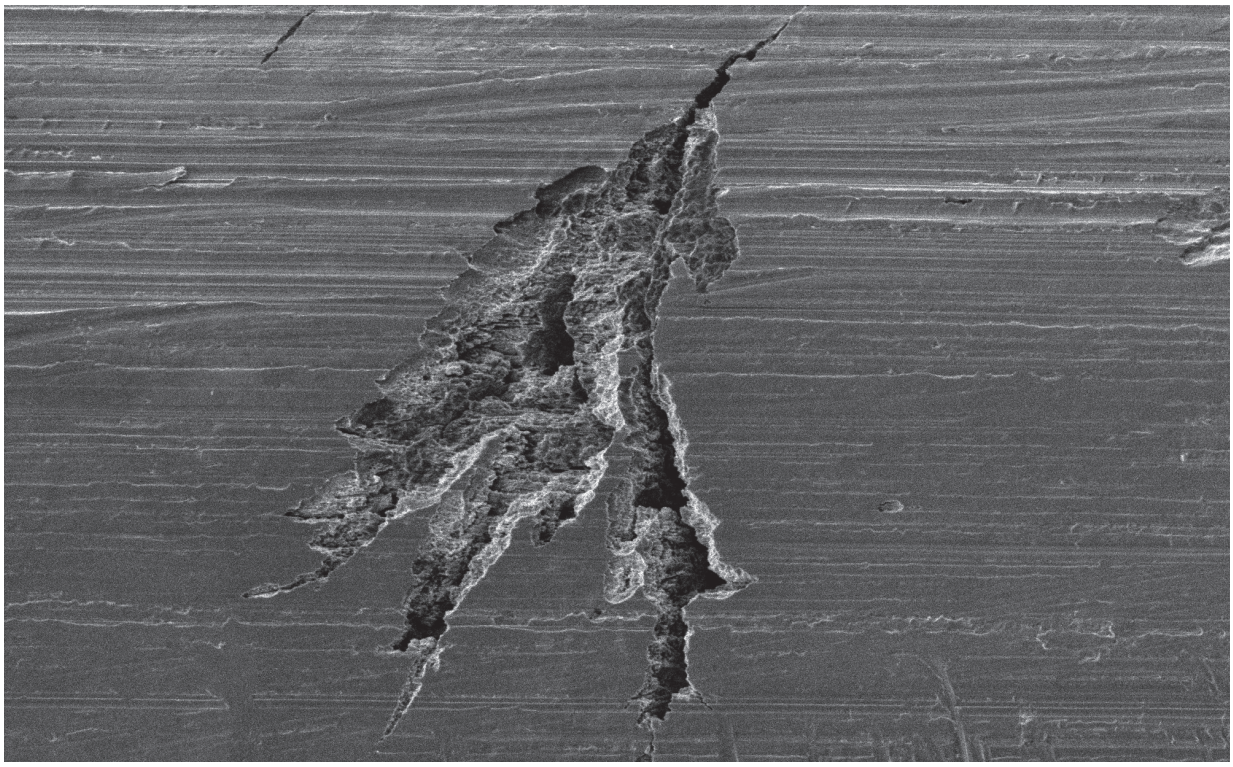

Fig. 18: Fotografía con microscopio de barrido electrónico que muestra la evidente fragilidad del material en cada punto de bifurcación donde se ha desprendido el material.

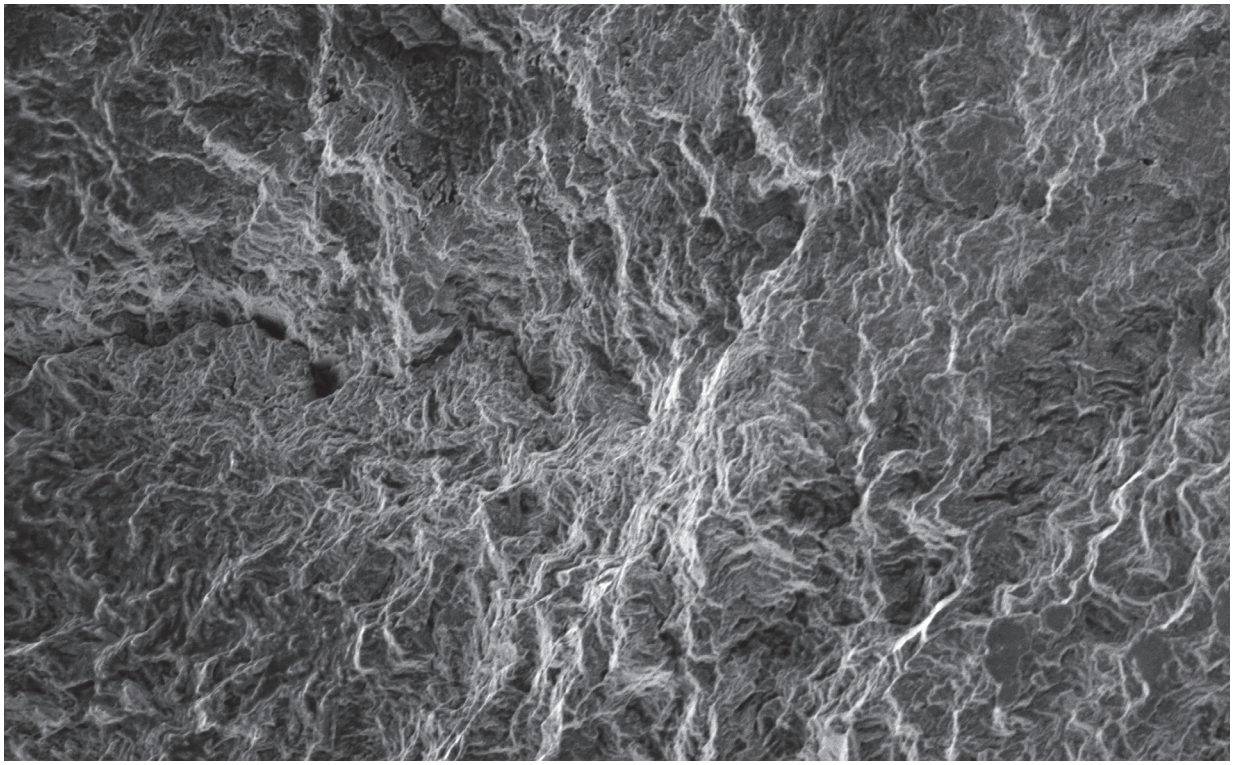

Fig. 19: Superficie de fractura del alambre roto, mostrando una topografía típica de material frágil, muy poco habitual en el dúctil alambre de un cable de acero

Cuando se investigó una posible exposición de la línea de vida a productos químicos, un trabajador recordó que una tubería que transportaba peróxido de hidrógeno[21] había reventado cerca del lugar donde se había roto el cable. La tubería había sido reparada, pero nadie se había preocupado por el cable. El hidrógeno se había difundido en el acero y había provocado fragilización por hidrógeno. Finalmente, la moderada pretensión del cable fue suficiente para romperlo.

21 En castellano al peróxido de hidrógeno se lo conoce habitualmente como agua oxigenada. (NdT)

2.4. Rulos y cocas[22]

Un cable de acero puede sufrir una torsión durante la instalación (Fig. 20), o bien la torsión puede ser inducida por la máquina o el modo de funcionamiento de la grúa. Ello puede advertirse por el giro de la pasteca.

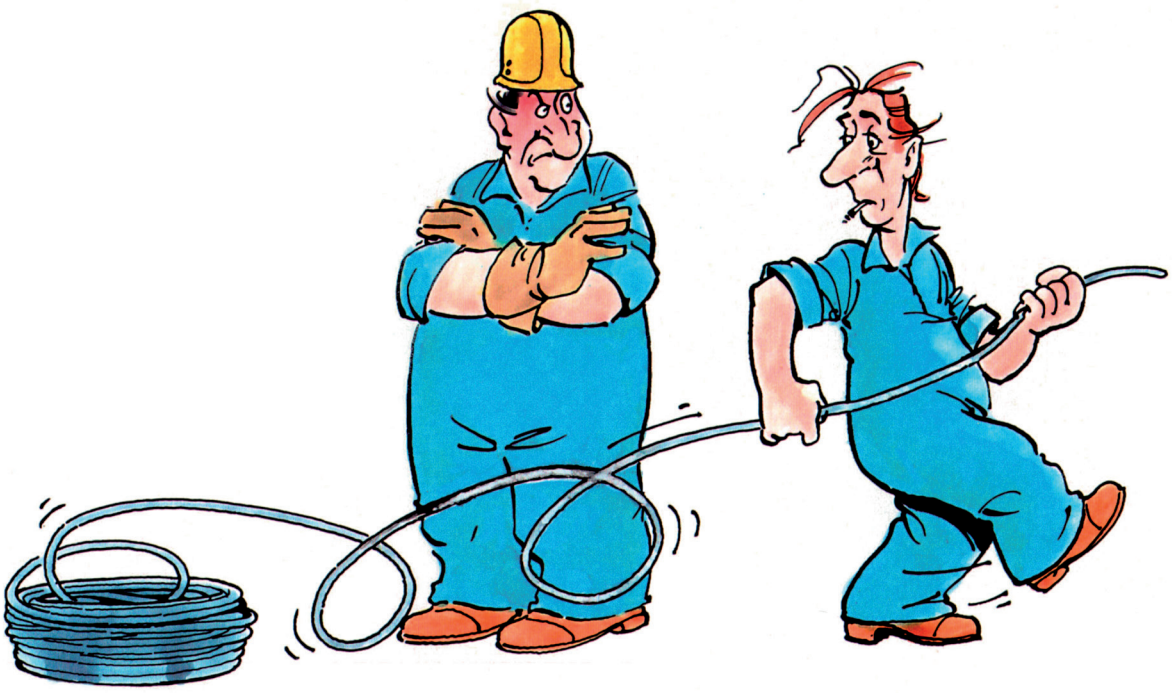

Fig. 20: Induciendo una torsión en el cable durante la instalación.

Pero muy a menudo un cable de acero funciona con torsión sin que el operario se percate de ello. Mientras el cable permanezca bajo tensión, puede funcionar bien. Pero basta que la tensión se libere por debajo de un valor crítico para que se forme un rulo (Fig. 21).

Si a continuación se tensa fuertemente el cable con el rulo, el mismo podría romperse de forma catastrófica[23].

22 El título en inglés de este capítulo 2.4. es *Kinks*, palabra que significa tanto pliegue como rulo o bucle. En la jerga del cable en castellano tenemos dos palabras para dos situaciones distintas: *rulo* (o *retorcedura*, o *bucle*), que designa el rulo propiamente dicho, tal como se ve en la Fig. 22 y *coca*, que designa la deformación permanente tipo doblez que se queda en un cable de acero como consecuencia de una tracción o tirón sobre un cable que ya tiene un rulo (cuando no provoca la rotura directamente). (NdT)

23 Muy probablemente se rompa, y si no se rompe dejará una coca permanente que inutiliza el cable (ver Nota 22). (NdT)

En las minas de pozo profundo, la parte del cable de elevación situada justo encima del skip[24] soporta el peso del mismo. El mismo cable 2000 m más arriba soporta el peso del skip más el peso de 2000 m de cable. La baja carga en la parte inferior del eje crea un bajo momento del cable en una dirección, la carga mucho mayor en la parte superior creará un momento mucho mayor. Como consecuencia de este desequilibrio, el tramo más alto del cable intentará girar en el sentido de apertura de los cordones (o sea, de desarmar el cable), mientras que la parte inferior del cable sufrirá una torsión en el sentido de cierre de los cordones.

Fig. 21: Un rulo en el cable de acero, que se hace visible a baja tensión

Este estado de torsión del cable no representa un verdadero problema durante el funcionamiento del pozo (aunque la vida útil del cable a la fatiga se verá reducida). Sin embargo, si durante el movimiento ascendente del skip se produce un freno de emergencia, el tambor de elevación dejará de girar mientras el skip continúa por inercia su movimiento ascendente. Como consecuencia de ello, el tramo de cable situado justo por encima del skip se va a aflojar (Fig. 22) y, debido a su estado de torsión, va a formar un rulo. Cuando el skip pierda impulso y retroceda cayendo, el cable muy probablemente se rompa[25].

24 Dejamos la palabra original *skip* puesto que es la que se usa ampliamente en la jerga minera, más que su posible traducción *volquete* o *contenedor*. (NdT)

25 Vale lo mismo dicho en Nota 20: Si no se rompe dejará una coca que inutilizará el cable. (NdT)

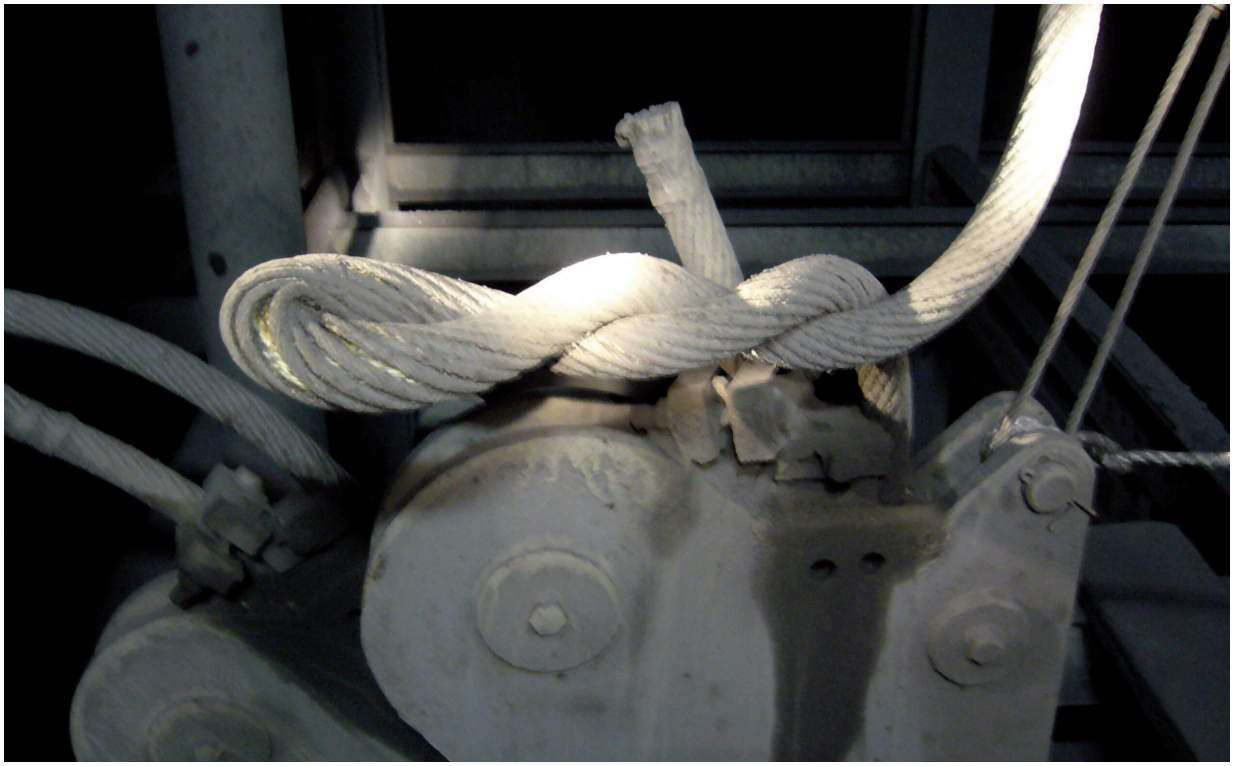

Fig. 22: Torcedura formada encima del skip de una mina de pozo profundo al aflojarse el cable.

Una solución para estos problemas es el uso de cables de paso variable[26]. Estos cables generan el mismo momento a la altura del skip (con poca carga) que 2000 m más arriba (con una carga mayor). Estos cables trabajarán libres de torsión, porque no tendrán que torsionarse para encontrar un estado de equilibrio. Esto mejora la vida útil a la fatiga y, al mismo tiempo, reduce el riesgo de que se formen rulos y cocas cuando el cable está flojo.

3. Resumen

Los cables de acero son elementos de máquina sometidos a grandes cargas. Una falla del cable puede tener consecuencias desastrosas.

Algunos accidentes son previsibles y están destinados a ocurrir si no se toman medidas correctivas. Otros nos toman por sorpresa.

Por eso tenemos que seguir estudiando los accidentes con cables de acero y enseñar las lecciones aprendidas.

La educación es un elemento clave para hacer más seguro el uso de los cables.

26 Para una explicación de los cables de paso variable se puede consultar el Boletín de OIPEEC mencionado en las referencias o, más accesible, el artículo “Cables y sistemas de enrollamiento, los últimos 40 años”, disponible en castellano en la página del autor. (NdT)

4. Referencias

Norma BS 6570 (1986): Selección, cuidado y mantenimiento del cable de acero, British Standards Institution.

Norma DIN 15061 (1977): Aplicaciones de izaje: Perfiles de gargantas de poleas para cables de acero. Deutsches Institut für Normung.

Norma ISO 4308-1 (2003): Grúas y aplicaciones de izaje – Selección de cable de acero – Parte 1: General, International Standards Organisation.

Verreet, R. (2001): Cables de acero de paso variable para aplicaciones mineras, Boletín OIPEEC[27] N° 81 - 2001, páginas 63-70.

27 OIPEEC es la Organización Internacional para el Estudio de la Durabilidad de Cables (por su sigla en francés), en la cual el Autor tiene una activa participación, además de haber participado en su fundación. (NdT)

Más información sobre el autor:
seile.com/bro_engl/WRN_roland-verreet-reprint.pdf

Información sobre el traductor:
Ricardo Muñiz es Ingeniero, con 30 años de especialización en el tema de Cable de Acero e Izaje. Vive en Argentina y se dedica a la docencia, principalmente como formador de instructores en izaje.

Wire Rope Technology Aachen
Dipl.-Ing. Roland Verreet

Grünenthaler Str. 40a • 52072 Aachen • Germany
Phone: +49 241- 173147 • Fax: +49 241- 12982
Mail: R.Verreet@t-online.de
www.ropetechnology.com