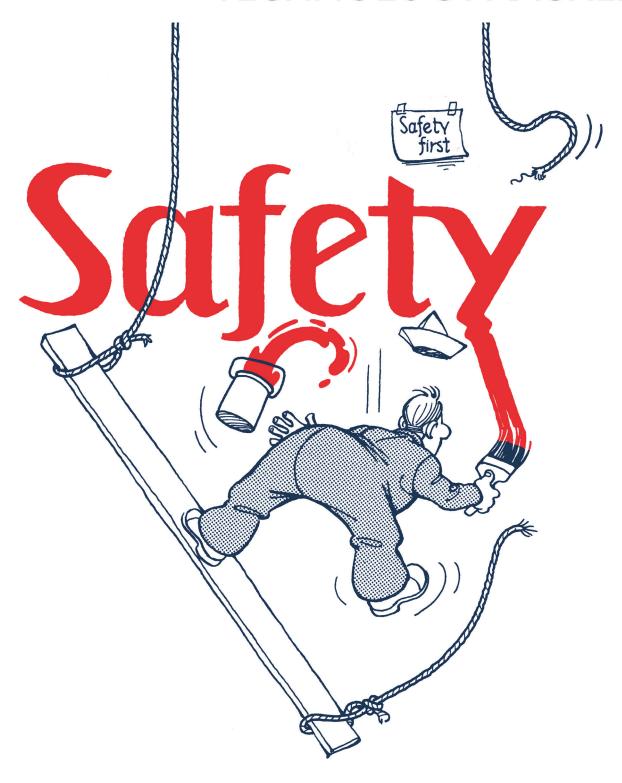
WIRE ROPE

TECHNOLOGY AACHEN



¿Qué tal tu seguridad?

¿Qué tal tu seguridad?

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

Índice

1.	Un ejemplo histórico (1): El factor de seguridad en los puentes	4
2.	Un ejemplo histórico (2): La columna de mármol	9
3.	Un caso de estudio contemporáneo (1): El segundo manguito de aluminio	9
4.	Un caso de estudio contemporáneo (2): Las mallas tiracables	11
5.	Un caso de estudio contemporáneo (3): El cable acortado	13
6.	Un caso de estudio contemporáneo (4): Inspección del cable en la polea	
	de compensación	16
7.	Un ejemplo histórico (3): El puente Tacoma Narrows	17
8.	Un caso de estudio contemporáneo (5): El accidente de Cavalese	18
9.	Las reglas de Roland para los cables de grúa y los sistemas de cables	19
10.	Referencias	22

© 2006, 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

En este artículo se analizan los aspectos de seguridad de las máquinas diseñadas sobre la base de criterios de fatiga, en contraposición a los diseños basados en un factor de seguridad. Algunos ejemplos relacionados con el cable de acero, tanto históricos como recientes, ilustran cómo se desarrollan las condiciones inseguras y cómo podrían evitarse.

Si buscas la palabra seguridad en el diccionario de la RAE, encontrarás la siguiente definición: La seguridad es la ausencia de peligro o riesgo.¹

Cuando en Ingeniería se comenzó a cuantificar los distintos niveles de seguridad, apareció una pregunta difícil: ¿Cómo se mide la ausencia de peligro?

El primer intento de respuesta consistió en definir un factor de seguridad. Este factor debía expresar en qué medida una determinada estructura era resistente en comparación con las fuerzas a las que estaba sometida. Si el factor de seguridad era, por ejemplo, 4, la estructura debía soportar teóricamente fuerzas hasta 4 veces superiores a las fuerzas máximas a las que podría llegar a estar sometida.

La historia del factor de seguridad es una historia de ensayo y error. Nadie sabía realmente cuál era el nivel óptimo de "ausencia de peligro". Los largos periodos sin accidentes animaban a los ingenieros a reducir los factores de seguridad porque, obviamente, estaban sobredimensionando las estructuras y, por tanto, desperdiciando material y dinero.

Por el otro lado, los fallos repentinos de las estructuras indicaban a los ingenieros que, obviamente, debían incrementar esta "ausencia de peligro", elevando los factores de seguridad para tener en cuenta tensiones o concentraciones de tensiones desconocidas.

Así es que al factor de seguridad empezó a llamárselo "factor de ignorancia".

1. Un ejemplo histórico (1): El factor de seguridad en los puentes

En 1847, el puente sobre el Río Dee, en el Reino Unido, diseñado por el famoso ingeniero Robert Stephenson², colapsó bajo el peso de un tren tan solo ocho meses después terminada su construcción. La comisión que investigó la avería encontró que el factor de seguridad había sido de 1,6, o sea bajísimo, y decidió que el factor de seguridad de los futuros puentes construidos en el Reino Unido debía ser por lo menos de 6.

John Roebling, el diseñador del Puente Colgante del East River, hoy más conocido como el Puente de Brooklyn (Figura 1), no sólo fue uno de los principales constructores de puentes de su época, sino que también fue el primer fabricante de cable de acero del continente americano.

Ocurre lo mismo en inglés, donde safety se define como "free from danger or injury" (NdT)

² Gran propulsor de los ferrocarriles y considerado padre de la locomotora de vapor (NdT)

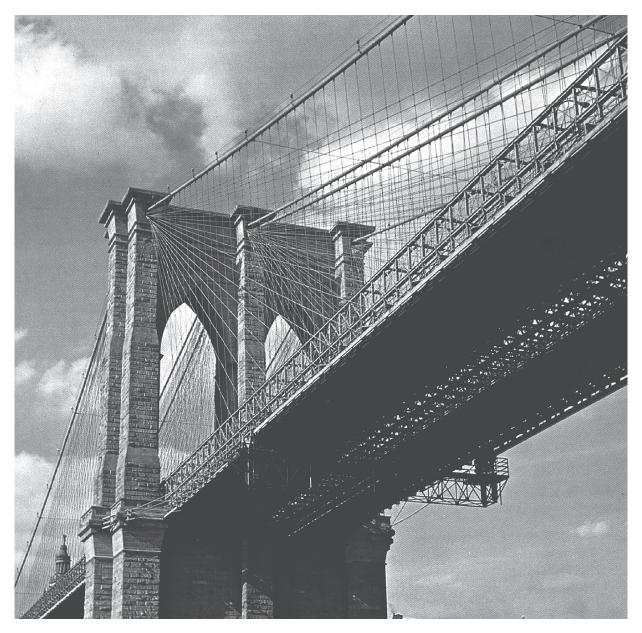


Fig. 1: El Puente de Brooklyn

Basándose en su experiencia con los cables de acero y los puentes, Roebling aceptó que todas las estructuras permanentes debían ser inicialmente seis veces más resistentes que lo necesario para soportar la carga más alta que pudiera esperarse, y que la resistencia suplementaria debía servir de reserva para el deterioro debido a la corrosión o la fatiga, para cargas dinámicas y para muchas otras influencias imprevisibles.

En consecuencia, los cables de suspensión del puente de Brooklyn también se diseñaron con un factor de seguridad de 6. Durante la construcción del puente, John Roebling murió, y su hijo Washington Roebling continuó su trabajo. Una vez terminadas las torres de granito en 1877, los cables principales se tendieron in situ. Cada uno de los alambres fue tendido sobre los pilones para que adoptara su catenaria natural, y luego atado en conjunto con los otros alambres. Este procedimiento, inventado por John Roebling, permitía que los cables del interior de la curva fueran más cortos y los del exterior más largos que los del centro, garantizando una distribución uniforme de las tensiones en la sección transversal del cable.³

Antes de su instalación, cada alambre de acero era ensayado por un inspector independiente, rechazándose los que no tenían suficiente resistencia. En 1878, Washington Roebling se dio cuenta de que la pila de alambres rechazados, que debería crecer ligeramente cada semana, en realidad casi había desaparecido. Inició una investigación secreta y descubrió que ¡todos los alambres rechazados habían sido incorporados a los cables principales!

Hizo algunos cálculos, teniendo en cuenta la resistencia reducida de los alambres rechazados, y descubrió que, rediseñando ligeramente los cables y añadiendo alambres adicionales, todavía podía mantener un factor de seguridad de 5. Decidió no mencionar el problema a nadie y terminar el puente con un factor de seguridad reducido de 5.

Pero cuando el puente aún estaba en construcción, los propietarios del puente, que desconocían por completo la reducción de la resistencia de los cables principales, decidieron modificar el tablero del puente para incluir vías ferroviarias. Sus cálculos mostraron que esto reduciría el factor de seguridad de los cables a aproximadamente 5, pero concluyeron que el puente seguiría siendo lo suficientemente resistente. ¡Sin embargo, Washington Roebling era el único que sabía que el factor de seguridad ya había bajado a 5 y que los pesos adicionales reducirían el factor de seguridad a sólo 4!

Roebling decidió que el puente seguía siendo "seguro" y lo modificó como se le pidió. El tiempo le dio la razón: los pesados trenes cruzaron el puente durante más de 50 años, y tras más de 120 años de intenso tránsito diario los cables principales del puente de Brooklyn siguen en su sitio.

Para los lectores que conocen el cable de acero pero no están familiarizados con los cables de los grandes puentes, cabe aclarar que en éstos es común usar alambres (o riendas) <u>no</u> retorcidos, sino simplemente posicionados en un haz uno al lado de otro. (NdT)

1.1. El factor de seguridad en cables y grúas

Una grúa o un sistema de cables⁴ diseñado con un factor de seguridad elevado no es necesariamente "más seguro" que uno con un factor de seguridad más bajo. Incluso podría ser lo contrario.

El concepto de factor de "seguridad" aplicado a los cables y grúas revela una total incomprensión de los reales mecanismos de falla que tienen lugar en toda estructura sometida a esfuerzos superiores a su límite de fatiga.

Como ya se ha dicho, el factor de seguridad se basa en el nivel de tensión más alto que podría producirse. Pero no es el nivel de tensión en sí lo que hace que las estructuras fallen, sino la variación continua del nivel de tensión. Este mecanismo de falla es lo que se llama fatiga.

1.2. Fatiga a la tracción

Supongamos que sometemos un cable de acero a una carga del 50% de su carga de rotura. El factor de seguridad es sólo 2, pero si la fuerza no cambia y si el cable no se desplaza sobre poleas, teóricamente podría soportar la carga durante un tiempo ilimitado.

Ahora sometamos el mismo cable a una tracción que cambie continuamente entre el 2% y el 10% de la carga de rotura. Esto nos da un factor de seguridad muy elevado: 10 (5 veces mayor que en el ejemplo anterior). Pero ahora las variaciones en la fuerza de tracción provocarán continuamente cambios en la tensión de los alambres del cable, lo que a su vez provocará movimientos relativos entre los elementos internos del cable. Estos mecanismos provocarán la fatiga del alambre y la abrasión del material, lo que a su vez reducirá la resistencia del cable. Por lo tanto, a pesar de su elevado factor de seguridad, este cable sólo tendrá una vida útil limitada.

⁴ 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 reenvios* (que se referiría más al cable entre las poleas) o simplemente *sistema de cables o cableado* (cuando no se preste a confusión). (NdT)

1.3. Fatiga a la flexión

Ahora sometamos el cable a una fuerza de tracción constante del 10% de la carga de rotura del cable, pero hagámoslo pasar de un lado a otro de una polea con un diámetro de 16 veces el diámetro nominal del cable (D/d = 16). Volvemos a tener un factor de seguridad muy alto de 10, pero ahora las tensiones de flexión y las presiones de contacto de la polea se sumarán a las tensiones causadas por la tracción en la línea. Los cambios de forma entre el estado recto y el flexionado generarán severos cambios en la tensión de los alambres y causarán importantes movimientos relativos internos entre los elementos del cable. Estos mecanismos volverán a provocar fatiga en los alambres y abrasión en el material, lo que a su vez reducirá la resistencia del cable. Por lo tanto, pese a que la fuerza de tracción en la línea es constante, este cable sólo tendrá una vida útil limitada.

Dupliquemos ahora el diámetro del cable. Esto aumentará el factor de seguridad de 10 a 40. ¿Es ahora más seguro nuestro sistema? ¿Y nuestro cable durará más? La respuesta es no.

Al contrario, al duplicar el diámetro del cable, disminuiremos automáticamente la relación D/d, de 16 a 8, con lo que aumentarán mucho nuestros esfuerzos de flexión (que constituyen la parte variable de nuestras tensiones). A pesar del mayor factor de seguridad, nuestro cable se deteriorará mucho más rápido que antes.⁵ Un mayor factor de seguridad no hará que el sistema de enrollado sea más seguro. En algunos casos puede posponer la falla de el cable a una fecha posterior, pero en otros casos puede incluso acelerarla.

Es muy importante entender que siempre que haya variaciones en la fuerza de tracción sobre la línea o que ésta pase por un sistema de poleas, el cable fallará. Por lo tanto, los cables de acero deben ser inspeccionados a intervalos regulares para ser descartados antes de que se produzca una condición insegura.

Todo cable de acero falla si no se lo retira de servicio a tiempo.

En el contexto de elementos mecánicos que sabemos que inevitablemente fallarán con el uso, deberíamos dejar de utilizar la palabra "seguridad". Es mucho más seguro llamar "factor de diseño" al antiguo factor de seguridad.

A veces nosotros mismos provocamos fallas al tratar de hacer las cosas más seguras. Veamos un antiguo ejemplo que relata Galileo Galilei:

⁵ Sobre el tema de la optimización del diámetro de cable hay un interesante desarrollo en el artículo del Ing. Verreet "Problemas y soluciones en cables de acero para grúas". (NdT)

2. Un ejemplo histórico (2): La columna de mármol

Las columnas de mármol a menudo debían almacenarse acostadas durante largos periodos de tiempo antes de ser erigidas. Si permanecían en contacto con el suelo, se decoloraban por un lado. Por ello, normalmente se las disponía apoyadas sobre dos soportes (Figura 2), y a veces ocurría que una columna se rompía en el centro por su propio peso.





Fig. 2: Columna con dos soportes

Fig. 3: Columna con tres soportes

Galilei informa: "Una gran columna de mármol fue colocada de manera que sus dos extremos descansaban sobre sendos apoyos. Al poco tiempo, se le ocurrió a un mecánico que, para estar doblemente seguro de que la columna no se rompiera en el medio por su propio peso, sería prudente colocar un tercer soporte en el medio. Esto les pareció a todos una excelente idea."

La columna se rompió en el centro poco después, pero no a pesar del tercer soporte, sino precisamente a causa de éste. Con el peso de la columna, los soportes son presionados en el suelo, penetrando en diferente medida según de la dureza del terreno. Si el soporte que cede más resultara ser el central, no serviría para nada. Pero si uno de los apoyos exteriores cede más que los otros, casi seguramente provocará la rotura (Figura 3).

Hay ejemplos similares en el mundo del cable de acero:

3. Un caso de estudio contemporáneo (1): El segundo manguito de aluminio

En un gran teatro de ópera, los ingenieros estaban muy preocupados por el hecho de que los extremos de los pequeños cables de acero que manejaban la escenografía por encima de los artistas sólo estaban asegurados por un único manguito⁶ de aluminio (Figura 4).

Traducimos el inglés *clamp* (a veces también 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*. También se usan muchas malas traducciones, que recomiendo enfáticamente evitar, tales como *presilla*, *clip*, *broche*, y otras igualmente desacertadas. (NdT)

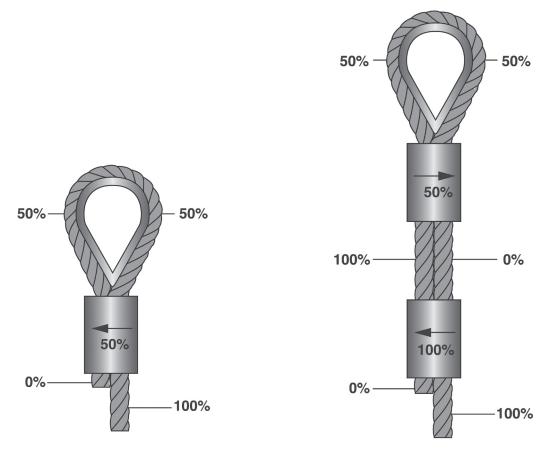


Fig. 4: Terminación con un manguito

Fig. 5: Terminación con dos manguitos

Entonces decidieron asegurar con dos manguitos los extremos de todos los cables que operaban por encima del escenario (Figura 5), suponiendo que esto duplicaría la seguridad. Unos meses más tarde, una de estas terminaciones⁷ falló.

No falló a pesar de la segunda abrazadera, sino justamente a causa de ella.

En la zona del manguito prensado, la línea "viva" del cable transfiere normalmente el 50% de la fuerza de tracción a la línea "muerta" (Figura 4).

Usamos la palabra terminación para traducir las expresiones end connection y termination, que se usan ampliamente en inglés referidas a cualquier dispositivo que permita conectar el cable a su carga. Esto incluye tanto a las piezas fabricadas ad hoc, como a los ojales o gazas, que es el caso en este artículo. La designación general terminaciones se usa en toda Latinoamérica, lo mismo que uniones finales y conexiones finales, mientras que la norma UNE española usa terminales. (NdT)

Respetamos el entrecomillado que usa el Autor en las palabras 'live' line y 'dead' line. Cuando en castellano nos referimos a un ojal de cable de acero doblado usamos exactamente las mismas palabras, o sea línea viva y línea muerta. La línea viva es el cable de acero tensionado. La línea muerta (también llamada cola muerta) es el tramo corto del ojal, cuya punta queda en el aire (sin tensión). En las figuras 4 y 5, la línea viva está a la derecha y la línea muerta a la izquierda. Las siguientes apariciones de estas palabras las dejaremos sin comillas. (NdT)

Si se instala un segundo manguito cerca del primero, puede ocurrir que -debido a pequeños movimientos imposibles de controlar durante el prensado- el tramo de línea viva entre los manguitos quede ligeramente más largo que el tramo de línea muerta. Como consecuencia, uno de los manguitos debe transferir ahora no el 50% sino el 100% de la fuerza de tracción (Figura 5). Cuando la fuerza de tracción es alta, el manguito no puede soportar el esfuerzo. Se romperá, transfiriendo toda la carga al otro manguito como carga dinámica. Esto hará que el segundo manguito falle también.⁹

Aumentando la cantidad de manguitos estás disminuyendo el nivel de seguridad.

4. Un caso de estudio contemporáneo (2): Las mallas tiracables

Las mallas tiracables¹⁰ están hechas de alambres o cordones¹¹ trenzados y se utilizan para instalar cables eléctricos o cables de acero (Figura 6). Cierta vez el Autor asistió a la instalación del cable de elevación de una grúa de offshore¹². El tiracable se colocó sobre el extremo del cable y los instaladores empezaron a asegurarlo con más y más ligaduras¹³ de alambre (Figura 7 derecha).

El Autor los detuvo, advirtiéndoles que debía hacerse una sola ligadura, en el extremo del tiracable. Le dijeron que se mantuviera al margen: se había hecho así durante 20 años, y se seguiría haciendo así durante otros 20 años.

Pero no fue así: Cuando se habían tirado y levantado 80 m de cable hacia la pluma, la conexión falló y el cable se cayó, por suerte sin herir a nadie. Así es que hubo que cortar 40 m de cable estropeado.

- 9 En la zona entre los dos manguitos siempre una de las dos líneas quedará levemente más floja que la otra. Esto es inevitable por el proceso mismo de prensado. En el 50% de los casos puede quedar más floja la línea muerta, y entonces el segundo manguito resulta completamente inútil. En el otro 50% de los casos quedará más floja la línea viva, y se puede producir la rotura catastrófica que describe el Autor. (NdT)
- 10 Traducimos como *malla tiracable* lo que el Autor en inglés llama *rope sock*. La denominación más común en inglés es *chinese finger* (nunca pude encontrar el porqué de ese nombre). Como es una palabra que se usa tanto en la industria del cable de acero como en la del cable eléctrico, aparecen muchos sinónimos, por ejemplo *media tiracable*, *víbora tiracable*, etc. (NdT)
- 11 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 preferentemente *torón*. Ambas palabras son correctas y significan exactamente lo mismo. En cambio, no recomiendo usar la palabra *hebra*, que puede confundirse con un solo alambre. (NdT)
- 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)
- 13 La palabra en inglés es *seizing*. Se refiere a las ataduras con alambre que se hacen sobre un cable por distintos motivos, en este caso para fijar el tiracable. *Ligadura* es el equivalente más usual. En España se usa también *ligada*. (NdT)

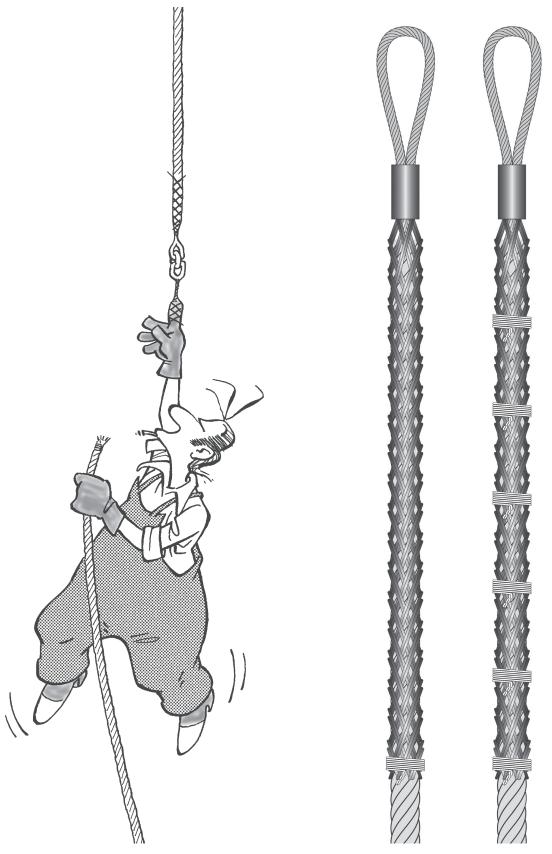


Fig. 6: Instalación de un cable mediante una malla tiracable (método incorrecto)

Fig. 7: Cantidad de ligaduras correcta (izquierda) e incorrecta (derecha)

¿Qué habían hecho mal los instaladores? Una malla tiracable debe estar asegurada con una sola ligadura en el extremo (Figura 7 izquierda). Bajo carga, la malla se alarga y se estrecha, apretando el cable con más fuerza cuanto más se tire de ella. Sin embargo, si la malla está atada con muchas ligaduras repartidas a lo largo, éstas impiden que la malla se alargue y, por lo tanto, que se estreche y agarre el cable. En realidad, el cable que se instalaba sólo estaba sujeto por la última ligadura. Cuanto más cable se tiraba, más pesada se hacía la carga sobre la ligadura, hasta que finalmente ésta se rompió. Entonces, toda la carga se transfirió a la penúltima ligadura, la cual falló a su vez. En un segundo, este mecanismo se repetiría hasta que se rompieran todas las ligaduras y el cable se soltara por completo y cayera.

Si aumentas la cantidad de ligaduras, disminuyes el nivel de seguridad.

Muchas decisiones aparentemente lógicas pueden causar un desastre:

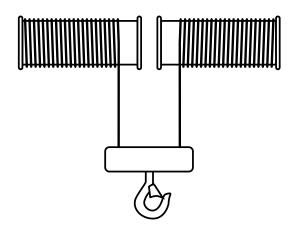
5. Un caso de estudio contemporáneo (3): El cable acortado

Una grúa de cuchara de 400 toneladas en una acería tenía una altura de elevación de 40 m. Podía llevar la traviesade la cuchara desde 10 m por debajo del piso hasta 30 m por encima. Los cables de elevación siempre habían alcanzado una vida útil de unos 15 meses.

Después de unos años de funcionamiento, el agujero de 10 m en el suelo tuvo que dar paso a una carretera, por lo que se rellenó y pavimentó. El supervisor de producción se dio cuenta de que la grúa ya no iría a bajar la traviesa¹⁴ por debajo del nivel del suelo y, por tanto, ya no necesitaría cables para una altura de elevación de 40 m, sino sólo para 30 m. Su superior estuvo de acuerdo, y el siguiente juego de cables se encargó correspondientemente más corto.

Tras 10 meses de servicio, los cables fallaron, causando un daño de medio millón de dólares. La razón: fatiga interna en una zona inesperada.

¹⁴ En el original inglés, la palabra *block* se refiere a todo el dispositivo que contiene las poleas y el gancho. En castellano hay quien usa la palabra *bloque*, pero es un anglicismo innecesario y poco específico. Hay palabras específicas para designarlo en cada caso. La más común es *pasteca*, pero en este caso particular el dispositivo consiste en una viga con el gancho abajo y las poleas arriba, y su nombre exacto es *traviesa*. En Argentina también se le llama *traversa*. (NdT)



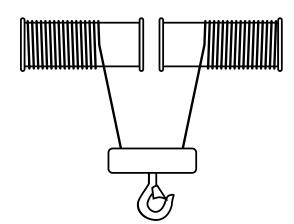


Fig. 8: Sistema de reenvío original

Fig. 9: Sistema de reenvío modificado

La grúa había sido diseñada para que en la posición más alta de la traviesa los ángulos de desvío¹⁵ entre los cables salientes del tambor y las primeras poleas fueran de 0° (Figura 8). En la posición más baja, los ángulos de desvío alcanzaban el valor máximo permitido de 4°.

Sin embargo, después de la modificación, faltaban algunas vueltas de cable en los tambores. Por lo tanto, en todas las posiciones de la traviesa los cables tenían ángulos de desvío mayores que antes. Ahora los ángulos eran de 2,56° en la posición más alta y más de los 4° permitidos en la posición más baja (Figura 9).

Dado que en la posición más baja se superaba el ángulo de desvío permitido de 4°, no se debería haber permitido que la grúa siguiera funcionando. Pero lo que realmente causó la falla fue el considerable ángulo de desvío de 2,56° en las posiciones más altas de la pasteca: La torsión causada por el ángulo de desvío de 4° en la posición baja fue absorbida por longitudes de cable relativamente grandes. En cambio, la torsión causada por el ángulo de desvío de 2,56° en la posición más alta tuvo que ser absorbida por tramos muy cortos. Estos tramos de cable fueron severamente destorcidos, sobrecargando el alma y provocando finalmente una rotura del cable sin previo aviso.

Sin duda, el acortamiento del cable provocó la falla. Pero, ¿qué hizo mal el usuario de la grúa? El cambio de la longitud del cable modifica importantes parámetros de diseño del sistema (por ejemplo, los ángulos de desvío) y, por lo tanto, el usuario de la grúa no debe hacerlo por sí solo.

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

El usuario debería haber consultado al diseñador de la grúa. El diseñador de la grúa habría desplazado el punto fijo del tambor para mantener los mismos ángulos de desvío (Figura 10).

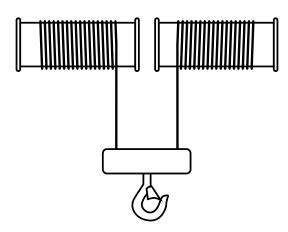


Fig. 10: Cómo se debería haber modificado el sistema de reenvíos

Los cables de acero fallarán inevitablemente si no los desechamos a tiempo. Por lo tanto, debemos inspeccionarlos regularmente. Pero debemos hacerlo en los lugares adecuados (Figura 11).



Fig. 11: Inspección minuciosa del cable (en el lugar equivocado)

6. Un caso de estudio contemporáneo (4): Inspección del cable en la polea de compensación

La Figura 12 muestra el sistema de cableado de un puente grúa de doble tambor. La polea central se llama polea de compensación o polea ecualizadora. Su función es compensar las diferencias de longitud o de carga sobre el cable que puedan producirse entre los dos lados del sistema de reenvío.

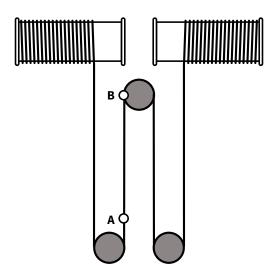


Fig. 12: Puente grúa con doble tambor y polea compensadora

Durante la elevación y el descenso de la pasteca, las dos poleas móviles giran consecuentemente. Sin embargo, la polea de compensación situada en el centro normalmente no gira en absoluto. Muchas normas reconocen este hecho permitiendo que las poleas de compensación tengan un diámetro menor que las otras poleas del sistema.

Existen antecedentes de accidentes donde los cables de acero fallaron justo en las poleas de compensación. ¿Por qué? Veamos el número de ciclos de flexión que sufren los distintos tramos del cable durante una operación típica de la grúa:

Durante la operación de elevación, el tramo "A" del cable se desplazará sobre una polea (= 1 ciclo de flexión) y sobre el tambor (= 1/2 ciclo de flexión). A continuación, la grúa transportará la carga a otro lugar y la bajará de nuevo al suelo. Durante el descenso, el mismo tramo "A" saldrá del tambor (= 1/2 ciclo de flexión) y volverá a pasar por una polea (= 1 ciclo de flexión). En total, el tramo "A" habrá realizado 3 ciclos de flexión.

Veamos ahora el tramo "B", en la zona de la polea de compensación: Durante la elevación, el tramo "B" no sufrirá ninguna flexión, sino que permanecerá quieto al lado de la polea. Pero durante el transporte de la carga a través del edificio, la carga oscilará bajo el puente grúa, creando constantemente diferencias de longitud entre los dos lados del sistema de reenvío.

Por lo tanto, un pequeño tramo de cable se desplazará continuamente dentro y fuera de la polea de compensación, sometiendo a la sección "B" a, por ejemplo, 30 ciclos de flexión.

Entonces el tramo "B" es la zona de cable más solicitada en este sistema en particular. Estará sometido a 10 veces más ciclos de flexión que el tramo "A", ¡y por añadidura sobre una polea de menor diámetro! Y sin embargo, a menudo es el único tramo del cable que no se inspecciona, un poco porque es de difícil acceso y otro poco porque en teoría "ese cable no trabaja".

Sólo los sistemas de reenvío con muchas poleas de reenvío son "seguros" con respecto a la fatiga en la polea de compensación porque tendrán otras zonas más accesibles sometidas a una fatiga aún mayor.

A veces, un accidente ocurre cuando no hay antecedentes de los cuales pudiéramos haber aprendido la lección. El accidente simplemente ocurre porque nunca antes había habido una situación algo similar:

7. Un ejemplo histórico (3): El puente Tacoma Narrows

El puente Tacoma Narrows se abrió al tránsito el 1 de julio de 1940. Se construyó de acuerdo con los estándares de la ingeniería de la época, pero se derrumbó tras sólo cuatro meses de servicio el 7 de noviembre de 1940.



Fig. 13: El colapso del puente Tacoma Narrows

El colapso del puente no fue causado por una sobrecarga. Fue causado por un viento relativamente inofensivo que, levantando el tablero del puente, le provocó una torsión oscilatoria en uno de los modos naturales¹⁶ de oscilación de la estructura, un efecto nunca antes observado en puentes (Figura 13). Realmente si ustedes no ven la filmación del derrumbe, no podrán creer que un puente de esas dimensiones pueda balancearse del modo en que lo hizo éste.¹⁷

8. Un caso de estudio contemporáneo (5): El accidente de Cavalese

En febrero de 1998, un avión militar estadounidense chocó contra los cables de 51 mm de un teleférico en Cavalese (Italia). Los expertos habrían predicho que cualquier avión que chocara contra un cable de acero con una resistencia a la rotura de más de 200 toneladas habría quedado destruido mientras que el cable de acero muy probablemente habría sobrevivido. Sin embargo, ocurrió lo contrario: el avión cortó el cable de suspensión, cortó también el cable de arrastre, este último en dos puntos separados 1,5 m entre sí, y regresó a su base aérea casi sin daños.

Más tarde se encontró que la gran velocidad del avión había generado una fuerza de impacto que se propagó a través de la sección transversal del cable en dos lugares cercanos, rompiendo los alambres uno por uno, sin permitirles "agrupar" sus fuerzas y así detener al avión.

Tras algunos cientos de años de ingeniería, nuestras estadísticas deberían ser mejores, pero las fallas siguen ocurriendo. Todos ejemplos anteriores muestran una cierta falta de comprensión de los mecanismos que finalmente condujeron a la falla, y también que a veces ocurren cosas imprevistas.

Debemos aprender las lecciones de ingeniería que nos enseñan estos accidentes, y debemos entender su moraleja: que nunca debemos ser complacientes con la seguridad.

El Autor desea agradecer a la Dra. Isabel Ridge, por la corrección de este trabajo y sus útiles sugerencias.

¹⁶ *Modo natural* es la traducción del inglés *eigenmode*, y se refiere a las frecuencias naturales o propias de oscilación (divulgadas muchas veces como frecuencias de *resonancia* o *armónicas*). (NdT)

¹⁷ La película, disponible en YouTube, es verdaderamente impactante. El caso del puente de Tacoma se enseña en los cursos de Física como ejemplo clásico de resonancia mecánica, aunque algunos investigadores sostuvieron que la rotura se debió al llamado flameo aeroelástico. Sea como sea, lo cierto, y la lección que debemos aprender, radica en lo que dice el Autor: nunca antes se había diseñado un puente de esas características y ese tamaño. (NdT)

9. Las reglas de Roland para los cables de grúa y los sistemas de cables

9.1. Diseño de la grúa

- Utilice los mayores diámetros de polea posibles
- Utilice los menores diámetros de cable posibles
- Minimice el número de poleas
- Evite las flexiones invertidas
- Use el diámetro adecuado en las canaletas de poleas y tambores (diámetro nominal del cable + 6%)
- Mantenga ángulos de desvío pequeños
- Utilice poleas con ángulos de garganta de 45° o superiores18
- Coloque una pasteca pesada, con el centro de gravedad bajo
- Para mejorar la estabilidad de la pasteca, construya el sistema de reenvíos con una base amplia¹⁹
- Evite los números impares de líneas de cable²⁰
- Evite los rodillos
- Evite las poleas ecualizadoras, prefiera vigas ecualizadoras o tambores ecualizadores, si es posible
- Evite los enrollamientos de varias capas siempre que sea posible

¹⁸ El ángulo de la garganta (*groove angle*) es el ángulo entre sus dos paredes, medido en un plano perpendicular al eje del cable. (NdT)

¹⁹ Textualmente *a large base*. El Autor llama *base* al mayor rectángulo determinado, en un plano horizontal, por las líneas del sistema de reenvíos. En otras palabras, un lado de este rectángulo está dado por el diámetro de las poleas y el otro lado por la distancia entre las poleas extremas. (NdT)

²⁰ El Autor se refiere al armado de la grúa con el punto muerto en la pasteca. (NdT)

9.2. Selección del cable

- Utilice los cables adecuados (no los más baratos, sino los más seguros)
- No utilice cables estándar convencionales
- No utilice cables con alma de fibra
- Prefiera los cables de 8 cordones a los de 6 cordones
- Utilice cables con relleno de plástico siempre que se pueda
- Utilice cables antigiratorios sólo cuando es necesario
- · Los cables antigiratorios deben tener 14 cordones exteriores o más
- Utilice cables galvanizados
- Para el enrollado en varias capas, utilice cables de torsión Lang.²¹
- Para enrollado en varias capas, utilice cables con cordones exteriores compactados
- Para mejorar la resistencia a la fatiga, use cables con alambres finos
- Para mejorar la resistencia a la abrasión, use cables con alambres exteriores gruesos
- Para tambores o sistemas de reenvío con hélice ("rosca")²² derecha, utilice cables de torsión izquierda
- Para tambores o sistemas de reenvío con "rosca" izquierda, utilice cables de torsión derecha

9.3. Almacenamiento del cable

- Guarde los cables en lugares limpios y secos
- Los cables almacenados en el exterior deben estar protegidos contra la lluvia y la humedad

²¹ 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)

²² Las palabras textuales del autor son *right hand drums or reevings*, lo cual sería *tambores o cableados a la derecha*. En mi experiencia esta expresión en castellano a menudo se malinterpreta, por lo cual agrego la palabra *hélice* o *rosca*. Aun a sabiendas de que no es rigurosamente correcta, esta palabra se entiende muy bien en un tambor de puente grúa donde la canaleta es efectivamente un helicoide. En un tambor de guía paralela (Lebus), la hélice se muestra fácilmente cuando observamos las zonas de cruce del cable. En el sistema de reenvíos del cable la analogía no es tan directa: Hay que ver los sucesivos reenvíos como una especie de hélice que avanza a medida que transcurre entre las poleas superiores e inferiores. (NdT)

9.4. Instalación del cable

- Evite que el cable se torsione durante la instalación
- Antes de cortar los cables, haga las ligaduras²³ necesarias
- Si desenrolla por arriba, enrolle por arriba; si desenrolla por abajo, enrolle por abaio²⁴
- Evite que la torsión del cable viejo se transfiera al nuevo
- Instale el cable bajo tensión, especialmente en los tambores multicapa

9.5. Operación de la grúa

- Evite las cargas dinámicas (más fácil de decir que de hacer)
- No gire mientras eleva y no eleve mientras gira
- No modifique nada sin consultar al diseñador de la grúa

9.6. Inspección del cable

- Inspeccione los cables de acero con frecuencia
- Inspeccione los cables de acero en los lugares adecuados:
 - en las zonas de mayor fatiga
 - en los puntos de toma de carga
 - en las poleas de compensación
 - en el tambor
- Inspeccione las terminaciones de los cables
- Controle las canaletas de poleas y tambores
- Use END cuando sea posible
- Lleve un libro de registro de inspecciones

9.7. Mantenimiento del cable

- Retire los alambres rotos
- Relubrique sus cables a intervalos regulares
- Utilice un lubricador a presión si es posible
- Utilice un procedimiento de corrida y corte de cable cuando sea posible

9.8. Generales

- Aprenda y mejore todo el tiempo
- Nunca se sienta seguro
- 23 En este caso *ligadura* (o *ligada*, como se dice en España) se refiere a la atadura con alambre que se hace en la punta de un cable para evitar que se desarme. Ver Nota 13. (NdT)
- 24 El Autor se refiere a la conocida regla de mantener el sentido de la curvatura del cable cuando se lo pasa de un carretel a otro o al tambor del equipo. (NdT)

10. Referencias

Galileo Galilei, 1638, Dialogues Concerning Two New Sciences, Translated by H. Crew and A. de Salvio, 1914.

Henry Petrosky, Design Paradigms, Cambridge University Press 1994, ISBN 0-521-46108-1 hardback, ISBN 0-521-46649-0 paperback.

Donald Sayenga, Sling Design Factors Discussion, Slingmakers²⁵

Gabor Oplatka et al., Why was it the rope that broke and not the wing? OIPEEC bulletin 76, 1998, pp 21-24²⁶

Roland Verreet, Handling, Installation and Maintenance of Steel Wire Ropes (disponible en castellano: Roland Verreet, Manipulación, montaje y mantenimiento del cable de acero)

Roland Verreet and William Lindsay, Wire Rope Inspection and Examination

Roland Verreet, Wire Rope End Connections (disponible en castellano: Roland Verreet, Terminaciones de cable de acero)

Roland Verreet, The Rotation Characteristics of Steel Wire Ropes (disponible en castellano: Roland Verreet, Características rotacionales del cable de acero)

Roland Verreet, Calculating the Service Life of Running Steel Wire Rope

Roland Verreet, Analysis of the Bending Cycle Distribution of 1-to 8- part Electric Hoists

Roland Verreet, Wire Ropes for Offshore Cranes, Problems and Solutions, Offshore Crane Conference, Kristiansand, 1998

Roland Verreet & Isabel Ridge, Wire Rope Forensics

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.

²⁵ Slingmakers es la revista orgánica de la AWRF (Associated Wire Rope Fabricators). Donald Sayenga fue Directivo de la AWRF hasta su fallecimiento en 2019 (NdT)

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

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