

CASO BT MIMOSA, IDEAS PRELIMINARES SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LAS AMARRAS

Jaime Letelier Montenegro*

Resumen

El derrame de petróleo por el BT Mimosa el 24 de septiembre de 2014 en la bahía de Quintero, incita a analizar las amarras bajo la capacidad de su absorción de energía. Por espías y estachas reconocemos los elementos usados para el amarre de los buques y artefactos navales. Lo que sigue, pretende justificar el pensamiento del autor respecto del comportamiento de estos elementos de amarre, lo que se somete a la discusión de los lectores, sus comentarios y correcciones si las tuvieran.

Palabras clave: Amarras; espías de amarre; tensión; elongación.

Las sociedades de clasificación de naves determinan la maniobra de amarre y fondeo mediante cálculo del Numeral de Equipo y en función de éste, están tabulados: la masa y número de las anclas proeles; longitud y diámetros de la cadena según el grado del acero; la longitud y carga de ruptura del remolque; y la longitud, número espías de amarre y su carga de ruptura. (Por ejemplo, 1 ABS Part 3, Ch 5, Sec 1 / LRS Part 1, Ch 2, Sec 2). La ecuación del Numeral de Equipo considera al buque temporalmente en puerto o en aguas protegidas bajo condiciones ambientales extremas de viento 25 m/s (48,6 nudos) y corriente de 2,5 m/s (4,9 nudos); para el fondeo, contempla filar cadena entre 6 a 10 veces la profundidad. Bajo condiciones ambientales más severas, será necesario ejecutar su diseño.

Seleccionamos las espías básicamente por su carga de ruptura, la que ponderada (dividida) por el factor de seguridad, establecemos la Carga Segura de Trabajo SWL. Intuimos, pero sin cuantificar su comportamiento elástico y su capacidad de absorción de energía. Así, distinguimos dos tipos de solicitaciones sobre la espía, una estática y otra dinámica. Sin esta distinción, no podríamos explicarnos el por qué del corte de la espía entre una bita y el buque, cuando éste (el buque) toma viada merced al tiro del remolcador a través de su cabo de remolque, cuya resistencia casi siempre es inferior a la de la espía y no se corta. También sabemos que mientras más larga es la espía mayor será su capacidad de absorción de energía, pero también intuimos que, si la espía estaba inicialmente en banda, el camino recorrido para templarla será mayor; y por tanto, la velocidad alcanzada por el tiro del remolcador también será mayor.

Repaso de Física

Corriendo el riesgo de repetir lo ya conocido, recordemos de la física respecto a trabajo y energía. Supongamos que tenemos sobre el primer piso un balde pesado de masa M amarrado a un cabo

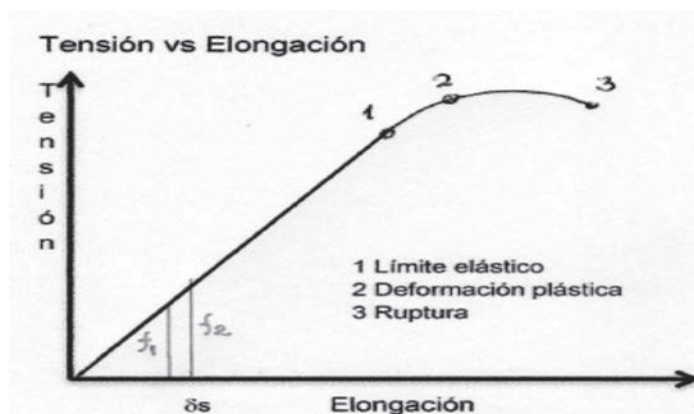
* Capitán de Navío, Ingeniero Naval con mención en Arquitectura (Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, España). Ingeniero Politécnico Militar (APM). Antiguo Colaborador de la Revista de Marina desde 2015. (jaimeletelier@vtr.net).

que llega al segundo piso y lo queremos subir; para ello halamos el cabo, aplicamos una fuerza constante y subimos el balde una altura h , efectuamos un trabajo. Cuantificamos el trabajo realizado como el producto de la masa M en kg, por la aceleración de gravedad g en m/s^2 y, multiplicado por la altura h en metros y tendremos el trabajo realizado igual a $M \cdot g \cdot h$ [Newton – metros]; (la unidad N-m se llama Joule). Si mantenemos colgado el balde, éste tendrá una energía potencial igual a dicho trabajo y si lo dejamos caer, llegará al piso con una velocidad v dependiente de la altura h y con una energía cinética igual a $1/2 Mv^2$.

Continuemos con nuestras suposiciones; arriemos en banda el balde y separemos en dos los efectos del trabajo sobre el cabo; el primero estático que será el peso del balde por la deformación elástica del cabo y el segundo por la energía cinética del balde al término de su carrera de caída cuando recorrió la altura h ; si la suma del trabajo de deformación del cabo más la energía cinética del balde por la caída, es superior al área debajo de la curva Fuerza vs elongación del cabo, éste se cortará. Más adelante justificaré esto del área bajo la curva.

Tracción vs elongación, trabajo y energía

Veamos ahora qué pasa cuando la fuerza no es constante, por ejemplo, un resorte, donde la fuerza es directamente proporcional a la elongación producida ($F = k \cdot x$). Imaginemos un resorte, uno de sus extremos empotrado (anclado), el otro, libre del que podemos tirar. Sometamos a tracción el resorte, ejercemos una fuerza sobre él y notamos que se estira. El alargamiento dependerá de la intensidad de la fuerza que apliquemos. Si relajamos la fuerza y la eliminamos notaremos



que el resorte vuelve a su dimensión original, devolviendo la energía que acumuló. El gráfico que sigue pretende ilustrar su comportamiento, a mayor elongación mayor fuerza de tracción; la fuerza no es constante como con el balde. La fuerza al inicio de δx es (f_1) y la final, (f_2); así la correspondiente al intervalo δx será la media de ambas fuerzas y el trabajo efectuado será $1/2(f_1+f_2) \cdot \delta x$ y esto es el área correspondiente y,

por lo tanto, la suma de todas estas áreas pequeñas darán el trabajo total efectuado desde el resorte sin carga hasta que éste haya sido alargado en x metros y eso es el área del triángulo ($1/2 F \cdot x$). Si reemplazamos F por $k \cdot x$, tendremos que el trabajo será: $1/2 \cdot x \cdot k \cdot x = 1/2 \cdot k \cdot x^2$.

Características de una espía nylon

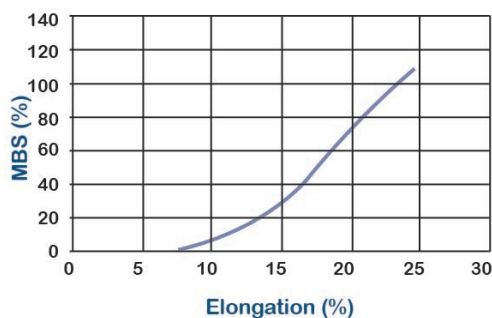
Las figuras que siguen han sido copiadas del catálogo de *CSL Marine* y corresponden al ensayo de tracción y ruptura de las espías nylon tipo "2 in 1", en condición seca y mojada. Estas curvas ilustran la tracción vs elongación para cada condición. En las ordenadas la tracción está en porcentajes de la carga de ruptura, al 100% para la espía seca y 75% de aquella, para la mojada. En las abscisas la elongación está expresada en porcentaje de la longitud de la espía. Vemos que las pendientes de las curvas no son constantes como en el caso del resorte. La superposición de ambas curvas; espía seca sobre la mojada, vemos que sus líneas coinciden, sólo que las ordenadas de la seca

corresponden al 100% de su carga de ruptura; en la mojada, el 100% corresponde al 75% de la carga de ruptura de la seca. Las abscisas tienen los mismos valores de porcentaje del largo de la espía.

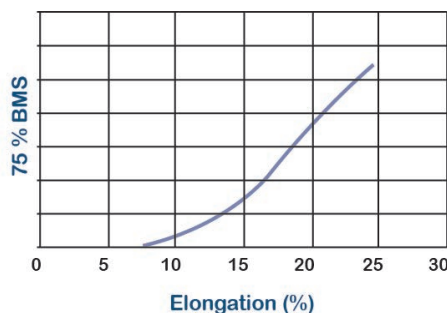
■ **Ejemplo de espía nylon "2 in 1" de 15 pulgadas de mena**

Su carga de ruptura mínima es 308 toneladas y la promedio 370. En lo que sigue determinaremos la tabla de puntos del ensayo de la espía mojada en la que su carga de ruptura será el 75% de 308 toneladas y su largo inicial de 50 metros; buscaremos la ecuación Tensión vs Elongación y, calcularemos el trabajo de elongación que será igual al área bajo la curva. La elección de espía mojada la he hecho bajo un punto de vista conservador y sin tener clara su definición. Hay autores que señalan que las espías mojadas tienen el mismo y aún un mejor comportamiento que las secas.

DRY BREAKING TEST



WET BREAKING TEST AT 75% MBS



■ **Aplicación de las curvas para una espía tipo**

"2 in 1" de 15 pulgadas de mena y 50 metros de longitud inicial

Las tablas y gráficos que siguen representan las curvas Elongación vs Tensión para la misma espía seca y mojada de 50 metros.

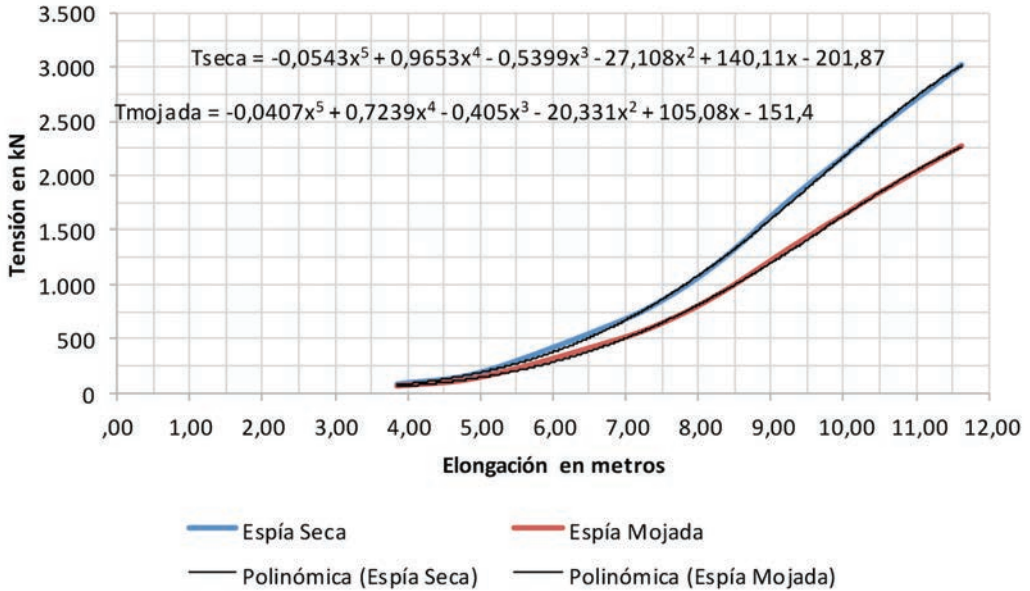
Espía seca; MBS (Carga Mínima de Ruptura): 308 toneladas = 3.020,25 kN

Espía mojada; MBS (Carga Mínima de Ruptura): 231 toneladas = 2.265,19 kN

■ **Tabla de Puntos adimensional.**

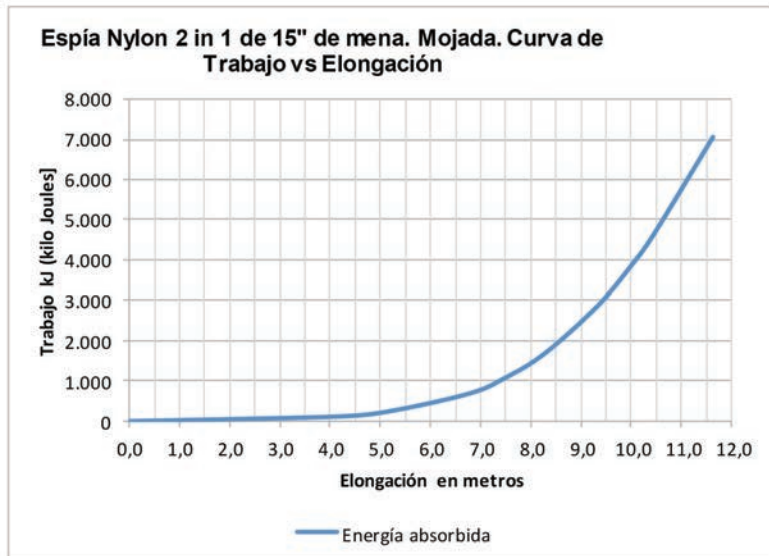
Elongación %	Tensión %	Elongación m	Espía seca Tensión kN	Espía mojada Tensión kN
0,0	0,0	0	0	0
7,7	2,4	3,850	72	54
10,0	6,0	5,000	181	136
13,5	20,0	6,740	604	453
15,0	28,0	7,500	846	634
16,6	40,0	8,295	1.208	906
18,7	60,0	9,335	1.812	1.359
20,0	71,8	10,000	2.170	1.627
20,9	80,0	10,445	2.416	1.812
23,3	100,0	11,630	3.020	2.265

Espías Nylon 2 in 1 de 15" de mena. Condiciones seca y mojada. Curvas de Tensión vs Elongación



Las ecuaciones de Tensión vs Elongación, para ambas curvas son válidas sólo en el rango de 3,85 a 11,63 metros, como lo demuestran las superposiciones de las polinómicas correspondientes. Así para el cálculo del trabajo de deformación o de la energía absorbida (el área bajo la curva) será la integral entre $x = 3,85$ a x metros, más el área del triángulo para $x = 0$ y $x = 3,85$ m y $T = 72$ y 54 kN para la espía seca y la mojada respectivamente; esto por considerar que en esa región de $0 \leq x \leq 3.85$ m la variación de la Tensión es lineal.

Elongación metros	Trabajo kJ
0,0	0
3,9	104
5,0	209
6,7	676
7,5	1.085
8,3	1.704
9,3	2.872
10,0	3.858
10,4	4.626
11,6	7.061



El gráfico y tabla muestran la elongación y el trabajo / energía absorbida por la espía mojada, por asumir conservadoramente que ésta representa mejor de la realidad. Resumiendo, con la información de las espías, puedo concluir: que la elongación de ruptura se produce alrededor del 23% del largo de la espía; que la carga de ruptura es de 2.265 kN y; que el trabajo de ruptura o la energía absorbida de ruptura es de 7.061 kJoules. Tener presente que este resultado es para un largo inicial de espía de 50 metros y del levantamiento de los gráficos del fabricante.

Apliquemos lo que conocemos

■ Caso de espía sometida a Tracción a punto fijo, sin fuerzas dinámicas.

Mientras la fuerza de tracción sea inferior a la de ruptura no habrá colapso; si se ha excedido el límite elástico del material, podrá resultar una deformación permanente y aumento de la longitud original de la espía. $T < \text{Tensión ruptura}$

■ Caso de espía sometida a cargas dinámicas

El movimiento está compuesto por traslación y giro, considerémoslo sólo en el plano horizontal. Sabemos determinar la energía que puede absorber la espía; ésta debe ser inferior a la energía cinética del buque que se pretende arrestar más el trabajo estático por el tiro del remolcador.

➤ Entonces tendremos:

$$E_c = 1/2 (M+m) \cdot V^2 + 1/2 I_{zz} \cdot \omega^2 \text{ [energía cinética]}$$

τ trabajo estático = $T \cdot \epsilon$; donde ϵ es la elongación estática por el Tiro del remolcador.

En condiciones extremas de solicitud de la espía, antes del colapso tendrá que cumplirse $E_c + \tau \leq \psi$; donde ψ es la máxima energía absorbida por la espía a la ruptura; igual al área bajo la curva tracción vs elongación.

A modo de ejemplo, empleando el símil del balde arriado en banda y apliquémoslo al caso de un buque imaginario, con una espía pasada en banda a una bita bajo el tiro de un remolcador, en condiciones ambientales de mar y viento calma. El tiro del remolcador le imprimirá una velocidad al buque que dependerá de la distancia navegada y estará dada por la ecuación:

$$(M+m) \cdot dv/dt = T - R_r$$

Sean:

M la masa del buque más agua arrastrada.

m la masa del remolcador.

I_{zz} el momento polar de inercia del buque.

λ_{zz} radio polar de inercia.

V la velocidad máxima alcanzada por el tren buque y remolcador.

ϕ el ángulo de giro (guiñada) del buque.

t el tiempo de guiñada.

ω la velocidad angular media de guiñada.

E_c la energía cinética del tren.

τ el trabajo estático de la espía.

LBP eslora entre perpendiculares del buque.

T la fuerza de tiro del remolcador.

L el largo de la espía, que es igual a la distancia que recorre el buque por el tiro del remolcador cuando ésta está en banda y perpendicular a la bita.

dV/dt , la aceleración de las masas resultante del tiro del remolcador

R_r la resistencia hidrodinámica del buque, la friccional R_F más formación de ola R_o .

➤ Velocidad del tren buque y remolcador:

Partiendo de: $(M+m) \cdot dV/dt = T - R_T$;

Tenemos: $(M+m)VdV = TdL - R_T dL$, y finalmente, $1/2(M+m)V^2 = (T - R_T) \cdot L$

Respecto a la resistencia R_T a muy bajas velocidades, no fui capaz de encontrar una expresión que permita calcularla. Sin embargo, me aventuré a estimar una expresión en base a la resistencia friccional, que resulta muy pequeña más una pseudo resistencia por formación de ola en base a la sección transversal del buque.

$$R_T = 91,191V^2 + 0,1448V \text{ kN}$$

Nos queda la ecuación de segundo grado:

$$1/2 (M+m)V^2 + 91,191LV^2 + 0,1448V = TL$$

Reemplazando valores de T , M , m y L , tabulados abajo, tendremos:

$$29.709,55V^2 + 0,1448V = 6.865$$

$$V = 0,4807 \text{ m/s o } 0,934 \text{ nudos}$$

Considerando la incertidumbre en el valor de R_T y poniéndonos el lado conservador en la ecuación $1/2(M+m) \cdot V^2 = (T - R_T) \cdot L$, eliminemos R_T y reemplazando valores tendremos:

$$25.150V_0^2 = 6.865;$$

$V_0 = 0,523 \text{ m/s o } 1,016 \text{ nudos}$ que representa un valor mayor que el real porque no considera la resistencia hidrodinámica del buque remolcado.

➤ Velocidad impresa por el tiro al término de recorrer la distancia L

T	137,3	kN
M	50.000	ton
m	300	ton
L	50	m
V_0	0,523-1,016	m/s - nudos
V	0,481-0,934	m/s - nudos

➤ Energía cinética

Energía cinética de traslación		
M	50.000	ton
m	300	ton
V	0,523	m/s
V	1,016	nudos
E_{Ctrans}	6.838	kJ
E_{Ctotal}	7.533	kJ

Energía cinética de guiñada		
ϕ guiñada	20	grados
ϕ guiñada	0,349	radianes
t	120	s
ω	0,00290888	rad/s
λ_{zz}/L	0,261	-
LBP	219,7	m
I_{zz}	164.254.850	ton-m ²
E_C guiñada	694.9	kJ

➤ Energía estática:

Trabajo sobre la espía por la tracción del remolcador de 137,3 kN (14 ton),

Elongación metros	Tensión kN	Trabajo kJ
4,971	137,3	205

➤ Energía total = 7.738 kJ

El cálculo efectuado resulta que la energía total (7.738 kJ) supera el trabajo máximo de la espía única (7.061 kJ). Manteniendo la energía cinética por la guiñada y la del tiro del remolcador, se determina que la velocidad del tren (buque y remolcador) que iguala el trabajo máximo de la espía única (7.061 kJ) sería de 0,503 m/s o 0,978 nudos.

Consideraciones

He querido plantear el tema para responderme a mí mismo cómo habría abordado el comportamiento de las espías en el caso del accidente del BT *Mimoso*. Estoy consciente que lo expuesto es limitado y simplificado; por ello partí pidiendo a los lectores sus opiniones y correcciones.

Proposición

En el caso BT *Mimoso* (derrame en Quintero), será de alto interés analizar en su oportunidad, el comportamiento de las espías, confirmando con el fabricante las capacidades sus características, la definición de cuándo debe considerarse espía seca y mojada y, a la luz de los datos reales obtenidos del registro de las condiciones ambientales y movimientos del buque, determinar las sollicitaciones a que fueron sometidas.

NYLON_{2IN1}

DOUBLE BRAIDED NYLON

<i>Circunference at load</i>	<i>Nominal diameter</i>	<i>Nominal mass at load</i>	<i>Minimum breaking strenght</i>	<i>Average breaking strenght</i>
Inches	mm	kg/100m	tons	tons
6	48	143	50	59
7	56	195	68	89
8	64	255	88	104
9	72	322	112	132
10	80	398	138	165
11	88	482	166	200
12	96	573	198	238
13	104	673	231	276
14	112	780	268	324
15	120	893	308	370
16	128	1020	350	420
17	136	1155	396	475
18	144	1290	443	530
19	152	1447	495	588
20	160	1603	547	648
21	168	1760	599	720
22	176	1937	660	783
23	184	2113	721	856
24	192	2290	782	938
25	200	2493	849	1007
26	208	2697	917	1089
27	216	2900	984	1180
28	224	3127	1061	1259
29	232	3353	1137	1350
30	240	3580	1213	1455
31	248	3823	1298	1540
32	256	4065	1382	1641
33	264	4308	1467	1743

BIBLIOGRAFÍA

1. Catálogo de CSL marine (Cordoaria Sao Lopoldo Original)
2. S.Timoshenko - Resistencia de Materiales Tomo I. Duodécima edición. Espasa - Calpe S.A. Madrid 1970.