



GUÍA DE LA IALA

1066

DISEÑO DE LOS AMARRES DE AYUDAS FLOTANTES A LA NAVEGACIÓN

Edición 1.1

Junio de 2017



Puertos del Estado



REVISIÓN DEL DOCUMENTO

Las revisiones realizadas al documento de la IALA se anotarán en el siguiente cuadro antes de la puesta en circulación de un documento revisado.

Fecha	Página / Apartado revisado	Motivo de revisión
Mayo de 2009	1ª edición	
Junio de 2017	3.3.1.2.1	Modificación de la fórmula

La revisión de la traducción de este documento ha sido realizada por el grupo de trabajo de Puertos del Estado en el que han participado:

*Luis Martínez (Autoridad Portuaria de Vigo);
Enrique Abati (Autoridad Portuaria de Marín);
Juan Manuel Vidal (Autoridad Portuaria de Gijón);
Carlos Calvo (Autoridad Portuaria de Santander);
Cristina García-Capelo (Autoridad Portuaria de Bilbao);
José Luis Núñez (Autoridad Portuaria de Pasajes);
Juan Antonio Torres (Autoridad Portuaria de Huelva);*

*Septimio Andrés (Autoridad Portuaria de Sevilla);
Germán Gamarro (Autoridad Portuaria de Algeciras);
Santiago Tortosa (Autoridad Portuaria de Ceuta);
Jaime Arenas (Autoridad Portuaria de Baleares);
Antonio Cebrián y Guillermo Segador (Autoridad Portuaria de Barcelona);
José Carlos Díez (Puertos del Estado).*

Coordinación de la edición en español y edición final:

José Carlos Díez (Puertos del Estado)

NOTA: Puertos del Estado no se responsabiliza de los errores de interpretación que puedan producirse por terceros en el uso del contenido de este documento, que corresponde a una traducción del documento original de la Asociación Internacional de Ayudas a la Navegación Marítima y Autoridades de Faros (IALA) denominado según aparece en la carátula.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	7
2. CONSIDERACIONES GENERALES	7
3. AMARRES DE CADENA	7
3.1. Proceso de diseño para un nuevo amarre	8
3.1.1. Datos necesarios	8
3.1.2. Proceso de cálculo	9
3.2. Varias secciones del amarre	9
3.2.1. Cadena de cola	10
3.2.2. Anclaje en forma de Y o pata de gallo	10
3.2.3. Cadena suspendida	10
3.2.4. Cadena de borneo o de roce	10
3.2.5. Cadena durmiente o de fondo	11
3.2.6. Radio de borneo	11
3.2.7. Muerto	11
3.3. Diseño del amarre	11
3.3.1. Tipos de fondeo	12
3.3.2. Peso del muerto	19
3.3.3. Muertos enterrados	20
3.4. Componentes del sistema de fondeo con cadena	20
3.4.1. Cadena	20
3.4.2. Amarre en Y o pata de gallo	22
3.4.3. Grilletes	22
3.4.4. Eslabones giratorios	26
3.4.5. Muertos	26
3.5. Desgaste y corrosión de amarres	28
3.5.1. Corrosión	28
3.5.2. Desgaste	28
3.6. Vida útil	29
4. AMARRES DE CABO	29
4.1. Amarres de boya de cabo	29
4.2. Diseño del amarre	30
4.3. Tamaño del cabo	30
4.4. Fabricación del cabo	30
4.5. Tipos de fibra	31
4.5.1. Nylon	31
4.5.2. Poliéster	31
4.5.3. Polipropileno	32
4.5.4. Fibras avanzadas	32
4.5.5. Construcción mixta	32



ÍNDICE DE CONTENIDOS

4.6.	Terminaciones de cabos	32
4.6.1.	Guardacabos.....	32
4.6.2.	Empalmes	33
4.6.3.	Amarres híbridos de cable/cadena ("amarres compuestos").....	33
4.6.4.	Fondeo con las patas en tensión	33
4.7.	Manejo de cabos de amarre	33
4.7.1.	Utilización	33
4.7.2.	Recuperación.....	34
4.8.	Seguridad	34
5.	AMARRES ELÁSTICOS.....	34
5.1.	Introducción.....	34
5.2.	Construcción de amarres elásticos	35
5.3.	Diseño de amarres elásticos	35
5.4.	Manejo.....	35
5.5.	Ventajas	35
6.	EJEMPLOS DE AMARRES FLUVIALES ESPECIALES	36
6.1.	Alemania	36
6.1.1.	Boyas ancladas en el lecho del Río Rin	36
6.2.	Los Países Bajos (Holanda).....	37
6.2.1.	Amarre con anclas en el Rin	37
7.	ACRÓNIMOS	38
ANEXO A	COEFICIENTE DE ARRASTRE.....	¡Error! Marcador no definido.
ANNEX B	COMPARATIVA DE CARGAS EN EL AMARRE DE UNA BOYA FONDEADA CON AMARRE ELÁSTICO O DE CADENA	¡Error! Marcador no definido.2
ANEXO C	EJEMPLO DE UN DISEÑO DE AMARRE	49
ANEXO D	DETALLES DEL MUERTO	¡Error! Marcador no definido.4
ANEXO E	DETALLES DEL SISTEMA DE AMARRE CON CABO UTILIZADO POR LA GUARDIA COSTERA CANADIENSE.....	59

Índice de tabla

Tabla 1	Acero típico de cadena	22
Tabla 2	Cuadro que muestra las fuerzas de remolque con el cabo.....	41
Tabla 3	Cuadro que muestra las fuerzas de remolque con la línea de elastómero.....	41
Tabla 4	Dimensiones del muerto de hormigón.....	55
Tabla 5	Dimensiones del muerto de hormigón.....	57



ÍNDICE DE CONTENIDOS

Índice de figuras

Figura 1	Amarre de boya	9
Figura 2	Fondeo intermedio.....	12
Figura 3	Reserva de flotabilidad	14
Figura 4	Amarre flojo.....	16
Figura 5	Amarre tenso.....	17
Figura 6	Cadena 4d.....	21
Figura 7	Grillete de chaveta con pasador ovalado	23
Figura 8	Grillete remachado con pasador ovalado	23
Figura 9	Grillete de perno con tuerca	24
Figura 10	Grillete de perno roscado	24
Figura 11	Grillete Kenter.....	25
Figura 12	Gancho “G” y eslabón de unión.....	25
Figura 13	Eslabón giratorio	26
Figura 14	Muerto de hormigón	27
Figura 15	Muerto de hierro fundido de 3 toneladas de Trinity House.....	27
Figura 16	Construcción de tres hebras	31
Figura 17	Construcción de múltiples trenzas.....	31
Figura 18	Construcción de trenzas.....	31
Figura 19	Comportamiento de distintos tipos de fibra bajo tracción.....	32
Figura 20	Configuración del amarre elástico.....	35
Figura 21	Tipo de boya fluvial.....	37
Figura 22	Amarre fluvial	37
Figura 23	Fuerzas al remolcar con una línea de cabo y fuerzas al remolcar con una línea de elastómero	40
Figura 24	Gráfico que muestra la resistencia de la boya al remolcarla a varias velocidades.	40
Figura 25	Un tren de olas rompientes	42
Figura 26	La fuerza horizontal ejercida sobre una boya en función del desplazamiento ΔX	43
Figura 27	La fuerza horizontal de una boya vs. el desplazamiento de la boya desde su posición de corriente cero.....	43
Figura 28	La fuerza horizontal ejercida sobre una boya cuando la golpea una ola rompiente	45
Figura 29	La fuerza horizontal ejercida sobre una boya cuando la golpea una ola rompiente.	45
Figura 30	46	
Figura 31	La fuerza horizontal ejercida sobre una boya cuando la golpea una ola rompiente.	46
Figura 32	La fuerza ejercida sobre un fondeo elástico en función de la longitud relativa.	47
Figura 33	La fuerza de amarre ejercida sobre una boya amarrada con un fondeo elástico cuando pasan olas rompientes. Longitud del cabo de elastómero: 2 cm, 8 cm, 32 cm, 1,3 m y 5,1 m	47



ÍNDICE DE CONTENIDOS

Figura 34	La fuerza de amarre ejercida sobre una boya amarrada con un fondeo elástico cuando pasan olas rompientes. Longitud del cabo de elastómero: 2 cm, 8 cm, 32 cm, 1,3 m y 5,1 m.....	48
Figura 35	Boya de nueva generación A8L.....	49
Figura 36	Tensión vertical ejercida sobre el muerto en función de la longitud de la cadena.....	51
Figura 37	Carga vertical ejercida sobre la boya	51
Figura 38	Tensión sobre la cadena	52
Figura 39	Masa del muerto	52
Figura 40	Reserva de flotabilidad.....	53
Figura 41	Muerto cuadrado de hormigón	54
Figura 42	Muerto circular de hormigón.....	56
Figura 43	Muertos de hierro fundido.....	58
Figura 44	Amarres de cabo de la Guardia Costera Canadiense para boyas de 0,5 m.....	59

Lista de ecuaciones

Ecuación 1	Cargas para fondeo intermedio causadas por el viento y la marea.....	12
Ecuación 2	Carga máxima de viento sobre una boya.....	13
Ecuación 3	Carga máxima de marea (o corriente) sobre una boya.....	13
Ecuación 4	Tamaño práctico de cadena para fondeo intermedio	13
Ecuación 5	Longitud de la cadena para los fondeos intermedios.....	14
Ecuación 6	Carga impuesta sobre una boya.....	15
Ecuación 7	Radio de borneo de fondeos de transición	15
Ecuación 8	Aumento efectivo de la masa que la cadena de fondo suma al muerto	16
Ecuación 9	Carga vertical del amarre sobre el muerto.....	18
Ecuación 10	Tamaño práctico de cadena para fondeo intermedio	18
Ecuación 11	Reserva de flotabilidad	18
Ecuación 12	Radio de borneo del amarre tenso	19
Ecuación 13	Peso mínimo del muerto.....	19
Ecuación 14	Peso del muerto para los amarres intermedios flojos	20
Ecuación 15	Estimación de la carga máxima que puede encontrarse en el caso de un muerto enterrado	20



1. INTRODUCCIÓN

Esta guía combina y sustituye el contenido técnico de tres documentos de la IALA existentes, que se han retirado:

Recomendación E-107 de la IALA sobre el Diseño de amarres normales, 1998;

Guía 1024 de la IALA sobre Amarres sintéticos, 2001;

Consejos prácticos sobre la utilización de trenes de fondeo para ayudas flotantes a la navegación, 1989.

La información se basa en las costumbres actuales de las Miembros de la IALA en el año 2009.

2. CONSIDERACIONES GENERALES

Para garantizar la seguridad de los navegantes, las autoridades de faros utilizan boyas y buques faro como señales marítimas. Los fondeos de dichas señales garantizan que se mantengan en el lugar adecuado.

El sistema de amarre ha de mantener la ayuda flotante en una posición lo suficientemente exacta para que cumpla su función como ayuda a la navegación.

El amarre es un cable flexible que conecta la ayuda a la navegación flotante a un dispositivo de anclaje.

En la mayoría de los casos, esta guía se refiere a boyas conectadas por un tramo de cable de amarre a un muerto en el fondo de mar. No obstante, los conceptos descritos podrán aplicarse igualmente a las ayudas flotantes más grandes, como los buques faro fondeados con anclas.

El diseño del amarre dependerá de:

- La profundidad del agua en el lugar de fondeo;
- La flotabilidad de la ayuda flotante;
- Las condiciones del fondo marino en el lugar;
- Las cargas a las que la señal marítima flotante se ve sometida por las acciones del oleaje, el viento, las corrientes y el hielo;
- Las cargas a las que el cable de amarre se ve sometido por las corrientes de agua;
- Las condiciones del entorno que someten el amarre al desgaste y la corrosión;
- Los medios de mantenimiento disponibles;
- La vida exigida del amarre;
- El precio.

3. AMARRES DE CADENA

El tipo de cable de amarre que más se utiliza es la cadena de acero. La cadena formará una catenaria entre la boya y el fondo marino y podrá absorber grandes cantidades de energía. Las cadenas tienen una buena resistencia al desgaste y su manejo resulta fácil y seguro con el equipamiento adecuado. Las cadenas pueden unirse con grilletes con poco impacto en su resistencia a la tracción.

Los amarres de boya suelen estar compuestos de una cadena de eslabón abierto, cuyo tamaño se establece basado en el diámetro de barra del material empleado en su fabricación, así que la cadena de amarre de la boya puede variar entre 12,5 y 50 mm. Se puede utilizar un acero aleado de poco carbón o con un nivel más elevado de carbón. Asimismo, puede emplearse un acero aleado si la mejora de su resistencia al desgaste justifica la utilización de un producto más caro.

No suelen emplearse las cadenas con eslabones de concreto para los amarres de boya por su elevado coste inicial, pero puede considerarse su utilización en casos donde su peso más elevado aporte ciertas ventajas sobre las cadenas de eslabón abierto.

No obstante, existen dos situaciones específicas en las que la utilización de las cadenas resulta problemática:

- Si se prevén amarres en aguas más profundas, a más de 60 m, es posible que un amarre de cadena pese tanto que una boya normal no puede soportar el peso de la cadena de amarre.

En estos casos, un material de peso ligero, como un cabo sintético podría servir para parte del cable de amarre. El Apartado 4 contiene información pormenorizada sobre los amarres de cabo.

- Asimismo, la utilización de los amarres de cadena convencionales podría causar problemas en aguas poco profundas, sobre todo en las zonas de rompientes.

Si la rotura del oleaje es un fenómeno frecuente en el emplazamiento de la boya, ocurriría típicamente cuando la altura de ola sea de $\frac{1}{4}$ (o más) de la profundidad del agua. En estos casos, la ola rota transmitiría gran cantidad de energía a la boya. Es posible que la cadena de amarre, que podría tener una longitud 7 veces superior a la profundidad del agua, no sea capaz de absorber las cargas tan altas generadas por una boya barrida por las olas. En estos casos la cadena podría romperse o el muerto verse arrastrado a otro lugar. La utilización de los fondeos elásticos puede ser la solución en estos casos. El Apartado 5 contiene información pormenorizada sobre los amarres de elastómero y el ANNEX B proporciona datos sobre las altas cargas a las que se ven sometidos los amarres donde existe rotura de ola.

3.1. PROCESO DE DISEÑO PARA UN NUEVO AMARRE

Antes de hacer los cálculos para el amarre, es preciso tener los datos físicos de la boya en cuestión y las condiciones ambientales del emplazamiento. Debería tenerse en cuenta qué mantenimiento va a necesitar la boya y cómo se va a llevar a cabo, porque puede que haga falta una plataforma segura para el personal de mantenimiento.

Asimismo, para tener unos cálculos más acertados, es preciso conocer el tamaño y la resistencia de la cadena de amarre disponible, información sobre los muertos disponibles y la capacidad de izado de los equipos de la maquinaria de elevación de los barcos de mantenimiento.

3.1.1. DATOS NECESARIOS

La clase y el tipo de boya a emplear dependen de las exigencias de las ayudas a la navegación en el lugar de fondeo en cuestión. Una combinación de los siguientes factores determinará el tipo o clase de boya a emplear:

- La intensidad de luz exigida;
- La altura del plano focal,
- El tamaño de las marcas diurnas y sus marcas de tope;
- Otras señales marítimas (AtoN) a llevar;
- Sistema de supervisión y control remoto;
- Todos los sistemas de energía asociados;

Es posible que haga falta tener en cuenta la precisión posicional exigida a la ayuda a la navegación a la hora de diseñar el amarre. Cuando se calculan las cargas de los amarres, puede ser preciso un cuerpo de boya más grande que el que se preveía para tener francobordo suficiente para la marca diurna o garantizar condiciones de trabajo seguras para el personal de mantenimiento.

Será necesario conocer las dimensiones de la superestructura de la boya y la marca diurna para calcular las cargas ejercidas por el viento.

Será preciso tener datos pormenorizados sobre el cuerpo de la boya y el tubo de la cola o el faldón para calcular las cargas ejercidas sobre el fondeo por la corriente o marea.

Hace falta conocer las dimensiones físicas y el desplazamiento de la boya elegida para poder calcular el francobordo bajo las condiciones máximas de carga del fondeo.

Los datos ambientales para el emplazamiento del amarre proporcionarán la información sobre las condiciones adversas o extremas de viento y marea, y las alturas máximas de las corrientes y el oleaje. Asimismo, es preciso saber en qué tipo de fondo va a asentarse el muerto.

3.1.2. PROCESO DE CÁLCULO

Pueden emplearse los datos relevantes de la boya y las fuerzas ambientales en las fórmulas para el caso de "fondeo intermedio" (con la catenaria de tangencia horizontal al muerto) para calcular las cargas sobre el fondeo, el tamaño de la cadena, la longitud de la cadena, el tamaño del muerto, el radio de borneo máximo y la reserva de flotabilidad de la boya.

Si el radio de borneo calculado no cumple con las exigencias de navegación, habrá que replantear el diseño de los amarres utilizando una cadena más pesada o realiza los cálculos con las "fórmulas de amarre tenso" para conseguir un amarre aceptable. Entonces, se puede reevaluar la idoneidad de la boya elegida calculando la nueva reserva de flotabilidad.

Si no plantea problemas el radio de borneo obtenido a partir de las "fórmulas de fondeo intermedio" (Ecuación 7), se puede investigar con las "fórmulas de amarre flojo" (Ecuación 8), para ver cómo un aumento en la longitud de la cadena puede ayudar a reducir las cargas sobre el muerto o incluso reducir el tamaño del muerto.

3.2. VARIAS SECCIONES DEL AMARRE

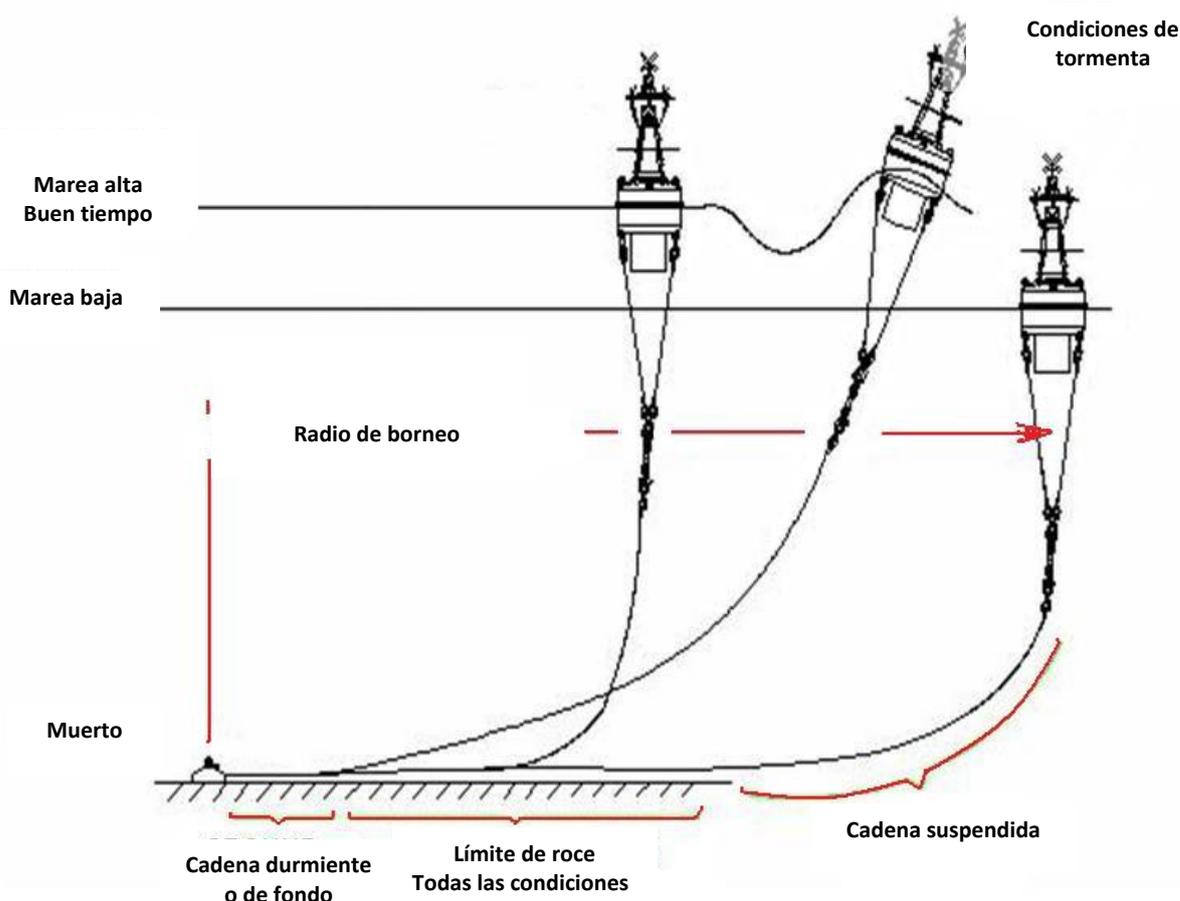


Figura 1 *Amarre de boya*

Un amarre suele estar compuesto por los siguientes componentes debidamente montados:

- Una cadena de cola o amarre en forma de Y o pata de gallo (según el método empleado para asegurar la boya);
- Cadena suspendida;
- Cadena de borneo o de roce;
- Cadena durmiente o de fondo.

3.2.1. CADENA DE COLA

En el caso de las boyas donde el amarre se sujeta únicamente a un solo asa de anclaje, la cadena de cola es el tramo de la cadena conectada a la boya. Sufre desgaste entre los eslabones al absorber gran parte de la energía generada por la boya cuando sube y baja siguiendo los movimientos de la superficie del mar. Asimismo, tiene que absorber la energía rotacional del amarre inducida por la boya girando sobre su eje. Para contrarrestar dichos efectos, se puede colocar una aleta estabilizadora en la boya en el lado opuesto al asa de amarre o perpendicular al eje de las asas de amarre en el caso de anclaje en forma de Y o pata de gallo. Otra ventaja de dicha aleta es que reduce la oscilación de la boya en el agua circulante.

Para permitir que las boyas con un solo punto de sujeción puedan permanecer en vertical en distintas corrientes y profundidades de agua y con diferentes pesos de cadena, es preciso colocar varias asas de amarre a distintas distancias del eje de la boya.

Si se trata de una boya de cola, se debe aumentar el tamaño de la cadena de cola para tener en cuenta el desgaste adicional en el punto donde la cadena frota contra la cola tubular. Para disminuir este roce, algunos servicios colocan una banda de madera de roce en la parte inferior del tubo.

3.2.2. ANCLAJE EN FORMA DE Y O PATA DE GALLO

Este anclaje está compuesto por dos tramos de cadena de la misma longitud engrilletados en lados opuestos de la boya. Las dos cadenas se unen por debajo de la boya mediante un eslabón triangular o circular, o un conjunto de engrilletado.

Por debajo de dicho punto, puede que se encuentre un eslabón giratorio o una conexión directa al próximo tramo de cadena.

La utilización de este anclaje permite que las boyas permanezcan en vertical sin necesitar varias asas de amarre en diferentes posiciones para distintas condiciones de flujo o para amarres de distintos pesos.

3.2.3. CADENA SUSPENDIDA

La cadena suspendida une la cadena de anclaje a la boya (en Y o de cola) a la cadena de borneo. El tamaño de la cadena (diámetro) y su longitud pueden variar en función de la flotabilidad de la señal marítima, la profundidad del agua y las fuerzas que se vayan a ejercer sobre la cadena. La cadena ha de tener una resistencia suficiente como para recuperar el muerto. Las cadenas se suelen suministrar en unidades estándar de la misma longitud, ya conectadas entre sí mediante grilletes.

Esta parte del amarre queda suspendida debajo de la boya y no se ve expuesta al desgaste en el fondo del mar. Por tanto, para esta parte del amarre se puede emplear un cabo sintético si es preciso tener un amarre de poco peso, como sucede normalmente en aguas profundas, o de cabo de elastómero para amarres en aguas muy someras, donde han de absorberse grandes cantidades de energía del oleaje. Se tratan tanto el cabo sintético como el cabo elástico en esta guía.

3.2.4. CADENA DE BORNEO O DE ROCE

La cadena de borneo es la parte del amarre que se encuentra en el fondo del mar o cerca del fondo, uniendo la cadena suspendida con la cadena de fondo. Debido a los efectos de las mareas, las corrientes y las condiciones del mar y el viento, la cadena de borneo se mueve constantemente en el fondo del mar. Si el fondo es arenoso esta parte del amarre va a sufrir mucho desgaste.



Esta parte del amarre suele ser la primera en sustituirse, bien con una nueva cadena o empleando una sección de cadena de otra parte del amarre.

En algunos casos se aumenta el tamaño de la cadena (diámetro) en este tramo para contrarrestar el desgaste.

3.2.5. CADENA DURMIENTE O DE FONDO

La cadena durmiente se encuentra en el fondo del mar entre la cadena de borneo y el muerto, y a veces se queda enterrado en el lecho marino.

Se puede bien aumentar la longitud de esta sección del amarre o emplear un tamaño más grande de cadena para disminuir las cargas transmitidas al muerto.

La cadena de fondo, el muerto y la capacidad de recuperación de las demás partes del amarre mantienen a la boya en su posición correcta.

Nota: En el caso de los amarres de tamaño reducido o mediano, se puede utilizar un solo tramo de cadena para la cadena suspendida, cadena de fondo y cadena de borneo. No obstante, se sigue empleando esta terminología para identificar las distintas secciones del amarre.

3.2.6. RADIO DE BORNEO

El radio de borneo es el radio del movimiento circular de la boya alrededor de la posición del muerto en situaciones de bajamar. La presencia de hielo puede aumentar el radio de borneo porque, con el aumento de la carga, la cadena podría volverse recta.

En zonas de marea o fluviales, la trayectoria del desplazamiento de la boya seguirá la del caudal.

3.2.7. MUERTO

El muerto normalmente fija el amarre al fondo del mar. La ventaja que tienen los muertos es que son capaces de resistir las cargas ejercidas desde cualquier punto. Las anclas pueden emplearse cuando la carga del amarre es siempre unidireccional. Un ancla puede resultar bastante más resistente que un muerto del mismo peso, pero solo cuando el ancla se encuentra correctamente enterrada en el fondo del mar o el río.

3.3. DISEÑO DEL AMARRE

Este apartado ofrece una metodología para el cálculo de las dimensiones de la cadena del tren de fondeo y el peso necesario del muerto. El proceso requiere conocimientos de las condiciones ambientales en la zona de fondeo, detalles sobre el régimen local del oleaje y las dimensiones de la boya que se fondeará. Hace falta tener datos sobre el tipo de lecho marino para poder determinar el peso muerto.

Las necesidades de navegación, en lo referente a un radio de borneo aceptable para una boya, podrían exigir afinar más en el diseño del fondeo.

En los lugares donde existe una preocupación sobre los daños a la fauna y la flora en el fondo del mar, puede que haga falta diseñar el amarre de manera que no tenga cadena durmiente barriendo en el fondo.

En zonas como el Mar Báltico, donde la carrera de mar es muy reducida, es frecuente el uso de los amarres tensos. Unen la boya directamente al muerto mediante una línea lo más corta posible, para que la tensión en tren de fondeo mantenga a la boya en la posición vertical.

La información obtenida a partir de la experiencia práctica con otras boyas en la zona de amarre propuesta resultará de importancia a la hora de verificar los resultados de los cálculos. En los cálculos se supone que:

- El eje de la boya sea vertical bajo la mayoría de las condiciones de corriente y viento;
- La reserva de flotabilidad de la boya totalmente equipada sea suficiente bajo las peores condiciones de viento y marea;
- El arrastre debido al flujo del agua sobre la cadena de fondeo no sea significativo en las corrientes de por debajo de 5 nudos y en profundidades de agua de menos de 40 m. Serán necesarios cálculos adicionales para emplazamientos más profundos y/o con mayores corrientes.

3.3.1. TIPOS DE FONDEO

Se presentan datos para los tres tipos de fondeo principales:

- El fondeo intermedio;
- El amarre flojo;
- El amarre tenso.

El texto que aparece a continuación contiene una descripción de estos tres tipos de fondeo y explica cómo pueden calcularse las cargas de los amarres.

3.3.1.1. El fondeo intermedio

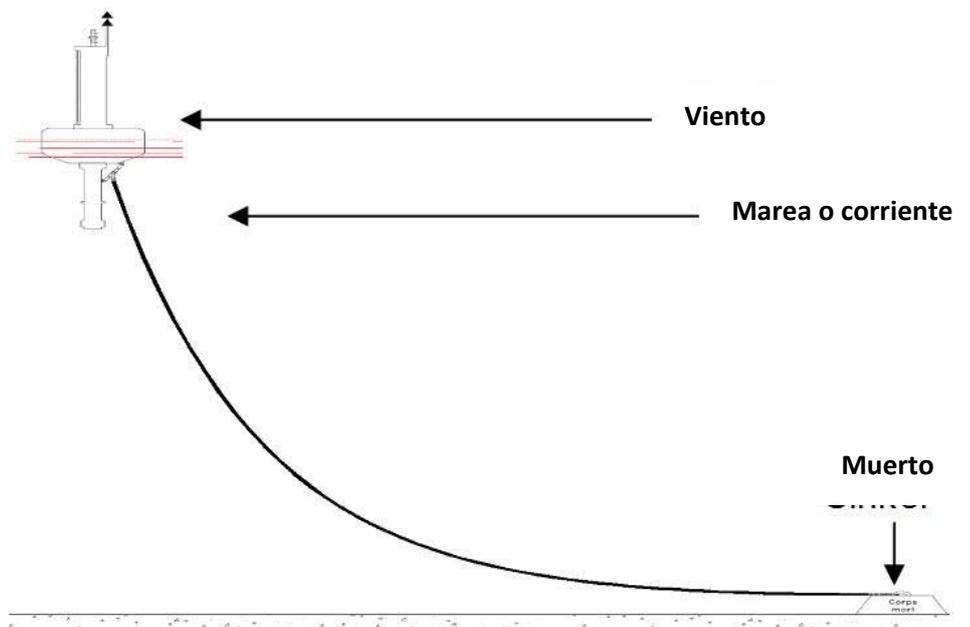


Figura 2 Fondeo intermedio

El intermedio (véase la Figura 2) es el estado de fondeo ideal, en el que la catenaria de la cadena de fondeo se encuentra en fondo del mar tangencialmente al muerto cuando la boya se ve expuesta a las máximas cargas de viento y marea (o corriente). Las cargas de amarre se transmitirán horizontalmente al muerto, que estará funcionando de la manera más eficaz posible.

3.3.1.1.1 Cargas del fondeo intermedio

Se calculan las cargas a las que la boya se ve sometida por el viento y por las mareas mediante las siguientes fórmulas:

$$T_{ho} = F_w + F_d$$

Ecuación 1 Cargas para fondeo intermedio causadas por el viento y la marea

Donde

T_{ho} es la carga horizontal provocada por el viento y las mareas, en newtons

F_w es la máxima carga del viento sobre la boya, en newtons

F_d es la máxima carga de la marea (o la corriente) sobre la boya, en newtons

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 A C_w$$

Ecuación 2 Carga máxima de viento sobre una boya

Donde:

ρ_a es la densidad del aire, en kilogramos por metro cuadrado (kg/m³)

V_w es la máxima velocidad del viento, en metros por segundo (m/s)

A es el área de la sección transversal de la boya expuesto al viento, en metros cuadrados (m²)

C_w es el coeficiente de arrastre aerodinámico de las partes de la boya expuestas a las cargas del viento.

Los valores típicos de C_w son los siguientes:

Cilindro 0,3 a 0,4

Chapa Plana 1,0

Celosía (ángulos) 1,2

Celosía (tubería) 0,3 a 0,4

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_o V_c^2 A C_d$$

Ecuación 3 Carga máxima de marea (o corriente) sobre una boya

Donde

ρ_o es la densidad del agua marina, en kg/m³

S es el área de la sección transversal de las áreas sumergidas de la boya, en m²

V_c es la máxima velocidad de la corriente o marea. en m/s

C_d es el coeficiente de arrastre hidrodinámico de las distintas secciones sumergidas de la boya

Los valores típicos de C_d son 0,55-0,65 (sin incrustaciones), según el tipo de boya. Se puede ver un ejemplo en el ANNEX A, donde los ensayos han establecido un coeficiente de arrastre de 0,55 para una boya de faldón convencional.

3.3.1.1.2 Tamaño de la cadena para el fondeo intermedio

A continuación, se podrá averiguar el tamaño práctico de la cadena, probando la resistencia y peso sumergido de varios tamaños de cadena disponibles en el mercado mediante las siguientes fórmulas:

$$R_c \geq 5(pgH + T_{ho})$$

Ecuación 4 Tamaño práctico de cadena para fondeo intermedio

Donde

R_c es la carga de prueba de la cadena, en newtons (N)

p es la masa sumergida por unidad de longitud de la cadena (la masa menos la flotabilidad de la cadena), en kg/m

H es la máxima profundidad del agua en el lugar de fondeo en metros, que debería incluir la altura de ola.

T_{ho} es la carga horizontal debido a la boya, que equivale a la carga horizontal de amarre en el muerto, en newtons

g es la aceleración debido a la gravedad, en metros por segundo cuadrado (m/s^2)

El factor de seguridad de 5 tiene en cuenta la carga cíclica constante y los efectos del oleaje a los que la cadena se ve sometida por los movimientos de la boya.

Este cálculo dará una orientación en cuanto al tamaño de cadena que se necesita y, a continuación, pueden emplear las siguientes fórmulas para establecer la longitud de la cadena de amarre.

3.3.1.1.3 Longitud de la cadena para el fondeo intermedio

$$L = \sqrt{H \left(H + \frac{2T_{ho}}{pg} \right)}$$

Ecuación 5 Longitud de la cadena para los fondeos intermedios

3.3.1.1.4 Reserva de flotabilidad para el fondeo intermedio

Para instalar una marca diurna adecuada, hace falta una reserva de flotabilidad suficiente, para garantizar que el cuerpo no se vea sumergido por el oleaje normal y, si es necesario que el personal de mantenimiento trabaje sobre la boya cuando está a flote, para que pueda constituir una plataforma de trabajo segura.

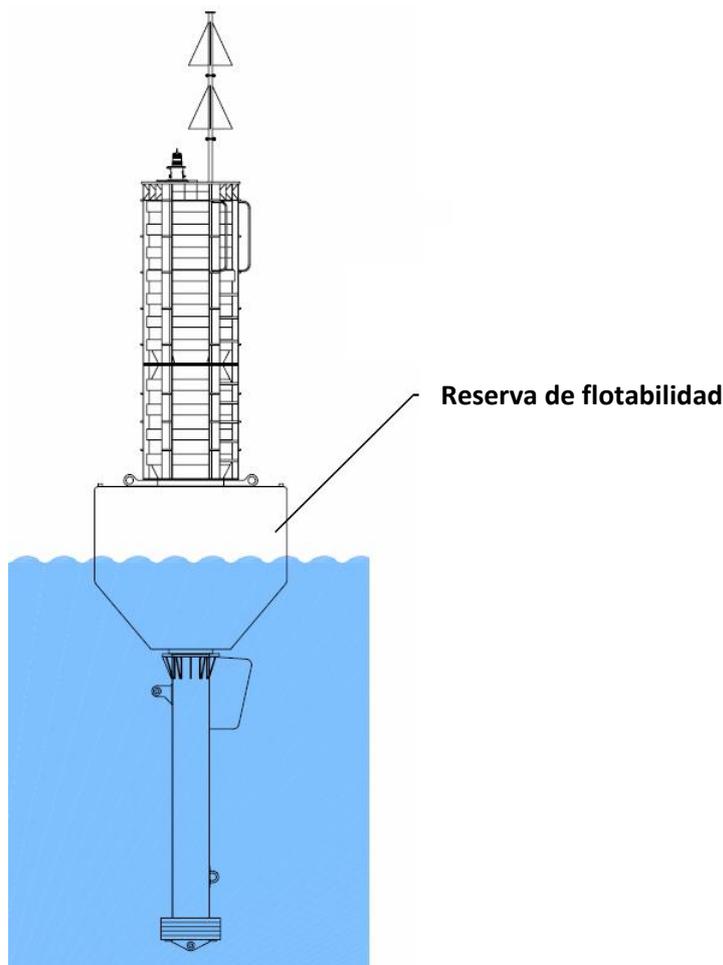


Figura 3 Reserva de flotabilidad

A continuación, se puede calcular la carga a la que la boya se verá sometida para determinar si la boya propuesta tiene suficiente reserva de flotabilidad.

$$R_b = U - \frac{M_b + m_c L}{\rho_w}$$

Ecuación 6 Carga impuesta sobre una boya

Donde

R_b es el volumen de la reserva de flotabilidad, en metros cúbicos (m^3)

U es el volumen total del flotador (m^3)

M_b es la masa de la boya (kg)

m_c es la masa sumergida por unidad de longitud de la cadena (kg/m)

L es la longitud del tramo suspendido del amarre (m)

ρ_w es la densidad del agua (kg/m^3)

3.3.1.1.5 Radio de borneo para el fondeo intermedio

A continuación, el radio de borneo (véase la Figura 1) del tren de fondeo se podrá calcular a partir de las siguientes fórmulas.

$$R_m = L - \sqrt{H_m \left(H_m + \frac{2T_{ho}}{pg} \right) + \frac{2T_{ho}}{pg} \cosh^{-1} \left(H_m + \frac{pg}{T_{ho}} + 1 \right)}$$

Ecuación 7 Radio de borneo de fondeos de transición

Donde:

R_m es el máximo radio de borneo, en metros (m)

L es la longitud total del amarre (m)

H_m es la profundidad mínima en el lugar de fondeo (m)

g es la aceleración debido a la gravedad (m/s^2)

T_{ho} es la tensión horizontal de amarre en el punto de conexión con el muerto, en newtons (N)

ρ es la masa sumergida por unidad de longitud de la cadena (la masa menos la flotabilidad de la cadena) (kg/m)

Entonces, será posible determinar si el fondeo diseñado cumple con las exigencias operacionales y de navegación.

¿Será aceptable el radio de borneo? Si la boya señala un canal navegable, es posible que haga falta reducir el radio de borneo, lo que puede conseguirse utilizando un tamaño mayor de cadena. El efecto de esta medida puede comprobarse recalculando el diseño de los fondeos con tamaños de cadena cada vez mayores.

Si resulta preciso reducir aún más el radio de borneo máximo, se puede considerar el "amarre tenso". (véase el apartado 3.3.1.3).

Asimismo, al considerar tamaños de cadena mayores, debe controlarse la reserva de flotabilidad de la boya.

Si lo que se necesita es un marcado de precisión, se puede considerar la utilización de una boya articulada, una baliza sobre pilar fijo o un amarre de dos patas.

3.3.1.2. Amarre flojo

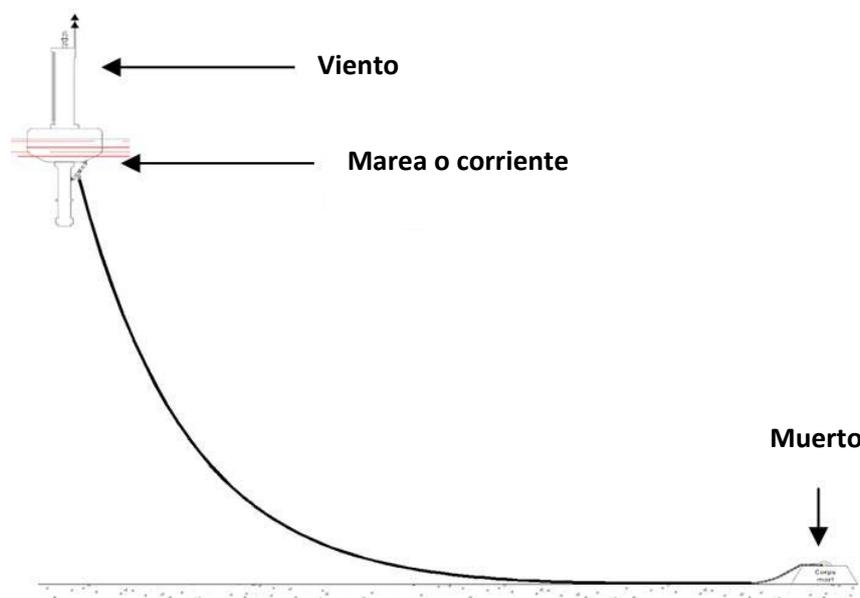


Figura 4 Amarre flojo

Se trata del tipo de amarre que más se emplea en la práctica.

Los amarres flojos, o estirados, siempre tienen parte de la cadena en el fondo del mar. Cuando la carga sobre la boya está en su punto máximo, la catenaria de la cadena de amarre tocará el fondo del mar a cierta distancia del muerto. La cadena en el fondo del mar mejora la seguridad del amarre o puede emplearse para disminuir el tamaño del muerto (véase la Figura 4).

3.3.1.2.1 Resistencia de la cadena de fondo para el amarre flojo

La siguiente fórmula evalúa el aumento efectivo de la masa que la cadena de fondo suma al muerto:

$$M_{gained} = m_c L_g \frac{\tan \phi}{K}$$

Ecuación 8 Aumento efectivo de la masa que la cadena de fondo suma al muerto

Donde

M_{gained} es el aumento efectivo de la masa del muerto proporcionado por la cadena de fondo (kg)

m_c es la masa sumergida por unidad de longitud de la cadena (la masa menos la flotabilidad de la cadena) (kg/m)

K es un coeficiente de seguridad (generalmente, igual a 1,5)

ϕ es el ángulo de rozamiento interno del fondo del mar (depende del tipo de suelo en el lugar de fondeo), 45° (0,7855 en radianes) siendo una aproximación práctica que puede emplearse en la mayoría de los casos. El ángulo de rozamiento es menor en los fondos de caliza y en algunos fondos de gravas.

L_g es la longitud del tramo de fondeo que se apoya en el fondo del mar (m)

En mar abierto, donde es aceptable un radio de borneo de la boya amplio, suele utilizarse esta disposición de fondeo. El tramo de cadena de fondo es capaz de absorber energía en condiciones meteorológicas extremas.

Si el peso del muerto para el fondeo intermedio resulta superior a la capacidad de elevación del buque de mantenimiento, otra consideración podría ser si dicho peso puede reducirse empleando una cadena de fondo larga.

3.3.1.3. Amarre tenso

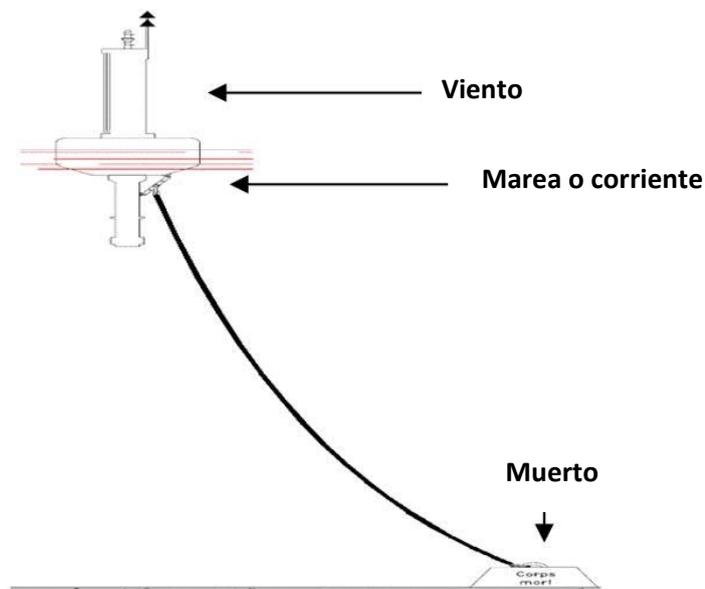


Figura 5 *Amarre tenso*

Si el radio de borneo obtenido a partir del diseño inicial del fondeo es demasiado grande para las exigencias de navegación, por ejemplo, cuando se necesita marcar los límites de los canales dragados con mucha precisión, puede que haya que considerar un amarre tenso.

Las mismas restricciones deben aplicarse si el fondo del mar en el lugar es un ecosistema importante. Por lo tanto, podría resultar necesario diseñar un fondeo tensionado para que la mayor parte del tren de fondeo quede suspendido de la boya. Así, se minimizará cualquier daño que la cadena de fondeo pueda provocar al fondo marino.

En las zonas donde el fondo del mar es rocoso y accidentado, existe la posibilidad de que la cadena de amarre quede atrapada en los afloramientos de roca. Si el amarre proyectado es intermedio o flojo, puede que parte de la cadena en el fondo del mar quede enganchada en una roca, disminuyendo así la longitud del amarre. En este caso, las cargas ejercidas sobre la cadena y la boya aumentarán, posiblemente hasta el punto de rotura. Se pueden minimizar dichos problemas diseñando el fondeo como un amarre tenso.

En el caso del amarre tenso (véase la Figura 5), cuando las cargas máximas del viento y de las mareas se ejercen sobre la boya, la cadena de amarre se une al muerto formando un ángulo. En tal caso, se verá sometido el muerto a un componente vertical de la carga del amarre, lo que implica que será necesario un muerto más grande para mantener la boya en su lugar de fondeo.

Para establecer el radio de borneo necesario en el lugar de fondeo de la boya, se pueden calcular el tamaño de la cadena y su longitud, así como el peso del muerto. Con el fin de garantizar que la flotabilidad de la boya sea suficiente para soportar este amarre en las peores condiciones ambientales, es preciso comprobar los resultados de nuevo.

Existen las siguientes fórmulas para realizar este cálculo de amarre.

3.3.1.3.1 Cargas de amarres tensos

Para la carga vertical del amarre sobre el muerto:

$$T_{vo} = \frac{pgH \sqrt{4T_{ho}^2 + (pgL)^2 - (pgH)^2}}{2\sqrt{(pgL)^2 - (pgH)^2}} - \frac{pgL}{2}$$

Ecuación 9 Carga vertical del amarre sobre el muerto

Donde:

T_{vo} es la tensión vertical del amarre en su punto de unión con el muerto (N)

T_{ho} es la tensión horizontal del amarre en su punto de unión con el muerto (N) (igual a la tensión horizontal del amarre en su punto de unión con la boya, cuando la tensión horizontal se transmite íntegramente por el amarre),

ρ es la masa sumergida por unidad de longitud de la cadena (masa menos la flotabilidad de la cadena) (kg/m)

H es la máxima profundidad del agua, incluida la altura de la ola (m)

L es la longitud del amarre (m)

3.3.1.3.2 Tamaño de cadena para amarres tensos

Para la resistencia de cadena:

$$R_c \geq 5 \left(\rho g H + \sqrt{T_{ho}^2 + T_{vo}^2} \right)$$

Ecuación 10 Tamaño práctico de cadena para fondeo intermedio

Donde:

R_c es la carga de prueba de la cadena (N)

ρ es la masa sumergida por unidad de longitud de la cadena (masa menos la flotabilidad de la cadena) (kg/m)

H es la máxima profundidad del agua en el lugar de fondeo, incluida la altura de la ola (m)

T_{ho} es la carga horizontal ejercida por la boya, que es igual a la carga horizontal de amarre en el muerto (N)

T_{vo} es la carga vertical ejercida por el peso (en el agua) de la cadena más la carga vertical ejercida sobre el muerto (N)

g es la aceleración debido a la gravedad (m/s²)

El factor de seguridad de 5 tiene en cuenta la carga cíclica constante a la que la cadena se ve sometida.

3.3.1.3.3 Reserva de flotabilidad para amarres tensos

Para la reserva de flotabilidad:

$$R_b = U - \frac{M_b + M_c L + T_{vo}}{\rho_w}$$

Ecuación 11 Reserva de flotabilidad

Donde

R_b es el volumen de la reserva de flotabilidad (m³)

U es el volumen total del flotador (m³)

M_b es la masa de la boya (kg)

m_c es la masa sumergida por unidad de longitud de la cadena (la masa menos la flotabilidad de la cadena) (kg/m)

L representa la longitud en suspensión del amarre (m)

T_{vo} es la tensión vertical del amarre en su punto de unión con el muerto (N)

g es la aceleración debido a la gravedad (m/s^2)

ρ_w es la densidad del agua (kg/m^3) (igual a $1.024 kg/m^3$ para el agua salada)

3.3.1.3.4 Radio de borneo para amarres tenso

Para el radio de borneo del amarre tenso:

Nota: Se produce el radio de borneo máximo cuando el nivel del agua está en su punto más bajo. Comprueba que el amarre permanece tenso en estas condiciones.

$$R_m = \frac{T_{ho}}{pg} \cosh^{-1} \left(\frac{pgH_m}{T_{ho}} + \frac{\sqrt{T_{ho}^2 + T_{vo}^2}}{T_{ho}} \right) - \frac{T_{ho}}{pg} \sinh^{-1} \left(\frac{T_{vo}}{T_{ho}} \right)$$

Ecuación 12 Radio de borneo del amarre tenso

Donde:

R_m es el radio de borneo (m)

H_m es la profundidad mínima en el lugar de fondeo (m)

T_{ho} es la tensión horizontal del amarre en su punto de unión con el muerto (N)

T_{vo} es la tensión vertical de amarre en su punto de unión con el muerto (N), calculada mediante la ecuación (5) en la profundidad mínima para la masa de la cadena

p es la masa sumergida por unidad de longitud de la cadena (masa menos la flotabilidad de la cadena) (kg/m)

3.3.2. PESO DEL MUERTO

Una manera muy sencilla de calcular el peso del muerto consiste en tener en cuenta solamente los efectos del rozamiento con el fondo del mar (sin tener en cuenta los efectos de "soterramiento" y "atrapamiento por rocas").

Bajo dichas hipótesis, el peso mínimo del muerto se calcula con la fórmula:

$$M \geq K \frac{T_{ho} \delta}{g(\delta - \rho_w) \tan \phi} + \frac{T_{vo}}{g}$$

Ecuación 13 Peso mínimo del muerto

Donde:

M es la masa del muerto (kg)

K es un coeficiente de seguridad (generalmente, igual a 1,5)

T_{ho} es la tensión horizontal de amarre en el punto de unión con el muerto (N)

T_{vo} es la tensión vertical del amarre en su punto de unión con el muerto (N)

δ es la densidad media del muerto (kg/m^3) (generalmente, igual a $2.400 kg/m^3$ para un muerto de hormigón armado y $7.800 kg/m^3$ para uno de hierro fundido)

g es la aceleración debido a la gravedad (m/s^2)

ρ_w es la densidad del agua (kg/m^3) (igual a $1.024 kg/m^3$ para el agua salada)

ϕ es el ángulo de rozamiento interno del fondo del mar (en función del tipo de tierra en el lugar de fondeo), 45° ($0,7855$ en radianes) es una aproximación práctica que puede emplearse en la mayoría de los casos. Un ángulo de rozamiento más bajo puede darse en el caso de ciertos fondos de caliza y gravas. La información relevante puede encontrarse en los libros de texto de la ingeniería.

3.3.2.1. Peso del muerto para amarres intermedios y flojos

En el caso de los amarres intermedios o flojos, la tensión vertical del amarre en su punto de unión con el muerto es igual a cero y, por lo tanto, se puede simplificar la relación anterior:

$$M \geq K \frac{T_{ho} \delta}{g(\delta - \rho_w) \tan \phi}$$

Ecuación 14 Peso del muerto para los amarres intermedios flojos

3.3.3. MUERTOS ENTERRADOS

Debe señalarse que los muertos a menudo acaban enterrados en la arena o en los sedimentos del fondo del mar. Para recuperar el muerto, el buque de mantenimiento tendrá que levantar la cadena de amarre y liberar el muerto del fondo del mar.

Las siguientes fórmulas empíricas proporcionan una estimación de la carga máxima que puede encontrarse:

$$H_c = 2M \frac{\delta - \rho_w}{\delta} + H_m m_c$$

Ecuación 15 Estimación de la carga máxima que puede encontrarse en el caso de un muerto enterrado

Donde:

H_c es a capacidad de izado del buque de mantenimiento (probablemente un buque balizador) en (kg)

M es la masa del muerto (kg)

δ es la densidad media del muerto (kg/m^3) (generalmente, $2.400 \text{ kg}/\text{m}^3$ para un muerto de hormigón armado y $7.800 \text{ kg}/\text{m}^3$ para uno de hierro fundido)

ρ_w es la densidad del agua (kg/m^3) (igual a $1.024 \text{ kg}/\text{m}^3$ para el agua salado),

H_m es la profundidad del agua al izar el amarre (m) (se suele tener en cuenta la máxima profundidad en el emplazamiento)

m_c es la masa sumergida por unidad de longitud de la cadena (masa menos la flotabilidad de la cadena) (kg/m)

Véase el ANNEX C: Ejemplo de los cálculos del fondeo para una de las boyas estándar del Servicio Francés.

3.4. COMPONENTES DEL SISTEMA DE FONDEO CON CADENA

Los componentes utilizados para montar un sistema de amarre o tren de fondeo son:

- Cadena;
- Grilletes;
- Eslabones giratorios;
- Muertos o anclas.

Para minimizar el desgaste y la corrosión electrolítica, es preciso que todos los componentes (el muerto y los ojos del ancla incluidos) se fabriquen con materiales de la misma calidad.

3.4.1. CADENA

El tamaño de la cadena se define por el diámetro de la barra que forma los eslabones de la cadena. No obstante, en función de los procesos locales de fabricación, las normas nacionales y las exigencias operacionales, se han determinado varias longitudes de los eslabones de cadena.

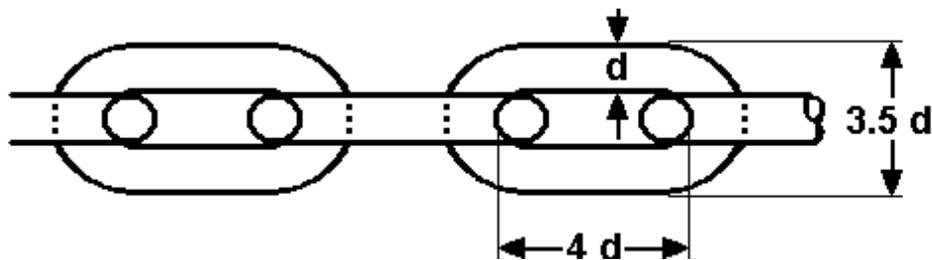


Figura 6 Cadena 4d

Las proporciones del eslabón de la cadena se definen como la relación entre el diámetro de la barra y la longitud interior del eslabón de la cadena.

Cada servicio debe definir una relación dimensional con el proveedor y el fabricante, que permitirá la utilización de sus grilletes y otras conexiones tipo para la cadena.

Unos ejemplos de las relaciones utilizadas en la actualidad son:

- Francia 3d, 4d y 5d;
- Reino Unido 4d;
- Países Bajos 5d;
- Alemania 9d.

Las cadenas de eslabones más cortos necesitan más eslabones por tramo. Pesan más y, por tanto, pueden resultar más caras, pero se manejan con mayor facilidad con un cabrestante. Sin embargo, es posible que los eslabones no tengan el tamaño suficiente como para recibir un grillete de unión, y eslabones finales alargados en cada tramo de cadena podrían ser necesarios.

En cuanto a las cadenas con eslabones más largos, es posible que no sea necesario un eslabón final alargado. En tal caso, pueden cortarse tramos largos de cadena hasta conseguir la longitud necesaria para un amarre en concreto. Es más fácil manipularlas con un gancho, lo que permite que se utilice un solo tamaño de gancho en el equipo de izado para diversos tamaños de cadena. Además, existe menor riesgo de "anudamiento".

Si se prevé emplear distintas longitudes de eslabón, se debe considerar no sólo el método utilizado para manipular la cadena, sino también las dimensiones del cabrestante que la manipula en los buques de mantenimiento.

3.4.1.1. Materiales utilizados en la fabricación de cadenas

Las cadenas se fabrican de calidades de acero que son adecuadas para crear la forma del eslabón y que pueden soldarse de manera fiable. Existen diversos tipos aceros que proporcionan distintas combinaciones de resistencia, dureza, resistencia al desgaste y precio. Un tipo de acero en particular podría tardar en desgastarse, pero no ser resistente a la corrosión, o viceversa. En general, se debe llegar a un compromiso en cuanto a la calidad del material para que minimice tanto el desgaste como la corrosión a un precio aceptable.

Han demostrado ser muy eficaces para las cadenas de amarre de boyas los aceros con un alto contenido de carbón (0,2%) y de manganeso (1,5%). Cabe señalar que los grados U de Lloyd y los grados DIN alemanes se basan en la resistencia de la cadena y no especifican un grado de acero en concreto. Por tanto, no indican el rendimiento de la cadena en cuanto a su desgaste se refiere. Se recomienda que las autoridades nacionales especifiquen qué acero debe emplearse en la fabricación de sus cadenas.

Para reducir la concentración de puntos débiles debidos a los procesos de moldeado y soldadura, así como para mejorar la resistencia de la cadena, las cadenas pueden ser tratadas térmicamente. No obstante, algunas autoridades consideran aceptable una cadena no tratada térmicamente y fabricada de un acero con un bajo contenido carbono y, por tanto, más económico.

OCuadro 1, puede verse el acero utilizado por las Autoridad de los Países Bajos, que un acero aceptable de alto rendimiento para cadenas de amarre. Se ha tratado térmicamente la cadena en este ejemplo mediante el templado y la revenida.

Tabla 1 Acero típico de cadena

Material		
	Mínimo %	Máximo %
Aluminio	0,015	0,025
Carbono	0,25	0,26
Cromo	0,20	0,30
Cobre	-	-
Manganeso	1,40	1,60
Molibdeno	0,10	1,20
Níquel	0,20	0,30
Fósforo	-	0,02
Silicio	0,20	0,35
Azufre	-	0,02
Vanadio	0,08	0,12

3.4.1.2. Acabado de la cadena

Para limitar la corrosión mientras la cadena se almacena antes de utilizarse, algunas autoridades especifican un recubrimiento protector.

3.4.1.3. Especificaciones y homologación

La especificación debe incluir información sobre el material que se empleará para la fabricación de la cadena, el tratamiento térmico, las dimensiones de la cadena acabada y las propiedades mecánicas del material y de la cadena terminada. Deberá incluir también la información sobre los procedimientos de ensayo y los procesos de certificación, para que el comprador pueda comprobar que la cadena cumple la especificación. Además, debe incluir medios de identificación para cada tramo individual de cadena.

Mediante la utilización de dicha especificación, permitirá a una autoridad adquirir cadenas de la misma calidad, que funcionarán de forma consistente cuando se pongan en servicio.

3.4.2. AMARRE EN Y O PATA DE GALLO

Una pata de gallo se compone de dos cadenas de longitud idéntica a lados opuestos de la boya. Algunos de estos amarres se diseñan para que tengan una longitud suficiente como para pasar por debajo del faldón o cola tubular de la boya, mientras que otros son más cortos y se diseñan para apoyarse contra el tubo de la cola, dando así más estabilidad a la boya. Cuando se emplean estos enganches más cortos, se suele instalar en el tubo de la cola un dispositivo para impedir que el enganche ocasione desgaste por rozamiento.

Existen varias maneras de unir las "patas" de la cadena: mediante un eslabón circular, uno triangular, una placa triangular con tres agujeros o con un solo grillete. A partir de la conexión central, pueden unirse las patas directamente a la cadena de amarre, o se puede incorporar un eslabón giratorio.

Tradicionalmente, los componentes se montan como parte del proceso de fabricación de la cadena, forjando y soldando los eslabones de conexión. A continuación, se pueden realizar ensayos sobre el conjunto y certificarlo de una manera parecida a la cadena. Si, al contrario, se montaran los componentes con grilletes *in situ*, no se podrán realizar pruebas sobre la pata de gallo completa. Además, no siempre es posible utilizar un grillete que tenga la misma resistencia que la cadena si las dimensiones de los eslabones de la cadena así lo impiden. Se suele considerar que las conexiones engrilletadas resultan menos fiables que los eslabones de cadena sometidos a todas las pruebas.

3.4.3. GRILLETES

El grillete es el dispositivo que más se emplea para unir el fondeo a la boya, así como para unir los demás componentes del fondeo.

Como mínimo, la resistencia del grillete debe ser igual a la resistencia de la cadena que une. Por lo tanto, es probable que el diámetro del arco del grillete sea mayor que el tamaño de la cadena que une. En este caso, puede ser necesario que la cadena esté provista de eslabones finales alargados para acomodar los grilletes de unión.

De manera confusa, el tamaño de un grillete puede referirse tanto al tamaño de la cadena a la que encaja como al diámetro del perno, o pasador, del grillete. Se deben consultar las normas de la zona para garantizar que los tamaños se definan correctamente.

Se utilizan los siguientes tipos de grilletes / conectores:

- Grilletes de chaveta;
- Grilletes remachados;
- Grilletes de perno con tuerca;
- Grilletes de perno roscado;
- Grillete Kenter;
- Unión de zafado rápido.

3.4.3.1. Grilletes de chaveta

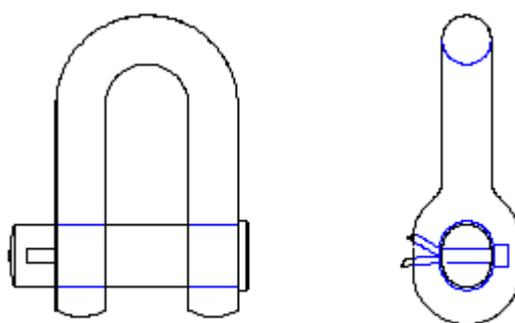


Figura 7 *Grillete de chaveta con pasador ovalado*

El grillete de chaveta es un tipo muy fiable y fácil de usar. Se puede fabricar de un tamaño y de una forma tal que se adapte a los componentes a los que conecta y tiene una chaveta para asegurar el perno o pasador. La ventaja que tiene este tipo es que la chaveta es el componente que menos tensión tiene que soportar. Sin embargo, estos grilletes no deben utilizarse en el tramo de roce del amarre, porque con los movimientos de la cadena, la chaveta podría soltarse o desgastarse.

La sección del perno, o pasador, puede ser redonda u ovalada. Es más barato fabricar los pasadores redondos, pero son propensos a girar en servicio, sometiendo a la chaveta y a los ojos del grillete al desgaste. Aunque resultan más caros, los pasadores ovalados no padecen dicho problema.

3.4.3.2. Grilletes remachados (llamados "Heat & Beat" en Estados Unidos)

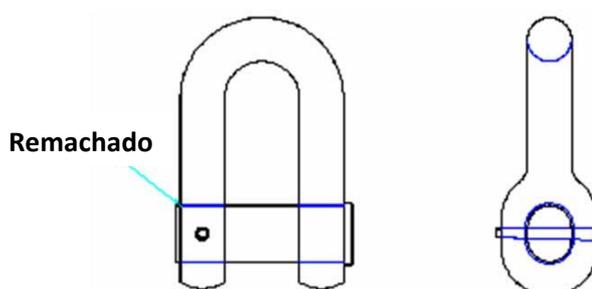


Figura 8 *Grillete remachado con pasador ovalado*

3.4.3.3. Grilletes de perno con tuerca

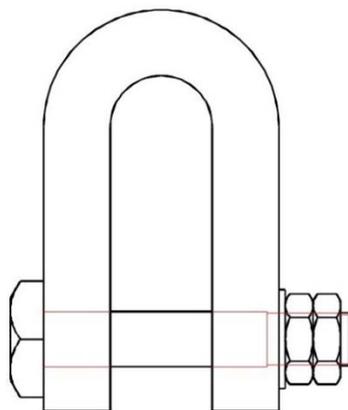


Figura 9 *Grillete de perno con tuerca*

Este tipo de grillete lleva un perno redondo, asegurado por una o dos tuercas. Si sólo se emplea una tuerca, debe asegurarse con un pasador o bulón de sujeción. A las autoridades que deciden utilizar estos grilletes les puede resultar aconsejable soldar las tuercas y los pernos en su lugar.

Un inconveniente de este grillete es que el perno redondo puede girar dentro de las asas del grillete ocasionando un desgaste rápido. Además, la tuerca puede aflojarse en servicio por la abrasión contra el fondo del mar o los movimientos de la cadena de amarre. Debido a todos estos motivos, no es recomendable utilizar este grillete en tramo de roce.

3.4.3.4. Grilletes de perno roscado

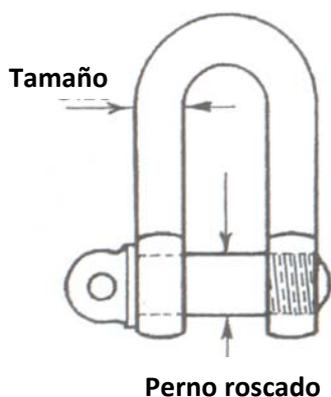


Figura 10 *Grillete de perno roscado*

No se deben utilizar estos grilletes en amarres permanentes o en la zona de roce, ya que cualquier rotación del perno del grillete resultará en el fallo del mismo.

3.4.3.5. Grilletes Kenter

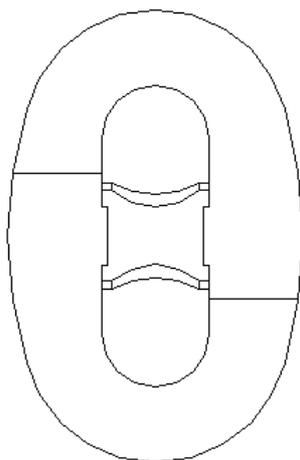


Figura 11 *Grillete Kenter*

Se emplean frecuentemente en los amarres de buques, pero no se suelen utilizar en los amarres permanentes, porque con el paso del tiempo se deshacen debido al desgaste y la corrosión.

3.4.3.6. Unión de zafado rápido

Existen muchos tipos, uno de los cuales se muestra a continuación. Si es necesario desconectar el amarre con frecuencia o rapidez, se pueden emplear cerca de la boya, donde el amarre siempre se encuentra tenso.

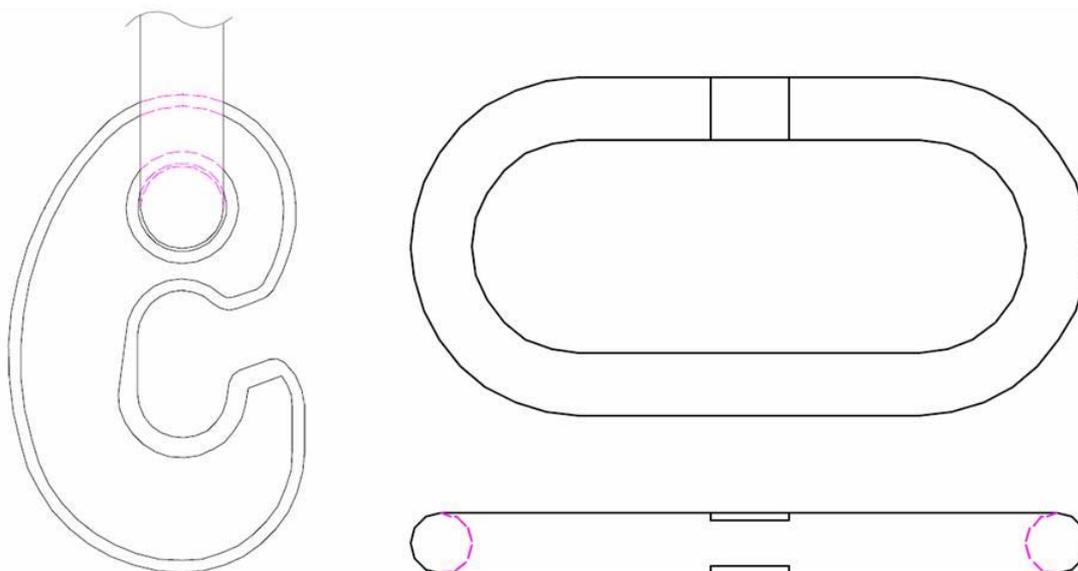


Figura 12 *Gancho "G" y eslabón de unión*

3.4.4. ESLABONES GIRATORIOS

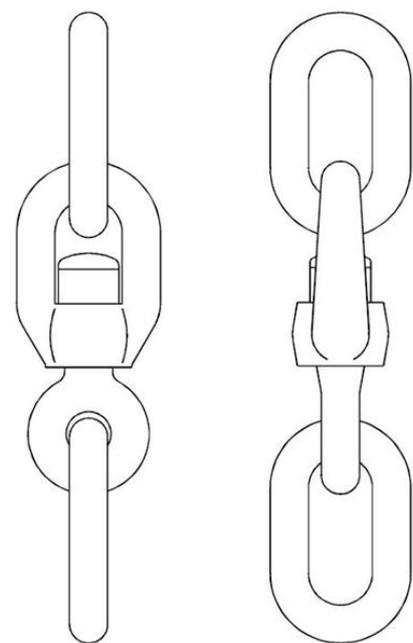


Figura 13 *Eslabón giratorio*

Un eslabón giratorio facilita la unión entre dos tramos de cadena sin que se transmita un par de torsión de un tramo al otro.

Al girar por su eje, la boya somete la cadena a un par de torsión, que puede resultar en que la cadena se anude, afectando negativamente a la flotabilidad de la boya y la eficacia del amarre. En tal caso, se pueden insertar uno o más eslabones giratorios en el amarre. Se suele colocar un eslabón giratorio entre la cadena de cola o el enganche y la cadena de ascenso.

Para asegurar que su resistencia y su vida útil sean parecidas a las de los demás componentes del amarre, la experiencia ha demostrado que es preciso supervisar y controlar con cuidado la calidad de los eslabones giratorios. Deben fabricarse del mismo material que la cadena.

Es posible que los eslabones giratorios se agarroten a consecuencia de la corrosión, el desgaste y/o una acumulación de incrustaciones marinas. Si la acumulación de incrustaciones marinas resulta excesiva, se recomienda una revisión y limpieza con regularidad.

3.4.5. MUERTOS

La experiencia ha demostrado que los muertos son capaces de mantener las boyas en sus ubicaciones designadas. No proporcionan ni la resistencia ni la capacidad de sujetar que tienen las anclas del mismo peso, pero tienen la ventaja de que proporcionan la misma resistencia independientemente del sentido de aplicación de la carga del fondeo.

Los muertos pueden fabricarse de hormigón, hierro fundido, roca o cadena usada.

Aunque la mayoría de las autoridades utilizan los muertos, en algunos casos las anclas son necesarias para resistir las altas cargas del fondeo. Por ejemplo, emplean una combinación de muertos y anclas los LANBYS (LNB) en lugares de fondeo expuestos. Asimismo, las anclas se pueden utilizar para las señales flotantes en los ríos donde el sentido de la corriente es constante. El ancla se queda enterrada en el cauce porque la carga transmitida desde la boya siempre viene en el mismo sentido.

El peso muerto efectivo será igual al peso muerto en tierra menos el peso del desplazamiento del agua.

3.4.5.1. Muertos de hormigón

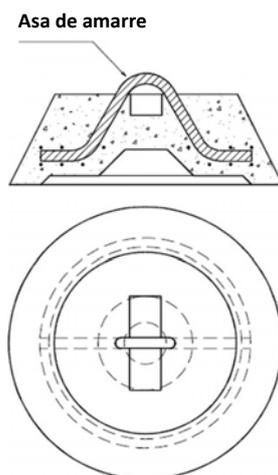


Figura 14 Muerto de hormigón

Su precio no es excesivo y su uso está muy extendido. Se fabrican echando el hormigón en un molde de forma adecuada junto con una anilla metálica embutida en el hormigón para acoplar la cadena de amarre. Pueden fabricarse los muertos de hormigón empleando mano de obra y materiales de la misma zona. No obstante, son bastante más grandes que los de hierro fundido del mismo peso sumergido y, por tanto, ocupan mucho espacio en el almacén o en la cubierta del buque balizador. Es preciso cuidar todos los aspectos de su fabricación para garantizar que no se deshagan y para que el asa de amarre no se salga. Hay que controlar con cuidado la calidad del hormigón para que tenga la densidad indicada. Se puede mejorar la densidad incorporando cadena de chatarra en el hormigón. Además, se puede añadir la hematita como material inerte para aumentar la densidad del hormigón.

Se suele fabricar la anilla metálica del muerto de acero de carbono, que ofrece una buena resistencia a la abrasión. Las barras de acero de la armadura no suelen ser aptas para las anillas de amarre.

Véase el ANNEX D para información sobre la fabricación de los muertos empleados por los servicios de los EE.UU., el Reino Unido y Francia.

3.4.5.2. Muertos de roca

Se puede hacer otro tipo de muerto empotrando una anilla de amarre, o cáncamo, en una roca o piedra grande. Pueden servir si abundan en la zona piedras densas del tamaño adecuado. No obstante, resulta muy difícil evaluar el estado de rocas o piedras aisladas y podrían romperse en servicio.

3.4.5.3. Muertos de hierro fundido

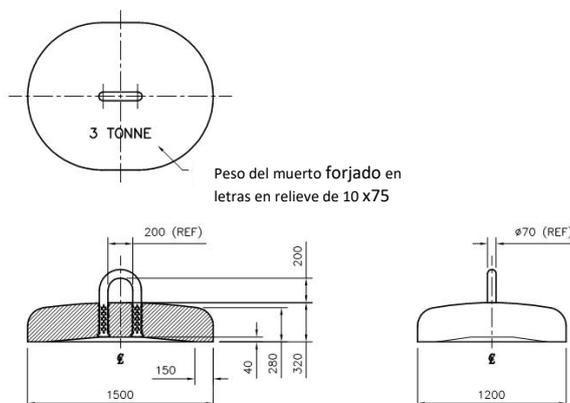


Figura 15 Muerto de hierro fundido de 3 toneladas de Trinity House



Los muertos más caros, pero los más duraderos, se fabrican de hierro fundido. Comparados con los de hormigón, su densidad es aproximadamente 3 veces superior.

Los muertos de hierro fundido son robustos y es posible reparar o sustituir el asa de amarre.

Si el amarre tiende a quedarse inundado en la arena, es más fácil extraer un muerto de hierro fundido que uno de hormigón, porque sus dimensiones son más reducidas. No obstante, si se pierde un muerto de este tipo resultará más caro sustituirlo que uno de hormigón.

Los muertos de hierro fundido existen en muchas formas. Puede ser más económico utilizar hierro fundido de chatarra, si existe en tamaños adecuados. Véase el ANNEX D para las dimensiones de distintos tamaños de muertos de hierro fundido.

3.4.5.4. Amarres fijos

En circunstancias especiales, se pueden emplear puntos de amarre anclados al fondo del mar o río. Se pueden hincar pilotes en el fondo del mar para crear un punto de sujeción para el amarre y, si existe roca sana en el fondo, unir las asas de amarre directamente a los cauces fluviales.

3.5. DESGASTE Y CORROSIÓN DE AMARRES

Los dos factores principales que inciden sobre la vida útil de un sistema de amarre son el desgaste y la corrosión. Puesto que la corrosión produce la aceleración de los procesos de desgaste, existe una interrelación entre los dos factores.

El rendimiento de la cadena de amarre depende en gran medida de las especificaciones del acero y debe tenerse en cuenta una cantidad aceptable de desgaste durante la vida útil del amarre.

3.5.1. CORROSIÓN

La oxidación, la acción electrolítica y la contaminación pueden acortar la vida útil de un tren de fondeo. La oxidación ocurre tanto en la tierra como en el mar. La acción electrolítica es consecuencia de las diferencias que existen entre los componentes de un amarre. Se debe a la utilización de metales distintos en un mismo fondeo, sumergidos en un electrólito común, en este caso el agua, y se manifiesta en forma de picaduras cerca de y en las soldaduras de los eslabones de las cadenas y en la cadena, a cada lado de los grilletes de unión, en un tramo de entre 1 y 2 metros. Si se fabrican el cuerpo de la boya y todos los componentes metálicos del amarre de la misma calidad de acero, se puede minimizar la acción electrolítica. Las aguas contaminadas influyen sobre el grado de corrosión por picadura, que se suele observar en la parte suspendida de la cadena de amarre y, a veces, en los faldones de las boyas de acero.

3.5.2. DESGASTE

Hasta cierto punto, el desgaste depende principalmente de la calidad de los materiales utilizados para fabricar el amarre. Además, las condiciones del entorno también influyen sobre el nivel de desgaste, sobre todo:

- El tipo de fondo del mar;
- La cantidad de arena transportada en el agua;
- Las mareas;
- La profundidad del agua;
- Aguas abrigadas o mar abierto;
- Las condiciones meteorológicas.

El amarre no puede modificar estas condiciones, solo puede reaccionar frente a ellas.

Se apreciará una reducción en el diámetro de la barra en el punto de contacto entre los eslabones, que puede ser ocasionado bien por el desgaste a consecuencia del movimiento entre los eslabones, o por una deformación localizada del metal debido a los esfuerzos producidos por los "tirones repentinos" de la cadena. Además, estos tirones pueden alargar los eslabones.



En las zonas donde el fondo del mar es arenoso, sobre todo durante el mal tiempo y cuando hay corrientes mareales fuertes, puede esperarse un alto nivel de transporte de sedimentos. En estas condiciones, los componentes del amarre se verán afectados por la abrasión.

La zona de borneo del amarre es donde se encuentra el mayor desgaste, porque siempre está en movimiento. Incluso en las aguas con una carrera de marea reducida, donde solo una pequeña parte de la cadena de amarre se desplaza sobre el fondo del mar, se podrá detectar un nivel importante de desgaste. Para tener en cuenta este desgaste adicional, se suele emplear un tamaño de cadena mayor en la zona de borneo.

3.6. VIDA ÚTIL

En general, la vida útil de la cadena oscila entre 1 y 5 años, pero en las aguas abrigadas con muchos limos, pueden durar hasta 20 años. Cuando las cadenas han sobrepasado su vida útil se suelen desguazar o se les bajan de categoría para que puedan emplearse en otros emplazamientos, o las partes desgastadas de la cadena se puede trasladar a otra parte del tren de fondeo sujeto a menos desgaste. En general, se toma la decisión de dar a una cadena de baja cuando el diámetro en cualquier punto de un eslabón se ha reducido a un porcentaje predeterminado de su tamaño inicial: para algunas autoridades 60% es el valor para las boyas en los canales y ríos, y 85% en mar abierto y en las zonas expuestas.

Se suelen realizar inspecciones para determinar el estado de la cadena a intervalos que oscilan entre 6 y 24 meses. La frecuencia dependerá de los factores de seguridad incorporados al amarre y de las condiciones ambientales en el emplazamiento de la ayuda a la navegación. La experiencia puede determinar si las inspecciones deban efectuarse con más o menos frecuencia en un lugar de fondeo determinado. Un régimen de inspección que incluye aspectos de mantenimiento preventivo puede permitir un margen de desgaste mayor o menor. Dicho régimen debe tener en cuenta el índice de desgaste y el desgaste esperado para la sección. Por tanto, es necesario mantener un registro detallado como parte del proceso de inspección.

Es preciso mantener un registro detallado de todas las especificaciones dimensionales y materiales para poder estimar, de manera fiable, el desgaste previsible de todos los componentes del amarre. Dichas especificaciones tienen importancia sobre todo a la hora de planificar el mantenimiento. Solo será posible utilizar la experiencia adquirida en cuanto a la vida útil de un conjunto de amarres y el mantenimiento necesario y aplicarla en el futuro para reparar y sustituir amarres semejantes, si se puede comprar cadenas, grilletes y otros componentes de la misma calidad en el futuro. Si se someten los distintos componentes de los sistemas de amarre a un proceso de homogenización, se producirán ventajas debido a la reducción del almacenamiento y de los costes de componentes. Debe relacionarse la calidad de los componentes con la vida útil requerida.

Cabe señalar que las regulaciones normalmente citadas para los fabricantes de cadenas para buques mercantes, según lo establecido por las sociedades de clasificación, sólo especifican la resistencia a la rotura y al impacto de la cadena y no dan ninguna orientación sobre la resistencia al desgaste y a la corrosión. Los buques no suelen pasar mucho tiempo fondeados. Por lo tanto, el desgaste de las cadenas es mínimo, y lo mismo ocurre con la corrosión. A menudo, la vida útil de la cadena es la misma que la del buque, o solo se sustituye se haya sobrecargada.

Véase la Guía 1040 de la IALA sobre el Mantenimiento de boyas y pequeñas estructuras de ayuda a la navegación.

4. AMARRES DE CABO

4.1. AMARRES DE BOYA DE CABO

Cuando se comparan los amarres de cabo con los de cadena, su peso reducido y su elasticidad son los beneficios principales de los amarres de cabo. El cabo moderno tiene la misma resistencia que una cadena de acero, y se ha demostrado que su vida útil es la misma o incluso mayor que la de la cadena si se toman medidas para evitar el rozamiento.

El amarre de cadena convencional utiliza la catenaria de la cadena para absorber gran parte de la energía del viento y del oleaje ejercida sobre la boya, impidiendo así que se transmita al muerto o al ancla. La elasticidad del



cabo tiene una función parecida y, si se elige una combinación adecuada del tipo de fibra y de construcción, se puede optimizar dicha absorción de energía.

Los mayores peligros para un tren de fondeo de cabo son la rozadura y los cortes. Es fácil demostrar que una navaja afilada puede dañar el cabo y cualquier roca o concha con aristas vivas, e incluso el cabrestante del buque, puede causar daños permanentes a la superficie del cabo. Permitir que el cabo se deslice sobre el tambor de un cabestrante, o tirar de él a través de un pasacables inadecuado, pueden no sólo provocar daños por abrasión, sino también un calentamiento localizado, de tal manera que las fibras superficiales del cable pueden derretirse, lo que provoca un debilitamiento significativo. Igualmente, las partículas de arena en suspensión en el agua pueden dañar el cabo y tener un impacto negativo sobre la carga de rotura. En zonas donde hay un problema grave de incrustaciones marinas, los cabos pueden atraer una cantidad considerable de algas e incrustaciones, que pueden hacer que la resistencia del cabo del amarre sea inaceptablemente alta en corrientes rápidas.

4.2. DISEÑO DEL AMARRE

El amarre debe dimensionarse de tal forma que el cabo nunca entre en contacto ni con el cuerpo de la boya o el tubo de la cola, ni con el fondo del mar (aunque esto no suele ser un problema en zonas de fondo blando de limo).

Utilizar una cadena de fondo que absorba el desgaste en el lecho marino, a la que se une un cabo ascendente, o cabo flotante, puede garantizar que se cumplan estos criterios en un amarre de boya normal. Además, pueden añadirse flotadores para mantener al cabo por encima del fondo. Los flotadores también pueden emplearse en zonas sensibles desde un punto de vista medioambiental. El componente del cable ascendente, o "cabo flotante", del amarre debe ser de una longitud que impide que el cabo roce contra el fondo del mar, incluso durante las mareas más bajas.

Si el asa de amarre se encuentra en una posición adecuada, se puede unir el cabo directamente a la boya, lo que garantice que el cabo nunca entre en contacto con la boya.

En otros casos, se puede emplear un tramo corto de cadena (o una pata de gallo en el caso de dos asas de amarre) para evitar cualquier roce.

En zonas de pesca comercial, existe el riesgo de que los cables de arrastre corten el cabo. En la parte del amarre que pueda encontrarse expuesta a tal riesgo, podría emplearse cadena.

4.3. TAMAÑO DEL CABO

La decisión sobre el tamaño de cabo a emplear dependerá de la carga ejercida por la boya debido a la acción del viento y el oleaje, la velocidad del agua y la fuerza necesaria para izar el muerto (o el ancla).

A la hora de elegir el cabo a emplear y para tener en cuenta las situaciones en las que el muerto está enterrado, un cabo cuya resistencia es igual a dos veces la capacidad de izado del buque de mantenimiento podría servir de orientación.

El fabricante del cabo deberá aportar información detallada sobre las propiedades de absorción de energía y de la carga admisible de trabajo del cabo elegido.

Otro factor que puede determinar el tamaño del cabo es el método a emplear para manipularlo.

El usuario debe ser consciente del peligro que supone el alto nivel de energía que se acumula en un cabo elástico bajo carga, que puede liberarse repentinamente si se rompe. Por la tanto, el personal debe tomar las medidas de seguridad oportunas cuando trabajan con un cabo bajo carga.

4.4. FABRICACIÓN DEL CABO

Existe una gran variedad de cabos en el mercado con muchos tipos de fibras y fabricadas de muchas maneras. Ya apenas se utilizan los cabos de fibras naturales para aplicaciones que soportan cargas. Los cabos de fibra natural tienen poca resistencia, tendrán una vida útil mucho más corta que los de fibra sintética y ya no resultan más baratos que los sintéticos.

Además, cuando las necesidades principales son una alta resistencia y una larga vida útil, los cabos trenzados han sustituido, en gran medida, al cabo tradicional de tres hebras.

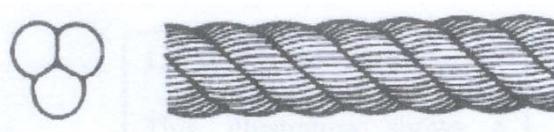


Figura 16 Construcción de tres hebras

La manera más antigua y más sencilla de fabricar un cabo es con tres hebras trenzadas. Los cabos de tres hebras son duraderos y fáciles de empalmar.

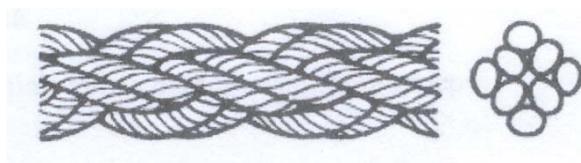


Figura 17 Construcción de múltiples trenzas

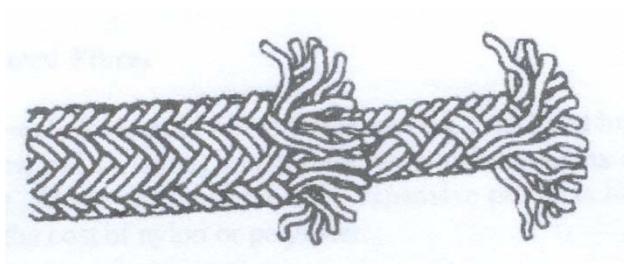


Figura 18 Construcción de trenzas

En este ejemplo, se muestra un cabo con el cuerpo central trenzado y encapsulado en una funda trenzada, y también se utilizan cuerpos centrales de tres hebras. Las variaciones en la construcción del encapsulado y del cuerpo central permiten que los cabos se diseñen para determinadas condiciones de funcionamiento. Se pueden crear cabos para distintas situaciones y funciones, variando la forma de construir la funda y el cuerpo central.

Cada hebra interna del cabo puede construirse de diversas maneras. Debe leerse con detalle la información aportada por el fabricante.

4.5. TIPOS DE FIBRA

En la fabricación de los cabos modernos, se utilizan los siguientes tipos de fibras:

4.5.1. NYLON

El cabo fabricado con nylon es muy fuerte, elástico y capaz de resistir a los golpes. No obstante, si el cabo se encuentra sumergido permanentemente en el agua, pierde algo de su resistencia debido a la absorción del agua.

4.5.2. POLIÉSTER

Su uso está muy extendido para la fabricación de cabos muy resistentes y de poca elasticidad, con una buena resistencia al desgaste y una larga vida.

4.5.3. POLIPROPILENO

Se ha utilizado para fabricar cabo barato y de uso general que flota. No obstante, los últimos avances en la fabricación y construcción de los cabos han creado productos de rendimiento moderado, que resultan menos caros que el nylon o el poliéster.

4.5.4. FIBRAS AVANZADAS

Se incluyen entre estas fibras las fibras Aramid (marca comercial Kevlar) y el polietileno de alto módulo (HMPE, del inglés, *High Modulus Polyethylene*) de las marcas registradas Spectra, Dyneema y Vectran), que combinan una alta resistencia con muy poca elasticidad. Además, el cabo de HMPE flota. Sin embargo, son productos muy caros y su coste es aproximadamente tres veces más que el de nylon o poliéster.

Puede resultar difícil identificar los tipos de cabo, porque muchas veces los fabricantes utilizan los nombres comerciales para referirse al tipo de fibra, en vez de emplear sus nombres genéricos.

Algunos tipos de cabo de HMPE son muy fáciles de empalmar.

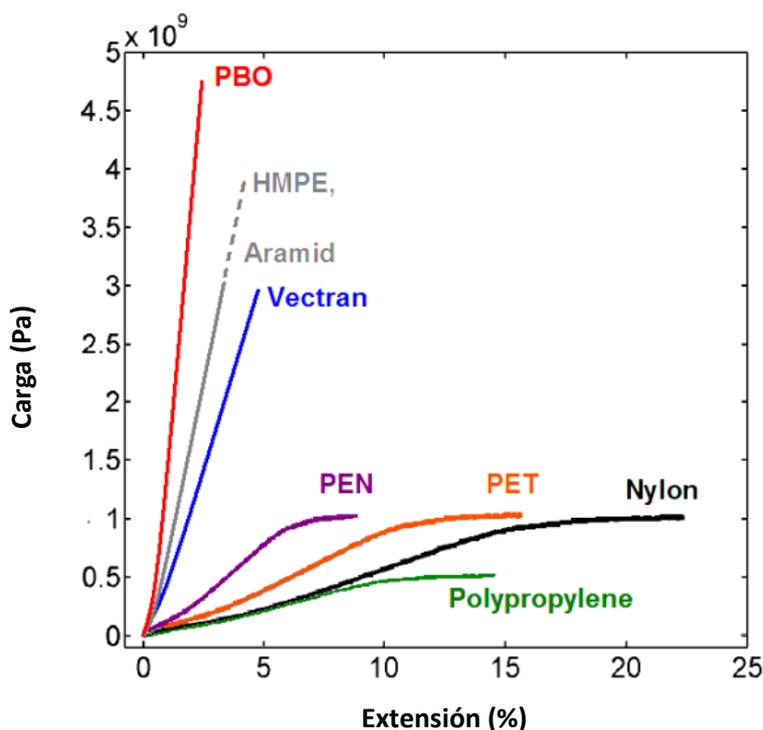


Figura 19 *Comportamiento de distintos tipos de fibra bajo tracción*

4.5.5. CONSTRUCCIÓN MIXTA

Los cabos de gran tamaño, como los que se emplean para los amarres de buques, se pueden fabricar empleando una mezcla de fibras para cumplir ciertos parámetros determinados de rendimiento.

ANNEX D, se muestran de forma pormenorizada los datos de un sistema de amarre típico, desarrollado por la Guardia Costera Canadienses, para amarrar boyas pequeñas (menos de medio metro en diámetro) en profundidades por encima de 30 metros.

4.6. TERMINACIONES DE CABOS

4.6.1. GUARDACABOS

La utilización de cabo de fibra, en lugar de cables de acero, para remolcar y amarrar buques y plataformas de petróleo ha dado lugar al desarrollo de guardacabos que permiten que los cabos que soportan cargas muy altas a ser engrilletados a cadenas o asas de amarre sin dañar las fibras.



Dichos guardacabos envuelven toda la superficie del cabo, de forma que éste queda totalmente protegido y no pueda rozar contra el grillete de unión, que pueden fabricarse de tubos de acero, hierro fundido o plástico de alta resistencia. Asimismo, se puede impedir que la cuerda se mueva dentro del guardacabo, llenando el guardacabo con una resina flexible (normalmente poliuretano). No obstante, existen opiniones diferentes en función la necesidad de dicho proceso.

4.6.2. EMPALMES

Con las técnicas modernas de fabricación (es decir, el cabo trenzado), pueden conseguirse empalmes muy resistentes en que el cabo se coloca alrededor del guardacabo. Cabe señalar que es imprescindible que el fabricante facilite instrucciones detalladas sobre cómo empalmar y que dichas instrucciones deben seguirse rigurosamente para garantizar que gran parte de la resistencia del cabo se retenga en el empalme. Se necesitan unas herramientas especiales para empalmar cabos trenzados, y quienes los empalman necesitan recibir una formación especial.

Cuando se realizan los cálculos de los amarres, debe tenerse en cuenta el hecho de que se pierden en los empalmes aproximadamente el 10% de la resistencia si estos se hacen correctamente.

4.6.3. AMARRES HÍBRIDOS DE CABLE/CADENA ("AMARRES COMPUESTOS")

Una de las aplicaciones de cabo que más éxito ha cosechado ha sido su uso en el tramo de ascenso (Véase "Cadena suspendida" en la Figura 1) de los fondeos de boya en aguas profundas. En lugares donde el peso de un amarre compuesto exclusivamente de cadena hundiría a la boya, el peso más ligero del tramo de cabo permite la utilización de una boya estándar. Como alternativa, el menor peso de un amarre de cabo podría permitir el uso de una boya de menor tamaño, comparado con el que sería necesario para soportar un fondeo de cadena (siempre que el tamaño de la marca diurna y la altura del plano focal sean adecuados).

Si se emplea cabo para el amarre, es preciso evaluar cuidadosamente el diseño de la boya para asegurarse de que flote de manera adecuada, ya que algunos diseños de boya se basan en el peso de la cadena para conseguir una estabilidad positiva.

Este tipo de amarre no funciona bien para aplicaciones en aguas poco profundas.

4.6.4. FONDEO CON LAS PATAS EN TENSIÓN

Los amarres de cabo son particularmente adecuados para las configuraciones de amarre bajo tensión, tales como las boyas de espeque y balizas elásticas, donde el amarre discurre directamente desde la boya al muerto y la tensión en la estacha de amarre mantiene a la boya en posición vertical. Cuando el cabo se encuentra tenso, no existe peligro de rozamiento contra el fondo del mar o contra la boya. La ventaja de dicha configuración es que mantiene a la boya en su lugar de fondeo (es decir, no existe el "radio de borneo", que sí existe con un amarre convencional), pero solo resulta práctico utilizarlo en zonas donde la amplitud de la marea o las corrientes es reducida. No obstante, el muerto o el ancla de fondeo tendrá que ser bastante más grande que el de un fondeo de cadena convencional.

4.7. MANEJO DE CABOS DE AMARRE

4.7.1. UTILIZACIÓN

En comparación con la cadena, el cabo es mucho más ligero y fácil de manejar. Como pesan menos, las personas pueden mover, tanto en tierra como en la cubierta de un barco, los componentes de un fondeo relativamente grande. Se puede adujar el cabo en la cubierta (o en una caja de adujamiento, una versión más grande de la caja de cañón lanzacabos) para la instalación del amarre. La boya se coloca en el agua, el muerto y la cadena de fondo se echan por la borda (o se sueltan cortando los cables de sujeción), y el cabo los sigue y cae dentro del agua.

La cubierta debe estar limpia y sin arena, y el borde de la cubierta tiene que ser lo suficientemente liso como para no dañar al cabo.

4.7.2. RECUPERACIÓN

Si es necesario izar el amarre para su retirada o inspección, es preciso cerciorarse de que:

- 1 Cualquier guía por la que se deslice el cabo debe tener un diámetro suficiente para el cabo utilizado, además de ser de rodillo y no tener bordes afilados.
- 2 El cabrestante debe estar diseñado para el manejo de cabos e impedir que resbalen por el tambor del cabrestante cuando estén en tensión de carga.

Los cabrestantes convencionales, que se emplean para tensar el cabo de amarre, pueden ser capaces de recuperar un cabo de amarre. No obstante, hay que tener en cuenta que tienden a permitir que el cabo resbale sobre el tambor del cabrestante, lo cual provoca la generación de mucho calor en el punto de contacto entre el cabo y el tambor, causando serios daños al cabo. Se han desarrollado técnicas eficaces que emplean cabrestantes con grandes carretes, en que se envuelve el cabo sobre un tambor giratorio grande. Dicha técnica se ve limitada por la longitud del cabo, y por tanto existe un límite en el número de fondeos que el tambor puede llevar al mismo tiempo.

Cuando se manipulan una gran cantidad de fondeos, el método preferido es la utilización de un cabrestante diseñado específicamente para el arrastre de cabos, que puede instalarse en la borda de la cubierta del buque, de tal forma que el cabo pueda llevarse directamente al cabrestante sin la necesidad de un guiacabos. El cabestrante consiste en un juego de grandes ruedas de caucho, que presionan el cabo sin dañar la fibra de la superficie. En lugar de envolverse alrededor de un tambor, el cabo suele pasar solo por un segmento de rueda de arrastre. Por lo tanto, se puede colocar dentro del cabrestante de arrastre o sacarlo de él según las necesidades. Este tipo de cabrestante, colocado al borde de la cubierta, tiene también la ventaja de que no hay cabo bajo tensión que pase por la cubierta de la embarcación, lo que sería un grave peligro en caso de rotura.

Otro concepto es el de incorporar lazos de manipulación o grilletes en el cabo, para que la grúa en la cubierta pueda levantar el fondeo en secciones.

El diseño que emplean las autoridades francesas para fondeos de aguas profundas garantiza que la cadena de fondo tenga una longitud suficiente como para que, a medida que se recupera la parte de cabo del amarre, la única tensión a la que se ve sometido es el peso de la cadena de fondo que se iza. No se notará el peso del muerto hasta que todo el cabo se haya recuperado y el buque esté izando la parte del fondeo de cadena.

4.8. SEGURIDAD

Cabe señalar que la cantidad de energía que se acumula en los tipos de cabo más elásticos, cuando están bajo tensión, puede ser considerable, y que esta energía se liberaría violentamente si el cabo se rompiera. Es preciso tomar medidas para cerciorarse de que no haya personas en la zona que podrían ser alcanzadas por el extremo de un cabo que se rompe.

5. AMARRES ELÁSTICOS

5.1. INTRODUCCIÓN

Puesto que actualmente la vida útil de las boyas de navegación es más larga que anteriormente, el desgaste de la cadena de amarre ya constituye el factor determinante a la hora de planificar la frecuencia del mantenimiento. El movimiento constante de los eslabones de la cadena y las partículas abrasivas suspendidas en el agua producen un desgaste de la cadena, que puede minimizarse si se puede mantener la estacha de amarre siempre bajo tensión. La utilización de líneas de amarre totalmente elásticas logra superar este problema. Para minimizar el desgaste, pueden proyectarse para que siempre se encuentren bajo tensión.

El amarre elástico es parecido al amarre de cabo al que se ha referido anteriormente en esta guía, siendo la única diferencia el hecho de que la parte superior de la estacha de amarre la compone un tramo de cabo de elastómero (goma o similar), que absorbe la energía creada por los movimientos de la boya y que compensa las diferencias en los niveles de agua, las mareas, las olas, etc.

5.2. CONSTRUCCIÓN DE AMARRES ELÁSTICOS

El cabo elástico se fabrica de goma natural sólida, que puede alargarse considerablemente y tiene una buena resistencia al desgarramiento. El cabo de goma se instala en paralelo a un cabo de seguridad, que se conecta al cabo elástico mediante un simple nudo. Se emplean grilletes de H especiales para unir los distintos tramos de cabo.

5.3. DISEÑO DE AMARRES ELÁSTICOS

El diseño de un fondeo elástico estará condicionado por las condiciones del mar, el calado, el lugar de fondeo y el tamaño y forma de la boya. Con respecto a los fondeos de cadena, son necesarias una longitud, tamaño de cadena y calidad de acero determinadas para mantener la boya en su lugar durante cierto tiempo. En el caso de un amarre elástico, las variables a tener en cuenta son que el cabo del elastómero tenga la longitud correcta, y que el diámetro y la dureza de la goma sean suficientes para permitir el alargamiento necesario para compensar por los distintos niveles de agua y para absorber la energía de la boya.

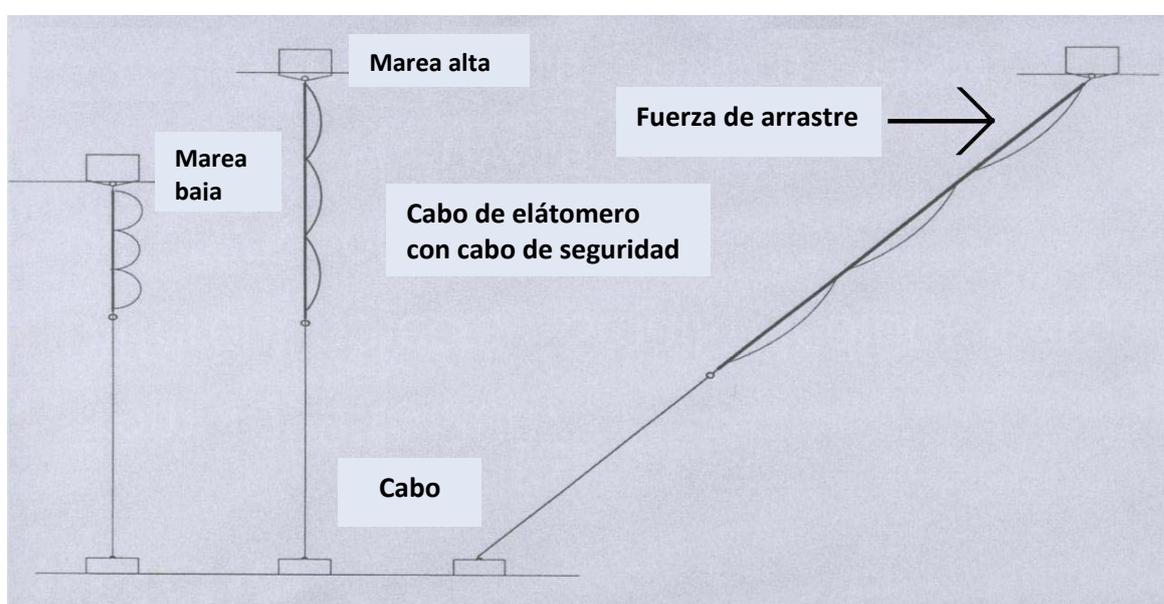


Figura 20 Configuración del amarre elástico

5.4. MANEJO

Se puede utilizar un amarre elástico de la misma manera que un amarre con cabo sintético. Para recuperarlo, la grúa levanta las secciones de cabo tramo a tramo. Se necesita un dispositivo especial de retención en el borde de la cubierta para aguantar, sin peligro, el cabo durante el proceso de recuperación.

5.5. VENTAJAS

Un amarre elástico pesa poco, es fácil de montar y no es necesario utilizar un soplete para cortar el amarre hasta la longitud exigida.

Además, siempre se encuentra bajo tensión y no daña al fondo del mar.

Comparado con el diámetro de un amarre de cadena, el de un amarre elástico es mucho más reducido y, por consiguiente, la acumulación de fauna marina es mucho menor. Por tanto, el amarre elástico tiene una resistencia menor en el agua que el amarre de cadena.

Una ventaja que tiene el amarre elástico es que puede emplearse en aguas someras y en zonas donde rompa la ola, porque la misma goma absorbe la energía en el sistema. Para funcionar adecuadamente, un amarre de



cadena debe tener una longitud determinada y un peso determinado, además de una profundidad mínima de agua. Por tanto, un amarre de cadena no es una buena opción en las aguas someras y en zonas de rompientes.

Un amarre elástico pesa muy poco y por eso apenas influye sobre la reserva de flotabilidad de la boya.

Ya que la estacha de amarre siempre está bajo tensión, la boya siempre se encuentra en su posición precisa.

El cabo elástico absorbe la energía de una manera muy suave, por lo que la fuerza ejercida sobre el tren de fondeo es aproximadamente la mitad que la de en un fondeo de cadena,

Dado que la estacha de amarre siempre se encuentra bajo tensión, existe poco desgaste y, por tanto, apenas necesita mantenimiento. Por este motivo, la vida útil de un fondeo elástico es casi el doble que el de uno de cadena.

6. EJEMPLOS DE AMARRES FLUVIALES ESPECIALES

Los ejemplos incluidos a continuación son de amarres especiales, desarrollados para ríos que fluyen rápidos y con corriente unidireccional.

6.1. ALEMANIA

6.1.1. BOYAS ANCLADAS EN EL LECHO DEL RÍO RIN

En la zona de St. Goar, el cauce tiene una anchura de 120 m y serpentea. La corriente es de aproximadamente 7 nudos y el terreno principalmente de roca. Utilizan este tramo del río buques de una eslora de hasta 140 m y una anchura de 15 m. Alrededor de 70,000 buques transportan 67 millones de toneladas de carga al año. Por motivos de seguridad, solo se permite tráfico en un sentido y se ha instalado un centro VTS para controlar el tráfico. En esta zona, aproximadamente un tercio de las boyas se encuentra amarrada a argollas hincadas en el lecho de roca del río. Los muertos serían demasiado grandes y podrían representar un peligro para los buques en tránsito.

- Datos del río:
- Corriente de 3,6 m/s (7 nudos);
- Anchura mínima 120 m;
- Profundidad mínima (no más de 20 días al año) 1,9 m;
- Profundidad media 3,4 m;
- Variación estacional de la profundidad, de 1,39 m hasta 9,29 m.

Datos del sistema de amarre:

- Profundidad del anclaje del fondeo 60 cm;
- Argolla de amarre, diámetro de barra 50 mm;
- Longitud de la cadena durmiente, 12 m, y diámetro de barra, 18 a 20 mm;
- Longitud de la cadena de ascenso, 15 m, y diámetro de barra, 10 mm;
- Si se pierde la argolla de anclaje, entonces el tramo de cadena temporal (utilizado hasta que se instale un nuevo anclaje) es 40 m, con un diámetro de 20 a 22 mm (peso de 600 a 700 kg).

Datos de la boya:

- Boya de acero ligero, diámetro 1 m;
- Volumen, 400 litros;
- Relleno de poliestireno, en caso de falta de estanqueidad, podrían entrar 40 litros de agua;
- Peso 62 kg + cola tubular 13 kg + contrapeso 8 kg = 73 kg.

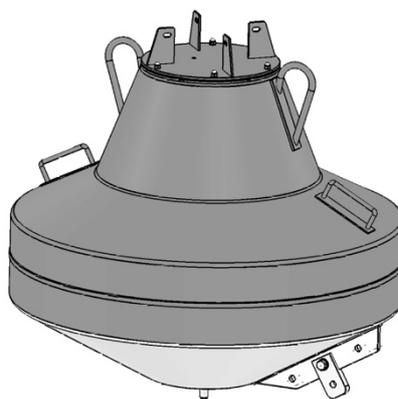


Figura 21 *Tipo de boya fluvial*

6.2. LOS PAÍSES BAJOS (HOLANDA)

6.2.1. AMARRE CON ANCLAS EN EL RIN

Se utiliza un ancla de 125 kg en vez de un muerto.

La longitud de la cadena es 25 m, incluyendo la pata de gallo de 4 m.

El diámetro de la cadena es de 22 mm.

La profundidad del agua oscila entre 3 m y 12 m.

La corriente suele ser de 4 nudos, pero podría aumentar hasta 6 nudos.

Se denomina la "*neuringline*" la segunda línea de la boya. La parte inferior es de cadena de 10 mm y la parte superior es de cabo sintético. Si fuera necesario debido a cambios en los niveles del agua, un buque pequeño utiliza la *neuringline* para remolcar la boya y el ancla a un emplazamiento nuevo. El buque pequeño puede izar con facilidad el ancla de esta manera y llevarse la boya y el amarre a un lugar distinto. El izado de la boya no es necesario y el barco pequeño no sería capaz de izar un muerto que tenga la misma fuerza de sujeción que el ancla.

La boya empleada es de acero de un diámetro de 2,00 m, pesa 2.500 kg y el calado es de 1,90 m.

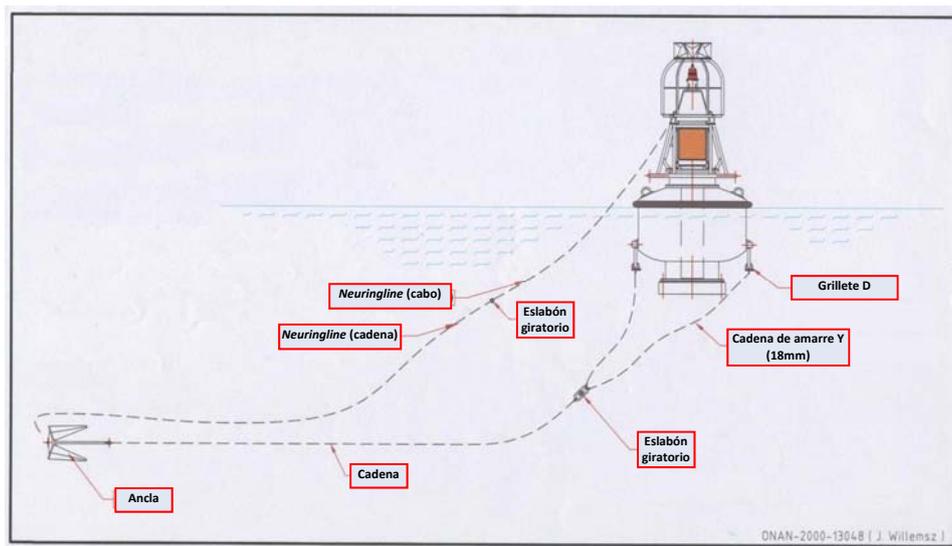


Figura 22 *Amarre fluvial*



7. ACRÓNIMOS

AtoN	(<i>Aid(s) to Navigation</i>) Ayuda/s a la navegación
BNG	(<i>New Generation Buoy</i>) Boya de nueva generación
Cd	(<i>Drag coefficient</i>) Coeficiente de arrastre
cm	centímetro
DIN	Clasificación alemana de aceros
HMPE	(<i>High modulus polyethylene</i>) Polietileno de alto módulo
IALA	International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities
kg	Kilogramo
kgf	Kilogramo-fuerza
kg/m	Kilogramos por metro
kg/m ³	Kilogramos por metro cuadrado
kn	Nudo/s (milla/s náutica/s por hora)
LANBY	(<i>Large navigation buoy</i>) Boya de navegación de gran tamaño
m	Metro/s
m ²	Metro/s cuadrado/s
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetro
m/s	Metros por segundo
m/s ²	metros por segundo cuadrado
N	Newton/s
N/mm ²	Newtons por milímetro cuadrado



ANNEX A COEFICIENTE DE ARRASTRE

A 1. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA O EL COEFICIENTE DE ARRASTRE

Se ha publicado muy poco sobre el coeficiente de arrastre de las boyas, a pesar de que dicho valor es muy importante a la hora de calcular las cargas en el amarre. El 9 de abril de 2002, la Autoridad de los Países Bajos realizó unas pruebas prácticas de remolque en el Haringvliet, cerca del dique, para establecer el coeficiente en cuestión. El buque balizador, el "Vliestroom", efectuó varias pruebas de remolque con un cuerpo de boya tipo de 6,5 m³ con faldón, remolcándolo de sur a norte a distintas velocidades.

A 2. DATOS DE LA BOYA DE ACERO CON FALDÓN DE 6,5 M³

Diámetro del cuerpo de la boya:	2,55 m
Diámetro del faldón:	1,78 m
Calado:	1,35 m
Superficie de la boya:	2,97 m ² a un calado de 1,35 m

A 3. PRUEBA DE REMOLQUE

Se remolcó la boya de dos maneras, primero con una estacha de remolque de cabo y después con una de goma de 35 mm de diámetro.

Para impedir que la estela de la hélice incidiera sobre las medidas, se remolcó la boya desde el extremo de la pluma de la grúa cuando la pluma estaba colocada de babor a estribor. El registrador de fuerza de tracción se ubicó en el tramo sencillo de la estacha de remolque.

A 3.1. COMPOSICIÓN DE LA ESTACHA DE REMOLQUE:

1ª prueba: asa de amarre, ramal del cabo (l = aproximadamente 5 m), registrador de fuerza de tracción, longitud del cabo aproximadamente 10 m, cable de izado. Botalón horizontal.

2ª prueba: asa de amarre, ramal del cabo (l = aproximadamente 5 m), registrador de fuerza de tracción, longitud del cabo aproximadamente 10 m, botalón de izado. Botalón horizontal.

A continuación, el Vliestroom remolcó la boya a velocidades de 1, 2, 3 y 4 nudos con la línea de cabo y a velocidades de 1, 2 y 3 nudos con la línea de goma.

Durante el remolque, la boya no dio guiñadas, ni giró, ni osciló.

La boya se desplazó por el agua a una velocidad constante. La boya se comportó igual con la línea de cabo que con la de goma.

A medida que se aumentaba la velocidad, se formaban olas a lo largo de la boya, con una ola de proa creciente y un seno de ola en el punto donde la ola tenía su máxima anchura.

Durante la prueba con la línea de goma, la línea se alargaba con el aumento de la velocidad de arrastre. A una velocidad de 3 nudos, la boya se encontraba aproximadamente en línea con la parte trasera de la superestructura, mientras que al principio, estaba en línea con la parte trasera de la zona de trabajo del puerto.

A 4. RESULTADOS

A medida que se aumentó la velocidad de remolque de 1 a 4 nudos, las mediciones de las fuerzas oscilaron de 20 kgf a alrededor de 400 kgf.

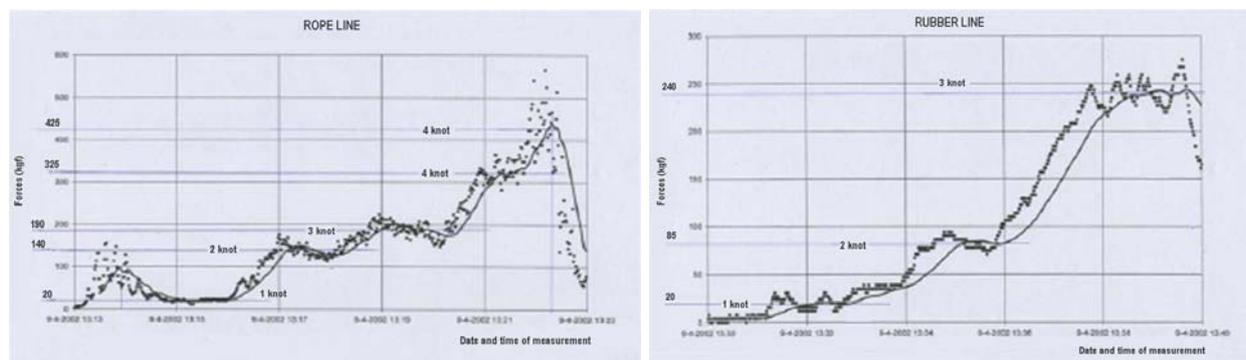


Figura 23 Fuerzas al remolcar con una línea de cabo y fuerzas al remolcar con una línea de elastómero

Basado en la medición de las fuerzas, se calculó la resistencia de la boya de 6,5 m³ en función de la velocidad de remolque. Se pueden explicar los valores medidos, que se desvían ligeramente de la tendencia, por el hecho de que resultaba muy difícil remolcar la boya a una velocidad baja y constante.

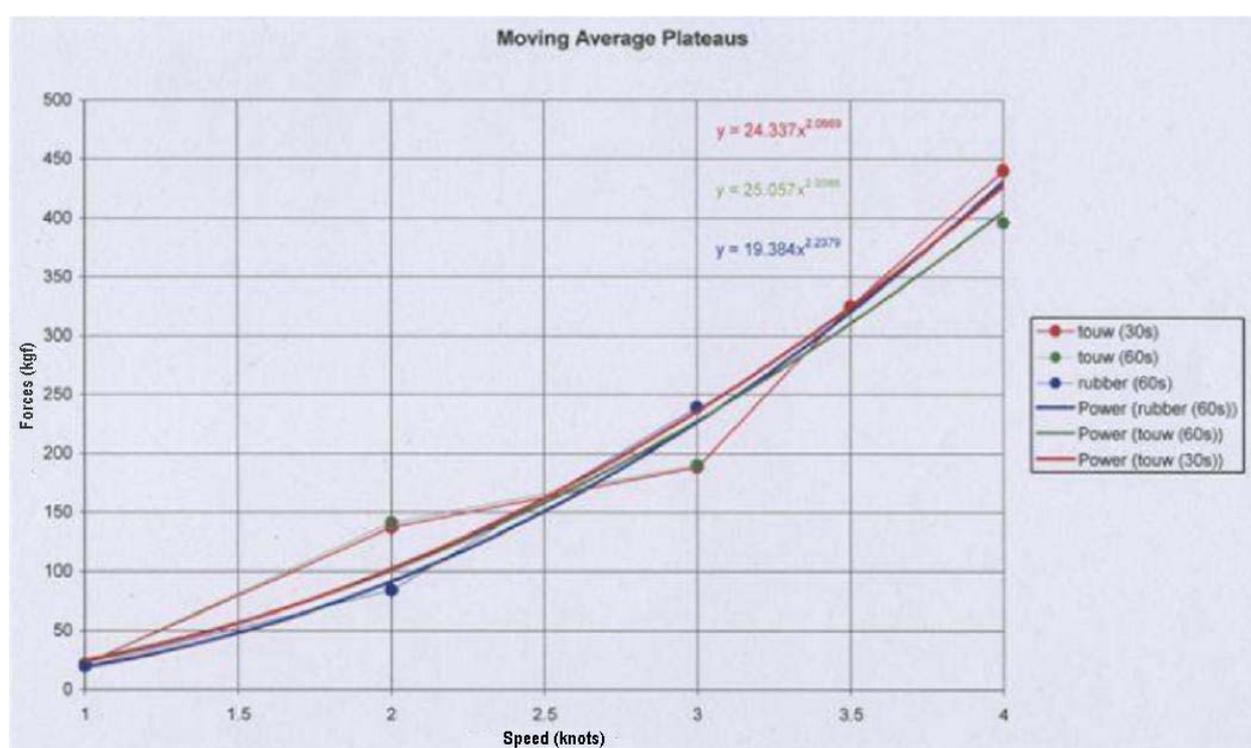


Figura 24 Gráfico que muestra la resistencia de la boya al remolcarla a varias velocidades.

A 5. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE

Se pueden utilizar las fuerzas medidas para calcular el coeficiente de arrastre para este tipo de boya con faldón.

Tabla 2 Cuadro que muestra las fuerzas de remolque con el cabo

V (nudos)	Fuerza (kgf)	Cd	Observaciones
1	20	0,53	
2	140	0,93	Pico aleatorio
3	190	0,55	
4	325/ 425	0,54/ 0,70	

Tabla 3 Cuadro que muestra las fuerzas de remolque con la línea de elastómero

V (nudos)	Fuerza (kgf)	Cd
1	20	0,53
2	85	0,56
3	240	0,70

A 6. CONCLUSIONES

Los cuadros anteriores demuestran que el valor oscila entre 0,53 y 0,56, con picos de hasta 0,93. Si se supone que los picos son consecuencia de errores de medición y fluctuaciones en la velocidad de remolque, se puede considerar que, para este tipo de boya, se puede aplicar un valor de Cd de 0,55.

ANNEX B COMPARATIVA DE CARGAS EN EL AMARRE DE UNA BOYA FONDEADA CON AMARRE ELÁSTICO O DE CADENA

B 1. INTRODUCCIÓN

Un estudio numérico basado en un modelo sencillo de una boya fondeada con cadena ayuda a comprender qué carga se ejerce sobre la cadena. Se utiliza el mismo modelo para evaluar las fuerzas sobre el amarre de una boya con fondeo elástico. Al contrastar los resultados, se puede entender por qué los fondeos elásticos ofrecen un mejor rendimiento que los de cadena en aguas someras.

En un principio, había muchas dudas sobre la utilización de elastómero para amarrar a las boyas de ayudas a la navegación. La experiencia ha demostrado que los amarres de cadena a veces se rompen. Al sustituir la cadena con una más fuerte (o más larga), sobrevive el fondeo. Si se utiliza la experiencia como punto de partida, parece ilógico pensar que un fondeo elástico, que solo tiene una fracción de la carga máxima, pueda soportar igual de bien, o incluso mejor, las cargas ejercidas sobre el amarre. No obstante, ahora, tras 5 años de experiencia (de la Autoridad de los Países Bajos) empleando cables elásticos para amarrar las boyas, se ha transformado el escepticismo inicial en confianza y voluntad de aceptar este tipo de material como apto para los fondeos. Esta ponencia trata de algunas de las consideraciones importantes respecto a las cargas sobre los amarres de las boyas fondeadas, tanto de cadena como de elastómero, y demuestra que un amarre de este tipo mantiene la carga del fondeo muy por debajo de la máxima fuerza con la que un cabo de elastómero puede operar.

B 2. EL CONFLICTO INICIAL

Básicamente, el amarre de una boya tiene dos funciones aparentemente contradictorias. Por una parte, mantiene la boya en su sitio, pero por la otra el amarre tiene que seguir, hasta cierto punto, la dinámica de las olas para poder reducir las cargas en el amarre. Cuando una ola levanta la boya en el momento en que se alcanza el final de la longitud de la línea de amarre, este conflicto se manifiesta con más claridad. El amarre la cadena llega repentinamente a su fin, sobre todo en aguas poco profundas, lo que da lugar a enormes picos de fuerza. Es capaz de alargarse un fondeo elástico hasta dos veces su longitud inicial y, por tanto, la boya se para suavemente, amortiguando así estas fuerzas puntuales. En los siguientes apartados de esta presentación, se muestran los resultados de una simulación numérica de una boya amarrada con cadena y otra amarrada con elastómero. En el último apartado, este tema se presenta en función del concepto de conservación de la energía.

B 3. DESCRIPCIÓN DE LA BOYA DE NAVEGACIÓN FONDEADA EN EL MAR

Para que los resultados sean lo más transparentes posible, el mar, la boya y el amarre se reducen a sus características esenciales. El modelo es de una boya que se encuentra amarrada en un solo punto y que siempre permanece en posición vertical. En el modelo, el tren de olas rompientes es un muro de agua de anchura y altura idénticas. Las olas rompientes están separadas por aguas en reposo de tres veces la anchura de las olas.

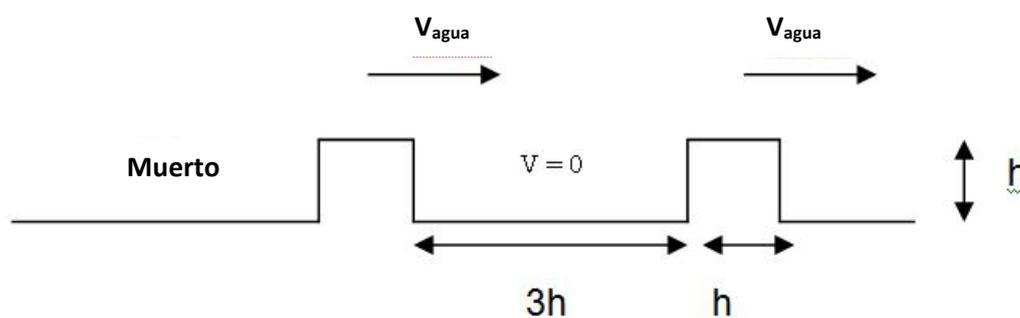


Figura 25 *Un tren de olas rompientes*

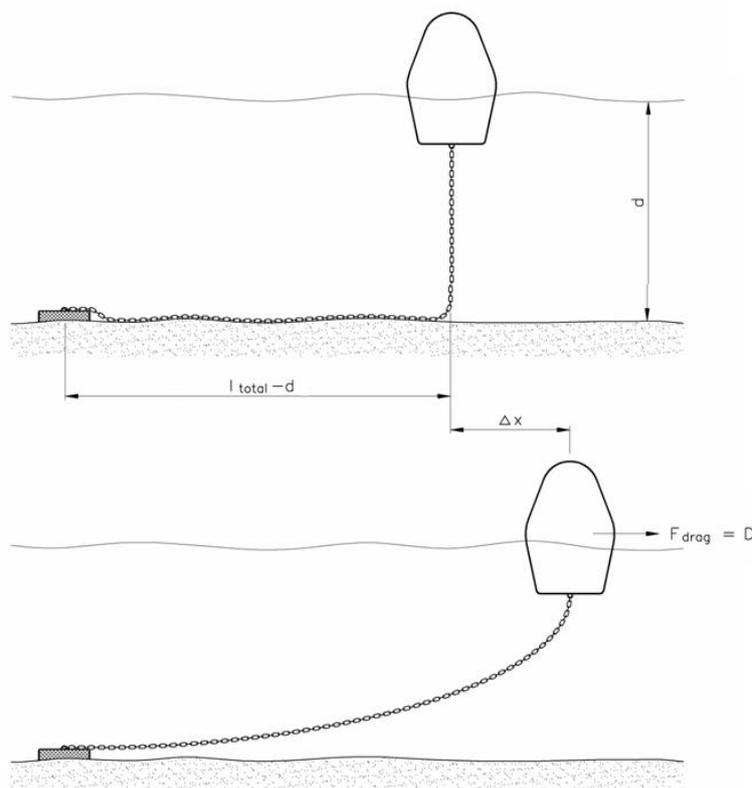


Figura 26 La fuerza horizontal ejercida sobre una boya en función del desplazamiento ΔX

Aunque el amarre de cadena es al menos un problema bidimensional, se utiliza como si fuera en un modelo unidimensional. Esto se realiza calculando la relación entre la fuerza horizontal y el desplazamiento de una boya amarrada con cadena. La fuerza horizontal de la cadena sobre la boya se calcula en función del desplazamiento (ΔX) desde la posición de velocidad cero posición (véase la Figura 26).

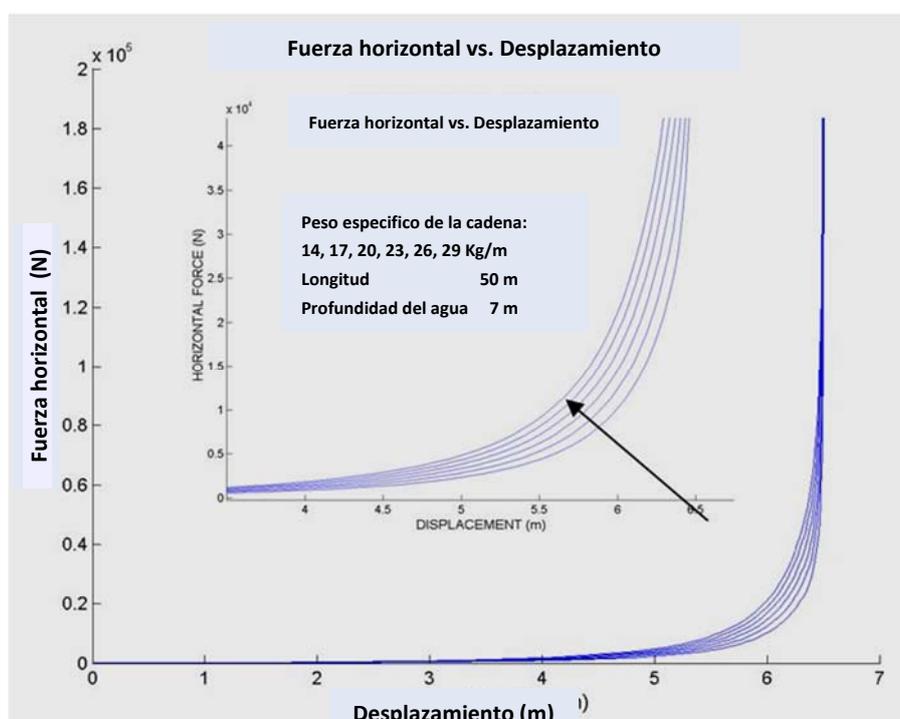


Figura 27 La fuerza horizontal de una boya vs. el desplazamiento de la boya desde su posición de corriente cero

En equilibrio, dicha fuerza es igual a la fuerza de arrastre sobre la boya y, en una situación dinámica, dicha fuerza también acelera (desacelera) la boya. La relación entre fuerza y desplazamiento depende del peso específico (peso por metro), la longitud de la cadena y, por último, pero no por ello menos importante, de la profundidad del agua. En la Figura 27, se presenta la fuerza horizontal frente al desplazamiento para varios valores del peso específico de la cadena. Como era de esperar, cuanto más ligera sea la cadena, más agudo será el perfil de la relación entre la fuerza y el desplazamiento.

Se puede observar el impacto producido por la variación del peso específico de la cadena en la cadena en un amarre. La boya, el mar y el amarre se definen de la siguiente manera:

Las especificaciones de la boya son:

Superficie sumergida:	1 m ²
Superficie total:	2 m ²
Masa, incluida la masa añadida:	300 kg
Masa incluida la masa añadida cuando rebasada:	400 kg
Coefficiente de arrastre:	1

Las especificaciones del mar son:

Profundidad del agua:	7 m
Velocidad del agua de la ola rompiente:	8,3 m/s
Velocidad del agua entre las olas rompientes:	0 m/s
Altura de la ola rompiente:	7 m
Distancia entre dos olas rompientes:	21 m

Las especificaciones del amarre de cadena son:

Longitud	50 m
Peso específico (en el agua)	14, 17, 20, 23, 26 y 29 kg/m

Cuando la ola rompiente alcanza la boya, la boya acaba completamente rebasada. No se tiene en cuenta la inclinación de la boya, ni tampoco la inercia de la cadena y el arrastre de ella. Se determina la velocidad del agua en una ola (rompiente) por las leyes de la física y depende, en aguas someras, de la profundidad del agua. La profundidad típica del agua en este estudio numérico es 7 m. Por cuestiones de compatibilidad, se considera constante la velocidad del agua en la ola rompiente a lo largo de este estudio, independientemente de la profundidad del agua.

En la Figura 29, se presenta la fuerza de amarre en función del tiempo en que las olas rompientes pasan por la boya y, Figura 28 se puede observar con detalle las fuerzas puntuales observadas. Para todas las cadenas, la fuerza de amarre alcanza un nivel estacionario, igual a la fuerza de arrastre de una boya estacionaria. La manera de alcanzar esta fuerza en estado estacionario depende, en gran medida, del peso específico de la cadena. Como se puede ver en la Figura 28, en el caso de la cadena que más pesa, la fuerza aumenta suavemente hasta que se alcance la fuerza de equilibrio. Por otra parte, las cadenas ligeras no ralentizan la boya lo suficiente antes de que se alcance el final del tramo de cadena, y el pico de la fuerza de amarre es aproximadamente 10 veces superior al valor en el estado estacionario. Se puede apreciar aquí la naturaleza del problema con la cadena de poco peso: la cadena ligera no pesa lo suficiente como para mantener los esfuerzos del amarre a un nivel reducido. En dichos casos, los esfuerzos en el amarre pueden llegar valores de pico muy altos, con todas las consecuencias negativas que ello conlleva.

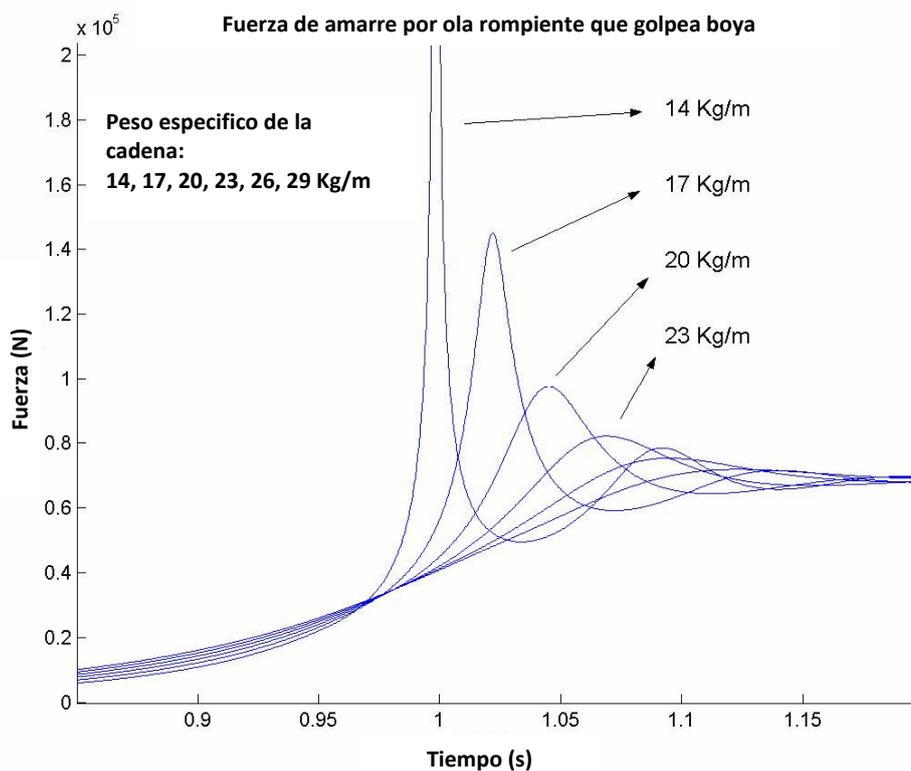


Figura 28 *La fuerza horizontal ejercida sobre una boya cuando la golpea una ola rompiente*

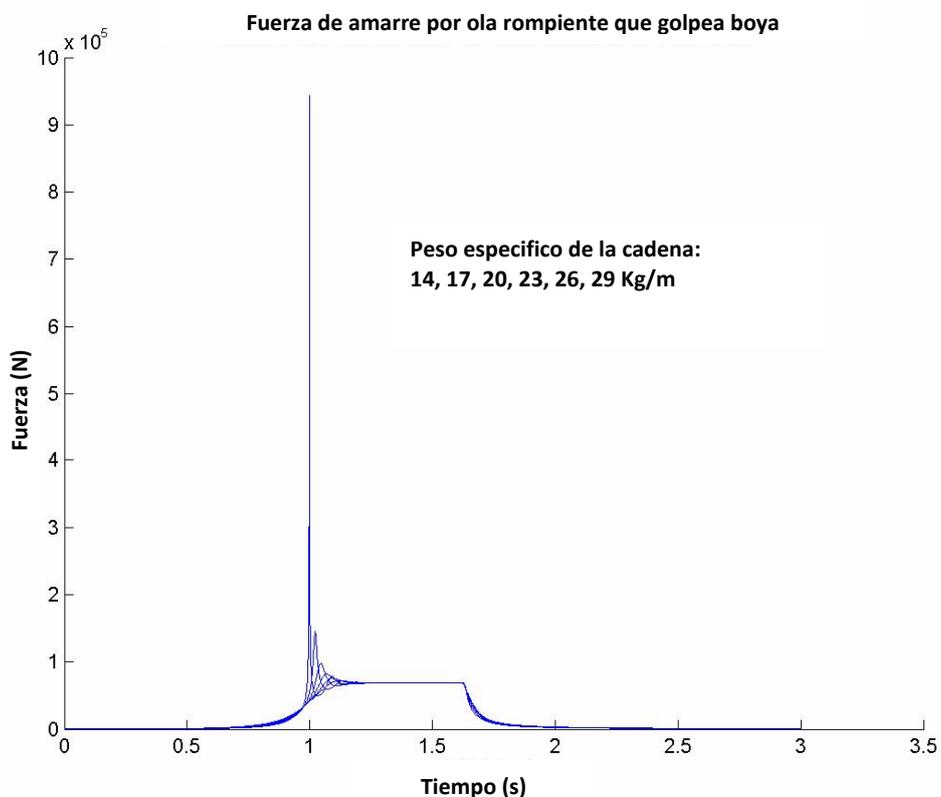


Figura 29 *La fuerza horizontal ejercida sobre una boya cuando la golpea una ola rompiente.*

Figura 30

B 4. AGUAS SOMERAS

En el apartado anterior, controlamos por completo el diseño del amarre. Al seleccionar una cadena adecuada, tanto en cuanto a su peso específico como a en su longitud, se pudieron mantener los esfuerzos del fondeo en un nivel reducido. No obstante, en el caso de aguas someras, el parámetro clave es la profundidad precisa del agua y esto no es controlado por el hombre. De las configuraciones descritas en el apartado anterior, se selecciona una cadena con un peso específico de 20 kg/m, y se toman, respectivamente, niveles de agua de 3, 4, 5, 6 y 7 m. Las fuerzas ejercidas sobre el amarre debido a la ola que pasa en condiciones de rotura se presentan en la Figura 31. Cuando $t = 0$, el frente de la ola rompiente se encuentra en la posición de equilibrio de la boya, en el caso de velocidad del agua cero. A medida que baja el nivel del agua de 7 a 4 m, la fuerza máxima aumenta de manera espectacular. A los 3 m, la fuerza puntual se aumenta hasta más de 10 veces la fuerza estática de la ola rompiente, lo que significa que, en los casos en los que el nivel de agua sea más bajo de lo esperado, el diseño ya no vale y el amarre podría fallar.

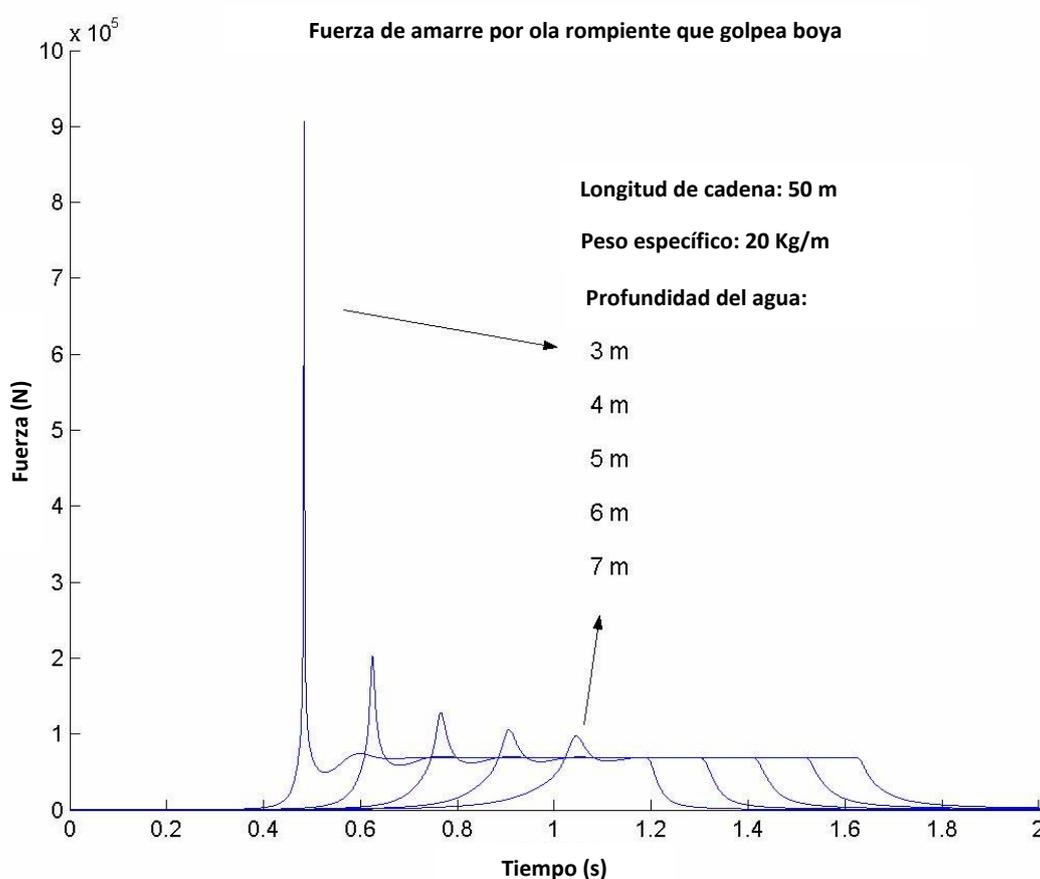


Figura 31 La fuerza horizontal ejercida sobre una boya cuando la golpea una ola rompiente.

B 5. BOYA AMARRADA CON ELASTÓMERO

Pueden evitarse los picos bruscos en la fuerza de amarre en aguas someras sometido a olas rompientes, empleando un fondeo elástico. Cuando la ola levanta la boya y el tren de fondeo se tensa hasta el final, la boya tiene que ralentizarse, lo que hará un fondeo elástico de manera paulatina, evitando así las variaciones bruscas de las fuerzas que actúan sobre el amarre. Con el fin de demostrarlo, se ha llevado a cabo la simulación numérica

presentada en el apartado anterior, pero con un cabo de elastómero en lugar de una cadena. El cabo empleado tiene un diámetro de 50 mm y una dureza de 60 Shore A.

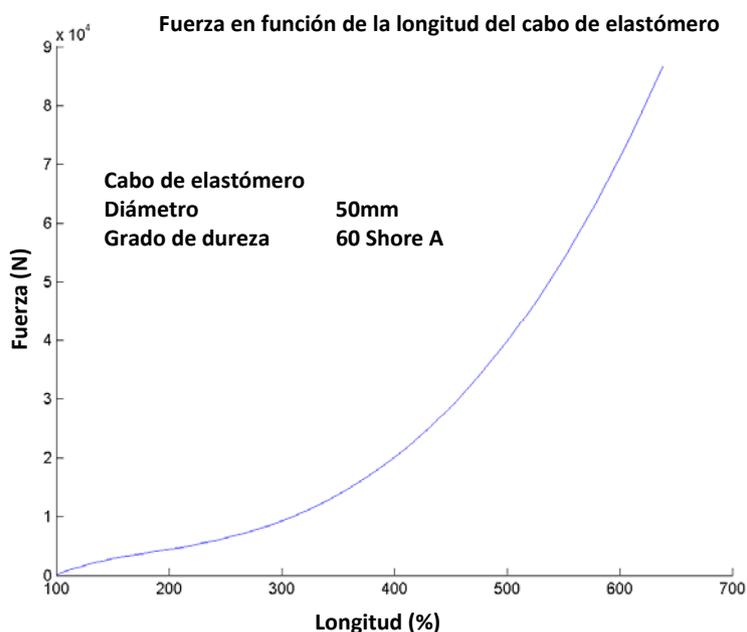


Figura 32 *La fuerza ejercida sobre un fondeo elástico en función de la longitud relativa.*

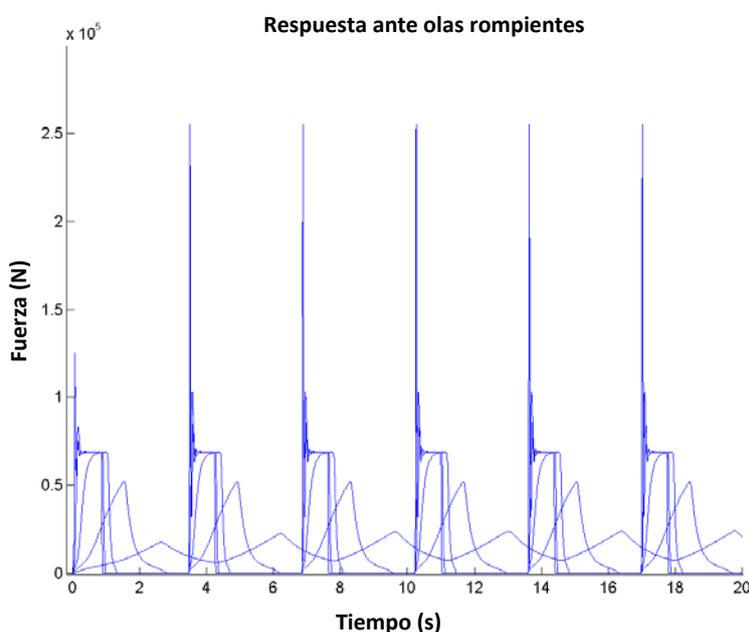


Figura 33 *La fuerza de amarre ejercida sobre una boya amarrada con un fondeo elástico cuando pasan olas rompientes. Longitud del cabo de elastómero: 2 cm, 8 cm, 32 cm, 1,3 m y 5,1 m*

La relación entre la fuerza y el alargamiento del elastómero utilizado se presenta en la Figura 32. El alargamiento se presenta como un porcentaje, el 100 % corresponde en la condición de no estar estirado y el 200 % cuando la longitud del cabo de elastómero se duplica. Se ha efectuado la simulación para distintas longitudes de elastómero, véase la Figura 33. Figura 34, se puede ver ampliado el paso de la segunda ola rompiente. Las fuerzas de pico en el amarre son consecuencia de realizar la simulación con un cabo de elastómero de sólo 2cm, una

longitud que no es nada realista. A medida que se aumenta la longitud del cabo, el pico desaparece enseguida. Al alargar el cabo aún más, la fuerza máxima disminuye hasta un nivel por debajo del nivel en reposo. En dichos casos, la boya puede moverse con la ola durante todo el recorrido y se tira hacia atrás durante el intervalo entre dos olas rompientes.

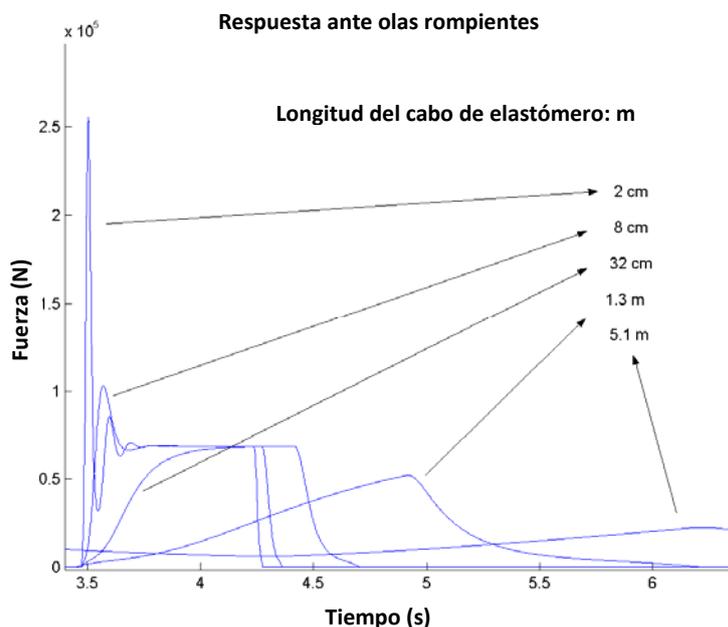


Figura 34 La fuerza de amarre ejercida sobre una boya amarrada con un fondeo elástico cuando pasan olas rompientes. Longitud del cabo de elastómero: 2 cm, 8 cm, 32 cm, 1,3 m y 5,1 m

Cuando la primera ola rompiente pasa por la boya, las fuerzas máximas no son tan altas como cuando las olas pasan en secuencia. Cuando $t = 0$, el cabo elástico no se encuentra estirado y el frente de la ola rompiente sólo inclina la boya. Cuando la ola rompiente pasa por la boya, se ve desplazada en el sentido positivo y, después, el amarre tira la boya hacia atrás. En el momento en que el frente de la segunda ola golpea a la boya, podría encontrarse a la izquierda o a la derecha de su posición original. Con esta nueva posición de partida, la segunda pasada será ligeramente distinta.

B 6. CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS

Puede considerarse desde un punto de vista energético la aplicabilidad de los fondeos de cadena y de elástico. Cuando una ola (en condición de rotura) levanta la boya, su energía cinética aumenta, y el amarre tiene que absorberla. Un amarre de cadena absorbe dicha energía levantando la cadena y la energía cinética se transforma en energía potencial. Por su parte, el amarre de elastómero transforma la energía cinética en energía interna (elástica). Aquí se puede apreciar la diferencia, la energía que un amarre de cadena puede absorber depende, entre otros factores, de la profundidad del agua, pero la energía que un fondeo elástico puede absorber depende exclusivamente del cabo en sí. Por lo tanto, en aguas someras, un amarre elástico aporta más ventajas.

B 7. CONCLUSIÓN

Se demuestra por análisis numérico que una boya amarrada incorrectamente puede sufrir esfuerzos puntuales en el tren de fondeo. La calidad del fondeo de cadena depende de su longitud y peso específico, así como de la profundidad del agua. Si es demasiado ligero el peso de la cadena o si no es lo suficientemente larga, las fuerzas de pico pueden incrementarse de manera espectacular. La calidad del fondeo elástico de una boya solo depende de la calidad del cabo en sí. Independientemente de la profundidad del agua, pueden evitarse las fuerzas puntuales y, por este motivo, es mejor utilizar en aguas someras un fondeo elástico.

ANNEX C **EJEMPLO DE UN DISEÑO DE AMARRE**

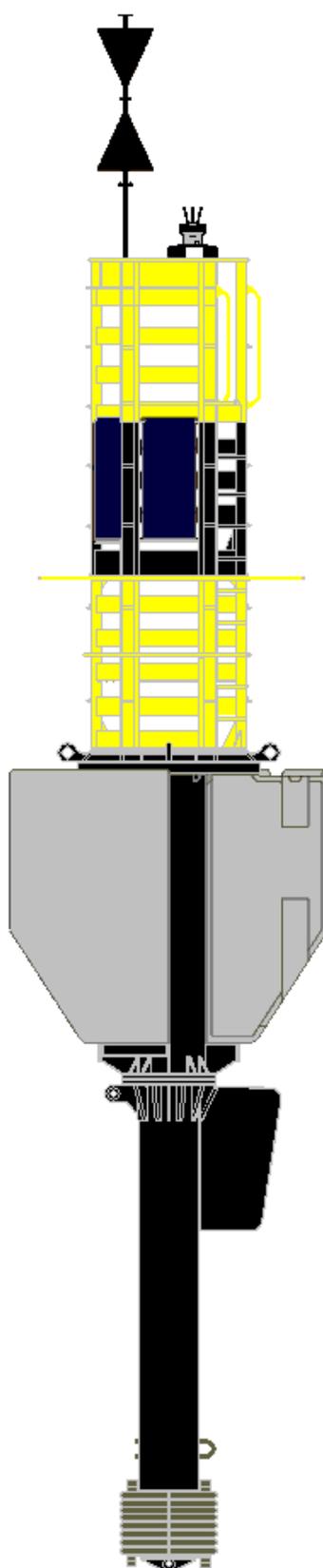


Figura 35 ***Boya de nueva generación A8L***

C 1 SITUACIÓN ELEGIDA

Se ha efectuado esta aplicación numérica para una boya de nueva generación A8L. Se han calculado los arrastres aerodinámicos e hidrodinámicos de la manera indicada en el apartado 3.3.1.1. "Cargas de amarres intermedios".

Condiciones ambientales del ejemplo:

Boya:	Boya de nueva generación (BNG) A8L
Profundidad:	20 m
Marea:	6,9 m
Altura máxima de ola:	5 m
Velocidad máxima del viento	180 km/h
Velocidad máxima de la corriente:	2 nudos
Diámetro de la cadena:	35 mm
Tipo de cadena:	3D
Densidad del muerto:	2.100 kg/m ³
Densidad del acero:	7.850 kg/m ³
Resistencia a la tracción del acero:	500 N/mm ²
Densidad del aire:	1,29 kg/m ³
Densidad del agua:	1.024 kg/m ³
Ángulo de rozamiento interno del fondo del mar	45°
Tipo de Boya	A8L
Superficie de la superestructura	5,06 m ²
Coefficiente de arrastre de la superestructura	1.2
Superficie del flotador superior	2,73 m ²
Coefficiente de arrastre del flotador superior	1
Superficie del flotador inferior	2,7 m ²
Coefficiente de arrastre del flotador inferior	1
Superficie de la cola	2,22 m ²
Coefficiente de arrastre de la cola	1
Flotabilidad del cuerpo completo de la boya	9,5 m ³
Masa con el equipo	4,2 T

Masa sumergida por unidad de longitud de la cadena: 23 kg/m³

Tensión en el muerto--- véase la Ecuación 9 "Cargas de amarres tensos"

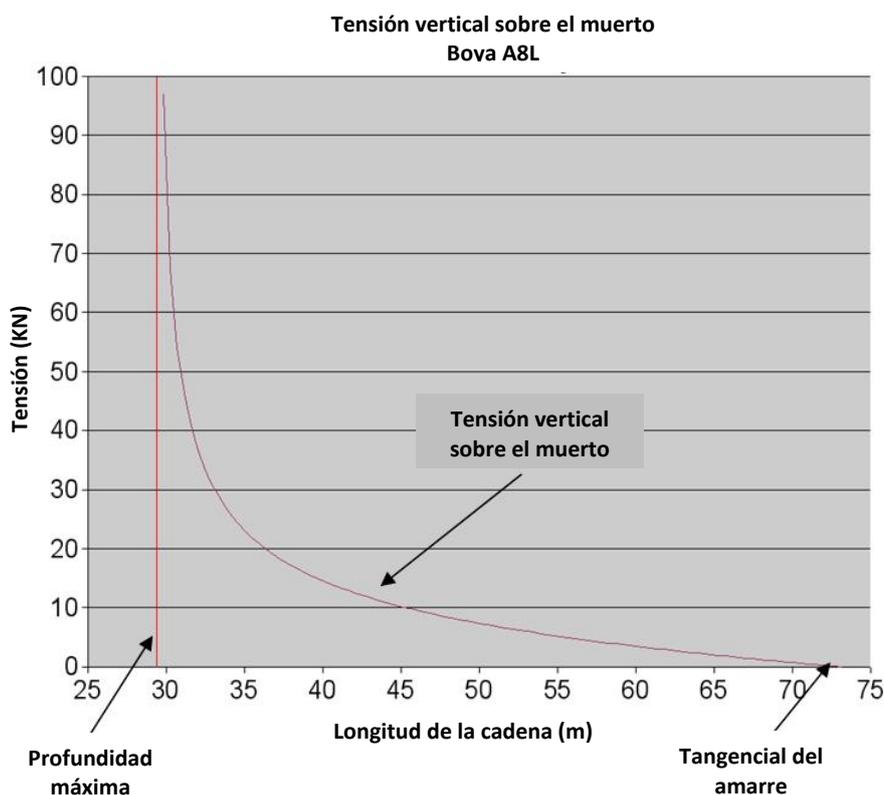


Figura 36 *Tensión vertical ejercida sobre el muerto en función de la longitud de la cadena*

La tensión vertical es igual a cero para los amarres flojos e intermedios.

Si el fondeo es más corto, la tensión vertical ejercida sobre el muerto se incrementará.

Si la longitud del amarre es igual a la profundidad, será muy alta la tensión ejercida sobre el muerto, aunque en realidad la boya estará sumergida antes de que esto pueda producirse.

Con respecto a la tensión ejercida sobre la boya, véase la Ecuación 11 Reserva de flotabilidad.

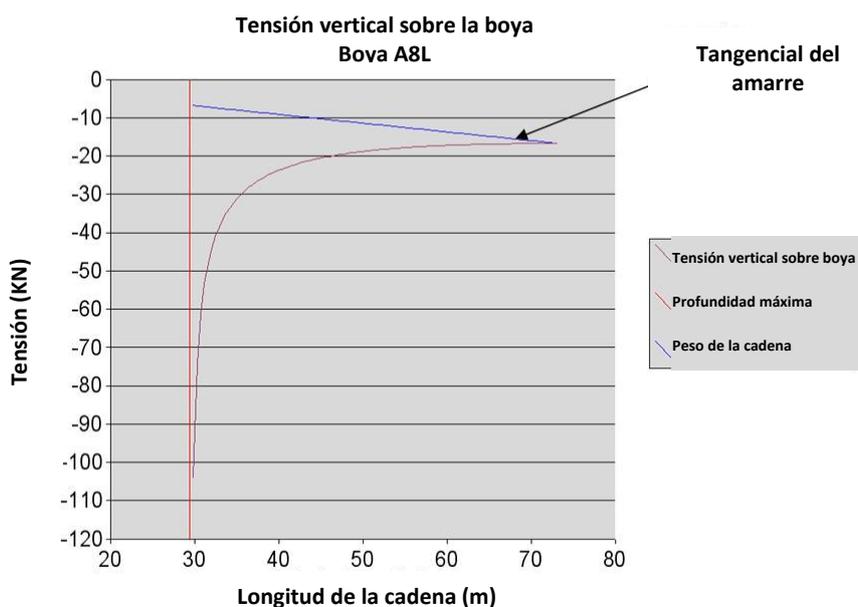


Figura 37 *Carga vertical ejercida sobre la boya*

En el caso de un amarre tangencial (flojo o intermedio), la tensión ejercida sobre la boya se debe exclusivamente al peso de cadena soportada. No obstante, si la longitud del tramo de cadena es menor que la recomendada para el fondeo intermedio, el aumento en el peso de la cadena no será suficiente, debido a la tensión sobre el muerto, para compensar el esfuerzo adicional.

Con respecto a la tensión sobre el tren de fondeo, véase el apartado 3.3.1.3.2 Tamaño de cadena.

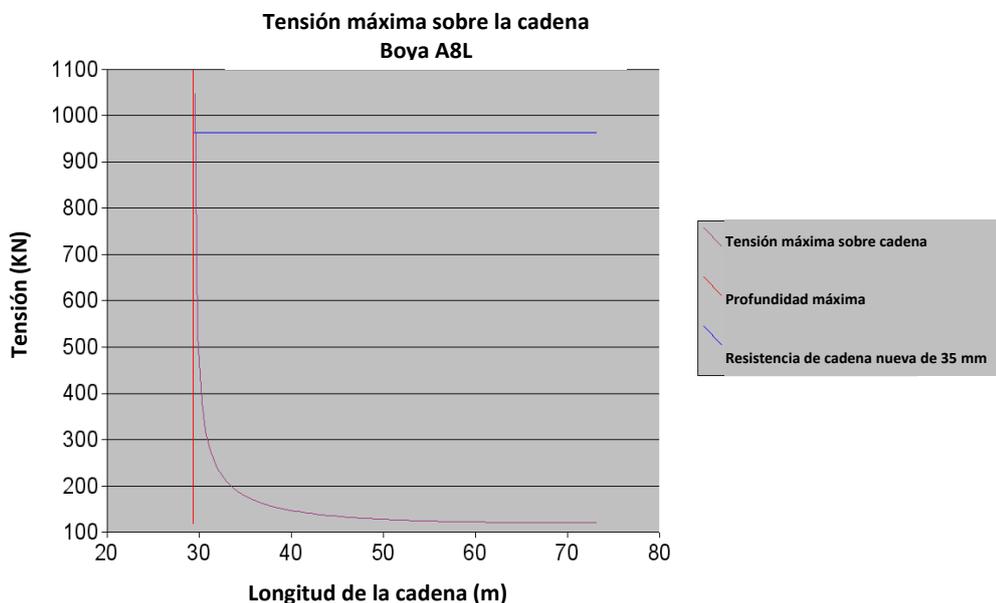


Figura 38 *Tensión sobre la cadena*

El gráfico anterior pone de manifiesto que la "nueva" resistencia de la cadena puede no ser un problema para el fondeo, siempre y cuando la longitud de la cadena no esté demasiado cerca del valor de la "profundidad". De lo que se deduce que, si se tiene un amarre tenso, es posible que no haya que elegir una cadena de mayor resistencia. No obstante, un amarre tenso puede tener mayor incidencia en el desgaste de la cadena. Puesto que la cadena se encuentra bajo tensión constantemente, será más rápida la velocidad de desgaste de este tipo de amarre.

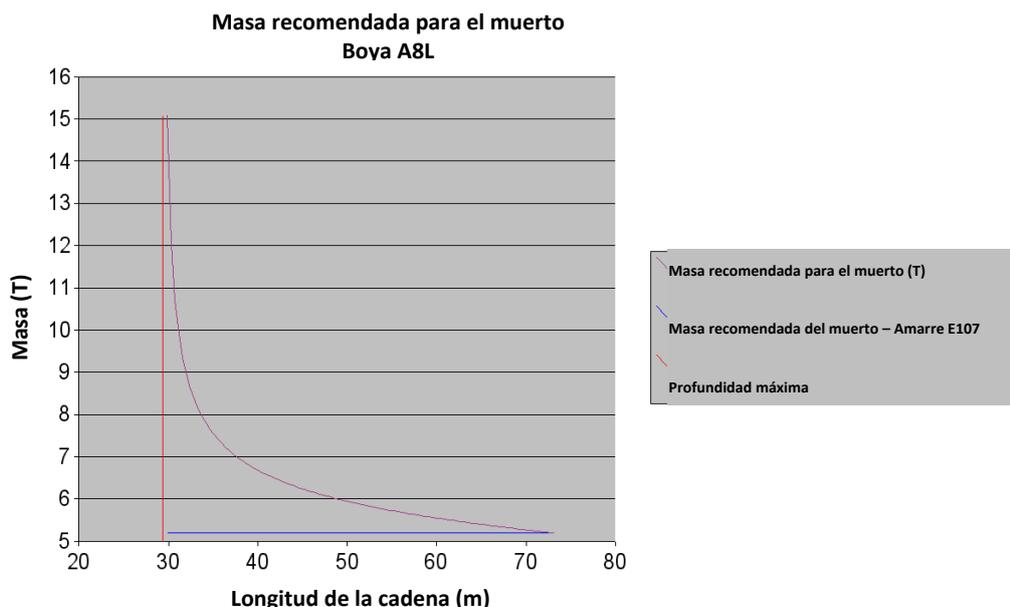


Figura 39 *Masa del muerto*

En cuanto a la masa recomendada para el muerto, véase el apartado 3.3.2 "Peso del Muerto".

Figura 39, se muestra que los amarres tensos necesitan muertos más pesados.

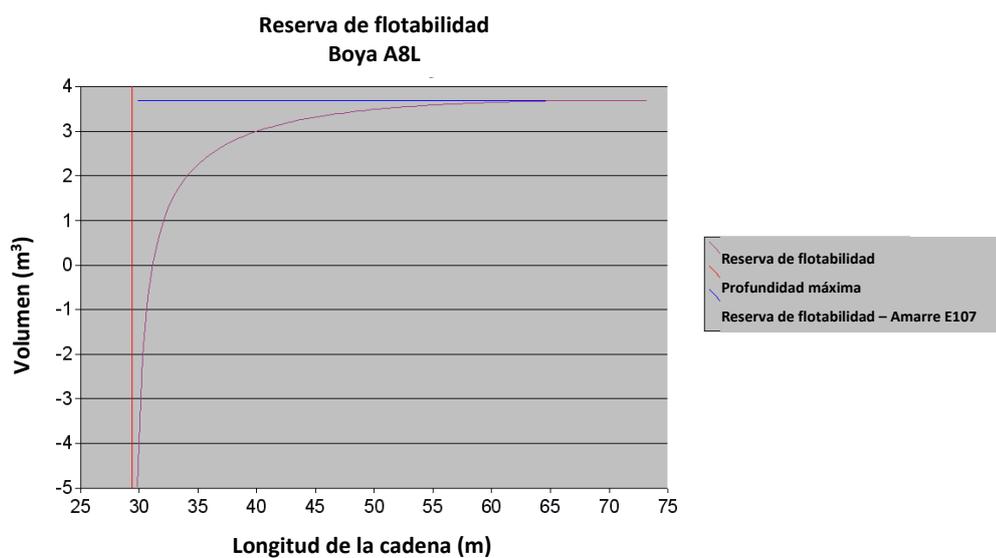


Figura 40 Reserva de flotabilidad

De igual manera, disminuir la longitud de la cadena da lugar a una reducción en la reserva de flotabilidad, por lo que se debe tener en cuenta durante la fase de diseño. En algunos casos, podría ser necesario elegir una boya de mayor tamaño.

ANNEX D DETALLES DEL MUERTO

D 1 MUERTO CON BASE CUADRADO

Son más fáciles de fabricar, pero no se recomiendan en zonas de corrientes rápidas.

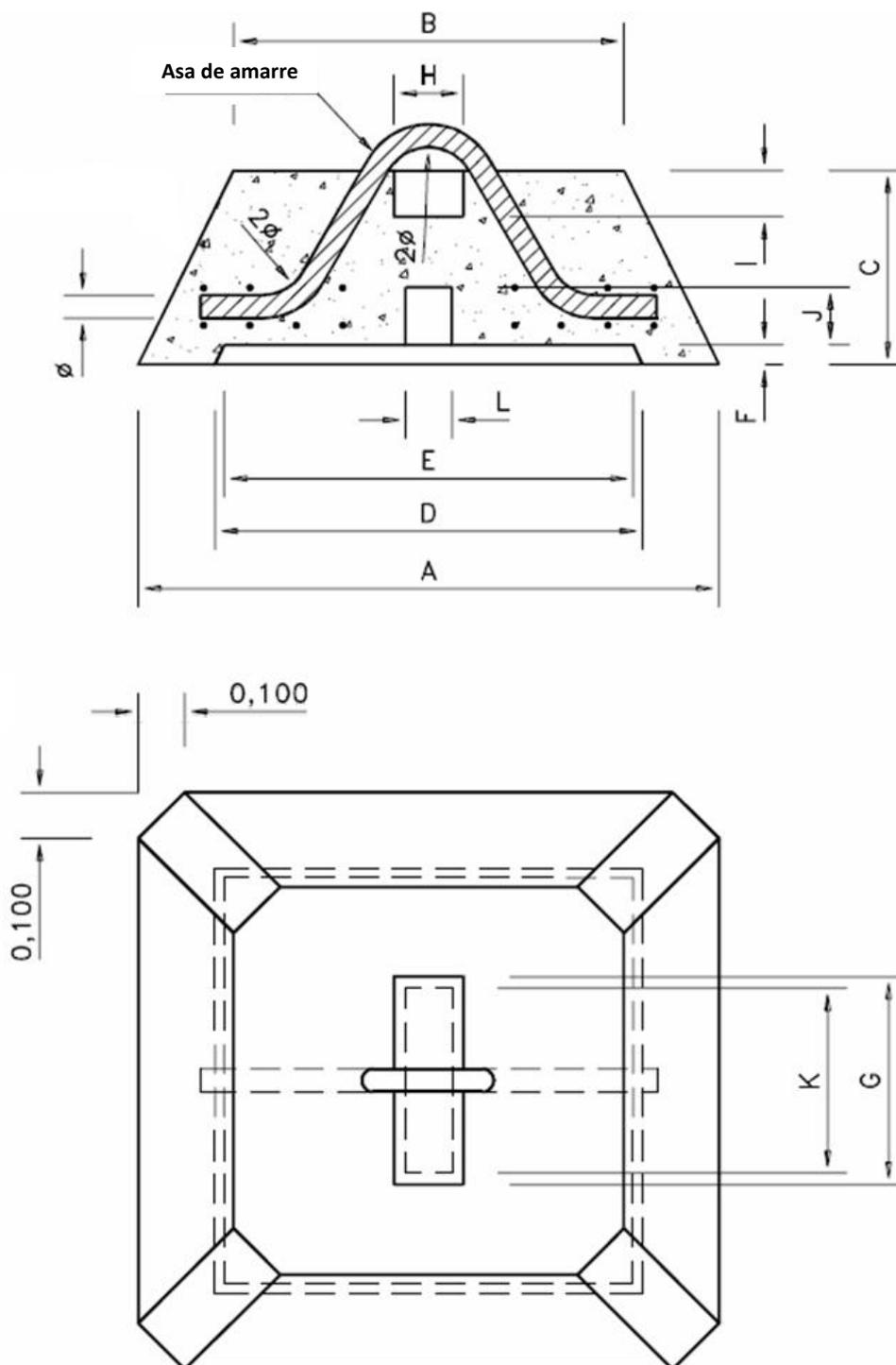


Figura 41 *Muerto cuadrado de hormigón*

Tabla 4 Dimensiones del muerto de hormigón

M	Masa del muerto	500 kg	1.000 kg	2.000 kg	3.000 kg	4.000 kg	6.000 kg
A	Lado de la base grande	100 cm	125 cm	155 cm	175 cm	190 cm	215 cm
B	Lado de la base estrecha (=2A/3)	66,7 cm	73,3 cm	86,7 cm	106,7 cm	133,3 cm	153,3 cm
C	Altura del muerto (=A/3)	33,3 cm	41,7 cm	51,7 cm	58,3 cm	63,3 cm	71,7 cm
D	Base de la cavidad de succión (=22A/30)	73,3 cm	91,7 cm	113,7 cm	128,3 cm	139,3 cm	157,7 cm
E	Techo de la cavidad de succión (=21A/30)	70 cm	87,5 cm	108,5 cm	122,5 cm	133 cm	150,5 cm
F	Altura de la cavidad de succión (=A/30)	3,3 cm	4,2 cm	5,2 cm	5,8 cm	6,3 cm	7,2 cm
G	Longitud de reentrante para grillete (=9 φ)	36 cm	45 cm	54 cm	54 cm	54 cm	54 cm
H	Anchura de reentrante para grillete (=3 φ)	12 cm	15 cm	18 cm	18 cm	18 cm	18 cm
I	Profundidad de reentrante para grillete (=2 φ)	8 cm	10 cm	12 cm	12 cm	12 cm	12 cm
J	Altura del encaje para almacenamiento (=2,5 φ)	10 cm	12,5 cm	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm
K	Longitud del encaje para almacenamiento (=8 φ)	32 cm	40 cm	48 cm	48 cm	48 cm	48 cm
L	Ancho del encaje para almacenamiento (=2 φ)	8 cm	10 cm	12 cm	12 cm	12 cm	12 cm
φ	Diámetro del asa de amarre	40 mm	50 mm	60 mm	60 mm	60 mm	60 mm
	Masa de acero incorporado (incluidos cadena de chatarra y el asa de amarre)	50 kg	100 kg	300 kg	500 kg	800 kg	1400 kg
P	Peso del muerto en el agua	2.500 N	4.000 N	6.500 N	13.000 N	26.500 N	39.000 N

D 2 MUERTO CON BASE CIRCULAR

Son más difíciles de fabricar, pero son aptos para zonas de corrientes rápidas

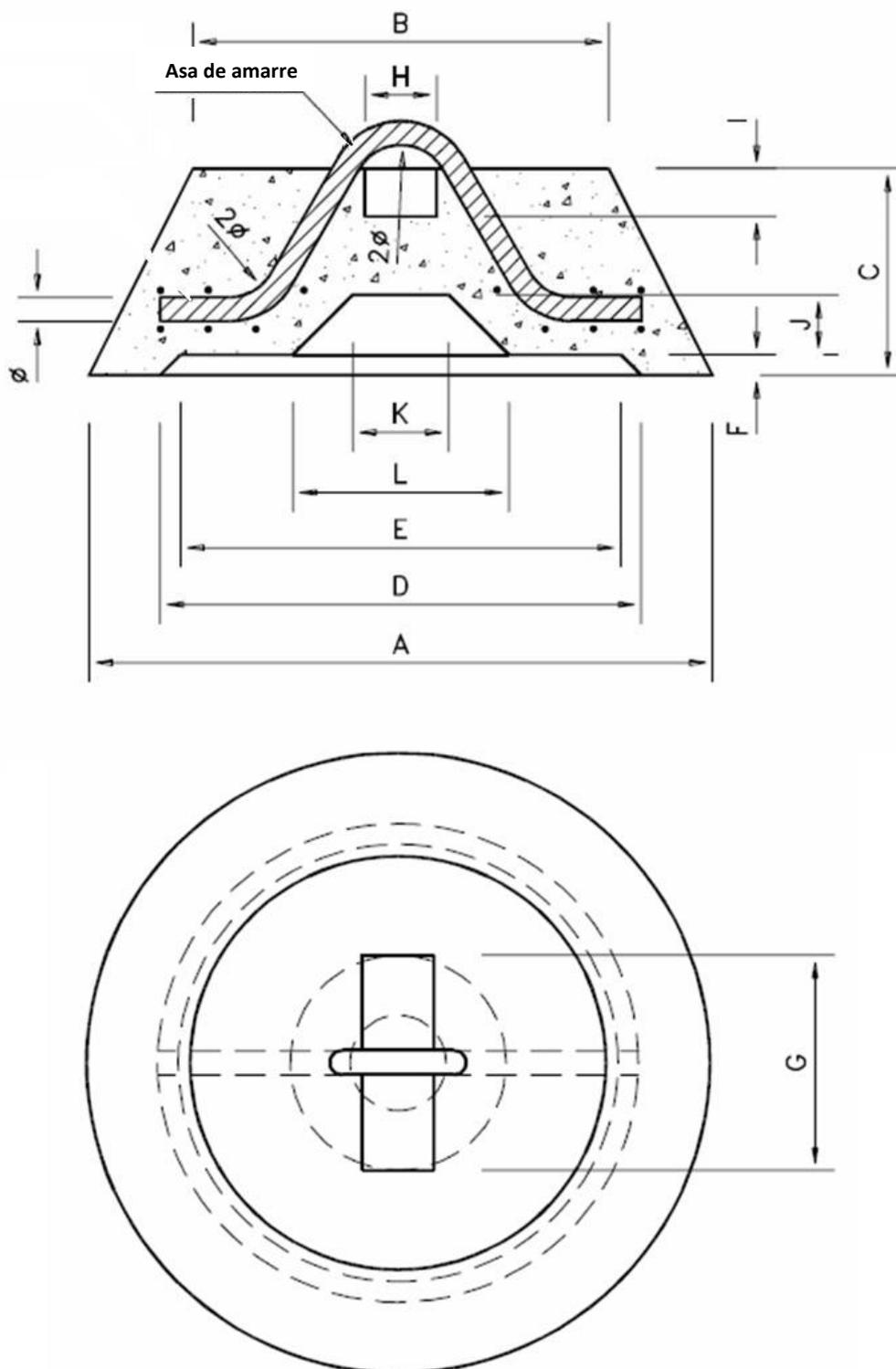


Figura 42 Muerto circular de hormigón

Tabla 5 Dimensiones del muerto de hormigón

M	Masa del muerto	400 kg	600 kg	1.000 kg	2.000 kg	4.000 kg	6.000 kg
A	Diámetro de la base	100 cm	110 cm	130 cm	160 cm	200 cm	230 cm
B	Diámetro superior (=2A/3)	66,7 cm	73,3 cm	86,7 cm	106,7 cm	133,3 cm	153,3 cm
C	Altura del muerto (=A/3)	33,3 cm	36,7 cm	43,3 cm	53,3 cm	66,7 cm	76,7 cm
D	Diámetro grande de la cavidad de succión (=22A/30)	73,3 cm	80,7 cm	100,3 cm	122,3 cm	151,7 cm	173,7 cm
E	Diámetro estrecho de la cavidad de succión (=21A/30)	70 cm	77 cm	91,7 cm	111,7 cm	138,3 cm	158,3 cm
F	Altura de la cavidad de succión (=A/30)	3,3 cm	3,7 cm	4,3 cm	5,3 cm	6,7 cm	7,7 cm
G	Longitud de reentrante para grillete (=9 ϕ)	36 cm	36 cm	45 cm	54 cm	54 cm	54 cm
H	Anchura de reentrante para grillete (=3 ϕ)	12 cm	12 cm	15 cm	18 cm	18 cm	18 cm
I	Profundidad de reentrante para grillete (=2 ϕ)	8 cm	8 cm	10 cm	12 cm	12 cm	12 cm
J	Altura del encaje para almacenamiento (=2,5 ϕ)	10 cm	10 cm	12,5 cm	15 cm	15 cm	15 cm
K	Diámetro superior del encaje para almacenamiento	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm
L	Diámetro inferior del encaje para almacenamiento (=K+2J)	40 cm	40 cm	45 cm	50 cm	50 cm	50 cm
	Diámetro del asa de amarre	40 mm	40 mm	50 mm	60 mm	60 mm	60 mm
	Masa de acero incorporado (incluidos cadena de chatarra y el asa de amarre)	50 kg	150 kg	250 kg	600 kg	1200 kg	1600 kg
P	Peso del muerto en el agua	2.500 N	4.000 N	6.500 N	13.000 N	26.500 N	39.000 N

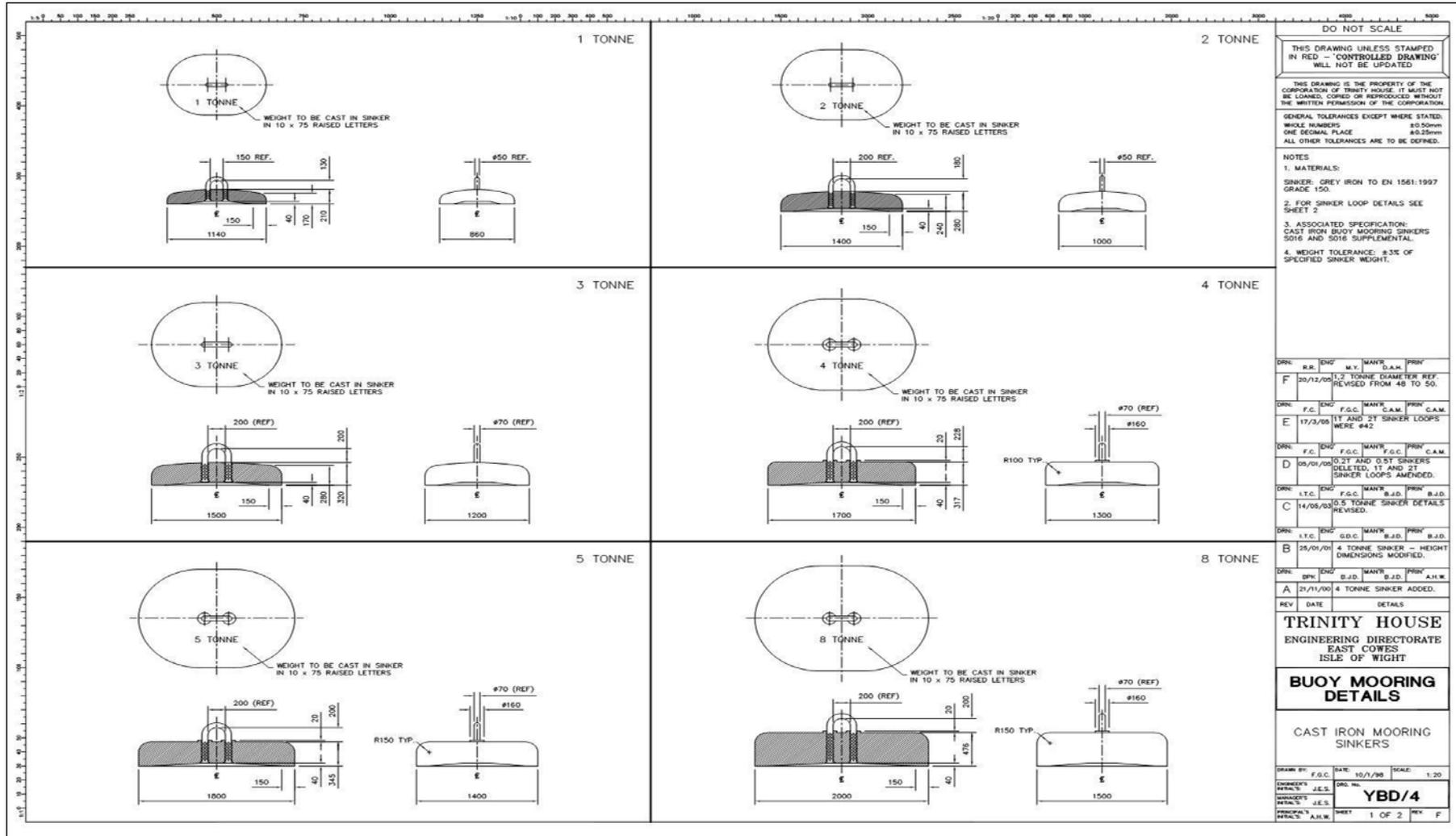


Figura 43 Muertos de hierro fundido

ANNEX E **DETALLES DEL SISTEMA DE AMARRE CON CABO UTILIZADO POR LA GUARDIA COSTERA CANADIENSE**

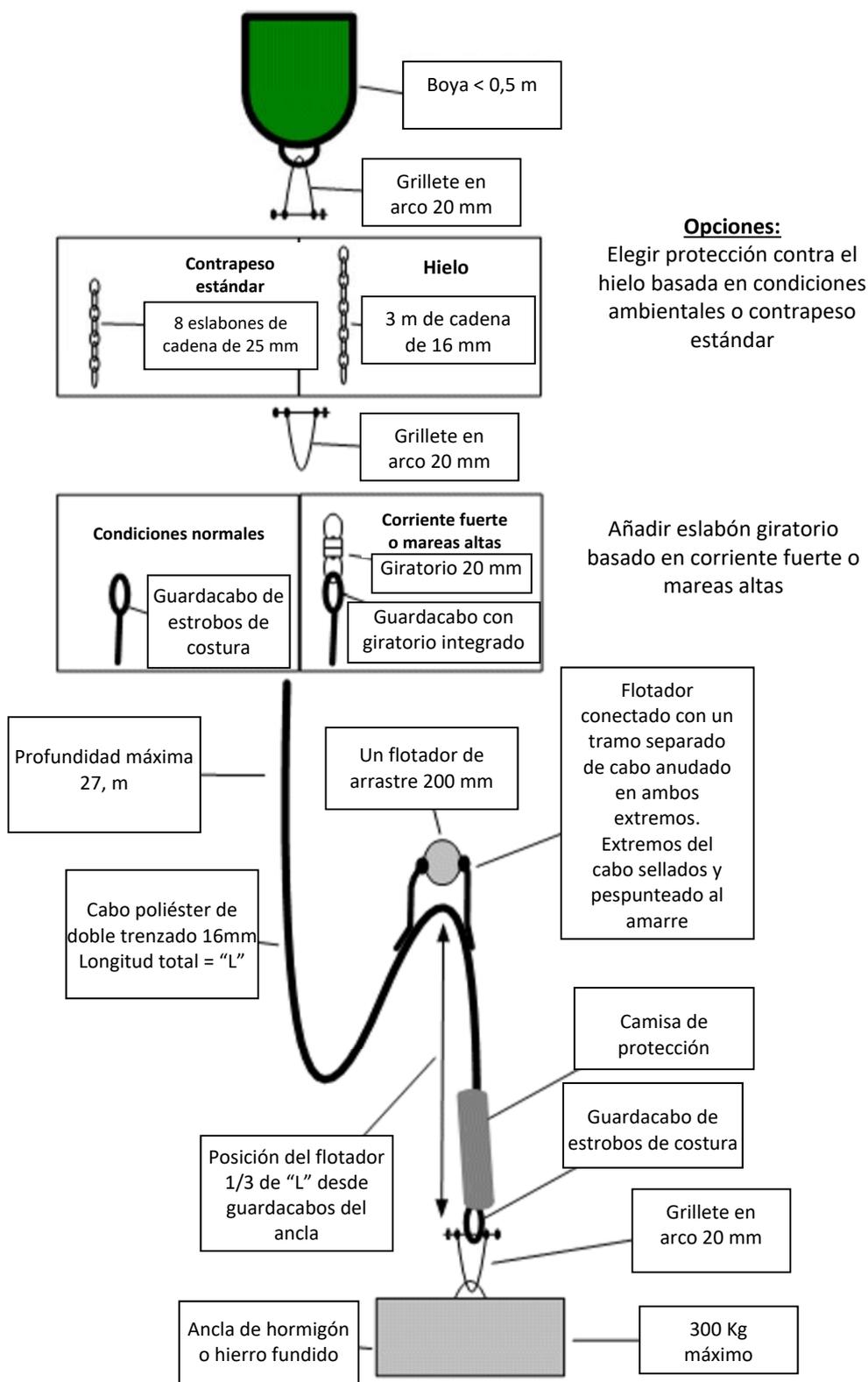


Figura 44 *Amarres de cabo de la Guardia Costera Canadiense para boyas de 0,5 m*