

Modelización y diseño de un sensor de amarras y defensas, y de una estructura para la realización de ensayos de modelos de buques atracados

JOSE BUENO PEREZ (*)
JAVIER ALEIXANDRE CAMPOS (*)
JAIME TAMARIT RODRIGUEZ (*)

RESUMEN. Este artículo describe la modelación, diseño y construcción de los sensores de defensas y amarras que se utilizan en los ensayos de modelos de buques atracados en el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX. Asimismo se hace una descripción de la estructura que se ha diseñado para la realización de los mismos.

MODELLING AND DESIGN OF A MOORINGS AND DEFENCE SENSOR, AND OF A STRUCTURE TO CARRY OUT TESTS ON DOCKED SHIP MODELS

ABSTRACT. This article describes the modelling, design and building of moorings and defence sensors used in tests in docked ship models at the CEDEX Ports and Coasts Studies Centre. It includes a description of the structure designed for carrying out these tests.

Palabras clave: Sensor; Modelo físico; Atraque de buques; Diseño.

1. INTRODUCCION

El Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX solicitó del Sector de Técnicas Físicas los siguientes encargos para la realización de ensayos de modelos de buques atracados:

- Por una parte, un tipo de sensor que modelizara las defensas y amarras existentes en los puertos y buques reales, así como que midiera con precisión los esfuerzos en las mismas.
- Por otra, una estructura portable que integrara todos los sensores que se utilizan en este tipo de ensayos y facilitara la realización de los mismos.

Asimismo, para alimentar a los sensores y amplificar y filtrar la señal generada en los mismos, unos acondicionadores de señal de altas prestaciones que se han diseñado en el Laboratorio de Físicas, así se obtiene una señal de alto nivel sin ruidos que puede ser leída por un equipo de toma de datos.

A continuación se comentan los cálculos, diseño y detalles de construcción que aportó la propia experimentación hasta llegar al modelo final de los sensores.

2. DISEÑO DE LOS SENSORES

De reuniones establecidas con los especialistas del Centro de Estudios y Costas se indican los siguientes órdenes de magnitud para el sensor:

Coefficientes de rigidez:

Amarras: 5 - 30 gr/cm
Defensas: 150 - 1.000 gr/cm

Fuerzas máximas:

Amarras: 30 - 100 gramos
Defensas: 70 - 250 gramos

2.1. PRINCIPIOS GENERALES

Desde el primer momento se piensa en una pletina de acero que tiene un extremo empotrado y el otro queda libre, la

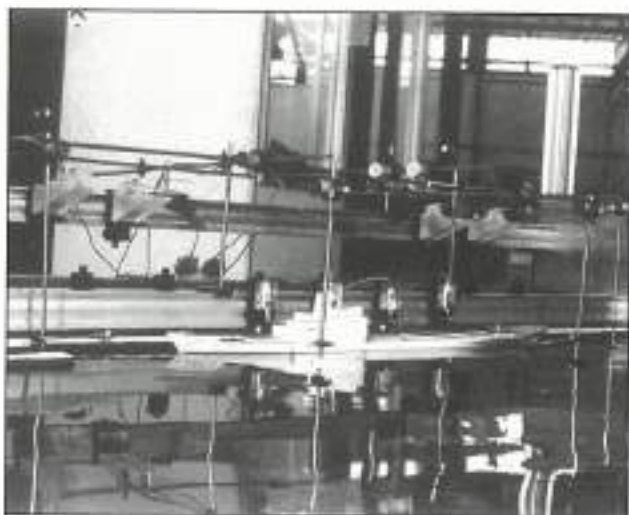


FOTO 1. Vista general de la estructura.

(*) Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. Sector de Técnicas Físicas. CEDEX.

rigidez de la misma es función de la longitud de la pletina (varía con el cubo de la distancia).

Una vez elegida la pletina para conseguir la rigidez, el esfuerzo se mide por medio de unas galgas pegadas en la propia pletina lo más cerca del extremo empotrado, que miden el momento flector. Las galgas forman un puente completo que se alimenta y amplifica por medio de un acondicionador de señal diseñado en el propio Laboratorio del Sector de Técnicas Físicas.

El sensor se calibra para relacionar un esfuerzo perpendicular a la pletina en el extremo libre de la misma, con un puente flector, que desequilibra el puente y se obtiene una señal eléctrica en voltios, medible por un equipo automático de toma de datos.

Para el rango de esfuerzos máximos la medida es lineal y repetitiva, ya que se trabaja dentro de la zona elástica del sensor; por otra parte el puente completo permite compensar cualquier tipo de variación de temperaturas en la realización de los ensayos.

La linealidad y estabilidad del acondicionador de señal utilizado está asegurada por los circuitos integrados de altas prestaciones que incorpora el diseño del mismo.

2.2. MODELIZACIÓN

Si aplicamos un esfuerzo P en el extremo libre de la varilla empotrada (de sección rectangular), se obtiene que rige la siguiente ecuación diferencial para la elástica (suponiendo el peso de la pletina despreciable), al ser una flexión pura:

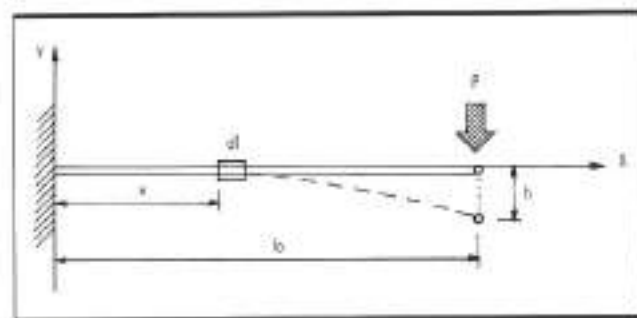


FIGURA 1.

$$\frac{d\theta}{dl} = \frac{M_f}{EI} = \frac{1}{\rho}$$

$$\rho = \frac{(1 + (y')^2)^{3/2}}{y''}$$

$$M_f = P(l_0 - x)$$

donde:

M_f : Momento flector.

E : Módulo de elasticidad o módulo de Young.

I : Momento de inercia de la sección respecto eje z .

$1/\rho$: Curvatura de la directriz.

h : Desviación del extremo al aplicar el esfuerzo P .

En primera aproximación $y' = 0$, y podemos estimar las longitudes de las pletinas para las rigideces de entrada, suponiendo unas pletinas disponibles de sección rectangular de diferente espesor. Se obtienen las siguientes ecuaciones:

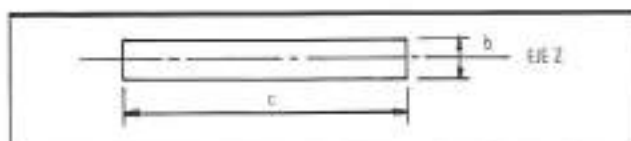


FIGURA 2.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{P(l_0 - x)}{EI}$$

$$h = \frac{Pl^3}{3EI} \quad I = \frac{b^3c}{12}$$

$$\text{rigidez} = \frac{P}{h} = rx$$

$$3EI = rx(lx)^3 = ry(l_y)^3$$

Con las siguientes dimensiones de la sección de la pletina y para un acero de módulo de elasticidad ($E = 2,1 \times 10^5 \text{ kg/cm}$):

ancho	$c = 1,27 \text{ cm}$
espesor pletina fina	$b = 0,03 \text{ cm}$
espesor pletina gruesa	$b = 0,05 \text{ cm}$

se obtienen las siguientes longitudes de pletinas en cm.

DEFENSAS:

Rigidez	fina	gruesa
150:	4,9	8,2
1.000:	2,6	4,3

AMARRAS:

Rigidez	fina	gruesa
5:	15,3	25,5
30:	8,4	14,1

De estos cálculos preliminares obtenemos unas longitudes de pletina para obtener las rigideces deseadas. Se deduce que para las defensas interesa la pletina gruesa, mientras para las amarras va mejor la pletina que hemos llamado fina.

Para estudiar de forma teórica el sensor, se ha realizado un programa en quickbasic, que resuelve la ecuación diferencial de la elástica con un Runge-Kutta de 4.º orden; de esta forma podemos obtener con mayor precisión la distancia recorrida por el sensor en el punto de aplicación de la fuerza y el momento flector para una fuerza determinada.

Para los valores máximos de esfuerzos admisibles, se obtiene la linealidad del momento flector medida en el extremo empotrado de la varilla y el coeficiente de rigidez equivalente de la misma para diferentes esfuerzos dentro del rango de medida.

La ecuación diferencial viene dada por:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \left[\frac{P(l_0 - x)}{EI} \right] \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}$$

y tiene que cumplir en el extremo empotrado:

$$\begin{aligned} x &= 0 \\ y &= 0 \\ y' &= 0 \end{aligned}$$

La ecuación diferencial se convierte en un sistema de ecuaciones que resolvemos con el siguiente método:

$$\frac{dy}{dx} = z$$

$$\frac{dz}{dx} = \frac{P(l_0 - x)}{EI} [1 + z^2]^{\frac{3}{2}}$$

$$dl = \sqrt{(dx^2 + dy^2)} = dx\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = h\sqrt{1 + z^2}$$

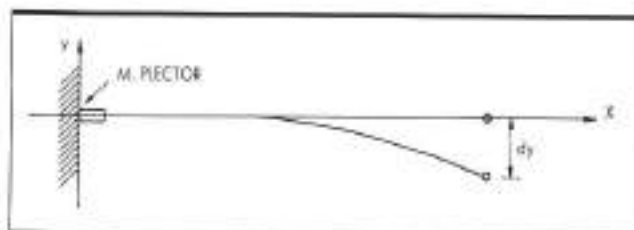


FIGURA 3.

que debe cumplir en $x = 0$; $y = 0$; $z = 0$.

Se calculan los valores ($y = f(x)$) de la elástica y se termina de integrar la ecuación cuando se llega al extremo libre de la varilla ($l_0 =$ longitud total de la varilla). Esto se realiza para diferentes esfuerzos.

Sistema de ecuaciones:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y, z)$$

$$\frac{dz}{dx} = g(x, y, z)$$

Runge-Kuta 4.º orden:

$$K11 = f(x_i, y_i, z_i)$$

$$K12 = g(x_i, y_i, z_i)$$

$$y_{i+1/2} = y_i + \frac{1}{2} h K11 \rightarrow K21 = f(x_i + \frac{1}{2} h; y_{i+1/2}; z_i)$$

$$z_{i+1/2} = z_i + \frac{1}{2} h K12 \rightarrow K22 = g(x_i + \frac{1}{2} h; y_{i+1/2}; z_{i+1/2})$$

$$y_{i+1/2} = y_i + \frac{1}{2} h K21 \rightarrow K31 = f(x_i + \frac{1}{2} h; y_{i+1/2}; z_{i+1/2})$$

$$z_{i+1/2} = z_i + \frac{1}{2} h K22 \rightarrow K32 = g(x_i + \frac{1}{2} h; y_{i+1/2}; z_{i+1/2})$$

$$y_{i+1/2} = y_i + \frac{1}{2} h K31 \rightarrow K41 = f(x_i + h; y_{i+1/2}; z_{i+1/2})$$

$$z_{i+1/2} = z_i + \frac{1}{2} h K32 \rightarrow K42 = g(x_i + h; y_{i+1/2}; z_{i+1/2})$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6} h (K11 + 2(K21 + K31) + K41)$$

$$z_{i+1} = z_i + \frac{1}{6} h (K12 + 2(K22 + K32) + K42)$$

Como ejemplo de cálculos teóricos se dan en las dos páginas siguientes los resultados obtenidos para una defensa tipo:

Dimensiones pletina: $c = 1,27$ cm
 $b = 0,05$ cm

Rigidez aproximada = 150 gr/cm
 Longitud de la pletina = 8,2 cm
 Esfuerzo máximo = 250 gr

Se observa la linealidad para el momento flector en todo el rango de esfuerzos de medida y la rigidez equivalente constante en todo el rango.

Momento flector = pendiente1 * Esfuerzo + cero1

Por lo que podemos relacionar los esfuerzos en el punto de aplicación del sensor como proporcionales a la señal en voltios registrada por el acondicionador.

Esfuerzo = pendiente2 * Desplazamiento + cero2

De aquí obtenemos que en el rango de medida del sensor la pendiente2 o rigidez equivalente es constante.

PUENTE DE MEDIDA: Para traducir el momento flector que queremos medir en una señal eléctrica, utilizamos unas galgas extensométricas que se pegan sobre la pletina en el sitio donde se quiere medir.

Se utilizan cuatro galgas, dos pegadas sobre la cara superior y otras dos sobre la inferior de la pletina, de forma que se completa el puente y se realizan las conexiones de tal manera que las dos galgas de la cara superior formen dos ramas opuestas del puente y las otras dos galgas de la otra cara las otras dos ramas opuestas del puente.

De esta forma se mide flexión pura y se suman los efectos de la flexión sobre el desequilibrio del puente, ya que si una cara trabaja a tracción, la otra lo hace a compresión y se suman sus efectos.

Las deformaciones en las caras de la pletina que siguen las galgas son proporcionales a las tensiones en las mismas, y éstas al momento flector.

Al formar un puente completo se compensan los efectos que una variación de temperatura exterior provoca en las galgas.

El esquema es el siguiente:

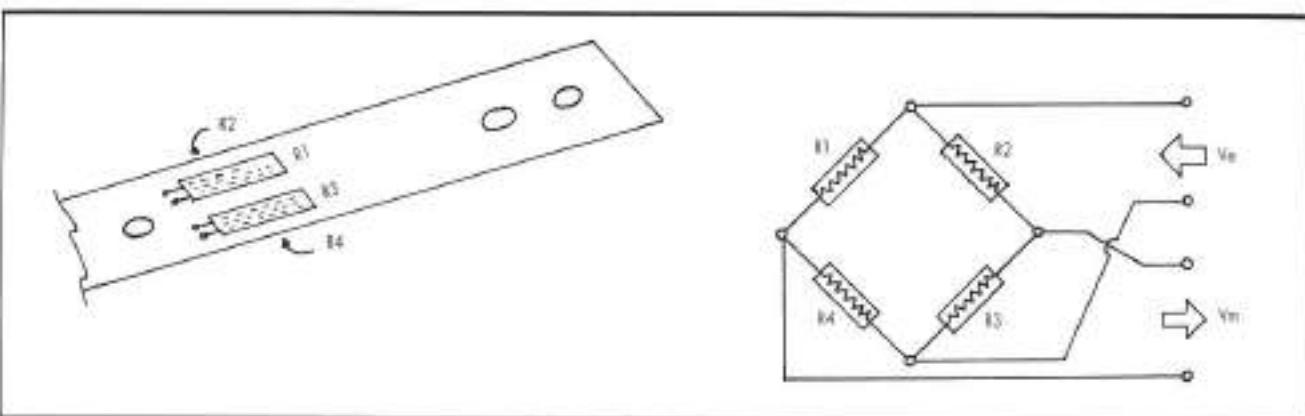
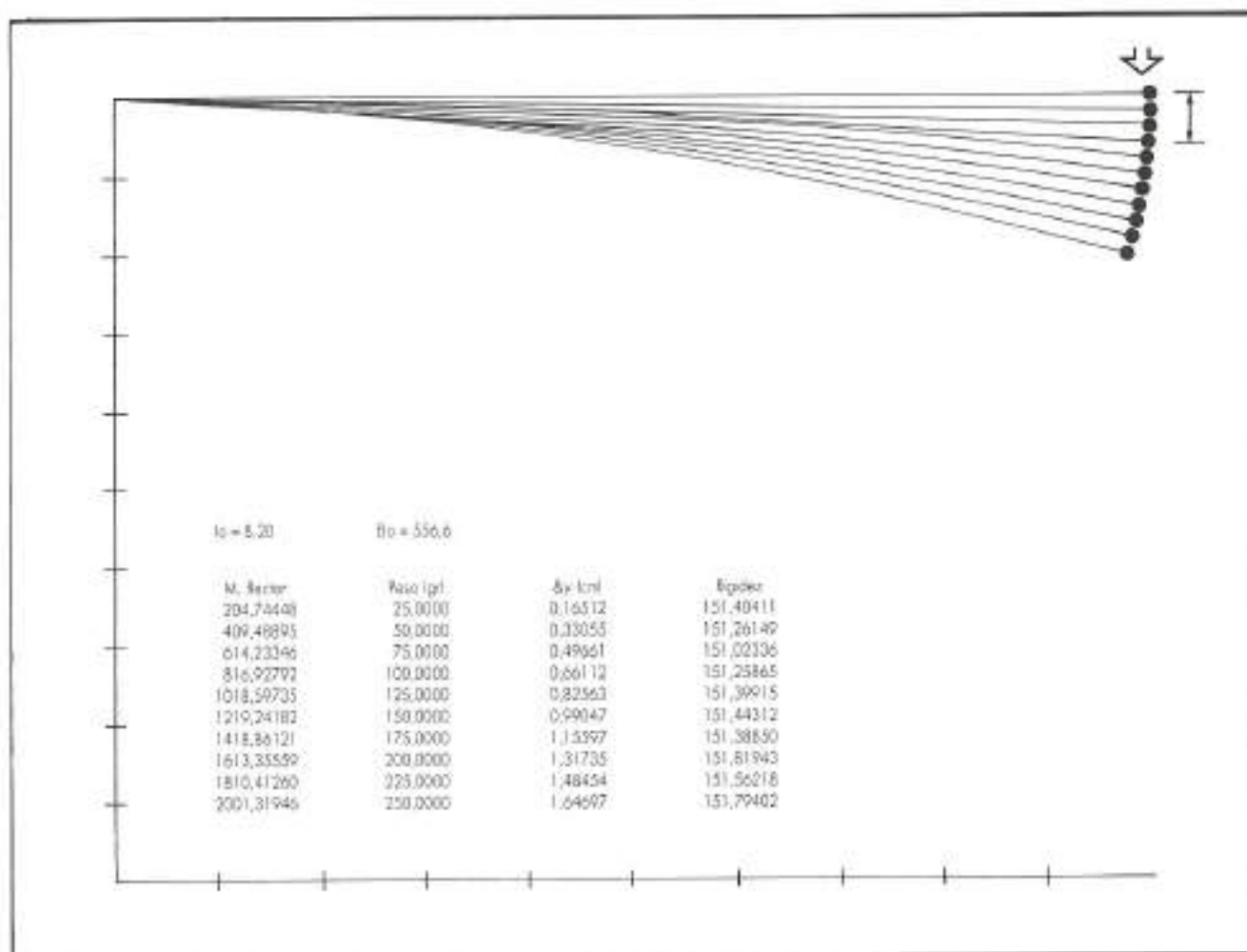


FIGURA 4.



Resultados de la integración de la ecuación diferencial.

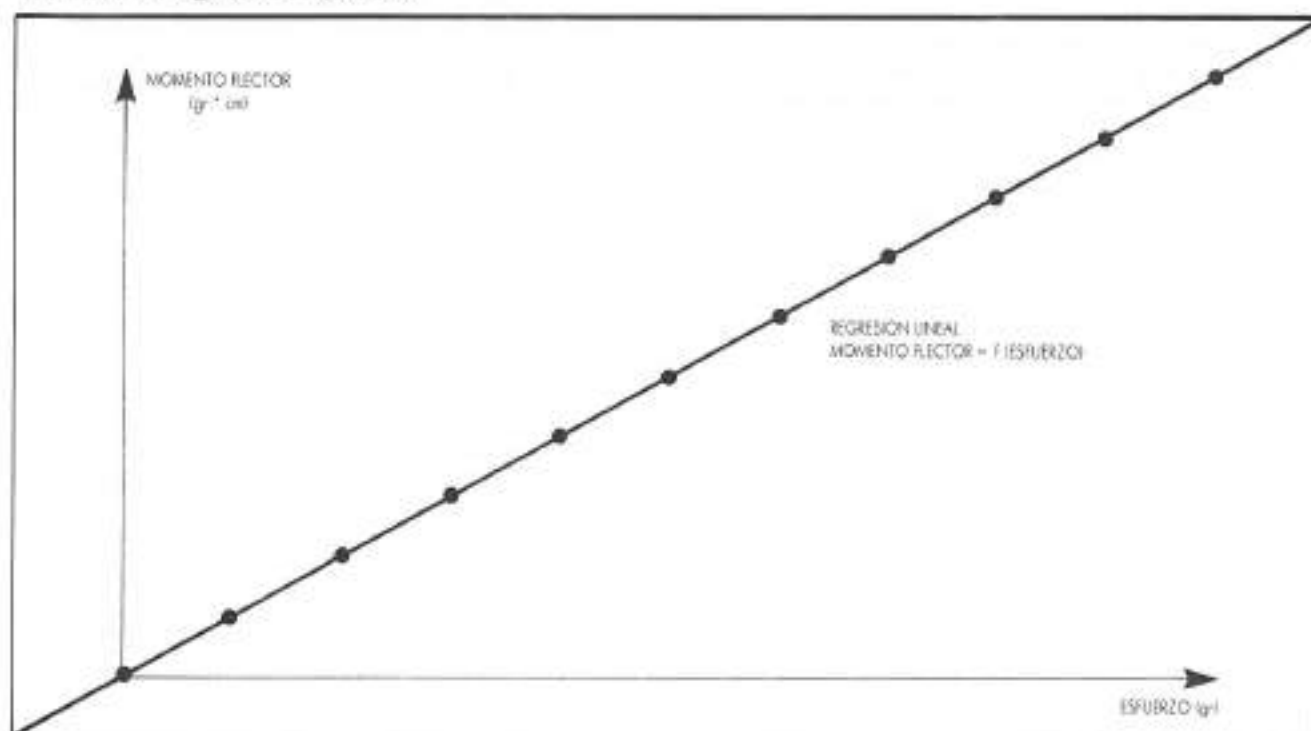
	ESFUERZOS	MÓMENTO FLECTOR
1	25	204,7445
2	50	409,489
3	75	614,2335
4	100	816,9279
5	125	1,018,597
6	150	1,219,242
7	175	1,418,861
8	200	1,613,356
9	225	1,810,413
10	250	2,001,319

Nombre fichero: mf.dat.

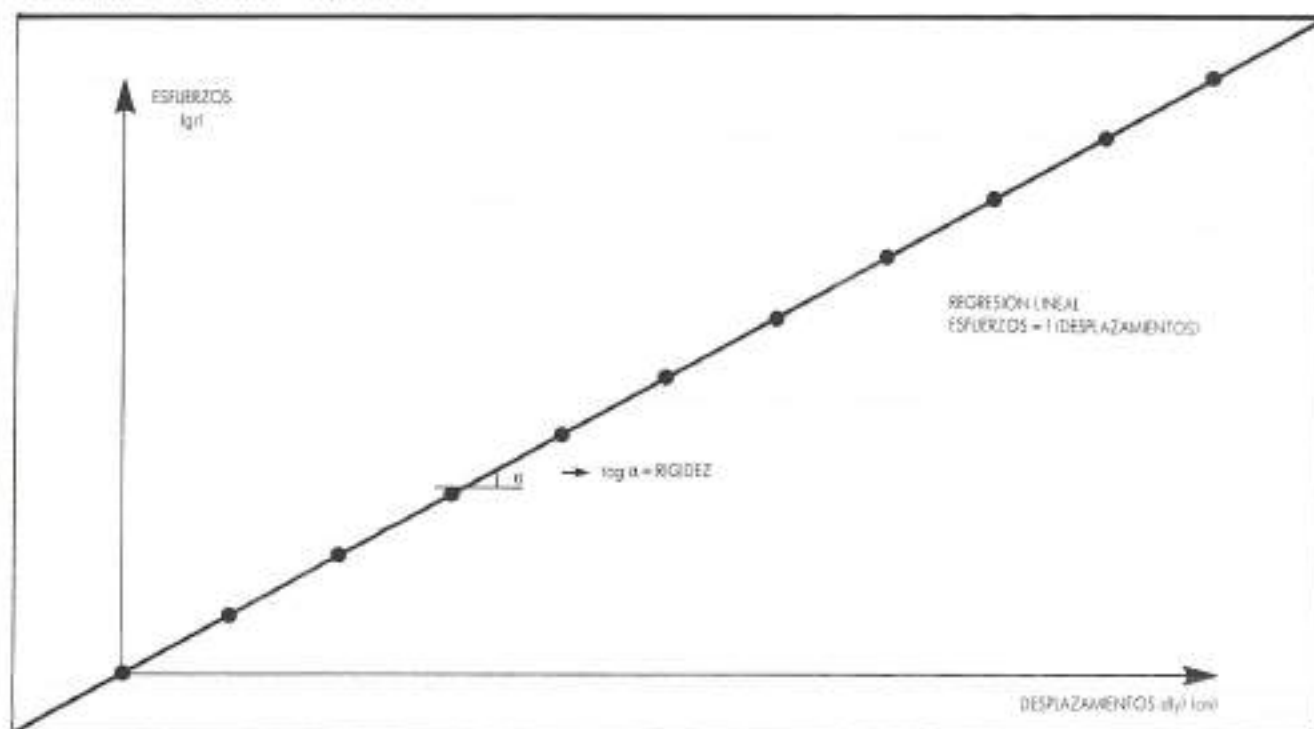
	Δy	ESFUERZOS
1	0,165121	25
2	0,3305534	50
3	0,4966119	75
4	0,6611192	100
5	0,8256321	125
6	0,9904709	150
7	1,155966	175
8	1,317354	200
9	1,484539	225
10	1,646969	250

Nombre fichero: rf.dat.

13.46157 * X^0 : cero1
 7.994594 * X^1 : pendiente1
 Error cuadrático = 6,17373
 Coeficiente de regresión = 0,9998214



-0,2795928 * X^0 : cero1
 151.8343 * X^1 : pendiente1
 Error cuadrático = 0,1760999
 Coeficiente de regresión = 0,9999909



Tras realizar unos primeros ensayos en la nave con estos sensores, se obtuvieron unos resultados excelentes en cuanto a linealidad, repetitividad, etc., y se vio la necesidad de modificar el diseño del sensor para tener en cuenta las siguientes anotaciones:

- En cuanto a las amarras, para poder conseguir las rigideces deseadas se exigía una pletina fina muy larga, que es una fuente de problemas en cuanto a vibraciones del sensor.
- Aparece a lo largo del tiempo óxido en la bola de acero que se pegó en el extremo de las defensas, al mismo tiempo que aparece también en las soldaduras y en la propia pletina.
- Los acondicionadores de señal están sobrados en cuanto a ganancia se refiere (400-12.800), ya que no hay que amplificar mucho para obtener una señal no saturada (800).

De estas primeras experiencias se realiza un rediseño del sensor que resuelve todos los problemas anteriores, y cuya filosofía consiste en realizar un elemento sensor base muy compacto.

El elemento sensor está construido sobre una pletina de acero sobre el que están pegadas las galgas. Toda la zona de

soldaduras queda protegida ya que está sellada con pasta impermeable y el propio elemento sensor se protege con un barniz antióxido.

Al elemento sensor se le puede conectar un suplemento diferente según se utilice el sensor como amarra (varilla de sección circular de diferentes diámetros) o como defensa (pletina rígida cromada).

A las defensas se le pega un pivote de metacrilato en el punto de la pletina calculado para obtener la rigidez necesaria.

Los suplementos se conectan al elemento sensor mediante tornillos y tuercas; una vez fijados se protege todo el sensor con un barniz contra humedad.

La modelización teórica para la integración de la ecuación diferencial que nos da la elástica exige ahora un cambio del momento de inercia del sensor en cuanto sobrepasamos la longitud del elemento base sensor, pasando por una zona de transición, y dejaremos de integrar la ecuación en cuanto se llega a la longitud total del sensor.

A continuación se indican los esquemas y valores utilizados para cada sensor tipo. Estos se han diseñado teniendo en cuenta las especificaciones de partida y la estructura portable donde van integrados.

2.2.1. Defensas. El esquema es el siguiente:

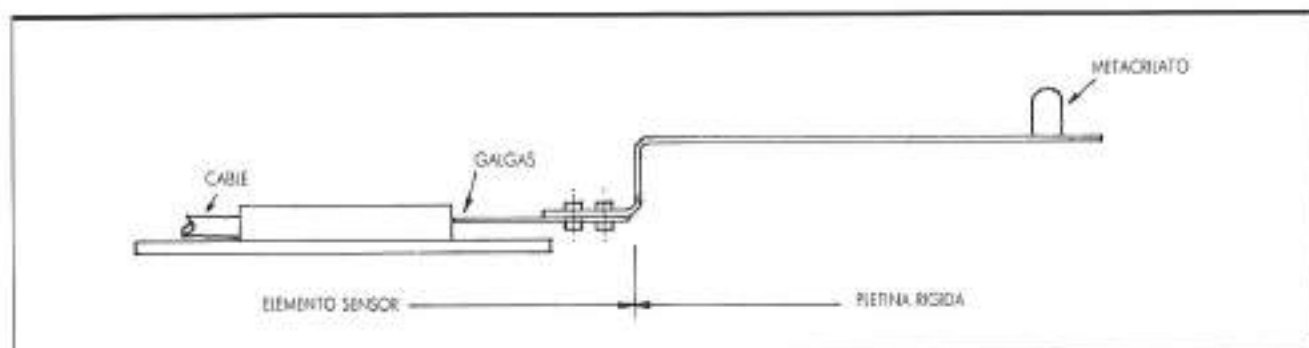


FIGURA 5.

Como suplementos se han utilizado dos pletinas rígidas (una larga y otra corta), que disponen de una curvatura para salvar el muelle. Se consiguen rigideces de 400 g/cm y mayores.

Para bajar las rigideces a valores más bajos se ha utilizado una pletina flexible (como la del elemento sensor) y cuyo esquema es el siguiente:

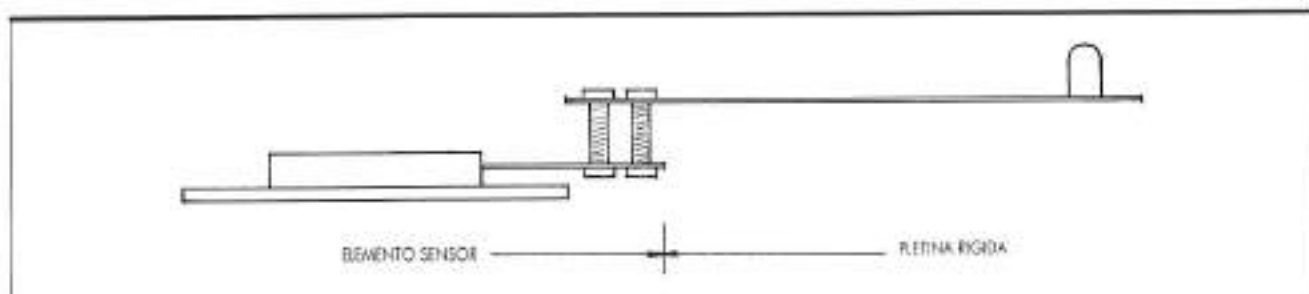


FIGURA 6.

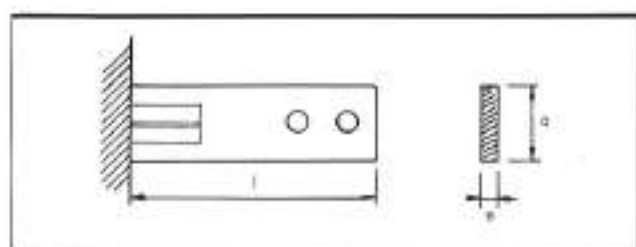


FIGURA 7.

Los valores de la pletina del elemento sensor son:

ancho = 1,27 cm
 espesor = 0,1 cm
 longitud = 3,0 cm

2.2.2. Amarras. El esquema es el siguiente:

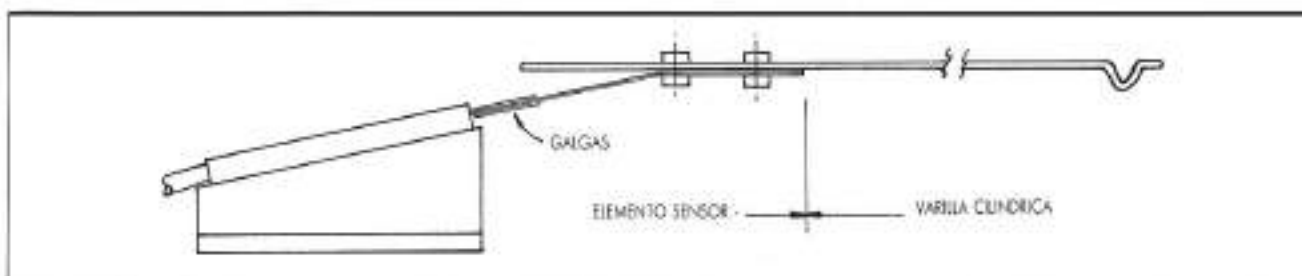


FIGURA 8.

Como suplemento se han utilizado 3 varillas de sección circular de distinto grosor, cuya longitud es de 30 cm.

varilla gruesa : 2,0 mm (diámetro)
 varilla media : 1,7 mm
 varilla fina : 1,5 mm

Los valores del elemento sensor son:

ancho = 1,27 cm
 espesor = 0,07 cm
 longitud = 4,00 cm

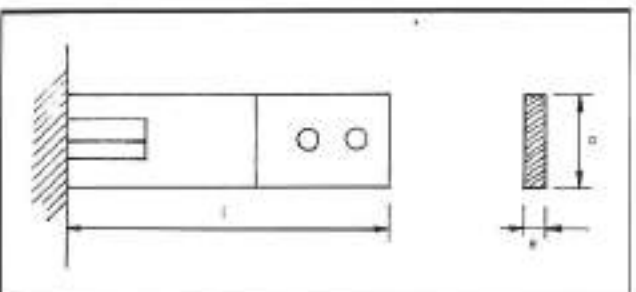


FIGURA 9.

2.6. CALIBRACION DE LAS RIGIDECES

Se han calificado las rigideces de todos los sensores tipo, tanto las diferentes defensas como las amarras en sus posiciones extremas, para conocer los límites de rigideces que podemos conseguir con un determinado sensor.

A continuación se indica un resumen:

AMARRAS:

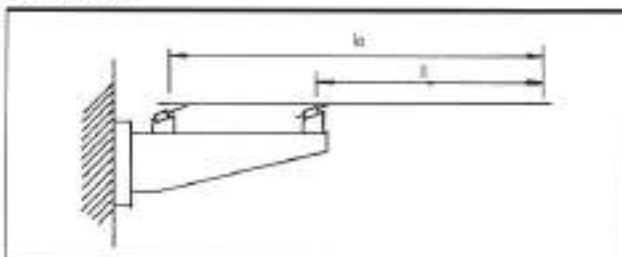


FIGURA 10.

D (mm)	Rigidez (gr/cm)	10 = 30 cm	lf = 20 cm
2,0	varilla gruesa:	12,8	- 43,2
1,7	varilla media:	6,6	- 22,5
1,5	varilla fina:	5,7	- 19,5
		4,89 (31,5 cm)	

DEFENSAS:

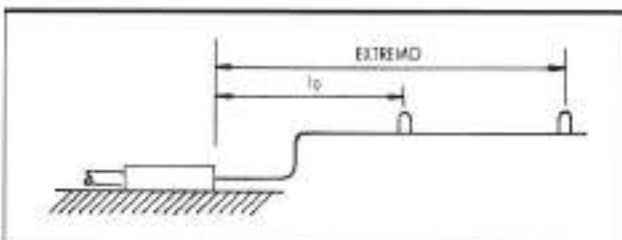


FIGURA 11.

Rigidez (gr/cm)	10 = 10,3 cm	extremo
pletina rígida larga:	1.087	- 179 (18,8 cm)
pletina rígida corta:	1.087	- 566 (12,8 cm)
pletina flexible:	339	- 135 (14,0 cm)

Partiendo de la especificación inicial de rigideces deseadas de defensas y amarras, se elige el tipo de varilla y pletina teniendo en cuenta el cuadro anterior.

Se ha diseñado un tarador para conocer con exactitud el desplazamiento generado al aplicar un peso determinado.

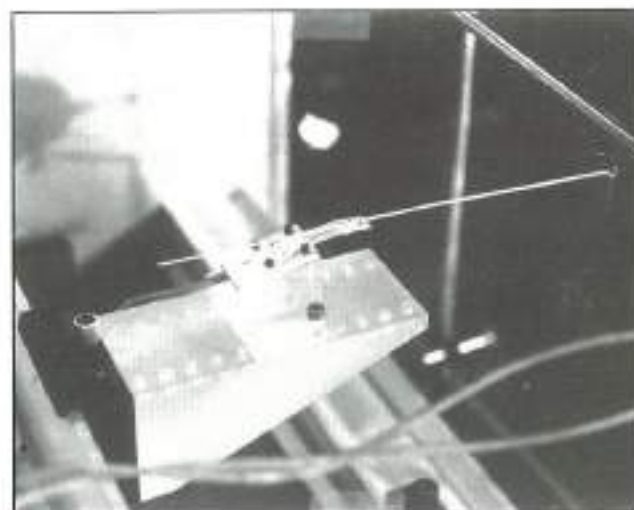


FOTO 2. Sensor de amarra y soporte.

3. ESTRUCTURA DE ENSAYO PARA BUQUES ATRACADOS

La estructura de ensayo de buques atracados se ha diseñado de acuerdo a las siguientes especificaciones:

- Modelos de buques de eslora máxima 2,2 metros.
- La estructura debe poder utilizarse también en muelles especiales como espigones o zonas de atraque especiales.
- Debe admitir todos los sensores de medida que se utiliza en este tipo de ensayos:
 - Defensas.
 - Amarras.
 - Medida de los movimientos del buque.
- La estructura debe ser portable con todos los sensores, para ser fácil de trasladar al ensayar un mismo modelo en distintas zonas de atraque.
- Las defensas deben poder situarse en la vertical deseada para admitir diferentes estados de mareas o condiciones de carga.
- La pretensión de las amarras se debe poder ajustar con facilidad en cada ensayo.
- Todos los sensores que modelizan el atraque deben poder colocarse en los puntos adecuados de la estructura para poder modelizar el mismo lo mejor posible y así adaptarse a cada forma de atraque y modelo de buque y muelle.

La estructura se ha diseñado con perfiles que permiten integrar unos módulos donde van situados los sensores.

Los perfiles son de aluminio y montados de tal forma que se ha creado una estructura muy estable, rígida e inoxidable.

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

El diseño de la estructura se ha realizado para el estudio del atraque de buques de eslora máxima 220 cm, en modelos reducidos de puertos, y permite la situación de 8 potenciómetros (u otro tipo de sensor) para la medida de los movimientos del buque, 6 sensores para medir los esfuerzos en las amarras y 5 para los esfuerzos en defensas.

El conjunto soporte, cuyo esquema se da en la figura 1, es un paralelepípedo de 50*50*280 cm, constituido por dos planchas de acero inoxidable en sus extremos, unidos por dos perfiles longitudinales indeformables de duraluminio y dos barras también longitudinales de acero inoxidable. Sobre las planchas de acero se han montado dos perfiles verticales de 100 cm de duraluminio, que pueden deslizarse en sus anclajes y que una vez fijos a la altura necesaria, permiten mantener la estructura horizontal sobre diversos tipos de muelle. Para evitar el pandeo y vibraciones en las barras de acero inoxidable longitudinales se han situado cuatro soportes que se apoyan sobre los perfiles de duraluminio, en cualquier punto de su longitud.

Situación de los potenciómetros. Los 8 potenciómetros se fijan a cinco barras transversales, unidas mediante «nueces» a las dos barras longitudinales, como se ve en la figura 2.

Situación de los sensores de amarras. Para cada uno de los 6 sensores de amarras, la estructura dispone de un soporte de sensor y de una polea orientable, que simula el bolardo del muelle. Esta polea se sitúa en el punto deseado mediante una escuadra que se fija a la cara posterior del perfil inferior de duraluminio.

El soporte del sensor correspondiente consta de dos prismas de metacrilato, que pueden acoplarse en distintas posiciones, para compensar la diferencia de longitud de varilla, obtenida en el ajuste de la rigidez del sensor. El prisma de mayor tamaño va sujeto a una plataforma que se desliza verticalmente mediante un tornillo micrométrico para ajustar la pretensión en las amarras y esta plataforma a un soporte que desliza por el perfil superior de duraluminio, con lo que se puede fijar el extremo del sensor, sobre la vertical a su polea.

Situación de los sensores de defensas. Sobre la cara exterior del perfil inferior, se pueden anclar 5 soportes en cualquier punto de su longitud. Sobre cada soporte se fijan los sensores a través de plataformas que pueden deslizarse verticalmente mediante un tornillo micrométrico con objeto de ajustar la defensa según el nivel de agua en el muelle.

BIBLIOGRAFÍA

- Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX). «Ensayos en modelo físico de los muelles de la dársena sur del puerto de La Luz y Las Palmas».
- Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas, Sector de Técnicas Físicas (CEDEX). «Acondicionador de señal para bandas extensométricas».
- HOFFMANN, K. (1989). «An Introduction to Measurements using Strain Gages». Hottinger Baldwin Messtechnik Gmm.
- CHAPA y CANALE (1988). «Métodos numéricos para ingenieros». McGraw-Hill.
- BOYLEST, R., y NASHALSKY, L. (1989). «Electronics. A Survey». Prentice Hall.

Drayfil

ecofilm

IMPERMEABILIZANTES DE PVC PARA CULMINAR CUALQUIER OBRA BIEN HECHA



MIEMBRO DE LA
FUNDACIÓN ESPAÑOLA
DE LOS PLÁSTICOS
PARA LA PROTECCIÓN
DEL MEDIO AMBIENTE

AISCONDEL LAMINADOS, desde hace más de quince años, viene investigando, desarrollando y produciendo láminas impermeabilizantes para todo tipo de instalaciones, en la construcción, obras públicas y agricultura. Esta larga experiencia, unida a los constantes avances tecnológicos, la sitúa en la primera línea de su sector.

Todas las láminas impermeabilizantes de PVC plastificado fabricadas por AISCONDEL LAMINADOS, bajo la marca DRAYFIL, poseen la certificación AENOR y son conformes a las correspondientes normas UNE.

DRAYFIL y ECOFILM marcan la diferencia en láminas impermeabilizantes.

DRAYFIL-AGRICULTURA

Láminas de PVC flexibles, sin armar, para la impermeabilización de balsas, edificios, obra civil, etcétera. Las cualidades más destacables son la estanquidad, resistencia a los rayos ultravioletas, imputrescibilidad y permeabilidad al vapor.



DRAYFIL-CONSTRUCCION

Láminas de PVC plastificado, reforzadas con fibra de vidrio o malla de poliéster, diseñadas para impermeabilizaciones que requieran una gran estabilidad dimensional y una mayor resistencia mecánica. Por sus características es la lámina idónea para cualquier tipo de impermeabilizaciones en el sector de la edificación.



DRAYFIL-ECOFILM

Láminas flexibles de PVC y Asaprene, idóneas para instalaciones de residuos sólidos urbanos (RSU), vertederos controlados e impermeabilizaciones que requieran propiedades muy superiores a las láminas convencionales.



AISCONDEL
LAMINADOS, S.A.

Santa Ana, 101 - 08290 CERDANYOLA (Barcelona) - Tels. (93) 580 44 77 / 580 80 84 - Fax (93) 580 48 45

En vez de millones de agujeros



Mejor ahorrarse millones: **ZEMDRAIN***

La nueva Lámina ZEMDRAIN garantiza una superficie de hormigón de alta calidad.

ZEMDRAIN reduce la relación agua/cemento en la superficie del hormigón, mejorando sustancialmente la resistencia a compresión y reduciendo la porosidad superficial. Todo ello contribuye a mejorar la resistencia a la abrasión en la superficie y a reducir la profundidad de carbonatación.

La Lámina ZEMDRAIN elimina por completo las coqueras, proporcionando una mayor resistencia a la erosión y a los ciclos hielo-deshielo. Por consiguiente ZEMDRAIN asegura unas obras mucho más resistentes y duraderas, es por tanto especialmente indicado en la construcción de obras públicas expuestas a medios agresivos como depuradoras, presas, canales, puentes, etc.

Utilizar ZEMDRAIN **ahora** evitará el deterioro del hormigón en el futuro, y por tanto todos los costes que acarrea su reparación.

Ahorre millones con ZEMDRAIN. Solicite nuestro dossier técnico, donde le informaremos detalladamente, enviándonos la pestaña adjunta.



BETTOR®

PRODUCTOS QUÍMICOS
PARA LA CONSTRUCCIÓN

Bastors 13-15 - 08184 PALAU DE PLEGAMANS (BCN)
Tel. (93) 864 86 01 - Fax (93) 864 84 63



Por favor remitirnos una más amplia información de ZEMDRAIN

Si la...
Empresa...
Cargo...
Dirección...
Población...
Código Postal...
Tel...

* Marca registrada de DuPont para láminas de encofrados