

# Análisis aeroelástico de chimeneas de acero utilizando elementos no-lineales de lámina sin rotación

Jesús G. Valdés · Hugo Hernández · Alejandro Hernández

Recibido: Marzo 2010, Aceptado: Abril 2010  
  Universitat Polit  cnica de Catalunya, Barcelona, España 2010

**Resumen** En este trabajo proponemos el análisis de chimeneas utilizando interacción fluido-estructura como alternativa a los clásicos procedimientos internacionales bien reglamentados por diferentes países. Para lograr un análisis confiable, se ha implementado un fluido incompresible estabilizado del tipo ALE para el estudio del viento, el cual ha sido acoplado a una chimenea que se estudia con elementos lámina del tipo BST. Este tipo de elemento tiene la característica de no poseer grados de libertad de rotación, lo cual al tratarse de un elemento no-lineal geométrico permite su análisis con menos grados de libertad influyendo directamente en la velocidad del cálculo. Para el acoplamiento se ha utilizado un método fuerte con relajación de Aitken. Un estudio detallado sobre la teoría e implementación de cada una de las partes involucradas en el problema de interacción fluido-estructura se encuentra en [1]. Se presenta el particular el estudio de una chimenea de acero construida recientemente, donde se presentan diferencias entre un método clásico y el método aquí presentado usando interacción fluido-estructura.

## AEROELASTIC ANALYSIS OF STEEL CHIMNEYS USING NONLINEAR ROTATION-FREE SHELL ELEMENTS

**Summary** As alternative to methods presented in several codes around the world to analyze chimneys, an analysis procedure based in the finite element method is presented. To achieve a reliable analysis, a stabilized incompressible fluid with an ALE scheme is used to simulate wind action. Geometrically nonlinear BST rotation-free shell elements are used to model a steel chimney and both schemes are coupled to simulate the fluid-structure interaction of chimneys. Shell elements without rotation degrees improve time solution due to a significant reduction of degrees of freedom in the geometrically nonlinear system. A strong coupling scheme with Aitken relaxation method is used to ensure convergence. Detailed theory for fluid, structure and interaction can be founded in [1]. Differences between code analysis and the proposed procedure are presented for a case of study.

## 1. Introducción

Existen numerosas empresas alrededor del mundo que necesitan tener en sus instalaciones chimeneas o torres de enfriamiento. El diseño de este tipo de estructuras est  a contemplado en prácticamente todos los reglamentos del mundo. Sin embargo en un estudio reciente como se muestra en [2], se demostró que una misma chimenea puede tener una gran diferencia de resultados que varían hasta en un 780% dependiendo del reglamento utilizado. Actualmente se est   realizando investigación sobre dicho porcentaje, ya que al parecer este resultado es así de grande cuando las chi-

Jesús G. Valdés · Alejandro Hernández  
1: Departamento de Ingeniería Civil, División de Ingenierías  
Universidad de Guanajuato  
Av. Juárez 77, C.P. 36000, Guanajuato, Gto.  
e-mail: valdes@quijote.ugto.mx, aherandez@quijote.ugto.mx  
  
Hugo Hernández  
2: Facultad de Ingeniería Civil  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo  
Ciudad Universitaria s/n, Morelia, Mich.  
e-mail: hugohbarrios@yahoo.com.mx

**Tabla 1.** Características básicas de los códigos internacionales de diseño eólico

Código de diseño	Velocidad básica de viento	Densidad del aire $\rho_a(Kg/m^3)$	Número de Strouhal	Metodología empleada
AIJ (2004)	10 min	1.22	0.2	Espectral
Eurocódigo	10 min	1.25	0.18	Espectral/Resonancia de vórtices
ASCE 7-05	3 s	1.23	—	Simulación numérica
NBC-2005	1 h	1.2929	1/16	—
AS/NZS 1170.2:2002: 2005	3 s	1.2	En función del número de Reynolds	Resonancia de vórtices/Espectral
ISO 4354-1997	10 min	1.2	En función del número de Reynolds	Resonancia de vórtices
Norsk Standards NS 3491-4	10 min	1.25	En función de la longitud y el diámetro (0.20)	Espectral
Danish Standards DS 410E	10 min	1.25	En función de la longitud y el diámetro (0.20)	Espectral
CICIND-2002	1 h	1.25	Permite hacer correcciones con la altura de la chimenea Para distancia a diámetro (A/d) mayor de 15, es 0.20	Espectral
ESDU 96030	—	—	En función del número de Reynolds	Híbrido
CFE (2008)	10 min	1.25	0.2	Espectral

meneas son construidas con acero, no siendo así en el caso de chimeneas de concreto reforzado. Tal y como lo permiten hacer en algunos reglamentos, una forma más sofisticada y moderna de llevar a cabo el análisis de las chimeneas es mediante la utilización de métodos numéricos. En particular en este trabajo estudiamos la aeroelasticidad de las chimeneas, que es la interacción del viento sobre una estructura a la cual se le ocasionan deformaciones en cada instante de tiempo, cambiando consecuentemente las presiones y velocidades del viento repetidamente. Adicionalmente se hace la comparación de resultados con los valores obtenidos utilizando uno de los procedimientos clásicos que vienen dado por el Manual de Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad 2008 [3].

En lo referente a los códigos o reglamentos mundiales, algunos de los parámetros que diferencian el procedimiento de cálculo de las fuerzas estáticas y dinámicas equivalentes que produce el viento sobre una estructura se resumen en la Tabla 1.

Los códigos de diseño que especifica la Tabla 1 son: el código japonés, AIJ (2004); el eurocódigo (BS EN 1991-1-4-4:2005), el código estadounidense (ASCE 7-05), el código canadiense (NRCC 48192, 2005), el código de Australia y Nueva Zelanda (AS/NZS 1170.2:2002: 2005), las recomendaciones del ISO 4354 (1997), el código de Noruega (DS410 E: 2004, 2004), el código de Dinamarca (DS410 E: 2004, 2004), las recomendaciones del CICIND (2002), las del ESDU 96030 (1998) y el Manual de Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad Mexicana (2008). Este último y el cód-

go canadiense operan de manera casi idéntica. Hay que destacar, que la mayoría de los reglamentos tienen ecuaciones muy similares, y en particular hemos utilizado en todos nuestros cálculos el de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Una parte importante en el cálculo de chimeneas es saber cual es la fuerza cortante en su base así como el momento flexionante en la dirección del viento. Este valor se obtuvo tanto por el manual de la CFE como por análisis aeroelástico.

En resumen, se ha estudiado una chimenea de acero de reciente construcción tanto por métodos clásicos basados en reglamentos bien establecidos como mediante la utilización de la interacción fluido-estructura resuelta mediante mecánica computacional. De la misma manera, se propone una metodología para resolver este tipo de problemas de ingeniería haciendo uso de los métodos numéricos con teorías de investigaciones recientes que han demostrado tener un gran futuro para la ingeniería aplicada en el mundo actualmente.

## 2. Estructura

Para el estudio de la estructura de la chimenea se han utilizado elementos finitos de lámina. Ya que los desplazamientos encontrados al momento de realizar el análisis de la chimenea superan varias veces el espesor del acero que forman la chimenea, se ha tenido que recurrir a un análisis geométricamente no-lineal.

Como es bien sabido, los problemas con los giros en elementos no-lineales complican considerablemente

la formulación con elementos finitos. Añadido a esto, hay que tomar en cuenta que se trata de un análisis dinámico el cual es resuelto paso a paso en un intervalo de tiempo, por lo que entre menos grados de libertad existan menor será el esfuerzo computacional para llegar a la solución.

Por estas razones, se ha decidido utilizar un elemento geométricamente no-lineal de lámina delgada sin grados de libertad por rotación. Este tipo de formulaciones no es nueva y existen diversas investigaciones sobre este tipo de elementos al respecto. Trabajos de este tipo de formulación en el rango no-lineal se encuentran en [4]-[8]. En particular en este trabajo se ha usado la formulación de Valdés y Oñate [9]. Esta formulación tiene la ventaja de que puede trabajar con fibras de refuerzo local y materiales tanto isótropos como ortótropos. Se trata de una formulación implícita que fácilmente se puede extrapolar a problemas explícitos. Las ecuaciones a resolver se obtienen de la ecuación de conservación del momento lineal, que una vez discretizadas con elementos finitos consisten en resolver la siguiente igualdad

$$\mathbf{f}^{\text{int}}(\mathbf{u}_{n+1}) + \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_{n+1} = \mathbf{f}^{\text{ext}}(\mathbf{u}_{n+1}) \quad (1)$$

donde  $\mathbf{f}^{\text{int}}$  son las fuerzas internas,  $\mathbf{f}^{\text{ext}}$  son las fuerzas externas,  $\mathbf{M}$  es la masa,  $\mathbf{u}$  es el vector de los desplazamientos y  $\ddot{\mathbf{u}}$  es el campo de las aceleraciones. Para nuestro elemento de lámina, las fuerzas internas equivalen a

$$\mathbf{f}^{\text{int}} = A_0 [\mathbf{B}^T]^{\text{memb}} \mathbf{N} + A_0 [\mathbf{B}^T]^{\text{bend}} \mathbf{M} \quad (2)$$

donde  $A_0$  es el área de la superficie media del elemento lámina,  $\mathbf{N}$  son las fuerzas axiales y  $\mathbf{M}$  son los momentos flexionantes. Las matrices  $\mathbf{B}$  que relacionan las deformaciones con los desplazamientos se obtienen de diferentes maneras. Como en este trabajo se usa en particular un elemento triangular de tres nodos, la matriz de membrana  $\mathbf{B}^{\text{memb}}$  no cambia y se encuentra en [1],[9]. Sin embargo, la matriz de flexión  $\mathbf{B}^{\text{bend}}$  es completamente diferente. La razón es debida a que al tratarse de un triángulo de tres nodos, no hay curvaturas en el elemento que nos permitan calcular la flexión. Por esta razón y con el procedimiento explicado en [1],[9] se tiene que obtener la flexión de cada elemento  $\mathbf{M}$  auxiliándose de los tres elementos que lo rodean **1,2,3**, ver Figura 1. De esta forma la matriz  $\mathbf{B}^{\text{bend}} = \mathbf{B}^{\text{main}} + \mathbf{B}^{\text{adj}}$  donde sus componentes se pueden obtener a partir de la variación del tensor de deformación para la flexión, el cual se expresa por

$$\delta\mathbf{E}^{\text{bend}} = \mathbf{B}^{\text{main}} \delta\mathbf{u}_I + \mathbf{B}^{\text{adj}} \delta\mathbf{u}_I^J \quad (3)$$

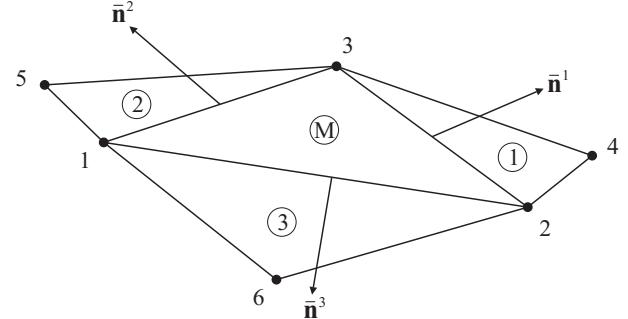


Figura 1. Elementos para calcular la flexión

donde la expresión desarrollada es equivalente a

$$\begin{aligned} \delta\mathbf{E}^{\text{bend}} = & \frac{1}{2A_0} \sum_{J=1}^3 l^J \begin{bmatrix} \bar{n}_1^J & 0 \\ 0 & \bar{n}_2^J \\ \bar{n}_2^J & \bar{n}_1^J \end{bmatrix} \times \\ & \sum_{I=1}^3 \begin{bmatrix} \frac{\partial N_I}{\partial x} \mathbf{x}_{,1}^J \cdot \tilde{\mathbf{x}}_{,1}^h + \frac{\partial N_I}{\partial y} \mathbf{x}_{,1}^J \cdot \tilde{\mathbf{x}}_{,2}^h \\ \frac{\partial N_I}{\partial x} \mathbf{x}_{,2}^J \cdot \tilde{\mathbf{x}}_{,1}^h + \frac{\partial N_I}{\partial y} \mathbf{x}_{,2}^J \cdot \tilde{\mathbf{x}}_{,2}^h \end{bmatrix} \mathbf{n} \cdot \delta\mathbf{u}_I \\ & - \frac{1}{2A_0} \sum_{J=1}^3 l^J \begin{bmatrix} \bar{n}_1^J & 0 \\ 0 & \bar{n}_2^J \\ \bar{n}_2^J & \bar{n}_1^J \end{bmatrix} \sum_{I=1}^3 \begin{bmatrix} \frac{\partial N_I^J}{\partial x} \\ \frac{\partial N_I^J}{\partial y} \end{bmatrix} \mathbf{n} \cdot \delta\mathbf{u}_I^J \end{aligned} \quad (4)$$

donde igualando la ecuación (3) y (4) se puede obtener la matriz de flexión  $\mathbf{B}^{\text{bend}}$ , en la cual  $l^J$  es la longitud de los lados del elemento principal  $\mathbf{M}$ ,  $\bar{n}_\alpha^J$  es la normal de cada lado del elemento con  $\alpha = 1, 2$  y se encuentra en el plano del elemento principal,  $\mathbf{x}_{,\alpha}^J$  es la derivada cartesiana de las coordenadas de los elementos adyacentes y  $\tilde{\mathbf{x}}_{,\alpha}^h$  son las derivadas de una base contravariante. Detalles del desarrollo de la ecuación (4) se encuentran en [9].

El esquema de integración en el tiempo de las ecuaciones del movimiento dadas por la ecuación (1) se hace con el método *generalized-α*. Es recomendable la utilización de este método debido a que métodos como el de Newmark producen soluciones espurias a medida que se avanza en el tiempo. Este elemento se ha validado y ha mostrado tener un comportamiento excelente tanto con mallas estructuradas como con mallas no-estructuradas. Hay que resaltar que al tratarse de un elemento sin grados de libertad por rotación, el tamaño del sistema de ecuaciones a resolver se reduce a la mitad por lo que el tiempo necesario de computo en cada instante de tiempo es mucho menor que con un elemento de lámina convencional.

### 3. Fluido

Para la simulación del flujo del viento y el cálculo de las fuerzas que ejerce sobre la estructura, se ha usado un fluido incompresible por tenerse velocidades de viento menores a 0.3 Mach. Las ecuaciones utilizadas son mejor conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes incompresibles y se expresan por

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}_{n+1} + \mathbf{K}\mathbf{v}_{n+1} - \mathbf{G}\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{f}_{n+1}^{\text{ext}} \\ \mathbf{G}^T \mathbf{v}_{n+1} = 0 \quad (5)$$

donde  $\mathbf{v}$  es el vector de las velocidades,  $\mathbf{p}$  es el campo de las presiones,  $\dot{\mathbf{v}}$  son las aceleraciones,  $\mathbf{M}$  es la matriz de masa,  $\mathbf{K}$  es la matriz que contiene los términos convectivos y viscosos, mientras que  $\mathbf{G}$  es una matriz que sirve para poder incluir la influencia del término de la presión o para tomar en cuenta la incompresibilidad del fluido. En el mundo de la dinámica de fluidos es más común encontrar las ecuaciones (5) escritas de la siguiente manera,

$$(\dot{\mathbf{v}}_h^{n+1}, \mathbf{w}_h) + c(\mathbf{v}_h^{n+1}, \mathbf{v}_h^{n+1}, \mathbf{w}_h) - b(p^{n+1}, \mathbf{w}_h) + \\ a(\mathbf{v}_h^{n+1}, \mathbf{w}_h) = (\mathbf{b}_h^{n+1}, \mathbf{w}_h) \quad (6) \\ b(q_h, \mathbf{v}_h^{n+1}) = 0$$

donde se ha utilizado la notación introducida en [10] y [11]. El significado de estas expresiones también se puede encontrar en [1]. Con objeto de analizar la estructura lo más rápido posible, se han desacoplado las ecuaciones (6) utilizando el método de los pasos fraccionados tal y como se encuentra en [11]. Además, ya que se trata de una formulación completamente euleriana, se ha tenido que cambiar por una formulación del tipo *ALE*, ya que de esta forma se toma en cuenta el movimiento de la estructura y de esta manera se puede mover el dominio del fluido. Estas ecuaciones se expresan de la siguiente manera,

$$(\dot{\tilde{\mathbf{v}}}_h^{n+\alpha_f^f}, \mathbf{w}_h) + c(\tilde{\mathbf{c}}_h^{n+\alpha_f^f}, \tilde{\mathbf{v}}_h^{n+\alpha_f^f}, \mathbf{w}_h) - b(p_h^n, \mathbf{w}_h) + \\ a(\tilde{\mathbf{v}}_h^{n+\alpha_f^f}, \mathbf{w}_h) + \tau(\tilde{\mathbf{c}}_h^{n+\alpha_f^f} \cdot \nabla \tilde{\mathbf{v}}_h^{n+\alpha_f^f} + \\ \nabla p_h^n - \boldsymbol{\pi}_h^n, \tilde{\mathbf{c}}_h^{n+\alpha_f^f} \cdot \nabla \mathbf{w}_h) = (\mathbf{b}_h^{n+1}, \mathbf{w}_h) \\ - \frac{\Delta t \gamma^f}{\alpha_m^f} (\nabla(p_h^{n+1} - p_h^n), \nabla q_h) - \tau(\tilde{\mathbf{c}}_h^{n+\alpha_f^f} \cdot \nabla \tilde{\mathbf{v}}_h^{n+\alpha_f^f} + \\ \nabla p_h^{n+1} - \boldsymbol{\pi}_h^n, \nabla q_h) = b(q_h, \tilde{\mathbf{v}}_h^{n+1}) \\ \frac{\alpha_m^f}{\Delta t \gamma^f} (\mathbf{v}_h^{n+1} - \tilde{\mathbf{v}}_h^{n+1}, \mathbf{w}_h) - b(p_h^{n+1} - p_h^n, \mathbf{w}_h) = \mathbf{0} \\ (\boldsymbol{\pi}_h^{n+1}, \boldsymbol{\eta}_h) - (\tilde{\mathbf{c}}_h^{n+\alpha_f^f} \cdot \nabla \tilde{\mathbf{v}}_h^{n+\alpha_f^f} + \nabla p_h^{n+1}, \boldsymbol{\eta}_h) = \mathbf{0} \quad (7)$$

las cuales están formadas por un sistema de 4 pasos implícitos. El primer paso consiste en resolver una velocidad intermedia, la cual es no lineal. Con esta velocidad intermedia, se calcula en un segundo paso la

presión en el paso de tiempo. El tercer paso consiste en encontrar la velocidad final de cada paso de tiempo. Finalmente el cuarto paso estabiliza el sistema completo. En particular, se ha utilizado la integración en el tiempo con el método *generalized- $\alpha$*  para pasos fraccionados introducido en [1]. En esta referencia se encuentra paso a paso la deducción analítica de la formulación de fluidos mencionada, así como la validación para fluidos incompresibles.

### 4. Interacción fluido-estructura

Una vez que se tiene resuelto el problema del cálculo de la estructura con el elemento de lámina (CSD), y el cálculo del flujo del viento (CFD) en un dominio que envuelva perfectamente a la estructura, se tiene que ver la manera en que ambos resultados trabajen de manera conjunta para poder predecir su efecto simultáneo, tal como sucede en la realidad. Existen diferentes investigaciones de como hacer el acoplamiento de problemas de interacción fluido-estructura, de entre los que destacan los monolíticos [12] y los particionados [13],[1].

En algunos casos, la desventaja de los esquemas monolíticos es la necesidad de tener todo programado en un solo código, lo que además presenta el problema de que se aumente considerablemente el número de grados de libertad y consecuentemente el tiempo de computo.

Por esta razón, los métodos particionados presentan la ventaja de que se pueden tener códigos especializados en cada una de las ramas del acoplamiento, en este caso la parte de la estructura y la parte del fluido. Estos códigos al estar separados pueden trabajar de manera desacoplada reduciendo el número de grados de libertad lo que impacta de manera positiva en el tiempo de computo. La desventaja en los métodos particionados suele ser la convergencia del acoplamiento entre ambos, lo cual se puede remediar utilizando esquemas de Aitken que solucionan este problema para aplicaciones en donde la masa añadida no sea representativa del problema. Esta última solución fue la que se adoptó en este trabajo [1] y ha dado excelentes resultados por tratarse de problemas aeroelásticos.

El proceso de cálculo consiste en una primer etapa hacer una predicción con el solver estructural (CSD) de los desplazamientos de la estructura basándose en la dinámica encontrada en el paso de tiempo anterior. Esta predicción de los desplazamientos se manda entonces al solver del fluido y antes de realizar cualquier cálculo se tiene que debe ajustar la malla del fluido para que coincida con la malla de la estructura utilizando un solver para la dinámica de la malla (CMD). Despues que la malla del fluido se ha ajustado a los desplazamientos de la estructura, se procede a realizar el cálculo del

fluido utilizando el solver respectivo (CFD). Finalmente las fuerzas que el fluido ejerce sobre la estructura son transmitidas al solver estructural y se vuelven a calcular los desplazamientos de la estructura. Este procedimiento se repite hasta que se cumpla con una tolerancia de convergencia y entonces se da por convergido el paso de tiempo. Después la metodología se repite durante todos los instantes de tiempo que dure el tiempo de análisis del problema. En [1] se encuentran los algoritmos de cálculo para el acoplamiento.

## 5. Problema estudiado

El objetivo de este trabajo es calcular una chimenea de acero A36 de reciente construcción utilizando la interacción fluido-estructura con el fin de encontrar la solución más exacta posible. Esta chimenea ya construida se puede observar en la Figura 2. La chimenea en cuestión fue calculada con métodos clásicos utilizando el Manual de Diseño por Viento de la CFE, por lo que resulta importante ver las diferencias con el cálculo por métodos numéricos. La chimenea consiste en un cilindro de acero con una parte de sección variable hasta una altura en donde existe un cambio de pendiente y a partir de ahí se mantiene constante el diámetro hasta la altura total de la misma.



Figura 2. Chimenea construida en acero

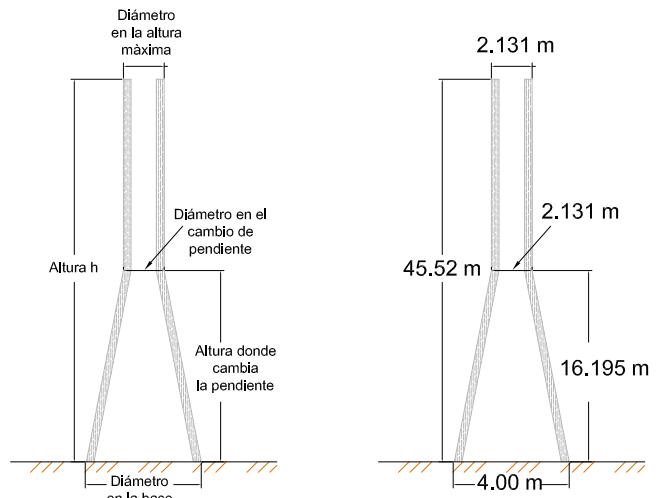


Figura 3. Geometría de la chimenea

La geometría de la estructura se puede ver simplificada en el esquema que aparece en la Figura 3. El diámetro en la base es de 4.00 m., y tiene una variación lineal hasta 2.131 m. a una altura de 16.195 m. a partir de donde permanece constante hasta una altura total de 45.52 m. El espesor de la lámina de acero varía con la altura de la siguiente manera: Desde la base y hasta una altura de 10.0 m., la sección 1 tiene una lámina de acero de 22.2 mm de espesor. A partir de esta altura y por 6.195 m. más se encuentra la sección 2, en donde el espesor es de 19.05 mm. La sección 3 parte de los 16.195 m. hasta los 23.695 m. con un espesor de 15.90 mm. Finalmente la sección 4 abarca el resto de la chimenea hasta alcanzar una altura de 45.52 m., teniendo en esta parte un espesor de 12.70 mm.

Para tratar de uniformizar al máximo los datos de partida para el análisis de las chimeneas con métodos clásicos y la interacción fluido-estructura, se han tomado las velocidades de diseño proporcionadas en [3] y que son las siguientes: para la sección 1: 31.69 m/s, sección 2: 34.40 m/s, sección 3: 36.70 m/s y finalmente la sección 4 con 41.01 m/s.

Los datos de análisis de la chimenea son los siguientes para el fluido: densidad del aire  $\rho = 1.185 \text{ kg/m}^3$  y una viscosidad  $\mu = 1.831 \times 10^{-5} \text{ kg/(m \cdot s)}$ . Para la estructura de acero se tiene: densidad del acero  $\rho = 7,850 \text{ kg/m}^3$ , un módulo de Elasticidad  $E = 210 \text{ GPa}$  y coeficiente de poisson  $\nu = 0.3$ . El paso de tiempo empleado en el análisis es de  $\Delta t = 0.0015 \text{ s}$ . El número de pasos de tiempo analizados es de 4,000 pero previamente se inicia el cálculo del fluido con 10 pasos utilizando una integración de primer orden y después se sigue con 1000 pasos utilizando una integración de segundo orden. Después de esta etapa es cuando se inicia el cálculo completo con el esquema de interacción fluido-estructura.

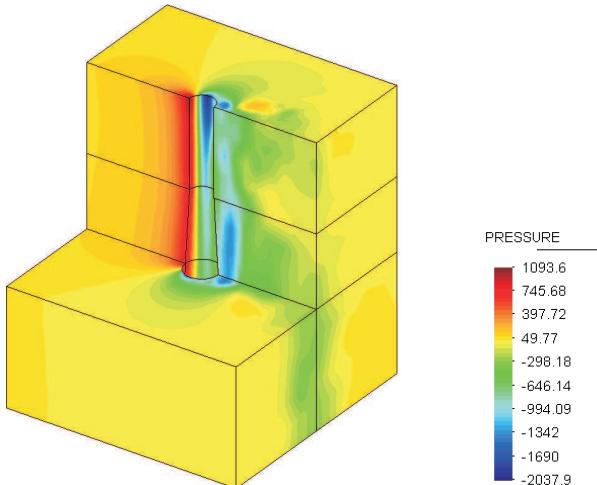


Figura 4. Presiones del fluido [Pa]

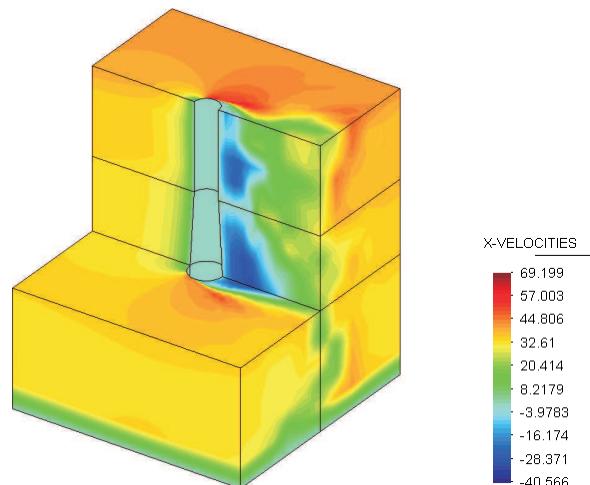


Figura 5. Componente x de la velocidad [m/s]

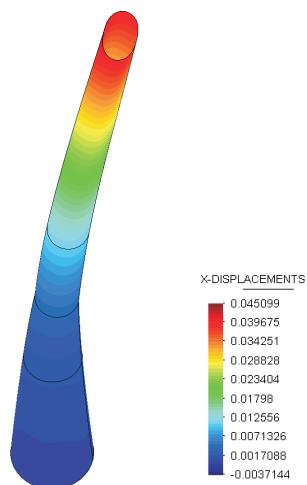


Figura 6. Componente x de los desplazamientos [m]

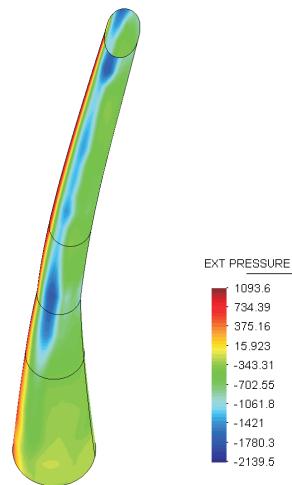


Figura 7. Presiones sobre la chimenea [Pa]

En la Figura 4 se presenta un corte de una parte del fluido, en donde se puede observar la formación de los vórtices de Von Karman, los cuales se alternan a uno y otro lado de la chimenea. Hay que resaltar que en la zona de barlovento el viento ejerce una presión de hasta 1093 Pa, mientras que existen zonas de succión con valores de -2139 Pa. Esto nos hace percibirnos que aunque la presión es casi constante en una zona de la chimenea, existe zonas de succión que tienen el doble de ese valor y que se forman en la zona de vórtices. Esto generará desplazamientos perpendiculares de la estructura al flujo del viento.

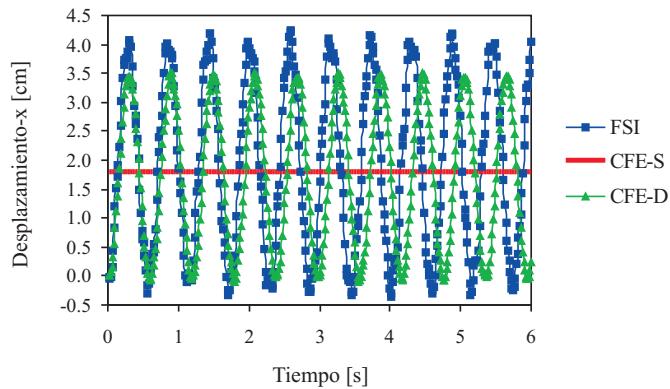
En la Figura 5 se puede apreciar la componente  $x$  de la velocidad, que como podemos apreciar da tanto valores positivos como negativos. Como era de esperar, a los lados que se encuentran a  $90^\circ$  con respecto al flujo del aire tenemos que la velocidad aumenta considerablemente hasta casi los 70 m/s, mientras que en la

zona de sotavento hay velocidades negativas debido al desprendimiento de vórtices con un valor de hasta -40 m/s.

Por otro lado, en lo referente a la estructura podemos apreciar en la Figura 6 los desplazamientos de la estructura. Hay que destacar que en una animación de los desplazamientos y deformaciones de la estructura se pueden apreciar como la chimenea pierde su sección circular y se generan en su lugar elipses debido a los vórtices que se alternan a uno y otro lado de la sección. Este comportamiento se menciona en varios de los reglamentos revisados. Los desplazamientos máximos encontrados en la dirección del flujo del viento son de 4.5 cm., mientras que los desplazamientos máximos perpendiculares al flujo del viento son de 1.0 cm. Estos desplazamientos máximos no se presentan simultáneamente, pero se encuentra que la norma del desplazamiento es de 4.5 cm.

**Tabla 2.** Resultados obtenidos para el ejemplo de aplicación

Método	Norma de los desplazamientos (cm)	Error (%)
Interacción Fluido-Estructura	4.5	—
CFE - Estático	1.8	55
CFE - Dinámico	3.5	22

**Figura 8.** Desplazamiento-x vs. Tiempo

En la Figura 7 se puede apreciar el campo de presiones de la chimenea en un instante de tiempo. Se aprecia claramente que la parte de presiones (rojo) es constante sobre una franja de la chimenea, mientras que la parte de las succiones (azul) varía en los costados de la chimenea. Esto es debido al efecto de los vórtices de Von Karman que genera el flujo del viento alrededor de la chimenea.

Con los resultados obtenidos de la interacción fluido-estructura se hace una comparativa con los resultados que se obtienen con el reglamentos mexicano, en particular, utilizando el Manual de Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad. Esta comparación se aprecia en la Tabla 2, donde se muestran la norma de los desplazamientos máximos para los diferentes métodos. Se presentan dos métodos para la CFE, uno estático y otro dinámico. Esto se ha realizado con el fin de hacer comparaciones más precisas con la interacción fluido-estructura que es un método dinámico. Las cargas de presión de la parte estática en el método de la CFE son las mismas que para la parte dinámica de la CFE y son los valores que se presentan en la Tabla 3. La única diferencia es que el método dinámico se hace, como su nombre lo indica, dinámicamente. Está indicado en el Manual de la CFE que el valor del amortiguamiento crítico para chimeneas como la del ejemplo es del 1 %, valor utilizado en este ejemplo tanto para el caso dinámico de la CFE como para la interacción fluido-estructura. En la Figura 8 se observa la gráfica

del desplazamiento en dirección x de la parte superior de la chimenea en la zona de sotavento. Como se puede apreciar, en la parte de interacción fluido-estructura (FSI) aparecen variaciones en el periodo de la gráfica, lo que indica que existen modos acoplados en la dinámica de la estructura. También se observa el análisis dinámico que proporciona la Comisión Federal de Electricidad tanto en su parte estática (CFE-S) como en su parte dinámica (CFE-D), cuyos desplazamientos máximos son los que aparecen en la Tabla 2.

Se aprecia claramente en la Tabla 2 como los desplazamientos obtenidos con los reglamentos están por debajo del valor exacto encontrado con interacción fluido-estructura. Los resultados obtenidos podrían ser verdaderos o completamente falsos, sin embargo tenemos varias razones por las cuales creer que nuestro análisis con interacción fluido-estructura es el más acertado. Una de ellas es que nuestra formulación ha sido validada tanto en la parte estructural, como para el fluido y la interacción [1]. Otra es el hecho que en muchas chimeneas construidas alrededor del mundo se puede apreciar como para restringir los desplazamientos éstas se restringen con cables, lo que nos da la certeza que al momento del cálculo los desplazamientos no eran los que en la realidad se presentan, tal y como lo sugieren los resultados aquí obtenidos. Esto sin tomar en cuenta que la mayoría de los reglamentos alrededor del mundo consideran los desplazamientos basados en análisis estáticos.

**Tabla 3.** Resumen CFE 2008

División No.	Altura <sub>z</sub> (m)	Presión <sub>x</sub> (Pa)	Fuerza <sub>x</sub> (N)	Momento <sub>y</sub> (N · m)
1	0 a 5	308.2	5,719.4	14,298.6
2	5 a 10	315.2	4,940.2	37,051.5
3	10 a 15	371.5	4,750.5	59,381.9
4	15 a 20	419.3	4,501.6	78,778.8
5	20 a 25	452.3	4,819.4	108,436.1
6	25 a 30	481.3	5,127.6	141,008.6
7	30 a 35	507.2	5,403.5	175,613.6
8	35 a 40	530.7	5,654.5	212,042.8
9	40 a 45	552.4	5,885.5	250,134.1
10	45 a 45.52	554.6	615.6	27,858.9
		Σ	47,417.8	1,104,604.9

**Tabla 4.** Resumen de cortantes y momentos flexionantes

Método	Cortante <sub>x</sub> (N)	Momento <sub>y</sub> (N · m)	Error (%)
Interacción Fluido-Estructura	81,236.6	1,757,795.0	—
Manual de CFE 2008 – Viento	47,417.8	1,104,604.9	37

Otra parte muy importante en el análisis y diseño de chimeneas es la obtención de la fuerza cortante en la base de la estructura así como el momento flexionante siguiendo la dirección del flujo del viento. Estos valores se resumen al final de la Tabla 3 siguiendo el método de la CFE.

Ya por último se observa en la Tabla 4 los resultados obtenidos del cortante y momento flexionante en la base comparando la interacción fluido-estructura con el Manual de la CFE [3].

Si nos enfocamos solamente a la parte de diseño por viento, podremos observar que aún el nuevo reglamento de diseño por viento subestima el valor real tanto de la fuerza cortante como del momento flexionante.

## 6. Conclusiones

De este trabajo se concluye que con las herramientas que se tienen actualmente se puede realizar el análisis y diseño por viento de chimeneas de tal forma que se utilice la interacción fluido-estructura. Además quedó demostrado como el diseño de este tipo de estructuras utilizando reglamentos queda por debajo de resultados más reales como los que proporcionan los elementos finitos.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al CONCYTEG (Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato) por el apoyo prestado en la realización de esta investigación, así como a Gilberto Ávila Jiménez por su interés en aprender mecánica computacional y ayudarnos con la realización de los ejemplos utilizados en este trabajo.

## Referencias

1. Valdés J.G. (2008) *Fluid-Structure Interaction Analysis*, Ed. Verlag D.M. Alemania
2. Hernández H., López A., Muñoz C.J. (2008) Respuesta Eólica de Estructuras Debida al Desprendimiento de Vórtices. En *it Memorias del XVI Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*. Veracruz. México
3. Comisión Federal de Electricidad (2008) *Manual de Diseño por Viento*. Instituto de Investigaciones Eléctricas
4. Cendoya P. (1996) Nuevos Elementos Finitos para el Análisis Elastoplástico No-Lineal de Estructuras Laminares. Lectura de tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. España
5. Rojek J., Oñate E., Postek E. (1996) Application of explicit codes to simulation of sheet and bulk metal forming processes. *Journal of Material Processing Technology*. 80-81:620-627
6. Flores F.G., Oñate E. (2001) A basic thin shell triangle with only translational dofs for large strain plasticity. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 51:57-83
7. Cirak F.m Ortiz M. (2001) Fully  $C^1$  conforming subdivision elements for finite deformation thin-shell analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 51:813-833
8. Flores F.G., Oñate E. (2005) Improvements in the membrane behavior of the three-node rotational-free bst shell triangle using an assumed strain approach. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 194:907-932
9. Valdés J.G., Oñate E. (2009) Orthotropic Rotation-Free Basic Thin Shell Triangle. *Computational Mechanics*. 44:363-375
10. Gunzburger M.D. (1989) *Finite Element Methods for Viscous Incompressible Flow*. San Diego Academic Press
11. Codina R. (2001) Pressure stability in fractional step finite element methods for incompressible flows. *Journal of Computational Fluids* 70:112-140
12. Hubner B. (2004) A monolithic approach to fluid-structure interaction using space-time finite elements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 193:2087-2104
13. Wuchner R. (2006) Mechanik und numeric der formfinding und fluid-struktur-interaktion von membrantragwerken. Tesis doctoral. Universidad Técnica de Munich