



Editorial de la
Universidad Tecnológica Nacional

**La Universidad Tecnológica Nacional - U.T.N. -
en el Nordeste Argentino – N.E.A.**
Investigación y Desarrollo en la Facultad Regional Resistencia

Compiladoras:

**Carola Sosa
Nidia Dalfaro**



MECÁNICA DE FLUIDOS

Estudio de la Interacción Fluido-Estructura en Tableros de Puentes.

Autores: Castro, Adotti, Paz y De Bortoli.



Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional – edUTecNe

<http://www.edutecne.utn.edu.ar>

edutecne@utn.edu.ar

© [Copyright] La Editorial de la U.T.N. recuerda que las obras publicadas en su sitio web son de libre acceso para fines académicos y como un medio de difundir el conocimiento generado por autores universitarios, pero que los mismos y edUTecNe se reservan el derecho de autoría a todos los fines que correspondan.

ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN FLUIDO – ESTRUCTURA EN TABLEROS DE PUENTES

CASTRO, H. G. ^{*(a)}, ADOTTI, M. I. ^(b), PAZ, R. R. ^(c) y DE BORTOLI, M.E. ^(a)

- ^(a) Grupo de Investigación en Mecánica de los Fluidos, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Resistencia, French 414, Resistencia, Chaco, Argentina.
- ^(b) Laboratorio de Aerodinámica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Las Heras 727, Resistencia, Chaco, Argentina.
- ^(c) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Centro de Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería (CIMEC), Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC), Universidad Nacional del Litoral (UNL), Sante Fe, Argentina.
- ^(a) Grupo de Investigación en Mecánica de los Fluidos, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Resistencia, French 414, Resistencia, Chaco, Argentina.

*e-mail: castrogui@gmail.com

Resumen. El estudio de problemas acoplados, tales como la interacción entre fluido y estructura se ha convertido en los últimos años en un tópico de creciente importancia en la ingeniería. Particularmente, en la ingeniería civil, el flujo de viento atmosférico puede provocar inestabilidades aeroelásticas en puentes de grandes luces, rascacielos y estructuras livianas y esbeltas, donde el amortiguamiento estructural es bajo.

En este trabajo se estudia mediante el modelado numérico la interacción entre el viento atmosférico y un tablero de puente, considerando al flujo laminar. El acople entre los sistemas fluido – estructura se realiza de forma débil, utilizando las capacidades del software comercial FLUENT, mediante funciones que deben ser específicamente definidas y mallas dinámicas.

Los resultados mostraron concordancia con los obtenidos mediante simulaciones numéricas publicadas en otros trabajos y evidenciaron que el movimiento de flutter en estructuras de baja frecuencia natural es el resultado de las vibraciones inducidas por el desprendimiento de vórtices.

Palabras Clave. Interacción fluido – estructura, inestabilidad aeroelástica, puentes suspendidos, acoplamiento débil.

1. INTRODUCCIÓN

Muchos fenómenos que involucran la interacción de cuerpos aerodinámicos y no aerodinámicos (conocidos como *bluff bodies*) con flujo de fluidos son de gran interés para la ingeniería. Particularmente, dentro de este campo de análisis, un problema que sigue siendo un foco de atención para los ingenieros es el de la interacción fluido-estructura (*fluid-structure interaction*, FSI) de puentes suspendidos con el viento atmosférico. El estudio computacional de este problema en particular abarca el modelado y la resolución del sistema de ecuaciones que gobiernan el mismo considerando a la estructura en sí como una condición de borde dinámica. Además, considerando que en general los tableros de puentes colgantes de grandes luces poseen un bajo amortiguamiento estructural y sus primeras frecuencias de vibración por debajo de los 0.3 Hz, son estructuras propensas a ser excitadas dinámicamente por el viento (Simiu y Scalan, 1996).

Dada la forma geométrica de los tableros de puentes, con secciones de bordes angulosos, los efectos aerodinámicos ante un flujo de viento son menos dependientes del número de Reynolds, $Re = UB/v$, donde U es la velocidad del flujo libre, B es el ancho del tablero del puente y v es la viscosidad cinemática, que los efectos que tienen sobre los cuerpos sin aristas como por ejemplo cilindros circulares. De cualquier manera, predecir el punto de reinserción del flujo interactuando con estas estructuras es aún considerado como problema que presenta varios desafíos.

La utilización de los métodos computacionales para la resolución de dinámica de estructuras flexibles ha adquirido un creciente interés en los últimos años, no sólo por el crecimiento en la potencia de cálculo de los procesadores sino también en la posibilidad de realizar análisis detallados sobre fenómenos complejos originados en la interacción fluido – estructura. Esto posibilita mejorar el entendimiento sobre la física del problema, mejorando el diseño y optimizando los recursos experimentales.

Entre los distintos métodos numéricos para el estudio de problemas FSI, uno de los más utilizados es el denominado método ALE (*Arbitrary Lagrangian – Eulerian*). Esta técnica requiere que la malla del fluido se adapte continuamente al movimiento realizado por los contornos móviles de la estructura. Actualmente existen diferentes tipos de software que posibilitan la aplicación de métodos numéricos para la resolución de problemas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Uno de ellos es el FLUENT, el cual cuenta además con un modelo de malla dinámica para la simulación de flujos donde la forma del dominio varía en el tiempo debido al movimiento de los contornos del dominio computacional. El modelo de malla dinámica utiliza la estrategia ALE y una metodología de suavizado y re-mallado local, para de esta manera permitir la adaptación de la malla en problema de FSI. El movimiento puede ser prescrito, es decir, mediante la especificación de velocidades lineales y angulares con respecto al centro de gravedad del cuerpo sólido en el tiempo, o determinándolo mediante funciones definidas por el usuario (UDF).

En este trabajo se describe la estrategia utilizada para la simulación de la interacción entre un tablero de puente y el viento atmosférico, considerando a la estructura como cuerpo rígido y el flujo laminar. Para la solución de la interacción se implementan UDF tanto para el movimiento del puente como para establecer condiciones de borde dinámicas. La estructura simulada corresponde al Puente colgante Great Belt East y los resultados obtenidos muestran buena concordancia con los publicados en los trabajos de referencia.

2. ESQUEMA DE INTERACCIÓN FLUIDO – ESTRUCTURA

La interacción dinámica entre una estructura rígida o elástica y un fluido compresible o incompresible ha sido objeto de diversas investigaciones en los últimos años. En la ingeniería civil, el flujo de viento puede provocar inestabilidades aeroelásticas en puentes de grandes luces, rascacielos y estructuras livianas y esbeltas. Cuando se resuelven problemas de FSI, las características de las escalas de tiempo y espaciales varían ampliamente, por la cual las simulaciones tienden a ser arduas en el proceso de acoplamiento y con un consumo de tiempo importante en el proceso de solución, dado que el problema acoplado es caracterizado por la menor escala de tiempo a simular. Sin embargo, existe un gran interés en resolver problemas acoplados y predecir el comportamiento de estructuras para mejorar su diseño. Cabe mencionar que esto ha sido potenciado por el incremento de la potencia de cálculo de los procesadores y memorias, permitiendo obtener resultados en tiempos razonables.

Existen varias estrategias a contemplar para la resolución numérica de problemas acoplados. Una posibilidad es la de vincular códigos específicos de la dinámica estructural (*Computational Structural Dynamics*, CSD) y de la dinámica de fluidos (*Computational Fluid Dynamics*, CFD). En este caso aparecen nuevos interrogantes, como ser la técnica de acoplamiento a utilizar (Felippa y Park, 1999; Lohner et al., 1998; Storti et al., 2009) y el movimiento de la malla del fluido. Otra posibilidad es la de combinar en una única formulación las ecuaciones que gobiernan tanto la estructura como al fluido (Michler et al., 2004) pero este esquema monolítico frecuentemente lleva implementaciones laboriosas o bien a introducir cambios significativos en el código si se utilizan diferentes modelos de fluido y/o estructura.

En este trabajo se utiliza un código específico (FLUENT) para la resolución del problema CFD mediante la técnica de volúmenes finitos y las ecuaciones del movimiento de la estructura son resueltas en cada paso de tiempo considerando a la misma como un cuerpo rígido, en un esquema de interacción débil (también denominado *one way coupling* o *lose coupling*). Ahora

bien, para poder resolver adecuadamente las ecuaciones de Navier – Stokes en conjunto con la deformación de la malla, es necesario incorporar la formulación ALE, mediante la cual la malla computacional se mueve con una velocidad independiente a la velocidad de las partículas materiales del fluido (Garelli et al., 2010), permitiendo de esta manera introducir las velocidades de la malla en las ecuaciones de cantidad de movimiento y continuidad del fluido. El método ALE fue primeramente propuesto en el contexto de las diferencias finitas y posteriormente extendido a elementos finitos y a volúmenes finitos (Trepanier et al., 1991).

En FLUENT, la actualización de la malla es manejada automáticamente por el código en cada paso de tiempo, basado en las nuevas posiciones de los contornos. Para utilizar el modelo de malla dinámica simplemente es necesario proporcionar una malla inicial y la descripción del movimiento de todas las zonas dinámicas en el modelo.

2.1 Métodos de actualización de mallas dinámicas

Para actualizar la malla en las zonas deformadas sujetas al movimiento definido por los contornos es posible utilizar tres metodologías, denominadas “smoothing methods”, “dynamic layering” y “local remeshing methods”. El método “spring-based smoothing” es el método de suavizado utilizado en el trabajo, donde las aristas que interconectan dos nodos cualquiera de la malla son idealizados como una red de resortes. Los espacios iniciales de las aristas antes de cualquier movimiento de los contornos constituyen el estado de equilibrio de la malla. El desplazamiento en un contorno generará una fuerza proporcional al mismo a lo largo de todos los resortes conectados al nodo.

Para controlar la rigidez de los resortes que relacionan los nodos, se realiza mediante un coeficiente que varía entre 0 y 1 (denominado *spring constant factor*). Un valor 0 indica que no existe rigidez sobre los resortes idealizados y por lo tanto los desplazamientos de un nodo en el contorno tiene mayor influencia sobre el movimiento de los nodos interiores. Por el contrario un valor igual a 1 impone el nivel de sensibilidad por defecto sobre los desplazamientos de los nodos internos obtenidos al resolver una ecuación basada en la ley de Hooke:

$$\vec{F}_i = \sum_j^{n_i} k_{ij} (\Delta\vec{x}_j - \Delta\vec{x}_i) \quad (1)$$

donde $\Delta\vec{x}_j$ y $\Delta\vec{x}_i$ son los desplazamientos del nodo “i” y su vecino “j”, n_i es el número de nodos vecinos conectados al nodo “i” y k_{ij} es el coeficiente de rigidez entre los nodos “i” y “j”.

3. USO E IMPLEMENTACION DE LAS UDF

Las UDFs son definidas utilizando funciones suministradas por FLUENT. Estas funciones son implementadas en el código como macros, denominadas DEFINE macros, e incorporadas en un código escrito en lenguaje C. Las definiciones de estas DEFINE macros son provistas en un *header* (udf.h). El formato general es:

DEFINE_MACRONAME (udf_name, passed-in variables)

En este trabajo se utiliza la UDF denominada DEFINE_CG_MOTION, la cual solo puede ser ejecutada como UDF compilada, (Fluent, 2007). Esta función se utiliza para especificar el movimiento de una zona particular, dadas la velocidades lineales y angulares en cada paso de tiempo. FLUENT utiliza estas velocidades para actualizar las posiciones nodales sobre la zona dinámica suponiendo que la estructura se mueve como un cuerpo rígido. La definición de la macro es:

DEFINE_CG_MOTION (name,dt,vel,omega,time,dtime)

La descripción de las variables que se deben pasar a la macro se puede observar en la tabla (1). Cabe mencionar que la comunicación (*hooking*) entre el solver y las UDFs se realiza automáticamente una vez definidas las zonas dinámicas de la malla.

Tipo de Argumento	Descripción
Symbol name	nombre de la UDF
Dynamic_Thread *dt	Puntero a la estructura que almacena los atributos de la malla dinámica, especificados o calculados por FLUENT.
Real vel []	Velocidad Lineal
Real omega []	Velocidad angular
Real time	Tiempo
Real dttime	Paso de tiempo

Tabla 1: Descripción de las variables DEFINE_CG_MOTION

4. DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO DEL TABLERO DE PUENTE

4.1 Ecuaciones del movimiento

En lo que sigue, se considera que el tablero de puente posee dos grados de libertad, es decir que se lo modela como un cuerpo rígido que puede oscilar en la dirección vertical y en la dirección angular (movimiento torsional) alrededor del eje elástico (EE), figura (1).

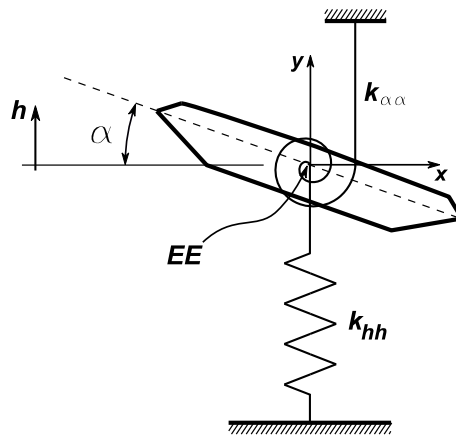


Figura 1: Esquema del tablero de puente soportado elásticamente mediante resortes de traslación y rotación.

Para describir las oscilaciones de cuerpos rígidos con grandes desplazamientos es necesario incluir en las ecuaciones de movimiento las no-linealidades geométricas, obteniendo de esa manera la siguiente formulación (Sváček et al., 2007):

$$\begin{aligned}
 m\ddot{h} + k_h h + S_\alpha \ddot{\alpha} - S_\alpha \dot{\alpha}^2 \sin \alpha + d_h \dot{h} &= -L(t) \\
 S_\alpha \ddot{h} \cos \alpha + I_\alpha \ddot{\alpha} + k_\alpha \alpha + d_\alpha \dot{\alpha} &= M(t)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

donde h es el desplazamiento vertical (m), α el ángulo de rotación (rad), d_h y d_α los amortiguamientos verticales y rotacionales, respectivamente. En las figuras (1) y (2) pueden observarse las fuerzas y momentos intervinientes. Además,

$$m = \int_{\omega} \rho(x) dx, \quad \text{es la masa del cuerpo (kg)} \quad (2)$$

$$S_{\alpha} = \int_{\omega} x \rho(x) dx, \quad \text{es el momento estático con respecto al eje elástico (kg m).} \quad (3)$$

$$I_{\alpha} = \int_{\omega} x^2 \rho(x) dx, \quad \text{es el momento de inercia con respecto al eje elástico (kg m}^2\text{).} \quad (4)$$

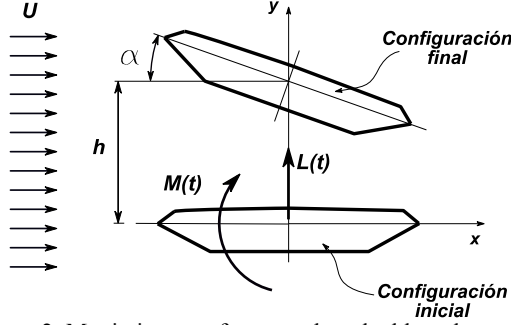


Figura 2: Movimientos y fuerzas sobre el tablero de puente.

Como en este trabajo se consideran solo pequeños giros y desplazamientos, los movimientos verticales y torsionales con amplitudes de vibración pequeñas del ángulo α y de su derivada $\dot{\alpha}$ pueden describirse mediante el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$\begin{aligned} m\ddot{h} + k_h h + S_{\alpha}\ddot{\alpha} + d_h\dot{h} &= -L(t) \\ S_{\alpha}\ddot{h} + I_{\alpha}\ddot{\alpha} + k_{\alpha}\alpha + d_{\alpha}\dot{\alpha} &= M(t) \end{aligned} \quad (5)$$

es decir, $\sin \alpha \approx \alpha$, $\cos \alpha \approx 1$, $\dot{\alpha} \approx 0$ para pequeños valores de α y de su derivada $\dot{\alpha}$, por lo cual las ecuaciones (1) se transforman en (5).

4.2 Resolución numérica

El sistema de ecuaciones (5) posee además condiciones iniciales, es decir, valores prescritos para el instante $t = 0$: $h(0)$, $\alpha(0)$, $\dot{h}(0)$ y $\dot{\alpha}(0)$. Para su resolución en cada paso de tiempo, se lo convierte en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden. Para ello la representamos en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} m & S_{\alpha} \\ S_{\alpha} & I_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{h} \\ \ddot{\alpha} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} d_h & 0 \\ 0 & d_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{h} \\ \dot{\alpha} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} k_h & 0 \\ 0 & k_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} h \\ \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -L \\ M \end{pmatrix}$$

es decir,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f} \rightarrow \dot{\mathbf{u}} = \mathbf{M}^{-1}[\mathbf{f} - \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}} - \mathbf{K}\mathbf{u}]$$

Haciendo $\mathbf{s} = \dot{\mathbf{u}}$ se obtiene un nuevo sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}} &= \mathbf{M}^{-1}[\mathbf{f} - \mathbf{D}\mathbf{s} - \mathbf{K}\mathbf{u}] \\ \mathbf{s} &= \dot{\mathbf{u}} \end{aligned}$$

Luego,

$$\begin{aligned}
\dot{s}_1 &= \frac{1}{mI_\alpha - S_\alpha^2} [-I_\alpha(L + d_h s_1 + k_h h) - S_\alpha(M - d_\alpha s_2 - k_\alpha \alpha)] \\
\dot{s}_2 &= \frac{1}{mI_\alpha - S_\alpha^2} [S_\alpha(L + d_h s_1 + k_h h) - m(M - d_\alpha s_2 - k_\alpha \alpha)] \\
s_1 &= \dot{h} \\
s_2 &= \dot{\alpha}
\end{aligned} \tag{6}$$

Este sistema es posible resolverlo numéricamente utilizando, por ejemplo, el método de Runge – Kutta de cuarto orden:

$$\begin{aligned}
\Delta h_1 &= \dot{h} \Delta t & \Delta h_2 &= \left(\dot{h} + \frac{1}{2} \Delta \dot{h}_1 \right) \Delta t \\
\Delta \alpha_1 &= \dot{\alpha} \Delta t & \Delta \alpha_2 &= \left(\dot{\alpha} + \frac{1}{2} \Delta \dot{\alpha}_1 \right) \Delta t \\
\Delta \dot{h}_1 &= F_1(h, \alpha, \dot{h}, \dot{\alpha}, t) \Delta t & \Delta \dot{h}_2 &= F_1\left(h + \frac{1}{2} \Delta h_1, \alpha + \frac{1}{2} \Delta \alpha_1, \dot{h} + \frac{1}{2} \Delta \dot{h}_1, \dot{\alpha} + \frac{1}{2} \Delta \dot{\alpha}_1, t + \frac{1}{2} \Delta t\right) \Delta t \\
\Delta \dot{\alpha}_1 &= F_2(h, \alpha, \dot{h}, \dot{\alpha}, t) \Delta t & \Delta \dot{\alpha}_2 &= F_2\left(h + \frac{1}{2} \Delta h_1, \alpha + \frac{1}{2} \Delta \alpha_1, \dot{h} + \frac{1}{2} \Delta \dot{h}_1, \dot{\alpha} + \frac{1}{2} \Delta \dot{\alpha}_1, t + \frac{1}{2} \Delta t\right) \Delta t \\
\Delta h_3 &= \left(\dot{h} + \frac{1}{2} \Delta \dot{h}_2 \right) \Delta t \\
\Delta \alpha_3 &= \left(\dot{\alpha} + \frac{1}{2} \Delta \dot{\alpha}_2 \right) \Delta t \\
\Delta \dot{h}_3 &= F_1\left(h + \frac{1}{2} \Delta h_2, \alpha + \frac{1}{2} \Delta \alpha_2, \dot{h} + \frac{1}{2} \Delta \dot{h}_2, \dot{\alpha} + \frac{1}{2} \Delta \dot{\alpha}_2, t + \frac{1}{2} \Delta t\right) \Delta t \\
\Delta \dot{\alpha}_3 &= F_2\left(h + \frac{1}{2} \Delta h_2, \alpha + \frac{1}{2} \Delta \alpha_2, \dot{h} + \frac{1}{2} \Delta \dot{h}_2, \dot{\alpha} + \frac{1}{2} \Delta \dot{\alpha}_2, t + \frac{1}{2} \Delta t\right) \Delta t \\
\Delta h_4 &= \left(\dot{h} + \Delta \dot{h}_3 \right) \Delta t \\
\Delta \alpha_4 &= \left(\dot{\alpha} + \Delta \dot{\alpha}_3 \right) \Delta t \\
\Delta \dot{h}_4 &= F_1(h + \Delta h_3, \alpha + \Delta \alpha_3, \dot{h} + \Delta \dot{h}_3, \dot{\alpha} + \Delta \dot{\alpha}_3, t + \Delta t) \Delta t \\
\Delta \dot{\alpha}_4 &= F_2(h + \Delta h_3, \alpha + \Delta \alpha_3, \dot{h} + \Delta \dot{h}_3, \dot{\alpha} + \Delta \dot{\alpha}_3, t + \Delta t) \Delta t
\end{aligned}$$

con lo cual, en cada paso de tiempo es posible obtener los desplazamientos y velocidades para el paso siguiente:

$$\begin{aligned}
h_{i+1} &= h_i + \frac{1}{6} (\Delta h_1 + 2\Delta h_2 + 2\Delta h_3 + \Delta h_4) \\
\alpha_{i+1} &= \alpha_i + \frac{1}{6} (\Delta \alpha_1 + 2\Delta \alpha_2 + 2\Delta \alpha_3 + \Delta \alpha_4) \\
\dot{h}_{i+1} &= \dot{h}_i + \frac{1}{6} (\Delta \dot{h}_1 + 2\Delta \dot{h}_2 + 2\Delta \dot{h}_3 + \Delta \dot{h}_4) \\
\dot{\alpha}_{i+1} &= \dot{\alpha}_i + \frac{1}{6} (\Delta \dot{\alpha}_1 + 2\Delta \dot{\alpha}_2 + 2\Delta \dot{\alpha}_3 + \Delta \dot{\alpha}_4)
\end{aligned} \tag{7}$$

Una vez actualizada la posición de la estructura en el paso de tiempo siguiente, la fuerza de arrastre D , de sustentación L y el momento de torsión M son calculados nuevamente.

5. MODELADO DEL PUENTE GREAT BELT EAST

El modelo de tablero de puente adoptado para su estudio en este trabajo es el denominado puente Great Belt East, de tipo colgante o suspendido, emplazado en Dinamarca en el año 1988, figura (3). Su longitud total es de 2,7 km una distancia entre pilares de 1,6 km, aproximadamente.

La sección de su tablero tiene como dimensiones principales un ancho $W = 31\text{m}$ y un alto $B = 4,4\text{m}$ y las características mecánicas pueden observarse en la tabla (2) publicadas por Badia y Codina (2007).

Masa por unidad de longitud, m (kg/m)	$2,27 \times 10^3$
Momento estático vertical respecto al centro elástico por unidad de longitud, S_α (kg m ² /m)	$1,61 \times 10^4$
Momento de inercia respecto al centro elástico por unidad de longitud, S_α (kg m ² /m)	$2,47 \times 10^6$
Rigidez vertical, k_h (N/m ²)	$8,78 \times 10^3$
Rigidez torsional, k_α (N m/m ²)	$7,21 \times 10^6$
Amortiguamiento logarítmico vertical, d_h (%)	1
Amortiguamiento logarítmico torsional, d_α (%)	0,6

Tabla 2: Propiedades mecánicas y dinámicas del puente Great Belt East.



Figura 3: Fotografía del puente suspendido Great Belt East.

El problema es modelado como bidimensional, es decir, despreciando los efectos de borde de los pilares. Esta aproximación no es muy limitante, dado que este puente posee una gran distancia entre los pilares, por lo que los fenómenos de inestabilidad aparecen en secciones distanciadas de los mismos. Al representar sólo la sección transversal del puente se está considerando como si el puente tuviera una longitud infinita. Además siguiendo la metodología propuesta por Frandsen (2004), se considera al flujo como laminar por lo que no se toman en cuenta los efectos de la turbulencia.

Como al moverse el puente la malla debe adaptarse a la nueva configuración de los contornos del dominio, las celdas cercanas a las paredes móviles no deben ser muy pequeñas, de lo contrario se distorsionan, introduciendo errores en los cálculos. Para ello se utilizó la estrategia de dividir en distintas zonas la malla del dominio, según se puede observar en la figura (4). En ella se ve el movimiento de la malla perteneciente al interior del círculo más cercano al puente se prescribió como zona móvil, es decir, acompañando rígidamente (no hay desplazamientos diferenciales entre los nodos de los elementos de la malla) los movimientos del puente. En el anillo exterior a la mencionada zona móvil, la malla mantiene deformaciones dinámicas, esto es, se mueve en consecuencia con los giros y desplazamiento de la zona móvil,

pero no rígidamente sino deformándose. La actualización de esta zona dinámica se realizó mediante el método “Spring – based smoothing”.

Como condiciones de borde se impusieron velocidades en la dirección horizontal tanto en la sección de entrada como en las paredes inferior y superior del dominio. Estas velocidades se fueron incrementando sucesivamente y en forma adecuada a efectos de evitar problemas con la convergencia en la resolución de las ecuaciones, considerando un paso de tiempo $\Delta t = 0,02$ segundos. La presión de salida fue impuesta con valor cero para todos los instantes de tiempo mientras que en las paredes del tablero de puente fue impuesta una condición de pared sin deslizamiento del flujo.

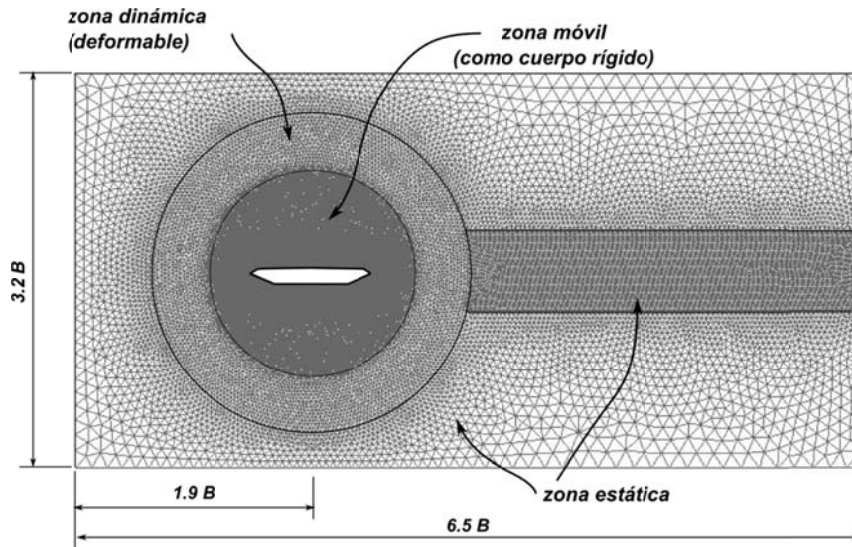


Figura 4: Esquema de la malla y estrategia utilizada para resolver los movimientos del puente.

El problema se corrió secuencialmente en una PC con procesador Interl Core i7 870 de 2.93 GHz con 8 GB de RAM. Para obtener los resultados presentados en este trabajo se requirieron aproximadamente 3 días de cálculo ininterrumpido.

6. RESULTADOS

Al resolver el sistema de ecuaciones que modela el problema se obtienen presiones y fuerzas de rozamiento que provoca el fluido sobre la estructura. Las fuerzas netas (por unidad de longitud del puente) son usualmente expresadas en forma adimensional y se denominan coeficientes de Arrastre (C_D), de sustentación (C_L), y de momento (C_M):

$$C_D(t) = \frac{D(t)}{\frac{1}{2}\rho U^2 D} \quad C_L(t) = \frac{L(t)}{\frac{1}{2}\rho U^2 B} \quad C_M(t) = \frac{M(t)}{\frac{1}{2}\rho U^2 B^2} \quad (8)$$

donde $D(t)$, $L(t)$ y $M(t)$ son la fuerza de arrastre, sustentación y el momento torsional sobre el cuerpo, respectivamente; $\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$ la densidad del aire y $\nu = 1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ la viscosidad cinemática del aire.

En la figura (5) se puede observar los resultados obtenidos para el coeficiente de sustentación, con respecto a las distintas velocidades impuestas en el ingreso del dominio. Se puede apreciar la variación de la fuerza de sustentación, primero en pequeños incrementos pero siempre llegando a una configuración estable, es decir, de movimientos oscilatorios periódicos. Esta estabilidad se pierde al imponer sobre la condición de entrada al dominio una velocidad de 70 m/s, alcanzando la inestabilidad estructural conocida como *flutter*.

Esta misma velocidad de flutter, en el rango de 70-75 m/s, fue obtenida por otros investigadores, tanto mediante ensayos en túneles de viento como a través de simulaciones numéricas (Frandsen, 2004).

En la figura (6) se presentan las configuraciones de la estructura y del flujo a distintos instantes de tiempo en la región de flutter. Se evidencia claramente en ambas figuras el instante en que el flujo se despega de los contornos de la estructura para producir lo que se conoce como desprendimiento de vórtices (o *vortex shedding*), fenómeno cuya intensidad es el encargado de producir la inestabilidad aeroelástica.

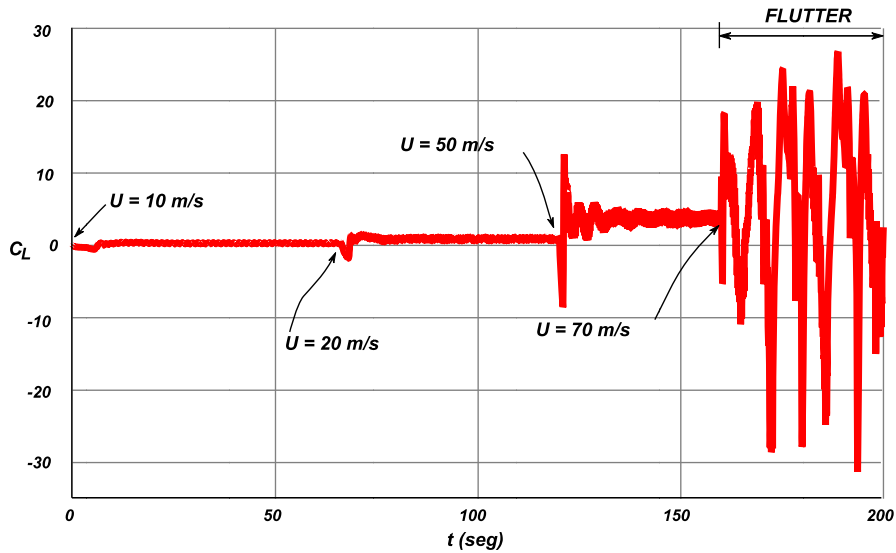


Figura 5: Registro del coeficiente de sustentación obtenido.

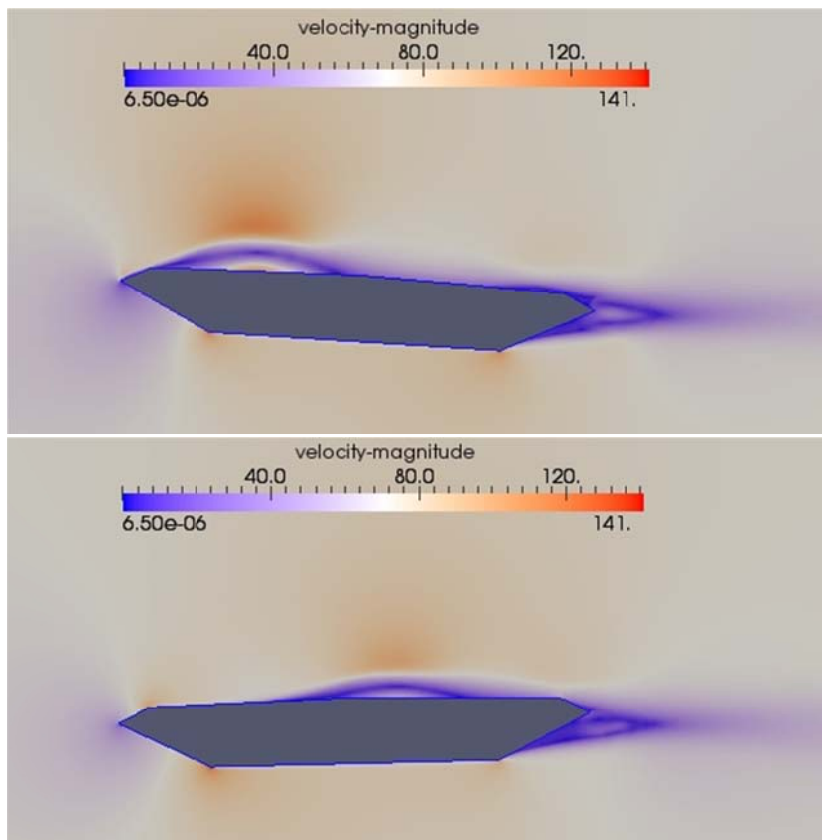


Figura 6: Configuración del tablero de puente y del flujo en dos instantes de tiempo distintos ($U = 70 \text{ m/s}$).

7. CONCLUSIONES

La metodología de acoplamiento entre los sistemas fluido-estructura utilizada en este trabajo demostró ser apta para la simulación numérica de la respuesta dinámica de un tablero de puente ante los efectos del viento atmosférico. Los resultados obtenidos son acordes con los publicados en las referencias incluso con un modelado bidimensional del problema y suponiendo flujo laminar. Esto podría indicar que para este caso particular, dada la geometría de la estructura, la predicción del límite de inestabilidad aeroelástica por flutter no es sensible a los efectos de turbulencia y al modelado tridimensional.

Con respecto a la utilización de las UDFs como herramientas de simulación, éstas demostraron ser adaptables al problema a analizar, a la vez que su utilización expande la aplicación de los posibles problemas a resolver.

REFERENCIAS

- Badia S. y Codina R. On some fluid – structure iterative algorithms using pressure segregation methods. Application to Aeroelasticity. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 72:46 – 71, 2007.
- Felippa C. y Park K. Partitioned analysis of coupled mechanical systems. *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190: 3247-3270, 1999.
- Fluent, Fluent manual 2007.
- Frandsen J. Numerical bridge deck studies using finite elements, part i: flutter, *Journal of Fluids and Structures*, 19:171-191, 2004
- Garelli L., Paz R., Castro H., Storti M. y Dalcín L. *Fluid structure interaction and galilean invariance*. Computational Fluid Dynamics: Theory, Analysis and Applications, Nova, 2010.
- Lohner R., Yang C., Cebral J., Baum J., Luo H., Pelessone D. y Charman C. Fluid Structure interaction using a loose coupling algorithm and adaptive unstructures grids. *AIAA paper*, AIAA – 98-2419, 1998.
- Michler C., Hulshoff S., van Brummelen E., y De Borst R. A monolithic approach to fluid – structure interaction. *Computers and Fluids*, 33:389-848, 2004.
- Simiu E. y Scanlan R.B. *Wind Effects on structures*. Wiley, New York, 1996.
- Storti M., Nigro N., Paz R., y Dalcín D. Strong strategy for fluid structure interaction problems in supersonic regime via fixed point interaction. *Journal of Sound and Vibration*, 30:859-877, 2009.
- Sváček P., Feistauer M., y Horáček J. Numerical simulation of flow induced airfoil vibrations with large amplitudes. *Journal of Fluids and Structures*, 23:391 – 411, 2007.
- Trepanier J., Reggio M., Zhang H., y Camarero R. A finite – volumen method for the euler equations on arbitrary lagrangian-eulerian grids. *Computers and Fluids*, 20:4:399-409, 1991.