

TRABAJO DE DIVULGACIÓN**LA PÉRDIDA DE SEGURIDAD EN LAS LÍNEAS DE REMOLQUE POR PROBLEMAS DE FATIGA EN LOS TRENZADOS DE FIBRAS SINTÉTICAS¹⁾**

R. Weyler*, L. Gil**, V. Ortega*** y M. Sánchez****

0.1. Resumen

En las operaciones de remolque de buques existen situaciones críticas debido a que el control del movimiento del buque pasa por la integridad de la línea de remolque.

En los puertos del Mediterráneo la composición de la línea de remolque viene dada por un cable de acero y un trenzado, de polipropileno habitualmente, más pequeño que actúa como amortiguador. En el momento del diseño de los diferentes elementos se utiliza el coeficiente de seguridad adecuado, pero dado a su uso dinámico y como demuestra nuestro estudio, con el tiempo el material se fatiga con la consiguiente pérdida de seguridad.

Palabras clave: operaciones portuarias, remolcar, seguridad.

0.2. Summary: THE LOSS OF SECURITY IN LARGE SYNTHETIC ROPES OF TOWLINES BY FATIGUE PROBLEMS

During tow operations of ships, safety and control of movements of ships depend on towlines integrity. In the Mediterranean Sea, common towline elements are steel cables and ropes, usually of polypropilene, that perform as a shock

absorber, due to its less stiffness. A static safety coefficient is defined in the design of the towline elements. In our study, we demonstrate that dynamical use of towline weakens the rope material and suffers fatigue. Hence a reduction of towline safety is reported.

Key words: port operations, tow, safety.

0.2. Résumé: LA PERTE DE SÛRETÉ DANS LES LIGNES DE REMORQUAGE PAR DES PROBLÈMES DE FATIGUE DANS LES TRESSAGES DE FIBRES SYNTHÉTIQUES

Dans les opérations de remorquage de bateaux i y a des situations critiques à cause de que le contrôle du mouvement du bateau passe par l'intégrité de la ligne de remorquage.

Dans les ports de la Méditerranée la composition de la ligne de remorquage est un câble en acier et en tressage de polypropylène, habituellement plus petit qui agit comme amortisseur. Au moment du dessin de différents éléments le coefficient adéquat de sûreté est utilisé, mais étant donné son usage dynamique et comme notre étude démontre, avec le temps le matériel se fatigue avec la perte résultante de sûreté.

Mots clés: opérations dans les ports, remorquage de bateaux, sûrete.

* Dr. Ing. Rafael Weyler Pérez, Profesor Asociado de Mecánica del Medio Continuo y Teoría de Estructuras del Departamento de Resistencia de Materiales en la E.T.S.E.I.A.T. (U.P.C.)

** Dr. Ing. Lluís Gil Espert, Profesor Titular de Mecánica del Medio Continuo y Teoría de Estructuras del Departamento de Resistencia de Materiales en la E.T.S.E.I.A.T. (U.P.C.)

*** Ingeniero Técnico Víctor Ortega Mur, Personal Investigador en el Laboratorio de Resistencia de Materiales del Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería en la E.T.S.E.I.A.T. (U.P.C.)

**** Dra. Ing. Montserrat Sánchez Romero, Profesora Titular de Mecánica del Medio Continuo y Teoría de Estructuras del Departamento de Resistencia de Materiales en la E.T.S.E.I.A.T. (U.P.C.)

•) Presentando en el 2004 International Textile Congress



1. INTRODUCCIÓN

Las operaciones de remolque son fundamentales en el transporte marítimo. Normalmente aparecen dos tipos de embarcaciones, el remolcador, un barco de pequeño tamaño pero de mucha maniobrabilidad y potencia, y el buque remolcado. Estas operaciones son comunes durante el atraque y el desatraque de barcos dentro de los escenarios portuarios de todo el mundo. También son comunes en operaciones de rescate y salvamento^{1,2)}

Por su propia naturaleza, las operaciones de remolque tienen un alto grado de riesgo. En especial en los ambientes portuarios donde los daños ecológicos y económicos pueden ser cuantiosos³⁾. La relación entre el remolcador y el remolcado se reduce a la línea de remolque, a través de la cual el remolcador tira del buque remolcado dirigiéndolo hacia su objetivo. En estas operaciones la línea de remolque sufre fuertes tracciones y se convierte en el elemento crucial para la seguridad⁴⁾.

En los últimos años se han dado grandes avances tecnológicos en la construcción de remolcadores, su potencia y velocidad ha aumentado mucho. Este hecho aumenta la inseguridad de las operaciones porque la línea de remolque sufre tirones más fuertes y por consiguiente, los efectos dinámicos⁵⁾ y de fatiga^{6,7,8)} debilitan los materiales.

En los últimos 30 años la industria de los remolcadores ha intentado aumentar la seguridad y la innovación de las operaciones. En especial la inclusión de nuevos materiales en la composición de las líneas de remolque^{9,10,11)}. Las primeras líneas de remolque eran cuerdas de fibras naturales, posteriormente se añadió el acero y hoy en día las fibras textiles sintéticas como Polipropileno, Dacron, Poliéster, fibras-HM Kevlar®, Vectran® o Dyneema®. Sin embargo, la tabla 1 muestra el grado de incertidumbre que todavía existe en las operaciones de remolcado.

TABLA 1
 Rango del factor de seguridad
 en puertos europeos ^{from 4}

Cables de acero	Cuerdas de fibra	En general
3.0 - 2.0	5.0 - 2.0	3.0 - 2.0

En este trabajo se estudia el efecto de disminución de la seguridad en las líneas de remolque que incorporan materiales textiles y sufren efectos dinámicos y de fatiga. Para ello se han realizado diferentes medidas experimentales 'in situ' en el puerto de Barcelona en diferentes escenarios de trabajo y con distintos materiales en la línea de remolque.

2. DESCRIPCIÓN DEL TRANSDUCTOR

Para poder caracterizar el comportamiento resistente de la línea de remolque, era necesario poder medir el estado tensional durante las operaciones de atraque y desatraque. Fundamentalmente de las primeras, ya que en dichas operaciones el buque remolcado está en movimiento y el objetivo es confinarlo en un espacio determinado; por consiguiente, es previsible que se obtenga un mayor rango de tensiones. En el caso de los desatraques es todo lo contrario, al buque confinado está parado y la misión es llevarlo hacia un espacio abierto, para que pueda iniciar la navegación por sus propios medios.

Por la propia trascendencia de este tipo de operaciones, cualquier intervención para cuantificar el estado tensional de la línea de remolque debe garantizar la integridad de la línea y la seguridad global de la operación, junto con la de las personas que intervienen. Otros factores a tener en cuenta son la morfología y las características mecánicas de la línea de remolque.

En el puerto de Barcelona, la línea de remolque tiene tres tramos diferenciados: El primero es un cable metálico de acero, de unos 15 metros de longitud, $\varnothing 38\text{mm}$ y una resistencia mecánica certificada de 135 Tn; su misión principal es el anclaje en el buque remolcado. El segundo tramo, el calabrote, es un trenzado de fibra de alta tenacidad de 8 metros de longitud con 8 cordones trenzados de 4*2 esta cuerda está certificada para una carga de rotura de 109Tn. El trenzado actúa como amortiguador ante posibles tirones durante la operación. El último tramo es igual que el primero, pero de una longitud variable que puede llegar hasta los 150 m en operaciones a mar abierto. No obstante, en operaciones en aguas portuarias la longitud oscila entre los 15 y 25 m. Los tramos están unidos entre sí mediante grilletes certificados para una carga límite de 120 Tn.



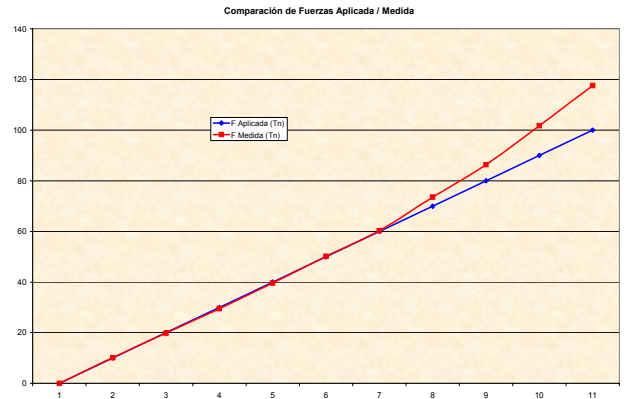
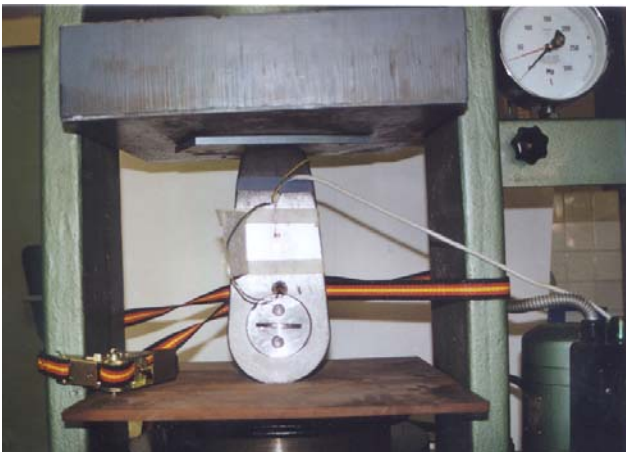
Las cargas para las que han sido dimensionados los diferentes elementos se han basado en el tiro máximo del remolcador. El tiro que la autoridad marítima ha certificado para el remolcador es de 40 Tn. Dicha certificación se obtiene en un ensayo donde la línea de remolque se fija a un punto estático del muelle, en el otro extremo el remolcador tira con las máquinas a su máxima potencia y con un dinamómetro se cuantifica dicho tiro. En realidad es un ensayo cuasi-estático y no tiene nada que ver con los esfuerzos reales que sufre la línea en las operaciones de remolcado. La línea de remolque se ve sometida a esfuerzos súbitos al tirar de un buque en movimiento, con una inercia propia y que flota en un fluido nunca estático.

Como solución más óptima para el transductor, se escogió el grillete. Este elemento forma parte de la línea, con ello se garantizaba la integridad de la misma y la manejabilidad. Además es un elemento metálico que cuenta con superficies adecuadas para la instalación de bandas extensométricas.

Durante las operaciones de remolcado el grillete puede estar sumergido de forma temporal. Por ello, a la hora de realizar la instalación definitiva se protegió la banda extensométrica con una mezcla de textura muy similar a la goma. De esta manera se garantizaba la estanqueidad impidiendo que el agua o la humedad alterasen la medida.

3. CALIBRACIÓN DEL TRANSDUCTOR

La calibración analítica presenta la dificultad de determinar con garantía las tensiones del punto sobre el cual está instalada la galga extensométrica. Por ello, la mejor calibración es aplicar unas cargas conocidas y equiparables a las de trabajo con ayuda de una prensa. En consecuencia, se podía construir la curva de calibración real del elemento: Carga aplicada-lectura de deformación. Algunos problemas se presentan cuando la lectura pierde la linealidad. Esto es debido al comportamiento del propio material y a la geometría del grillete.



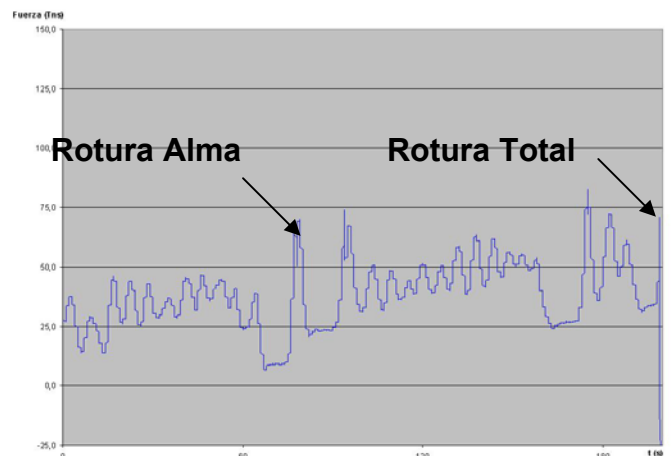
A partir de los resultados obtenidos con el grillete que se utiliza habitualmente en la línea, la curva de calibración pierde su linealidad en las 70Tn con un 5% de desviación. En un intento de obtener una mayor calidad en las lecturas correspondientes a cargas altas, se realizó una segunda instalación en un grillete de mayor resistencia. Concretamente, su certificación es válida para una carga máxima de 160Tn, con ella obtenemos linealidad hasta las 80Tn y en 90Tn la desviación es de un 6%.

4. MEDICIONES REALIZADAS

Se han realizado tres tipos distintos de mediciones para contrastar el comportamiento del sistema de medida y su relación con los materiales textiles de la línea.

4.1. Remolcador - noray

La prueba se realiza con un calabrote que ya está al final de su vida útil (2 meses). El ensayo realizado es de tipo cuasi-estático porque el remolcador tira con su máxima potencia estando el noray como punto fijo indeformable. Se consiguió primero la rotura del alma del calabrote para una carga de 75Tn. La rotura está claramente por debajo de la carga certificada para la cuerda en origen. Por consiguiente, el calabrote textil ha sufrido una disminución importante de su capacidad portante original por motivos de uso continuo.



4.2. Remolcador - remolcador

La prueba consiste en tirar desde dos remolcadores al mismo tiempo unidos mediante un calabrote con más de un mes de servicio. Después de diferentes procesos de carga y descarga a base de pequeños tirones de los remolcadores, el alma rompió con un estruendo considerable cerca de las 125Tn manteniendo la línea su integridad y alcanzando un instante después su carga máxima que sobrepasó las 150Tn. La zona donde el calabrote tiene rota el alma presenta una rigidez y un estrangulamiento detectable a simple vista.



A partir de las dos primeras pruebas se observó el comportamiento del calabrote textil. En primer lugar se midió que la carga de rotura está claramente por debajo de la certificación original a los dos meses de estar en servicio. Esto significa que el uso del calabrote debilita su capacidad portante de forma clara. No obstante, al mes de servicio la capacidad última estaba por encima de la certificación. Asimismo, se observó que con el uso, el trenzado aumenta su rigidez, esto significa que las fibras se estrangulan y el material sufre aplastamientos locales. Estos cambios morfológicos se relacionan con el aumento de la capacidad durante la entrada en servicio. Finalmente, es detectable una cierta pérdida de sección por estrangulamiento en la zona de la rotura. La rotura es súbita, acompañada de ruido, la rotura de las fibras y su recuperación elástica inmediata provocan una onda de choque que se transmite en el aire de forma claramente audible. Por consiguiente, se deduce que las fibras no se van rompiendo poco a poco debilitando la sección sino que se estrangulan y rompen todas al mismo tiempo.



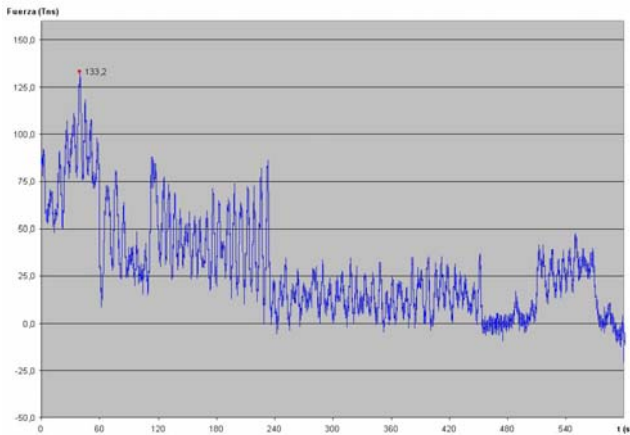
4.3. Remolcador - buque

El último tipo de medición se realizó con la intención de evaluar las condiciones reales de trabajo durante el proceso de atraque de un buque. Las mediciones del estado tensional de la línea de remolque en condiciones de trabajo real ofrecen valores muy dispares dependiendo de las diferentes variables que intervienen: tonelaje del buque, velocidad del mismo y estado de la mar. Los resultados que se presentan son de ensayos realizados en el mismo día y con una mar similar. Se destaca que fácilmente los rangos de las tensiones de trabajo superan las máximas teóricas sobre las que se dimensiona la línea de remolque. Incluso superan hasta más de 3 veces la carga máxima de trabajo de 40Tn certificada por la autoridad portuaria. Por consiguiente el factor de seguridad está claramente al límite de lo deseable.



De las mediciones se deduce que los picos de carga son muy elevados, de forma proporcional al tamaño del buque a remolcar. Por consiguiente, durante la vida operativa del calabrote las fibras textiles sufren tensiones de tracción muy elevadas en forma discontinua. Es evidente que a parte del cambio morfológico que representa en el calabrote (rigidez, disminución de sección), también el material sufre un fenómeno de pérdida de

capacidad portante, sólo de esta manera se justifica la gran pérdida de capacidad antes de la rotura.



	1°	2°	3°	4°
Tamaño buque	pequeño	mediano	grande	pequeño
Estimación de velocidad	lento	muy lento	moderada	rapida
Rango de trabajo (Tns)	5-10	5-10	45-55	25-55
Esfuerzo máximo (Tns)	35	35	90	130

5. CONCLUSIONES

5.1. Las líneas de remolque que se emplean en el puerto de Barcelona están formadas por cables de acero y trenzados textiles sintéticos de gran capacidad portante (calabrote). El calabrote es un elemento fundamental para absorber los tirones y los efectos dinámicos que aparecen en las operaciones de remolcado.

5.2. Según la certificación de la autoridad portuaria el tiro del remolcador no supera los 40Tn. Por consiguiente y suponiendo un factor de seguridad de 2.5, las cargas máximas de trabajo serían de 100 Ton. En las pruebas realizadas se ha utilizado un calabrote que tiene una certificación ligeramente superior 100 Tn y unos cables con certificación 135 Tn. Por consiguiente el factor de seguridad se sitúa en el rango de los valores que se emplean en otros puertos europeos.

5.3. Durante las pruebas realizadas se obtuvo que en un calabrote con dos meses de uso la capacidad última fuera de 75 Tn. Por consiguiente, la utilización y reutilización del calabrote disminuyó de manera apreciable su capacidad portante y de forma análoga su factor de seguridad se vio disminuido en un 25%. El trenzado presentó algunas particularidades morfológicas como la pérdida de sección transversal y el endurecimiento del trenzado en la zona cercana a la rotura. Asimismo, la rotura se realizó de forma súbita y comprendiendo todas las fibras del alma del trenzado, no existió pues una rotura fibra a fibra sino un comportamiento global.

5.4. Es evidente que el estrangulamiento provoca un aumento de la tensión en las fibras

centrales por aplastamiento. Por consiguiente, las almas sufren más y rompen antes, pero el rango de valores obtenidos en la disminución de la capacidad portante no puede justificarse sólo por la variación morfológica del trenzado. En general, un aumento de compacidad representa mayor capacidad portante por los estados triaxiales de tensiones en el material.

5.5. En otras pruebas el trenzado textil con un mes de uso rompió a valores superiores a la certificación original. En este caso el factor de seguridad para el trenzado textil subió hasta 3, valor superior al del cable de acero. En este caso el comportamiento del material textil fue excesivamente bueno de manera que el riesgo de rotura se situaba en el cable de acero y por lo tanto, ya no cumplía con su función. Es posible que en un primer momento, los cambios morfológicos aumenten la capacidad portante, pero que con posterioridad se pierda dicha virtud por efecto de la degradación de los materiales por fatiga.

5.6. A partir de las pruebas remolcador-buque se obtuvieron valores de carga reales y se ha observado que son superiores a los esperados en el rango de la seguridad. Así, se llegó a esfuerzos de pico de hasta 130 Tn, superiores a la certificación de los componentes. Dichas cargas aparecen de forma cíclica por efecto de los tirones del remolcador, el estado de la mar, el buque remolcado, etc. Por consiguiente, la seguridad de la línea está amenazada y sería necesario un estudio más detallado para evaluar los efectos de fatiga.



6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa SAR Remolcadores su apoyo en la realización de las pruebas.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. IMO International Maritime Organization. *Guidelines for safe ocean towing* (1998).
2. OCIMF Oil Companies International Marine Forum. Potential hazards associated with

- request for additional mooring lines by terminal operators (1997).
3. "La vanguardia". Spanish newspaper. 9 June (1998).
 4. Lloyd, J.M.R. *Harbour tugs – towline safety factors*. ITS2000, 16th International tug & salvage convention and exhibition. Jersey, (2000).
 5. Hara, S. and Yamakawa, K. *On the dynamic towline tension during towing*. Proceedings of Offshore and Polar Conference, Vol. II, (1994).
 6. Hearle, J.W.S., Hobbs, R.E. and Noone, P. *Axial compression and fatigue in polymer fibre ropes*. Technical paper of Tension Technology International. (1997).
 7. Hearle, J.W.S., Burgoyne, C.J. and Hobbs, R.E. *Fatigue and length effects in fibre ropes*. IABSE Reports (1992).
 8. Hobbs, R.E. and Burgoyne, C. *Bending fatigue of high-strength fibre ropes*. Int. J. of Fatigue, Vol. 13, pp. 174-180 (1991).
 9. Hooker, J. *Latest synthetic rope developments in the towage industry*. ITS2000, 16th International tug & salvage convention and exhibition. Jersey, (2000).
 10. Lee, M.Y. and Grove, T. *Use of synthetic ropes in deepwater moorings: ABS guidance notes*. Proceedings Oceans'99. (1999).
 11. Sack, P. and Schuetzner, K. *Use of high modulus fibre ropes in large scale towed marine applications*. Proceedings Oceans'99 (1999).