



6º Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica VIRTUAL



17, 18 y 19 de Noviembre del 2021

Simulación numérica de acoplamiento dinámico fluido-estructura en un cilindro empotrado en un extremo

M. Herrera, A. Scarabino, F. Bacchi

Grupo de Fluidodinámica Computacional – GFC – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.

Autor principal: matt_h_094@hotmail.com

Palabras claves: Calle de vórtices, Aeroelasticidad, Simulación Numérica.

Resumen:

En este trabajo se presentan la metodología y resultados preliminares de una simulación de acoplamiento fluido-estructura para un cilindro empotrado en su base, embestido por una corriente uniforme de fluido. El cilindro introduce en su estela vórtices periódicos en una configuración de “calle de Von Karman”, los que al desprenderse generan fuerzas laterales, que producen la oscilación de la estructura. La simulación numérica de este problema involucra el cálculo del campo fluidodinámico y las fuerzas que este ejerce sobre la estructura, el cálculo estructural de la deformación que esta sufre, la readaptación de la malla del dominio fluido a la nueva condición de borde que impone la estructura deformada y el inicio de un nuevo ciclo de cálculo en esta condición. Para esto se utilizaron los módulos Mechanical y Fluent de la suite ANSYS.

Introducción:

Cuando un cuerpo como aproximadamente bidimensional es embestido por una corriente fluidodinámica, para un amplio rango de números de Reynolds se producen en su estela desprendimientos periódicos de vórtices de signo alternado, conocidos como “calle de vórtices de Von Karman”. Si la frecuencia de desprendimientos coincide con una frecuencia natural de vibración de la estructura que los produce, las cargas aerodinámicas periódicas actúan como una forzante que amplifica la vibración, pudiendo producir daños considerables [1, 2], pudiendo llegar al colapso de la estructura, como ocurrió en el caso paradigmático del puente de Tacoma, en 1946 [3]. En el fenómeno de interacción aeroelástica conocido como “lock-in” que se da en estructuras poco aerodinámicas (bluff bodies), las frecuencias de desprendimientos de los vórtices aguas abajo (vortex shedding), a través de un mecanismo de realimentación, se ajustan a la frecuencia de movimiento del cuerpo [4]. Las oscilaciones de la estructura fuerzan el desprendimiento de los vórtices, lo que amplía el rango de velocidades en las que ocurre el acoplamiento aeroelástico. Con el objetivo de reproducir numéricamente este proceso, se realizó el análisis sobre una estructura cilíndrica, la cual fue inicialmente analizada mediante el programa de elementos finitos MECHANICAL de ANSYS. De dicho modelo se obtuvieron para una estructura cilíndrica empotrada en un extremo las deformaciones elásticas estáticas para un estado de carga simple, y los modos y frecuencias naturales a flexión, verificando su concordancia con los modos y deformaciones obtenidos analíticamente. Además, se realizaron simulaciones del dominio fluidodinámico, mediante el software ANSYS Fluent para condiciones de flujo estacionarias, con el objetivo de validar las deformaciones elásticas estáticas producidas en ausencia de vibraciones. Finalmente se realizó un análisis

de interacción fluido-estructura de acoplamiento bidireccional, donde en cada paso de tiempo, se consideró el desplazamiento de los nodos de la malla en la interfaz fluido-estructura debido a la deformación elástica de la estructura, y se corrigió la solución obtenida en el dominio fluidodinámico debido al desplazamiento de la interfaz.

En el acoplamiento bidireccional (o de dos vías), el módulo fluidodinámico luego de converger (o realizar cierta cantidad de iteraciones), transfiere las fuerzas debidas a la distribución de presiones y tensiones de corte sobre la interfaz, al módulo estructural. Este último, luego de converger (o realizar cierta cantidad de iteraciones), transfiere los desplazamientos nodales de la interfaz al módulo fluidodinámico. Estas iteraciones se denominan “iteraciones de acoplamiento” (coupling iteration). Es evidente que el tiempo de simulación excede considerablemente a las simulaciones puramente estructurales o puramente fluidodinámicas.

El objetivo del trabajo es adquirir experiencia y poner a punto un modelo de interacción fluido-estructura en un caso simple con soluciones conocidas, para poder avanzar en una etapa posterior en el análisis de problemas de aeroelasticidad más complejos.

Metodología

El trabajo desarrolla el procedimiento para el ajuste de un modelo computacional para acoplamiento fluido-estructura en un cilindro:

- Se parte de un análisis basado en el número de Reynolds del flujo, para el cual se estudiará el acoplamiento fluido-estructura.
- Se define la geometría del cilindro y sus propiedades físicas y mecánicas, de forma que su frecuencia natural sea lo mas cercana posible a la frecuencia de desprendimiento de vórtices.
- Se realizan simulaciones del dominio fluidodinámico con el módulo FLUENT de ANSYS en estado estacionario para verificar independencia de los resultados con la malla.
- Se realizan simulaciones con el módulo estructural MECHANICAL de ANSYS analizando el cilindro bajo estados de carga simple, y se comparan los resultados con las soluciones analíticas para una viga empotrada con una carga uniforme distribuida.
- Se realizan simulaciones del dominio fluidodinámico en estado transitorio, para diferentes pasos de tiempo, buscando verificar que la frecuencia de desprendimientos de vortices es independiente del paso de tiempo adoptado.
- Se realiza el acoplamiento fluido estructura combinando los modelos fluidodinamicos (FLUENT) y estructurales (MECHANICAL) mediante el modulo SYSTEM COUPLING de ANSYS.

La frecuencia de desprendimientos vorticosos en un cilindro se obtiene a partir del número adimensional de Strouhal, St , que es función del número de Reynolds Re , la velocidad V de la corriente libre y el diámetro D del cilindro, con la expresión:

$$f = \frac{St * V}{D}$$

La bibliografía cita numerosos experimentos en los que se reporta que para el rango de Re entre 100 y 300000, el número de Strouhal se mantiene aproximadamente constante entre 0.19 y 0.21.

Debido a que en esta etapa del trabajo el objetivo primario es la puesta a punto y validación de la simulación acoplada fluido-estructura, se eligió un número de Reynolds de 1000, para trabajar con flujo laminar y un número de Strouhal conocido con poca incertidumbre.

Geometría del cilindro y definición de propiedades para la simulación

Se define la geometría como un cilindro vertical de longitud 10 cm y sección transversal con perfil circular de 5 mm de diámetro, empotrado en su base.

Se desea obtener el acoplamiento fluido estructura, el cual se da en condiciones de resonancia, es decir, cuando la frecuencia de excitación coincide con la frecuencia natural de un cuerpo. Para un Reynolds de 1000, se tiene que el número de Strouhal es 0,2. Por lo tanto, la frecuencia de desprendimientos de vortices se calcula como:

$$f = \frac{St * V}{D} = \frac{0,2 * 10 \left[\frac{m}{s} \right]}{0,005 [m]} = 400 \text{ Hz}$$

En consecuencia, la frecuencia natural de la estructura también debería aproximarse a 400 Hz. Para obtener una primera estimación, se recurre al cálculo analítico de la frecuencia natural de una viga empotrada en un extremo. Dicha frecuencia se obtiene como:

$$f = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{4A} * \frac{1}{2\pi} * \left(\frac{k_1}{L} \right)^2}$$

Siendo:

- E: Módulo de elasticidad del material
- ρ : Densidad del material
- J: Momento de Inercia de la sección transversal
- A: Area de la sección transversal
- k_1 : Factor correspondiente al primer modo ($k_1 = 1,875$)
- L: Longitud del cilindro

Los datos para la definición del módulo estructural son:

- Densidad del material $\rightarrow \rho = 7850 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
- Modulo de elasticidad del material $\rightarrow E = 2,56 * E+11 \text{ [Pa]}$
- Diametro del cilindro $\rightarrow D = 0,005 \text{ [m]}$
- Longitud del cilindro $\rightarrow L = 0,1 \text{ [m]}$

Los datos utilizados para la definición del dominio fluidodinámico son:

- Densidad $\rightarrow \rho = 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
- Viscosidad $\rightarrow \mu = 0,05 \text{ [kg/m*s]}$ \leftarrow Se impone para obtener “Re = 1000”
- Velocidad de la corriente libre $\rightarrow V = 10 \text{ [m/s]}$

Configuración de la simulación FSI (Interacción fluido-estructura):

- Tiempo total de simulación: 0,02 [s]
- Paso de tiempo: $2E-5$ [s]
- Iteraciones de acoplamiento: 5
- Almacenamiento de resultados cada 20 pasos de tiempo

Dominio y malla fluidodinámicos

Se definió un dominio tridimensional prismático de 14 cm de altura, 14 cm de longitud y 7 cm de ancho, con el cilindro en posición vertical empotrado en el suelo sobre el plano medio a 4 cm. de la entrada. La longitud del dominio se consideró adecuada, luego de un análisis en el que se agregaron 5 cm adicionales sin que los resultados se modificaran sensiblemente.

Se utilizó una malla estructurada de 165000 elementos, de la que se muestra un detalle en la Figura 1.

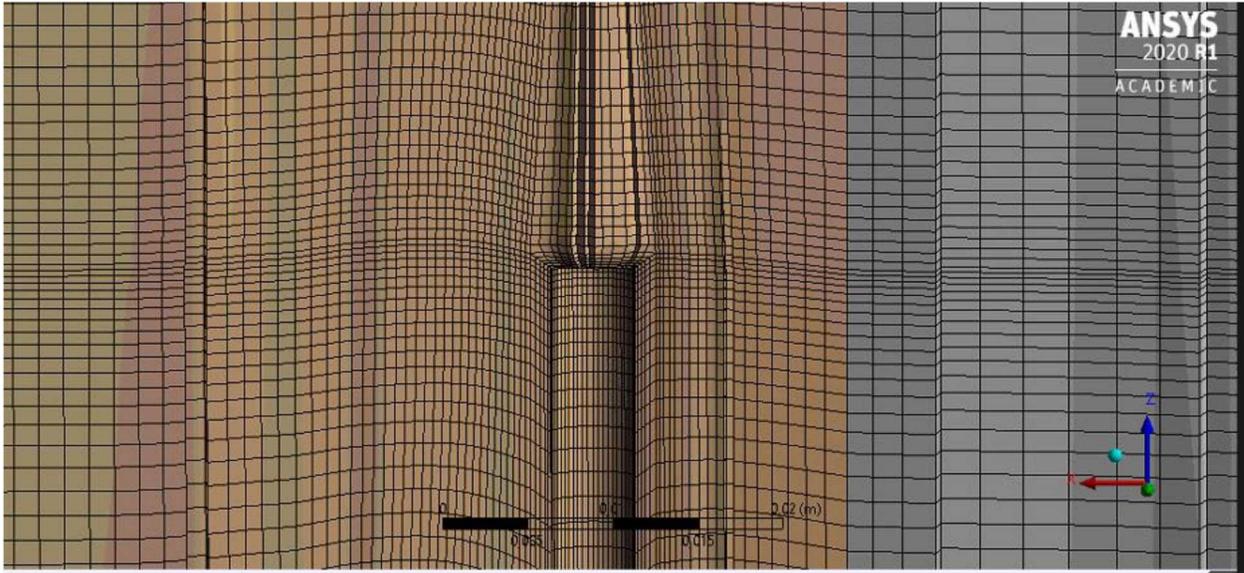


Figura 1: Detalle de la malla fluidodinámica en el entorno del cilindro.

Para verificar la independencia de los resultados con el tamaño de los elementos, la malla fue refinada a $5e5$ y $1e6$ elementos. Se realizaron simulaciones puramente fluidodinámicas (con el cilindro fijo) sin que apreciaran variaciones apreciables en la frecuencia de desprendimientos ni el coeficiente de resistencia calculados, por lo que se consideró apropiada la malla elegida.

El flujo se calculó como laminar, no estacionario, con un paso de tiempo de $2e-5$ s, apropiado para capturar los desprendimientos vorticosos de frecuencia 400 Hz.

Resultados:

Hasta la fecha, solo se alcanzó a simular un tiempo total de 0.03 s, por lo que los resultados que presentamos pueden considerarse preliminares. Sin embargo, en este intervalo se alcanza a establecer la configuración de desprendimientos periódicos y se comienza a ver el acoplamiento de la vibración estructural con los mismos.

La figura 2 muestra el campo fluidodinámico (contornos de velocidad) en un plano perpendicular al eje del cilindro, mientras que la escala de colores sobre la superficie del mismo muestra la deformación de la malla producida por el desplazamiento de su posición inicial. Aunque poco visible en la figura, en la punta alcanza casi 2 mm, un 40% del diámetro. Los contornos de velocidad muestran el desarrollo de los vórtices de Von Karman en la estela.

La Figura 3 muestra el desplazamiento del extremo del cilindro a lo largo del tiempo. Se observa que la excitación en resonancia debida a los desprendimientos vorticosos produce un aumento paulatino de la amplitud de oscilación, aunque el poco tiempo de simulación no permite determinar si finalmente el amortiguamiento estructural logrará estabilizar la amplitud máxima en un valor constante.

Se puede observar en la figura que la frecuencia de oscilación es de alrededor de 370 Hz, un valor dentro de lo esperable de acuerdo con los parámetros de la simulación.

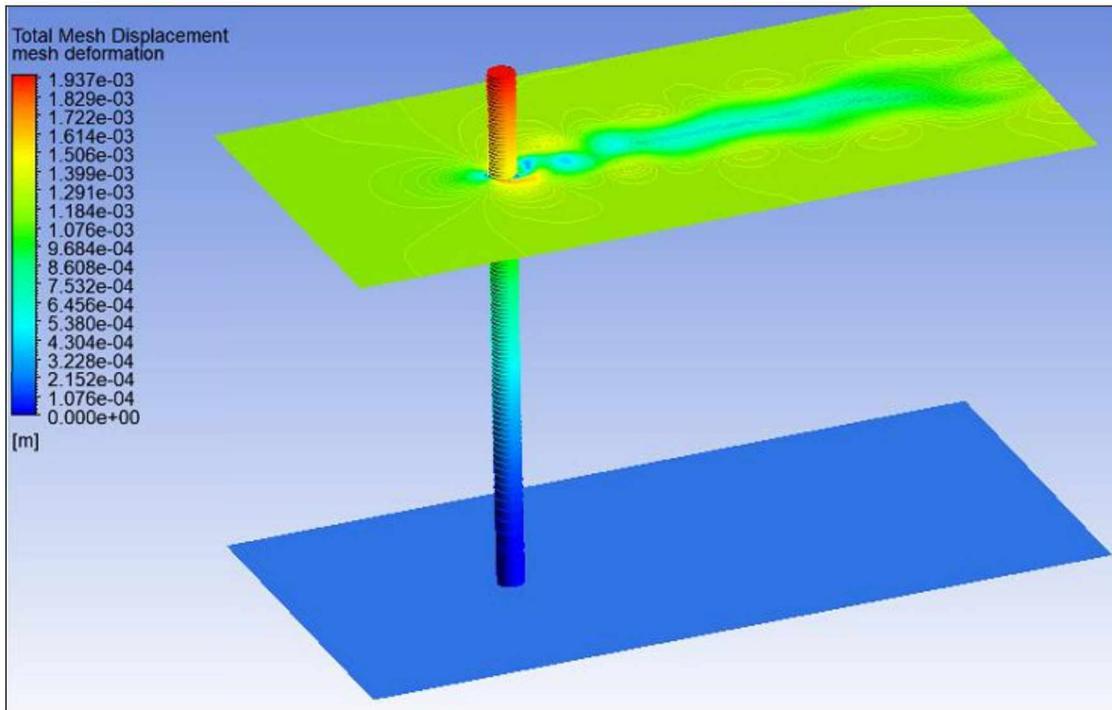


Figura 2: Velocidades en un plano horizontal y deflexión del cilindro

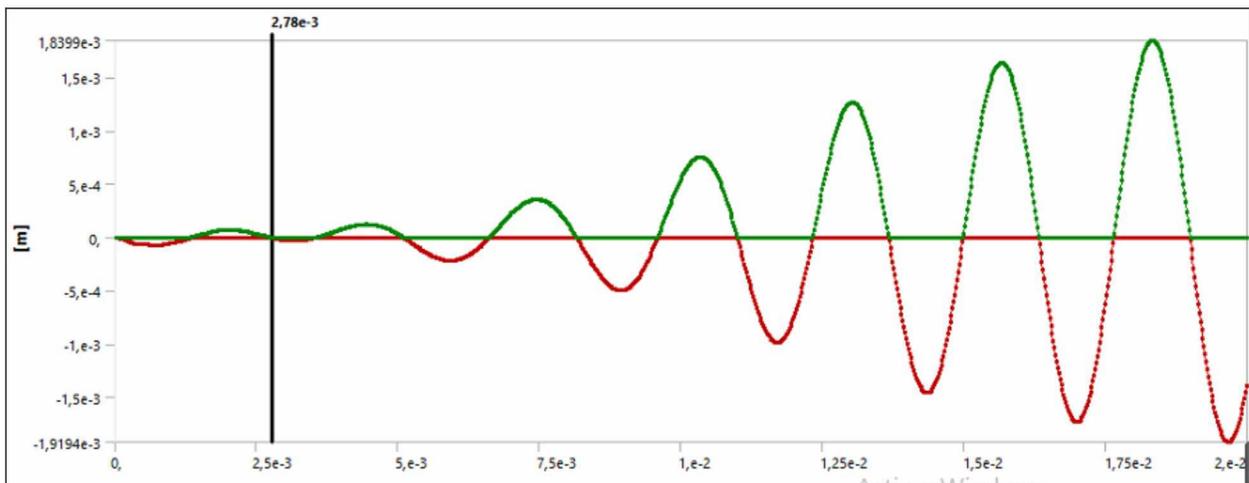


Figura 3: Desplazamiento del extremo del cilindro.

Conclusiones:

Se logró simular numéricamente la interacción fluido-estructura en el caso de un cilindro empotrado embestado por una corriente de fluido, obteniendo la respuesta dinámica estructural coincidente con los resultados teóricos. El poco tiempo de simulación logrado a la fecha de escritura de este trabajo no permite obtener conclusiones sobre la evolución a mediano plazo de la oscilación estructural, lo que constituye uno de los trabajos a futuro. Otros aspectos a mejorar son la simplificación de la malla del cilindro, utilizando elementos estructurales en vez de elementos sólidos, y la incorporación de modelos de turbulencia para estudios a mayores números de Reynolds.

Referencias:

- [1] J.D. Holmes, Wind Loading of Structures ed., Taylor and Francis, London, 2001.
- [2] Bacchi F., Scarabino A., García Sainz A., Delnero J.S.: “Fluid-dynamic interaction of rectangular cylinders of different aspect ratio”, Proceedings of the 13th International Conference on Wind Engineering, Amsterdam, Holanda, julio de 2011.
- [3] <https://www.simscale.com/blog/2018/07/tacoma-narrows-bridge-collapse/>, Consultado 20 de julio de 2021.
- [4] Blackburn, H.M., Henderson, R.D., A study of two-dimensional flow past an oscillating cylinder. Journal of Fluid Mechanics 385, 255–286, 1999.