

Mecanismos y modos de falla en cables metálicos estructurales

Humberto Gómez V.*, José Wilches B.**

Resumen

Los cables son elementos flexibles de estructura compuesta, fabricados a partir del trenzado helicoidal de torones que, a su vez, resultan de trenzar helicoidalmente alambres de acero de alto carbono. Éstos están diseñados para soportar esfuerzos de tracción, que tienden a enderezar los helicoides de los torones y de los alambres, lo cual da como resultado la aparición de fuerzas de fricción y compresión entre ellos. Cuando estos elementos no se encuentran debidamente protegidos y lubricados, se puede producir un desgaste mutuo, el cual puede acelerarse en presencia de una atmósfera corrosiva. Este mecanismo fue el origen de los fenómenos de fatiga y fretting corrosion causantes de la rotura catastrófica de un cable de la grúa de un barco transportador de granos, los cuales se identificaron a partir de un análisis de la falla del mismo, en el que se aplicaron técnicas de ensayos mecánicos, microscopía óptica, electrónica y de microanálisis EDX.

Palabras clave: Análisis de falla, cables, corrosión, fretting corrosion, fatiga, SEM, EDX, fractografía, alambres metálicos.

Abstract

Wire ropes are flexible elements of composite structure, manufactured by the helicoidally twining of strands, which are produced by the helicoidally twining of high carbon steel wires. Ropes are designed to support tension stresses, who tends to straight the strands and wires helicoids, resulting the friction and compression forces apparition among them. When this elements are not properly lubricated and protected, a mutual wear can be produced among them, which can be accelerated in the presence of an corrosive atmosphere. This mechanism was the origin of the fatigue and fretting corrosion phenomena, responsible of the catastrophic rupture of a cargo boat crane, identified by the corresponding failure analysis methodology using mechanical and microstructurals tests like SEM, EDX and others.

Key words: Failure analysis, fretting corrosion, wire ropes.

Fecha de recepción: 1 de septiembre de 2003
Fecha de aceptación: 4 de noviembre de 2003

* Ingeniero Mecánico y Magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte; Coordinador de laboratorios de materiales y profesor de los departamentos de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Básica, Universidad del Norte. Miembro del Grupo de Investigación en Materiales, Procesos y Diseño, GIMYP, de la misma universidad.

** Ingeniero Metalúrgico, UPTC, Especialización en Metodologías de la Investigación de la Enseñanza Universitaria. Jefe del departamento de Ingeniería Básica y profesor tiempo completo del Programa de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte. Miembro del GIMYP. jwilches@uninorte.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo es el resultado de un análisis de la falla presentada por un cable o guaya de un barco transportador de granos, cuya operación de descargue incluía la introducción en su interior de un cargador motorizado de 22 toneladas métricas para efectos de apilamiento de la carga. En varias ocasiones hubo necesidad de sacar el cargador para efectos de mantenimiento del mismo, dadas las frecuentes fallas que presentaba; y en una de esas maniobras, mientras el cargador estaba izado, el cable de la grúa utilizado para el efecto falló súbita y catastróficamente por rotura.

Los cables o guayas son elementos o componentes diseñados para comportarse flexiblemente mientras transmiten o soportan cargas axiales, y se construyen a base del enrollamiento helicoidal de varios torones alrededor de un alma central metálica (un alambre u otro torón) o de fibra. Cada torón, a su vez, resulta del enrollamiento (también helicoidal) de varios alambres de acero de alta resistencia, alrededor de sus respectivas almas o núcleos, tal como se muestra en la figura 1.

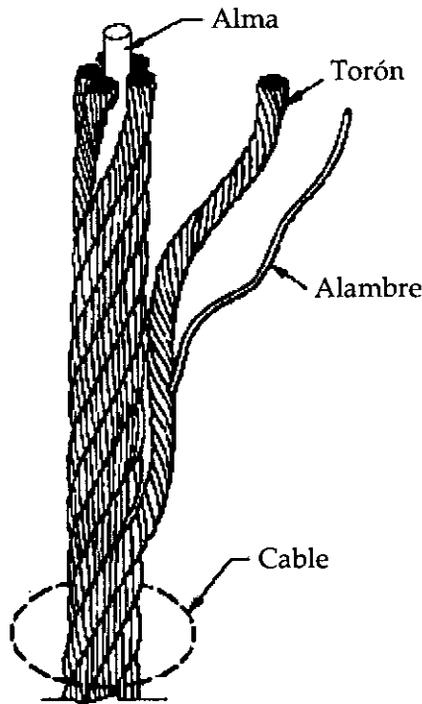


Figura 1. Estructura de un cable metálico

Los alambres se fabrican en aceros de alto carbono y su elevada resistencia se deriva de la acritud inducida durante el proceso de trefilado o de un tratamiento térmico posterior de «*patentado*».

Durante su desempeño se encuentran sometidos a tres tipos de cargas : las de tracción, que tratan de enderezar los helicoides de los torones y alambres; las de flexión, en los puntos de apoyo (poleas y tambor); las de fricción o rozamiento con estos mismos componentes y las que aparecen entre alambres y torones entre sí, como consecuencia de su inevitable tendencia al enderezamiento bajo las cargas de tracción.

Este modo de trabajar le permite al cable, por una parte, tolerar la ruptura de algunos alambres sin que se afecte la seguridad del mismo, dado que las fuerzas de rozamiento contribuyen a que los tramos resultantes sigan transmitiendo las cargas de tracción; pero, por la otra, este mecanismo también contribuye inevitablemente al deterioro del cable, en la medida en que los torones y alambres externos sufren desgaste en las áreas de contacto con las poleas y demás elementos que lo soportan; al tiempo que se desgastan entre sí, a todo lo largo del cable, por la atrición resultante del rozamiento entre ellos cada vez que se produce un ciclo de trabajo –carga y descarga–, pero muy particularmente en aquellos tramos obligados a soportar esfuerzos flectores cíclicos, como lo son los que están obligados a enrollarse o desenrollarse del tambor o a cambiar de dirección en las poleas.

De esta manera, la vida del cable depende de la magnitud de las cargas que se le aplican en servicio, del número de ciclos de trabajo a que se someta y del mantenimiento que se le haga en términos de su lubricación –obviamente, ésta minimiza el rozamiento y protege contra la corrosión– y de las inspecciones periódicas de que sea objeto, a fin de establecer su aptitud para seguir prestando servicio y/o eliminar los tramos deteriorados.

2. DISEÑO Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para identificar la causa de la falla se aplicó la metodología propia de este tipo de estudios, la cual inicia por la inspección visual general tanto del elemento fallado, para determinar sus dimensiones y características generales, como del entorno en el cual se encontraba en funcionamiento.

El cable con alma de fibra, de 33 mm de diámetro con cuatro torones y 38 alambres por torón –15 externos y 23 internos distribuidos en dos capas de 14 y 9 alambres, de 2.5 mm, 1.7 y 1.5 mm de diámetro respectivamente– (figura 2), posee un arreglo regular, lo cual equivale a que el sentido de enrollado helicoidal de los alambres en los torones es contrario al de los torones en el cable.

El tramo analizado estaba engrasado y presentaba la estructura normal de un cable a todo lo largo, excepto el último metro y medio hacia el extremo roto, donde se hace notable la ausencia de grasa entre torones y la pérdida del trenzado entre éstos.

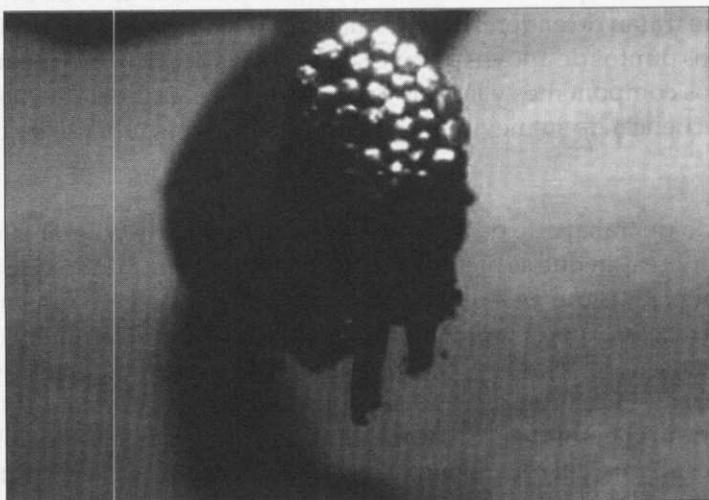


Figura 2. Torón del cable mostrando su sección transversal, donde es posible identificar los alambres exteriores con mayor diámetro que los interiores

Así mismo, en el extremo donde se produjo la falla por fractura, todos los torones aparecen desflecados (figura 3) y sus alambres cubiertos de óxido (figura 4). Hacia la zona del cable donde comienzan a destrenzarse los torones se observa que, con cierta regularidad, los alambres externos de éstos pierden su cilindridad, por lo cual presentan superficies planas (figura 5), donde el diámetro de los alambres se ve reducido significativamente, fenómeno que también se registra en el extremo roto vecino a la superficie de fractura de varios alambres (figura 6).

Posteriormente se procedió al análisis del elemento mediante fractografía por microscopía electrónica de barrido y estereomicroscopía, así como la identificación de depósitos sobre éstas mediante microanálisis por energía dispersa de rayos X (EDX), después de lo cual se analizaron metalográficamente mediante microscopía óptica y se midieron propiedades mecánicas.

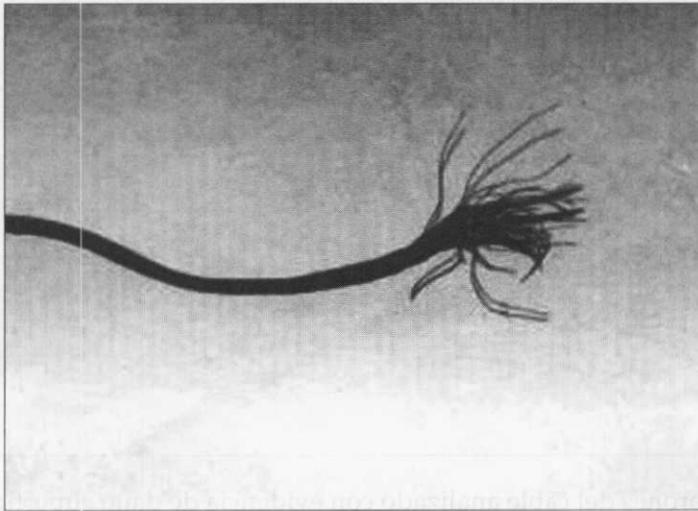


Figura 3. Extremo roto del cable donde se muestra el desfleque y pérdida de trenzado de los torones

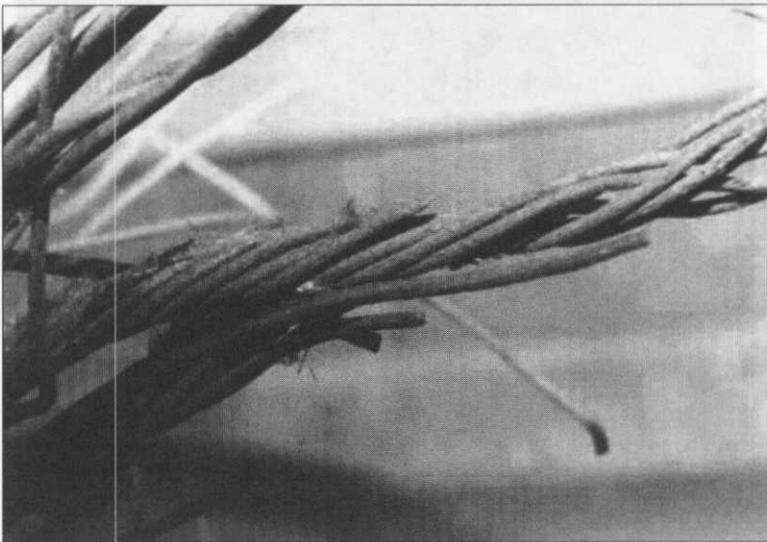


Figura 4. Torones del cable roto hacia el extremo de rotura con evidencias de alto grado de oxidación y ausencia de grasa.

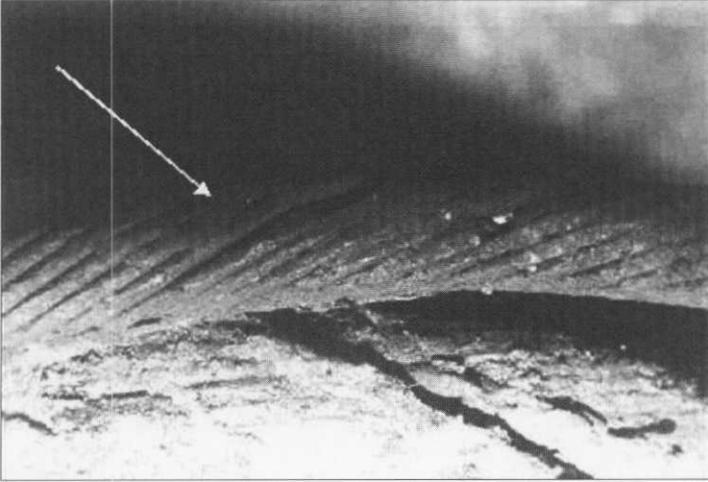


Figura 5. Torones del cable analizado con evidencia de daño superficial (flecha) por contacto entre ellos. Nótese la ausencia de grasa, la oxidación superficial y el deterioro del alma de fibra.

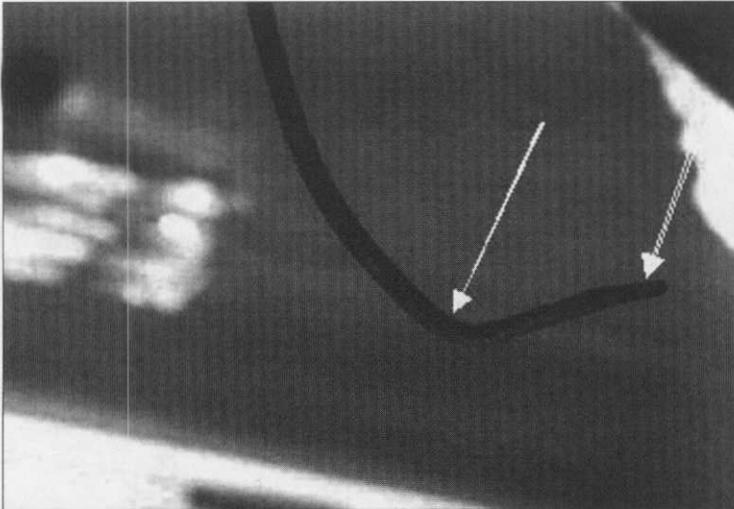


Figura 6. Extremo de alambres en la zona de rotura del cable. Nótese la evidente disminución del diámetro de varios de los alambres (flechas) y la coincidencia de algunos de estos sitios con el punto de rotura del alambre.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Fractografía

La observación detallada por microscopía electrónica de barrido y estéreomicroscopía de las superficies de fractura de los alambres fallados y sus vecindades, pone de manifiesto el carácter frágil de las superficies de fractura (figuras 7 y 8) y la existencia de estriaciones de fatiga (figuras 9, 10 y 11), así como de herrumbre y picado superficial por corrosión (figuras 12, 13 y 14), lo cual evidencia la naturaleza mecánico-química del desgaste causante del aplanamiento de la superficie cilíndrica de los alambres (figuras 15 , 16 y 17).

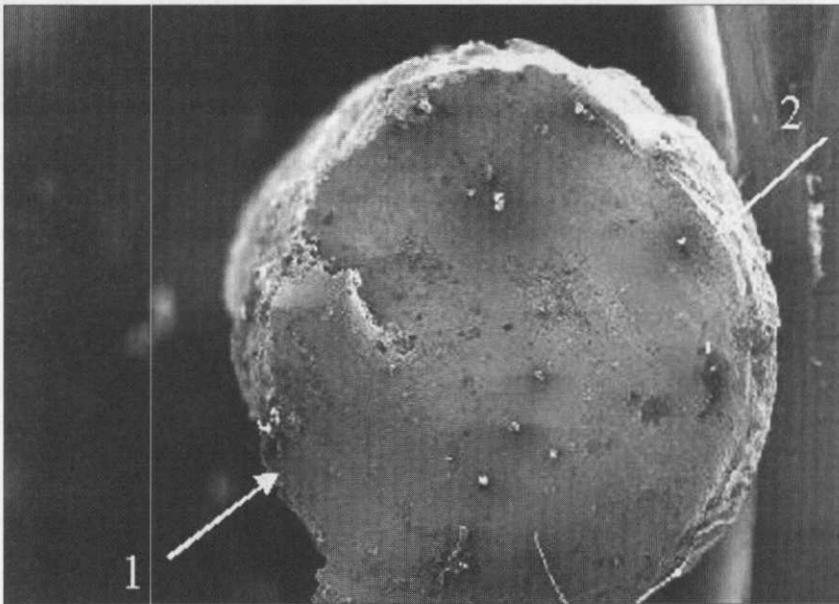


Figura 7. Fotomicrografía obtenida por microscopía electrónica de barrido correspondiente al extremo fallado de uno de los alambres interiores o delgados en la que se muestra la superficie de fractura, de aspecto claro y brillante, de topografía plana y lisa y sin evidencias de deformación plástica, características que tipifican el comportamiento frágil del material. Nótese que esta superficie tiene su origen en por lo menos dos sitios diferentes (flechas).

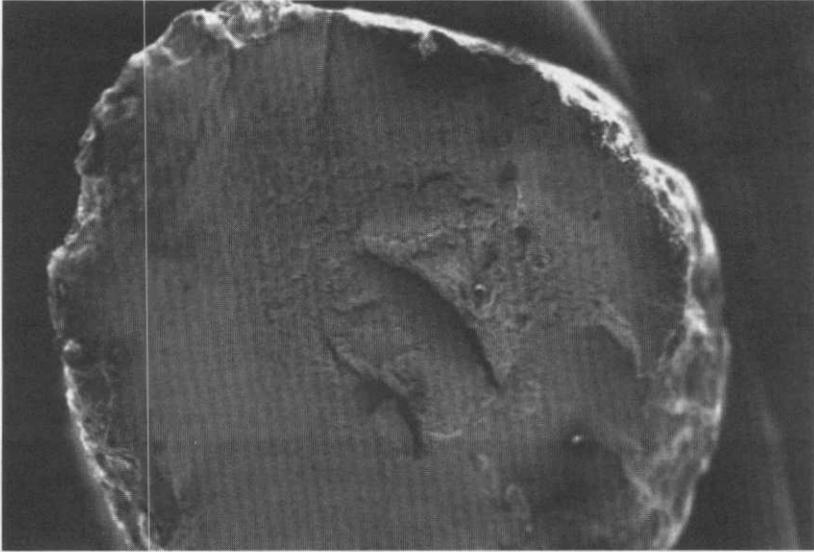


Figura 8. Fotomicrografía electrónica de la superficie de fractura de un alambre de 2.5mm sometido a una prueba de tracción. Nótese el aspecto plano, liso y sin deformación apreciable de la superficie de fractura, característica de un tipo de fractura frágil.

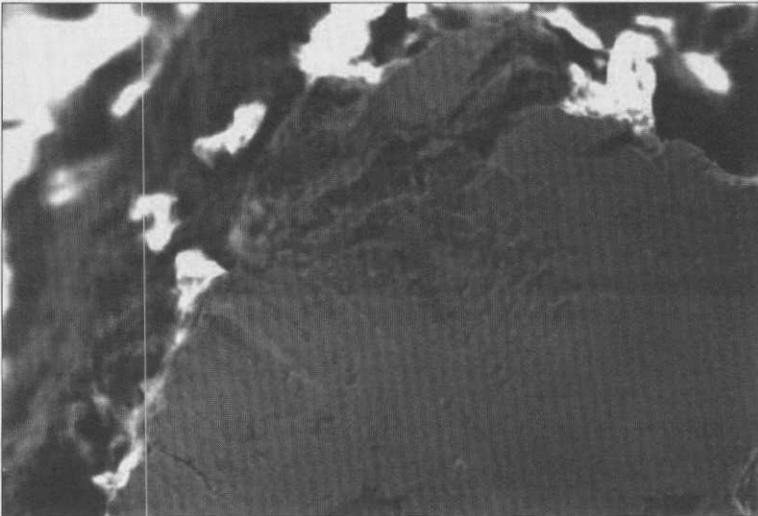


Figura 9. Fotomicrografía obtenida por microscopía electrónica de barrido en el origen 1, correspondiente a la figura 7, donde puede apreciarse claramente la serie de estrías de fatiga (marcas cuyo espaciamento indican el avance de la fisura por cada ciclo de aplicación del esfuerzo) originadas en la superficie corroída y agrietada del alambre

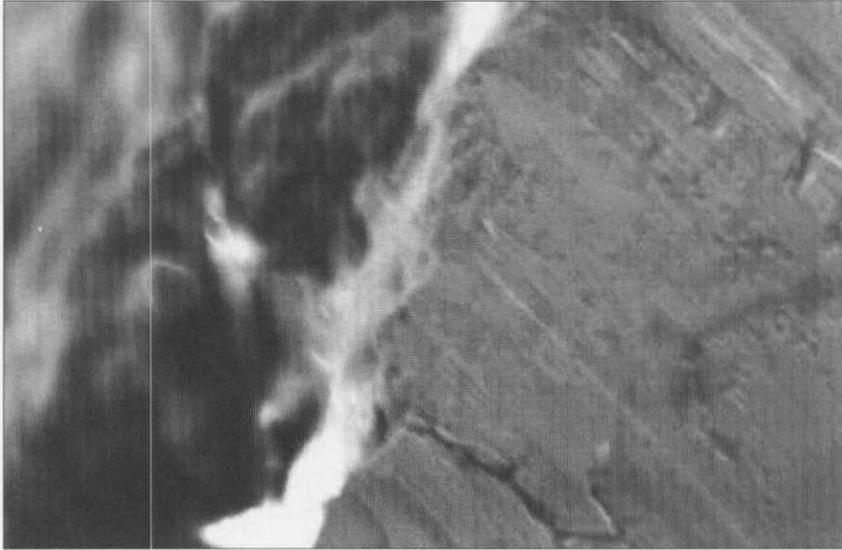


Figura 10. Ampliación de la figura 9 en la que se muestran las estriaciones y la fisura de forma más detallada.

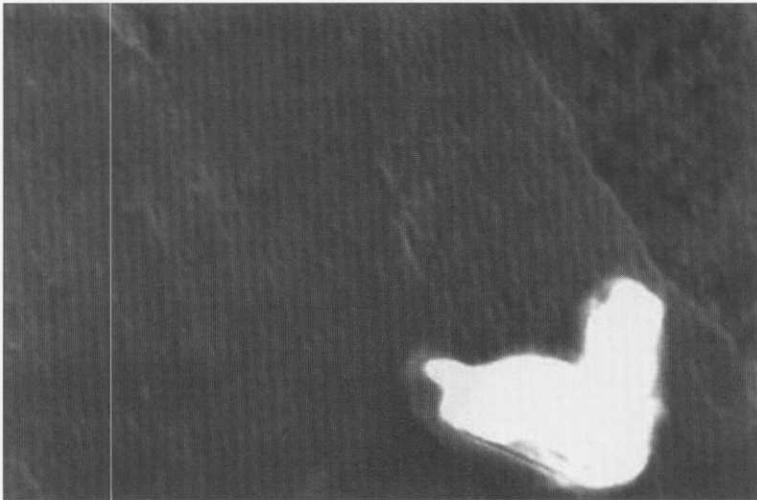


Figura 11. Fotomicrografía obtenida por microscopía electrónica de barrido (SEM) en el origen 2, correspondiente a la figura 7, donde puede apreciarse claramente la serie de estriaciones de fatiga originadas en la superficie y en dirección opuesta a la del punto 1 del alambre (la partícula blanca apreciada en la imagen corresponde a un depósito salino).

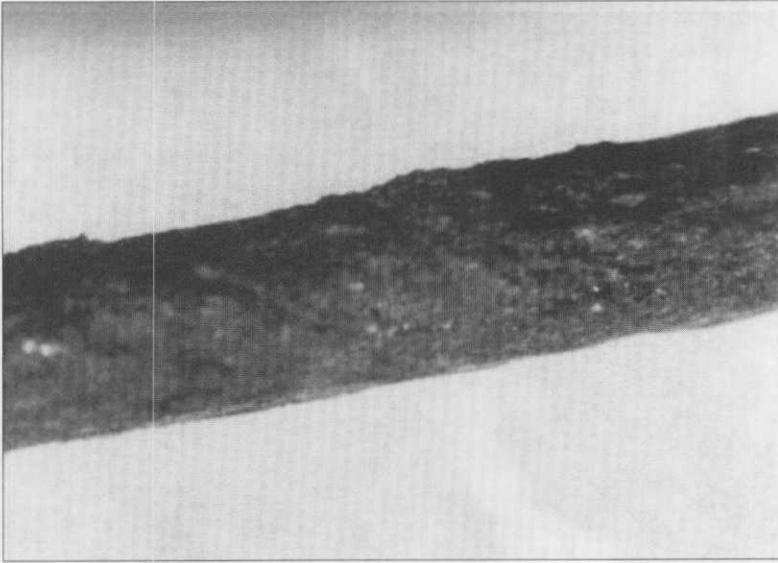


Figura 12. Alambre del extremo roto del cable cubierto por herrumbre o producto de corrosión.

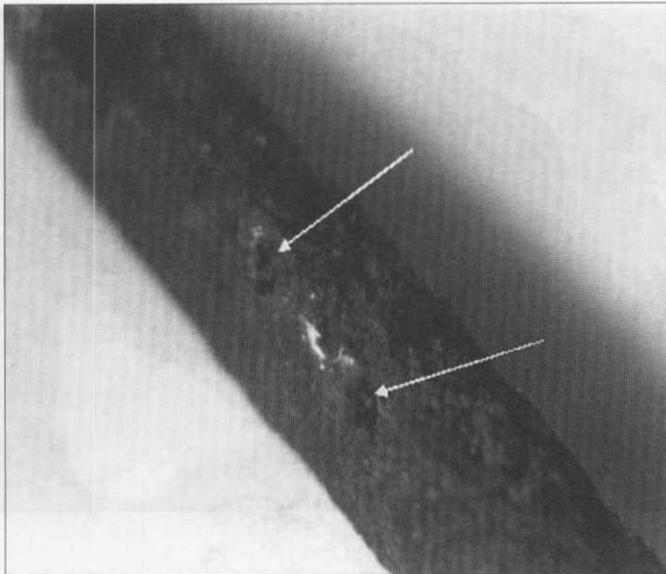


Figura 13. Alambre del extremo roto del cable con picaduras de corrosión (flechas) y totalmente cubierto por herrumbre. Las manchas blancas son depósitos de sal marina.

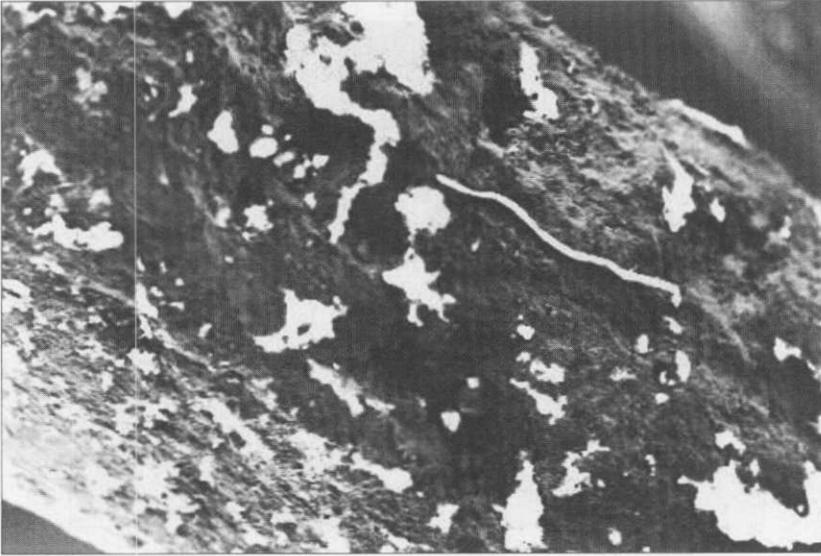


Figura 14. Fotomicrografía electrónica de la superficie cilíndrica de uno de los alambres comprometidos en la falla, donde se puede observar la presencia de depósitos salinos (áreas blancas) y picaduras de corrosión asociadas con éstos (puntos oscuros).

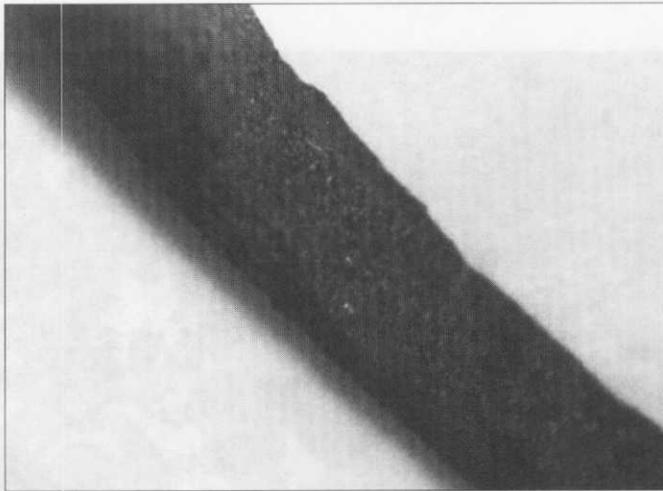


Figura 15. Desgaste de uno de los alambres del cable producido por corrosión por frotación o «fretting corrosion». Nótese que la superficie desgastada está cubierta por productos de corrosión que, por ser frágiles, son fácilmente removibles durante la frotación de esta superficie con la del alambre vecino en contacto con ella. Si la superficie se corroe de nuevo, el ciclo se repite hasta producir el daño de la magnitud observada.

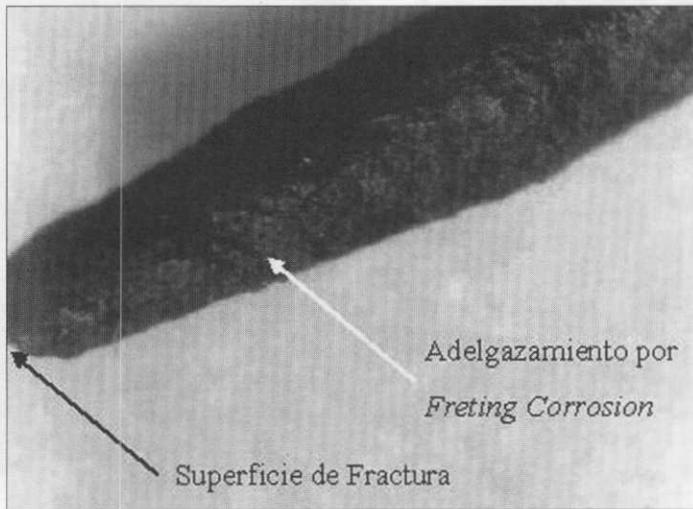


Figura 16. Uno de los alambres externos fallados mostrando superficie de fractura coincidente con la zona dañada por el mecanismo de «fretting corrosion». No menos del 25% del total de los alambres externos en la zona de rotura presenta esta morfología.

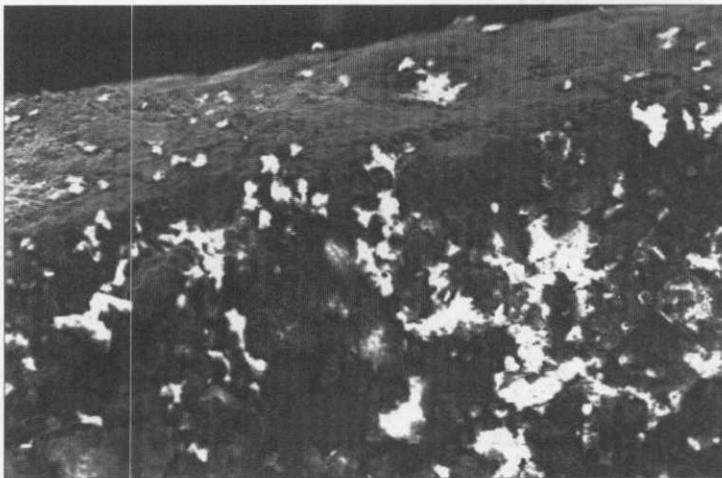


Figura 17. Fotomicrografía electrónica de la superficie desgastada de uno de los alambres en la que se observan depósitos salinos (áreas blancas), la superficie aplanada y pequeños cráteres, característicos del mecanismo de ataque por «fretting corrosion».

Así mismo, el microanálisis químico por la técnica de la energía de los electrones retrodispersados (EDX) de los depósitos sobre muestras de alambres del cable, revela la presencia de elementos que hacen parte de la composición química del agua de mar (figura 18).

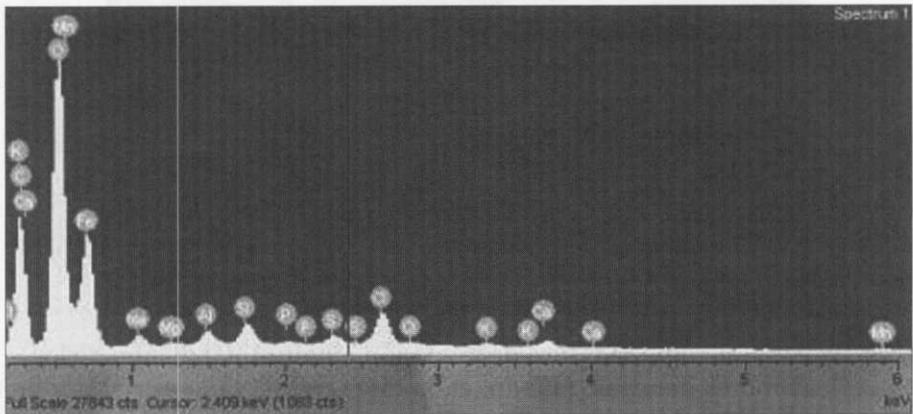


Figura 18. Espectrometría EDX del producto de corrosión o herrumbre (arriba) y de las manchas blancas de las figuras 9, 10, 11, 13, 14 y 17. Nótese la presencia de elementos como el cloro (Cl), potasio (K), magnesio (Mg) y sodio (Na), constituyentes característicos del agua de mar.

Metalografía

La metalografía microscópica óptica de una muestra de alambre del cable revela una microestructura típica de un acero al carbono hipoeutectoide o de menos de 0.8% C, constituida por granos alargados y estratificados de perlita y ferrita (figura 19), típica de un acero estirado en frío. La perlita presente es de tipo laminar y de orientación normal al eje longitudinal del grano (figura 20), lo cual sugiere un comportamiento frágil del material.

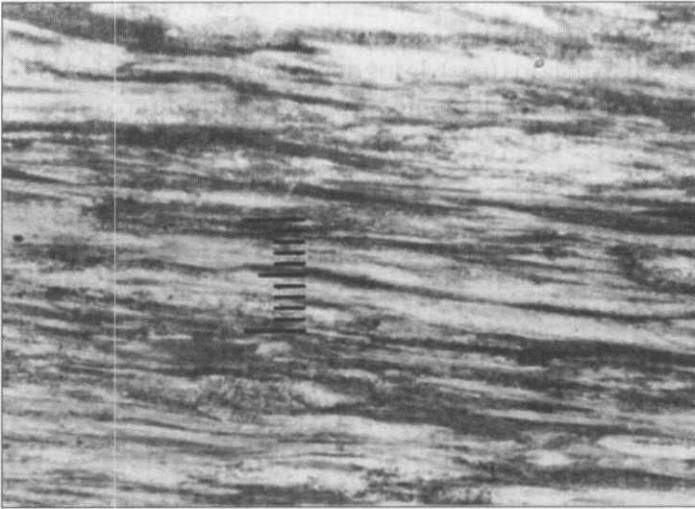


Figura 19. Foto micrografía óptica de la sección longitudinal de uno de los alambres del cable fallado, en la que se observa la estructura de un acero al carbono hipoeutectoide constituida por ferrita (áreas blancas) y perlita (áreas oscuras) en una proporción aproximada de 30/70. Nótese el alargamiento de los granos y su orientación paralela al eje longitudinal del alambre, coincidente con el del proceso de estirado en frío. Dado que el %C en la perlita es de 0.8, en tanto que la ferrita no tiene carbono, se deduce que el acero de los alambres tiene aproximadamente 0.6%C, que es lo usual en alambres para guayas. Nital 3, 250X.

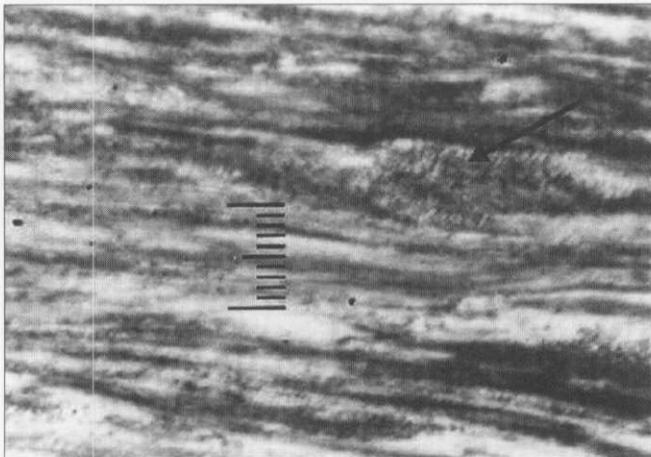


Figura 20. Fotomicrografía óptica a 500X de la microestructura del acero de los alambres, donde se detalla la orientación transversal de las plaquetas de carburo (flecha) con relación al eje longitudinal del alambre, lo cual contribuye al comportamiento frágil del mismo cuando se somete a esfuerzos de tracción paralelos al eje longitudinal de los granos.

Propiedades mecánicas del acero de los alambres

El promedio de las pruebas de microdureza Vickers tomadas sobre la muestra metalográfica es del orden de 430 BHN, lo cual corresponde a un acero de 215,000 RSI de resistencia a la tracción. Este valor es consistente con el obtenido de una prueba de tracción de dos de los alambres internos, donde para diámetros de 1.5 y 1.7 mm, las cargas de rotura fueron de 319.7 y 350 kilogramos, valores éstos que corresponden a una resistencia a la tracción del orden de lo estimado por la prueba de dureza. Sin embargo, es significativo el hecho de que la ductilidad en ambos casos fue del orden del 8%, lo cual es consistente con la microestructura del material.

CONCLUSIONES

La microestructura bandeada del acero demuestra que el diámetro y la resistencia finales de los alambres se obtuvieron a través de una operación de trefilado sin tratamiento térmico posterior. Ello explica su elevada resistencia –la cual es la apropiada para este tipo de componente–, pero también su baja capacidad de deformación plástica o alta tendencia a la fractura frágil y, por tanto, el hecho de que las roturas por sobrecarga se produzcan sin que haya una disminución notable en la sección transversal de los alambres; es decir, la tenacidad del acero del cable no es la más deseable para estos casos.

Por otra parte, la presencia de productos de corrosión, y de elementos que la favorecen en la superficie de los alambres, simultáneamente con la existencia de cargas axiales y laterales resultantes de las condiciones operativas normales del cable, propician el mecanismo de desgaste conocido como «corrosión por frotación» o *fretting corrosion*, responsable del adelgazamiento irregular de los alambres externos de los torones al entrar éstos en contacto entre sí mientras el cable está tensionado o, en el peor de los casos, durante la flexión del cable al pasar por las poleas o el tambor de enrollamiento.

También es evidente que algunos alambres delgados del interior de los torones fallaron por el mecanismo de fatiga o agrietamiento progresivo originado en la superficie corroída de los mismos. Las irregularidades superficiales originadas por este fenómeno actuaron como un concentrador de los esfuerzos de tracción, resultantes de los esfuerzos de flexión a que se encuentran sometidos los alambres por efectos del curvado y descurvado del cable al pasar por las poleas. Ello explica el doble origen de la fractura en puntos diametralmente opuestos de su superficie cilíndrica, en los que el esfuerzo de tracción adquiere un valor máximo.

Por consiguiente, cuando en un tramo relativamente corto de cable (50 cm a 1m) se produce el adelgazamiento simultáneo en varios alambres, con la presencia

de problemas de corrosión por picado en un material relativamente frágil, no es extraño que cargas inferiores a las de diseño inicien fisuras o grietas de fatiga, lo cual da lugar a la rotura de varios de ellos, lo que a su vez genera un incremento en los esfuerzos de los restantes de ese tramo, y la rotura subsiguiente de los mismos, y así sucesivamente hasta que se produce la falla.

Referencias

- CHAPLIN, C.R., Failure Mechanisms in Wire Ropes. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 2, N° 1, pp 45-47, 1995.
- SHREMS, K. & MACLAREN, D., Failure Analysis of a Mine Wire Rope. *Engineering Failure Analysis*, Vol 4, N° 1, pp 25-38, 1997.