anales de
ingeniería mecánica

revista de la asociación española de ingeniería mecánica

año 9 / número 3 / septiembre 1992

Actas del X Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica

ESTRUCTURAS, MAQUINAS, VEHICULOS, BIOMECANICA Y TERMODINAMICA

SISTEMA DE PROTECCION DE PILAS DE PUENTES CONTRA IMPACTO DE BARCOS

Mayoral González, F.; Martí Rodríguez, J.
Departamento de Ingeniería de Materiales
E.T.S. de Ingenieros de Minas
Ríos Rosas, 21. Madrid 28003. Tfn (91) 3367001. FAX (91) 3367068

Resumen.- Un puente a través del Estrecho de Gibraltar requeriría la consideración de posibles impactos de barcos contra sus pilas. Los sistemas de protección que no transmiten fuerzas a las mismas son especialmente adecuados. Se estudia aquí uno compuesto de una red flotante de cables que, al ser enganchada y desplazada por el barco impactante, arrastra tuberías lastradas por el fondo marino; éstas disipan la energía cinética del barco y/o varían su dirección de marcha.

Los análisis se realizan con un nuevo programa de diferencias finitas lagrangianas en el que se representa la dinámica del barco y de la red teniendo en cuenta las interacciones barco-cables, barco-agua, cables-agua, flotadores-agua y lastres-fondo. Se presenta también como ejemplo el análisis del impacto de un barco de 100.000 toneladas a 20 nudos.

Abstract.- A bridge across the Straits of Gibraltar requires the consideration of possible ship impacts against the bridge piers. Pier protection systems which do not transmit any forces to the piers are particularly adequate. The system studied here is composed of a floating network of cables which, when engaged and displaced by the impacting ship, drags weighted pipes on the sea floor. Those pipes dissipate the ship's kinetic energy and/or alter its course.

The analyses are carried out with a new Lagrangian finite-difference program, which represents the dynamics of the ship and the cables taking into account the various interactions of interest: ship-cables, ship-water, cables-water, buoys-water and pipes-seafloor. The analysis of the impact of a 100,000 ton ship at a speeds of 20 knots is presented as an example.

1.- INTRODUCCION

Aunque la comunicación a través del Estrecho está actualmente cubierta por vía aérea y marítima, cabe pensar en la necesidad de establecer en el futuro un enlace fijo entre Europa y Africa[1]. Para ello hay dos alternativas principales: el túnel y el puente.

Dada la responsabilidad de la estructura y el notable tráfico marítimo del Estrecho, resulta necesario defender las pilas del puente contra posibles impactos de barcos. En el presente artículo nos referiremos en general a los sistemas de protección de las pilas del puente y en particular al análisis de un determinado sistema de protección.

2.- SISTEMAS DE PROTECCION

Sin pretender incluir un listado exhaustivo, los principales sistemas de protección que están actualmente en uso o propuestos son:

2.1.- Instalaciones de guiado, aviso y alarma.

Parece conveniente que un puente sobre el Estrecho disponga de alguno de estos sistemas, muy desarrollados en aeronáutica, como primer nivel de protección.

2.2.- Islas artificiales.

Es ésta una solución muy recomendable ya que estas islas no sólo protegen a la pila sino que, al ejercer una resistencia continuada y progresiva al avance del barco, disipan su energía cinética sin causarle un excesivo daño[2]. En el caso del Estrecho, con profundidades de 300m, son prácticamente inviables ya que requieren enormes volúmenes de relleno, reducen considerablemente la sección hidráulica del Estrecho y dificultan excesivamente la navegación.

2.3.- Levantamiento del barco.

Este sistema, propuesto por Cowiconsult[3], consiste en una playa artificial de hormigón apoyada en la estructura. El barco se frena principalmente por levantamiento, más que por la resistencia continuada y progresiva que el rozamiento opone a su avance.

Como inconvenientes, es evidente que la detención de barcos grandes requiere una obra de enormes dimensiones. Además, la reacción sobre la proa se concentra en una superficie muy reducida. Esto puede dar lugar, o bien a la rotura del casco con el consiguiente derrame de la carga, o bien a la rotura de la playa.

Por otra parte, la gran masa de hormigón necesaria a una distancia considerable del suelo empeora la estabilidad sísmica, lo que constituye un inconveniente importante en la zona. Pero el peor problema planteado radica en el hecho de que las fuerzas de impacto se transmiten directamente a la pila.

2.4.- Colapso plástico.

Este procedimiento consiste en disponer estructuras colapsables (por ejemplo estructuras reticuladas tubulares) cuyo aplastamiento disipa la energía cinética del barco.

Un inconveniente de este sistema es la

dificultad de generar una estructura suficientemente robusta como para detener navíos grandes sin originar daños intolerables en los más pequeños. El problema puede resolverse, pero no sin aumentos considerables de costo y complejidad. Sin embargo, como en el caso anterior, el problema principal es que transmiten las fuerzas de impacto directamente a la pila.

2.5.- Sistemas flotantes de frenado.

También estos sistemas han sido utilizados en la práctica. Se componen esencialmente de redes de retención sustentadas por boyas y unidas al fondo mediante amarres. Los extremos de los amarres pueden estar fijos o unidos a lastres, generalmente constituidos por bloques de hormigón. En el primer caso, la energía se absorbe por alargamiento de los cables, que pueden estar fabricados con diversos materiales (nylon, acero, etc.) e incluso llevar algún tipo de amortiguadores intercalados. En el segundo caso, la disipación de energía ocurre como consecuencia del rozamiento de los bloques de hormigón con el fondo.

Estos sistemas presentan algunas ventajas claras con respecto a los no flotantes. Por ejemplo, son relativamente independientes del fondo marino, ejercen una fuerza de frenado progresiva sobre el buque atrapado y transmiten la fuerza del impacto directamente al fondo del mar.

2.6.- Sistema propuesto.

Se propone aquí para el caso del Estrecho el sistema de protección flotante representado en la figura 1.

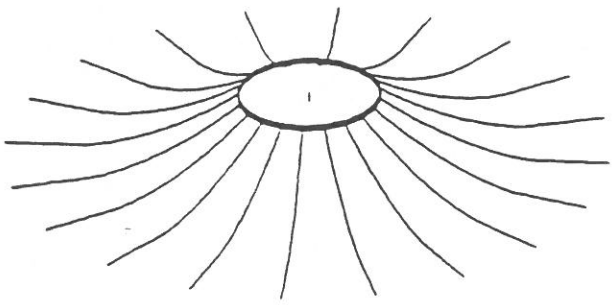

Fig. 1.- Sistema propuesto

Consta de una red de cables de acero de 300m de radio alrededor de cada pila, provista de 40 boyas equidistantes para conseguir su flotación. Veinte tuberías radiales suministran la necesaria conexión con el fondo. Dichas tuberías, unidas por cables a la red, tienen flotabilidad neutra en su parte inicial y están lastradas con mineral pesado en el tramo final.

Es claro que el sistema propuesto recoge esencialmente las ideas expuestas en el apartado anterior, con la excepción de que las fuerzas sobre el fondo se desarrollan arrastrando tuberías lastradas en lugar de bloques de hormigón. La principal ventaja estriba en que el mecanismo de rozamiento es mejor conocido y actúa de forma más predictible y suave en el caso de tuberías que en el de bloques.

3.- PLANTEAMIENTO NUMERICO

Dada la complejidad del fenómeno a estudiar, resulta necesario acudir a la modelización numérica en el ordenador. Para ello se ha desarrollado un nuevo programa de ordenador de propósito específico.

El programa SCAB (Ship Collision Against Bridge piers) utiliza una discretización espacial lagrangiana, compuesta por nodos en los que se concentra la masa, y elementos de conexión entre ellos. Las ecuaciones del movimiento se integran explícitamente en el tiempo en un esquema de diferencias finitas centrales. Los cálculos se realizan mediante un ciclo computacional que se repite, avanzando en el tiempo hasta cubrir el intervalo de interés. El esquema de dicho ciclo computacional es similar al de otros códigos explícitos[4] y puede resumirse como sigue:

a) Cálculo de fuerzas sobre los nodos, teniendo en cuenta tanto las tensiones internas como las fuerzas externas aplicadas, especialmente a través de las interacciones con otros cuerpos.
b) Cálculo de los movimientos. El cociente de las fuerzas aplicadas sobre los nodos divididos por su masa suministra sus aceleraciones instantáneas. Las velocidades y desplazamientos se obtienen por integración explícita de las aceleraciones. En este proceso deben tenerse en cuenta aquellas condiciones de contorno que estén formuladas en términos de velocidades o desplazamientos (por ejemplo, la impenetrabilidad del fondo).
c) Comportamiento mecánico. Las velocidades de los nodos permiten determinar las velocidades de deformación y giro en cada elemento. Estas, introducidas en una formulación objetiva de las ecuaciones constitutivas, suministran los nuevos valores de las tensiones. Asimismo, las leyes de interacción entre cuerpos producen las fuerzas generadas como consecuencia de los movimientos relativos

entre ellos (por ejemplo, las fuerzas de interacción entre el barco y la red).

Con esto se completa el ciclo computacional, lo que permite volver a a) y recomenzar el cálculo.

El ciclo computacional descrito es sólo condicionalmente estable. La estabilidad se logra si se satisface la condición de Courant, que esencialmente exige un intervalo de integración menor que el mínimo período propio del sistema. En nuestro caso, esto es aproximadamente equivalente a que la onda más rápida (compresión) no tenga tiempo de comunicar a dos nodos contiguos de la malla. En la práctica, la conservación de la energía (que no se formula explícitamente en estos códigos) puede imponer restricciones aún más estrictas sobre la duración del intervalo en problemas con múltiples impactos. Este problema no puede discutirse aquí en detalle por falta de espacio pero, en los impactos analizados para el presente estudio, el intervalo de integración debió limitarse a un valor del orden de 10 veces menor que el impuesto por la condición de Courant.

El comportamiento mecánico de los cables de la red se ha representado con un modelo elastoplástico con endurecimiento lineal que trabaja sólo a tracción. Para las tuberías, se han utilizado elementos de sección constante en una estructura espacial de nudos rígidos. Finalmente, aunque se han tenido en cuenta los diversos grados de libertad de traslación y rotación del barco, éste ha sido considerado como un elipsoide rígido, capaz de trasladarse y girar pero no de deformarse.

4.- INTERACCIONES.

Resulta necesario llevar a cabo unas ciertas consideraciones teóricas para modelizar adecuadamente las interacciones que tienen lugar entre las diversas estructuras involucradas en el problema.

4.1.- Red-agua y tuberías-agua.

El desplazamiento relativo entre un cuerpo cilíndrico y el agua produce unas fuerzas de interacción. La evaluación de dichas fuerzas se realiza tradicionalmente por medio de la ecuación de Morison[5]. Se trata de una expresión semiempírica que relaciona las fuerzas desarrolladas con las componentes del movimiento relativo normales al eje del cilindro:

$$F = C_D \rho \frac{D}{2} | u-\dot{x} | (u-\dot{x}) + C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \dot{u} - (C_M-1) \rho \pi \frac{D}{4} \ddot{x} \qquad (2)$$

donde F es la fuerza hidrodinámica por unidad de longitud, u y u son la velocidad y aceleración del fluido, x y x la velocidad y aceleración estructurales, ρ es la densidad del fluido, D es el diámetro del cilindro y C_D y C_M los coeficientes de arrastre e inercia respectivamente.

Otro aspecto a tener en cuenta en la interacción estructura-agua es la masa y momento de inercia añadidos en los movimientos relativos entre el cilindro y su entorno. En la mayoría de los casos, las masas añadidas se determinan experimentalmente debido a la dificultad de obtener soluciones teóricas en tres dimensiones. En base a dichos resultados, y a título de ejemplo, si un cilindro se desplaza normalmente a su eje la masa añadida puede expresarse[6]:

$$M_A = \alpha \rho \pi a^2 b \qquad (3)$$

donde a es el radio del cilindro, b es su longitud, ρ es la densidad del fluido y α es un coeficiente que depende de la relación b/2a.

4.2.- Lastres-fondo.

La metodología utilizada para la modelización de este fenómeno se basa en dos supuestos: la impenetrabilidad del fondo (que se formula como una condición de contorno en movimientos) y la aplicabilidad del criterio de rozamiento de Coulomb (que se formula en fuerzas). La aplicación del rozamiento de Coulomb se ve complicada por dos factores: la tridimensionalidad del problema (bidimensionalidad de la superficie del fondo) y la notable diferencia entre los coeficientes de rozamiento longitudinal y transversal. Este último problema se deriva de la inevitable indentación que una tubería pesada produce en el fondo marino.

4.3.- Flotadores-agua.

En cada uno de los nodos en que haya un flotador, se desarrollará una fuerza de flotación. Esta fuerza es el producto del peso específico del agua por el volumen sumergido del flotador, cuya sección se ha considerado constante.

También se ha tenido en cuenta la masa añadida de agua del flotador, considerada igual a la correspondiente a una esfera sumergida de volumen igual al volumen sumergido del flotador[6].

4.4.- Barco-red.

Para incorporar esta interacción, se ha representado al barco como un elipsoide rígido, dentro del cual no pueden penetrar los nodos de la red. Se ha supuesto que el contacto se realiza sin rozamiento.

Numéricamente, la interacción se modeliza anulando la velocidad de penetración que los nodos de la red tienden a desarrollar. La fuerza necesaria para llevar esto a cabo produce sobre el barco las consiguientes aceleraciones de traslación y giro. Puesto que no hay rozamiento, tampoco hay interferencia con las componentes tangenciales de la velocidad relativa. La

red y el barco pueden además separarse libremente cuando el estado tensional así lo requiera.

4.5.- Interacción barco-agua.

Los movimientos horizontales del barco, tanto de traslación como de giro alrededor de un eje vertical, conllevan el desarrollo de las fuerzas y momentos de arrastre con que el agua responde a los movimientos relativos del barco respecto a su entorno. También se ha tenido en cuenta la masa añadida que, a efectos de inercia, impone el líquido próximo al casco.

Las fuerzas de arrastre se evalúan mediante la expresión:

$$F = C_D A \rho v^2/2 \qquad (6)$$

donde F es la fuerza por unidad de longitud, $\rho v^2/2$ es la presión de parada, A es el área de la sección transversal al movimiento relativo y C_D es el coeficiente de arrastre. Se han adoptado distintos valores de C_D para desplazamientos longitudinales y transversales del barco.

El valor del momento de arrastre puede calcularse según la expresión:

$$M_a = C_a I \omega^2$$

donde I es el momento de inercia de la masa del barco respecto al eje de giro, ω es la velocidad de giro y C_a es un coeficiente de arrastre.

Tanto la masa como el momento de inercia del barco se verán incrementados por el arrastre de una cierta masa de agua. Como en casos anteriores, los valores utilizados provienen de determinaciones experimentales[6].

En cuanto a los movimientos relativos con componente vertical, se han tenido en cuenta tanto los desplazamientos verticales, como el giro de cabeceo. El desplazamiento produce variaciones en la fuerza de flotación, mientras el cabeceo da lugar a un par estabilizador proporcional al ángulo girado. El cálculo de estas fuerzas y momentos de flotación es similar al descrito para las boyas.

5.- APLICACION PRACTICA.

El sistema propuesto en 2.6 ha sido analizado con el programa SCAB, desarrollado y verificado a tal fin, que integra todas las ideas expuestas hasta aquí. El programa ha sido utilizado para analizar varios tipos de impactos, tanto normales como oblicuos a la red del sistema de protección.

A modo de ejemplo se describen a continuación las características más importantes de uno de los casos analizados:

- Diámetro de la red = 600 m
- Profundidad = 300 m
- Longitud de lastres = 1038 m
- Masa del barco = 100 Mg (100.000 T)
- Velocidad del barco = 10 m/s (20 nudos)

En la figura 2 se representa una deformada de la zona central del sistema. La posición del barco está indicada por su eje longitudinal, que aparece en trazo más grueso.

La historia de velocidades presentada en la figura 3 muestra claramenta el proceso de frenado del barco, que es finalmente rechazado por el sistema de protección a los 70 segundos desde el momento de impacto.

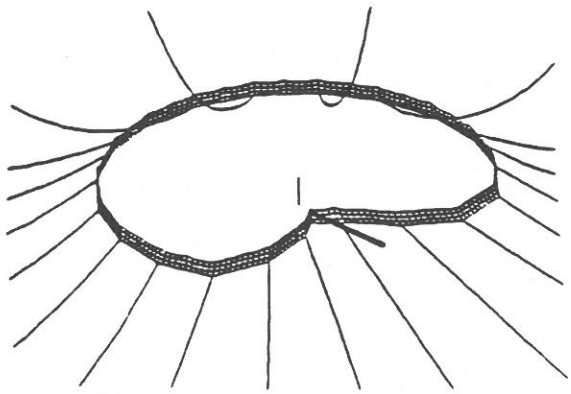

Fig. 2. Deformada, t = 30 s

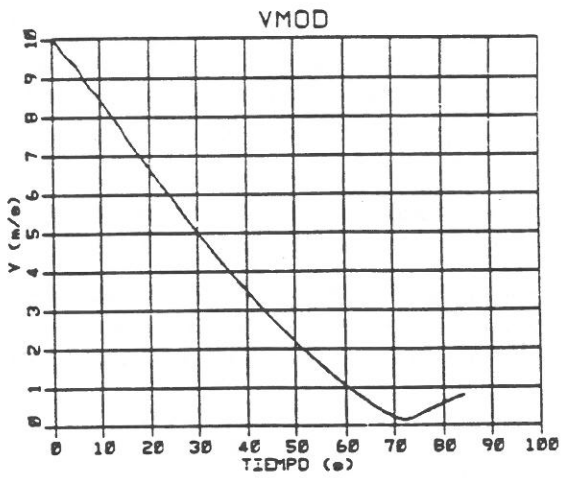

Fig. 3. Historia de velocidades del barco

Las figuras 4 a 9 muestran una serie de deformadas en planta de la misma zona, extraídas de la secuencia completa de un impacto.

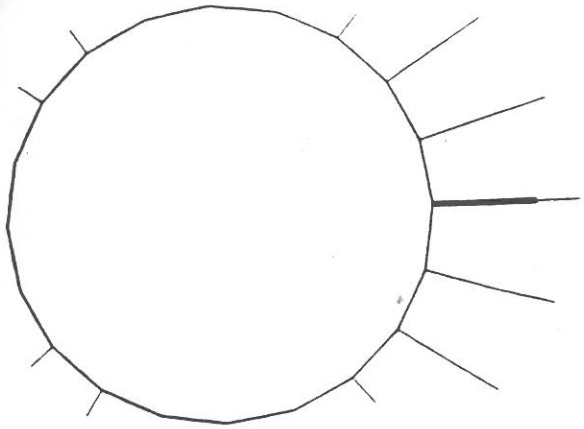

Fig. 4. Deformada, t = 0 s

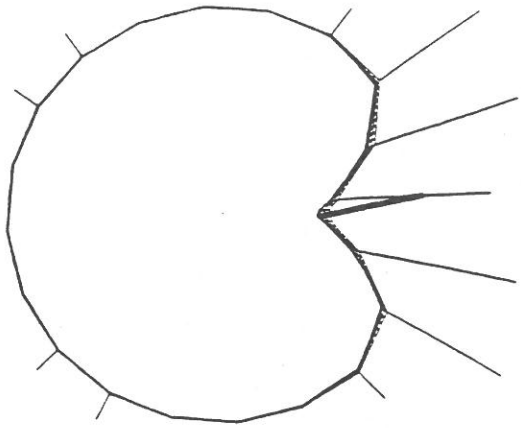

Fig. 5. Deformada, t = 20 s

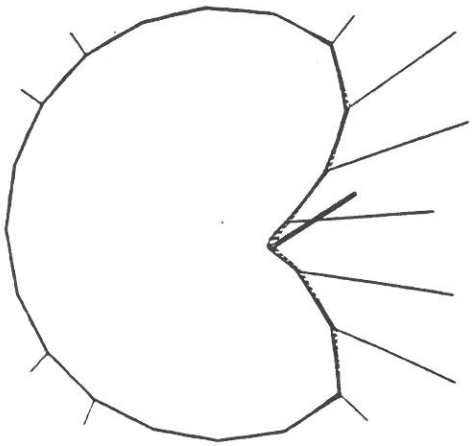

Fig. 6. Deformada, t = 35 s

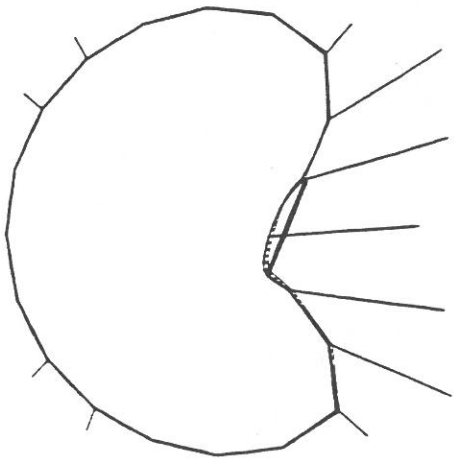

Fig. 7. Deformada, t = 50

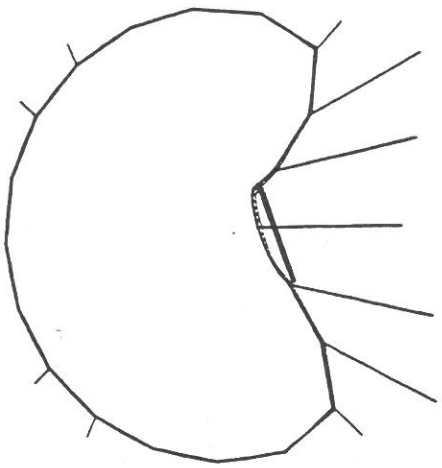

Fig. 8. Deformada, t = 65 s

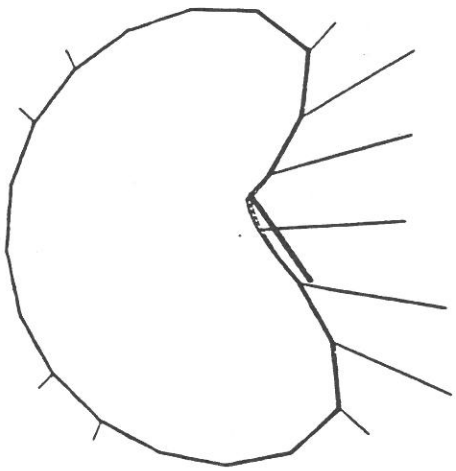

Fig. 9. Deformada, t = 80 s

6. CONCLUSIONES

Los trabajos desarrollados, de los que se ha presentado aquí un breve resumen, permiten deducir en primer lugar que el programa SCAB lleva a cabo una simulacion físicamente coherente de los fenómenos de interés, simulación que ha sido exhaustivamente verificada. En cuanto al sistema de protección de las pilas, los análisis realizados indican que el sistema aquí propuesto es en principio viable, aunque serían necesarios extensos trabajos adicionales para llegar a un diseño definitivo del sistema.

7. REFERENCIAS

1. SNED (ed.) "Liaison Fixe Europe-Afrique à Travers le Détroit de Gibraltar". Coloquio Internacional organizado por la SNED, Tánger, 1980.
2. Denver, H. "Geotechnical Model Tests for the Design of Protective Islands". IABSE Colloquium on Ship Collision with Bridges and Offshore Structures, Copenhague, 1.983.
3. Carlos Fernández Casado, Cowinconsult y C.E.D. "Estudio de Factibilidad Técnica de Apoyos Fijos y Flotantes para un Puente sobre el Estrecho de Gibraltar". Informe nº 2 "Structures de Protection. Rapport de Synthèse". Realizado para SNED, 1.987.
4. Principia S.A. "PR2D/3D - Theorical Basis". Madrid, 1.987.
5. Morison, J.R., Obrien, M.P., Johnson, J.W. y Schaaf, S.A. "The Force Exerted by Surface Waves on Piles". Tech. Inst. of Mining Eng., vol. 189, 1950.
6. Blevins, R.D. "Formulas for Natural Frequency and Mode Shape". Van Nostrand Reinhold Company, Nueva York, 1.980.