

# Estudio del Comportamiento Dinámico Acoplado en Estructuras Offshore

Gutiérrez Romero J.E<sup>1</sup>., Zamora Parra B<sup>2</sup>., García-Espinosa J<sup>3</sup>., Esteve Pérez J.A<sup>1</sup>.

(<sup>1</sup>) Unidad Predepartamental de Tecnología Naval. Universidad Politécnica de Cartagena

(<sup>2</sup>) Dpto. de Ing. Térmica y de Fluidos. Universidad Politécnica de Cartagena

(<sup>3</sup>) Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria. (CIMNE) Universidad Politécnica de Catalunya.

Paseo Alfonso XIII, 52, 30203, Cartagena

Teléfono: 868071261

Email: jose.gutierrez@upct.es

**Resumen.** Hoy día no cabe duda de que se requiere un desarrollo, estudio y evaluación de herramientas que permitan estudiar estructuras oceánicas. En este sentido, la industria demanda el desarrollo de herramientas capaces de evaluar el comportamiento de estructuras situadas en el mar. La dinámica de estructuras marinas oceánicas comprende una gran variedad de fenómenos no lineales tales como la interacción fluido-estructura, los efectos no lineales de cables de fondeo unidos a plataformas flotantes, la acción del viento, o la acción del oleaje, por ejemplo. En este trabajo se presenta un modelo dinámico de cable para plataformas flotantes oceánicas basado en el método de los elementos finitos acoplado con un potente software de simulación del comportamiento en el mar, denominado SeaFEM. Se expone la teoría y modelos matemáticos empleados en la definición del cable junto con algunos ejemplos de aplicación sobre estructuras oceánicas.

## 1. Introducción

Actualmente existe un importante interés por el desarrollo de las tecnologías en alta mar (*offshore*) alentado por el desarrollo de las tecnologías relacionadas con las energías renovables. En lo concerniente a la tecnología oceánica, es preciso indicar que se trata de un ámbito de estudio multidisciplinar, que abarca desde la aerodinámica hasta los sistemas de fondeo, y es en este sentido donde queda focalizado el presente trabajo. Se expone el modelo numérico dedicado al análisis dinámico de cables de fondeo, acoplado esta interacción cable estructura a través de un software dedicado al análisis de comportamiento de estructuras oceánicas en el mar.

Es posible encontrar una gran variedad de conceptos o tipologías en cuanto a estructuras oceánicas. Sin embargo, como se expone, estas estructuras están asociadas a sistemas de fondeo y posicionamiento, que requieren de un estudio detallado.

Los sistemas de fondeo se componen habitualmente por elementos como cables, cadenas o cabos, que se unen a diferentes puntos de la estructura y al fondo oceánico mediante anclas u otros elementos, evitando el desplazamiento de la estructura respecto de su posición en alta mar. Es preciso remarcar que el efecto fundamental de los cables de fondeo sobre una plataforma es el incremento del amortiguamiento y por tanto, la consecución de una mayor estabilidad de la misma.

Habitualmente, los códigos dedicados a la simulación del comportamiento de estructuras flotantes disponen de algoritmos que describen el comportamiento de los cables de fondeo, empleando de forma rutinaria

aproximaciones con modelos cuasi-estáticos [1]. Este tipo de modelos son de gran eficiencia computacional y proveen buenas aproximaciones cuando la amplitud del oleaje y los movimientos de la estructura flotante son pequeños. Sin embargo, cuando los movimientos de la estructura oceánica son significativos y los efectos de inercia son importantes, los modelos anteriores no tienen en cuenta diversos efectos importantes, de manera que pueden sobreestimar en la mayor parte de las ocasiones la tensión del cable [2].

En este trabajo, se presenta una modelización a través del Método de los Elementos Finitos (FEM) [3, 4] para el estudio dinámico de líneas de fondeo acoplado su dinámica con la correspondiente a la de la estructura oceánica.

## 2. Modelos matemáticos empleados en la descripción de un cable

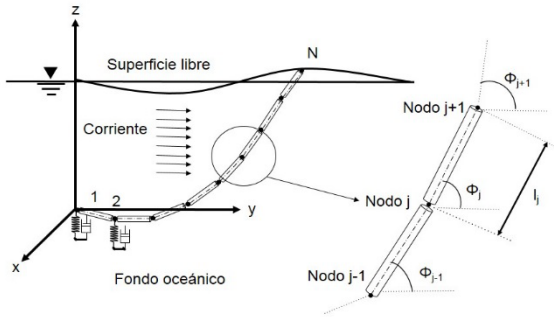
### 2.1. Introducción

El sistema de ecuaciones que modela el comportamiento dinámico de un cable despreciando los efectos de rigidez a flexión y torsional, puede expresarse como [5, 6]

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial s} \left( EA_0 \frac{\sigma}{1 + \sigma} \frac{\partial \vec{r}}{\partial s} \right) + \vec{f}(1 + \sigma), \quad (1)$$

donde  $\vec{r}$  es el vector de posición de la línea,  $s$  es la longitud de la línea,  $\rho_0$  es el peso por metro del cable,  $A_0$  es el área seccional del cable,  $E$  es el módulo de Young del material del cable,  $t$  es el tiempo,  $\sigma$  es la tensión, y  $\vec{f}$  es la suma de todas las fuerzas exteriores que actúan sobre el cable.

En la resolución matemática del sistema de ecuaciones anterior, se emplea un modelo adecuado que permita obtener los movimientos de la línea en cada instante de tiempo. En este sentido, el Método de Elementos Finitos resulta acertado para obtener el comportamiento dinámico de la línea [5,6]. El cable se divide en un número finito de barras, conectadas entre sí mediante bisagras. Esta discretización puede apreciarse en la Fig. 1.



**Figura 1:** Discretización de un cable de fondeo.

El modelo presentado no contempla algunos efectos no lineales como el cambio de geometría de la línea, los efectos de flexión y torsión, así como el comportamiento no lineal de fibras elásticas de gran extensibilidad empleadas en el fondeo de algunas estructuras.

Las principales hipótesis tomadas en este estudio son:

- Material elástico con un alargamiento definido.
- Cables de gran longitud, en los que predomina la rigidez axial (se pueden considerar despreciables tanto la rigidez torsional como la rigidez a flexión).
- La tensión del cable varía a lo largo de la coordenada longitudinal.

Es preciso indicar que gran parte de las configuraciones en sistemas de fondeo de artefactos marinos flotantes emplean fundamentalmente disposiciones de tipo catenaria o de tipo tendón tensado. Así, como primera aproximación o punto de partida estático en equilibrio resulta elegida la configuración de línea de catenaria. El resultado de la aplicación del MEF es una ecuación de tipo hiperbólico [7].

## 2.2. Esquema numérico

En este apartado se presenta el esquema numérico empleado en la resolución del modelo MEF.

Resulta común para problemas estructurales de tipo dinámico el uso de *esquemas tipo Newmark* [7]. Se trata de un esquema integración temporal de tipo implícito, ampliamente usado debido a su estabilidad en diversos tipos de problemas estructurales dinámicos.

En el estudio realizado se ha empleado un método basado en el esquema de Newmark, conocido como el *método de Bossak*. El método de Bossak queda formulado como sigue,

$$(1 - \alpha_B)\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}^{n+1} + \alpha_B\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}^n + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}^{n+1} + \mathbf{K}\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{F}^{n+1} \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{x}}^{n+1} = \dot{\mathbf{x}}^n + \Delta t\ddot{\mathbf{x}}^n + \frac{\Delta t^2}{2}[(1 - 2\beta)\ddot{\mathbf{x}}^n + 2\beta\ddot{\mathbf{x}}^{n+1}] \quad (3)$$

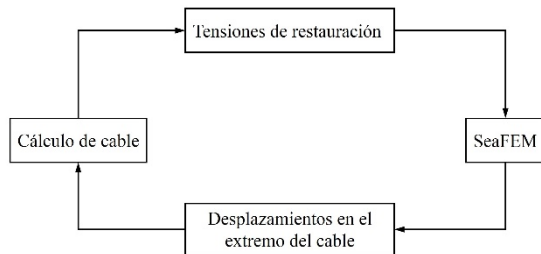
$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{x}^n + \Delta t[(1 - \gamma)\dot{\mathbf{x}}^n + \gamma\dot{\mathbf{x}}^{n+1}]$$

donde  $\mathbf{M}$  son las matrices de masas añadidas,  $\mathbf{C}$  es la matriz de amortiguamiento del cable,  $\mathbf{K}$  es la matriz de rigidez tangencial,  $\Delta t$  es el incremento de tiempo,  $\alpha_B$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son parámetros relacionados con el esquema numérico de Bossak-Newmark.

## 2.3. Acoplamiento con SeaFEM

En este punto se presenta el acoplamiento entre la dinámica del artefacto oceánico y la dinámica de cables de fondeo, realizada a través del software SeaFEM [8].

El código SeaFEM resuelve y simula problemas relacionados con la Ingeniería Oceánica y con la interacción de oleaje con estructuras flotantes. El análisis de este tipo de problemas se aborda mediante el uso de teoría potencial combinada con técnicas de perturbación de Stokes. Este software usa MEF para llevar a cabo el análisis en el dominio del tiempo y determinar así el comportamiento dinámico en el mar de estructuras flotantes en mallas no estructuradas. Al llevarse a cabo el análisis en el dominio del tiempo se facilita la incorporación de fuerzas externas lineales o no lineales sobre las estructuras flotantes simuladas, (en el caso considerado, los efectos restauradores de las líneas de fondeo). Véase la Fig. 2.



**Figura 2:** Esquema de acoplamiento entre SeaFEM y el código de cable dinámico.

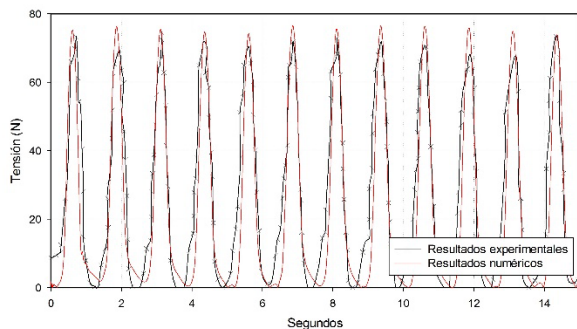
## 3. Ejemplos de aplicación sobre diferentes configuraciones

A continuación se presentan dos ejemplos de aplicación correspondientes, en primer lugar, a un caso de validación y en segundo lugar a un caso práctico de aplicación sobre una plataforma flotante sujeta al fondo marino con varias líneas de fondeo.

### 3.1. Ejemplo de validación

Se expone un ejemplo de validación basado en los experimentos llevados a cabo por Lindahl [9]. En la Fig. 3 se muestra una comparación entre los resultados numéricos y los obtenidos del ensayo experimental, consistente en la aplicación de un

movimiento rotatorio constante al extremo de un cable con unas determinadas características de longitud, masas y rigidez.

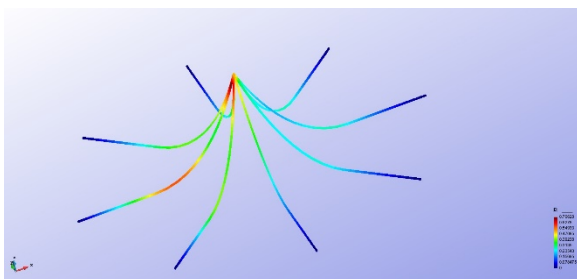


**Figura 3:** Comparación entre los resultados experimentales y numéricos.

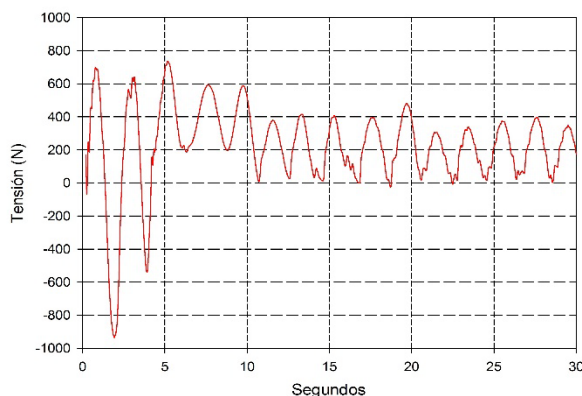
De la Fig. 3 se desprende que los valores obtenidos por el modelo de cable se ajustan de manera adecuada a los valores experimentales obtenidos por otros autores.

### 3.2. Ejemplo de aplicación

Se expone ahora un ejemplo de aplicación del modelo de cable dinámico sobre una estructura oceánica con 8 líneas de fondeo. La estructura en este ejemplo se encuentra sometida a un oleaje regular con un período de 2 segundos y una amplitud de 0,3 metros. Las características de cada línea son: un área de  $1,964 \times 10^{-5} \text{ m}^2$  un módulo de Young de  $210,0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ , y una longitud de 11,5 metros. Cada línea está conformada por 20 elementos de tipo barra, estando emplazadas a una profundidad de 5 metros.



**Figura 4:** Configuración de líneas de fondeo sobre la plataforma flotante.



**Figura 5:** Representación de las tensiones verticales en el punto de unión de las líneas a la plataforma.

En la Fig. 5 se muestran las tensiones en el punto de conexión de los cables a la plataforma flotante. El efecto de estas tensiones de restauración se traduce en un aumento de la estabilidad de la plataforma, debido a su vez a la incremento de las restricciones a los movimientos de la misma.

## 4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha expuesto de manera breve y somera la resolución del problema de la dinámica de un cable. Además, se ha presentado su integración con un software de análisis del comportamiento dinámico de estructuras oceánicas sometidas a la acción del oleaje. Finalmente, a través de dos ejemplos representativos, se ha mostrado el efecto que tienen las líneas de fondeo sobre las estructuras oceánicas marinas flotantes sometidas a la acción de viento y oleaje.

## Referencias

- [1] Faltinsen, O.M., (1990). *Sea loads on ships and offshore structures*. U.K. Cambridge University Press.
- [2] Hall, M., Buckham, B., Crawford, C., Nicoll, R.S., (2013). Evaluating the importance of mooring line model fidelity in floating offshore wind turbine simulations. *Wind Energy*, DOI: 10.1002/we.1669
- [3] Bathe, K.J., (1996). *Finite Element Procedures*, U.K. Prentice Hall.
- [4] Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., (2005). *The Finite Element Method*, Vol. I. U.K. McGraw Hill.
- [5] Aamo, O.M., Fossen, T.I., (2000). *Finite element modelling of mooring lines*. *Mathematics and Computers in Simulation* 53, 415 – 422.
- [6] Triantafyllou, M.S., (1990). *Cable mechanics with marine applications*, lecture notes, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA.
- [7] Hughes, T.R.J., (2000). *The Finite Element Method. Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. USA, Dover Publication Inc.
- [8] Serván, B., García-Espinosa, J., (2013) *Accelerated 3D multi-body seakeeping simulations using unstructured finite elements*, *Journal of Computational Physics* 252, 382–403.
- [9] Palm, J., Paredes, G.M., Eskilsson C., Pinto T.F., Bergdahl, L., (2013). *Simulation of Mooring Cable Dynamics Using Discontinuous Galerkin method*. *Marine* 2013, Hamburgo, Alemania.