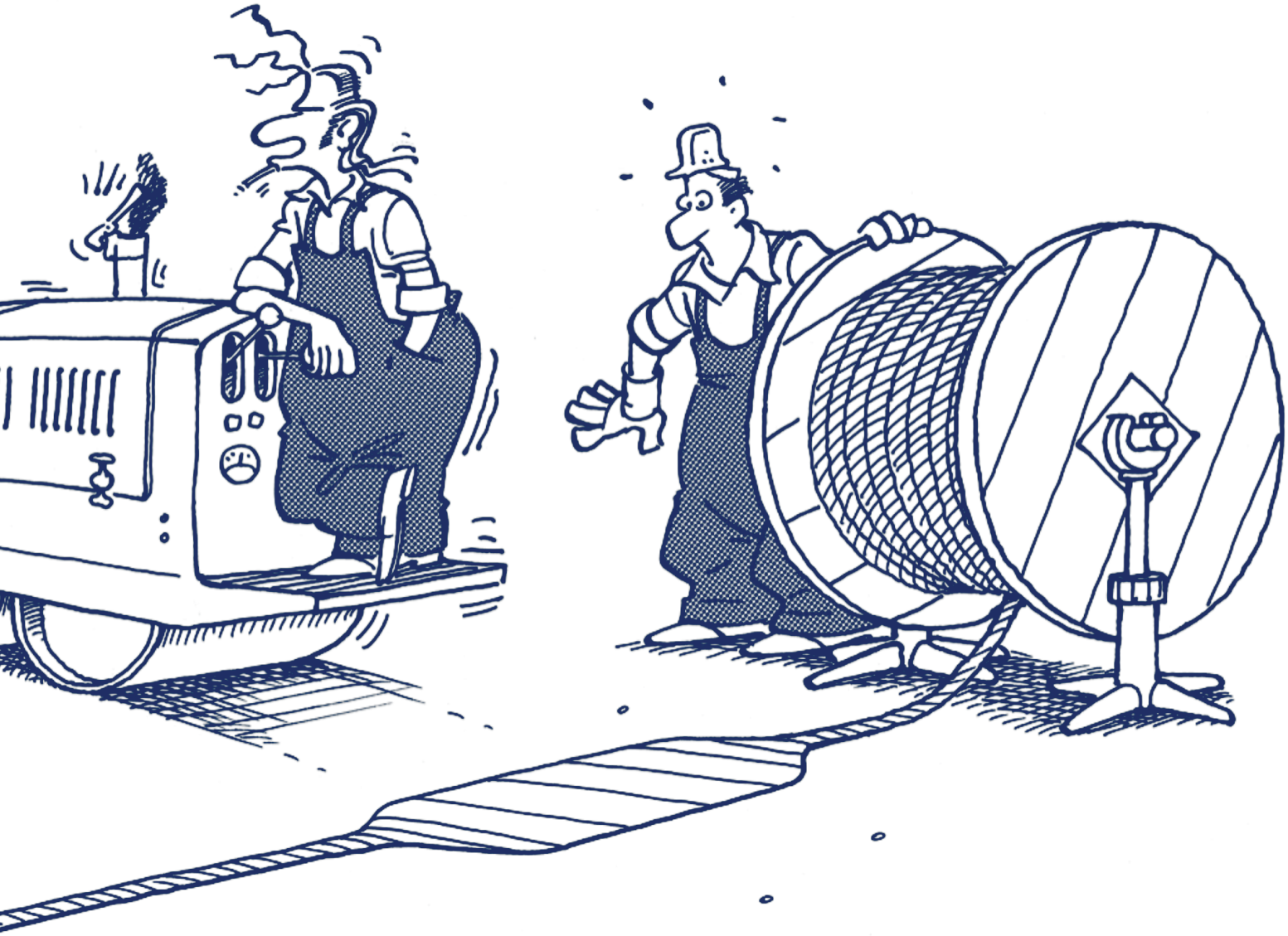
WIRE ROPE
TECHNOLOGY AACHEN



Cables de acero para grúas
Problemas y soluciones

Cables de acero para grúas
Problemas y soluciones

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

Índice

1. El cable de acero: Un elemento mecánico con redundancia múltiple.....4

2. Problema: Concentración localizada de roturas de alambres 6

3. Problema: Roturas internas de los alambres 7

4. Problema: Roturas interiores de alambres en los cables antigiratorios convencionales 10

5. Inspección electromagnética de cables.....15

6. Problema: Corrosión en los cables.....16

7. Problema: Vida útil a la fatiga insatisfactoria.....17

8. Problema: Cordones flojos y jaulas de pájaro.....25

9. Problema: Aplastamiento en el tambor.....30

10. Problema: Los buenos cables de acero son caros.....32

© 2002, 2004, 2012, 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

1. El cable de acero: Un elemento mecánico con redundancia múltiple

Imagínate la siguiente situación: Un inspector ha examinado el cable principal de una grúa de offshore y ha encontrado 10000 roturas de alambre. Sin embargo, insiste en que el cable está todavía en buenas condiciones de funcionamiento. ¿Puede ser cierto?

Antes de que se inventaran los cables de acero en 1834, la cadena era el medio de izaje más común. Sin embargo, la cadena tiene una desventaja esencial: En ella los elementos portantes de carga tienen una disposición lineal. Si falla un solo eslabón de la cadena, fallará todo el sistema (Figura 1).

Los cables de acero, en cambio, tienen una disposición paralela de los elementos portantes. Si uno de los elementos del cable falla, la resistencia a la rotura del cable de acero se reduce sólo localmente, y normalmente en menos del 1% (Figura 2).

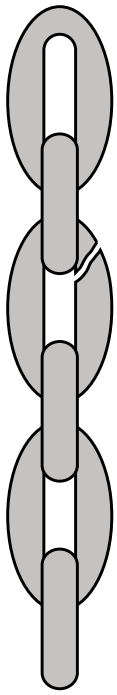


Fig. 1: Cadena. La rotura de un elemento lleva a la falla de todo el sistema.

Fig. 2: Cable. La rotura de un elemento prácticamente no tiene ningún efecto.

Los cables de acero son sistemas de elementos portantes múltiplemente redundantes. En un sistema redundante, cada elemento necesario para el buen funcionamiento del sistema existe por lo menos dos veces. Por ejemplo, algunas de las partes de nuestro cuerpo humano son redundantes: Si perdemos la vista en un ojo, podemos seguir viendo. Y si perdemos la audición en un oído, todavía podemos oír. Si en un cable de acero falla un alambre, todavía hay otros 250 alambres para soportar la carga.

Pero, ¿qué ocurrirá si durante la vida útil del cable fallan cada vez más alambres? Si perdemos la vista en ambos ojos, ya no podemos ver. Y si perdemos la audición en ambos oídos, ya no podemos oír. Del mismo modo, ¿no debería fallar también el cable de acero si cada uno de sus 250 alambres se rompe?

Parece increíble, pero la respuesta es no: un cable de acero puede seguir en buenas condiciones aunque cada uno de sus alambres tenga 200 roturas.

La Figura 3 muestra un esquema de los 250 alambres que componen un cable de acero (por razones de espacio, sólo se muestran 30 alambres). A lo largo del cable, cada uno de los 250 alambres está roto una vez. Sin embargo, cada rotura de alambre sólo representa una reducción local de la carga de rotura del cable. A pocos milímetros del lugar de la rotura, el alambre roto volverá a soportar toda su parte de la carga.

Si la distribución de las roturas de alambre es muy uniforme a lo largo del cable, de forma que en cada pequeño tramo de cable sólo se encuentre una rotura de alambre, la resistencia a la rotura de cada uno de esos tramos se debilita en menos del uno por ciento solamente. ¡En un ensayo de tracción, este cable de alcanzaría toda su resistencia a la rotura según catálogo, aunque cada uno de sus elementos esté roto!

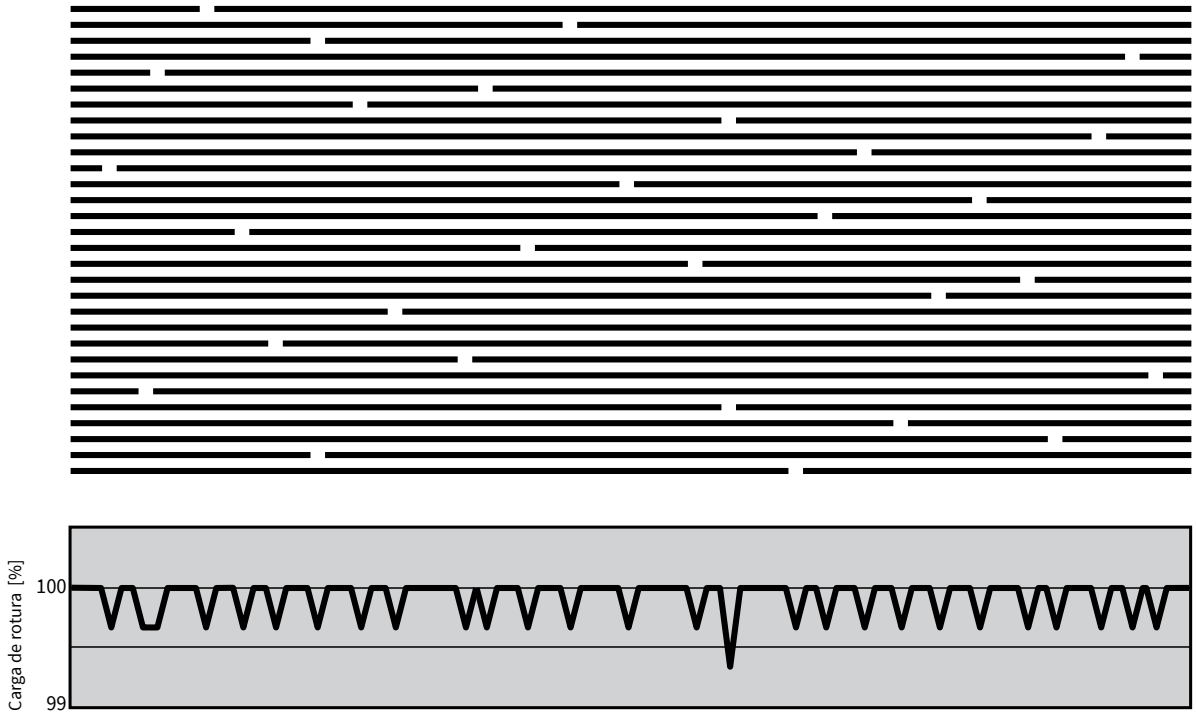


Fig. 3: Cada rotura de alambre sólo implica una reducción local de la carga de rotura del cable.

De todos modos, debe haber reglas sobre la cantidad de alambres rotos por unidad de longitud de cable que se puede tolerar. La cantidad de roturas para descarte se define en normas nacionales o internacionales, así como en las reglas de las sociedades de clasificación, como una cantidad admisible de alambres rotos visibles en una longitud de cable múltiplo de su diámetro, por ejemplo, en 6 veces el diámetro del cable (que representa la longitud de un paso de cableado) o en 30 veces el diámetro del cable (5 pasos de cableado).

Nuestro inspector ha encontrado 10000 roturas de alambre, pero el número para descarte no se alcanzó en ningún tramo de cable de una longitud de 6 x d o de 30 x d. Así que tenía toda la razón en su decisión de mantener el cable en servicio.

Este ejemplo demuestra que, en condiciones normales, un cable de acero es un elemento mecánico sumamente seguro y confiable.

2. Problema: Concentración localizada de roturas de alambres

Unos días después, nuestro inspector vuelve de examinar el cable principal de una grúa similar. Sólo ha encontrado 15 roturas de alambre, pero insiste en descartar el cable. Después de permitir 10.000 roturas de alambre en la primera grúa, esto suena algo extraño. ¿Podría el inspector equivocarse esta vez?

Si las roturas de alambre se concentran en un tramo muy corto del cable (Figura 4) como consecuencia, por ejemplo, de un mal uso o por un daño mecánico localizado, las pequeñas reducciones de la resistencia a la rotura sumadas llegarán a un valor crítico, y el cable deberá ser desechado. Aunque 500 m del cable estén como nuevos, hay que descartarlo porque 5 cm están en malas condiciones.

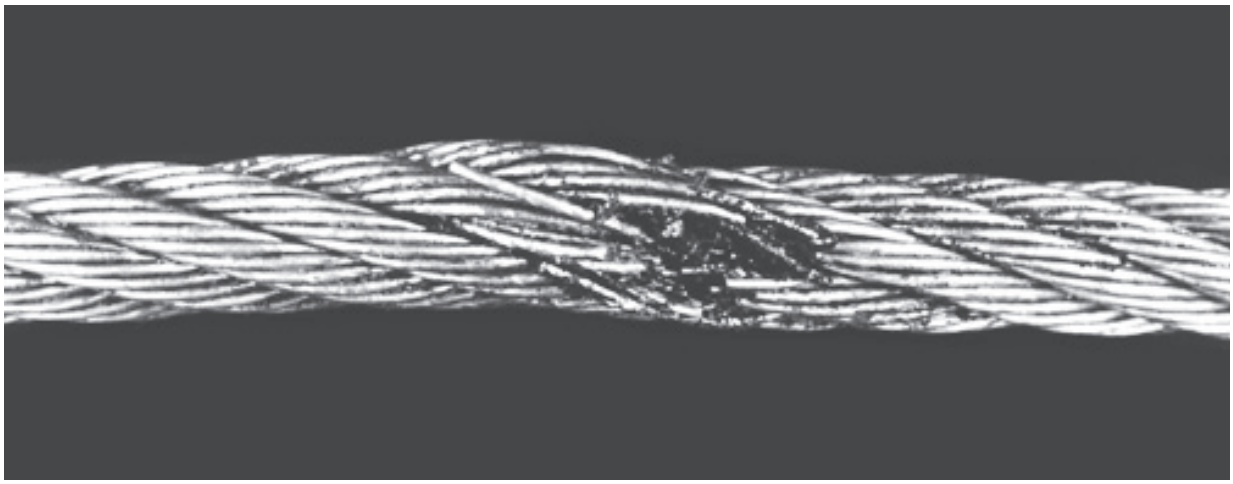


Fig. 4: Concentración localizada de alambres rotos

Los cables de acero con una concentración localizada de alambres rotos son inseguros. La decisión de nuestro inspector de descartar el cable es correcta.

3. Problema: Roturas internas de los alambres

El cable de una tercera grúa del mismo diseño no presenta ni una sola rotura de alambre. Tras examinar el cable, nuestro inspector insiste en que hay que desecharlo. ¿Por qué?

Durante un examen visual del cable, sólo se puede evaluar el estado de las partes visibles de los alambres exteriores. Sin embargo, la sección transversal de los alambres exteriores sólo representa alrededor del 40% del total de la sección metálica de un cable, y además sólo la mitad del largo de estos alambres exteriores es visible (Figura 5). Esto significa que durante la inspección visual del cable sólo podemos examinar el estado del 20% de la sección transversal del cable y esperanzarnos en que el 80% restante esté en las mismas buenas condiciones.

Inspección visual del cable =
20% de evidencia - 80% de esperanza

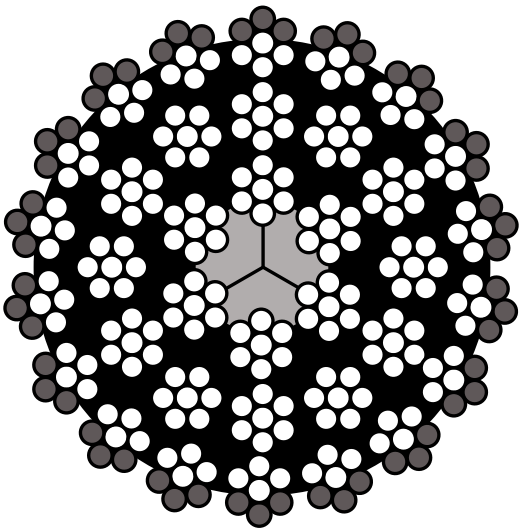


Fig. 5: Sólo se puede inspeccionar visualmente alrededor del 20% de la sección metálica del cable de acero.

Sin embargo, a menudo el 20% visible de la sección transversal parece estar bien, mientras que un gran número de roturas de alambre están ocultas en la parte del cable que no se ve. Los cables de acero con roturas internas y sin signos externos de daños son extremadamente peligrosos.

3.1. Problema: Roturas de alambres internas en un cable de 6 cordones[1] con alma de acero

Durante la inspección de un cable de acero 6x36 Warrington-Seale (Figura 7) con alma de acero no se encontró ningún alambre exterior roto. Sin embargo, flexionando el cable con la mano, resultó evidente que todos los alambres exteriores estaban rotos en el interior del cable (Figura 6).

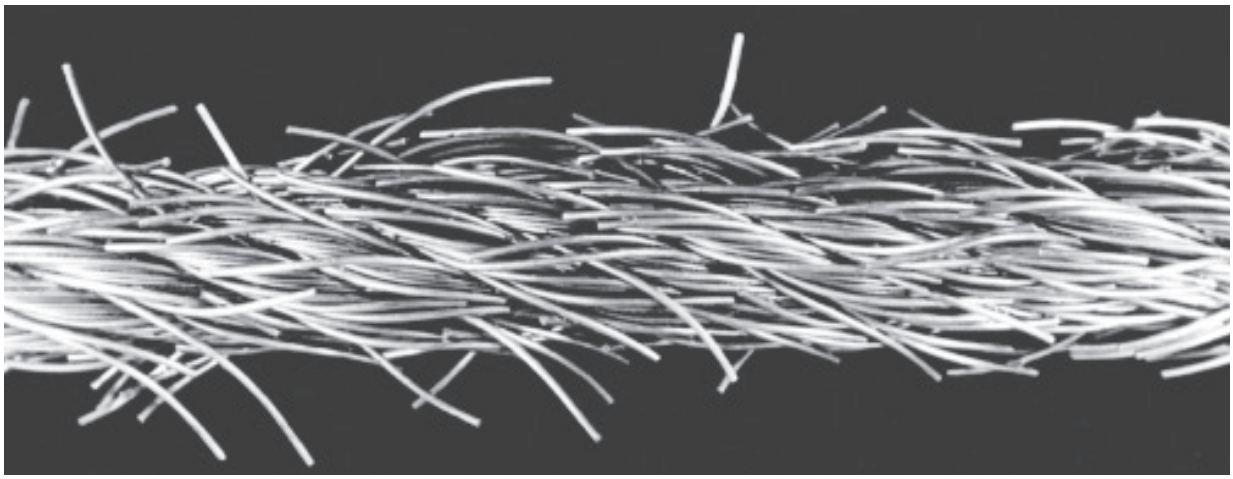


Fig. 6: Muchos alambres rotos en los puntos de contacto entre los cordones exteriores y el alma de acero

Las condiciones de contacto entre el alma de acero y los cordones exteriores se caracterizan por unas tensiones de contacto locales muy elevadas (Figura 9). Por lo tanto, los alambres exteriores pueden romperse en sus puntos de contacto con el alma de acero. La longitud libre de los alambres rotos que se ve en la Figura 7 muestra claramente que éste es el caso aquí.[2]

3.2. Solución: Cable de 8 cordones con relleno termoplástico

La Figura 8 muestra la sección transversal de un cable de 8 cordones con una capa de plástico intermedia entre el alma de acero y los cordones exteriores. La capa de plástico no sólo sella y mantiene el lubricante dentro del alma, protegiéndola contra el entorno corrosivo, sino que también evita el contacto metal-metal y reduce las presiones de contacto entre el alma y los cordones exteriores (Figura 10). Por lo tanto, la capa de plástico ayuda exitosamente a evitar las roturas internas de los alambres.

1 Adoptamos *cordón* 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 mucho más *torón*. Ambas palabras son correctas y significan exactamente lo mismo. En cambio, no recomiendo usar la palabra *hebra*, que puede confundirse con un solo hilo. (NdT)

2 La sigla *IWRC* significa *independent wire rope core*. Mantenemos la sigla en inglés debido a que es muy usada, y en cambio casi no se usa la sigla en castellano AACI (*alma de acero de cable independiente*). Cuando aparece en el texto la traduciremos simplemente como *alma de acero*, ya que aquí se refiere a las almas de acero en general, sin distinción de tipo. (NdT)

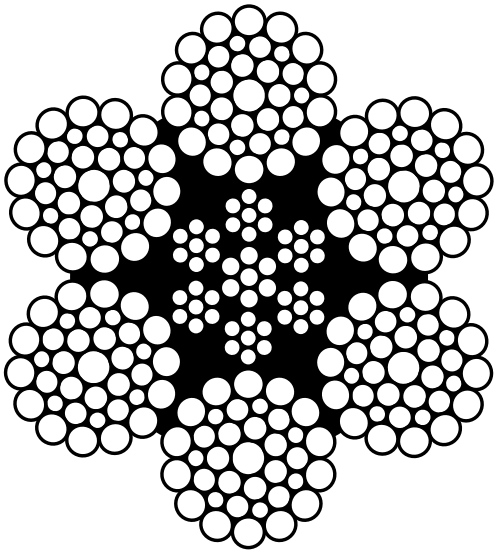


Fig. 7: Cable con alma de acero (6x36 Warrington-Seale IWRC)

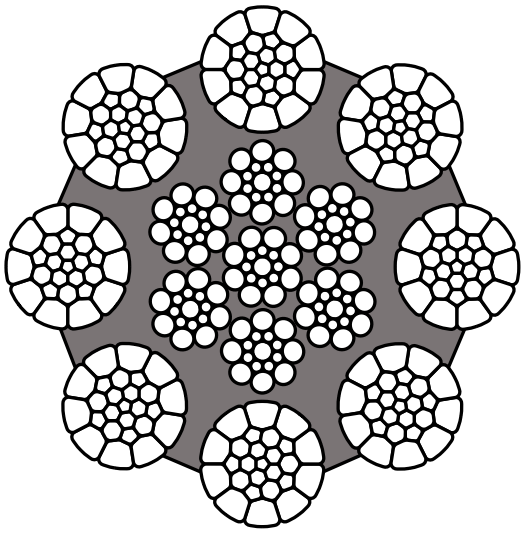


Fig. 8: Cable de 8 cordones con una capa plástica entre el alma de acero y los cordones exteriores

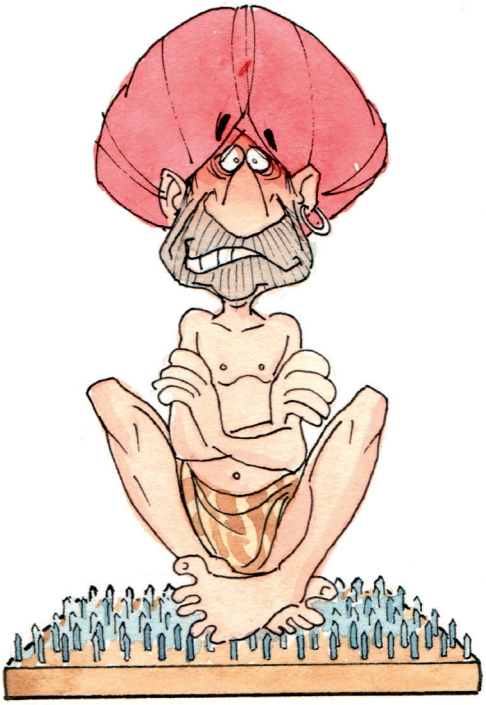


Fig. 9: Altísimas tensiones localizadas de contacto entre el alma de acero y los cordones exteriores (6x36 Warrington-Seale IWRC)

Fig. 10: La capa plástica actúa como un almohadón, reduciendo las tensiones de contacto entre el alma de acero y los cordones exteriores y ayudando a evitar roturas internas de los alambres.

4. Problema: Roturas interiores de alambres en los cables antigiratorios convencionales

En los cables antigiratorios, el cableado del alma se hace en sentido contrario al cableado de los cordones exteriores. Por ello, estos cables son aún más propensos a las roturas internas de alambre que los de 6 y 8 cordones.

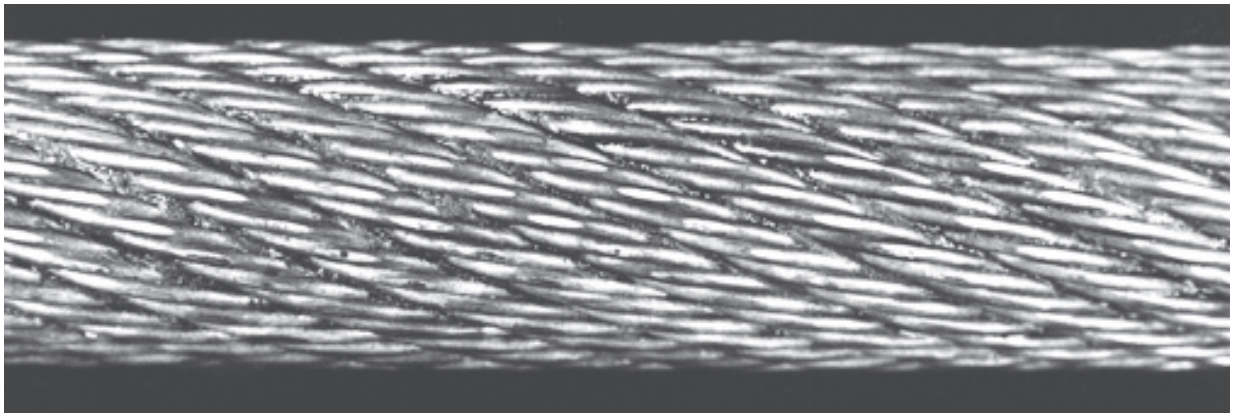


Fig. 11: Cable de acero 36x7 con unos pocos meses de servicio. Exteriormente, el cable de acero no presenta ni una sola rotura de alambre.

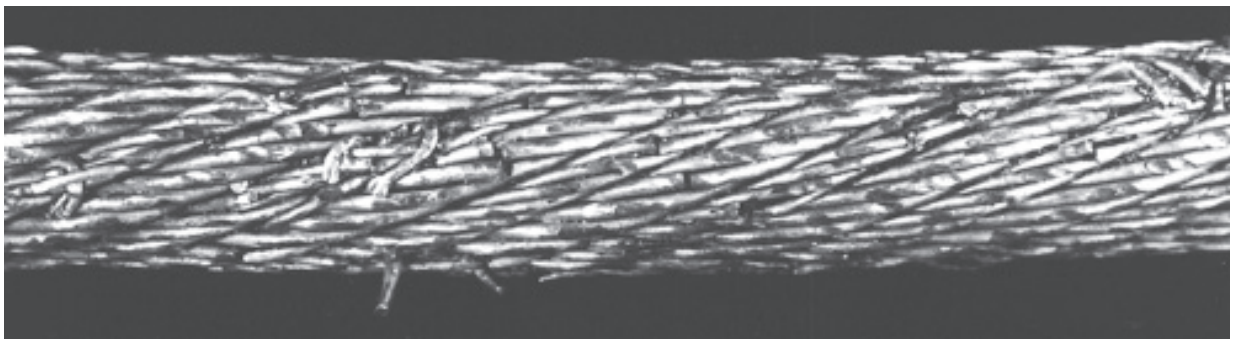


Fig. 12: Retirando la capa de cordones exteriores, se observan muchas roturas de alambre en el alma del cable en los puntos de cruce entre las dos capas de cordones.

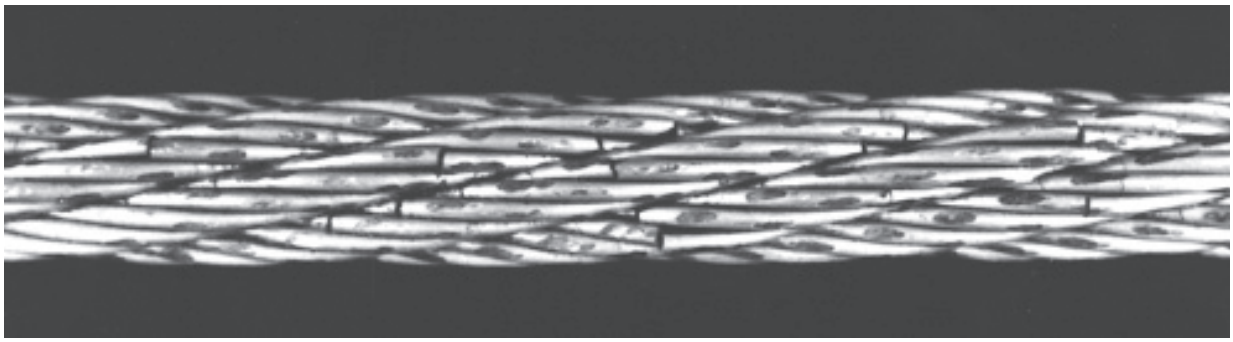


Fig. 13: La capa más interna también muestra una alta concentración de roturas de alambre.

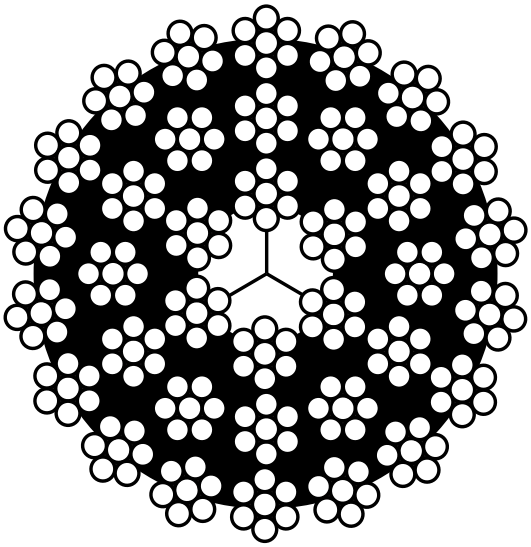


Fig. 14: Cable de elevación antigiratorio (36x7)

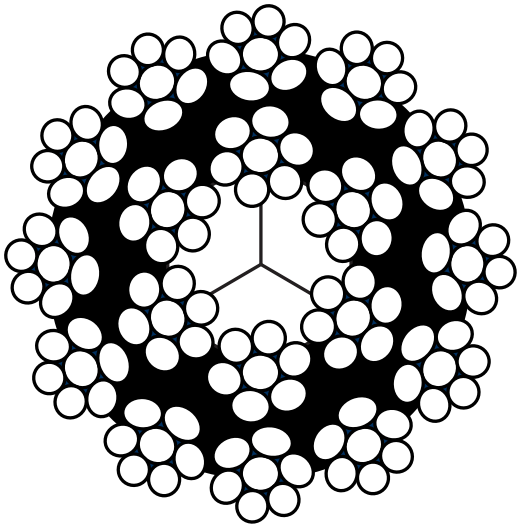


Fig. 15: Cable de elevación semi-antigiratorio (18x7)

La Figura 14 muestra la sección transversal de un cable de elevación antigiratorio 36x7. La figura 11 muestra la superficie visible de dicho cable con unos pocos meses de servicio. Exteriormente, el cable de acero no presenta ni una sola rotura de alambre.

Retirando la capa de cordones exteriores, se observan muchas roturas de alambre en el alma del cable en los puntos de cruce entre las dos capas de cordones (Figura 12). Retirando luego la segunda capa de cordones, se ve que la capa más interna también tiene una alta concentración de roturas de alambre (Figura 13).

4.1. Intermezzo: Los cables antigiratorios

Si utilizas cables 18x7 (Figura 15), 18x19 o alguna de sus variantes compactadas como cables de elevación en tus grúas, ¡no se lo cuentes a tu compañía de seguros!

Este diseño de cable tiene un defecto intrínseco, que se puede mostrar con la siguiente comparación: Dos equipos intentan empujar un molinete en direcciones opuestas. Pero la competición no es justa porque uno de los equipos empuja el torniquete en la punta de sus barras, beneficiándose así con un brazo de palanca considerablemente más largo, mientras que sus adversarios lo empujan cerca del centro (Figura 16).

Si los que empujan el molinete cerca del centro no tienen ninguna posibilidad cuando el número de sus competidores es igual, ¡cuánto más difícil les resultará si los que empujan en la punta de las barras los duplican en cantidad! (Figura 17)

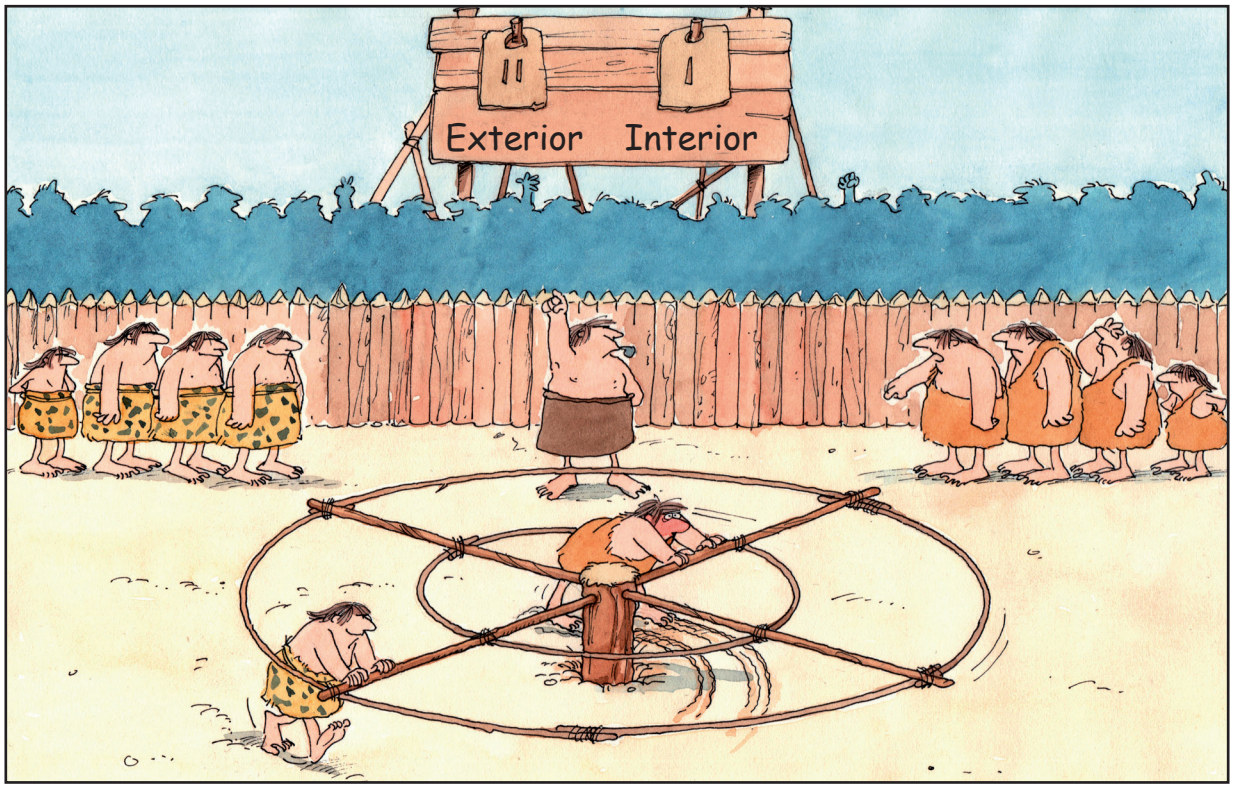


Fig. 16: Los cordones exteriores sacan ventaja debido a su mayor brazo de palanca.

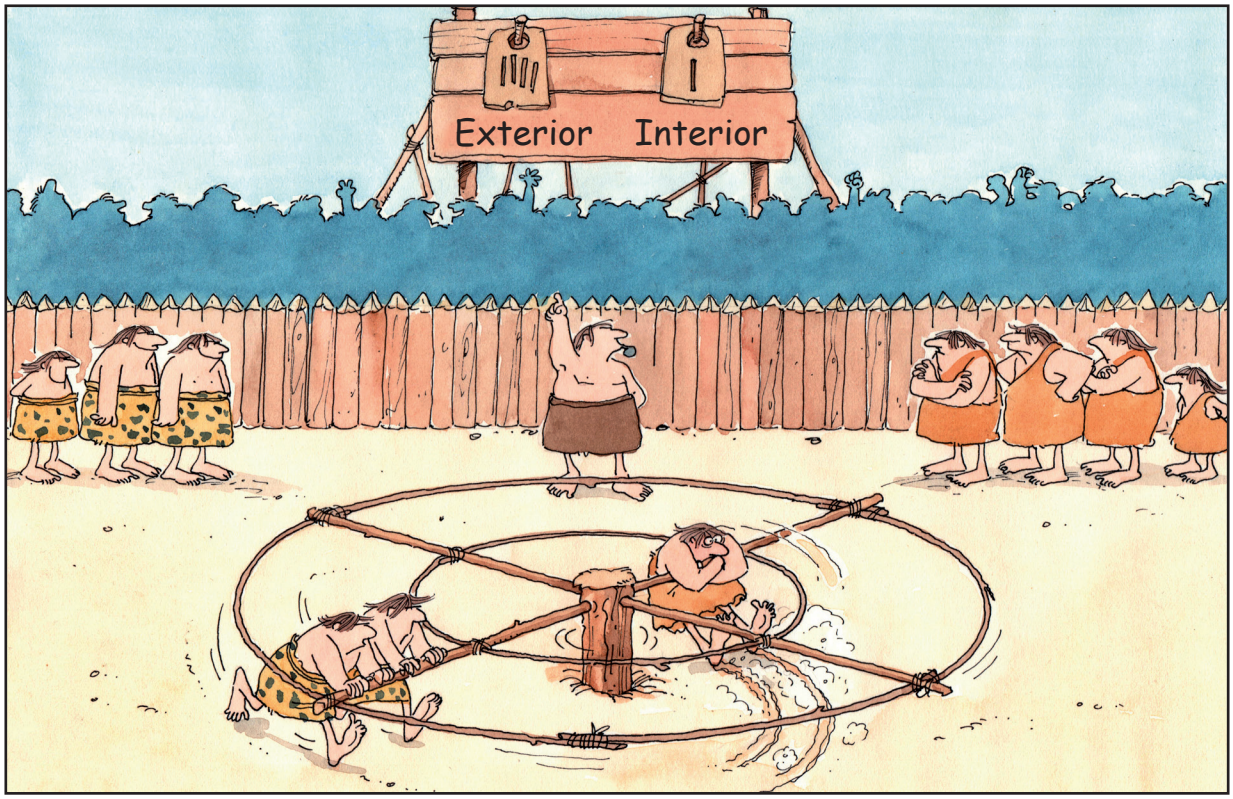


Fig. 17: En un cable 18x7 la sección transversal de los cordones exteriores es el doble de la de los cordones del centro.

Esto es exactamente lo que ocurre en los cables 18x7 o 18x19 y sus numerosas variantes. Estas construcciones contienen seis cordones interiores que deben competir con doce cordones exteriores del mismo diámetro, y con brazos de palanca el doble de largos. Los cables de este diseño sólo pueden ser razonablemente antigiratorios si los cordones interiores están irremediablemente sobrecargados.

En otras palabras, en estas construcciones el alma del cable siempre estará sobrecargada. Por lo tanto, se deteriorará a un ritmo mucho más rápido que los cordones exteriores. Las roturas internas del alambre ya vienen incluidas en el diseño.

La Figura 18 muestra cómo podría lograrse un equilibrio: Los competidores del interior, con el brazo de palanca corto, deben superar en cantidad a los del exterior con el brazo de palanca largo.

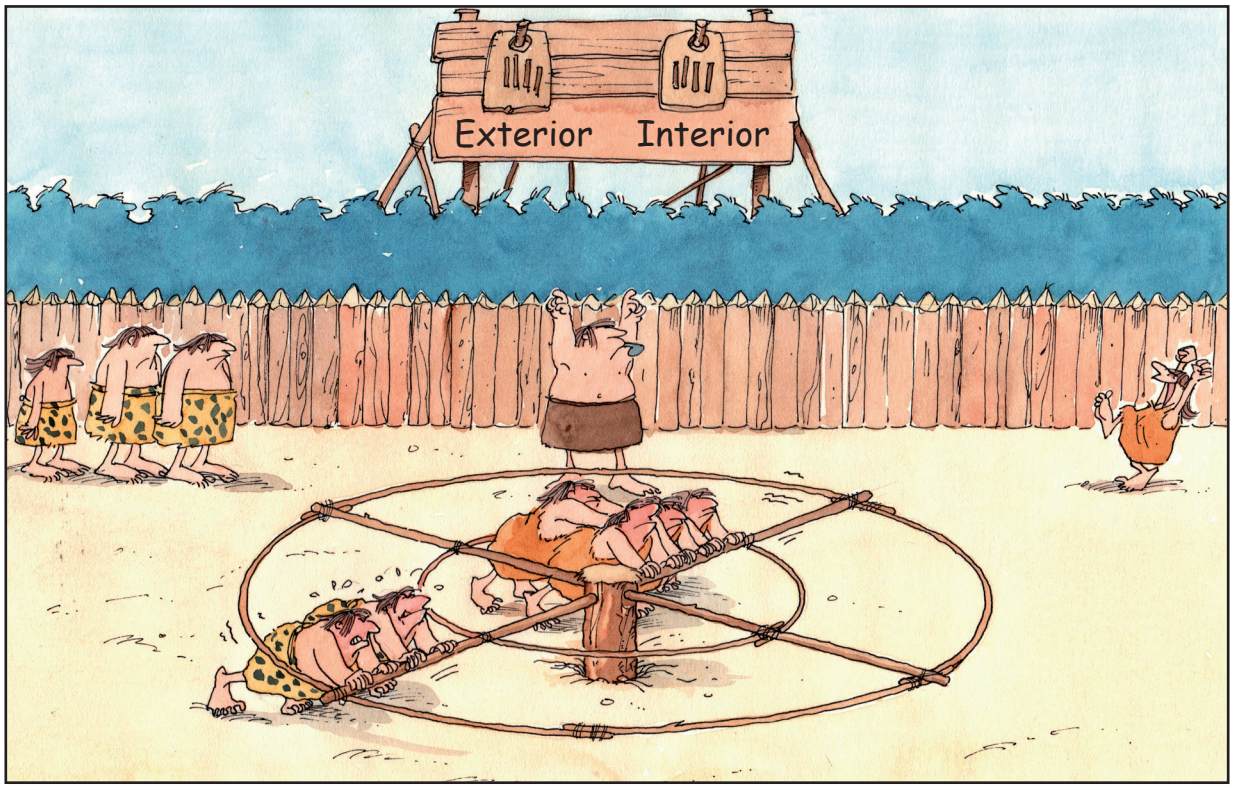


Fig. 18: Hay equilibrio porque los atletas de adentro, con el brazo de palanca más corto, son más numerosos que los de afuera que tienen el brazo de palanca más largo.

Y así es exactamente como los buenos cables antigiratorios consiguen estabilidad sin sobrecargar el alma del cable: La sección metálica de su alma es considerablemente mayor que la sección metálica de los cordones exteriores.

¡Los cables antigiratorios deben tener más metal en el alma que en los cordones exteriores!

4.2. Solución: Cables antigiratorios especiales con alma compactada y cordones exteriores compactados

La Figura 19 muestra la sección de un cable de elevación antigiratorio de 40 cordones con el alma de cable compactado y los cordones exteriores también compactados. La compactación del alma completa incrementa la resistencia a la rotura y la resistencia a rotar del cable. Además, la mayor superficie de apoyo del alma cuando es alisada reduce considerablemente las presiones de contacto entre ésta y los cordones exteriores, que también están compactados y alisados (Figura 20), reduciendo así el riesgo de roturas en los alambres interiores.

Los cables antigiratorios de este tipo deberían operar preferiblemente con un destorcedor (unión giratoria libre).

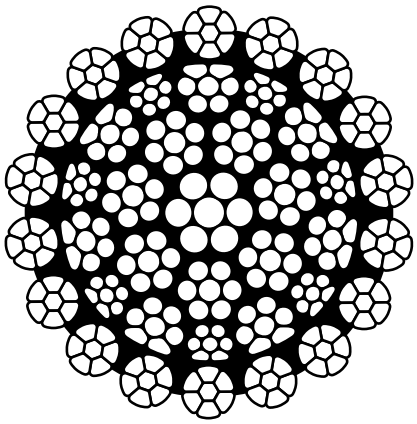


Fig. 19: Cable de elevación antigiratorio de 40 cordones con cordones exteriores compactados y alma de cable compactado

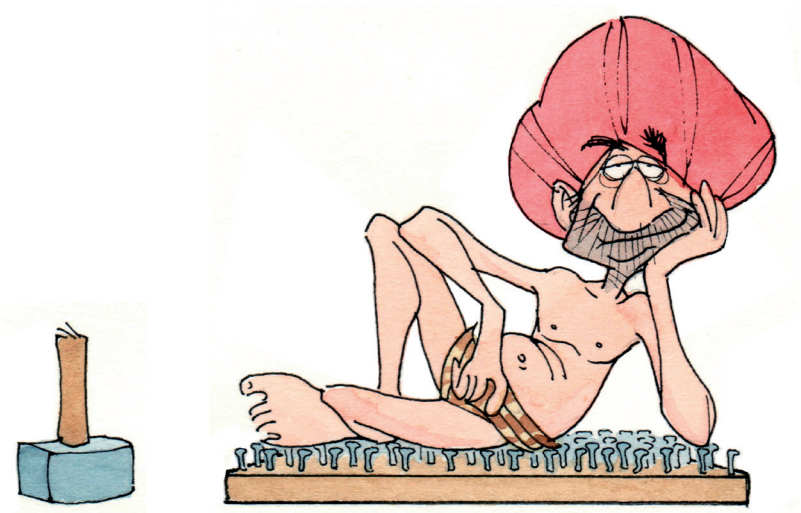


Fig. 20: La mayor superficie de apoyo del alma cuando es alisada reduce considerablemente las presiones de contacto entre ésta y los cordones exteriores, reduciendo así el riesgo de roturas en los alambres interiores.

5. Inspección electromagnética de cables

También debemos hacer notar aquí que las roturas internas de alambres pueden detectarse con instrumentos de ensayo electromagnéticos. Los ensayos pueden ser hechos por personal cualificado de la empresa operadora de la grúa (Figura 21) o por empresas independientes que prestan dicho servicio.

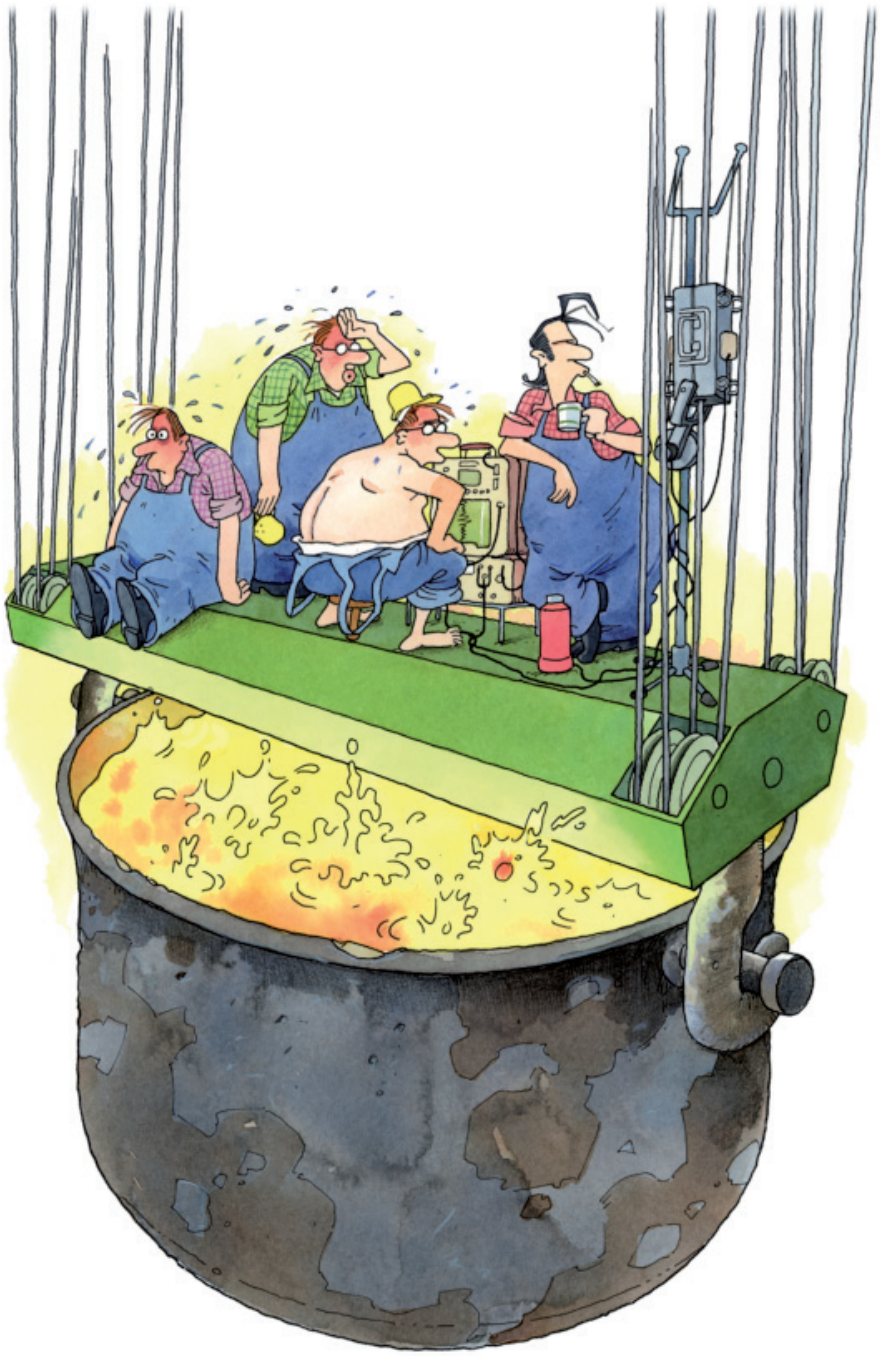


Fig. 21: Ensayo electromagnético del cable bajo carga

6. Problema: Corrosión en los cables

La superficie expuesta conjunta de todos los alambres que componen un cable de acero es aproximadamente 16 veces mayor que la superficie de una barra de acero maciza de la misma sección transversal metálica (Figura 22). Esto significa que, si no se toman precauciones, en un entorno corrosivo un cable de acero se corroerá unas 16 veces más rápido que una barra de acero.

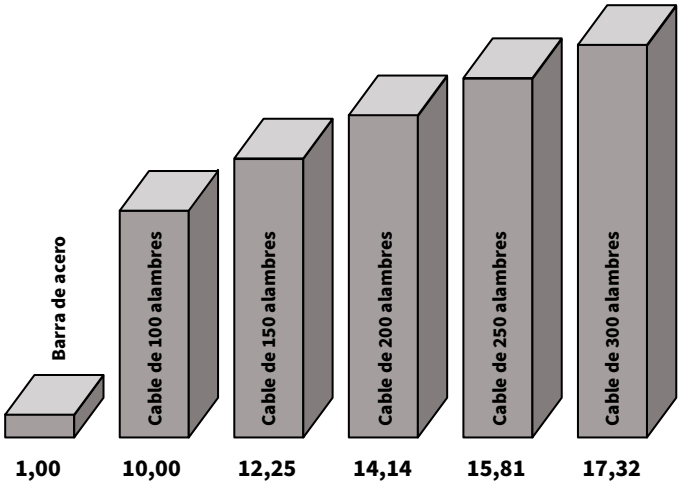


Fig. 22: La superficie conjunta de todos los alambres que componen un cable de acero es aproximadamente 16 veces mayor que la superficie de una barra única de acero con una sección transversal comparable.

6.1. Solución 1: Alambres galvanizados y cables con revestimiento plástico

Los cables que se usan en entornos corrosivos deberían ser hechos con alambres galvanizados. Incluso cuando el revestimiento de cinc sufra abrasión local, las zonas de alambre no cubiertas estarán protegidas por el zinc de los alambres vecinos (protección catódica).

El alma del cable, además del galvanizado, debería tener revestimiento de plástico. El revestimiento de plástico retiene el lubricante dentro del alma y la mantiene aislada del entorno corrosivo.

6.2. Solución 2: Relubricación a intervalos periódicos

Durante el servicio del cable los alambres perderán cada vez más su revestimiento de zinc y su lubricante. Para reducir la fricción entre los elementos del cable y proteger las superficies de los alambres contra el ambiente corrosivo, los cables deben ser relubricados durante el servicio a intervalos regulares. La Figura 23 muestra diferentes métodos de relubricación de los cables de acero.

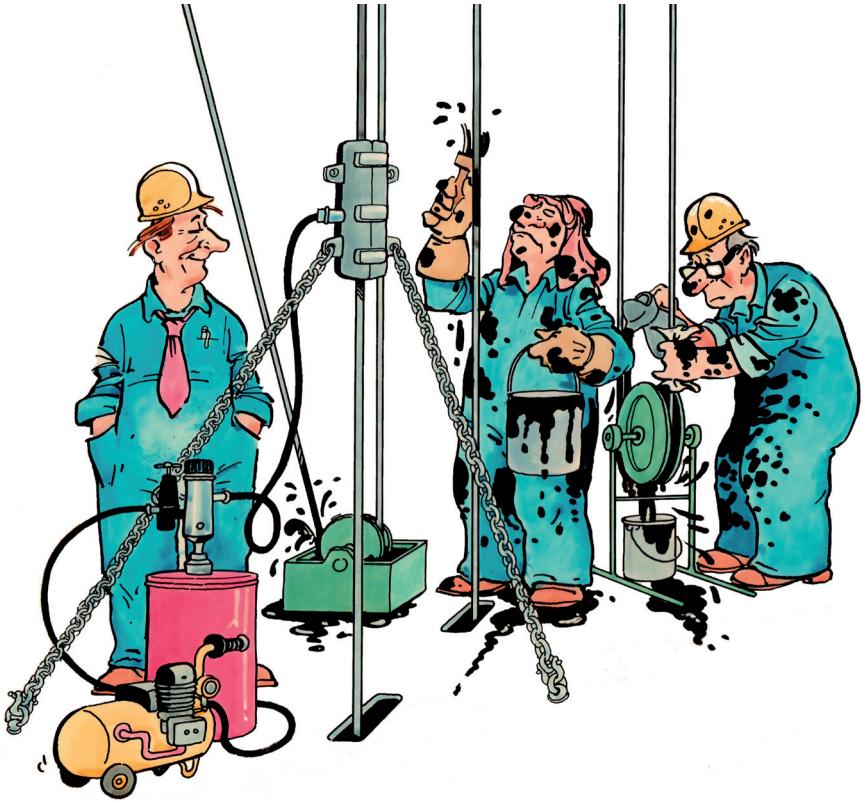


Fig. 23: Diferentes métodos de relubricación del cable de acero

7. Problema: Vida útil a la fatiga insatisfactoria

Los cables de acero en movimiento[3] en las grúas están sometidos a fatiga por flexión y por tracción. A menudo su vida útil resulta poco satisfactoria.

7.1. Solución 1: Cables con mayor resistencia a la fatiga por flexión

Los diferentes diseños de cables de acero tienen diferentes niveles de resistencia a la fatiga. Debido a su mayor cantidad de alambres -que dan lugar a menores esfuerzos de flexión- y a su mayor número de puntos de contacto con las poleas -que dan lugar a menores presiones de apoyo-, los cables de 8 cordones son mucho más resistentes a la fatiga por flexión que los de 6 cordones (Figura 24).

Los cables de acero con cordones exteriores compactados (Figura 25) tienen una sección metálica mayor que los cables con cordones convencionales y, por lo tanto, trabajan con una tensión menor. Sus condiciones de contacto con la polea también son mucho más favorables que en los cables con cordones exteriores convencionales (Figura 26).

3 Traducimos como *cables en movimiento* lo que en el original dice *running wire ropes*. El autor se refiere a los cables en movimiento relativo sobre los sistemas de tambores y poleas, por contraposición a los cables estáticos, como podrían ser, por ejemplo, los tensores de la pluma. (NdT)

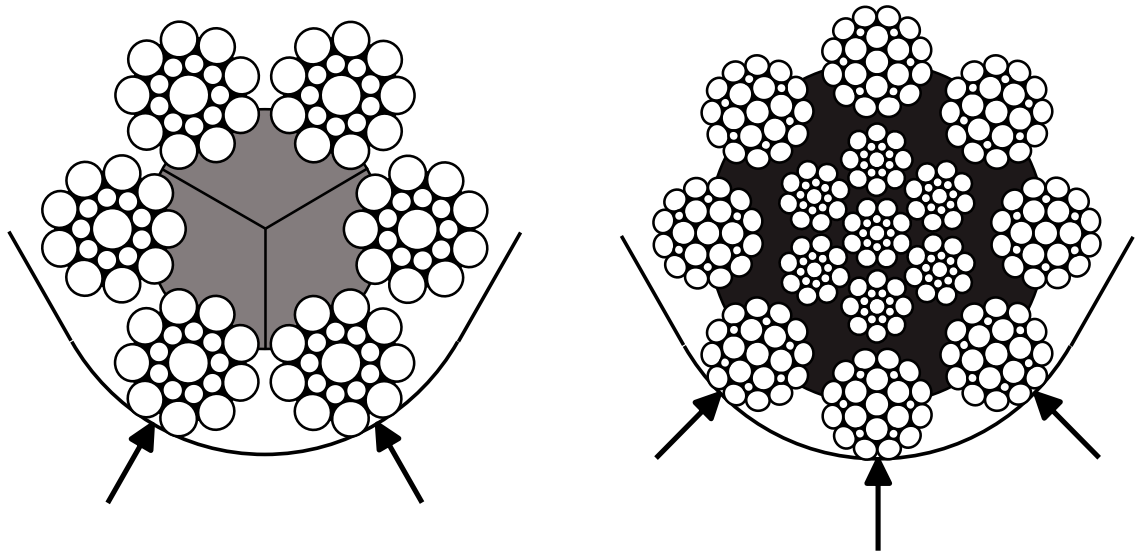


Fig. 24: Debido a su mayor cantidad de puntos de contacto con las poleas -que dan lugar a menores presiones de apoyo-, los cables de 8 cordones (derecha) son mucho más resistentes a la fatiga por flexión que los de 6 cordones (izquierda).

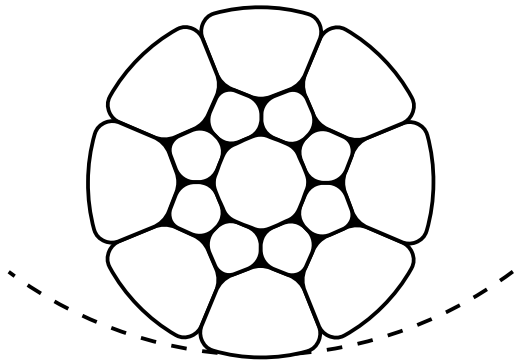


Fig. 25: Buenas condiciones de contacto para el cordón exterior compactado

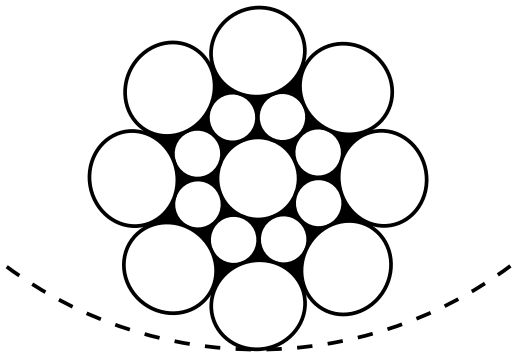


Fig. 26: Malas condiciones de contacto para el cordón exterior convencional

Por lo tanto, los cables con cordones exteriores compactados normalmente tienen una mayor resistencia a la fatiga que los cables con cordones exteriores convencionales.

Los cables de acero con una capa de plástico entre el alma de acero y los cordones exteriores no sólo son mucho más resistentes a la fatiga por flexión que los cables comparables sin capa de plástico, sino que también muestran una resistencia a la fatiga por tracción mucho mayor.

La capa de plástico actúa como amortiguador frente a las cargas dinámicas, reduciendo así los picos de tensión en los alambres.

Como las cargas dinámicas se transmiten a la estructura de la grúa a través del cable de acero, este amortiguador incorporado no sólo aumenta la vida útil del cable, sino que también brinda condiciones más favorables para los demás componentes de la grúa.

7.2. Solución 2: Optimiza el diámetro de tu cable

El profesor Klaus Feyrer de la Universidad de Stuttgart ha desarrollado una fórmula para predecir la vida útil del cable de acero:

$$\lg N = b_0 + (b_1 + b_3 \cdot \lg \frac{D}{d}) \cdot (\lg \frac{S}{d^2} - 0.4 \cdot \lg \frac{R_o}{1770}) + b_2 \cdot \lg \frac{D}{d} + \lg f_d + \lg f_L + \lg f_E$$

Los parámetros específicos b_0 a b_3 deben determinarse mediante un gran número de ensayos de fatiga para cada diseño de cable en particular. El parámetro f_d toma en cuenta el efecto de escala; f_L, el largo del tramo más tensionado y f_E el tipo de alma del cable. Estos parámetros ya han sido determinados para una gran cantidad de diseños de cables convencionales y especiales.

El propio Prof. Feyrer preparó un programa que calcula el desempeño del cable a la fatiga por flexión en función del diseño del cable, del diámetro nominal, del diámetro de la polea y de la fuerza de tracción sobre la línea. Si se conocen la geometría y las condiciones de trabajo de la grúa, se puede predecir el número de ciclos de elevación hasta el descarte del cable de acero y hasta la rotura del mismo.

Aun cuando la cantidad absoluta de ciclos de flexión no sea de interés, el programa puede utilizarse para comparar la vida útil a la fatiga de diferentes diseños.

Una opción interesante del programa es su capacidad para determinar el diámetro nominal óptimo del cable. La Figura 27 muestra el número de ciclos de flexión hasta el descarte (curva inferior) y hasta la rotura (curva superior) en función del diámetro nominal del cable para una construcción de cable determinada, una tracción en la línea de 40000 N y un diámetro de polea de 600 mm.

Por ejemplo, un cable con un diámetro nominal de 10 mm tendrá que ser desechado después de apenas 50000 ciclos de flexión. La relación D/d de 60 es muy favorable para el cable de 10 mm, pero obviamente la tracción de la línea de 40000 N es demasiado alta para un cable de un diámetro tan pequeño.

Si el diámetro nominal del cable se duplica a 20 mm, la cantidad de ciclos de flexión aumenta a 340000, casi 7 veces la cifra anterior. La relación D/d se ha reducido a 30, pero la sección metálica del cable se ha multiplicado por 4 y la tensión de la línea se ha reducido en consecuencia. El cable de 20 mm puede soportar mucho mejor la fuerza de tracción de 40000 N que el cable de 10 mm.

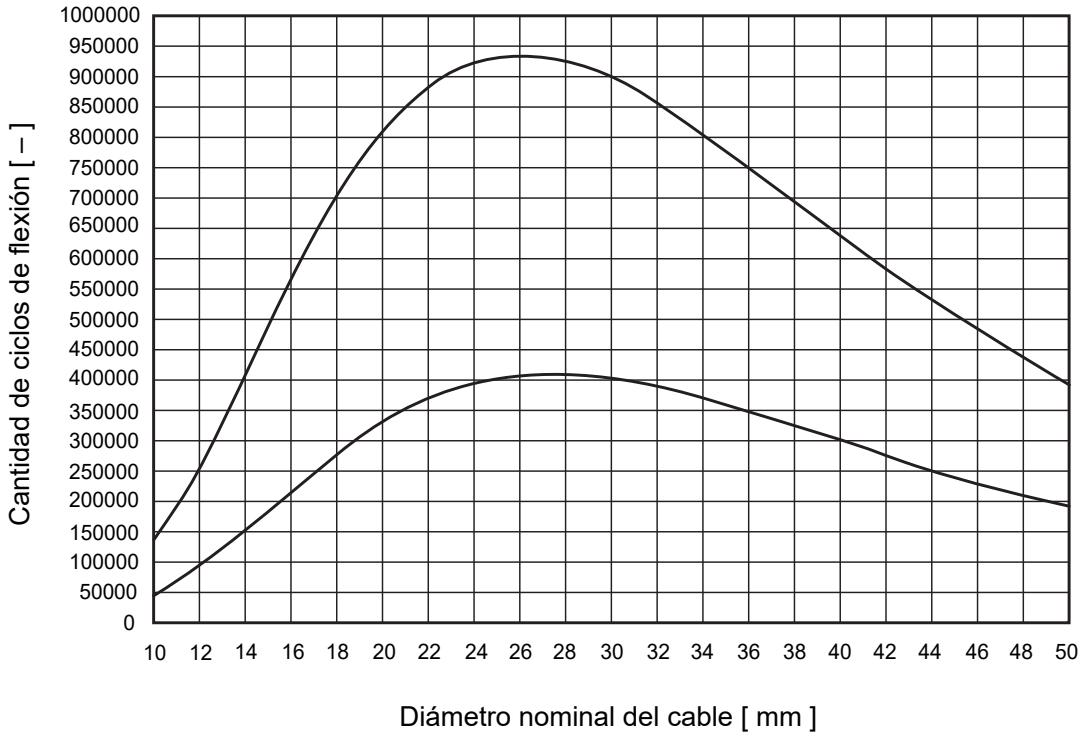


Fig. 27: Cantidad de ciclos de flexión hasta el descarte (curva inferior) y hasta la rotura (curva superior) en función del diámetro nominal del cable

Si el diámetro del cable se duplica de nuevo hasta los 40 mm, el número de ciclos de flexión ya no aumenta. El cable de 40 mm alcanza 300000 ciclos, o sea menos que el resultado obtenido por el cable de 20 mm. El cable de 40 mm tiene una sección metálica 16 veces mayor que la del cable de 10 mm. No se fatiga por la tracción de la línea de 40000 N, sino por la desfavorable relación D/d de 15.

En la parte izquierda de las curvas de la Figura 27, los cables tienen una relación D/d favorable. Fallan debido a las elevadas tensiones de tracción.

En la parte derecha de las curvas, los cables tienen tensiones de tracción favorables. Fallan debido a los grandes esfuerzos de flexión resultantes de las bajas relaciones D/d.

Entre ambas zonas se encuentra el máximo de la curva de vida a la fatiga, donde se minimiza la suma de las influencias negativas de la fuerza de tracción en la línea y de los esfuerzos de flexión. Al diámetro del cable para el cual el número de ciclos alcanza el máximo lo llamamos “diámetro nominal óptimo”. En la Figura 27, el diámetro nominal óptimo del cable es de 27 mm. Para este diámetro de cable se alcanza en promedio un número medio de ciclos de 410000.

Un diseñador de grúas no debería elegir un diámetro nominal de cable mayor que el diámetro nominal óptimo. Sólo gastaría más dinero y obtendría a cambio una vida útil más corta.

Al contrario, debería elegir un diámetro nominal del cable levemente inferior al diámetro nominal óptimo del cable. En nuestro ejemplo de la Figura 27, con un cable de diámetro 24 mm se consigue casi la misma vida útil que con 27 mm. Sin embargo, el diámetro del cable de 24 mm es un 10% menor. Esto significa que para casi el mismo número de ciclos de flexión se puede utilizar un cable de acero mucho más barato. Por añadidura, al utilizar el diámetro de cable más pequeño, el ancho del tambor puede reducirse enormemente, con lo que se reduce aún más el costo total.

Entonces, el diámetro nominal de cable más económico es siempre levemente menor que el llamado diámetro nominal óptimo, por ejemplo, el 90% del mismo.

En las estructuras de acero, más grande es siempre más durable. En el caso de los cables de acero, a menudo ocurre lo contrario.

7.3. Solución 3: Optimiza el diámetro de tus poleas

La vida útil de un cable de acero siempre puede prolongarse aumentando los diámetros de las poleas. El programa antes mencionado calcula en qué medida debe aumentarse el diámetro de la polea para obtener el resultado deseado.

La Figura 28 muestra el número de ciclos hasta el descarte (curva inferior) y hasta la rotura (curva superior) en función del diámetro de la polea. Para un diámetro de polea de 600 mm, el número de ciclos hasta el descarte es de 400000. Si se aumenta el diámetro de la polea, por ejemplo, en 150 mm (+25%), el número de ciclos aumentará a 900000 (+125%).

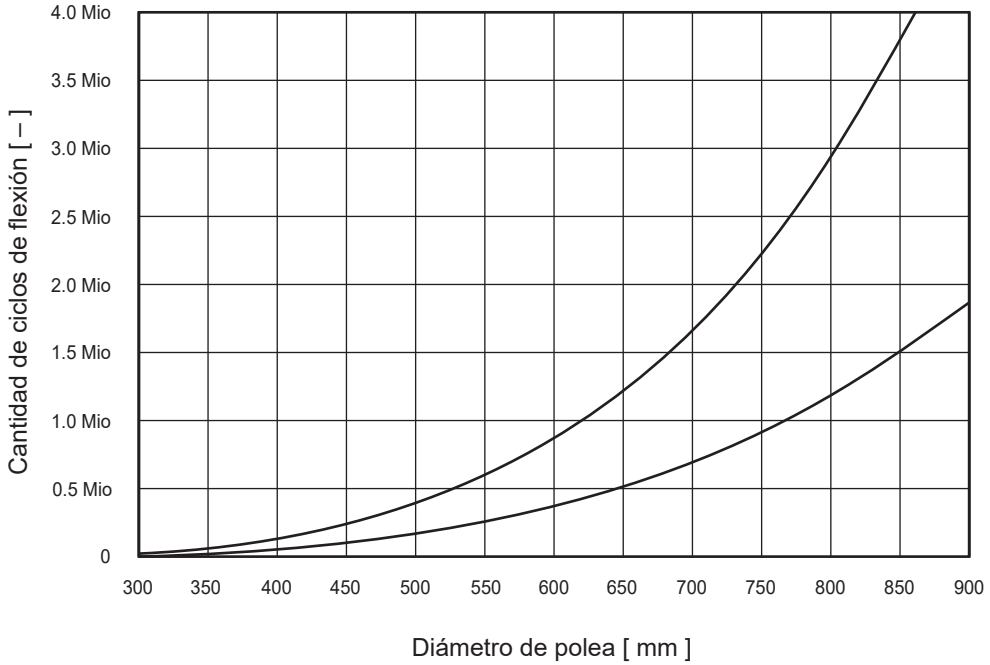


Fig. 28: Cantidad de ciclos hasta el descarte (curva inferior) y hasta la rotura (curva superior) en función del diámetro de la polea

7.4. Solución 4: Evita la fatiga a la flexión innecesaria

A menudo los cables de acero están sometidos a una fatiga a la flexión innecesaria. Por ejemplo, comparemos la vida a la fatiga de dos cables de acero que funcionan en grúas en las mismas condiciones, pero con pastecas[4] diferentes.

La Figura 29 muestra una pasteca con dos poleas pequeñas. Durante cada operación de elevación, el cable que pasa por la pasteca sufre dos ciclos de flexión.

La figura 30 muestra una pasteca con una sola polea grande. En cada operación de elevación, el cable que pasa por la pasteca sufre un solo ciclo de flexión. Este hecho por sí solo ya duplicaría la vida útil del cable de acero.

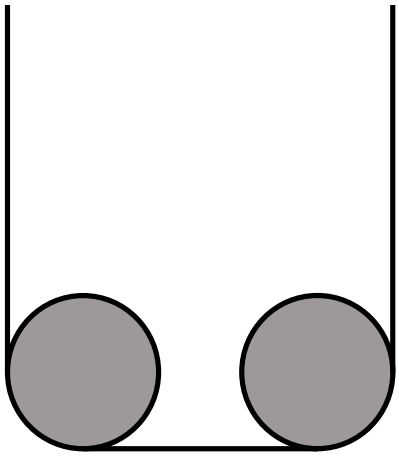


Fig. 29: Pasteca con dos poleas pequeñas

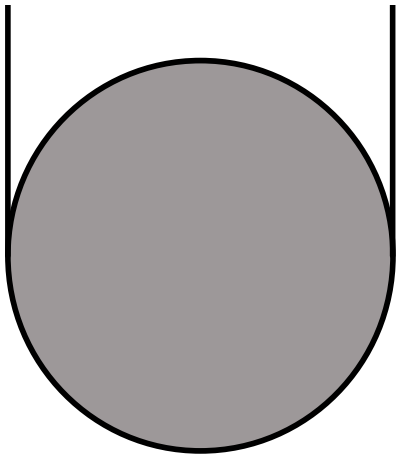


Fig. 30: Pasteca con sólo una polea grande

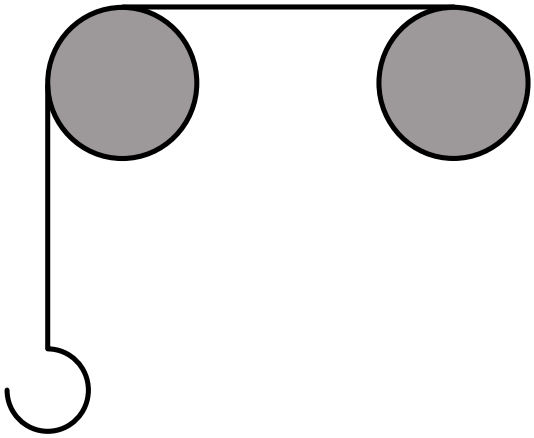


Fig. 31: Aparejo con flexión normal

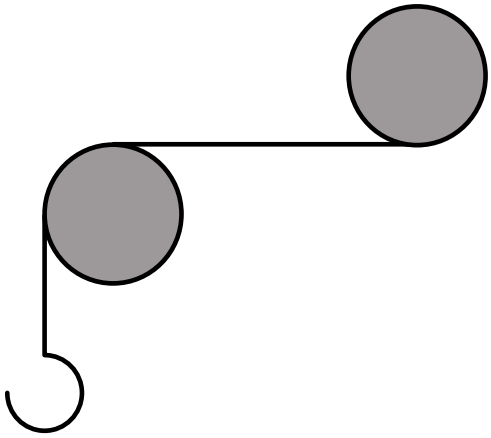


Fig. 32: Aparejo con flexión inversa

4 En el original *block* se refiere al conjunto formado por las poleas y el gancho. En castellano hay varias palabras específicas para designarlo, por ejemplo *motón* o *pasteca*, que es la que adoptamos. Hay quien usa la palabra *bloque*, pero es un anglicismo innecesario y poco específico. (NdT)

Sin embargo, el diámetro de la polea es 2,5 veces mayor que en la primera pasteca, y el número de ciclos que se pueden alcanzar con este diámetro es 9 veces mayor que en la polea pequeña. Por lo tanto, la vida útil se multiplicará de nuevo por un factor de 9, con lo que resultará 18 veces mayor que en el primer caso.

Aún más perjudicial es someter el cable a una flexión inversa, esto es flexionarlo primero hacia un lado y en seguida hacia el otro lado. Dependiendo de las condiciones, una flexión inversa fatigará un cable de acero de 2 a 7 veces más que una flexión normal. Por lo tanto, el cable del aparejo mostrado en la Figura 31 durará de 1,5 a 4 veces más que el cable del aparejo mostrado en la Figura 32.

7.5. Solución 5: Optimiza la fatiga a la tracción reduciendo el diámetro del cable

Normalmente, en los ensayos de metales a la fatiga por tracción, a una determinada amplitud de carga, la vida útil de la probeta disminuye con el aumento de la carga media. Sin embargo, en algunos recientes ensayos de fatiga por tracción realizados en la Universidad de Stuttgart se demostró que los cables de acero, hasta una carga total de aproximadamente el 50% de sus cargas de rotura, se comportan de forma contraria: Al aumentar la carga media del ensayo, los cables alcanzan una mayor vida útil a la fatiga por tracción (Figura 33).

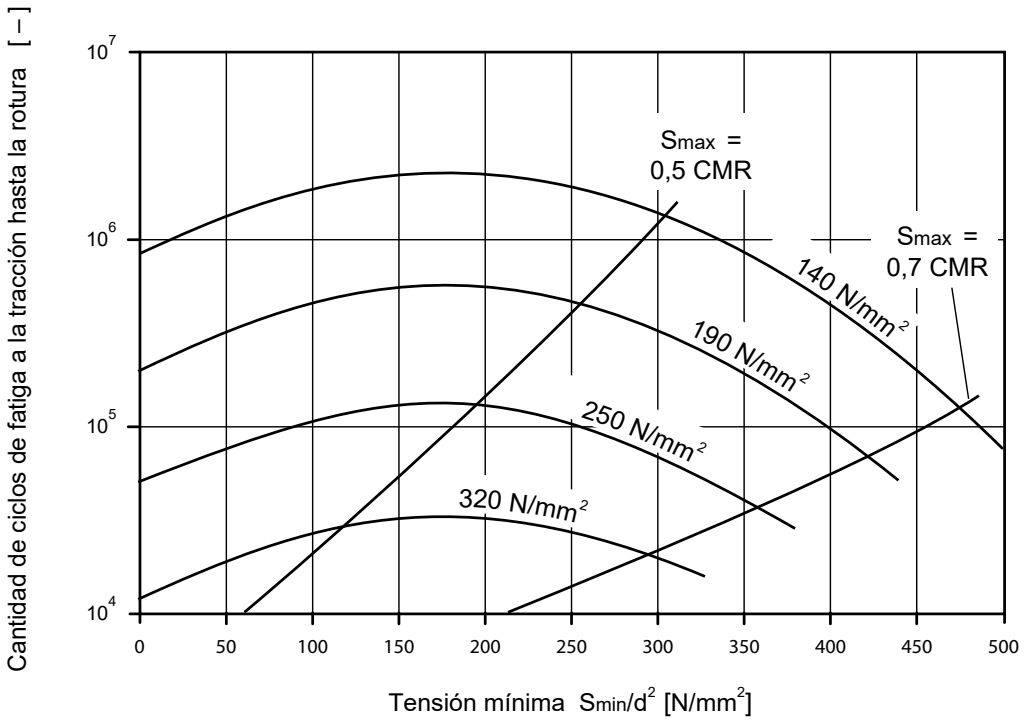


Fig. 33: Al aumentar la carga media del ensayo, hasta una carga máxima de aproximadamente el 50% de su carga de rotura, los cables alcanzan una mayor vida útil a la fatiga por tracción.

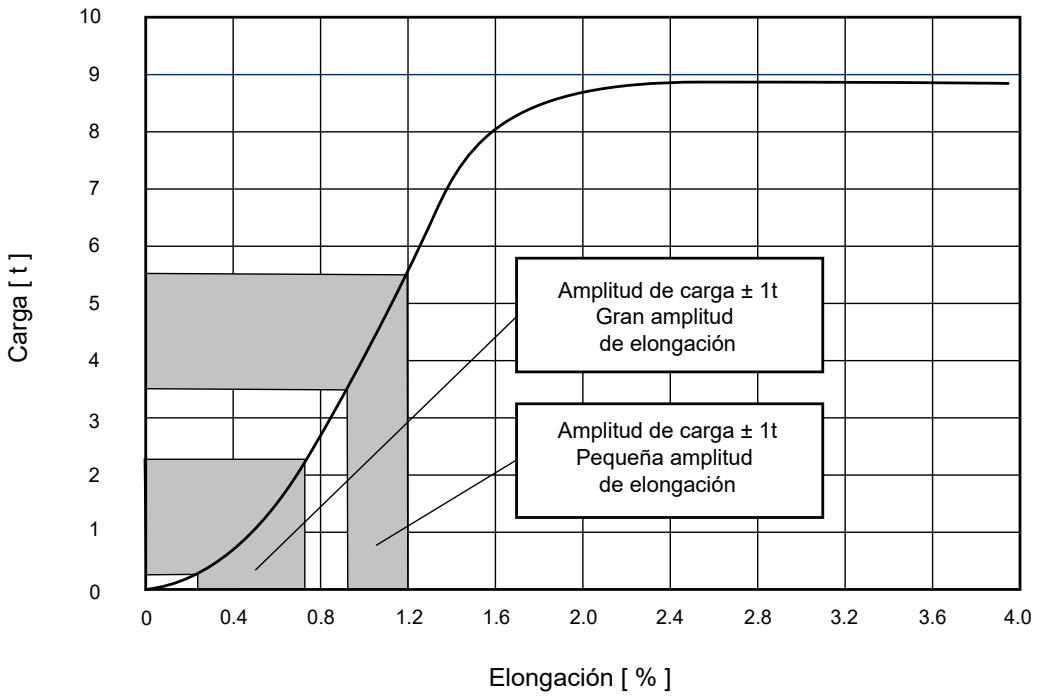


Fig. 34: Curva típica de carga-elongación de un cable de acero. Para una misma amplitud de carga las amplitudes de la elongación son mucho menores cuando la carga media es alta que cuando la carga media es baja.

Una explicación de este fenómeno podría ser el hecho de que, a diferencia de la típica probeta sólida, los cables de acero están construidos con múltiples elementos que se mueven entre sí durante los cambios de carga. Entonces su gráfico carga-elongación también es diferente. Como puede observarse en una curva típica de carga-elongación de un cable de acero (Figura 34), para una misma amplitud de carga, las amplitudes correspondientes de la elongación son mucho menores para cargas medias más elevadas. Esto significa que la vida útil de los cables de suspensión[5] de las grúas se podría aumentar reduciendo el diámetro del cable y por ende trabajando con un factor de diseño[6] menor.

5 Nótese que el autor aquí no se refiere al cable de elevación (como en casi todo el resto del artículo) sino al de suspensión, o sea al sistema de cables que sostienen, suben y bajan la pluma. Estos cables, a diferencia de los cables de elevación, sufren mucho más fatiga por tracción que fatiga por flexión. (NdT)

6 Factor de diseño es la traducción que adoptamos para *design factor*, término usual en inglés para referirse a la relación entre la carga de rotura y la fuerza de tracción aplicada. En español se sigue lo llamando a menudo *factor de seguridad*, expresión que actualmente se trata de evitar. Alguna bibliografía en castellano también le llama *factor de servicio*, pero esta última expresión, si bien sería la más correcta, da lugar a confusión con otros factores asociados a las condiciones de uso. (NdT)

8. Problema: Cordones flojos y jaulas de pájaro

A veces se encuentran deformaciones en los cables de grúas, tales como cordones sueltos (“levantados”) o las llamadas jaulas de pájaro. Estas deformaciones a menudo se atribuyen a cargas dinámicas, pero en la mayoría de los casos esto no es así.

En la mayoría de los casos, los cordones sueltos y las jaulas de pájaro se generan al retorcer un cable de acero alrededor de su propio eje. Como ejemplo, veamos un cable que está fijo en sus dos extremos. Si lo sujetamos por el centro del tramo y lo retorcemos una vuelta (Figura 35), lo alargaremos por un lado y lo acortaremos por el otro (Figura 36). Como resultado, los cordones exteriores quedarán demasiado largos por un lado (Figura 37), y los cordones interiores quedarán demasiado largos por el otro (Figura 38).

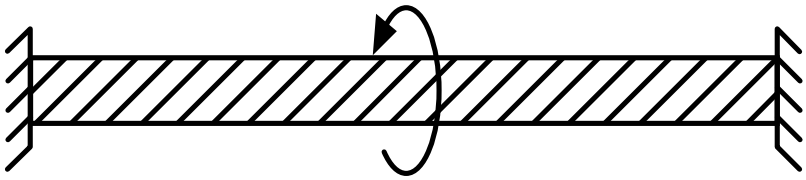


Fig. 35: Torsionar un cable de acero por la fuerza…

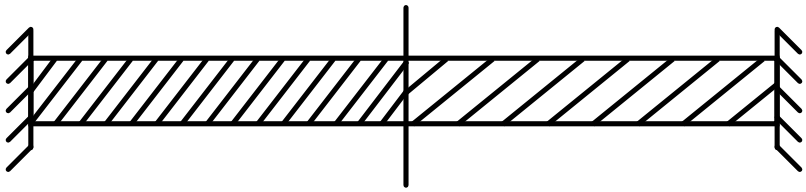


Fig. 36: … provoca el acortamiento del paso de cableado en un lado (izquierda) y su alargamiento en el otro (derecha).

Pero, ¿qué podría hacer que un cable en una grúa gire alrededor de su propio eje? Pues simplemente su paso por cada polea y cada tambor podría provocar este efecto.

Si un cable entra en una polea con un cierto un ángulo de desvío[7], primero tocará la pared de la garganta[8] y luego rodará hacia el fondo de la misma (Figura 39) torsionándose durante este proceso.

7 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 (el plano perpendicular al eje de giro). También se lo suele llamar *ángulo de ataque* (particularmente en México). Siempre se busca tener ángulos de desvío pequeños (del orden de 1° a 2°), aunque a veces el sistema no lo permite y se debe lidiar con ángulos de desvío mayores. (NdT)

8 La palabra original en inglés es *groove*, que tiene diversas traducciones, según el país o la industria. Aquí optaremos por *canaleta* cuando se refiere al tambor y *garganta* cuando se refiere a la polea. Evitamos la palabra *ranura*, aunque también se usa, pero es menos específica. (NdT)

Fig. 37: Longitud sobrante de los cordones exteriores provocada por el destorcimiento (torsión en sentido de abrir) del cable.

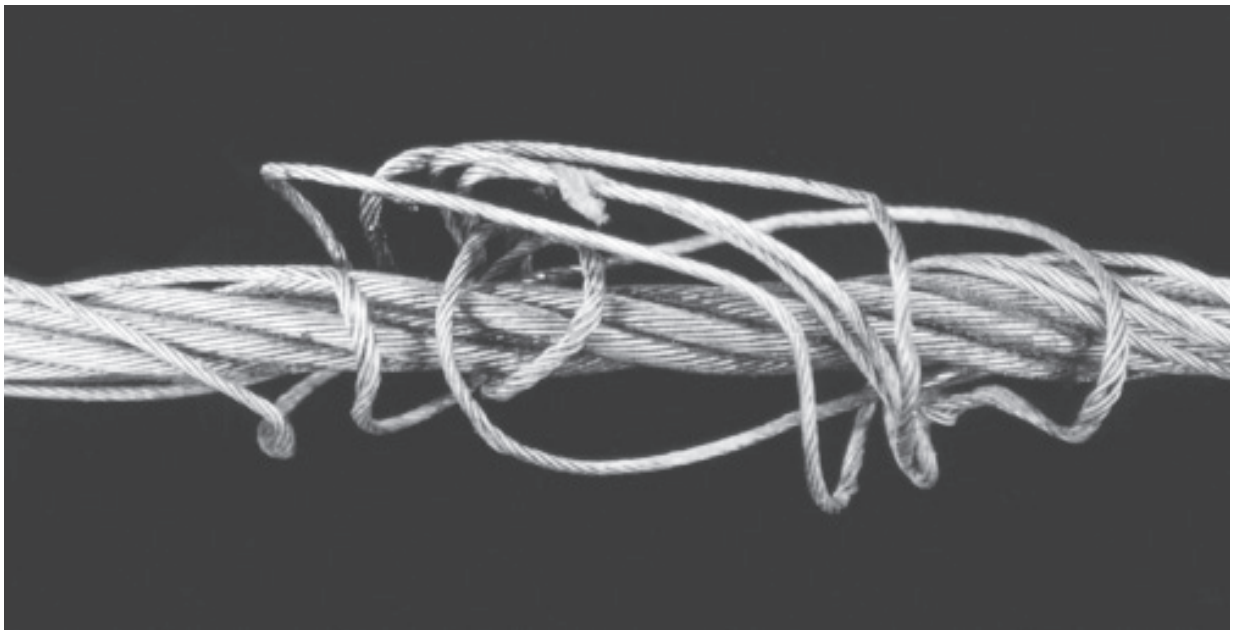


Fig. 38: Longitud sobrante de los cordones interiores provocada por el retorcido (en el sentido de cerrar) del mismo cable.

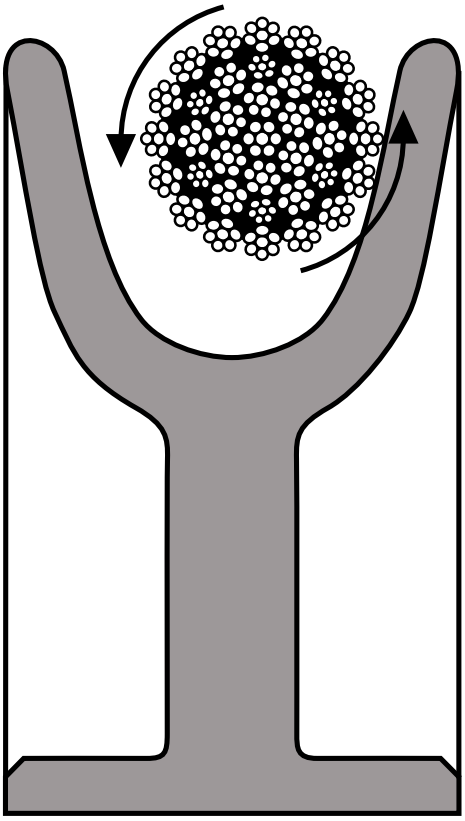


Fig. 39: El cable de acero rueda hacia el fondo de la garganta, torsionándose durante el proceso.

Si aumenta el ángulo de desvío, la torsión aumentará. La Figura 40 y la Figura 41 muestran la secuencia de una sección transversal de cable entrando en una polea con un ángulo de garganta[9] de 35° (acorde con las normas estadounidenses).

Si el cable entra en la polea con un ángulo de desvío de 1°, tocará la pared de la garganta en una posición muy profunda y sólo se torcerá 5°.

Si el cable entra en la misma polea con un ángulo de desvío de 5°, tocará la pared de la garganta en una posición muy alta y se torcerá ¡cerca de 50°!

Por supuesto, un cable no siempre rodará hacia abajo en las gargantas como una rueda dentada. El movimiento descendente será una mezcla de rodadura y deslizamiento. El grado de torsión inducida en el cable, por lo tanto, también depende mucho de la fricción entre el cable de acero y la polea.

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

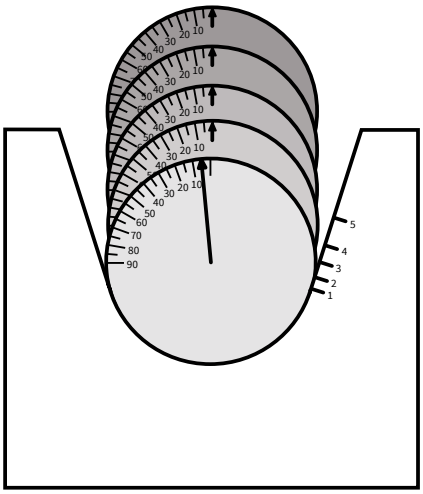


Fig. 40: Ángulo de garganta de 35°. Con un ángulo de desvío de 1° el efecto de torsión es leve

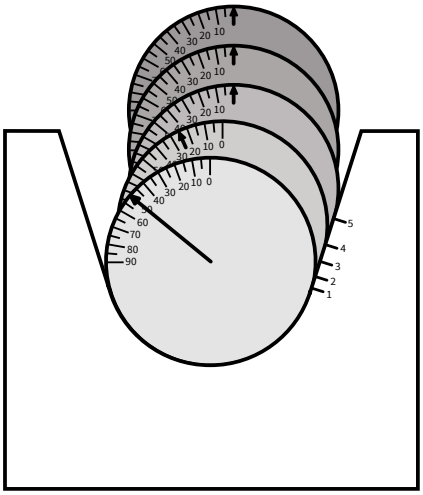


Fig. 41: Ángulo de garganta de 35°. Con un ángulo de desvío de 5° el efecto de torsión es fuerte

8.1. Solución 1: Lubricación en el cable de acero

La forma más fácil de reducir el coeficiente de fricción entre el cable de acero y la polea es lubricar el cable. Un cable de acero bien lubricado se torsionará mucho menos que un cable seco o uno corroído.

8.2. Solución 2: Poleas de acero en lugar de poleas de plástico

El coeficiente de fricción entre el acero y el plástico es mayor que entre acero y acero. Por lo tanto, en las mismas condiciones geométricas, un cable de acero se torsionará mucho menos con una polea de acero que con una de plástico. Las poleas de plástico sólo deben utilizarse en posiciones donde los ángulos de desvío sean pequeños.

8.3. Solución 3: Poleas con gargantas más anchas

Si la garganta de una polea es ancha, el cable de acero entrará mucho más profundamente antes de tocar la pared de la garganta. Por lo tanto, las poleas deberían tener un ángulo de garganta de 45° (como, por ejemplo, en la norma DIN 15061) como mínimo absoluto. Un ángulo de 52° (como en la norma británica) es incluso mejor.

La Figura 42 muestra la secuencia de una sección transversal de cable entrando con un ángulo de desvío de 5° en una polea con un ángulo de garganta de 60°. El cable de acero toca la pared en una posición mucho más baja que en la Figura 39 y se tuerce sólo 25°. Aumentando el ángulo de la garganta de 35° a 60° la torsión sufrida por el cable se ha reducido en un 50%.

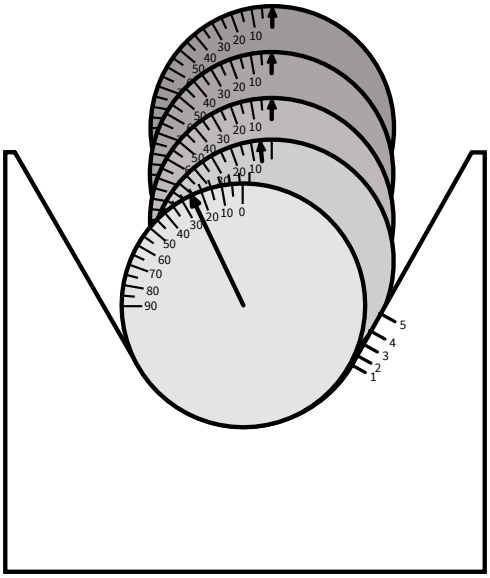


Fig. 42: Ángulo de garganta de 60°. Con un ángulo de desvío de 5° el efecto de torsión es leve

8.4. Solución 4: Cables de acero con capa plástica intermedia

Los cables con capa intermedia plástica son más resistentes a las deformaciones y jaulas de pájaro que cualquier otro diseño.

8.5. Solución 5: Evita las poleas muy estrechas

Los cordones sueltos y jaulas de pájaro también pueden ser el resultado de poleas estrechas. Si el radio de la garganta es demasiado pequeño (Figura 43), el cable se comprimirá al pasar por la polea. Entonces, los cordones exteriores resultarán demasiado largos para el diámetro reducido del cable, y la longitud de cordón sobrante se acumulará en un punto (normalmente al final del recorrido de la polea), donde se levantará como un cordón suelto o una jaula de pájaro.

El radio de la garganta debe medir entre 0,53 y 0,54 veces el diámetro nominal del cable. Si mide menos, la polea debe ser remecanizada o sustituida. Si esto no es posible, se debe utilizar un cable con la misma resistencia, pero con un diámetro nominal menor, que entonces cumplirá con las condiciones requeridas.

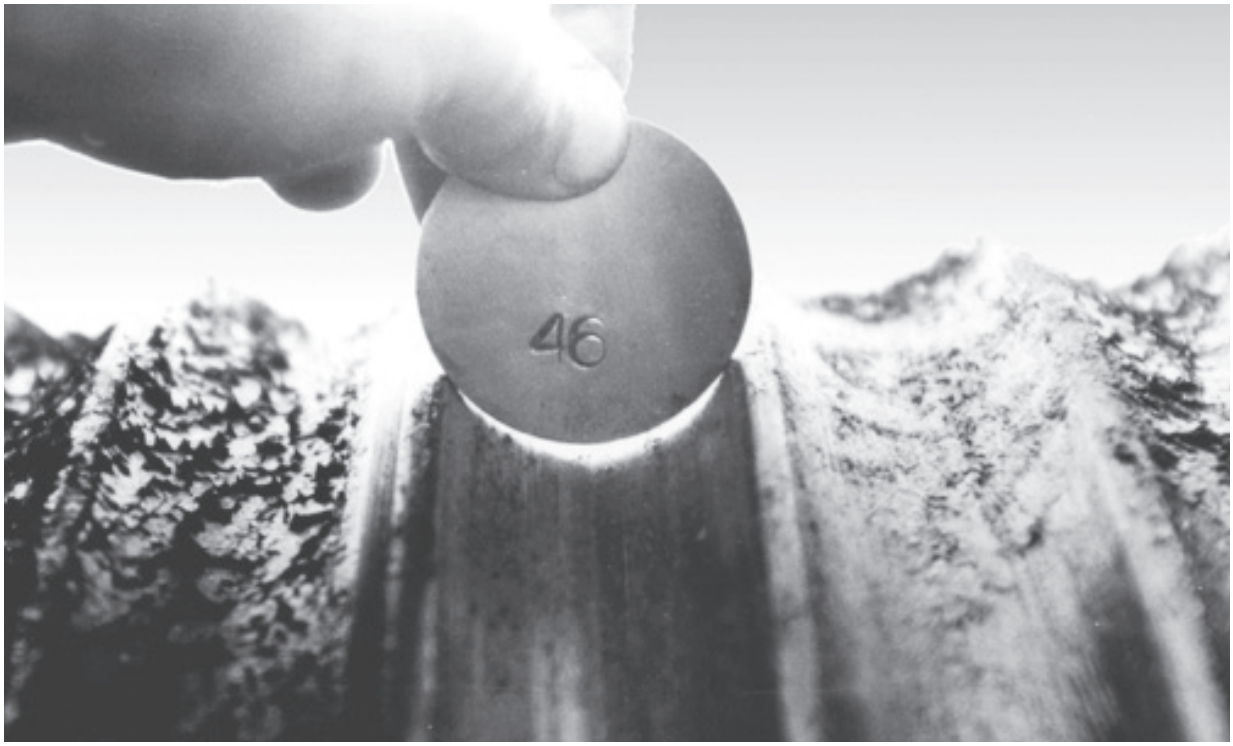


Fig. 43: Polea estrecha

9. Problema: Aplastamiento en el tambor

Los cables de acero suelen sufrir daños mecánicos en el tambor. Bajo la influencia de un ángulo de desvío, el cable de acero podría, por ejemplo, ser empujado contra su espira[10] vecina (Figura 44), y los alambres exteriores podrían dañarse en el punto de contacto.

9.1. Solución 1: Tambores acanalados y con guía Lebus

Siempre es preferible usar tambores acanalados y no lisos. Para enrollamiento en múltiples camadas[11] deberían usarse sistemas de enrollamiento tipo Lebus.[12]

10 *Espira* es aquí la traducción correcta del inglés *wrap*, refiriéndose a una única vuelta o circunferencia del cable en el tambor. Una *camada* o *capa*, como traducción del inglés *layer* es el conjunto de todas las *espiras* o vueltas de cable que están una al lado de otra, a la misma distancia del eje del tambor. A menudo se confunden ambos conceptos cuando se interpreta la palabra *wrap* como envoltura. (NdT)

11 Ver nota 9 sobre las palabras *espira*, *camada* y *capa*. (NdT)

12 Al igual que todo el mundo, el autor llama *tambor Lebus* al tambor de guía paralela. Lebus es marca registrada de Lebus Intl, empresa especialista en guinches y sistemas de enrollamiento de cable. Su invento del tambor de guía paralela revolucionó la industria y perduró a tal punto que se lo sigue denominando “tambor Lebus”, aunque la patente de 1950 ya no tiene vigencia y muchos otros fabricantes han copiado el diseño. (NdT)

Fig. 44: Bajo la influencia de un ángulo de desvío, el cable de acero es empujado contra la espira contigua. Los alambres se dañarán en el punto de contacto.

9.2. Solución 2: Cables de torsión Lang con cordones exteriores compactados

Al tocarse los alambres exteriores de dos espiras consecutivas de un cable de acero de torsión regular[13] pueden formar indentaciones o hendiduras (Figura 45) porque todos están alineados en la dirección del eje del cable. Cuando una vuelta entra en el tambor con un movimiento descendente o sale del tambor con un movimiento ascendente, los alambres exteriores indentados se dañarán mutuamente.

Si en cambio se utilizan cables de torsión Lang, los alambres exteriores de las espiras adyacentes no pueden formar indentación porque, en el punto de contacto, los alambres están inclinados hacia arriba en un lado y hacia abajo en el otro. Por lo tanto, estos alambres se dañarán mucho menos entre sí cuando una espira se enrolle en el tambor o salga de él.

Los cordones exteriores compactados ofrecen ventajas adicionales (Figura 46): las crestas y los valles de los cordones exteriores están suavizados, y la sección transversal metálica está incrementada para resistir la abrasión y los daños mecánicos.

Para un enrollado en varias camadas, deberían utilizarse siempre cables de torsión Lang con cordones exteriores compactados.

13 Torsión regular y torsión Lang son dos esquemas de diseño de cable bien diferentes. Las palabras *regular lay* y *Lang lay* han sufrido innumerables traducciones incorrectas. Las únicas maneras de designar sin ambigüedades los tipos de torsión son (a) con las palabras *regular* y *Lang* o (b) con la combinación de letras S y Z que establece ISO 17893, cuyo uso afortunadamente de a poco se va extendiendo. (NdT)

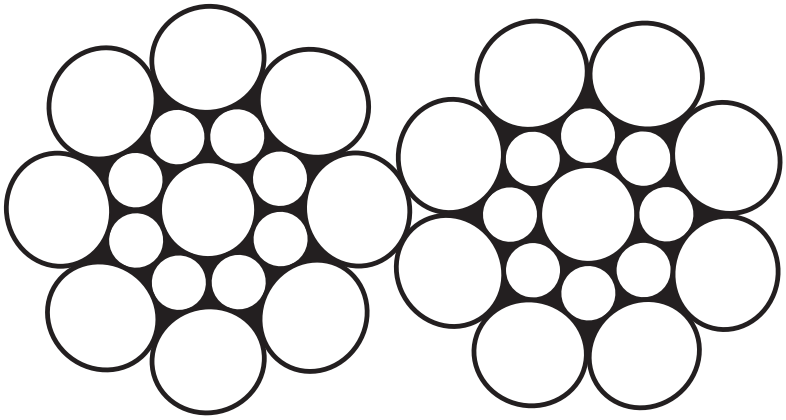


Fig. 45: Los alambres exteriores de dos espiras consecutivas de un cable de acero de torsión regular pueden formar indentaciones.

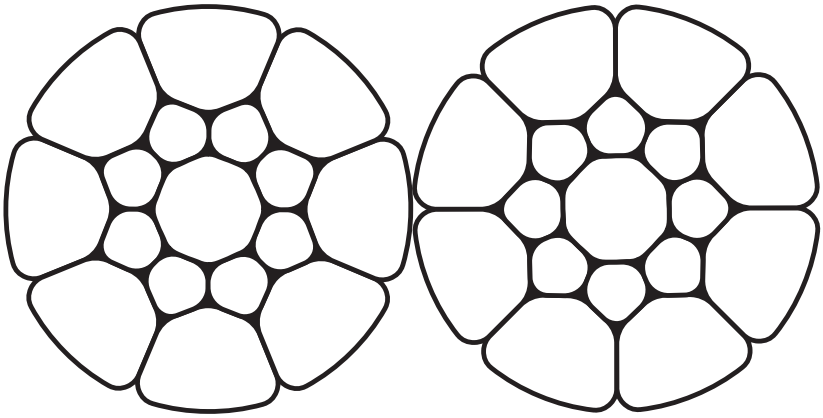


Fig. 46: Las crestas y valles de los cordones compactados resultan más suaves. La sección transversal metálica está incrementada para resistir la abrasión y los daños mecánicos.

10. Problema: Los buenos cables de acero son caros.

Los sofisticados cables de acero de alta tecnología cuestan más que los cables convencionales básicos.

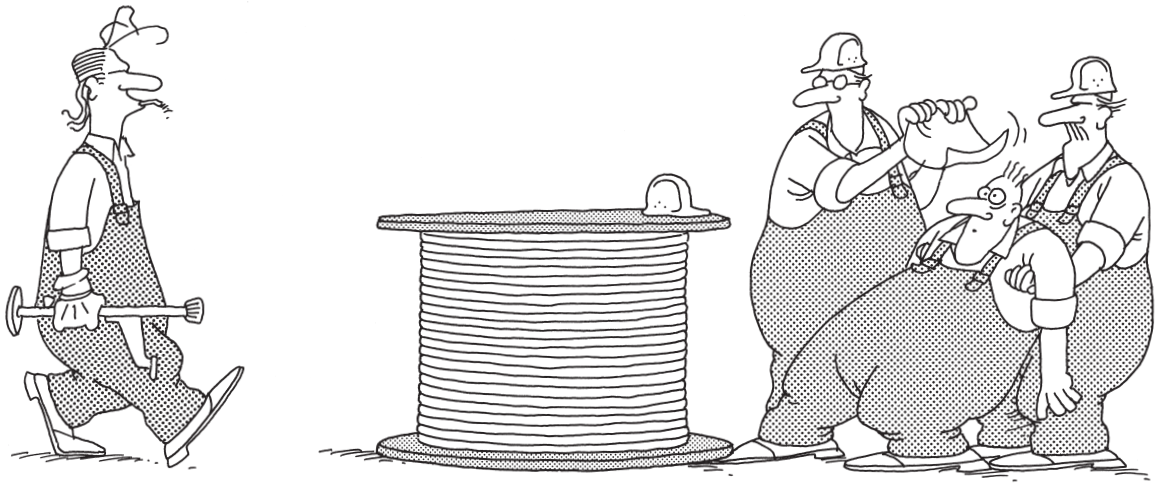
10.1. Solución: ¡Piensa en los costos totales!

Los cables malos son más baratos que los buenos. Pero al cabo de cierto tiempo, habrás comprado tres cables malos con el mismo dinero con que podrías haber comprado uno solo bueno.

Además, transportar un cable malo hasta la grúa cuesta tanto como transportar uno bueno. Y la instalación de un cable malo cuesta tanto como la de un cable bueno, pero puede que tengas que hacerlo tres veces con el cable malo y sólo una con el bueno.

Por lo tanto, comprar un cable más caro la primera vez te ahorrará mucho dinero al final.

Siempre se obtiene lo que se paga. Con los cables de grúa, esto es más cierto que con cualquier otro elemento de máquina.



Hay una solución para cada problema. ¡Consúltanos!

El autor: Dipl.-Ing. Roland Verreet
Wire Rope Technology Aachen
Grünenthaler Str. 40a • 52 072 Aachen • Alemania
Tel.: +49 241 173147 • Fax +49 241 12982
E-mail: R.Verreet@t-online.de

Traducción al castellano: Ing. Ricardo Muñiz
Especialista en cables y operaciones de izaje
ricardomuniz2005@yahoo.com.ar

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