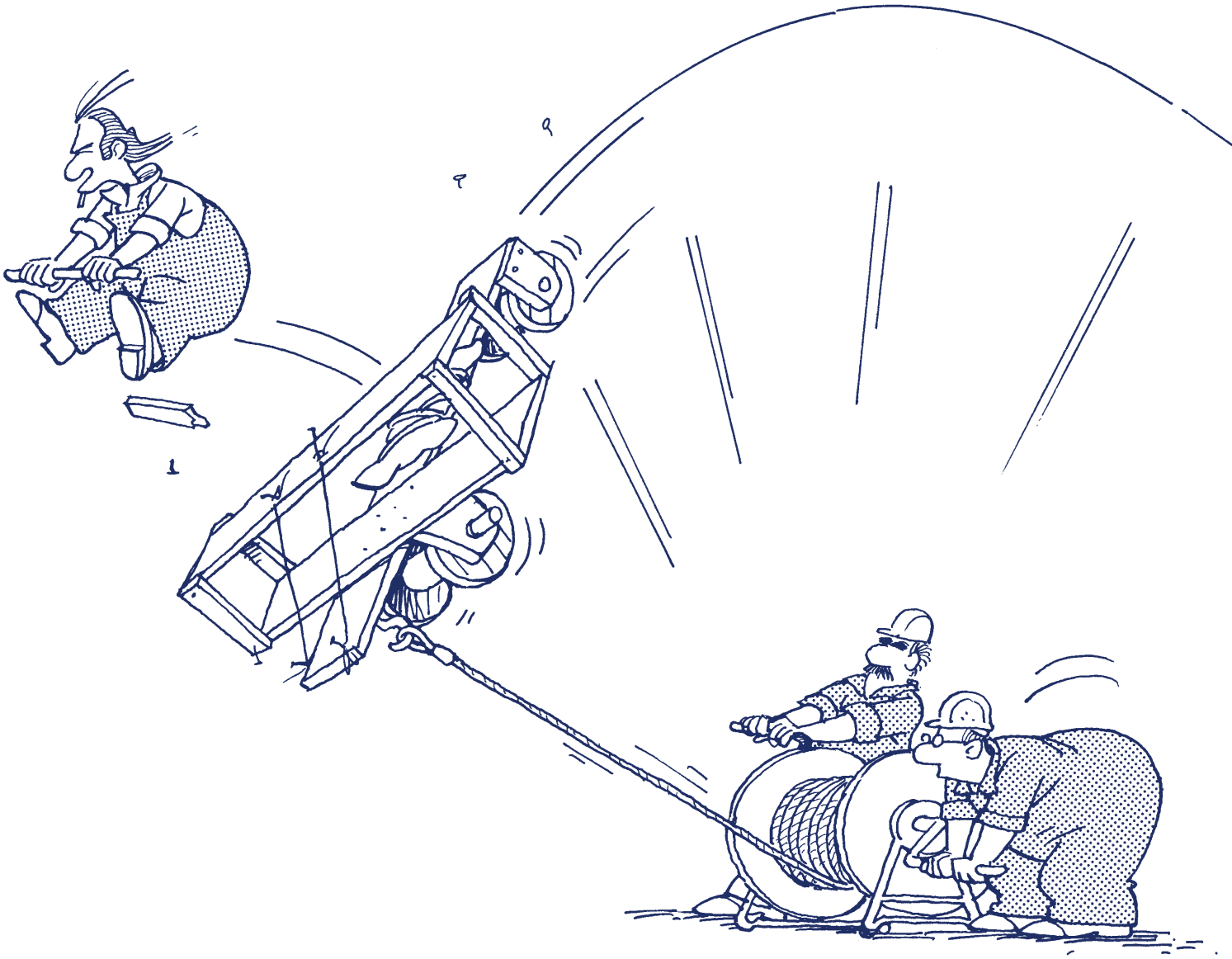
WIRE ROPE
TECHNOLOGY AACHEN



Cables de acero y sistemas de enrollado: Los últimos 40 años

Cables de acero y sistemas de enrollado: Los últimos 40 años

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

Índice

1. Introducción 4
2. Cables 5
3. Poleas 18
4. Ensayos en los cables de acero 26
5. Tambores 35
6. Inspección 44
7. Terminaciones 49
8. Conclusión 55

© 2015, 2018, 2021, 2022 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. Introducción

Nací en junio de 1950, y en junio de 2015 llegué a “condición de descarte”, como diría un ingeniero en cables de acero. Pero no me retiré. La grúa y el cable son demasiado interesantes como para retirarse.

Empecé la escuela a la edad de 5 años, un año antes de lo normal. La consecuencia de eso fue que, fuera donde fuera, siempre era el más joven. Fui el más joven en la escuela, fui el más joven en el secundario y fui el más joven en la universidad.

Luego, cuando empecé como ingeniero en la industria del cable de acero, era otra vez el más joven.

Acostumbrarse a eso es fácil. Pero un día miras a tu alrededor y te das cuenta de que algo ha cambiado: tus antiguos colegas se han jubilado y ahora eres el más viejo. ¡Eso sí que es traumático!

Entonces de pronto empiezas a darte cuenta de que todos estos jóvenes a tu alrededor no tienen ni idea de cómo era su industria 40 años atrás. Muchos de ellos ni siquiera habían nacido.

Por eso, cuando me pidieron que diera una presentación en la 21ª Conferencia Internacional de Grúas y Elevación Offshore[1], decidí ofrecer mi visión personal del desarrollo de los cables de acero en los últimos 40 años, en el cual he tenido una activa participación. Así que por favor discúlpenme si presento el tema desde mi propio y muy subjetivo punto de vista, ya que fui parte de toda esta gran evolución de los cables y sus sistemas de enrollado y reenvío[2].

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

2 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). (NdT)

2. Cables

2.1. Diseño asistido por computadora (CAD)

Hoy día damos por sentado que para diseñar cables de acero se utilizan sofisticadas computadoras. Estas computadoras no existían cuando comencé en la industria del cable como un joven ingeniero en 1975. En ese momento, los cables de acero se diseñaban utilizando factores empíricos para los diámetros de cordones, diámetros de alambre y longitudes de paso de cable y cordón[3]. Estos factores se determinaban por ensayo y error, y los clientes eran los conejillos de indias.

La sección transversal del alambre central de un cordón es un círculo, pero la sección transversal de un alambre arrollado alrededor de este alambre central no es ni un círculo ni (como todavía mucha gente cree) una elipse sino una sección en forma de riñón. La Figura 1 muestra el alambre circular central y la forma de riñón de un alambre arrollado alrededor de él con hélices de diferentes pasos.

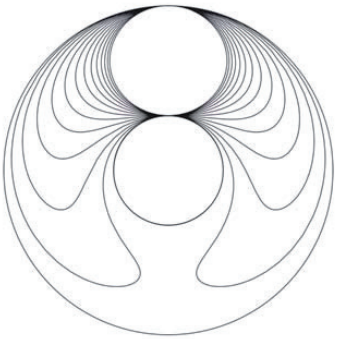


Fig. 1

En 1974, todavía estudiando ingeniería en Aquisgrán[4], empecé a diseñar cordones utilizando el revolucionario ordenador de bolsillo HP 65, que permitía programar 100 comandos de teclado (Figura 2). Podía introducir un valor *x*, ejecutar una tarjeta magnética a través de la máquina, y después de unos segundos la computadora me daba el resultado *y* correspondiente. De esta manera, en pocos minutos podía dibujar la sección transversal real de un alambre en el cordón.

3 La palabra inglesa *strand* designa un haz de alambres retorcidos sobre su eje central. En la jerga del cable de acero en castellano 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*. En esta traducción usaremos *cordón*, pero se debe aclarar que 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)

4 *Aquisgrán* o *Aachen* es la ciudad alemana donde el autor tiene su sede. (NdT)

Fig. 2

La primera Commodore PET fue introducida en 1977, y tenía una impresionante memoria RAM de 4K (Figura 3). Una notebook típica de hoy tiene más de un millón de veces esa capacidad.

Usé una PET Commodore para diseñar e incluso dibujar los primeros cordones por ordenador. Todavía requería mucho tiempo de procesamiento, pero permitió por primera vez calcular la sección real completa de un cordón.

Fig. 3

Cuando mi hijo mayor comenzó la escuela, su maestra me preguntó si yo era artista. Le dije: „No, soy ingeniero.“ Ella se sorprendió: „Su hijo me dijo que se sienta en su oficina todo el día y dibuja flores.“

Pronto me di cuenta de dónde había venido el malentendido: Los primeros plotters no sólo eran extremadamente caros, sino también muy ruidosos. La pluma se movía a alta velocidad en una dirección, mientras que el papel se movía por debajo en la otra. El plotter trabajaba todo el día, y llamaba poderosamente la atención de los niños. Cuando ya no necesité las impresiones, se las di a ellos, quienes luego colorearon y terminaron las „flores“ (Figura 4).

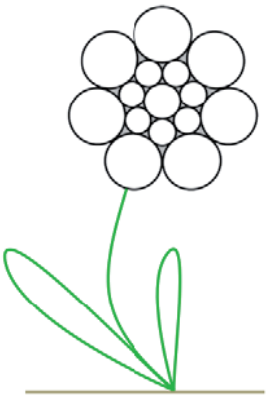


Fig. 4

Revisando y recalculando diseños preexistentes de cordones encontré un gran número de errores en los diseños, y establecí un conjunto de reglas de diseño que siguen siendo válidas 40 años después.

Recientemente, en una planta de energía nuclear, inspeccioné el cable elevador de una grúa del reactor. El cable estaba en servicio desde 1969. No me preocupaba la antigüedad del cable, sino el hecho de que trabajaba en una aplicación de seguridad crítica y databa de una época en que los cables aún no se diseñaban por computadora.

2.2. Cable con relleno termoplástico

El cable de acero fue inventado en 1834 por el Oberbergrat Wilhelm Albert[5]. Su diseño evitaba los cruces de alambre dentro de los cordones. La necesidad de mayores resistencias a la rotura, sin embargo, llevó rápidamente al desarrollo de cordones con varias capas de alambres, introduciendo peligrosos cruces de alambre dentro de los cordones. Este nuevo problema fue resuelto por Tom Seale, quien en 1884 inventó el cordón de tendido paralelo[6].

Pero la industria seguía pidiendo resistencias aún mayores, y entonces para muchas aplicaciones se comenzó a reemplazar el alma de fibra por un alma acero IWRC[7] (Figura 5).

5 La historia de Wilhelm Albert, ingeniero inventor del cable de acero, está amenamente contada en otro de los trabajos del Ing. Verreet. El grado de *Oberbergrat*, palabra que aquí se dejó en el original alemán, es el título honorífico de alto consejero que le concedió su ciudad, Clausthal, en 1835. (NdT)

6 Traduciremos *parallel lay strand* como *cordón de tendido paralelo*, designando el tipo de tendido en el que no aparecen puntos de cruce, también conocido en muchos medios hispanohablantes como *cordón de igual paso*, a diferencia del cordón antiguo, que es *cordón de igual ángulo*. El tendido paralelo no tiene nada que ver con la torsión Lang, confusión que a veces se produce por malas traducciones. (NdT)

7 Mantendremos la sigla *IWRC*, dado la nula difusión que tiene en castellano la sigla AACI (alma de acero de cable independiente), y la traduciremos como *alma de acero*, ya que aquí se refiere a las almas de acero en general, sin distinción de tipo. (NdT)

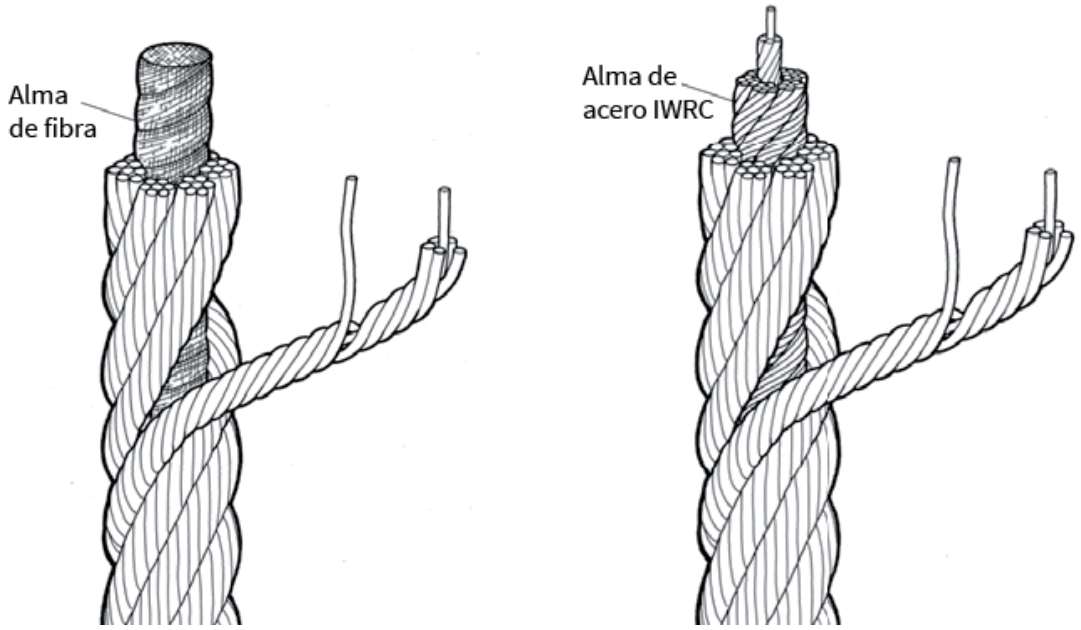
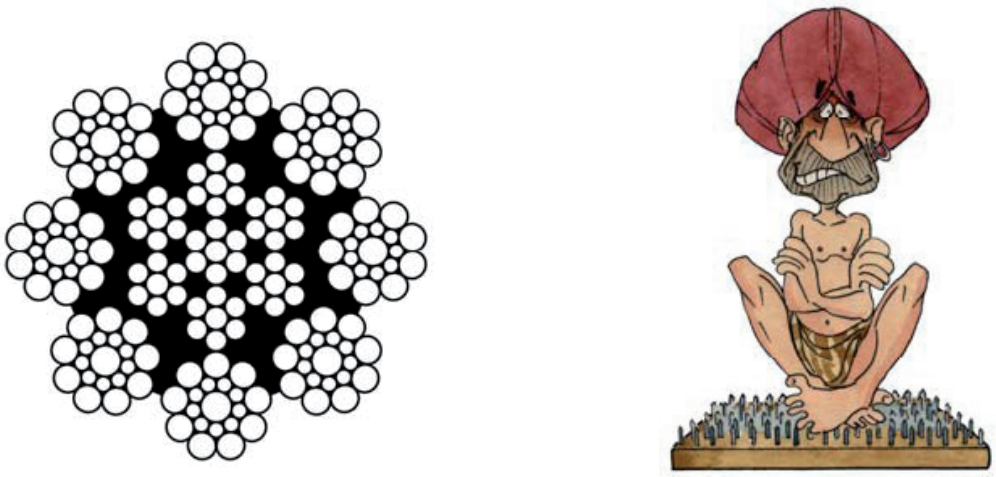


Fig. 5

Sin embargo, esto introdujo nuevos problemas: Mientras que con el alma de fibra los alambres exteriores de los cordones exteriores se apoyaban en un elemento central blando, ahora se cruzaban con los alambres exteriores del alma de acero, lo que provocaba roturas internas de los alambres que no podían detectarse en una inspección visual (Figura 6).

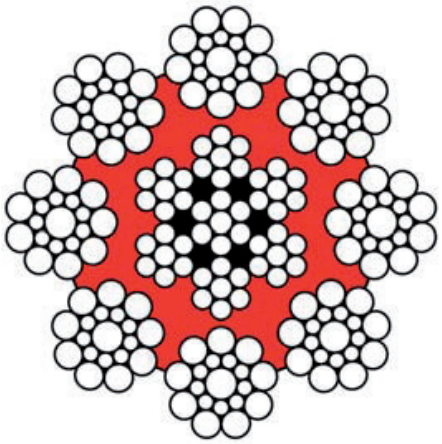


Sin relleno termoplástico

Puntos de cruce

Fig. 6

En 1975, la empresa para la cual yo trabajaba desarrolló y patentó el relleno de plástico de los cables de acero. Ahora, un revestimiento de plástico protegía el cable de acero contra la pérdida de lubricante y la entrada de humedad, pero lo más importante es que evitaba los cruces en el interior del cable y proporcionaba un suave almohadón para los cordones exteriores (Figura 7).



Con relleno termoplástico

No hay puntos de cruce

Fig. 7

2.3. Cables de 8 cordones versus cables de 6 cordones

Hace 40 años, los cables de 8 cordones eran fabricados solamente por unos pocos especialistas. Los cables de 6 cordones eran los que dominaban la industria.
Sin embargo, las pruebas de fatiga por flexión realizadas, por ejemplo, en la Universidad de Stuttgart, demostraban que la vida a la fatiga de los cables de 8 cordones era considerablemente mayor que la de los de 6 cordones. La razón principal es la mayor cantidad de puntos de contacto y la mayor superficie de contacto entre los cordones exteriores del cable y la polea, lo que conlleva una presión de apoyo mucho menor (Figura 8).

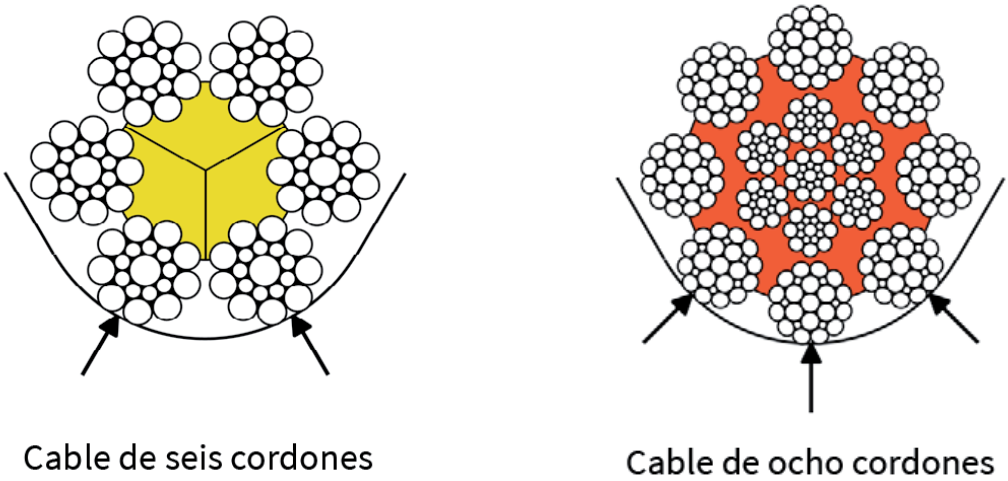


Fig. 8

Pude ver la misma escena muchas veces: durante años el vendedor de un fabricante de cable argumentaba en contra de los cables de 8 cordones, y de pronto empezaba a alabarlos. En ese momento yo deducía que su empresa había comprado por fin una máquina cableadora[8] de 8 bobinas.[9]

2.4. Cables con cordones compactados

La industria de las grúas seguía hambrienta de cables con resistencia a la rotura cada vez mayor: al utilizar un cable más resistente, los diseñadores de grúas podían reducir el diámetro manteniendo el mismo factor de diseño.

Y como los diámetros mínimos del tambor y la polea se definen como un múltiplo del diámetro del cable (la llamada relación D/d), un diámetro de cable más pequeño conducía a diámetros de polea y tambor más pequeños. A su vez, los diámetros de tambor más pequeños conducen a una menor necesidad de torque y, por lo tanto, a motores y cajas de engranajes más pequeños. En consecuencia, reducir el diámetro del cable en 1 mm podía reducir de forma significativa los costes totales de una grúa.

En 1975 ya se utilizaban cordones compactados para pretensar hormigón, y me pregunté por qué nadie hacía cables con esos cordones. Me dijeron que, debido a la alta proporción de acero en su sección, el cable hecho con ellos sería muy poco flexible. No quedé convencido, e hice una primera prueba de cable con cordones compactados. Resultó ser sorprendentemente flexible.

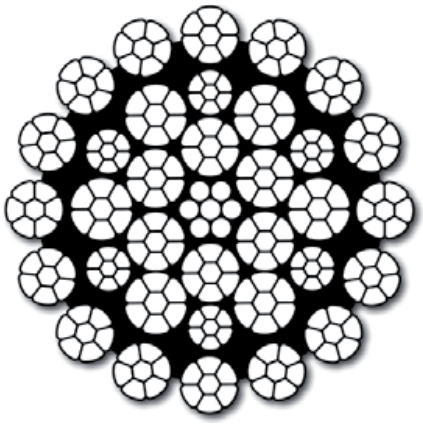
8 Optamos por traducir como *cableadora* la máquina que en inglés se denomina *closer*, aunque también a veces se encuentra la designación *cerradora*. (NdT)

9 En algunos mercados se observó además resistencia de los usuarios a la introducción de cables innovadores. Una importante empresa argentina tuvo durante años la capacidad y maquinaria para hacer cables de 8 cordones, y fue llevando a cabo la innovación, pero la pequeña escala del mercado se lo dificultaba. Este problema de escalas de producción se encuentra con frecuencia en Latinoamérica. (NdT)

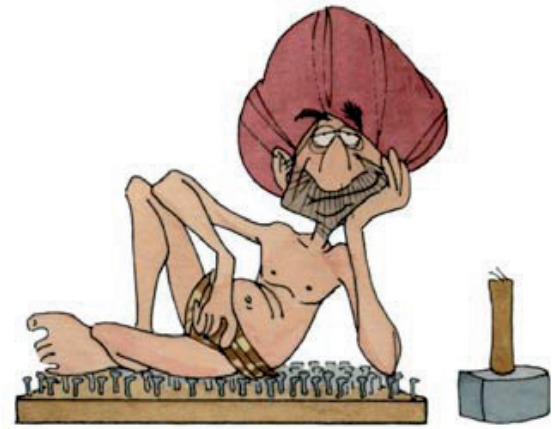
Cuando un cable se flexiona, sus cordones deben moverse deslizándose unos respecto a otros. Descubrimos que, debido a sus superficies lisas (Figura 9), los cordones compactados se deslizaban mucho más fácilmente que los convencionales.

Fig. 9

Seguimos desarrollando y probando la nueva tecnología, y ya en 1978 lanzamos la primera línea de cables con cordones compactados (Figura 10).



Cordones compactados



Áreas de contacto aplanadas

Fig. 10

Estos cables no sólo ofrecían una resistencia a la rotura mucho mayor, sino que también presentaban unas condiciones de contacto mucho mejores tanto con las canaletas[10] de las poleas y los tambores (Figura 11) como por dentro de los propios cables.

10 La palabra original en inglés es *groove*, que admite numerosas traducciones correctas. 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)

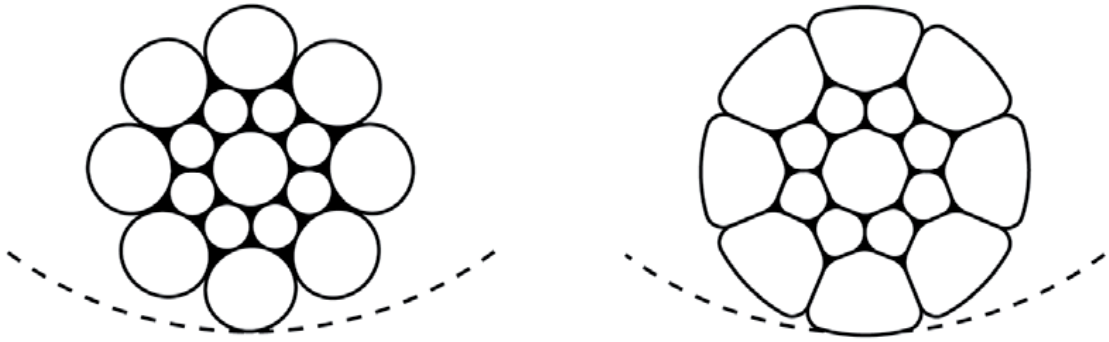
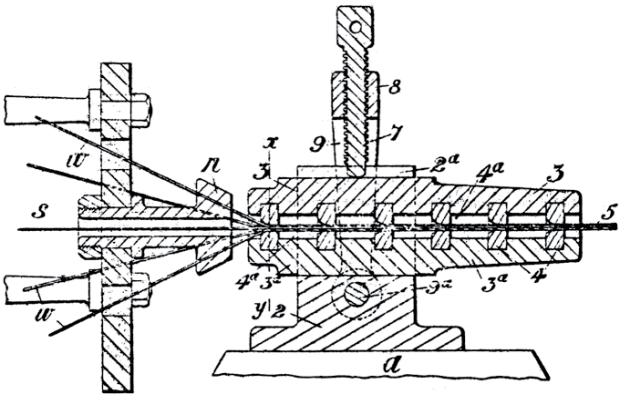


Fig. 11: Cordón común de alambres redondos (a la izquierda) y cordón compactado

Los nuevos cables tuvieron mucho éxito en el mercado, pero el fabricante de los cordones de pretensado compactados alegó que tenía una patente sobre el proceso de compactación de finales de los años 50 aún vigente. Admitió que nunca había pensado en fabricar cables con esos cordones, pero que ahora iba a empezar a hacerlo. Y nos prohibió seguir produciendo cordones compactados porque violábamos su patente. Afortunadamente, mientras trabajaba en el proceso yo había encontrado otra patente, de Charles John Banks, casi 70 años anterior (!), y era obvio que podría haber derribado su patente en un juicio fácilmente (Figura 12).



Charles John Banks 1891

Fig. 12: Dispositivo compactador de Charles John Banks, 1891

Así que finalmente llegamos a un acuerdo por el que nuestras dos empresas podrían fabricar cables con cordones compactados y demandarían a cualquier otro que quisiera hacerlo violando su patente (aunque inválida). Esta estrategia funcionó durante bastantes años.

Otro salto cualitativo en la evolución de los cables de acero fue el desarrollo de los cables martillados[11], que ofrecen mayor rigidez radial y un mejor desempeño en tambores de enrollamiento multicapa (Figura 13).

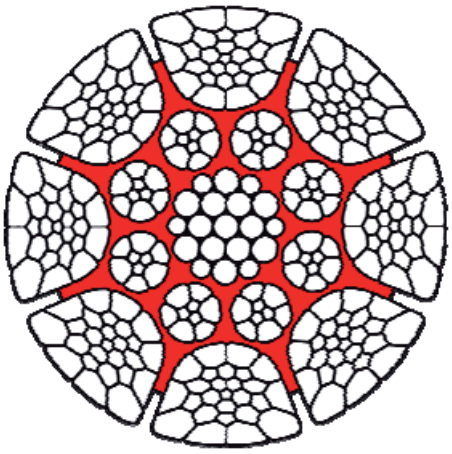


Fig. 13

Con el aumento de la longitud de los cables en aplicaciones en mar (offshore) o de pozos mineros profundos, la influencia del peso propio del cable se vuelve cada vez más importante. Esto abrió la puerta a cuerdas[12] más ligeras fabricadas con fibras de alta resistencia. Pero no había criterios de descarte para estas cuerdas.

Junto con un equipo de ingenieros de la industria del cable y la fibra, desarrollé un cable híbrido en el que el alma de acero se reemplazaba por un núcleo de fibra de alta resistencia (Figura 14).

11 La denominación en inglés es *swagged ropes*, lo cual se traduciría como *cables prensados*. Pero *cables martillados* es la traducción más usual, y por otra parte refleja mejor el proceso, que se parece más a un martillado que a un prensado. El efecto final es un cable compactado en su totalidad. (NdT)

12 El original inglés es *rope*, que traducimos como *cable* cuando se refiere al de acero y como cuerda cuando se refiere a la de fibra. (NdT)

Fig. 14

El problema de las diferentes elasticidades de los materiales se aprovechó pretensando las fibras. Para estos cables se aplican los mismos criterios de descarte de los cables de acero.

2.5. Cables con paso variable

La Figura 15 muestra una instalación de cables con una gran diferencia de altura. Podría tratarse de una mina de pozo profundo o de una aplicación en offshore. La sección del cable en el extremo inferior soporta la carga útil (10t), mientras que la sección del cable en la parte superior soporta la carga útil (10t) más el peso del propio cable (otras 10t).

Esto significa que en el extremo superior el cable está sometido al doble de fuerza que en el extremo inferior. Si el cable no es resistente a la rotación, desarrollará un momento en la parte superior aproximadamente dos veces mayor que en la parte inferior. Como consecuencia, el cable modificará la longitud de su paso de cableado: En la parte superior tenderá a abrirse, alargando el paso y por ende el cable, y en la parte inferior tenderá a cerrarse, acortando el paso y el cable.

A partir de ese momento, operará sometido a una alta torsión y su vida útil a la fatiga será muy pobre.

Pero además, operar con cables torsionados es peligroso: apenas el cable retorcido se afloje (por ejemplo, porque la carga útil toca el lecho marino), inmediatamente sufrirá deformaciones.

En las minas de pozo profundo esto es una cuestión de vida o muerte: Si el contenedor (“jaula”) en un pozo profundo se está desplazando hacia arriba y el cable se detiene repentinamente debido a un freno de emergencia, el contenedor seguirá moviéndose hacia arriba debido a su inercia y „sobrepasará“ al cable.

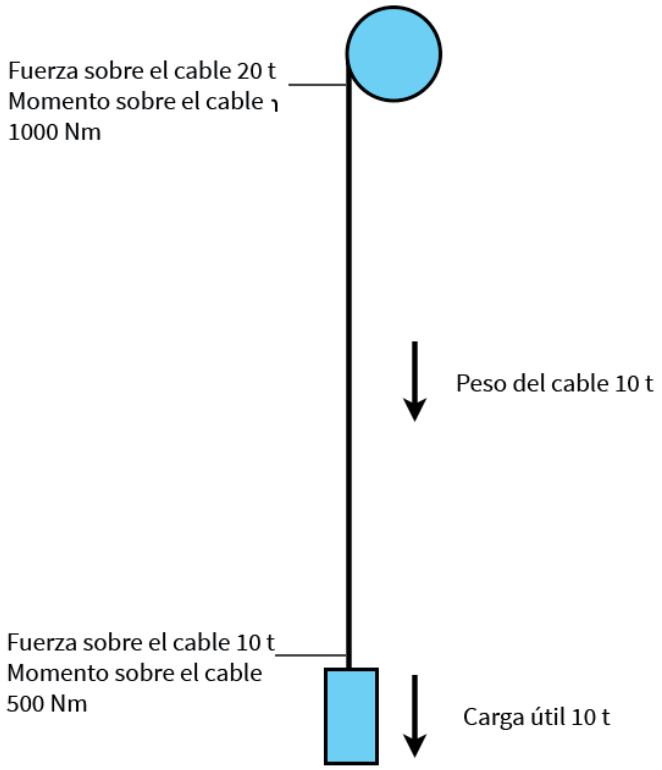


Fig. 15

El cable por encima de la jaula se aflojará inmediatamente y formará un pliegue o un rulo. Pero inmediatamente la jaula retrocederá cayendo y es probable que el cable doblado se rompa. La jaula puede caer entonces cientos de metros. Muchos mineros han perdido la vida en este tipo de accidentes[13].

Hace 30 años iba sentado en un avión pensando en cómo superar estos problemas. Se me ocurrió que cuando se instala un cable con una gran diferencia de altura, éste girará alrededor de su propio eje hasta que los momentos queden equilibrados en cada sección a lo largo del cable. Entonces, ¿por qué no fabricar un cable con este largo de paso continuamente variable?

Al instalar dicho cable, no tendría que girar para alcanzar el equilibrio de momentos: ¡ya tiene la forma correcta!

Patenté la idea y luego intenté convencer a usuarios y fabricantes de cables para que la probaran, pero sin éxito. Hasta que finalmente desarrollé el concepto en una conferencia en el Reino Unido y, afortunadamente, entre el público se encontraba un famoso ingeniero de cables ucraniano. Comprendió inmediatamente las implicaciones de la idea, se volvió a casa, fabricó cables con paso variable y los puso en servicio.

13 En regiones sin instalaciones de offshore o minas profundas, el efecto descripto por el autor se puede ver en la operación de terminación de pozos petroleros en tierra, con el cable llamado de *pistoneo* o *sand line*, que desciende 2000, 3000 o más metros y puede descargarse bruscamente y sufrir enredos o “galletas”. La causa subyacente es la torsión inducida, tal como el autor explica. (NdT)

Los cables funcionaron mucho mejor que cualquier diseño que se hubiera utilizado antes.

Este fue el primer paso, y hoy en día los cables de paso variable ganan cada vez más mercado, especialmente en minas con pozos de más de 1500 metros de profundidad.

Los cables de largo de paso variable aún no se utilizan en la industria de offshore, y es posible que la mayoría de los ingenieros de offshore ni siquiera haya oído hablar de ellos. Pero estoy convencido de que esto cambiará en los próximos años.

2.6. Dimensiones

En los últimos 40 años, las longitudes, los diámetros y los pesos totales de los cables han aumentado enormemente. Hace años, 50 mm se consideraba un diámetro grande para un cable, y el peso de un tramo entero de cable se limitaba a unas 50 toneladas. Hoy en día, diámetros de más de 120 mm no son infrecuentes. El récord mundial actual es un cable de 175 mm de diámetro fabricado en Malasia (Figura 16).

Fig. 16

Las capacidades de las grúas también han crecido.

En 1975, cuando empecé a trabajar en la industria del cable, Krupp construyó una grúa de pórtico de 900 toneladas, la mayor de su época. Hoy en día, las capacidades de elevación de las mayores grúas terrestres rondan las 4000 toneladas, y las de las grúas marítimas son mucho mayores aún.

La Figura 17 muestra una ilustración del buque „Pioneering Spirit“, propiedad de Allseas. El buque tiene capacidad para levantar un topside de hasta 48000 toneladas (utilizando cilindros hidráulicos) y jackets de hasta 25000 toneladas (utilizando cables de acero).[14]

14 El autor da el valor de la capacidad de izaje referida a las partes de una plataforma de perforación. El *topside* es la parte superior completa, o sea la plataforma propiamente dicha, y los *jackets* son las patas de apoyo. No traducimos estos términos ya que en la jerga del offshore se usan casi siempre en inglés. (NdT)

Fig. 17 (Fuente: sitio web de Allseas)

La Figura 18 muestra dos de los cuatro cables A&R[15] del Pioneering Spirit. Estos son los cables más pesados fabricados hasta el momento en un solo tramo, cada uno de los cuales pesa más de 400 toneladas.

Fig. 18

15 A&R son las siglas, tanto en inglés como en español, de “abandono y recuperación”. Se refieren a las operaciones con caños y cables en el fondo marino, para cuyo tendido se usan enormes guinches de cable de acero montados sobre buques. (NdT)

3. Poleas

3.1. Los ángulos de la garganta

Hace 40 años, las poleas de los sistemas de reenvíos se fabricaban únicamente en acero. En la mayoría de los países europeos el ángulo[16] de las gargantas era de 45°, en el Reino Unido era de 52°.

Un día, a principios de los años 80, un fabricante de grúas alemán me llamó para comentarme un problema. Había suministrado algunas grúas pórtico para contenedores, del tipo ship-to-shore[17], a los Estados Unidos, y sus cables de acero estaban generando el efecto jaula de pájaro en pocos días de uso. Ya había agotado todos los cables de repuesto y no los conseguía a tiempo en Estados Unidos. Había vendido el mismo tipo de grúa más de 20 veces en Europa y nunca había visto este problema.

Aunque en aquella época, la norma ISO 4309 decía que el efecto jaula de pájaro era el resultado de una fuerte carga dinámica, para entonces todas las jaulas de pájaro que yo había visto eran el resultado de una torsión en el cable. Pero, ¿en qué parte del sistema de reenvío se había retorcido el cable? ¿Y por qué no ocurría lo mismo en las grúas que operaban en Europa?

Revisamos los planos, pero todo parecía estar bien. Entonces le pedí los planos de las poleas. Me dijo que no los tenía: Había vendido las grúas sin poleas. Para reducir el número de piezas de recambio, su cliente había insistido en tener las mismas poleas en la grúa alemana que en sus otras grúas de fabricación americana, y había instalado poleas de fabricación americana.

Inmediatamente comprendí que ésta era la razón de los problemas: En Estados Unidos el ángulo de las gargantas de las poleas era de 30º. Esto significaba que un cable que entrara en la polea con cierto ángulo de desvío[18] tocaría la pared de la garganta mucho más arriba de lo que lo haría en una polea fabricada en Europa, y luego rodaría hacia abajo una distancia mucho más larga hasta llegar al fondo de la garganta. Como resultado, el cable se retorcería mucho más que en una polea con un ángulo de garganta de 45°. Instalamos poleas de 45° y el problema desapareció.

16 El ángulo de la garganta (*groove angle*) es el ángulo entre sus dos paredes, como se ve en la Figura 21 y en la Figura 23 (ángulo ω). (NdT)

17 Los subtipos de las grúas para contenedores no tienen traducción uniforme. Hay quien llama *pórtico* solamente al *ship-to-shore*, lo cual no es del todo correcto pero está muy generalizado. En definitiva, para ser claros hemos dejado el subtipo *ship-to-shore* como en su original inglés, referido a una grúa con una viga en parte apoyada (muelle) y en parte en voladizo (buque). (NdT)

18 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). Siempre se busca 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)

Más adelante resolví un gran número de problemas similares también en Europa, en sistemas de reenvío con ángulos de garganta demasiado pequeños, instalando nuevas poleas con un ángulo de garganta de 60°.
Muchos fabricantes de grúas insistían en que no se les permitía aumentar el ángulo de la garganta: La norma DIN 15061 pedía específicamente 45°. Pero eso no era correcto: ¡La norma dice 45° "como mínimo"! (Figura 19)

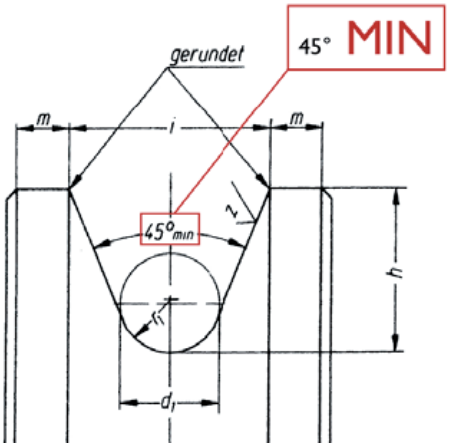


Fig. 19

Otro temor de los diseñadores de la grúa era que, dado al menor ángulo de contacto[19] en la garganta (120° en lugar de 135°), se redujera la vida a la fatiga del cable.

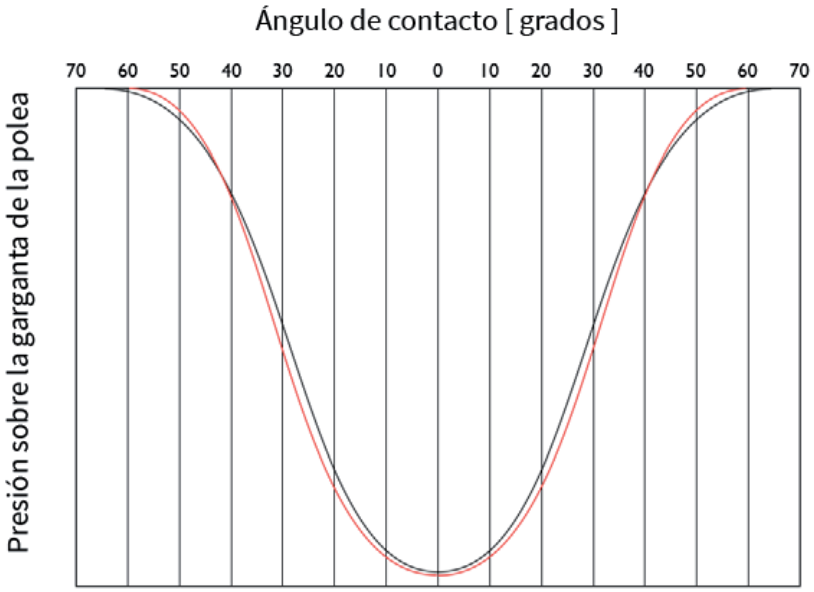


Fig. 20

19 El ángulo o arco de contacto (*angle of support*) del cable en la garganta es el arco de la circunferencia del cable que está en contacto con la circunferencia del fondo de la canaleta. Como se ve en las Figuras 21 y 23, el arco de contacto resulta ser 180° - ω. (NdT)

Pero la diferencia en la presión de apoyo entre las poleas de 45° y las de 60° no es muy significativa (Figura 20), y los ensayos de fatiga por flexión demostraron que no había ninguna diferencia apreciable en dicho rendimiento.

Sin embargo, la mayor resistencia al cambio provino de quienes pensaban que era obvio que el aumento del ángulo de la garganta aumentaría el peligro de que algún cable „saltara la polea“.

Así que construimos un sencillo aparejo de ensayo en el cual se podía variar fácilmente el ángulo de desvío inclinando la única polea del sistema (Figura 21).

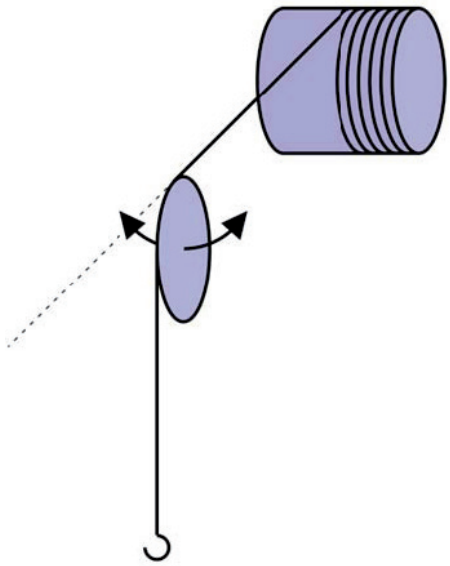


Fig. 21

Probamos diferentes tipos de cable en poleas con ángulos de garganta de 30°, 45° y 60° (Figura 22), y en todas las pruebas las gargantas con ángulo de 60° toleraron los mayores ángulos de desvío.

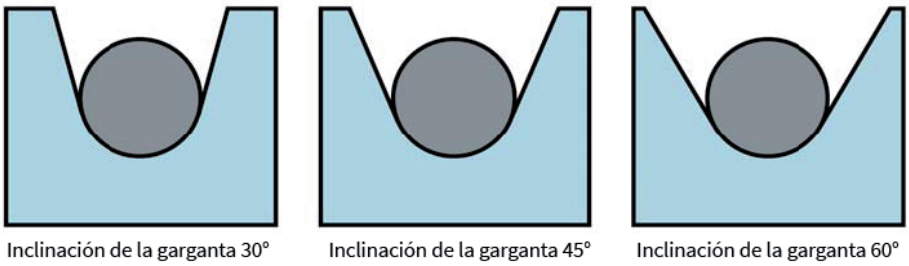
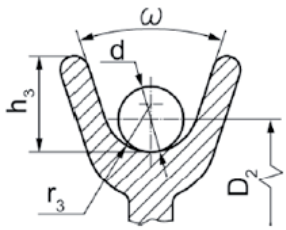


Fig. 22

Resultó evidente que un ángulo de garganta pequeño no impedía que el cable „saltara fuera de la polea“, sino que impedía que el cable entrara en la polea.

Muy lentamente, los fabricantes de grúas aceptaron las ventajas de los ángulos de garganta mayores, y hoy en día las normas como la ISO 4309 o la EN 13135 permiten ángulos de garganta desde 30° (para los americanos que quieren seguir teniendo problemas) hasta 60° (para los que no queremos tenerlos) (Figura 23).



Detalle de la polea del cable

$0{,}52 \times d \leq r_3 \leq 0{,}56 \times d$

$30° \leq \omega \leq 60°$ (simétrico)

$h_3 \geq 1{,}4 \times d$

D_2 es el diámetro primitivo de la polea

Los ángulos de abertura $\omega < 45°$ deberían ser usados únicamente en sistemas donde las poleas no se muevan axialmente y los ángulos de desvío del cable sean menores de 1°. De otro modo el contacto lateral del cable podría causar una peligrosa torsión del mismo.

Fig. 23

Pasados algunos años, me llamó el ingeniero jefe de una gran empresa de grúas: „Todavía te debo una información“. „Bueno, te escucho“.

Me dijo que al principio se había resistido a cambiar a poleas con ángulos de garganta de 60° porque entonces tendría el mismo tipo de grúa en el mercado con dos tipos diferentes de poleas. Pero luego se dio cuenta de que en sus grandes grúas de pluma reticulada su nuevo y muy exitoso límite de carrera superior (Figura 24) no podía utilizarse en el sistema de reenvío con poleas de 45°, pero sí con poleas de 60°.

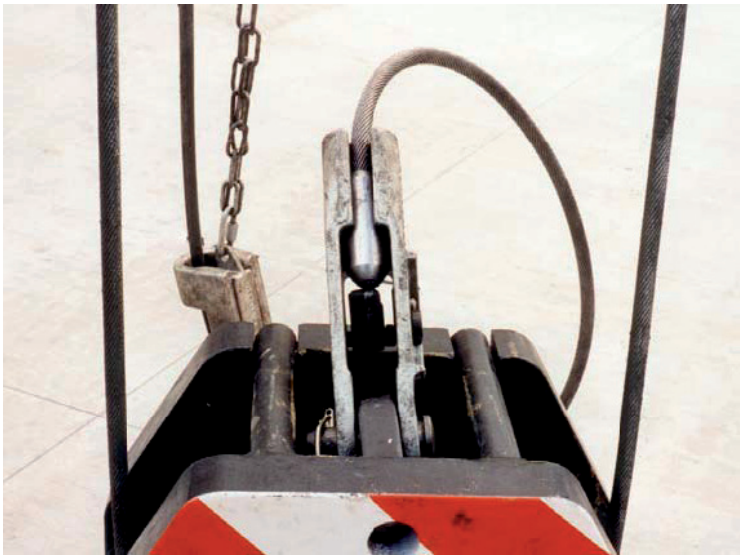


Fig. 24

Así que decidió cambiar a las gargantas más anchas.

„¿Y cuál es la información que me debes?“ „Esto fue hace dos años, y después de haber cambiado a las poleas de 60° no hemos tenido ni una sola queja sobre giro de la pasteca[20] en estas grúas“. Las grúas con las poleas de 45° seguían teniendo este problema.

3.2. Demasiadas poleas

Cuando empecé en esta industria, hace 40 años, un diseñador de grúas tenía que dibujar cada polea a mano (!), en sus tres diferentes vistas (!). Esta era una buena razón para reducir al mínimo el número de poleas.

Con los sistemas CAD modernos, una polea se dibuja en cuestión de segundos, lo que facilita demasiado la instalación de poleas innecesarias. A menudo veo grúas que podrían haber funcionado mucho mejor con menos poleas.

En la universidad de Clausthal (ciudad en la que se inventó el cable de acero) doy clase sobre cables y sistemas de enrollamiento y utilizo el siguiente ejemplo para explicar el efecto de añadir una polea al sistema de reenvíos:

La grúa 1 enrolla el cable de elevación directamente en un tambor. La grúa 2 enrolla el cable de elevación sobre una polea y en el tambor (Figura 25). La diferencia en la vida a la fatiga entre los cables de elevación de las dos grúas es tremenda.

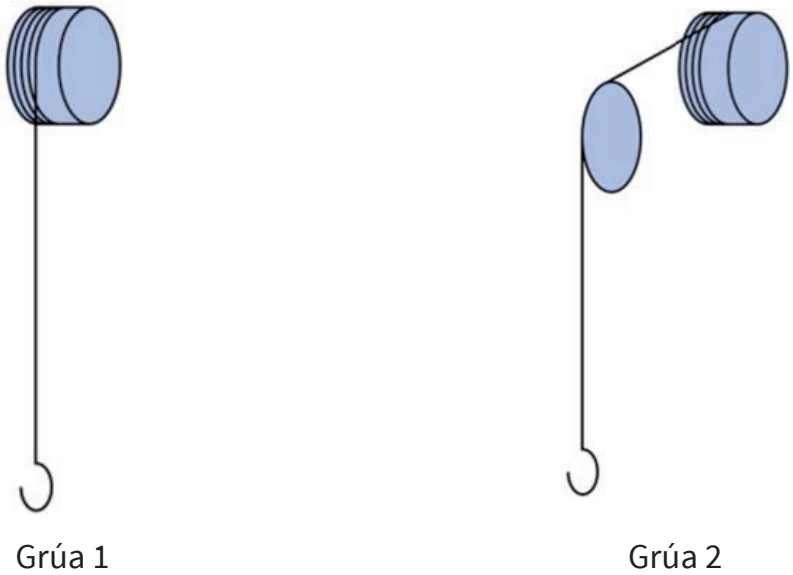


Fig. 25

20 En inglés, se llama *block* al conjunto formado por las poleas y el gancho. En castellano hay 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)

Durante una operación de elevación (1 elevación + 1 descenso) la grúa 1 realiza un ciclo de flexión (Figura 26, izquierda). Durante una operación de elevación, la grúa 2 realiza tres ciclos de flexión (Figura 26, derecha). Sólo por el hecho de tener una polea en el sistema de reenvío, la vida del cable de la grúa 2 será sólo un tercio de la que conseguiríamos en la grúa 1.

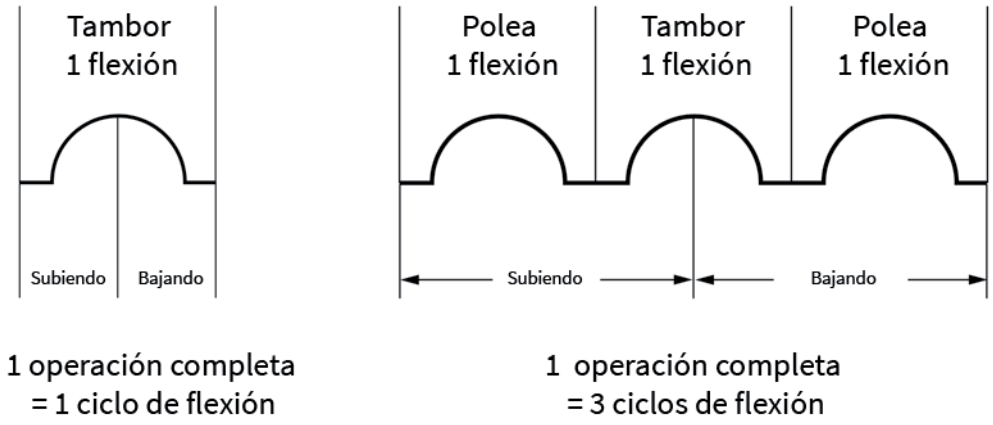


Fig. 26

3.3. Poleas de plástico

Las poleas de plástico aparecieron por primera vez en el mercado a finales de la década de 1970. Pronto se hicieron muy populares porque eran más baratas y, para los diámetros más pequeños, también mucho más livianas que las poleas de acero. Además, se decía que los cables de acero duraban mucho más en las poleas de plástico que en las de acero.

Pero no todo el mundo estaba convencido. El ingeniero jefe de una gran empresa de grúas escuchó el discurso del vendedor de poleas, abrió la ventana de su oficina del tercer piso y lanzó la polea en un amplio arco sobre el estacionamiento de abajo. Al golpear el suelo, la polea estalló en miles de pedazos.

„Esto no habría ocurrido con una polea de acero“, le dijo al vendedor. „Puede volver a consultarme cuando haya solucionado este problema“.

Por aquel entonces, un gran fabricante de grúas me pidió que realizara pruebas de fatiga por flexión con cables sobre poleas de plástico en las mismas condiciones en las que los probábamos sobre poleas de acero. Instalé una polea de plástico en la máquina de fatiga por flexión y comencé la prueba. Alrededor de media hora más tarde oí un fuerte estallido: La polea había quedado destrozada.

Cada vez que pasa por una polea, el cable pasa de estar recto a curvado y a recto nuevamente, repetidas veces, y en cada cambio los elementos del cable se mueven unos respecto a otros. El calor generado durante este proceso se puede disipar fácilmente a través de una polea de acero, pero no tan fácilmente a través de una polea de plástico: el material plástico es un aislante térmico. Como resultado, el cable se calienta mucho más en una polea de plástico que en una de acero, y finalmente el material de la polea empieza a fluir y la polea empieza a tambalear. Sometida a una fuerza del doble de la tracción del cable, la polea acabará deformándose y colapsando.

Cierto día me llama un fabricante de grúas torre y me pregunta: „¿Qué has cambiado en tu cable?“ „Nada, ¿por qué lo preguntas?“ „Deben haber cambiado algo. A partir de tal fecha, todas nuestras grúas nuevas tienen problemas de giro de la pasteca“.

Descubrimos que quien había cambiado algo era el fabricante de grúas: exactamente a partir de esa fecha la grúa se vendía con poleas de plástico. Volviendo al acero se solucionaron los problemas: El coeficiente de fricción entre el cable y el flanco de la polea es mayor con las poleas de plástico que con las de acero. Por lo tanto, con el mismo ángulo de desvío, una polea de plástico generará mucha más torsión en el cable, lo que provocará que la pasteca gire en condiciones en las que, con poleas de acero, sería estable.

Durante los años que siguieron, las poleas de varias grúas de gran tamaño expuestas a un fuerte sol colapsaron debido a una combinación de ángulo de desvío y calor (Figura 27).

Fig. 27

En la década del 80 las poleas de plástico se hicieron muy populares porque parecía que los cables duraban mucho más que con las poleas de acero.

Pero pronto se vio que el número de fallas de cables aumentaba, y muchos casos eran con poleas de plástico. Los cables fallaban sin mostrar ninguna rotura de alambre exterior.

Si un cable rueda 180° sobre una polea de acero con una tracción sobre la línea de, por ejemplo, 5t, la polea presiona contra el cable con una fuerza de reacción de 10t (Figura 28, izquierda). Las fuerzas actúan sobre los alambres exteriores del cable que están en contacto directo con la superficie de la garganta, generando muy altas presiones locales sobre los alambres (Figura 28, derecha).

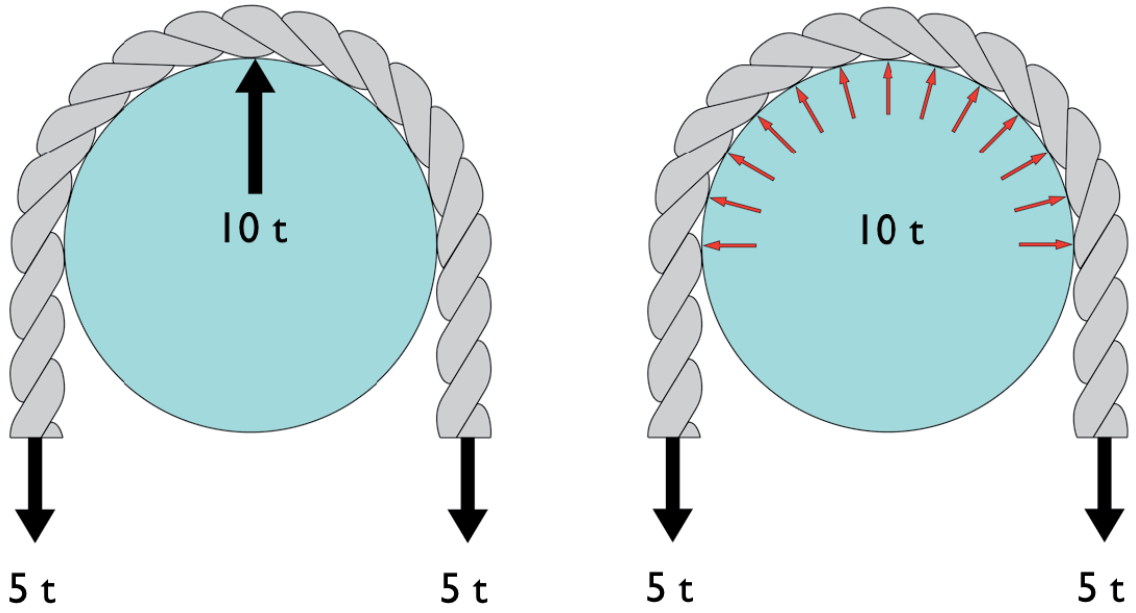


Fig. 28

Con el tiempo, se desarrollarán fisuras por fatiga en esos puntos de contacto (Figura 29). Con cada flexión adicional, la fisura se propagará más hasta que finalmente el alambre se romperá por completo.

Los ingenieros empezaron a comprender que la polea de plástico proporcionaría un lecho blando para los alambres exteriores del cable, de modo que dichos alambres ya no se romperían en los puntos de contacto con la garganta de la polea (esa era la buena noticia).

Fig. 29

Pero como en las inspecciones visuales de los cables no se veían las roturas, éstos se dejaban en servicio durante mucho más tiempo y empezaban a fallar desde adentro hacia afuera hasta que todo el cable se rompía sin mostrar antes ningún signo de deterioro (ésa era la mala noticia).

Las poleas de plástico nunca han sido prohibidas, pero han sobrevivido únicamente en aquellas grúas donde existen otros mecanismos (por ejemplo, el aplastamiento producido por el tambor en los arrollamientos multicapa) que causan un suficiente daño exterior antes de que cualquier daño interno pueda llevar el cable a un fallo.

4. Ensayos en los cables de acero

4.1. Ensayos de rotura

Hace 40 años, todo lo que un fabricante de cables de acero tenía que saber sobre su cable era su diámetro y su resistencia a la rotura.

Muy pocos diseñadores de grúas preguntaban por el módulo de elasticidad del cable o la rigidez radial, y la mayoría de los fabricantes de cables no sabían qué era eso.

Esto ha cambiado un poco, pero no mucho. Todavía hoy, muchos fabricantes de cables no saben que el módulo de elasticidad del cable no es constante, sino que cambia con la precarga (Figura 30) o, incluso con una carga media constante, cambia en función del número de ciclos de flexión o tensión-tensión.

Los cables de acero todavía se siguen valorando por su resistencia, aunque otros factores pueden ser más importantes para su uso.

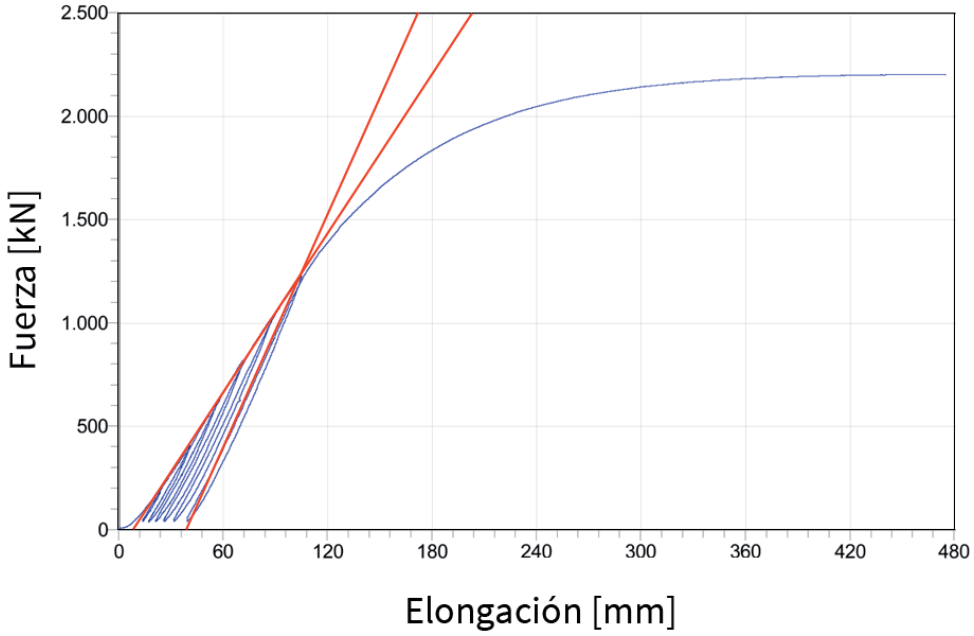


Fig. 30

A modo de ejemplo, las Figuras 31 y 32 muestran los gráficos fuerza-elongación de dos cables con una resistencia a la rotura casi idéntica. Sin embargo, la capacidad de absorción de energía, representada por el área bajo el gráfico, y que es proporcional al producto fuerza * alargamiento, es aproximadamente dos veces mayor en el primer cable, que tiene un alargamiento a la rotura mucho mayor (Figura 31) que el segundo (Figura 32).

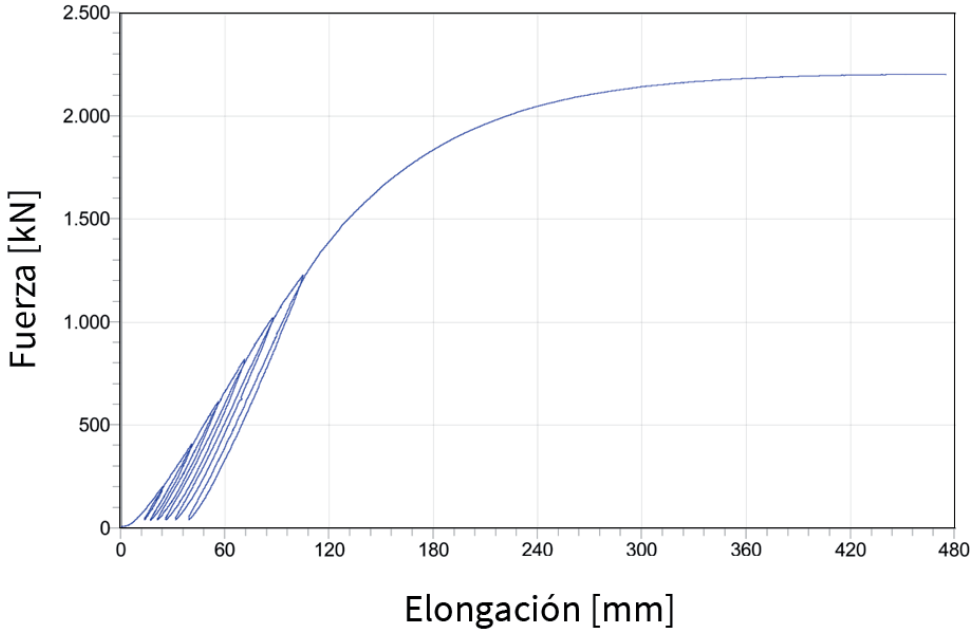


Fig. 31

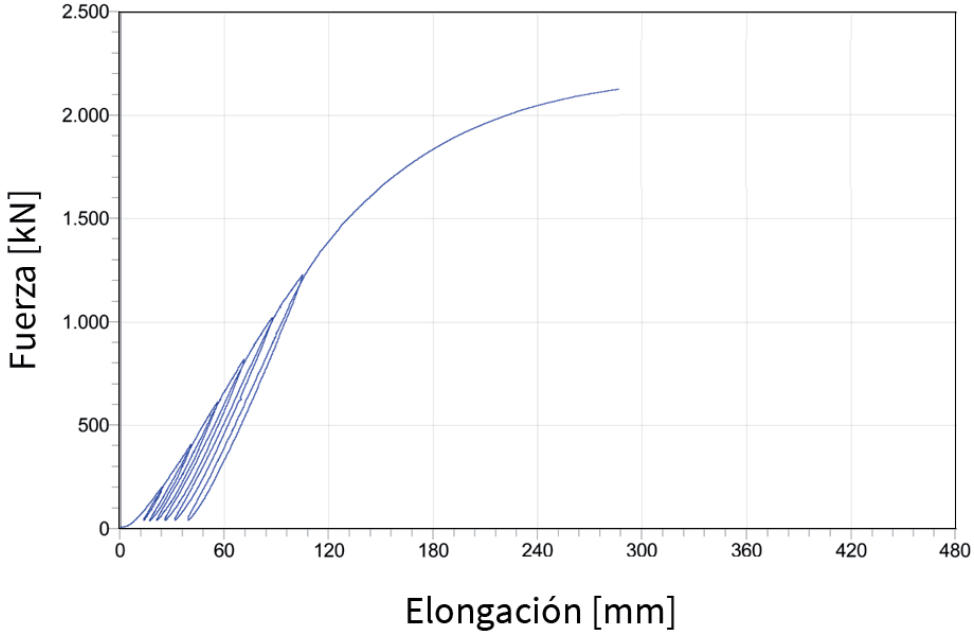


Fig. 32

Por lo tanto, a pesar de que las resistencias a la rotura son comparables, el cable de la Figura 32 tiene más probabilidad de fallar ante una carga dinámica elevada.

4.2. Ensayos de fatiga por flexión

En las últimas décadas, los ensayos de fatiga por flexión con cables de acero se han realizado en máquinas de ensayo con una polea motriz y una polea de ensayo (Figura 33) o en máquinas con dos poleas de ensayo girando alternativamente en uno y otro sentido (Figura 34).

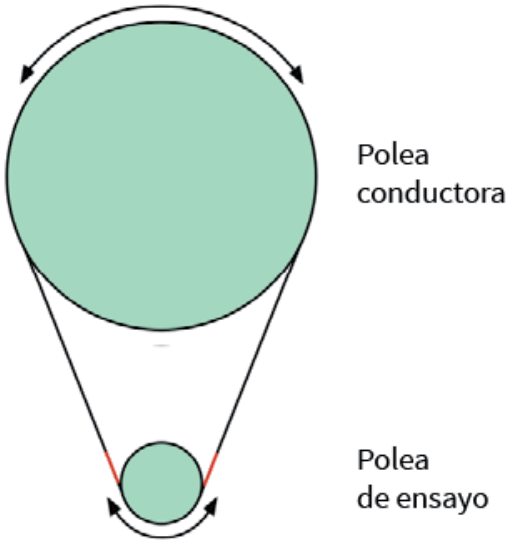


Fig. 33

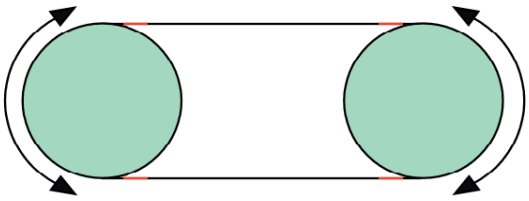


Fig. 34

La zona del cable a ensayar se mueve de un lado a otro sobre una sola polea. ¿Es una simulación realista del uso de tu cable? Yo diría que no.

Los resultados de estas pruebas suelen ser muy dudosos. A modo de ejemplo: La parte de cable que pasa sobre la polea por completo, flexionándose dos veces con cada ciclo (ida y vuelta) de la máquina, suele tener menos roturas de alambres que las partes que no sobrepasan la polea, flexionándose así una sola vez. Esto podría deberse a que la polea „ordeñaría“ posibles holguras del cableado, apretando la zona de prueba que hace dos flexiones por ciclo de máquina y “llevando” la holgura a la zona que sólo hace la mitad de flexiones.[21]

Pensé en cómo tendría que ser una máquina de ensayo para simular condiciones reales. Estaba claro que tendría que tener más de una polea de prueba.

A primera vista, la máquina de ensayo de la Figura 34 parece cumplir este requisito. Tiene dos poleas de ensayo. Sin embargo, en esta máquina no hay ninguna sección de cable que pase por las dos poleas de ensayo. Tenemos la misma disposición irreal que en la primera máquina, ¡sólo que dos veces!

Esto hace que sea aún peor: el calor generado en la polea de prueba de la Figura 33 puede viajar a través del cable a zonas más frías (en la polea de accionamiento, donde se genera mucho menos calor). Pero el calor generado en una de las poleas de prueba de la Figura 34 no se puede transferir a través del cable a la otra polea de prueba porque allí se genera la misma cantidad de calor.

Así que estaba claro que una máquina que reprodujera mejor las condiciones reales tendría que tener una disposición de poleas que proporcionara un gradiente de calor.

Un día me senté a plasmar en papel mi visión de una máquina de ensayo de fatiga. Junto con Jean Marc Teissier (DEP Engineering, Francia) construí una máquina prototipo, y una de las primeras pruebas que hicimos con ella fue para la NASA.

Hoy en día, el Sr. Teissier vende máquinas con este concepto para una amplia gama de diámetros de cable.[22]

La máquina tiene una disposición de 5 poleas (la cantidad puede variar), dispuestas de tal manera que el cable ingresa a cada polea sin ángulo de desvío (Figura 35).

Lo hicimos así porque la idea es ensayar cuánto influyen en la vida a la fatiga la tracción del cable y la relación D/d, y no así el ángulo de desvío. La Figura 36 muestra una vista general de la máquina.

21 El autor se refiere a una posible excesiva holgura originada por un defecto de fabricación, el cual no sería detectado por esta máquina en el ensayo. (NdT)

22 La máquina se vende con la marca DEP y resulta de enorme utilidad para los fabricantes de cable, tal como explica el autor. Una de las primeras máquinas producidas comercialmente fue comprada por una compañía argentina, que aplicó ampliamente sus resultados para perfeccionar sus diseños de cables. (NdT)

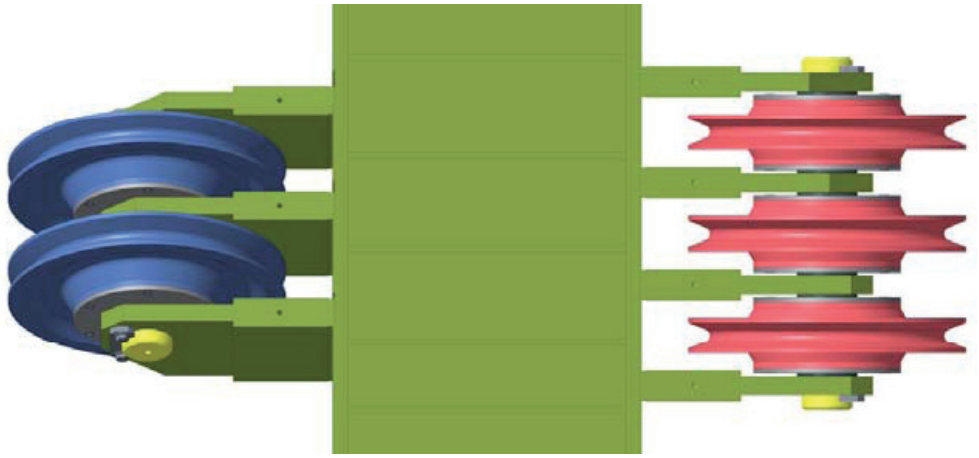


Fig. 35

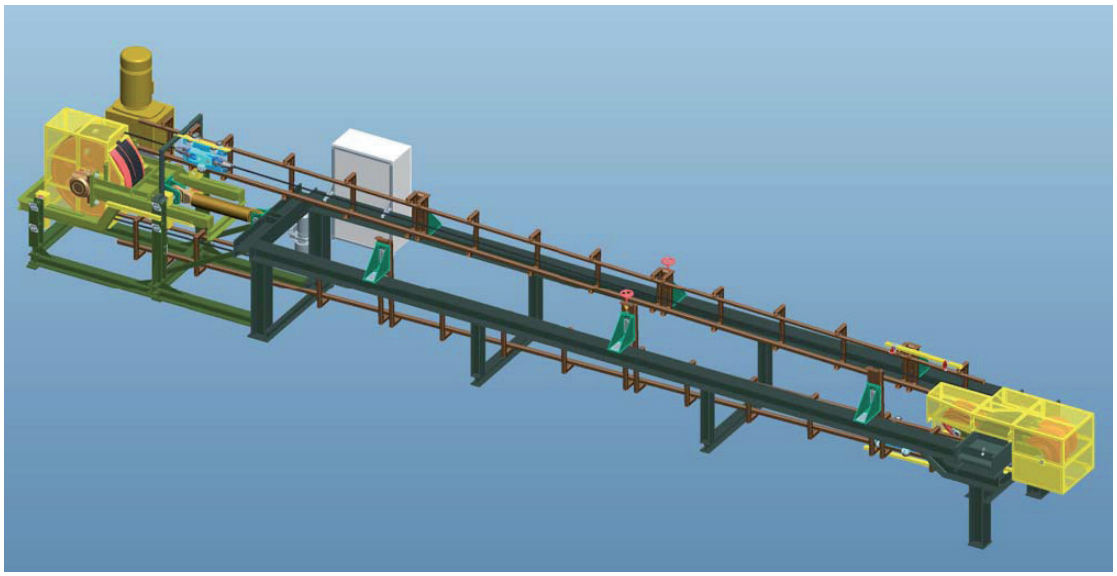


Fig. 36

Después de instalar el cable de prueba, ajustas la fuerza de tracción en la línea activando un cilindro hidráulico (a la izquierda). Luego aprietas el botón „start“, y el cable de prueba comienza a correr de un lado a otro del tambor (a la izquierda) a través de las 5 poleas y luego de vuelta a través de las poleas al tambor. El ensayo nunca se detiene hasta que el cable falla con un fuerte estampido.

Las máquinas de ensayo convencionales se detienen con mucha frecuencia para medir los cambios de diámetro del cable y contar las roturas de alambres. Nosotros no lo hacemos. Pero entonces, ¿cómo obtenemos estos datos? No te preocupes, obtendremos estos datos y muchos más después de terminado el ensayo.

Incluso obtendremos la cantidad de roturas de alambre en el interior del cable a lo largo de su vida útil sin necesidad de parar la máquina.

Y aquí está el truco: Sólo el tramo central del cable ensayado recorre las cinco poleas. A la izquierda y a la derecha de la sección central encontramos dos tramos de cable que recorren sólo cuatro poleas y no llegan a la quinta (Figura 37).

Por lo tanto, una vez terminada la prueba (y rota la zona central del cable) podemos analizar estos dos tramos que han realizado exactamente el 80% del número de ciclos del tramo central. Así que sin importar cuántos ciclos haga el cable en las condiciones elegidas, estos dos tramos representarán su estado al 80% de los ciclos de fallo.

Luego, a la izquierda y a la derecha de estos dos tramos encontramos otros dos tramos de cable que recorren sólo tres poleas y no llegan a la cuarta. Así que estas dos secciones representan el estado del cable después del 60% de los ciclos de fallo. Y, por supuesto, tenemos tramos de cable que recorren sólo 2, 1 o 0 poleas, lo que representa el estado del cable después del 40%, 20% y 0% del número de ciclos de fallo (Figura 38).

Así, después del ensayo, podemos medir las longitudes de paso y los diámetros del cable y contar las roturas de alambre visibles en estos diferentes tramos, representativos de las diferentes etapas de la vida del cable.

A continuación, podemos trazar la curva del número de alambres rotos a lo largo de la vida útil (en % de los ciclos de fallo) y comprobar en qué momento de la vida útil del cable se llegó al número de roturas de descarte indicado por ISO 4309 (Figura 39). Así podemos determinar cuándo alcanzamos el estado de descarte sin detener nunca el ensayo ni contar las roturas durante el mismo. Hacemos el recuento cuando la siguiente prueba ya está en marcha.

Luego podemos desarmar los tramos, medir el diámetro y paso del alma de acero de cada tramo y contar las roturas de alambres en la parte interior de los cordones exteriores o en el alma.

Imagínate que haces esto con la máquina de ensayo convencional: una vez que abres tu cable, el ensayo se termina definitivamente. ¡En esta máquina, en cambio, puedes desarmar el cable después del 20% de la vida útil, después del 40%, después del 60%, después del 80% y después del fallo habiendo hecho una sola prueba de fatiga!!!

Pero eso no es todo: si quieres conocer la carga de rotura residual o el módulo de elasticidad del cable después del 60% de los ciclos de fallo, sólo tienes que hacer una prueba de tracción con la muestra correspondiente al 60% del otro lado.

También podrás comprobar en qué fase de la vida útil comienzan a deteriorarse los distintos componentes del cable. Y podrás modificar el diseño del cable si un componente se deteriora demasiado pronto.

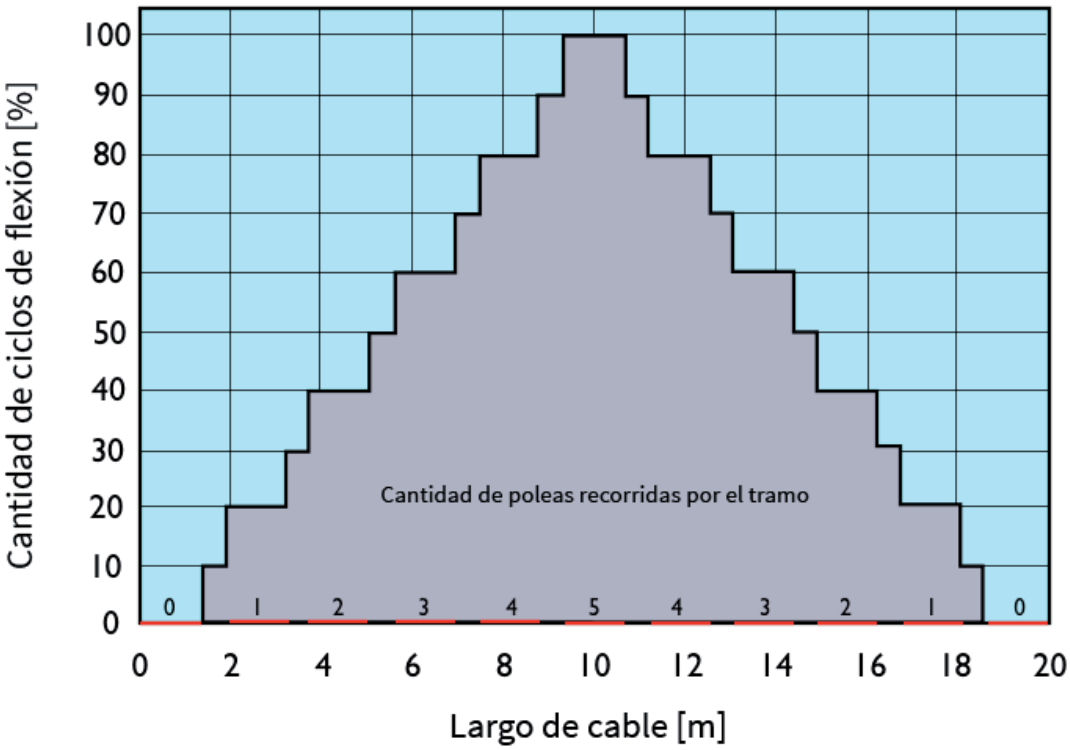

Cantidad de ciclos de flexión [%]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Cantidad de poleas recorridas por el tramo
0
1
2
3
4
5
4
3
2
1
0
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
Largo de cable [m]

Fig. 37

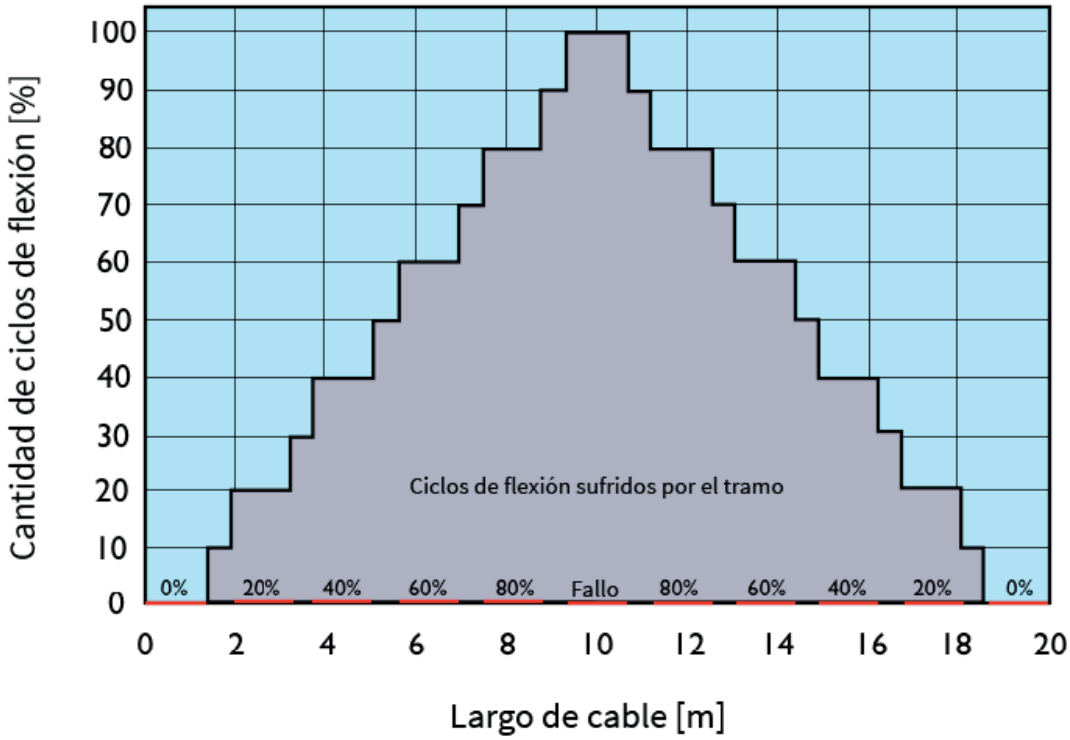

Cantidad de ciclos de flexión [%]
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Ciclos de flexión sufridos por el tramo
0%
20%
40%
60%
80%
Fallo
80%
60%
40%
20%
0%
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
Largo de cable [m]

Fig. 38

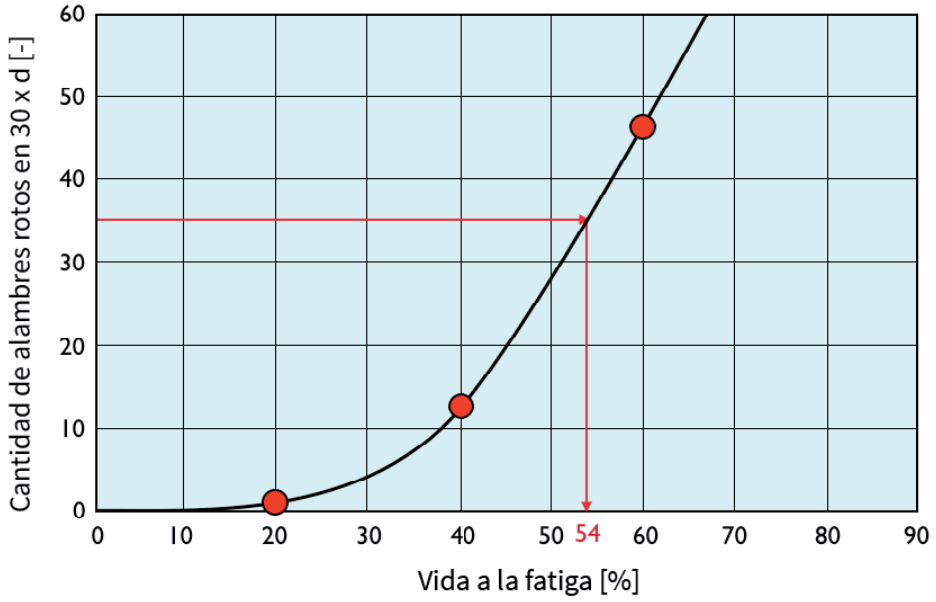


Fig. 39

Todo esto ayudará y acelerará enormemente el desarrollo tecnológico del cable de acero.

En 1978 diseñé el primer cable de la historia con cordones compactados y un relleno de plástico. Ese cable, llamado Turboplast, se sigue vendiendo hoy en día y se convirtió en el cable especial más copiado del mundo. Más de 30 años después, creía saber todo lo que se puede saber sobre el diseño de este cable. ¡Qué equivocado estaba! Sólo una prueba en esta innovadora máquina de ensayo me enseñó mucho más sobre el producto.

El análisis de los diferentes tramos del cable también te dará un panorama de cómo se presentará en determinadas etapas de su vida. La Figura 40 muestra el aspecto del cable después del 0%, 20%, 40%, 60%, 80% de los ciclos de fallo y las secciones próximas a la rotura en el tramo del 100%.

El tramo del 40% tiene roturas de alambres, pero su resistencia a la rotura es mayor que la del cable nuevo. El tramo del 60% tiene un número aún mayor de roturas, pero sigue teniendo el 97% de la resistencia del cable nuevo.

Es obvio que esta máquina de fatiga por flexión simula las aplicaciones reales de los cables mucho mejor que los diseños convencionales comentados anteriormente.

Con un solo ensayo de fatiga, la máquina proporciona una riquísima información sobre el cable, la mayor parte de la cual ni siquiera he mencionado aquí.

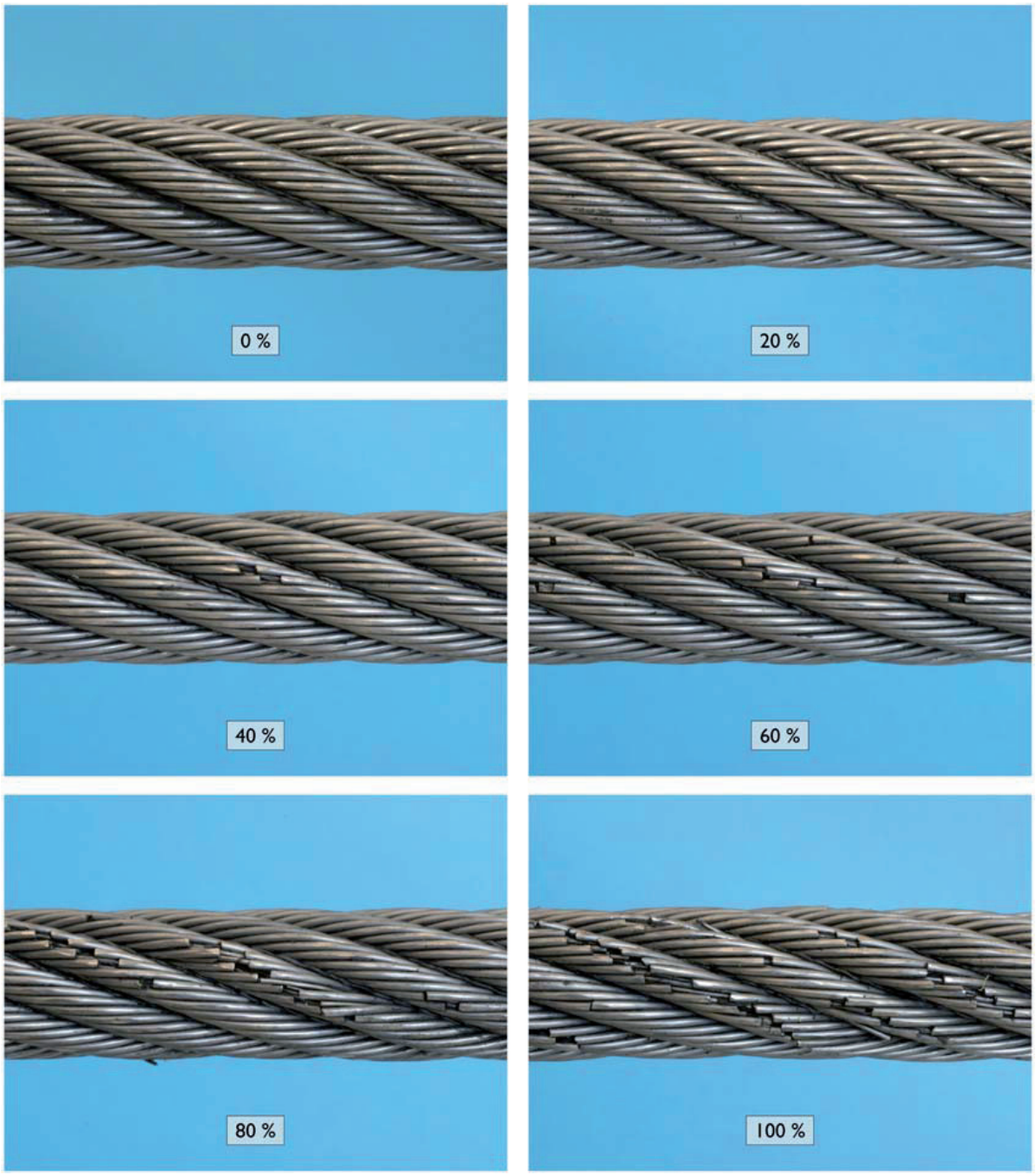


Fig. 40

5. Tambores

Hoy día estamos acostumbrados a ver tambores con varias camadas de enrollamiento y grandes relaciones D/d (Figura 41).

Fig. 41

Hace 40 años, un tambor de grúa típico tenía una relación D/d pequeña para reducir el par requerido. Para poder contener una gran longitud de cable, debía tener un gran número de vueltas. Por tanto, tenía que ser muy largo (Figura 42).

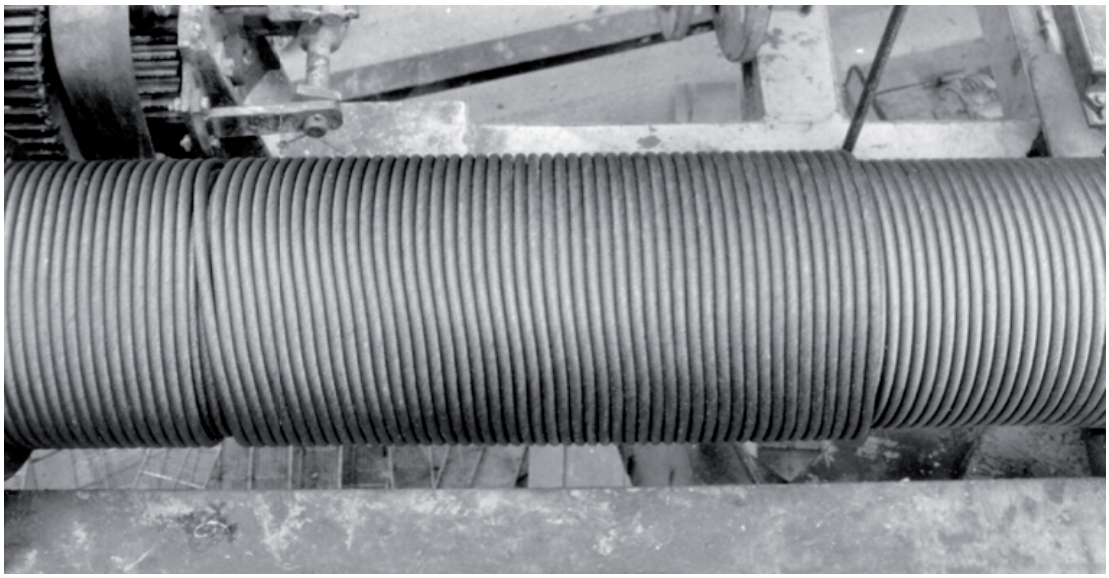


Fig. 42

Así se generaban ángulos de desvío excesivos, tanto en el tambor como en la primera polea, produciendo problemas de bobinado (Figura 42) y daños en el cable (Figura 43) y en el tambor (Figura 44).

Fig. 43

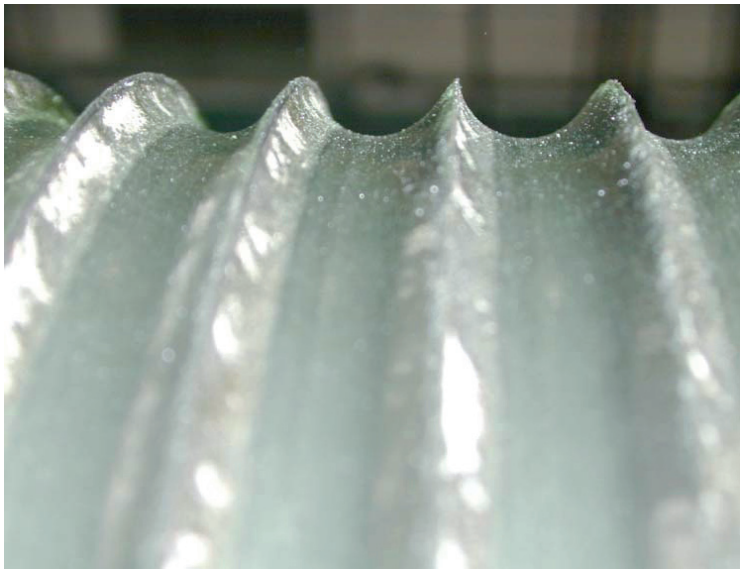


Fig. 44

En aquel momento desarrollé, basándome en la geometría del tambor y en los ángulos de desvío, un programa para calcular si el cable que entraba o salía del tambor entraba en contacto con la espira contigua o con el borde de la canaleta del tambor, y dónde lo hacía. El software detectaba una gran cantidad de superposiciones a lo largo del tambor (Figura 45) y luego las mostraba como en una película.

Con los años pude identificar y corregir cientos de diseños defectuosos de tambores utilizando este software.

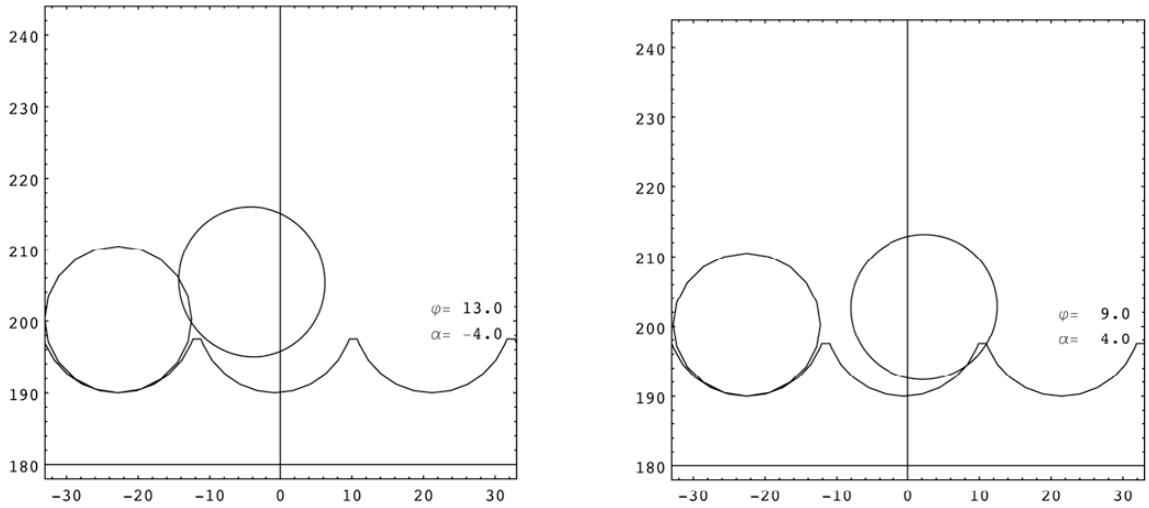


Fig. 45

También se puso de manifiesto que el número de cordones exteriores del cable desempeña un papel importante. Los tambores de la Figura 46 y de la Figura 47 tienen el mismo paso y los cables tienen el mismo diámetro, pero en el tambor siempre habrá en promedio una mayor separación entre dos cables contiguos de 6 cordones (Figura 46) que entre dos de 18 cordones (Figura 47).

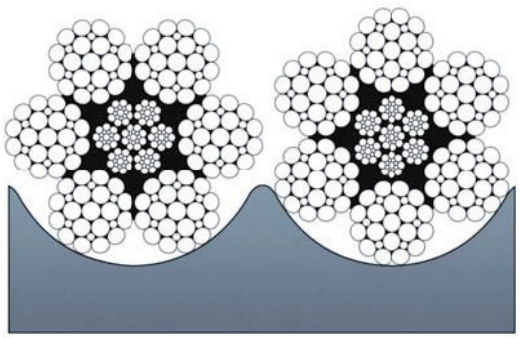


Fig. 46

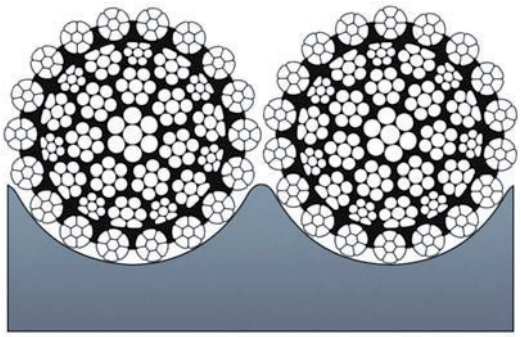


Fig. 47

5.1. Tambores multicapa

Cuando las grúas torre se hicieron más altas, hubo que poner una segunda capa de cable en el tambor (Figura 38). Fue entonces cuando empezaron los problemas: En la segunda capa, el cable ya no estaba guiado por la suave canaleta del tambor, sino que seguía la guía que le daba la primera capa (aunque avanzando en sentido opuesto) hasta que chocaba con la vuelta vecina.

Entonces tenía que „cruzar“: Debía abandonar la guía creada por dos vueltas de la primera capa y subir por encima de una de ellas, con lo que la fuerza de contacto aumentaba aproximadamente un 73% (Figura 48).

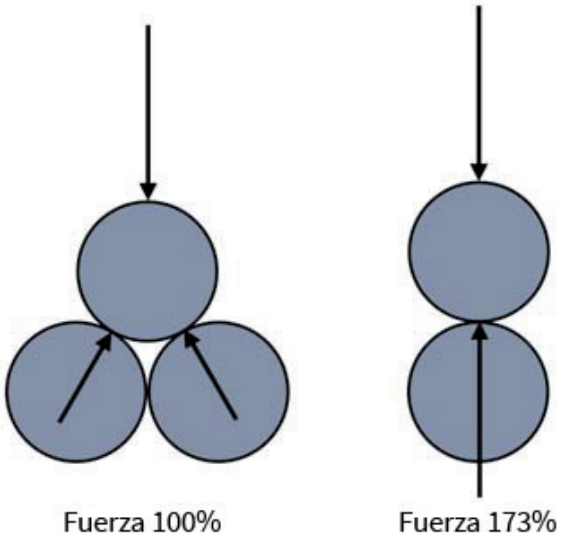


Fig. 48

Fig. 49

A menudo, y especialmente cuando se combinaba con cambios en la tracción sobre la línea, provocaba severos daños en el cable en los puntos de cruce (Figura 49).
Hoy en día, no es raro que los tambores tengan entre 8 y 10 capas. Si se enrolla el cable en el tambor bajo tensión desde la capa inferior hacia arriba, normalmente funciona bien. Pero enrollar unas capas flojas e inmediatamente tirar fuertemente levantando una carga es peligroso: El cable tenderá a introducirse entre dos vueltas de la capa de abajo. Como consecuencia, aumentan las fuerzas del cable contra las alas del tambor, y éstas pueden reventar.

Otro problema puede producirse cuando el cable se desenrolla de nuevo del tambor al bajar la carga: el tramo de cable introducido puede quedarse enganchado y no salir del tambor y, como consecuencia, la carga volverá a subir repentinamente (Figura 50).

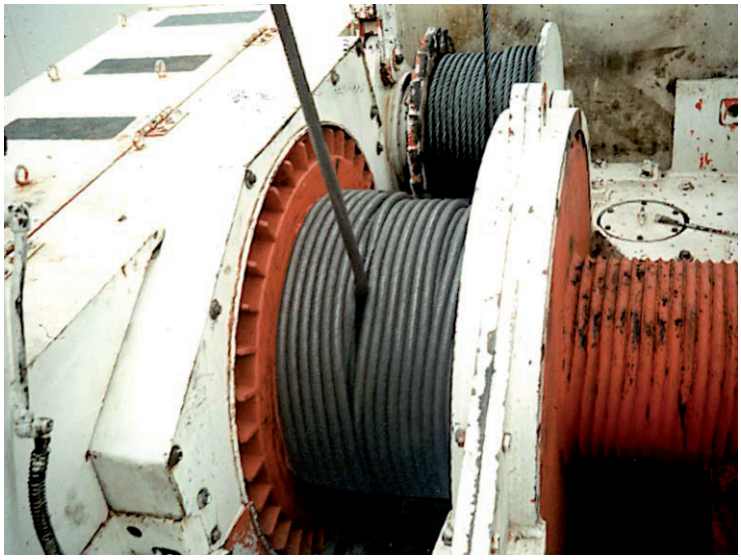


Fig. 50

En tal situación, el cable podría romperse o la grúa podría volcar.
La industria aún no ha encontrado un buen sistema para dar tensión a las primeras capas en el tambor y así evitar ese problema.

5.2. Cables de torsión Lang

Cuando empecé a trabajar en la industria del cable de acero, hace 40 años, los cables se fabricaban normalmente en torsión regular[23], y sólo ocasionalmente se producía alguno de torsión Lang. Esto ha cambiado[24]: hoy en día, es raro encontrar un cable de torsión regular en una grúa torre o móvil de gran tamaño. Este cambio ha sido causado por el tambor multicapa.

Cuando dos vueltas de cable de torsión regular entran en contacto durante el enrollado multicapa, se forman hendiduras en sus alambres exteriores (que están en la misma dirección). La siguiente camada de cable que entra al tambor los presionará aún más, y cuando el cable quiera volver a salir del tambor, se trabará con su vecino y los alambres exteriores se dañarán severamente (Figura 51).

Fig. 51

Las figuras 52 y 53 muestran la diferencia: Los alambres exteriores de dos espiras contiguas con cable regular forman hendiduras o indentaciones (Figura 52) mientras que los de los cables Lang no lo hacen (Figura 53).

El peligro de indentaciones también se reduce compactando los cordones exteriores, de modo que la mejor solución es utilizar cables de torsión Lang con cordones exteriores compactados.

23 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)

24 Este cambio hacia el cable Lang ya se va produciendo también en Latinoamérica, ya que algunos fabricantes principales tienen la capacidad y voluntad de hacerlo. Pero una vez más, la pequeña escala del mercado lo dificulta. (NdT)

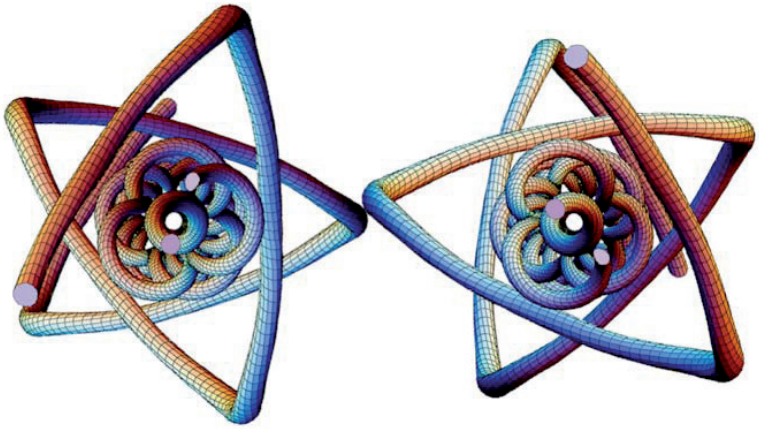


Fig. 52

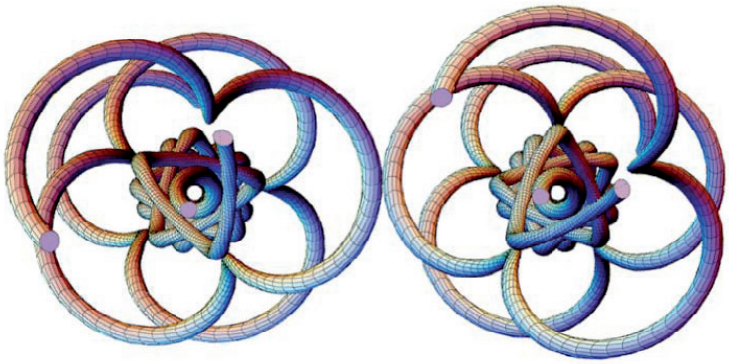


Fig. 53

Recientemente un importante fabricante de grúas ha introducido un nuevo concepto que podría resolver el problema del daño mutuo entre los cables contiguos en el bobinado de capas múltiples: El tambor „sabe“ en qué momento el cable que se está enrollando en el tambor va a chocar con la vuelta vecina, y exactamente cuando eso va a ocurrir el tambor se desplaza hacia un lado exactamente la mitad del paso de la canaleta para que el cable se enrolle en la nueva posición sin siquiera tocar la vuelta contigua.

5.3. Integridad del tambor

Con el paso de los años, el número de capas de cable en el tambor fue aumentando, y así vimos cómo comenzaban a colapsar los núcleos del tambor.

Si enrollamos 9 capas de cable en el tambor, las fuerzas del cable que intentan comprimir el núcleo del tambor no serán 9 veces mayores que con una sola capa, sino (dependiendo de la rigidez radial del cable utilizado) entre 2 y 5 veces mayores (Figura 54, © Prof. Lohrengel, Universidad de Clausthal, modificado).

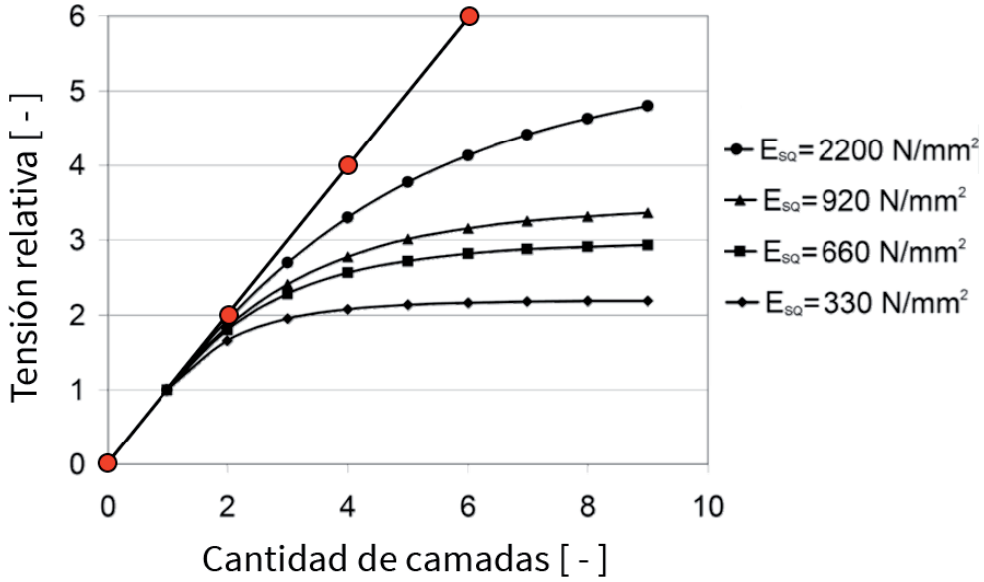


Fig. 54

La Figura 55 muestra un tambor deformado por varias camadas de cable. Desgraciadamente, algunas reglas de diseño de tambores ampliamente utilizadas eran defectuosas y, de vez en cuando, el núcleo de un tambor colapsaba.

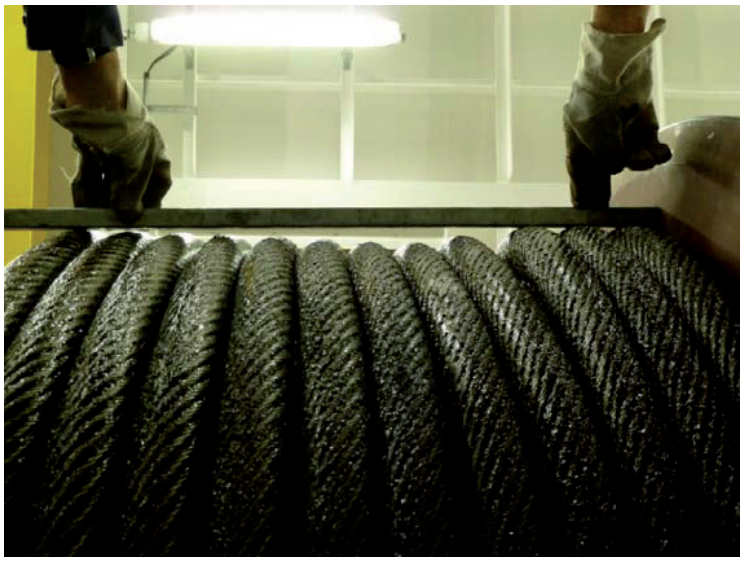


Fig. 55

Los cables más “blandos” (menos rígidos radialmente) se deformaban más y ejercían menos fuerza sobre el núcleo del tambor, pero más sobre las alas. Esto significa que cuando se utiliza un cable radialmente rígido con la carga máxima, puede colapsar el núcleo del tambor, y cuando se utiliza uno radialmente menos rígido, las alas pueden saltar. ¿Qué prefieres?

¿Y por qué hemos visto más colapsos de núcleos en offshore que en tierra firme, a pesar de que en ambos casos el diseño de los tambores se hizo usando las mismas reglas defectuosas?

Esto puede explicarse fácilmente por el hecho de que muchos guinches en offshore se utilizan hasta su máxima capacidad de tracción permitida, mientras que las grúas de tierra probablemente nunca llegarán a la máxima capacidad. Para estas grúas, en la mayoría de las configuraciones, el factor limitante es el momento de vuelco, que casi siempre se alcanza con cargas mucho más bajas.

5.4. Cuerdas de fibra en tambores multicapa

A igual tracción, las cuerdas de fibra enrolladas en varias capas ejercen fuerzas de compresión mucho menores sobre el núcleo del tambor que los cables de acero. Sin embargo, se deforman demasiado cuando una capa trata de acomodarse sobre la anterior, por lo cual, en tambores multicapa, ofrecen un desempeño pobre. Existe un nuevo diseño de tambor con alas cónicas, que quizá podría resolver este problema (Figura 56, © Deep Tek).

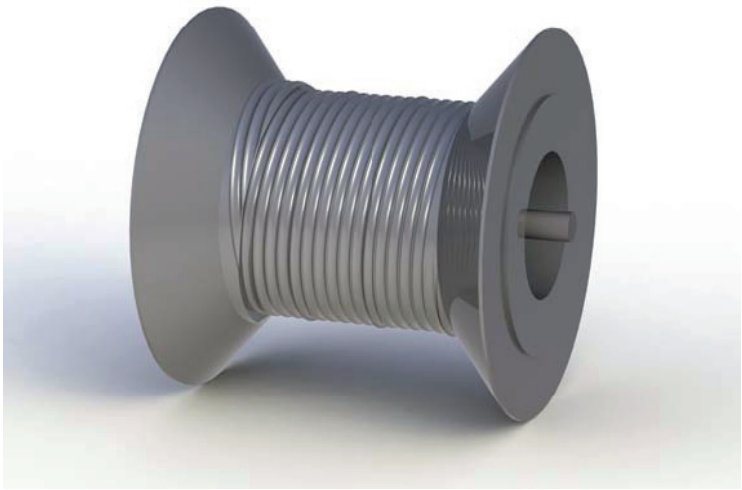


Fig. 56

6. Inspección

Hace 40 años el diseño de la mayoría de los cables no era muy sofisticado. Si un alambre exterior se rompía, los dos extremos del alambre se levantaban. Así que la inspección era fácil: tu colega iba pasando el cable por la mano y cada vez que gritaba es que había una rotura de alambre ☺.

Actualmente los cordones pueden estar preformados y/o compactados, y cuando alambre exterior se rompe, sus extremos puede que se separen apenas una fracción de milímetro y permanezcan en su posición. Especialmente cuando el cable está bien lubricado, será casi imposible detectar esa rotura.

La Figura 57 muestra un cable de cordones compactados. Arriba se ve el cable lubricado, en servicio. Esto es lo que vería un inspector. En el centro se ve el mismo tramo de cable después de limpiarlo por ultrasonido. Abajo se ve el mismo después de doblarlo a mano.

Encontrar las roturas de alambre externas en un cable lubricado con cordones exteriores preformados y compactados es difícil, y encontrar las roturas internas (en este caso numerosas) es casi imposible.

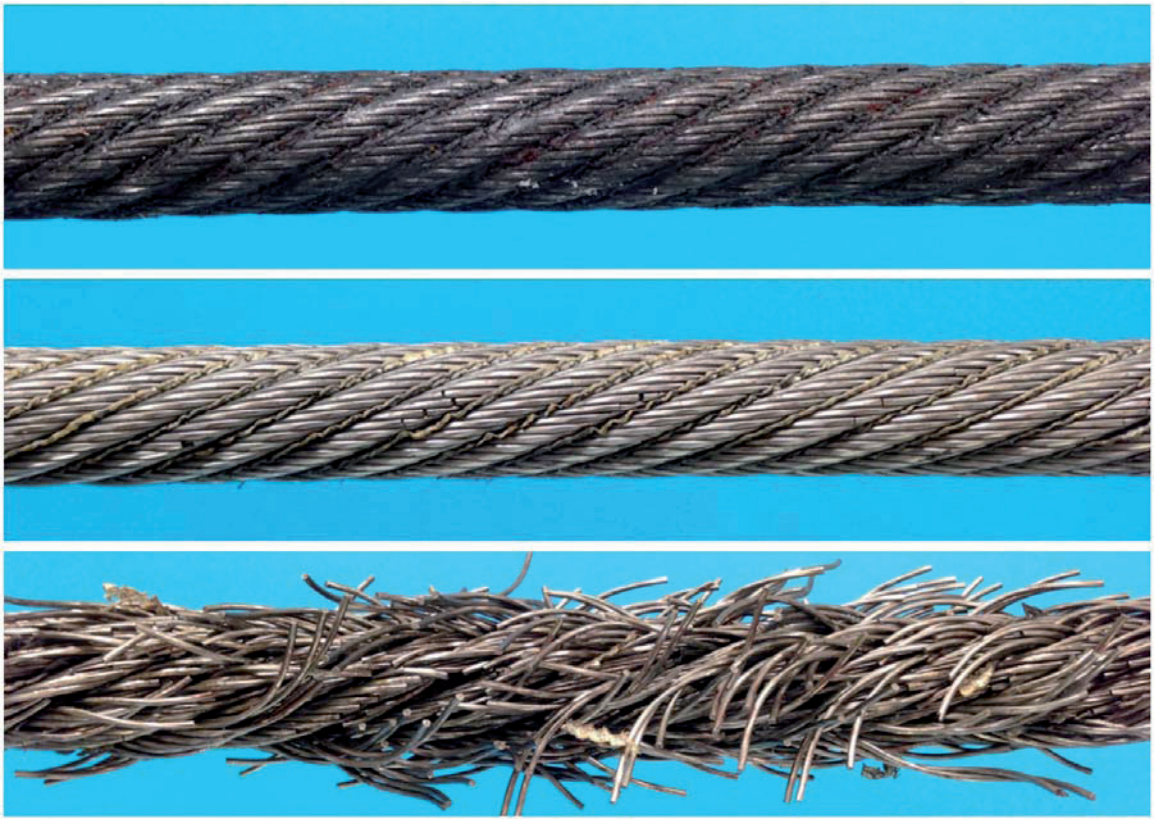


Fig. 57

Para complicar más el asunto, el porcentaje visible de la sección portante de carga se ha reducido enormemente con el paso del tiempo.

En el primer cable, el de Wilhelm Albert, fabricado en 1834, todos y cada uno de los alambres eran visibles desde el exterior, incluso cuando se encontraban en el interior del cable (Figura 58, izquierda). Entonces en aquel momento se podía inspeccionar visualmente el 100% de la sección portante de carga del cable. Esto hizo que el primer cable de la historia fuera relativamente seguro.

Sin embargo, con el aumento del número de elementos del cable, este porcentaje se redujo tremendamente: En los cables modernos, sólo un 20% de la sección transversal es visible desde el exterior (Figura 58, centro y derecha). Hoy en día, la inspección visual supone un 20% de evidencia y un 80% de esperanza.

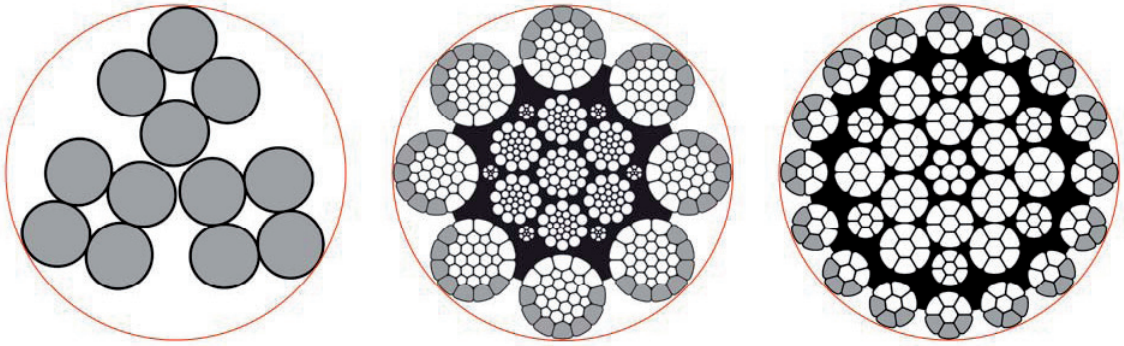


Fig. 58: Las áreas sombreadas son las visibles en la inspección visual

En los cables de gran diámetro (por ejemplo, más de 80 mm), la cantidad total de alambres a menudo es aún mayor, dando como resultado que el porcentaje de la sección visible desde el exterior resulta aún más pequeño.

6.1. Inspección magnética

Durante la segunda guerra mundial, los cañones se probaban haciéndolos pasar por un campo magnético. Las distorsiones de las líneas del campo magnético indicaban defectos en el cañón. Después de la guerra, se aprovechó este método modificándolo para detectar roturas de alambres en el exterior y en el interior de los cables de acero. La Figura 59 muestra una rotura de alambre en un cordón y la señal resultante en la hoja de registro de la medición.

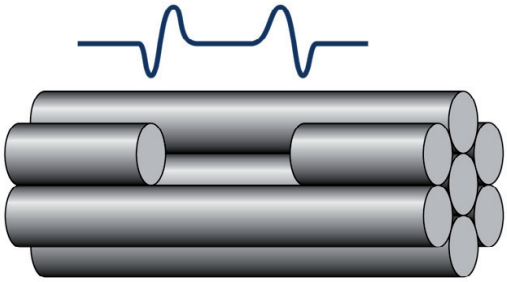


Fig. 59

Las máquinas para el ensayo magnético han mejorado a lo largo de los años, pero la interpretación de las señales sigue requiriendo mucha experiencia. Además, la confiabilidad de la señal empeora con el aumento de la cantidad de alambres en el cable.[25]Hace diez años patenté la idea de aprovechar la regularidad y repetitividad visual del cable de acero en una inspección de cable asistida por computadora: La Figura 60 muestra una figura de la patente.

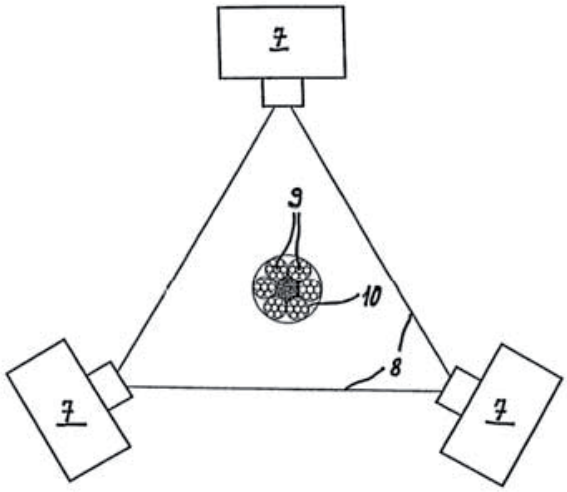


Fig. 60

Para probar la viabilidad de la idea, dispuse una luz estroboscópica disparada por la rotación del tambor Koepe de un pozo minero profundo en Australia. Dirigí la luz hacia el cable de elevación que se enrollaba a gran velocidad.

Bajo los destellos de la luz estroboscópica, el movimiento del cable se congeló inmediatamente.

25 Los equipos de inspección magnética se usan en nuestros países de habla hispana principalmente para la inspección de cables de medios de elevación en centros de esquí, especialmente en el Cono Sur (Chile y Argentina). (NdT)

En lugar de ver un „tubo gris“ moviéndose a gran velocidad, vimos un cable detenido: el primer flash mostraba el largo de un paso, el segundo flash mostraba el siguiente, etc., y como todos los pasos tenían el mismo aspecto, el cable parecía no moverse en absoluto (Figura 61).

Fig. 61

Pero si el flash estroboscópico iluminaba un largo de paso que NO era como los demás, éste saltaba a la vista. Así, las roturas de alambres se detectaban fácilmente.

Si la medida del paso se alargaba a lo largo del cable, la imagen estática empezaba a estirarse, y si el diámetro se reducía a lo largo del cable, la imagen estática empezaba a „respirar“: En la imagen estática, el cable no se movía, pero se volvía lentamente más delgado.

¡Era como si miraras una foto de tu abuela muerta hace tiempo y de repente empezara a sonreír!

Fig. 62

Utilicé cámaras especiales para hacer un registro continuo de la superficie del cable para su posterior análisis. Mis prototipos seguían utilizando película (Figura 62), pero era obvio que para las aplicaciones prácticas se necesitarían cámaras digitales y sistemas de almacenamiento de datos potentes.

Entre tanto, basándose en esta idea, la Universidad de Stuttgart ha construido una serie de unidades que escanean toda la superficie del cable utilizando 4 cámaras (Figura 63) y luego utilizan un software de reconocimiento de imágenes para rastrear cada alambre individualmente (Figura 64).

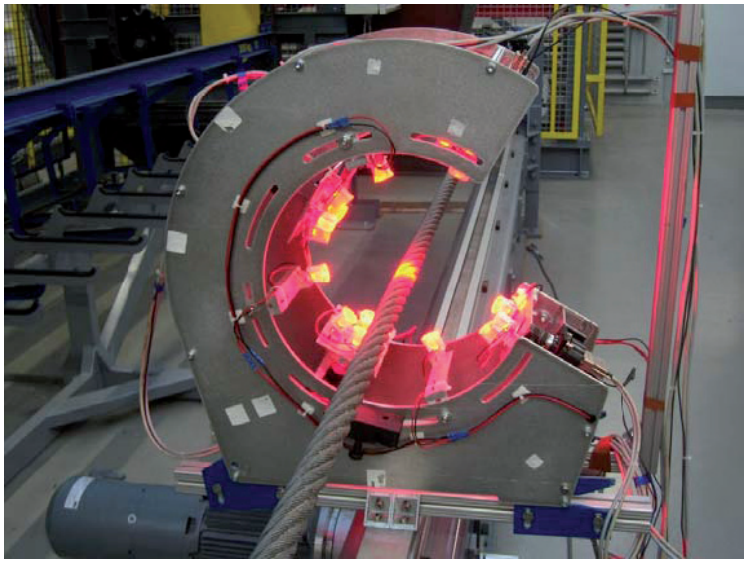


Fig. 63 (© IFF University of Stuttgart)

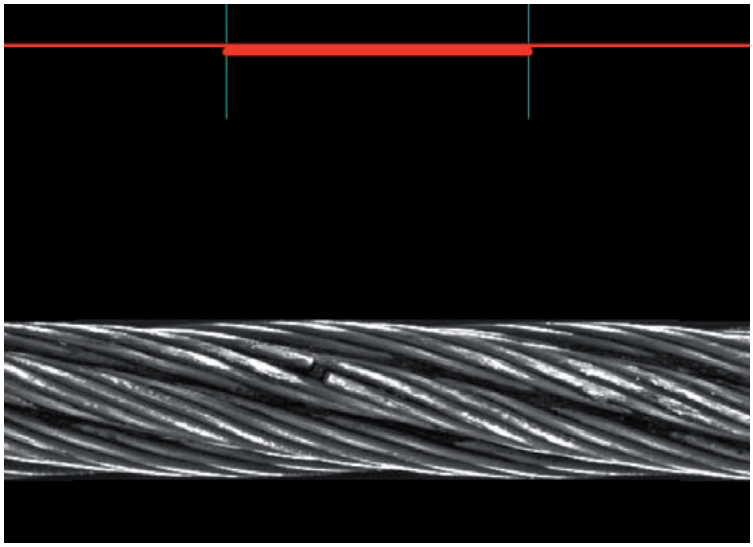


Fig. 64 (© IFF University of Stuttgart)

Además de las roturas de cable y los cambios de diámetro, se mide el largo de paso del cable en toda su extensión (Figura 65).

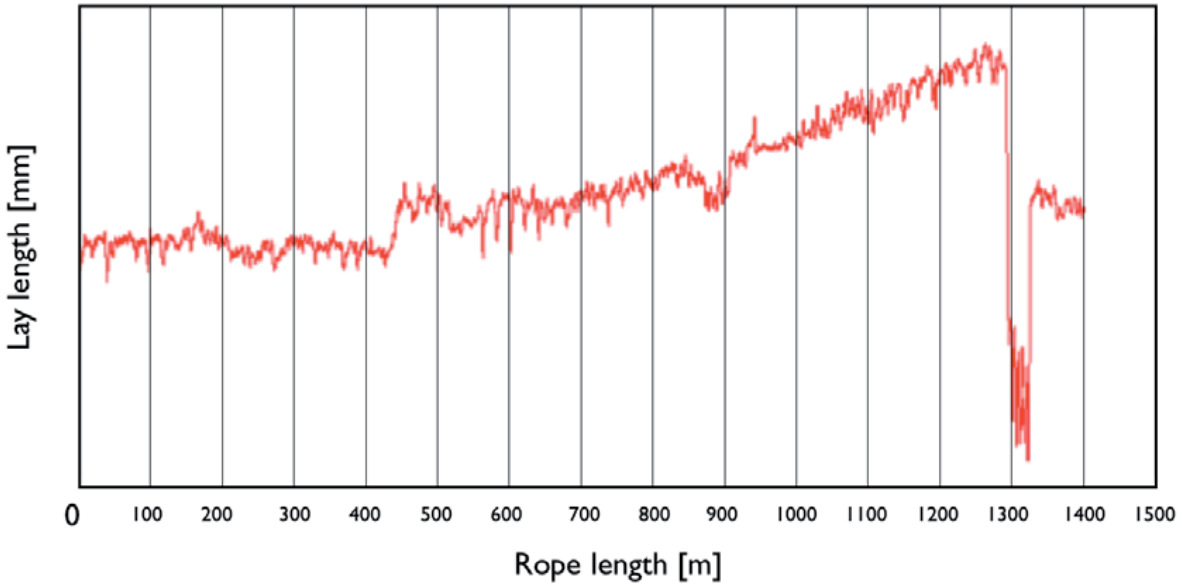


Fig. 65 (© IFF University of Stuttgart)

Hasta ahora, estas máquinas se utilizan principalmente para inspeccionar los cables de teleféricos y minas de pozo profundo, pero seguramente los cables de las aplicaciones offshore sigan el mismo camino.

7. Terminaciones[26]

La mayoría de las terminaciones de cable de acero que usamos hoy ya se usaban hace 40 años. Pero algunas de ellas sufrieron un uso restringido debido a falsas suposiciones.

7.1. El ojal doblado

El ojal doblado y prensado con manguito[27] de aluminio es una terminación muy extendida y fiable. Durante el proceso de prensado, el cable no se daña en el lugar donde entra en contacto con el manguito de aluminio, ya que cuando las tensiones son demasiado elevadas, es el aluminio el que „cede“ y fluye.

26 Las expresiones *end connection* y *termination* se usan ampliamente en inglés referidas a cualquier dispositivo que permita conectar el cable a su carga. Esto incluye tanto lo que en castellano llamamos *ojales* o *gazas*, como las piezas fabricadas ad hoc, que llamamos *terminales*. La designación global *terminaciones* se usa en toda Latinoamérica, lo mismo que *uniones finales* y *conexiones finales*, mientras que la norma UNE española usa *terminales* tanto para ojales como para piezas. En esta traducción usaremos *terminaciones* y reservamos la palabra *terminal* para las piezas. (NdT)

27 Traducimos el inglés *sleeve* como *manguito* por ser el término más difundido y, a mi entender, el más apropiado, aunque en España y en el Cono Sur se usa más *casquillo*. (NdT)

Pero cuando el extremo vivo del cable se presiona contra el muerto, el cable es presionado contra un material tan duro como él mismo, y ninguno de los dos „cede“.

En esta zona de compresión, los alambres exteriores de los dos tramos de cable en contacto son casi paralelos en el caso de los cables de torsión regular, pero se cruzan en ángulo en el caso de los cables Lang. Por lo tanto, se supuso que los alambres exteriores de dichos cables se dañarían gravemente durante el proceso de prensado, y se prohibió utilizar esta conexión final con cables Lang.

Hace 40 años se empezaron a difundir los cables Lang debido a los problemas del bobinado multicapa con los cables de torsión regular. Pero la terminación más común en grúas torre y móviles no estaba permitida con los cables Lang. Así que empecé a comparar el desempeño de ambos tipos de cable prensados con manguitos de aluminio. Resultó que el daño en la zona de contacto entre el extremo vivo y el extremo muerto del cable era tan grande para los cables con torsión regular (Figura 66) como para los cables Lang (Figura 67), y las resistencias a la rotura eran absolutamente comparables.

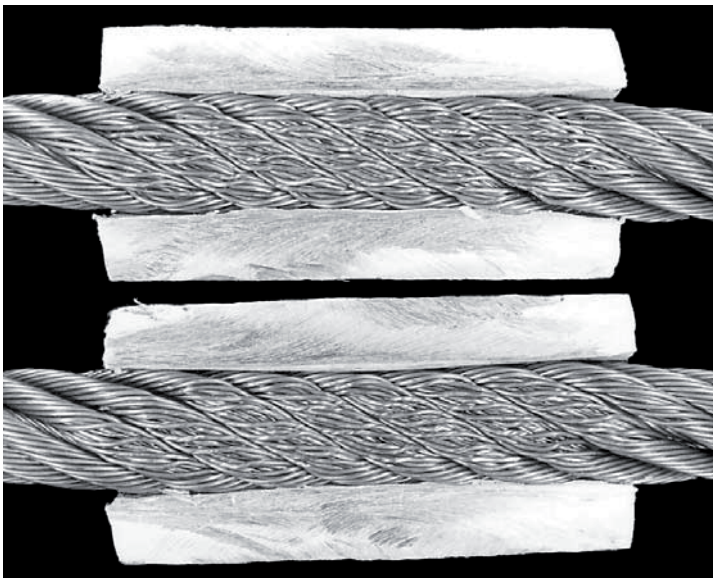


Fig. 66

El desempeño de los cables de torsión Lang a la fatiga por tensión con manguitos de aluminio era ligeramente inferior, pero los cables de izado en la grúa se fatigan más por flexión que por tensión.

Con estos resultados y la presión de la industria de las grúas para que se utilizaran los cables de torsión Lang con esta terminación, la prohibición desapareció rápidamente.[28]

28 Mientras en Europa se producen los avances que relata el autor con el ojal doblado, en toda América la terminación más usual de cable con ojal no es ésta, sino el ojal flamenco, bajo la notoria influencia de EEUU y la norma ASME B30.9. El autor se refiere a ambos ojales en otro de sus artículos, dedicado exclusivamente a terminaciones de cable. (NdT)

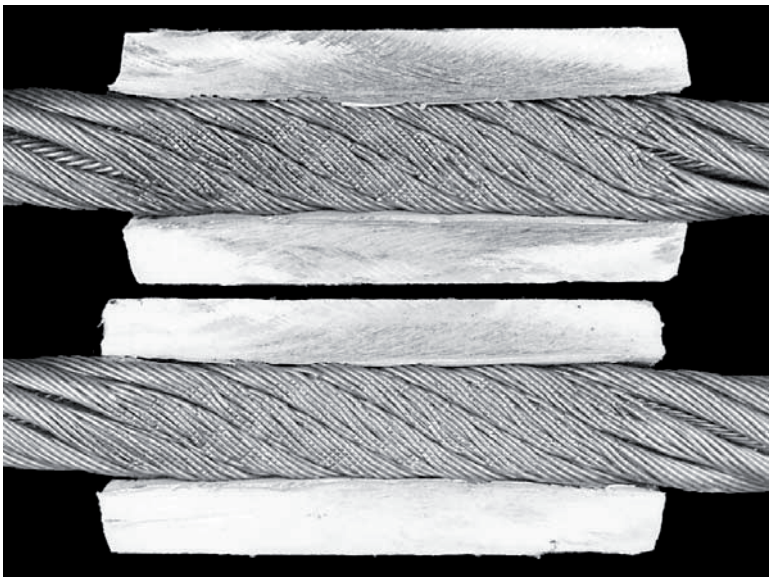


Fig. 67

7.2. La especificación de terminales de rellenado[29] Fed Spec de Estados Unidos

Según la Fed Spec estadounidense RR-S-5500 (Figura 68), los terminales de rellenado deben tener 1, 2 o 3 ranuras en su cavidad para evitar que el cono del relleno metálico se salga del terminal si el cable se descarga de forma repentina.

TABLE III. Number and the size of the grooves in wire rope sockets.

Socket size	Grooves	
	Number	Depth (approximately)
Inches		Inch
1/4 to 3/4, inclusive	1	1/16
7/8 to 1-1/2, inclusive	2	1/8
1-5/8 and over	3	3/16

Fig. 68

29 La designación en inglés *spelter socket* es única y bien específica (*socket* = enchufe, cavidad; *spelter* = cinc). En cambio, en español hay multitud de variantes: En castellano se usa *terminal de vaciado* (aludiendo al vaciado del crisol en un molde de fundición), *terminal de rellenado*, *terminal de cinc*, e incluso *socket* a secas. La norma española UNE 13411-4 lo traduce como *terminal cónico*. En esta traducción optamos por *terminal de rellenado*, aludiendo obviamente al relleno, que puede ser de metal o de resina. (NdT)

Lo que los autores de la especificación pasaron por alto es que estas ranuras no sólo impiden que el terminal se salga cuando el cable se descarga, sino que también impiden que el cono entre cuando se carga.

El cono de un terminal de rellenado sólo puede sujetar el cable de forma segura si, bajo carga, se introduce y se acuña en la cavidad, de modo que con el aumento de la tracción en la línea el cable se encajará cada vez más y se sujetará con una fuerza cada vez mayor.

Si el cono de relleno no puede entrar en la cavidad, la fuerza de sujeción se limita a las fuerzas de unión entre los alambres y el material de relleno, y el cable podría salirse del mismo.

Hace más de 20 años escribí un artículo sobre terminaciones para cable, y allí describí el problema de las ranuras en la Fed Spec. Unos meses después, el mayor productor de estos terminales con ranuras se puso en contacto conmigo y se quejó de que, desde que había publicado mi artículo, sus ventas de estos terminales habían bajado mucho, ya que los clientes dudaban ahora de su seguridad.

Sin embargo, estuvieron de acuerdo con mis argumentos. Así que les propuse que simplemente cambiaran la Fed Spec y se deshicieran de las ranuras. Me contestaron que en Estados Unidos nadie, ni siquiera el Presidente de los Estados Unidos, podía cambiar una Fed Spec.

Pero entonces estos ingenieros tuvieron una idea brillante: La especificación sólo define el número y la profundidad requerida de las ranuras, pero no el grosor (Figura 68). Así que decidieron que harían las ranuras tan finas que los anillos de relleno se desprenderían con la primera carga. Entonces, el cono del relleno se quedaría sin anillos y se introduciría en la cavidad bajo carga como en cualquier otro terminal sin ranuras. Y esto es lo que hicieron (Figura 69).

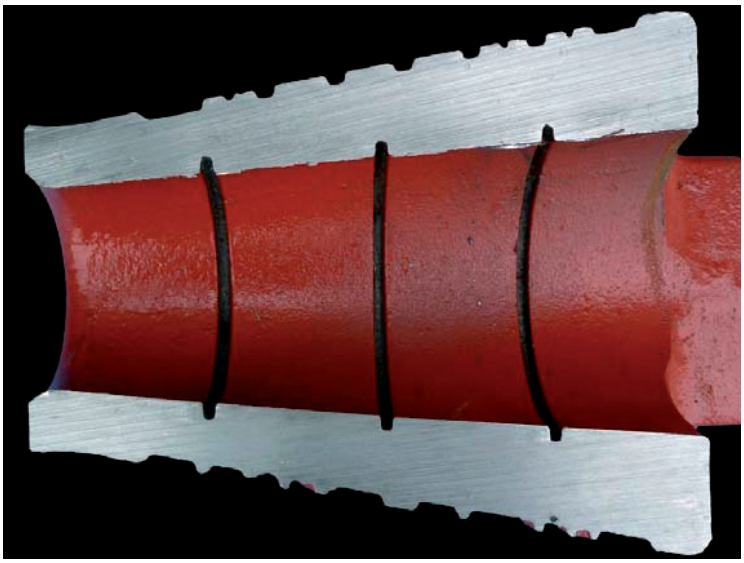


Fig. 69

De todos modos, quedan muchos otros terminales en el mercado con ranuras gruesas, y para ellos sigue siendo válida la preocupación.

El fabricante de la resina de relleno Wirelock©[30] aborda este problema en sus instrucciones de uso. En ellas se exige que las grandes ranuras de los terminales se rellenen con masilla antes de verter la resina en la cavidad (Figura 70).

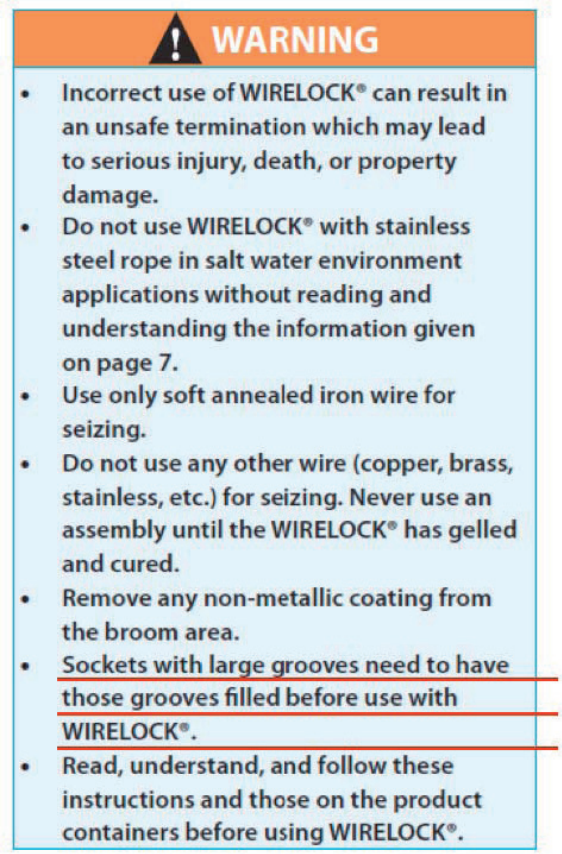


Fig. 70

La idea que subyace en ambos conceptos es la misma: ya que no podemos eliminar las ranuras asegurémonos de neutralizar el daño.

30 En Latinoamérica, los mayores fabricantes de eslingas usan actualmente la misma resina que menciona el autor para el rellenado de los conos (“soqueteado”). Esta resina es fabricada por una compañía familiar con sede en el Reino Unido, líder en desarrollar las propiedades de las resinas epoxi para este uso. (NdT)

7.3. The wedge socket

La ley de Murphy dice que si algo puede salir mal, saldrá mal.

Y algo salió mal hace unos años, cuando un operario tomo la parte principal (el “bolsillo”) de un terminal de cuña de su caja, luego se distrajo con un compañero y finalmente sacó la cuña del terminal de la caja. De lo que no se dio cuenta fue de que había sacado la cuña de una caja equivocada.
La cuña era para un diámetro de cable diferente al del bolsillo. Días más tarde, un hombre se mató cuando el cable de elevación de una grúa se salió del terminal porque la cuña era demasiado pequeña.

Esto no puede ocurrir con el conjunto mostrado en la Figura 71: El bolsillo, la cuña y la grapa prensacable corresponden al mismo diámetro de cable y no se entregan individualmente, sino como una única pieza ensamblada.

Fig. 71

Otra cosa que podría salir mal con un terminal de cuña asimétrico (el nombre asimétrico ya lo indica) es que se instale el extremo muerto del lado equivocado del bolsillo. El conjunto de la Figura 71 permite colocar el muerto solo de un lado (que es el correcto).

Quizá no sea así para la industria offshore, pero en tierra firme los trabajadores están cada vez menos capacitados, así que necesitamos más de estas soluciones a prueba de tontos.

8. Conclusión

Los últimos 40 años de la industria de los cables y las grúas han sido muy interesantes, y estoy muy satisfecho por haber podido participar activamente en ellos.

Hemos resuelto muchos de los problemas que involucran nuestros productos, pero no se preocupen, hemos dejado suficientes desafíos para ocupar a toda una próxima generación de ingenieros de cables y grúas.

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