



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

VIBRACIONES AEROELÁSTICAS EN CHIMENEAS METÁLICAS ESBELTAS

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ROBERTO WILLEBALDO LÓPEZ PEÑA

TUTOR PRINCIPAL
NEFTALÍ RODRÍGUEZ CUEVAS

MÉXICO, D.F. NOVIEMBRE DE 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. LUIS ESTEVA MARABOTO

Secretario: M. EN I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

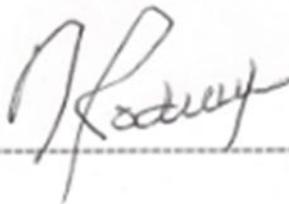
Vocal: ING. NEFTALÍ RODRÍGUEZ CUEVAS

1er. Suplente: DRA. SONIA ELDA RUIZ GÓMEZ

2 do. Suplente: M. EN I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ

Lugar donde se realizó la tesis:
Instituto de Ingeniería UNAM

TUTOR DE TESIS:
ING. NEFTALÍ RODRÍGUEZ CUEVAS



Handwritten signature of Neftalí Rodríguez Cuevas, written in black ink over a horizontal dashed line.

Agradezco y dedico este trabajo a la:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Institución ejemplar y piedra angular para el desarrollo de nuestro país.

Asimismo, a mis maestros, y en especial al Ing. Neftalí Rodríguez Cuevas por su apoyo y paciencia durante el proceso.

Con cariño a mi familia, de quien siempre recibí expresiones de aliento:

A mis padres: Roberto † y Gloria †

A mis hijos: Roberto, Mónica Patricia, Sirio y Max Dilan.

A mi esposa: Nora

A mis nietos: Bruno, Natalia, Matías, Gerardo, Emiliano y María.

A mis hermanos: Dulce Gloria, Maximino, Linda Aurora, Reymundo, Estrella Celeste †, Gerardo, Alejandro †, Iris del Rocío, Maravilla, Cristal de María.

A mis cuñados: Chuy, Chavo, Adriana, Lalo, Chata y Nichol.

A mis primos: Virginia, Miguel Angel, MaríaTeresa, Guillermina, Antonio, Guadalupe, Lucía, Concepción, , Mario y Marissa.

A Gerardo Zea, Angel Escandón y Liliana Gutierrez.

A Rogelio y Dora.

A Mauricio y María Eugenia.

A Blanca Levy.

A mis ahijados: Angélica, Fabiola, Reynaldo y Sofía.

A mis sobrinos: Máximo, Dulce †, Verónica, Brisia, Salvador Wilfrido, Loalé, Pablo Federico, Fabían Alberto, Gerardo Daniel, Luis Enrique, Adriana, Milton Willebaldo, Paula Carolina, Sebastian, Giovanni, Alexa, Carlos y Karla, Virginia, Celia, Roberto, Gerardo, Alberto, Mariana, Antonio, Martha Celia, Roberto, Guadalupe, Tania, Edna, Manuel, Mario, María Fernanda, Mariana, Diego y Carlos Miguel.

También a mis amigos y compañeros con quienes de una u otra forma compartí este nuevo y estimulante periodo de estudio: Honorio, Emilio Guillermo, Arturo, Eduardo Enrique, José Carlos, Carlos Elías †, Munir, Juan Carlos Corona, Abel Cedeño, Vicente Santín †, Reynaldo y José Ramón.

A Jorge Peraza, Roberto Heatley, Jorge Díaz Padilla y Juan Mario Rodríguez por la confianza depositada.

A Gabriela Morales por su profesionalismo.

A Gerardo Vallejo, Pilar Jiménez, Roberto Aguilar †, Edgar Flores † y mi tocayo Roberto Estrada.

Con especial agradecimiento y cariño a Clara y a Cesar por su apoyo con los temas del lenguaje.

Contenido

Resumen – Abstract.....	1
Notación.....	2
1.- Introducción.....	3
2.- Generalidades.....	9
3. Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.....	14
3.1. Respuesta paralela al viento.....	15
3.1.1. Flujo laminar y velocidad constante.....	15
3.1.2. Flujo laminar y velocidad variable, escalonada.....	16
3.1.3. Flujo laminar y velocidad variable, armónicamente, en baja y alta frecuencia.....	17
3.1.4. Flujo turbulento.....	20
3.1.4.1. Flujo con baja velocidad y baja turbulencia.	21
3.1.4.2. Flujo con baja velocidad y alta turbulencia.....	22
3.1.4.3. Flujo con alta velocidad y baja turbulencia.....	23
3.1.4.4. Flujo con alta velocidad y alta turbulencia.....	23
3.1.5. Consideraciones relativas a la respuesta paralela al viento turbulento.	24
3.2. Respuesta transversal al viento.....	26
3.2.1. Respuesta a fuerzas derivadas del desprendimiento de vórtices resonantes.....	26
4. Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.....	33
4.1. Número de Reynolds.....	33
4.2. Longitud de correlación efectiva.	34
4.2.1. Longitud de correlación efectiva como función del perfil de velocidades del viento.....	37
4.3. Efecto de la turbulencia.....	46
4.4. Efecto del amortiguamiento.....	49
4.5. Coeficiente de fuerza lateral.....	53
4.6. Bloqueo aeroelástico.....	55
4.6.1. El bloqueo aeroelástico estudiado a través de espectros de Fourier.....	56
4.6.2. Efecto del cambio de fase en la respuesta si en la estructura actúa una fuerza armónica.....	57
5. Análisis de la respuesta transversal de Chimeneas existentes.....	61
5.1. Método Simplificado de Vickery, Código Canadiense.....	63
5.2. Método espectral, Eurocódigo.....	64

5.3. Simulación de la respuesta mediante programas comerciales.....	65
5.4. Cálculo de la respuesta por el método resonante.....	66
5.5. Resumen.....	67
6. Algunos aspectos relativos al diseño con base en la respuesta transversal. Fatiga.....	69
7. Conclusiones y comentarios.....	74
Apéndice A: Glosario de términos relacionados con chimeneas.....	77
Apéndice B: Propuesta para denominar bloqueo aeroelástico al fenómeno conocido como lock-in.....	81
Apéndice C: Cálculo de la rigidez de una viga en voladizo cuando está sometida a una carga uniforme en el extremo opuesto al empotramiento.....	82
Apéndice D: Simulación de series de velocidad del viento por el método de Montecarlo.....	83
Referencias.....	86

Resumen

Las estructuras metálicas esbeltas, representadas típicamente por las Chimeneas metálicas, son especialmente sensibles a la acción de vibraciones inducidas por vórtices. En este trabajo se clarifican algunos conceptos de los desplazamientos paralelos ante la acción del viento turbulento, y es analizada la participación de diversos parámetros, como el Número de Reynolds, la longitud de correlación efectiva, el perfil del viento, la turbulencia, el amortiguamiento y el coeficiente de fuerza lateral. Asimismo se desarrolla una expresión similar a la propuesta en diversos códigos, al aplicar el enfoque conocido como resonante. También, son exploradas las posibilidades de modelar el fenómeno mediante la aplicación de series de tiempo y el empleo de programas comerciales, en este caso SAP2000 V.14. Debe concluirse que la respuesta transversal máxima está íntimamente ligada a la resonancia entre la frecuencia del desprendimiento de vórtices y las frecuencias de la estructura, lo que conduce a la aparición del bloqueo aeroelástico, y a un amortiguamiento aerodinámico negativo del orden del estructural cuando los desplazamientos son suficientemente amplios para interactuar con el viento, para que finalmente, en condiciones extremas estos últimos tengan un comportamiento descontrolado, implicando estados de esfuerzo superiores a la capacidad de la estructura. A pesar de lo extenso de las investigaciones realizadas, aún no se cuenta con procedimientos definitivos para predecir la respuesta.

Abstract

Line-like structures, from which steel Chimneys are representative, are very sensitive to vortex induced vibrations. In this paper, some aspects of the maximum along-wind deflection amplitude in presence of turbulence are clarified, and is analyzed the roll of some parameters in the across-wind response. It is developed an expression, similar to that proposed in some codes, when the resonant approach is applied. Also, possibilities are explored in order to model the process by means of commercial software, SAP2000 V.14 in this case. It is concluded that the across-wind maximum amplitude is closely dependent on resonance between the frequency of vortex shedding and the structure frequencies, which in turn develops the lock-in phenomenon, and on negative aerodynamic damping similar in magnitude to the structural when amplitudes are large enough as to interact with the wind; so finally, in extreme conditions the response come out of control, with stress states beyond the structure capacity. Besides the wide investigations up to date, there is no a final word to predict the response.

Notación

A	Área.	I	Momento de inercia de la sección transversal de la Chimenea.
C	Coefficiente de fuerza del viento, relación entre la fuerza efectiva a la obtenida multiplicando la presión aerodinámica por el área.	Iu(z)	Turbulencia en dirección del viento y altura z.
C _D	Coefficiente de arrastre, (fuerza) en la dirección del viento.	Iv(z)	Turbulencia en dirección transversal - horizontal al viento y altura z.
C _L	Coefficiente de fuerza lateral, coeficiente de sustentación, en la dirección perpendicular-horizontal al viento.	k	Rigidez de la estructura.
C _{ML}	Amplitud máxima del coeficiente de fuerza lateral, considerada como función armónica.	K _a	Coefficiente de amortiguamiento dinámico.
D, b	Diámetro de la Chimenea.	K _s	Coefficiente de amortiguamiento estructural.
e	Base de los logaritmos naturales.	LCE	Longitud de correlación efectiva.
E	Módulo de elasticidad del material estructural de la Chimenea.	M	Masa. Número de Miner.
F	Fuerza.	m	Masa equivalente por unidad de longitud de la Chimenea.
F(u)	Fuerza que ejerce el viento con velocidad u.	q	Presión aerodinámica que ejerce el viento.
f _D	Frecuencia amortiguada.	R _d ²	Admitancia mecánica de la estructura.
F _{eq}	Fuerza transversal equivalente, la necesaria para ocasionar el mismo desplazamiento máximo que la fuerza armónica.	R _d	Factor de amplificación dinámica.
f _n	Frecuencia natural de la estructura.	Re	Número de Reynolds.
f _v	Frecuencia del desprendimiento de vórtices.	Sc	Número de Scruton.
G	Factor correctivo de la densidad del aire.	St	Número de Strouhal.
h	Altura de la Chimenea.	t	Tiempo.
		T	Periodo. Periodo de retorno.
		u	Velocidad instantánea del viento en la dirección paralela al viento.
		U	Velocidad media del viento.
		u'	Componente turbulenta del viento

Notación.

$U(z)$	Velocidad media en la dirección del viento en la altura z .	α	Relación espesor- diámetro de la Chimenea
U_{cr}	Velocidad crítica. Velocidad del viento que causa desprendimiento de vórtices con la misma frecuencia que una de las frecuencias naturales de la estructura.	β	Relación entre la altura h de la Chimenea y la LCE
v	Velocidad instantánea del viento en la dirección transversal-horizontal al viento.	λ	Densidad del material estructural de la Chimenea. También relación de aspecto de la Chimenea: h/D
w	Velocidad instantánea del viento en la dirección vertical.	τ	Temperatura ambiente.
x	Desplazamiento de la estructura en la dirección paralela al viento.	μ	Viscosidad dinámica.
y	Desplazamiento de la estructura en dirección transversal-horizontal al viento.	ν	Viscosidad cinemática.
$y_{m\acute{a}x}$	Desplazamiento máximo de la estructura en la dirección transversal al viento.	ξ_s	Amortiguamiento estructural relativo al crítico.
Y_{st}	Desplazamiento estático de la estructura, proporción entre la fuerza aerodinámica transversal, y la rigidez.	ξ_a	Amortiguamiento aerodinámico
		$\sigma_u(z)$	Desviación estándar de la velocidad en la dirección del viento y altura z .
		Ω	Presión barométrica en mm de mercurio.
		ρ	Densidad del aire.
		$\overline{F_T}$	Fuerza media del viento en el periodo T .
		\bar{x}	Desplazamiento medio de la estructura en el periodo T .

1.- Introducción

Cuando un fluido como el viento, encuentra en su camino un cuerpo sólido al que puede rodear, inicia la generación de vórtices periódicos a ambos lados del mismo. Cada vórtice ejerce una fuerza específica sobre este último y dependiendo de su esbeltez y propiedades dinámicas, el cuerpo vibra, principalmente en dirección transversal al flujo.

Las vibraciones inducidas por vórtices, (VIV) y su efecto sobre estructuras esbeltas y elásticas como son las Chimeneas metálicas, constituye la materia del presente trabajo.

El título de la tesis es específico en cuanto al objeto de estudio, sin embargo, el tema de VIV también es aplicable, a una variedad de estructuras, todas ellas de gran importancia, como son:

- Edificios altos y esbeltos,
- Mástiles destinados a diversos fines,
- Elementos esbeltos de estructuras en celosía,
- Generadores por viento, etc.

En general, toda estructura cuyas frecuencias naturales puedan ser igualadas por la frecuencia del desprendimiento de vórtices, estará sujeta a fuerzas dinámicas mayores que las correspondientes a la presión definida por el principio de Bernoulli, al producirse resonancia entre ambos tipos de vibración.

Los tipos de estructuras mencionadas desempeñan funciones particularmente importantes en la economía, y en la mayor parte de los casos el costo del elemento estructural sujeto a VIV es irrelevante comparado con los costos derivados de su falla o de la interrupción de su función.

La falta de una Chimenea puede impedir la operación total de una instalación industrial; la posible falla de edificios sensibles a las vibraciones inducidas por vórtices es una amenaza a la integridad de sus ocupantes, por no mencionar el costo material inherente; el colapso de elementos de torres de transmisión eléctrica representa únicamente el costo de unos cuantos kilogramos de acero, pero afecta a una población de cientos de miles...

En este trabajo se describen y analizan las características de la respuesta ⁽¹⁾ de estructuras esbeltas, en particular Chimeneas metálicas, ante la acción de VIV, con el objetivo de destacar la importancia del fenómeno, que quizá no ha sido valorado en su debida magnitud.

La siguiente sección presenta una breve revisión de las características comunes a Chimeneas metálicas.

En la primera parte de la Sección 3 es analizada la respuesta paralela al viento ante la acción de fuerzas constantes o armónicas de media no nula, proceso conocido como

¹ Para los fines de la tesis la respuesta está constituida por las características en el tiempo de los desplazamientos, y en menor medida las velocidades y aceleraciones de los diversos elementos de la Chimenea, en particular la corona. No está incluido en el alcance la determinación y análisis de los esfuerzos resultantes.

1.- Introducción.

vibración forzada, distinguiéndose las fases transitoria y estacionaria. Los ejemplos simulados muestran que al incorporar la turbulencia la respuesta incrementa su amplitud.

La segunda parte de la Sección 3, trata sobre la respuesta transversal al viento, y el análisis conduce a una expresión que permite determinar la amplitud de las vibraciones de la Chimenea. La expresión, con ligeras variantes, puede encontrarse en diversas publicaciones y códigos, si bien en este documento es evidente el proceso de su obtención. El enfoque del análisis es conocido en la literatura como resonante, ya que considera la respuesta cuando la frecuencia de las VIV es igual a alguna de las naturales de la estructura. Diversos ejemplos de carácter teórico ilustran gráficamente los aspectos básicos de la respuesta.

Los principales parámetros que afectan la respuesta transversal al viento son tratados individualmente en la Sección 4. Las estructuras sensibles a las VIV, en general presentan un número de Reynolds correspondiente al régimen crítico, esto es, en el intervalo $3 \cdot 10^5 < Re < 3.5 \cdot 10^6$. Resalta la participación de este parámetro en otros factores que intervienen.

El estudio de la longitud de correlación efectiva (LCE) muestra su efecto en la rigidez de la estructura, y cómo es que la primera depende del perfil de velocidades del viento, que a su vez es función del tipo de terreno y de las condiciones de temperatura y estratificación atmosféricas. El análisis y los ejemplos corroboran que las acciones del viento en el tercio superior de la estructura determinan el grueso de la respuesta.

Al incorporar la turbulencia en combinación con las VIV, (en resonancia con alguno de los modos naturales la estructura), el modelo, analizado mediante SAP2000, no logra reproducir las disminuciones del desplazamiento máximo consignadas en la literatura, aunque la forma y frecuencia de la respuesta, calculada en el dominio de la frecuencia mediante espectros de Fourier, no muestra los efectos de la turbulencia, a menos que esta adquiera valores mayores, fuera de los intervalos usuales del fenómeno.

También, en la Sección 4, destaca la importancia primordial del amortiguamiento en la respuesta, tanto del viscoso proveniente de las fricciones internas y estructurales, como del aerodinámico, función este de la amplitud de los desplazamientos y de la velocidad del movimiento de la estructura, lo que constituye el efecto aeroelástico.

Se mencionan los esfuerzos para interpretar mediante modelos las características de la interacción fluido-estructura, puesto que al aumentar los desplazamientos aumenta el amortiguamiento aerodinámico, lo que a vez disminuye el amortiguamiento total, y en consecuencia retroalimenta el aumento de desplazamientos; sin embargo, en la literatura es aceptado que el proceso sea auto-limitante.

De menor importancia respecto a la magnitud de la respuesta, aunque no menos compleja su evaluación, es la fuerza lateral consecuencia de los vórtices y la turbulencia lateral, cuantificada usualmente a través del coeficiente de fuerza transversal, también conocido como coeficiente de sustentación, C_L , término no muy adecuado en estructuras, por su origen en relación al estudio de fuerzas sobre aeronaves. Para ilustrar la complejidad inherente a la determinación de los valores de la fuerza lateral, son mencionados los criterios establecidos en ESDU, en donde C_L es función de:

- El Número de Reynolds;
 - La rugosidad de la estructura;
 - La forma modal.
-

1.- Introducción.

- El efecto de punta, la longitud de correlación y la relación de aspecto;
- La intensidad de la turbulencia lateral, y
- La amplitud del desplazamiento. (efecto aeroelástico)

Aunque no es un parámetro en sí mismo, al final de la Sección 4 son estudiadas las características del fenómeno denominado bloqueo aeroelástico ⁽²⁾.

Constituye aquel una pugna entre las fuerzas derivadas de la acción del viento y las que resultan de las propiedades dinámicas y mecánicas de la Chimenea. Al alcanzar el viento la velocidad crítica, las fuerzas periódicas casi armónicas producidas por vórtices entran en resonancia con la frecuencia del modo correspondiente, generalmente el fundamental, lo que conduce a un incremento significativo en los desplazamientos, que en teoría podrían alcanzar el valor correspondiente al desplazamiento estático dividido entre el doble del amortiguamiento, que, para un amortiguamiento relativo al crítico igual a 0.5 %, (común en Chimeneas metálicas), significa un desplazamiento de 100 veces el estático.

Puede decirse que existe una sinergia al considerar el amortiguamiento aerodinámico, dependiente de la amplitud y velocidad de los desplazamientos y de signo opuesto al amortiguamiento estructural, por lo que en un momento determinado, el amortiguamiento total podría ser nulo, por lo que los desplazamientos tienden a aumentar indefinidamente.

En oposición a este crecimiento descontrolado de los desplazamientos, actúa la turbulencia del viento, y sobre todo la de gran escala, la cual tiende a romper el efecto de resonancia al ser interpretada por la estructura como variación gradual y lenta de la velocidad, que se aparta y aleja alternadamente de la crítica.

El efecto de la amplitud de los desplazamientos en el amortiguamiento aerodinámico, ha sido aceptado como un proceso auto-limitante.

A pesar de que diversos factores actúan para evitar su aparición, el bloqueo aeroelástico es frecuente en la práctica, y son conocidas estructuras que presentaron desplazamientos con estas características después de años de construidas, (con el consiguiente daño), en los que habrían mostrado un aceptable comportamiento estructural.

Las posibilidades de que ocurra el bloqueo aeroelástico deben eliminarse desde el propio proceso de diseño.

En la parte 5, se realiza el cálculo de los desplazamientos para las dos Chimeneas tomadas como ejemplo y cuyas propiedades aparecen en la literatura. Corresponden a dos localidades en Dinamarca (Odense y Thyborøn) y fueron seleccionadas por sus características dinámicas, y por saberse que sufrieron grandes desplazamientos por VIV en ocasiones específicas.

Las Chimeneas seleccionadas fueron analizadas por cuatro diferentes métodos, el método simplificado de Vickery, contenido en el Código Canadiense, el método espectral contenido en el Eurocódigo ⁽³⁾, la simulación mediante programas comerciales, y el método basado en la respuesta resonante.

² Lock-in, en el Apéndice B se exponen razones para denominarlo bloqueo aeroelástico.

³ Eurocode 1 EN 1991-1-4:2005, "Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions", European Standard EN 1991-1-4:2005.

1.- Introducción.

Los resultados difieren sustancialmente entre sí, y hacen patentes las diferencias entre los métodos aplicados.

El método simplificado de Vickery, toma en cuenta el amortiguamiento aerodinámico, pero no da una solución numérica cuando este último es mayor que el estructural, limitándose a señalar que pueden ocurrir grandes desplazamientos “...hasta de un diámetro de amplitud...”.

El método espectral proporciona valores numéricos en cualquier caso, y es el que arroja resultados mejor correlacionados (aunque no lo suficiente) con las respuestas observadas en Chimeneas y estructuras reales.

La simulación mediante programas comerciales, permite evaluar la respuesta como una serie de tiempo, pero no existe aún un método que permita asignar un valor al amortiguamiento total cuando el aerodinámico es mayor que el estructural, situación que ocurre en las Chimeneas bajo análisis.

El método resonante, presenta las mismas dificultades que la simulación mediante programas comerciales, ya que el amortiguamiento está incluido a través del número de Scruton, el cual solo incluye el amortiguamiento estructural. Por lo tanto estos dos últimos métodos, ignoran el efecto aeroelástico, al que se atribuye la amplificación de los desplazamientos.

La Sexta parte contempla las previsiones en el diseño para tomar en cuenta las VIV. A partir de que la velocidad crítica en el tipo de estructuras estudiadas es muy baja, (en muchas ocasiones menor que 30 km/h) es de prever un gran número de ciclos a lo largo de su vida útil, por lo que evitar la falla por fatiga será el objetivo principal del diseñador.

Al conocer la velocidad crítica y la velocidad regional de diseño, (y su periodo de retorno) es posible realizar un análisis probabilístico, y determinar un histograma que contenga los niveles de esfuerzos asociados al número de ciclos de vibración esperados para la vida útil requerida de la estructura.

Por otra parte, son conocidos los niveles de esfuerzo en fatiga que es capaz de resistir el material de la estructura, a través de las conocidas curvas S-N o curvas de Wöhler. De igual forma, los códigos proponen curvas S-N diferentes para diversos tipos de detalles de solución estructural, en particular zonas soldadas, en donde participa la orientación, tipo y extensión de la soldadura, así como el espesor y forma del material de base, que aunados al control de calidad, influyen para que cada tipo de detalle tenga una resistencia propia en fatiga. Este nivel de fatiga está identificado en los códigos como “...Categoría...”, y el número que define cada Categoría es, además, la resistencia en fatiga en N/mm^2 .

Identificado el nivel de esfuerzo para un detalle estructural determinado, se obtendrá la curva de Wöhler, y por lo tanto el número de ciclos asociado a cada una de las resistencias determinada en el histograma. La obtención de la relación de Palmgren-Miner con los datos previos es inmediata, y por lo tanto el nivel de daño acumulado, el cual, en un diseño seguro será menor que la unidad. Un ejemplo ilustra el método.

La última parte resume las conclusiones del trabajo realizado.

Cuatro apéndices complementan los temas tratados:

El Apéndice A presenta un Glosario de términos usuales en Chimeneas.

1.- Introducción.

El Apéndice B contiene una propuesta para denominar como bloqueo aeroelástico al fenómeno comúnmente conocido como lock-in, a fin de evitar el anglicismo.

El Apéndice C incluye el desarrollo de una expresión para determinar la rigidez de una barra en voladizo, sujeta a una carga uniforme en el extremo opuesto al empotramiento, al asignar como variable la longitud sobre la que actúa dicha carga. La rigidez así determinada permite tomar en cuenta el concepto de longitud de correlación efectiva (CLE) en el análisis resonante de la respuesta.

Finalmente, el Apéndice D describe en detalle el proceso de simulación de series de velocidad del viento, mediante el empleo del método de Montecarlo.

2.- Generalidades.

Una Chimenea es una estructura vertical que sirve para descargar en la atmósfera gases de deshecho, a fin de dispersar los contaminantes, y cuando corresponda, abatir la radiación de calor.

Esta definición tan simple, encierra el concepto de estructuras de gran importancia y cuyo comportamiento ante la acción del viento es complejo.

En su mayoría, las Chimeneas deben operar permanentemente, ya que las interrupciones, por cualquier razón, inciden directamente en el costo de operación de toda la planta.

En las chimeneas es posible distinguir sus partes fundamentales:

- Cimentación o soporte inferior, que sirve para conducir el peso de la chimenea y las cargas que sobre ella actúan, hacia el suelo.
- Fuste o carcasa, que tiene como objeto soportar su propio peso, y el de los elementos de la chimenea, así como las fuerzas externas o internas derivadas su operación y exposición al medio, transmitiéndolos a la cimentación.
- Tiro o conducto por el que circulan los gases que a desalojar. En ocasiones la propia carcasa o fuste hace las funciones de tiro.
- Revestimiento del tiro, que tiene por objeto impedir el enfriamiento rápido de los gases, y/o evitar el calentamiento de la carcasa o fuste, y las dilataciones o contracciones inherentes a grandes cambios de temperatura en materiales como el acero. El revestimiento puede ser de materiales refractarios o de placa metálica u otros materiales; en ocasiones entre el revestimiento y el fuste hay materiales para aislamiento térmico.
- Boca de la chimenea, que es la escotilla o abertura en su parte inferior, por donde entran los gases a eliminar.
- Orificio de descarga o corona.
- Existen otros componentes que permiten dar mantenimiento y limpieza a las Chimeneas, así como aquellos que son coadyuvantes para mejorar su eficiencia

El Apéndice A presenta un glosario de términos relativos a chimeneas.

Por las características de su estructura, las Chimeneas metálicas pueden clasificarse como



2.- Generalidades

- Chimenea auto-soportada.- Chimenea en la cual las cargas externas (p.ej. viento), son soportadas exclusivamente por la carcasa o fuste, que, conjuntamente con la cimentación y sin ningún soporte adicional, debe permanecer estable ante todas las acciones de diseño. (Fotografía 2.1)

- Chimenea atirantada o chimenea con retenidas.- Chimenea en la cual no todas las cargas, (p. ej. viento), son soportadas exclusivamente por la carcasa o fuste estructural, agregando retenidas para tomar en parte o en su totalidad, las fuerzas horizontales. (Fotografía 2.2)

- Chimeneas con estructura independiente del tiro.- En ocasiones uno o más tiros son soportados por una estructura independiente. (Fotografías 2.3, 2.4)

El diseño de una chimenea parte de conocer la cantidad y calidad de los gases que deben emitirse a la atmósfera. Participan en el diseño factores como la temperatura, contenido de sólidos, y la capacidad corrosiva de los gases, entre otros.

Todo ello decide el diámetro, altura y características físicas del aislamiento o recubrimiento interno si este se requiere. A partir de estos datos, procederá el diseño estructural.

Algunos conceptos que deben analizarse en el proceso son:

- Interacción suelo-estructura cuando el primero es blando.
- Fuerzas sísmicas.
- Acciones de viento:
 - En dirección paralela al viento.



Fotografía 2.2 Chimenea atirantada de 176 m de alto en Neudorf Austria.

Fuente: SkyscraperCity.com



Fotografía 2.3 Chimenea con tiros independientes de la estructura. Fuente: FOTORESEARCH

2.- Generalidades.

- En dirección transversal al viento.- Generación de vórtices y vibraciones aeroelásticas.
- Condiciones de inestabilidad local derivadas de los espesores usualmente pequeños en la carcasa.
- Esfuerzos generados por cambios de temperatura.
- Variación de las propiedades mecánicas de los materiales por la acción de temperaturas altas.
- Efectos de fatiga por esfuerzos alternados debidos a vibraciones.

Y también:

- Las características del sitio y las dificultades de montaje.
- Accesibilidad de los equipos.
- Interferencia de otras estructuras.
- Las dimensiones y pesos de los tramos, y las dificultades de transporte.

Los desplazamientos de las Chimeneas ante la acción del viento son de importancia por diversas razones; la gran esbeltez inherente a estas estructuras propicia desplazamientos grandes, visibles, sin que necesariamente los esfuerzos correspondientes excedan a los permitidos. Los desplazamientos grandes por otra parte pueden causar sobresalto y distracción.

El código del CICIND⁽⁴⁾ indica:

“... Para evitar la alarma entre las personas, la amplitud máxima permitida de oscilaciones debidas a efectos transversales del viento, o interferencia aerodinámica, debe acordarse entre el cliente y el diseñador. Este límite debe condicionarse por la prominencia y visibilidad de la chimenea y la frecuencia con que es de esperarse que ocurran las máximas amplitudes. El Comentario 3 proporciona orientación”

Comentario 3⁽⁵⁾:

“..... La amplitud debe limitarse para asegurar que los esfuerzos cumplen con los límites permisibles, desde los puntos de vista de falla (resistencia) como por duración por fatiga.



Fotografía 2.4 Chimenea con estructura independiente del tiro. Fuente: FOTOSEARCH

⁴ International Committee on Industrial Chimneys, "Model Code for Steel Chimneys"; December 2000 p. 5

⁵ CICIND; "Model Code for Steel Chimneys"; Commentaries and Appendices; December 2000. p. 16

2.- Generalidades

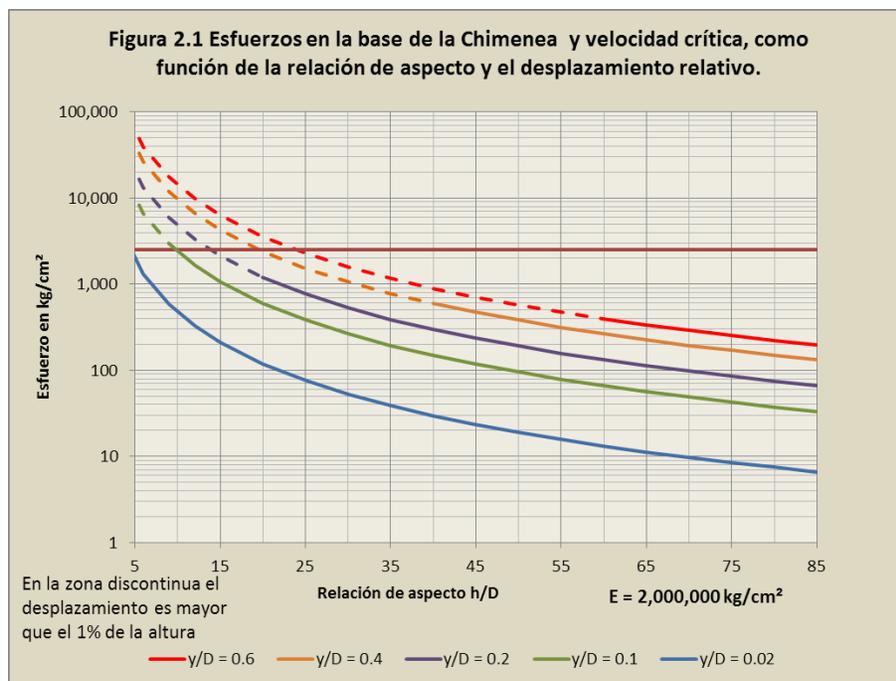
Además, la amplitud no debe ser tan grande que cause alarma entre los observadores. Este límite es difícil de definir ya que el concepto –alarma entre los observadores– es subjetivo, dependiendo de que tan frecuente ocurra la respuesta, su frecuencia, la visibilidad de la chimenea, y la percepción de riesgo de los observadores. Por esta razón, se deja al cliente y al diseñador la definición del límite, por mutuo acuerdo en cada caso. A continuación se proporciona una guía para chimeneas muy visbles con valores bajos de V_{cr} (< 10 m/s a menos de 5 km de la costa u orilla de lagos, < 7 m/s tierra adentro):

Chimeneas críticas: La amplitud doble en la corona (pico a pico) no debe ser mayor que 10% del diámetro de la corona.

Chimeneas normales: La amplitud doble en la corona (pico a pico) no debe ser mayor que 25% del diámetro de la corona.

Estos límites se pueden incrementar para chimeneas menos notables y/o aquellas con mayores valores de V_{cr} , (i.e. aquellas que raramente presentan una respuesta con amplitudes grandes)...⁽⁶⁾

Para sensibilizar acerca del tema, la Figura 2.1, muestra la influencia del desplazamiento, (relativo al diámetro) y la relación de aspecto, sobre los esfuerzos por flexión en la base de la Chimenea. Las líneas discontinuas indican cuando el desplazamiento excede de $0.1 \cdot h$. La línea café marca como referencia el esfuerzo: $\sigma = 2,500$ kg/cm²



A reserva de analizar con más detalle el concepto de velocidad crítica, queda definida como aquella(s) velocidad(es) del viento que induce(n) el desprendimiento de vórtices con la(s) misma(s) frecuencia(s) que la(s) frecuencia(s) natural(es) de la estructura, y por lo tanto,

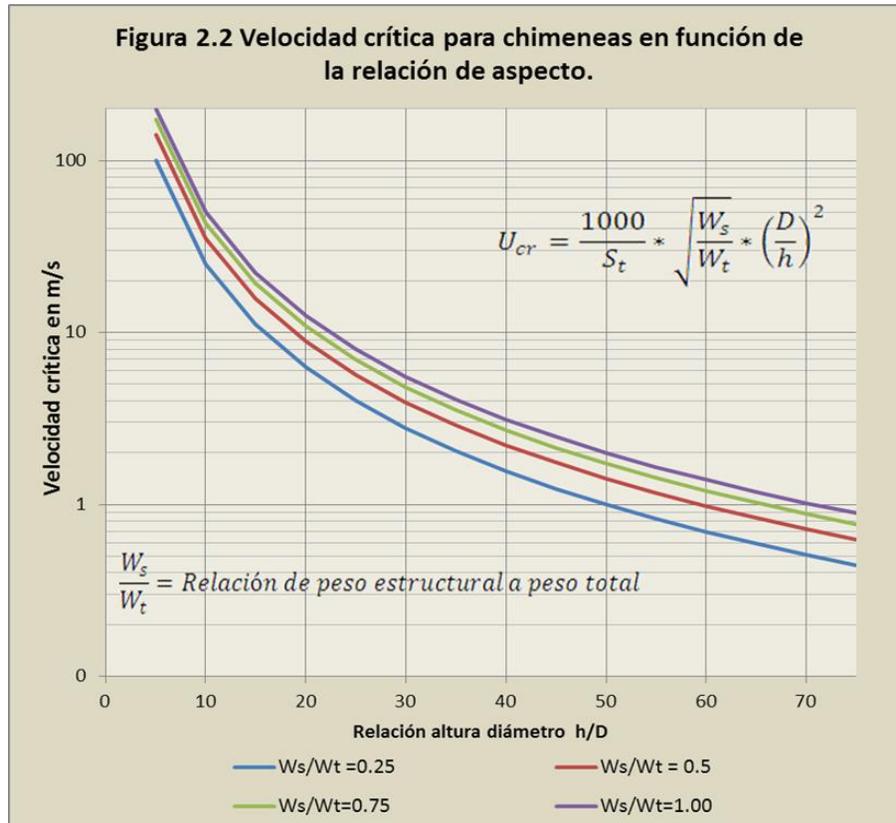
⁶ La traducción es responsabilidad del autor.

2.- Generalidades

las fuerzas resultantes de dichos vórtices actúan en resonancia con la vibración de la Chimenea.

La Figura 2.2 muestra la variación de la velocidad crítica asociada a la relación de aspecto h/D .

En Chimeneas metálicas son comunes las relaciones de aspecto comprendidas en el intervalo de $15 < h/D < 50$ ⁽⁷⁾, aunque no hay límites regulados por las normas.



Las velocidades del viento que ocurren con frecuencia, son del orden de la cuarta parte de la velocidad regional con periodo de retorno de 50 años ⁽⁸⁾, por ejemplo, para una localidad con velocidad regional $U(h)_{50} = 36$ m/s (≈ 130 km/h) ⁽⁹⁾, la velocidad media anual es del orden de 9 m/s (≈ 32 km/h).

La gráfica sugiere que para Chimeneas metálicas, son comunes los vientos que alcanzan velocidad crítica.

⁷ Hansen, S. O.; Vortex Induced Vibrations of Line-Like Structures; CICIND's 50th meeting; Oxford, 1998; pp. 21-23

⁸ CICIND; "Model Code for Steel Chimneys"; Commentaries and Appendices; December 2000, p. 22

⁹ El promedio de velocidades regionales en la primera hoja de la Tabla C-2 del Manual de Diseño de Obras Civiles (Viento) de la Comisión Federal de Electricidad (México 2008), es de 132 km/h.

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento

Una chimenea es una estructura de múltiples grados de libertad, en la que inciden:

- Fuerzas inerciales, proporcionales a las masas, contrarias a la dirección de la aceleración;
- Fuerzas de amortiguamiento, proporcionales a la viscosidad interna de la estructura, contrarias a la dirección de la velocidad;
- Fuerzas elásticas, proporcionales a la rigidez de la estructura, contrarias a la dirección del desplazamiento;
- Fuerzas aerodinámicas como resultado de la interacción del movimiento de la chimenea con el viento incidente. (interacción fluido-estructura);
- Fuerzas externas determinadas por la presión dinámica del viento y los coeficientes de fuerza de arrastre y sustentación.

La relación entre tales fuerzas, está determinada por la ecuación general del movimiento:

$$[M] * \{\ddot{x}\} + [C] * \{\dot{x}\} + [K] * \{x\} = \{F(t)\} \quad (3.1)$$

$\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$ y $\{x\}$ son los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento para las posiciones de la estructura consideradas al establecer los grados de libertad, $[M]$ es la matriz de masas, $[C]$ es la matriz de amortiguamiento viscoso y $[K]$ es la matriz de rigideces, $\{F(t)\}$ es el vector de fuerzas debidas al viento.

El viento, entendido como el movimiento del aire, es un fenómeno tridimensional.

En general, son de importancia las respuestas paralela y perpendicular-horizontal a la dirección del viento. Jauvtis y Williamson ⁽¹⁰⁾ han encontrado que existe poca interacción entre ambas, lo que permite estudiarlas independientemente. La componente transversal vertical, en estructuras esbeltas como son las Chimeneas, no es significativa.

La presión aerodinámica que ejerce el viento es:

$$q(t) = \frac{1}{2} * \rho * u^2 \quad (3.2)$$

y la fuerza que ejerce el viento sobre una superficie se expresa como:

$$F(t) = \frac{1}{2} * \rho * u^2 * A * C \quad (3.3)$$

En donde:

ρ es la densidad del aire, u es la velocidad del viento, C es un coeficiente que permite evaluar la fuerza en función de la presión aerodinámica, y A es el área sobre la que actúa el viento.

La velocidad del viento, en su dirección principal, y en su incidencia sobre una estructura, puede representarse como la suma de tres componentes:

¹⁰ Jauvtis, N. y Williamson. H.K.; "The effect of two degrees of freedom on vortex-induced Vibration at low mass and damping", J. Fluid Mech. Vol. 509, (23-62) Cambridge University Press, 2004

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

$$u = U + u' + \dot{x} \quad (\text{Referencia }^{(11)}) \quad (3.4)$$

U es la velocidad media del viento, u' la componente de Reynolds o componente turbulenta y \dot{x} es la velocidad de la estructura.

Al omitir la componente de velocidad de la estructura, a partir de (3.4) en (3.3) y ésta en (3.1)

$$F(t) = \frac{1}{2} * \rho * C_D * A * (U + u')^2 \quad (3.5)$$

$$[M] * \{\ddot{x}\} + [C] * \{\dot{x}\} + [K] * \{x\} = \left\{ \frac{1}{2} * \rho * C_D * A * (U + u')^2 \right\} \quad (3.6)$$

Que es la ecuación general del movimiento, o ecuación del equilibrio dinámico para una chimenea de múltiples grados de libertad sujeta a la acción de viento turbulento.

Esta sección presenta y comenta ejemplos de la acción del viento y la correspondiente respuesta de la estructura. La mayor parte de ellos ocurre en combinación con otros, su estudio en forma individual permite, sin embargo, una mejor comprensión del fenómeno.

En la práctica, la respuesta dependerá de la importancia relativa de los componentes del viento real.

En los ejemplos incluidos, no está considerada la participación de la velocidad de la estructura, (\dot{x}) y en su oportunidad se analizarán los aspectos del fenómeno aeroelástico en que esta componente no puede despreciarse.

3.1. Respuesta paralela al viento.

3.1.1. Flujo laminar y velocidad constante

El flujo laminar implica: $u' = 0$ (Sin turbulencia)

Aunque no es común encontrar situaciones de turbulencia nula ⁽¹²⁾, es útil calcular la respuesta en estas condiciones, ya que permite la comprensión de respuestas más complejas. En la Figura 3.1 se distinguen las dos fases del proceso de vibración forzada, (transitoria y estacionaria) ya que al aplicar la velocidad súbitamente, la estructura sufre un desplazamiento, (de 1.04 cm), iniciándose una fase de oscilación con la frecuencia fundamental, cuyas amplitudes disminuyen de manera paulatina hasta llegar a un desplazamiento constante. (0.56 cm).

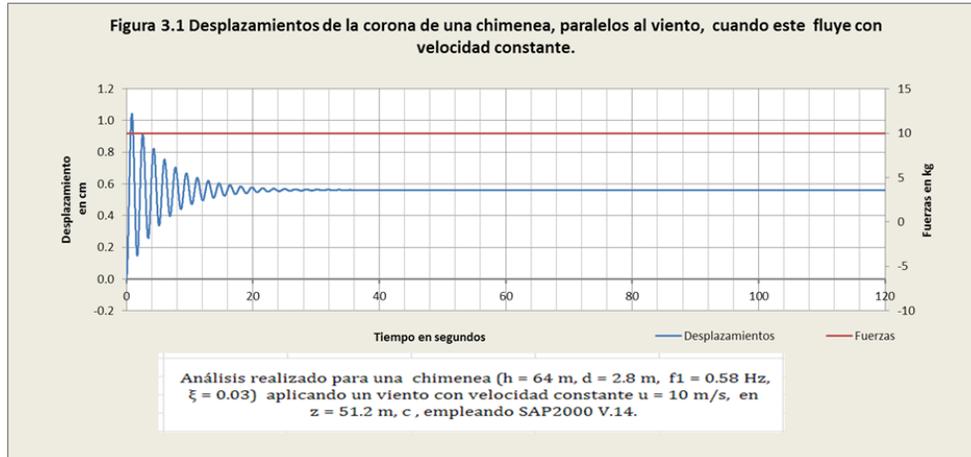
El tiempo necesario para que los desplazamientos se estabilicen, depende del amortiguamiento viscoso de la chimenea. (En el capítulo siguiente se analizará con más detalle la participación de diversos parámetros en la respuesta de la estructura). Así, de no variar las condiciones, la fase estacionaria del proceso, consiste en un desplazamiento fijo, y la fase transitoria corresponde a un lapso oscilatorio que se desvanece gradualmente, en donde el desplazamiento máximo es mayor que el respectivo a la fase estacionaria.

¹¹ Dyrbye C.; Hansen S. O., "Wind Loads on Structures", Wiley and Sons; 1997; p.75

¹² La fricción del viento con la superficie del terreno, o entre masas de aire con diferentes propiedades físicas, siempre inducirá turbulencia. Sin embargo, situaciones de turbulencia mínima pueden equipararse a turbulencia nula.

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

En la simulación de modelos de este tipo, es usual emplear una función de transición que permita aplicar la carga de manera progresiva; se evita o atenúa así la respuesta de la fase transitoria, la cual en ocasiones puede consumir importantes recursos de cálculo, por el tiempo que tarda en alcanzarse la fase estacionaria.



Se opta por la aplicación súbita de la velocidad, ya que resalta el efecto de rachas o ráfagas, así como las variaciones turbulentas de un flujo, que a su vez ocasionarán oscilaciones de fase transitoria como la mostrada.

Los desplazamientos de una estructura de un grado de libertad, a la cual se le aplica una fuerza $F(u)$ constante, (correspondiente a una velocidad del viento $u = \text{cte.}$), se obtienen de la solución a la ecuación del movimiento:

$$x(t) = \frac{F(u)}{k} \left[1 - e^{-\xi * f_n * t} * (\cos(f_D * t) + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} * \text{sen}(f_D * t)) \right] \quad (3.7)$$

En donde k es la rigidez de la estructura, ξ es el amortiguamiento relativo al crítico, f_n es la frecuencia natural no amortiguada de la chimenea, y f_D es la frecuencia amortiguada.

3.1.2. Flujo laminar y velocidad variable, escalonada:

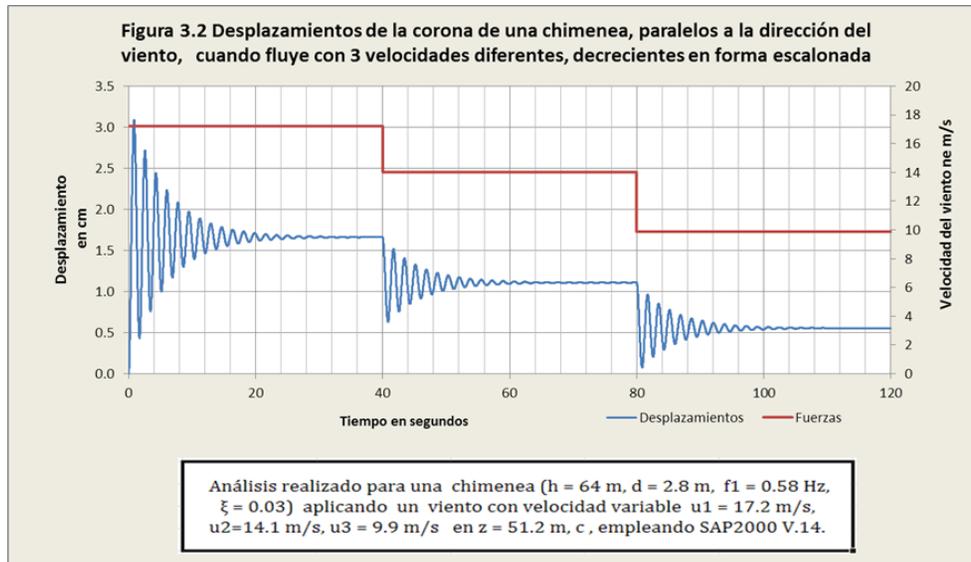
La serie de tiempo de velocidades del viento aplicadas, consiste de tres periodos iguales, en cada lapso la velocidad se mantuvo constante y decreció de forma repentina de uno a otro. Por lo tanto, la estructura se vio sometida a tres fuerzas distintas, constantes en su espacio de tiempo y decrecientes. La figura 3.2 las muestra, así como la respuesta de la chimenea.

En los 40 segundos que dura la aplicación de cada fuerza, se presentan las fases transitoria y estacionaria para cada una, y el amortiguamiento de la estructura logra cada vez disminuir el desplazamiento hasta alcanzar un valor constante, equivalente al que se calcula en forma estática al aplicar la presión aerodinámica.

Se muestra, entre otros conceptos, la tendencia de la estructura a encontrar su equilibrio.

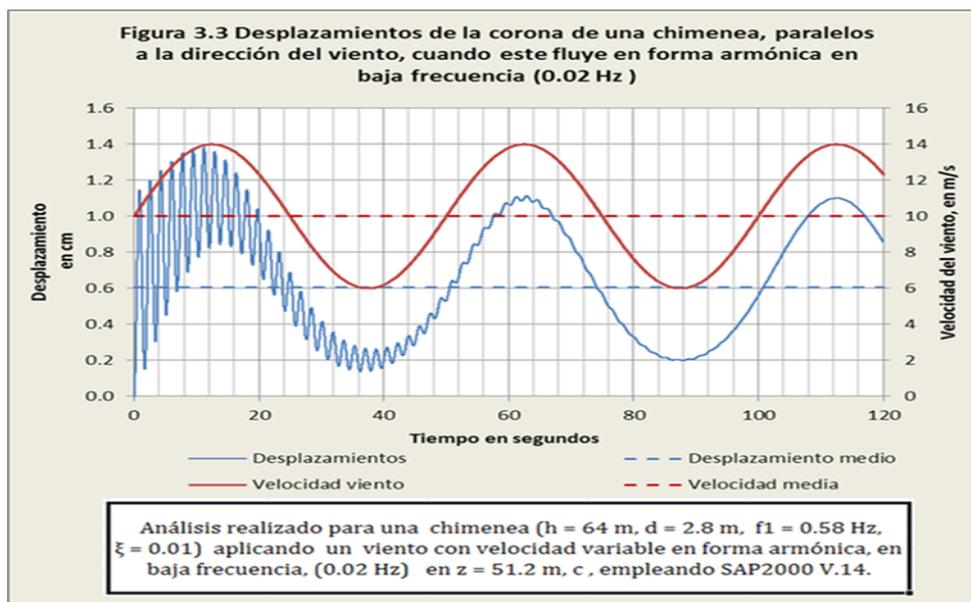
3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

Cada variación de la velocidad (súbita) introduce una fuerza desestabilizadora que causa desplazamientos mayores al de equilibrio, lo que deberá tomarse en cuenta en el diseño estructural de chimeneas.



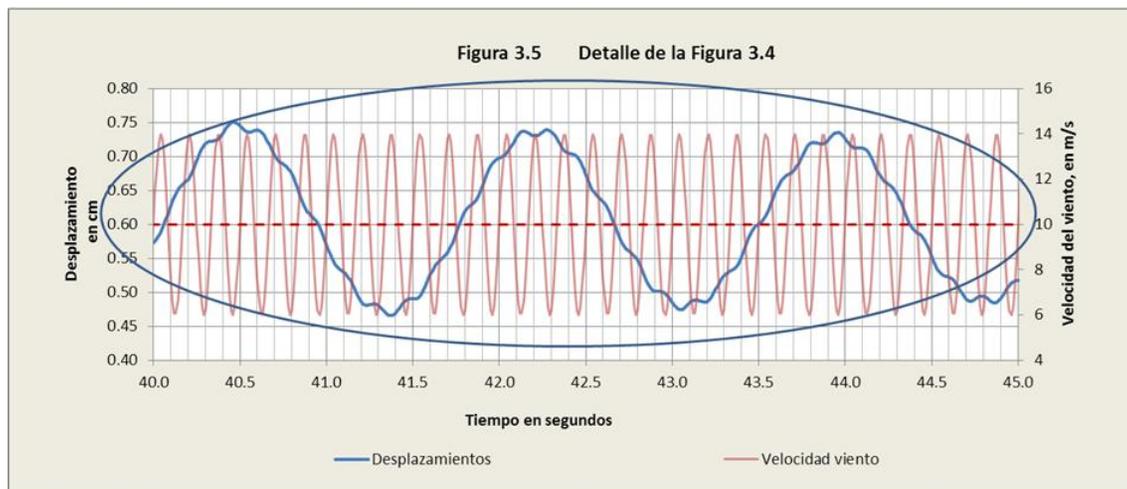
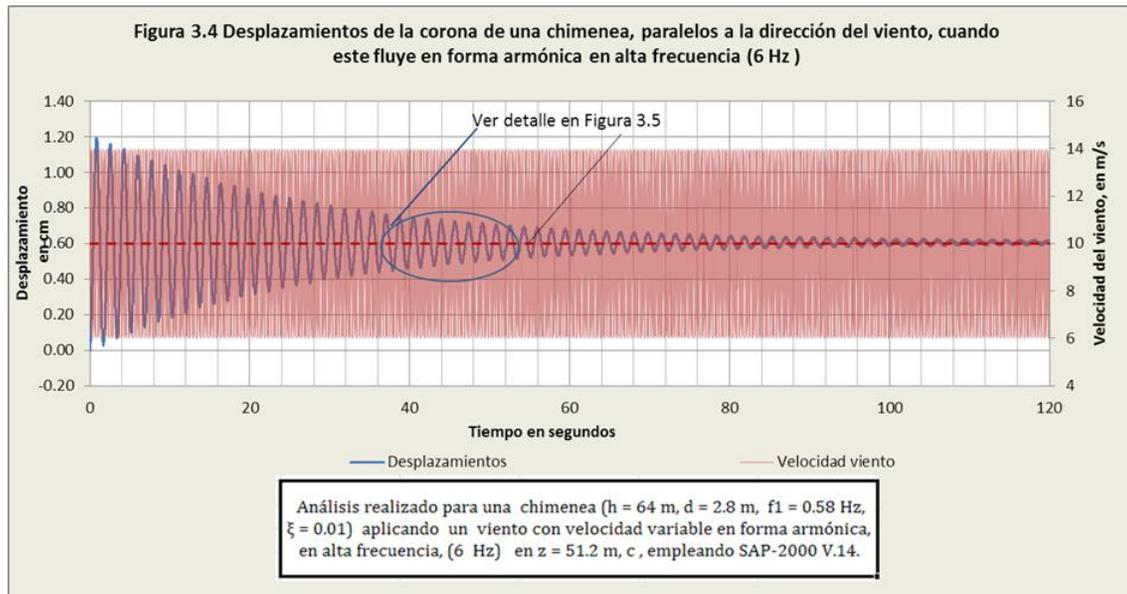
3.1.3. Flujo laminar y velocidad variable, armónicamente, en baja y alta frecuencia.

Estos son dos ejemplos en los que el flujo de viento tiene la misma velocidad media (10 m/s), y amplitud. (8 m/s pico a pico) La diferencia es la frecuencia en la variación de la velocidad del viento: en el primero es de 0.02 Hz, en el 2º es 6 Hz. Se les ha calificado, en forma empírica, como baja y alta, por ser ± 30 y 10 veces menor y mayor, respectivamente, que la fundamental.



3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

Las Figuras 3.3, 3.4 y 3.5 ilustran las características de la respuesta.



El desplazamiento medio de los dos ejercicios es el mismo e igual al desplazamiento estático, calculado para la velocidad media del viento.

También son iguales las respuestas máximas de la fase transitoria, con un valor igual al doble del desplazamiento medio.

La frecuencia de la respuesta en las fases transitorias es igual a la de la estructura.

En donde se manifiesta la diferencia es en la amplitud de la respuesta en la fase estacionaria:

Cuando el viento incide en baja frecuencia, la respuesta sigue a este, es decir, se encuentra en fase con la velocidad, ($\varphi=0^\circ$) y los desplazamientos corresponden al valor derivado de la presión dinámica instantánea, con amplitud máxima de ± 0.5 cm en torno al desplazamiento medio. ($\pm 83\%$).

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

Cuando el viento actúa en alta frecuencia, la respuesta, es decir el desplazamiento, mantiene un ángulo de fase de $\varphi=180^\circ$ (desfase) con la velocidad, y su amplitud máxima es de 0.02 cm, ($\pm 3\%$) abajo o arriba del desplazamiento medio. En la Tabla 3.1 se muestran los resultados.

Tabla 3.1 Características de la respuesta cuando el viento es armónico, e incide con la misma velocidad y amplitud, pero diferentes frecuencias			
Velocidad media del viento	m/s	10	10
Amplitud de la variación en la velocidad del viento	m/s	4	4
Frecuencia de la variación en la velocidad del viento	Hz	0.02	6.00
Desplazamiento medio	cm	0.6	0.6
Amplitud del desplazamiento en fase transitoria	cm	1.2	1.2
Frecuencia del desplazamiento en fase transitoria	Hz	0.58	0.58
Ángulo de fase entre la velocidad del viento y el desplazamiento	rad	0	π
Amplitud del desplazamiento en fase estacionaria	cm	0.5	0.02
Frecuencia del desplazamiento en fase estacionaria	Hz	0.02	6.00

La respuesta ante viento cuya velocidad cambia en baja frecuencia es conocida como la respuesta a turbulencia de fondo, o "... a excitación de fondo..."⁽¹³⁾

Al analizar el contenido de frecuencias del viento a través de su espectro, se encuentra un intervalo de valores menores que la fundamental de la estructura, tales frecuencias menores generan una respuesta importante, sin que en esta intervenga el acoplamiento de las frecuencias del viento con las propias de la estructura.

En la Figura 3.3 muestra con claridad que los desplazamientos de la chimenea siguen al viento en su comportamiento armónico.

La acción de estas componentes del viento sobre la estructura, se acepta como casi-estática y a la respuesta de la estructura se le denomina como respuesta a la turbulencia de fondo.

¹³Gobierno del Distrito Federal NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO POR VIENTO, Gaceta Oficial del Distrito Federal; 6 de octubre de 2004. p. 52

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

En la Figura 3.5 se muestran las oscilaciones del desplazamiento con la frecuencia del viento, sobrepuestas en las oscilaciones con la frecuencia fundamental de la estructura. Eventualmente, las oscilaciones con la frecuencia fundamental tienden a desaparecer (al entrar en la fase estacionaria) para dar lugar únicamente a las derivadas de la oscilación en la velocidad del viento.

El planteamiento anterior, hace una llamada de atención hacia del desplazamiento máximo que es de esperarse, el cual sin lugar a dudas corresponde al que se presenta en la fase transitoria, derivado de una acción tipo impulso.

La solución teórica de la respuesta de la chimenea a una fuerza armónica está dada por ⁽¹⁴⁾

$$R_d = \frac{x_{max}}{x_{st}} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{f}{f_n})^2]^2 + [2 * \xi * \frac{f}{f_n}]^2}} \quad (3.8)$$

$$\emptyset = \tan^{-1} \frac{2 * \xi * \frac{f}{f_n}}{1 - (\frac{f}{f_n})^2} \quad (3.9)$$

En donde R_d es la relación entre el desplazamiento máximo y el desplazamiento denominado estático, es decir, aquel en el cual la fuerza se aplica tan lentamente que no se generan fuerzas de inercia o viscosas notables, calculado como:

$$x_{st} = \frac{F(u)}{k} \quad (3.10)$$

R_d^2 se conoce como la admitancia mecánica de la estructura, $(|H(n)|^2)$, ver Ref. ⁽¹⁵⁾ y a su raíz cuadrada como el factor de amplificación o factor de amplificación dinámica.

3.1.4. Flujo turbulento

En un flujo turbulento existen variaciones aleatorias en la velocidad del viento, ocurren en torno de la velocidad media $U(z)$, y se acepta que presentan una distribución normal.

Asimismo, se considera que corresponden a un proceso estacionario y ergódico. Es decir, que sus propiedades estadísticas no cambian a través del tiempo y que una muestra suficientemente amplia, proporciona estimados aceptables del proceso.

Es usual tratar al viento como turbulento por debajo de la altura gradiente (δ) y como laminar por encima de ella.

Numéricamente, se define la turbulencia como la razón de la desviación estándar de las velocidades del viento, (o de sus componentes turbulentas) a su velocidad media:

$$I_u(z) = \frac{\sigma_u(z)}{U(z)} \quad (3.11)$$

En donde $I_u(z)$ es el índice de turbulencia en la dirección del viento a la altura z ; $\sigma_u(z)$ es la desviación estándar de las velocidades del viento.

¹⁴ Chopra A. K.; "Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering"; Third Edition, Pearson, Prentice Hall, 2007. (pp. 76-79)

¹⁵ Holmes John D.; "Wind Loading of Structures"; Taylor and Francis; 2001, (p. 102)

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

Debido a la turbulencia, la presión del viento sobre la estructura es fluctuante, por lo que reacciona de acuerdo con sus propiedades dinámicas: rigidez, modos naturales, y amortiguamiento.

Las presiones que ejerce el viento, son proporcionales al cuadrado de su velocidad (u^2) y obedecen al principio de Bernoulli. -expresión (3.2)- Las componentes frecuenciales del viento que coinciden con las naturales de la estructura, generan respuestas máximas, y por lo general es mayor la del modo fundamental. Por razones obvias se les considera como respuestas resonantes ⁽¹⁶⁾. (Figura 3.6)

Todos los espectros que se presentan en la tesis han sido calculados con el programa DEGTRA A4 Ver. 3.1 ⁽¹⁷⁾



De acuerdo a lo indicado, el viento puede modelarse como la suma de la velocidad media y la componente turbulenta, la cual tiene media nula; además de su magnitud, (I_u) la turbulencia debe entenderse, como la suma de una diversidad de componentes armónicas, y ante cada una de ellas, la estructura presentará una respuesta particular.

3.1.4.1. Flujo con baja velocidad y baja turbulencia.

Para los fines de este trabajo, baja velocidad del viento es aquella menor de 10 m/s, que es representativa de vientos que suelen ocurrir frecuentemente, y que usualmente no son percibidos como amenaza a la estabilidad y resistencia de chimeneas. (u otras estructuras) Más adelante se hará evidente la importancia de estos vientos de baja velocidad, al analizar la respuesta transversal de la estructura.

¹⁶ Esta misma propiedad se aprovecha en pruebas experimentales de vibración forzada de estructuras, para determinar, físicamente, sus frecuencias naturales.

¹⁷ Ordaz M., Montoya D. C. "DEGTRA" (programa para análisis de señales). Instituto de Ingeniería, UNAM.

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

El siguiente ejemplo se analizó con una velocidad media $U = 5$ m/s y turbulencia $I = 0.1$; (Figura 3.7)

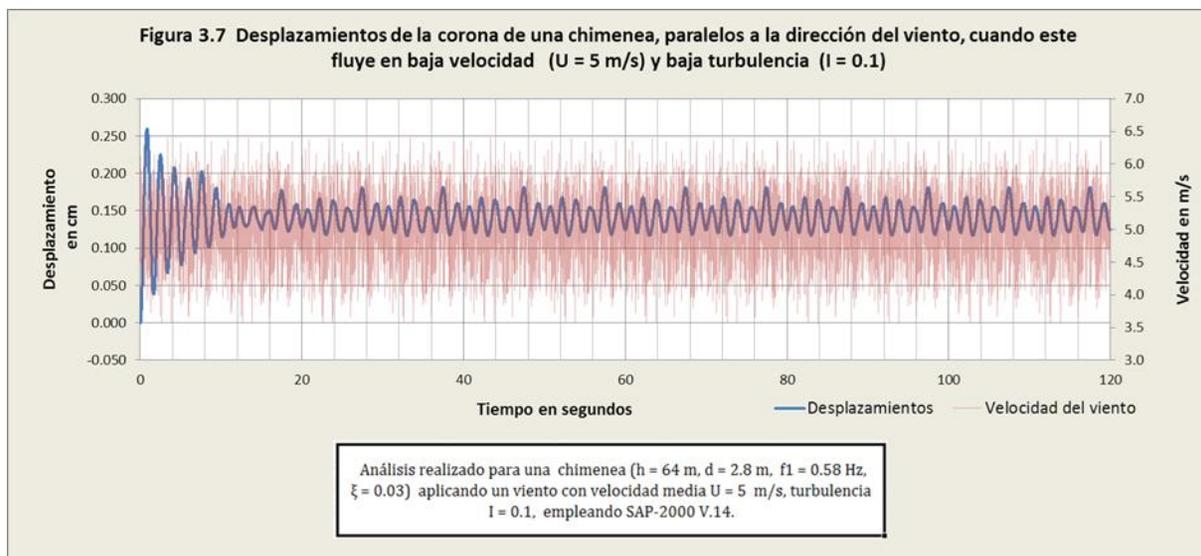
La respuesta muestra claramente las fases transitoria y estacionaria. Sin embargo, la fase estacionaria no presenta un valor único, sino una serie de valores que también se pueden caracterizar por su media y la desviación estándar.

Los valores de la respuesta son:

- Desplazamiento medio: 0.142 cm
- Desviación estándar del desplazamiento en fase estacionaria: 0.016 cm
- Coeficiente de variación: 0.11

La respuesta no es semejante a la turbulencia del viento, hay regularidad evidente en los desplazamientos, con predominancia de la frecuencia que corresponde a la fundamental de la chimenea, lo que se confirma al analizar el espectro de Fourier.

El coeficiente de variación es prácticamente igual a la turbulencia. (0.11 vs 0.10) El desplazamiento medio es un poco mayor que el correspondiente a turbulencia nula. (0.142 cm vs 0.140 cm)



3.1.4.2. Flujo con baja velocidad y alta turbulencia.

El siguiente caso se analizó con la misma velocidad media $U = 5$ m/s, pero con mayor turbulencia $I = 0.4$ (Figura 3.8)

Los valores de los desplazamientos calculados son:

- Desplazamiento medio: 0.16 cm
- Desviación estándar del desplazamiento en fase estacionaria: 0.06 cm
- Coeficiente de variación: 0.38

De nuevo, el coeficiente de variación de la respuesta es muy similar a la turbulencia. (0.38 vs 0.40) El desplazamiento medio es aún mayor que el respectivo a turbulencia nula y que el correspondiente a turbulencia $I=0.1$. (0.16 cm vs 0.142 cm y 0.14 cm)

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

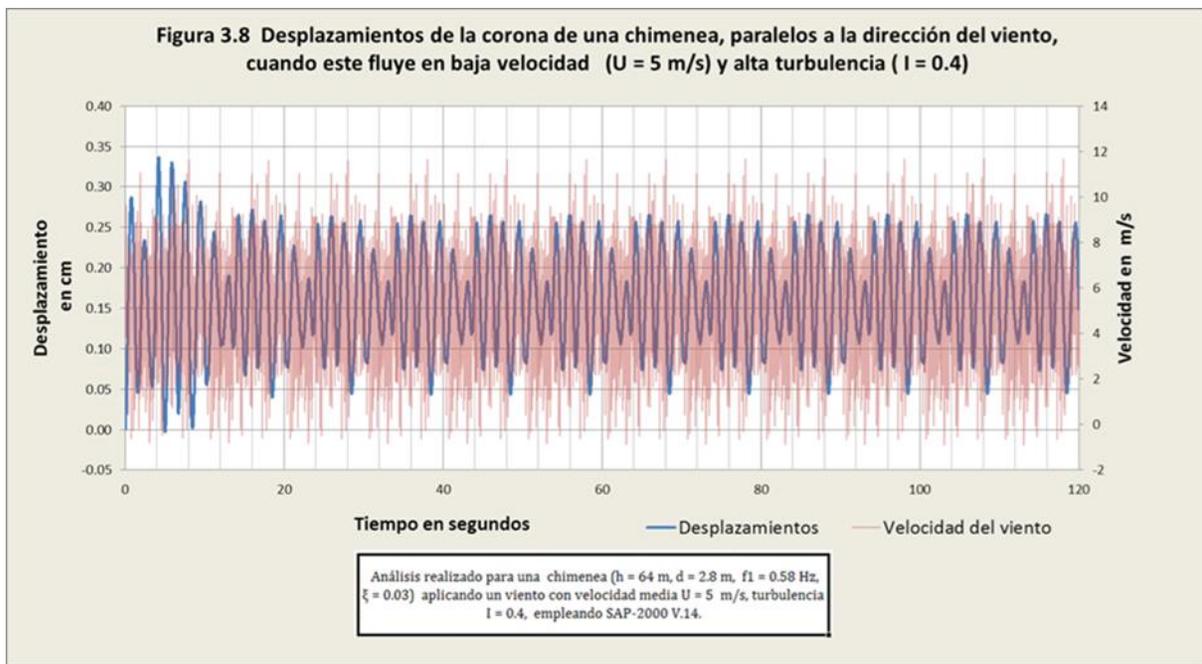
El desplazamiento medio aumenta, sin que la velocidad media aumente, por lo que el incremento es atribuible únicamente al de la turbulencia. Más adelante se analiza este aspecto.

3.1.4.3. Flujo con alta velocidad y baja turbulencia

Para este ejercicio, la velocidad media aumentó a $U = 40$ m/s y turbulencia $I=0.1$

Los valores de los desplazamientos calculados son:

- Desplazamiento promedio: 9.08 cm
- Desviación estándar del desplazamiento en fase estacionaria: 1.03 cm
- Coeficiente de variación: 0.11



3.1.4.4. Flujo con alta velocidad y alta turbulencia.

Se mantiene la velocidad media $U=40$ m/s y aumenta la turbulencia: $I=0.4$

Los valores de los desplazamientos calculados son:

- Desplazamiento promedio: 10.42. cm
- Desviación estándar del desplazamiento en fase estacionaria: 4.01
- Coeficiente de variación: 0.38

En la Tabla 3.2 se concentran los resultados obtenidos con viento turbulento.

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

Tabla 3.2 Análisis de la Respuesta Paralela al Viento para diferentes Velocidades y Turbulencias					
Velocidad Media	Turbulencia	Desplazamiento Medio	Desplazamiento normalizado respecto al de equilibrio sin turbulencia	Desviación estándar de los desplazamientos	Coefficiente de variación
m/s	[-]	cm	[-]	cm	[-]
5.0	0.00	0.140	1.000	0	0.00
5.0	0.10	0.142	1.016	0.016	0.11
5.0	0.40	0.160	1.143	0.060	0.38
40.0	0.00	8.980	1.000	0.000	0.00
40.0	0.10	9.078	1.011	1.033	0.11
40.0	0.40	10.416	1.160	4.010	0.38

3.1.5. Consideraciones relativas a la respuesta paralela al viento turbulento.

La fuerza que actúa en la estructura se puede definir a partir de la expresión 3.4, sin tomar en cuenta la velocidad de la estructura:

$$F(t) = \frac{1}{2} * \rho * C_D * A * (U + u'(t))^2 \quad (3.11)$$

La fuerza promedio en un periodo T:

$$\bar{F}_T = \frac{1}{2} * \rho * C_D * A * \frac{1}{T} \sum (U + u'(t))^2 \quad (3.12)$$

$$\bar{F}_T = \frac{1}{2} * \rho * C_D * A * \frac{1}{T} \sum (U^2 + 2 * U * u'(t) + u'(t)^2)$$

Al aceptar que la componente de Reynolds tiene media nula, se elimina el segundo término de la sumatoria:

$$\bar{F}_T = \frac{1}{2} * \rho * C_D * A * \frac{1}{T} \sum (U^2 + u'(t)^2) \quad (3.13)$$

$$\bar{F}_T = \frac{1}{2} * \rho * C_D * A * [U^2 + \frac{1}{T} \sum u'(t)^2] \quad (3.14)$$

Y como $u'(t) = u(t) - U$, entonces, por definición, el término en sumatoria de la expresión 3.14 es la varianza de la velocidad del viento turbulento.

Por lo que la fuerza media que ejerce el viento turbulento sobre la estructura, quedaría definida como:

$$\bar{F}_T = \frac{1}{2} * \rho * C_D * A * (U^2 + \sigma^2) \quad (3.15)$$

Si se acepta que los desplazamientos son linealmente proporcionales a la fuerza, entonces:

$$\bar{x} = \frac{\bar{F}_T}{k} = \frac{1}{k} * \frac{1}{2} * \rho * C_D * A * (U^2 + \sigma^2) \quad (3.16)$$

$$\bar{x} = \frac{\bar{F}_T}{k} = \frac{1}{k} * \frac{1}{2} * \rho * C_D * A * (1 + \frac{\sigma^2}{U^2}) \quad (3.17)$$

$$\bar{x} = \frac{\bar{F}_T}{k} = \frac{1}{k} * \frac{1}{2} * \rho * C_D * A * U^2 (1 + I^2) \quad (3.18)$$

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

Por lo expuesto, la oscilación resultante en la fase estacionaria no es armónica, pero conserva las propiedades estadísticas del viento, es decir, los desplazamientos tienen un valor medio, igual a $(1+I^2)$ veces el desplazamiento correspondiente a la condición de equilibrio. (Expresión 3.18).

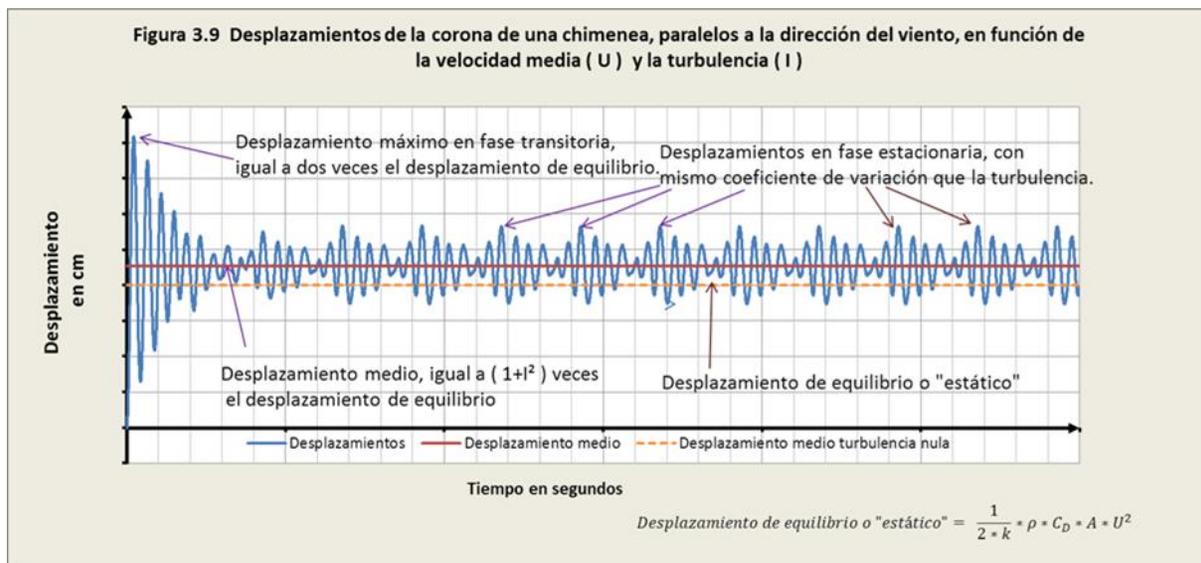
Asimismo, la variación de los desplazamientos en torno al valor medio muestra una varianza igual a la del viento actuante.

Una diferencia entre la respuesta a viento turbulento respecto a la que ocurre cuando no lo es, consiste en que ante turbulencia nula, la frecuencia de los desplazamientos es única, marcadamente coincidente con la del modo fundamental, mientras que ante viento turbulento existe una variedad de frecuencias presentes en la respuesta, validando así que la turbulencia se pueda considerar como la suma de ondas armónicas con diversidad de frecuencias.

Debe destacarse que la respuesta inicial ante carga súbita, alcanza valores muy cercanos al doble del valor de equilibrio ⁽¹⁸⁾, lo que obliga a la revisión de estados de esfuerzo para dichos valores.

Por otra parte es necesaria la revisión por resistencia a fatiga para los estados de esfuerzos derivados del movimiento de la Chimenea en la fase estacionaria, con desplazamientos menores pero con importante número de ciclos.

En la Figura 3.9 se muestra el esquema general de las características de la respuesta paralela ante viento turbulento, y en la Figura 3.9.bis se muestra el acelerograma obtenido en una prueba en el Túnel de Viento del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Mayo 4, 2012.



¹⁸ La dinámica estructural nos da la solución que corresponde a un oscilador sometido a una carga súbita que se mantiene constante, en la cual el desplazamiento máximo es el doble del correspondiente al desplazamiento de equilibrio, también llamado desplazamiento estático. Chopra A.K. Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering. Third Edition. Prentice Hall. p. 130

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

Los resultados mostrados en la Tabla 3.2, confirman la validez de la expresión (3.18).



3.2 Respuesta transversal al viento.

Una estructura presenta movimientos perpendiculares al viento por dos acciones de este sobre aquella: Las fuerzas derivadas del desprendimiento de vórtices y las fuerzas derivadas de la componente transversal de la turbulencia.

3.2.1 Respuesta a fuerzas derivadas del desprendimiento de vórtices resonantes.

Cuando el viento, turbulento o laminar, actúa sobre una barra y fluye rodeándola, altera sus características, generando vórtices que se desprenden alternadamente de los lados de la barra, por lo que se forma, flujo-abajo, una estela conocida como calle de von Karman. (von Kármán vortex street ⁽¹⁹⁾)

¹⁹ Por Theodore von Kármán quien estudió el fenómeno, aunque 40 años antes este ya había sido publicado por H. Bénard: "Formation des centres de giration à l'arrière d'un obstacle en mouvement" 1908, citado por Levi, E., Rodríguez C. N. and Echavez, A. G.; Fluid - Structure Interaction; Institute of Engineering Series No E-57; Universidad Nacional Autónoma de México; Feb - 1988.

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

En 1878, V. Strouhal ⁽²⁰⁾ encontró que la frecuencia de desprendimiento de vórtices, la velocidad del viento y la geometría (dimensión transversal) de la barra presentan una relación constante, que con el tiempo ha sido identificada con su nombre.

En otras palabras, la frecuencia con que se desprenden los vórtices es proporcional a la relación U/D , (velocidad media del flujo y diámetro de la barra), y existe una constante de proporcionalidad para cada forma de sección transversal. A dicha constante se le denomina número de Strouhal.

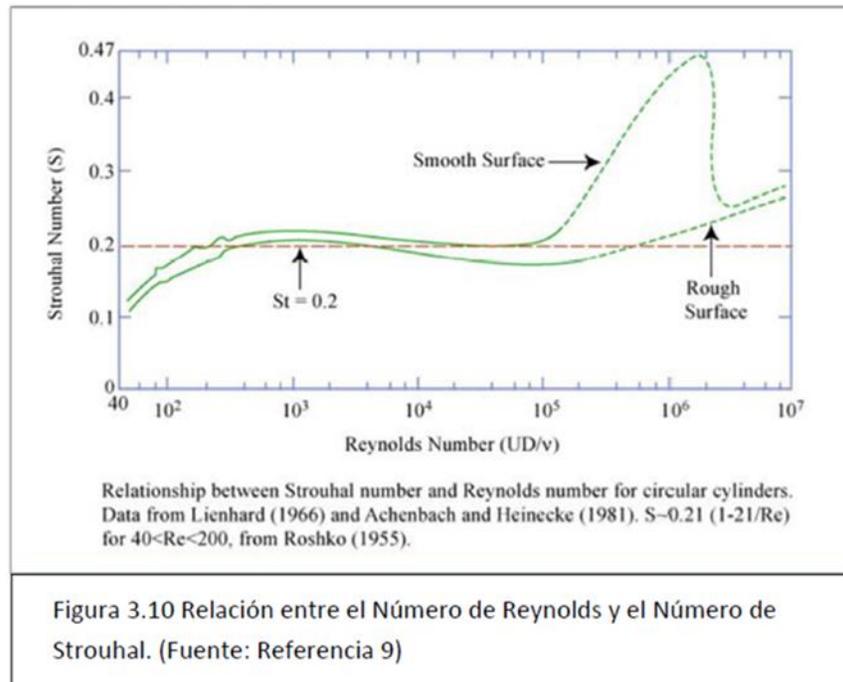
Para una barra cilíndrica circular el número de Strouhal queda definido como:

$$S_T \approx 0.2 \approx \frac{f_v * D}{U} \quad (3.19)$$

En donde f_v es la frecuencia de generación de vórtices y D el diámetro de la barra.

Posteriores investigaciones han demostrado que el número de Strouhal no es constante y que presenta variaciones que se pueden asociar al número de Reynolds (Re) y a la rugosidad del cilindro.

En la Figura 3.10 se presenta la relación entre ambos parámetros. ⁽²¹⁾



²⁰ Vincenc Strouhal (Čeněk Strouhal) (Seč, 10 de abril de 1850 – Praga, 26 de enero de 1922) fue un físico checo, especialista en el campo de la física experimental y en hidrodinámica. Fue uno de los fundadores del Departamento de Física de la Universidad Carolina de Praga, de la cual fue también rector entre 1903 y 1904. En su honor se nombró como 7391 Strouhal un asteroide del cinturón de asteroides, descubierto en 1983; así como el número adimensional conocido como número de Strouhal, utilizado en mecánica de fluidos.

²¹ Techet, Alexandra. 2.22 DESIGN PRINCIPLES FOR OCEAN VEHICLES (13.42), SPRING 2005. (Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare), <http://ocw.mit.edu> (Accessed 22 Jun, 2013). License: Creative Commons BY-NC-SA

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

En términos de escala relativa, el Número de Strouhal indica que la distancia, entre dos vórtices de un mismo lado de la barra es $\frac{D}{St}$ cuando la barra es infinitamente rígida.

La frecuencia de desprendimiento de vórtices, depende de la velocidad del viento, de la forma de la barra, (expresada cuantitativamente como el No. de Strouhal) de su dimensión característica (D) y de la rugosidad en la superficie de la barra (este último parámetro se incluye usualmente en St):

$$f_v = \frac{St * U}{D} \quad (3.20)$$

Cuando la velocidad del viento es tal que $f_n = f_v$, se le denomina velocidad crítica o velocidad de resonancia. (U_{cr}):

$$U_{cr} = \frac{f_n * D}{St} \quad (3.21)$$

Al generarse un vórtice, aparece una zona de baja presión entre él y la barra, por lo que ésta se ve sometida a una fuerza perpendicular al viento, cuya dirección cambia 180° con frecuencia $\frac{f_v}{2}$.

La fuerza transversal derivada del desprendimiento de vórtices es, con suficiente aproximación, una función senoidal:

$$F(t) = \frac{1}{2} * \rho * C_{ML} * A * U^2 * \text{sen}(2 * \pi * f_v * t) \quad (3.22)$$

En donde C_{ML} es la amplitud máxima del coeficiente de fuerza lateral y los otros términos mantienen el significado ya definido.

Un concepto de utilidad para el análisis es el Número de Scruton ⁽²²⁾, que relaciona la masa de la Chimenea con la del aire que desplaza al vibrar, afectándolo por el amortiguamiento, expresado este por su decremento logarítmico:

$$S_c = \frac{2 * \delta * m_e}{\rho * D^2} \quad (3.23)$$

En contraste con el caso de desplazamientos paralelos al viento, la alternancia de vórtices implica que la fuerza media que de ellos se deriva es nula, y por lo tanto la media de la respuesta.

Es de particular interés la respuesta de la estructura cuando la velocidad del viento iguala a la velocidad de resonancia, es decir cuando la frecuencia de desprendimiento de vórtices es igual a la fundamental de la estructura; para su análisis se recurre nuevamente a la dinámica de estructuras:

La ecuación que gobierna el movimiento, para un sistema de un grado de libertad, es ⁽²³⁾:

$$m * \ddot{y}(t) + c * \dot{y}(t) + k * y(t) = \frac{1}{2} * \rho * C_{ML} * A * U^2 * \text{sen}(2 * \pi * f_v * t) \quad (3.24)$$

Y su solución cuando $f_n = f_v$ es:

²² El concepto de amortiguamiento de masa fue presentado por primera vez por Scruton C. "Wind-induced oscillations of tall stacks" Engineer 199, 806-808 (1955)

²³ Las componentes del movimiento de la corona de la chimenea, perpendiculares al viento están simbolizadas por: y, \dot{y}, \ddot{y}

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

$$y(t) = (y_{st}) \frac{1}{2\xi} [(e^{-\xi f_n t} (\cos(f_d * t) + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \text{sen}(f_d * t)) - \cos(f_n * t))] \quad (3.25)$$

En donde $f_d = f_n * \sqrt{1 - \xi^2}$; $y_{st} = \frac{F}{k} = \frac{1}{2 * k} * \rho * C_L * A * U^2$ y U es la velocidad media paralela al viento.

Si el amortiguamiento es suficientemente pequeño, ($f_d \approx f_n$) la expresión (3.25) se reduce a:

$$y(t) \approx (y_{st}) \frac{1}{2\xi} [(e^{-\xi f_n t} - 1) * \cos(f_n * t)] \quad (3.26)$$

El análisis de (3.26) muestra que el desplazamiento está limitado a un valor máximo de

$$y(t)_{max} = (y_{st}) \frac{1}{2\xi} \quad \text{cuando } t \rightarrow \infty \quad (3.27)$$

El desplazamiento varía periódicamente y su amplitud aumenta con el tiempo hasta llegar al límite definido por (3.27).

De la expresión (3.27) se desprende que la fuerza equivalente necesaria para producir el desplazamiento máximo es:

$$F_{eq} = \frac{1}{2 * \xi} * F_{st} \quad (3.28)$$

La fuerza lateral, debida al desprendimiento de vórtices, que produce el máximo desplazamiento, ocurre cuando la velocidad del viento es igual a la crítica, y en teoría, para alturas menores a la gradiente, esto sólo puede ocurrir en un punto a lo largo del fuste; sin embargo, en estructuras flexibles, se presenta el fenómeno de bloqueo aeroelástico ⁽²⁴⁾, que se analizará con más detalle en la sección (4), y en el cual, la frecuencia de desprendimiento de vórtices se iguala a la de la estructura para un intervalo de velocidades en el entorno cercano a la crítica, lo que permite considerar que la fuerza máxima es consecuencia del viento al actuar con una misma velocidad, (la velocidad crítica) a lo largo de una longitud específica, denominada longitud de correlación efectiva) ^{(25), (26)}

El área a lo largo de la longitud de correlación efectiva (LCE) es:

$$A = \frac{h}{\beta} * D \quad (3.29)$$

En donde la LCE se ha expresado en función de la altura de la chimenea mediante el factor

$$\beta = \frac{h}{L_1}$$

La amplitud máxima de la fuerza armónica (F_{st}) está asociada a la velocidad del viento con la expresión:

$$F_{st} = \frac{1}{2} * \rho * C_{ML} * U^2 * \frac{h}{\beta} * D \quad (3.30)$$

El término: ($\frac{1}{2} * \rho * C_{ML} * U^2$), constituye la presión media del viento sobre la chimenea.

²⁴ Conocido en idioma inglés como lock-in.

²⁵ Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-4: General Actions – Wind actions; April 2005

²⁶ Vickery, B.J., Basu, R.I.; Across-Wind Vibrations of Structures of Circular Cross-Section. Part I. Development of a Mathematical Model for Two-Dimensional Conditions; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 12, 75-97 Elsevier Science Publishers; Amsterdam Netherlands; 1983; p.57

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

Al incorporar (3.21) en (3.30) y ésta en (3.28) se obtiene:

$$F_{eq} = \frac{1}{2 \cdot \xi} * \frac{1}{2} * \rho * \frac{h}{\beta} * D * C_{ML} * \left[\frac{f_n * D}{S_t} \right]^2 \quad (3.31)$$

Por otra parte, la frecuencia fundamental de una viga en voladizo es:

$$f_n = \frac{1.875^2}{2 \cdot \pi} * \sqrt{\frac{E \cdot I}{m \cdot h^4}} \quad (3.32)$$

En la expresión anterior:

E = módulo de elasticidad del material estructural de la chimenea.

I = momento de inercia de la sección transversal.

m = masa equivalente por unidad de longitud de la chimenea, la cual, a su vez, se puede expresar como función del diámetro:

$$m = \pi * \lambda * D^2 * \alpha \quad (3.33)$$

λ y α son la densidad del material de la chimenea, y la relación espesor-diámetro (t/D), respectivamente.

Al sustituir el valor de (3.33) en (3.32), elevar este al cuadrado y a su vez incorporarlo en (3.29) se obtiene:

$$F_{eq} = \frac{1}{2 \cdot \xi} * \frac{1}{2} * \rho * \frac{h}{\beta} * D * C_{ML} * \frac{1.875^4}{4 \cdot \pi^2} * \frac{E \cdot I \cdot D^2}{\pi * \lambda * D^2 * \alpha * h^4 * S_t^2} \quad (3.34)$$

Después de simplificar:

$$F_{eq} = \frac{1.875^4}{16 \cdot \pi^3} * \frac{C_{ML} * \rho * E * I * D}{\xi * \beta * \lambda * \alpha * h^3 * S_t^2} \quad (3.35)$$

La rigidez (k) de una barra sometida a carga uniforme en una longitud h/ β sobre el extremo opuesto al apoyo, está dada por la expresión ⁽²⁷⁾:

$$k = \frac{E \cdot I *}{h^3} * \frac{24 * \beta^3}{(8 * \beta^3 - 6 * \beta^2 + 1)} \quad (3.36)$$

Y el desplazamiento máximo, en condición de velocidad crítica es:

$$y_{max} = \frac{F_{eq}}{k} = \frac{\frac{1.875^4}{16 \cdot \pi^3} * \frac{C_{ML} * \rho * E * I * D}{\xi * \beta * \lambda * \alpha * h^3 * S_t^2}}{\frac{E \cdot I *}{h^3} * \frac{24 * \beta^3}{(8 * \beta^3 - 6 * \beta^2 + 1)}} \quad (3.37)$$

Una vez simplificada:

$$y_{max} = \frac{1.875^4}{384 \cdot \pi^3} * \frac{C_{ML} * \rho * D}{\xi * \lambda * \alpha * S_t^2} * \frac{(8 * \beta^3 - 6 * \beta^2 + 1)}{\beta^4} \quad (3.38)$$

La expresión (3.37) se puede normalizar respecto al diámetro:

$$\frac{y_{max}}{D} = \frac{1.875^4}{384 \cdot \pi^3} * \frac{C_{ML} * \rho}{\xi * \lambda * \alpha * S_t^2} * \frac{(8 * \beta^3 - 6 * \beta^2 + 1)}{\beta^4} \quad (3.39a)$$

También se puede expresar en función de la masa por unidad de longitud:

²⁷ Ver en el Apéndice C, el cálculo de la rigidez.

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

$$\frac{y_{max}}{D} = \frac{1.875^4}{384 \cdot \pi^2} * \frac{D^2 C_{ML} \cdot \rho}{\xi * m * S_t^2} * \frac{(8 \cdot \beta^3 - 6 \cdot \beta^2 + 1)}{\beta^4} \quad (3.39b)$$

O, al tomar en cuenta el número de Scruton: $\left[S_c = \frac{2 \cdot \delta \cdot m_e}{\rho \cdot D^2} \right]$ (3.23)

$$\frac{y_{max}}{D} = \frac{1.875^4}{96 \cdot \pi} * \frac{1}{S_c} * \frac{C_{ML}}{S_t^2} * \frac{(8 \cdot \beta^3 - 6 \cdot \beta^2 + 1)}{\beta^4} \quad (3.39c)$$

Se tiene entonces el desplazamiento máximo de la corona de la chimenea como función de:

- El diámetro de la chimenea: D [m]
- La altura de la chimenea : h [m]
- La relación espesor-diámetro: α [-]
- La longitud equivalente en la que se considera la fuerza lateral como resultante de una velocidad media uniforme.
(Longitud de correlación efectiva) $L_1 = \frac{h}{\beta}$ [m]
- La relación entre la longitud equivalente y la altura total $\beta = \frac{h}{L_1}$ [-]
- La densidad del aire: ρ $\left[\frac{kg \cdot s^2}{m^4} \right]$
- La amplitud máxima del coeficiente de fuerza lateral: C_{ML} [-]
- La relación de amortiguamiento respecto al crítico ξ [-]
- El número de Strouhal: S_t [-]
- La densidad equivalente del material, que incluye la masa de materiales no estructurales: λ $\left[\frac{kg \cdot s^2}{m^4} \right]$
- La masa equivalente por unidad de longitud m_e $\left[\frac{kg \cdot s^2}{m^2} \right]$
- El número de Scruton S_c [-]

En el Eurocódigo 2005 ⁽²⁸⁾ se propone la siguiente expresión para cálculo de los desplazamientos máximos:

E.1.5.2.1 Calculation of displacements

The largest displacement $y_{f,max}$ can be calculated using Expression (E.7).

$$\frac{y_{f,max}}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{Sc} \cdot K \cdot K_w \cdot C_{lat} \quad (E.7)$$

where:

St is the Strouhal number given in Table E.1

Sc is the Scruton number given in E.1.3.3

K_w is the effective correlation length factor given in E.1.5.2.4

K is the mode shape factor given in E.1.5.2.5

C_{lat} is the lateral force coefficient given in Table E.2

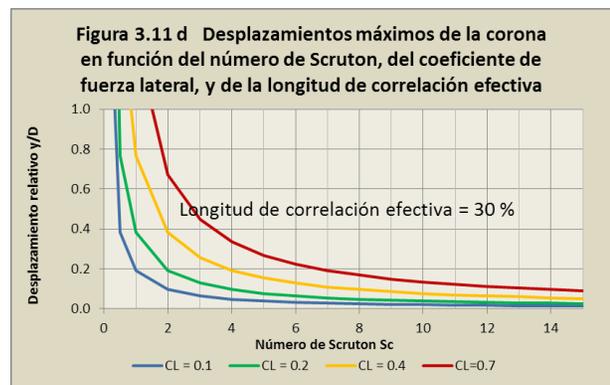
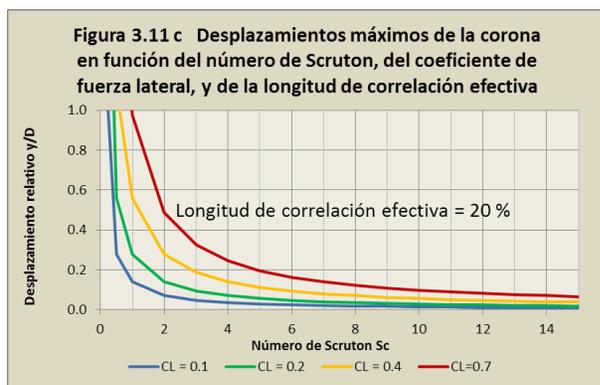
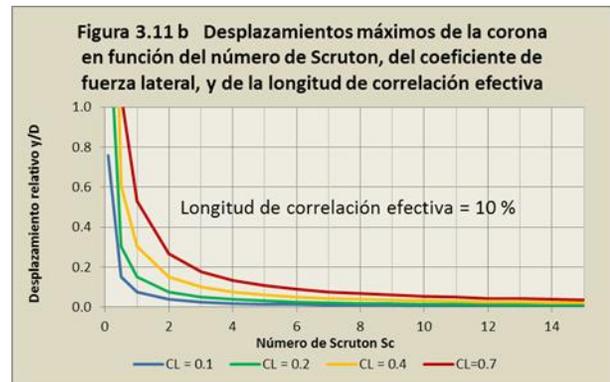
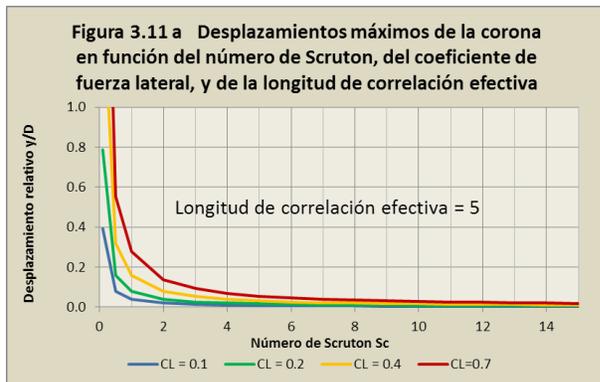
NOTE The aeroelastic forces are taken into account by the effective correlation length factor K_w .

²⁸ European Standard EN 1991-1-4 p. 119

3.- Respuesta de las Chimeneas metálicas a la acción del viento.

El desplazamiento máximo depende de muy diversos factores, siendo el principal el número de Scruton así como otros dos que están determinados por la interacción fluido estructura, y que usualmente se obtienen experimentalmente, dada la complejidad del fenómeno. Estos son la fuerza lateral y la longitud de correlación efectiva.

En las Figuras 4.11 a-d se muestran los desplazamientos relativos calculados con la expresión 3.38c, como función del número de Scruton, de la fuerza lateral y de la LCE. Los valores del coeficiente lateral corresponden a los encontrados por Ruschenweyh ⁽²⁹⁾ para números de Reynolds en el intervalo $10^4 < Re < 10^7$.



En la siguiente sección se analiza con más detalle la participación de los diversos parámetros en la respuesta de la estructura.

²⁹ Ruschenweyh, H.; "Practical Experiences with Wind -Induced Vibrations"; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 33 (1990), 211-218.

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

4.1. Número de Reynolds.

El número de Reynolds es sin duda el parámetro más empleado al analizar un flujo. Está definido como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas que actúan en un fluido.

Cualitativamente:
$$R_e = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}}$$

Cuantitativamente:
$$R_e = \frac{\rho * u^2 * D}{\mu * u} = \frac{u * D}{\frac{\mu}{\rho}} = \frac{u * D}{\nu}$$

En donde:

- ρ es la densidad del fluido [kg/m³]
- u es la velocidad [m/s]
- μ es la viscosidad dinámica del fluido [kg/(m*s)]
- $\nu = \mu / \rho$ es la viscosidad cinemática del fluido [m²/s]
- D es una dimensión característica que determina la superficie sobre la que actúan las fuerzas.

Distintos investigadores (Dyrbye & Hansen, Holmes, Roshko, etc.) identifican los regímenes de flujo en función de intervalos en los valores del Número de Reynolds, y en general se consideran tres tipos:

- Sub-crítico, para $Re < 3 * 10^5$ en el cual se presenta el desprendimiento periódico de vórtices.
- Supercrítico, para $3 * 10^5 < Re < 3.5 * 10^6$ en el cual el desprendimiento de vórtices es aleatorio.
- Trans-crítico, para $Re > 3.5 * 10^6$ en el cual el desprendimiento de vórtices vuelve a ser periódico.

Los valores e intervalos presentan algunas variaciones y aun los nombres de los mismos, sin embargo la clasificación anterior se puede considerar representativa de lo que definen los diferentes autores.

A fin de relacionar la velocidad crítica, el diámetro de la estructura y el Número de Reynolds, se preparó la gráfica que se muestra en la Figura 4.1, en la cual se incluyen (marcadores cuadrados) los valores del número de Reynolds correspondientes a diversas Chimeneas ⁽³⁰⁾, cuyos datos se presentan en la Tabla 4.1.

³⁰ Los datos de las chimeneas se tomaron de: Hansen, Sven Ole; Vortex Induced Vibrations of Line-Like Structures; CICIND's 50th meeting; Oxford, 1998

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

La velocidad crítica en una chimenea metálica, así como sus dimensiones, conducen con frecuencia a Números de Reynolds en el régimen supercrítico, lo que permitiría una rápida identificación en cuanto al tipo de desplazamientos transversales esperados.

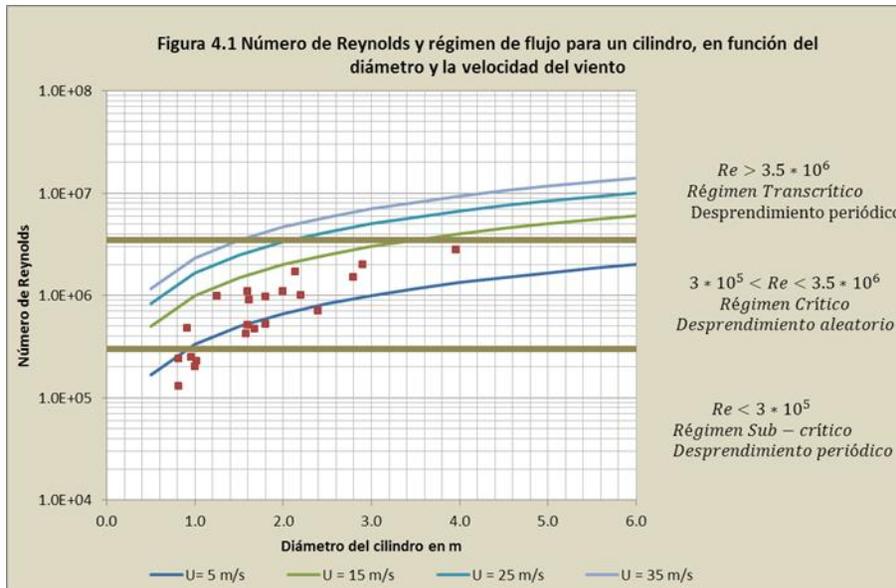


Tabla 4.1 Chimeneas empleadas para ilustrar la relación entre Número de Reynolds, Diámetro y Velocidad Crítica

Chimenea	Diámetro (m)	Velocidad crítica (m/s)	Número de Reynolds
Thyborón	2.8	8.1	1.50E+06
Odense	2.4	4.4	7.10E+05
Heming	1.8	4.4	5.26E+05
Distiling Column	3.96	10.5	2.77E+06
Chimenea B	0.816	4.3	2.40E+05
Aarhus	2.2	6.8	1.00E+06
Knokke	1.6	4.8	5.10E+05
Chimenea A	1.25	11.8	9.80E+05
Veales Nrwy	1.61	8.4	9.00E+05
Aachen	0.914	7.9	4.80E+05
Kein	0.813	2.5	1.30E+05
Pima	2	8	1.10E+06
Rekling	1.016	3.5	2.30E+05
Geece	1.68	4.2	4.70E+05
England	1.8	8.1	9.70E+05
Netherland 1	1.58	4	4.20E+05
Netherland 2	1	3	2.00E+05
Netherland 3	0.96	3.8	2.50E+05
USA #31	2.9	10.2	2.00E+06
UK	2.14	11.8	1.70E+06
Netherland Nho	1.6	10.4	1.10E+06

El Número de Reynolds está asociado, en general, a la mayor parte de los parámetros que interfieren en el fenómeno de vibraciones inducidas por vórtices, (VIV) por ello se mencionará en cada caso su influencia.

4.2. Longitud de correlación efectiva.

En la Sección 3.1, se indicó que la longitud de correlación efectiva (L1 ó LCE) es aquella a lo largo de la cual se puede considerar que la fuerza unitaria por viento es uniforme, esta

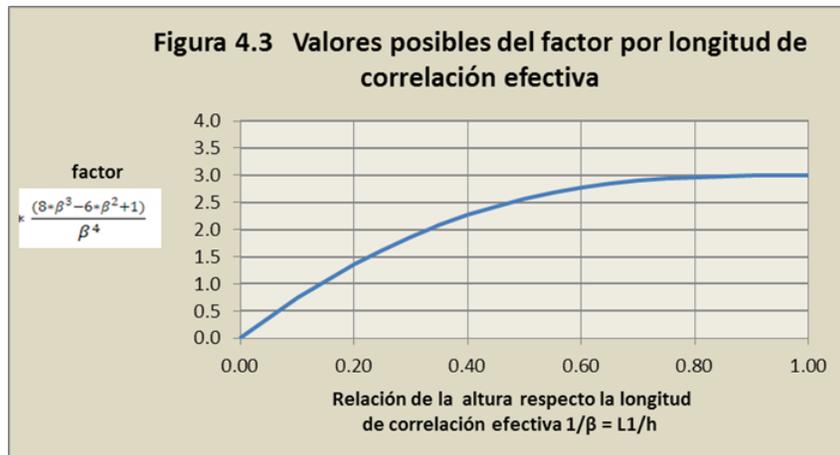
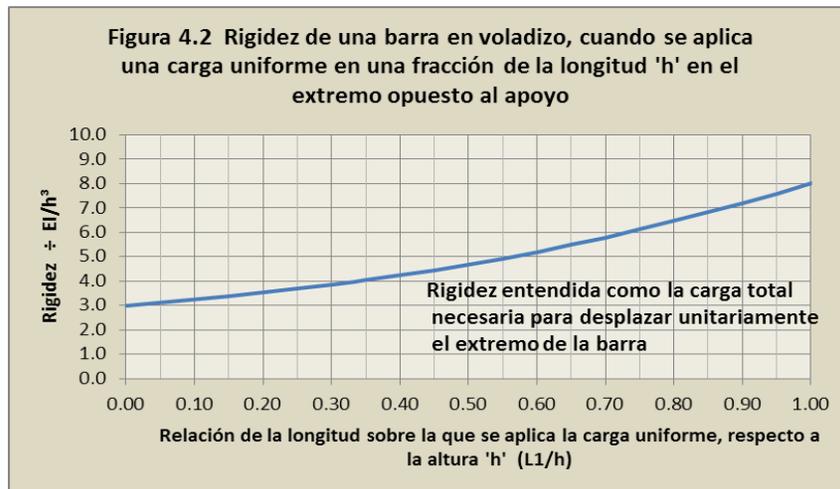
4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

última se deriva de la velocidad crítica y produce los desplazamientos máximos de la corona de la Chimenea.

En el Apéndice B se obtiene una expresión, (3.35), que permite determinar la rigidez de la Chimenea en función de la longitud de correlación efectiva. En la Figura 4.2 se muestra dicha variación.

Asimismo, se desarrolló una expresión para determinar el desplazamiento relativo máximo de la Chimenea, (3.38.c) en condición de resonancia, y en dicha expresión, como consecuencia de haber incluido la rigidez de la Chimenea, aparece el factor:

$$\frac{(8*\beta^3 - 6*\beta^2 + 1)}{\beta^4} \quad (4.1)$$



En donde β es la relación entre la altura de la Chimenea y la longitud de correlación efectiva: $h/L1$

Con objeto de analizar en qué medida los desplazamientos se ven afectados por la LCE, se preparó la Figura 4.3, en la cual se muestra la variación del factor (4.1)

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

La figura anterior indica que, por lo que respecta a la LCE y su influencia en los desplazamientos de la Chimenea, estos están limitados a un valor máximo, el cual se alcanza para valores de la longitud de correlación efectiva del orden de $0.65 \cdot h$.

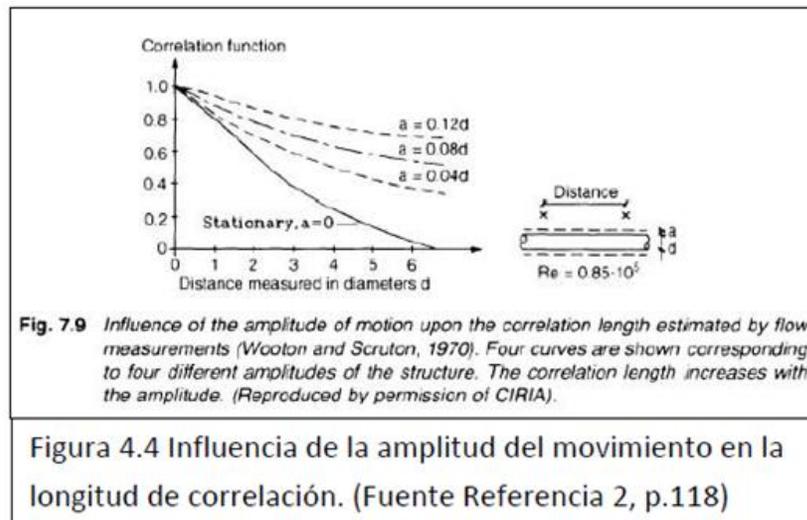
En la literatura se hace referencia a la LCE como función del máximo desplazamiento relativo, (y/D) y se le asignan valores que van desde $0.5 \cdot D$ ⁽³¹⁾ hasta $12 \cdot D$ ⁽³²⁾ ⁽³³⁾. Se señala además que la turbulencia tiende a reducir el valor de la LCE, y en consecuencia el valor máximo de los desplazamientos;

La Figura 4.4, muestra la relación entre diámetro, desplazamiento relativo y longitud de correlación.

Al considerar la definición de longitud de correlación efectiva se deduce que su magnitud $L1$ es una función de:

- El perfil de velocidades del viento.
- La turbulencia.
- La forma modal de la estructura, en correspondencia con la frecuencia del desprendimiento de vórtices, la cual a su vez es función de la velocidad.

La longitud de correlación efectiva es importante, y se asocia a desplazamientos máximos, al ocurrir resonancia con la frecuencia del modo fundamental.



En esta sección se limitará el análisis al efecto del perfil de velocidades del viento, y en la sección 4.3 se comentará en específico el efecto de la turbulencia.

³¹ Vickery, B.J., Basu, R.I.; Across-Wind Vibrations of Structures of Circular Cross-Section. Part I. Development of a Mathematical Model for Two-Dimensional Conditions; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 12, 75-97 Elsevier Science Publishers; Amsterdam Netherlands; 1983; p. 53

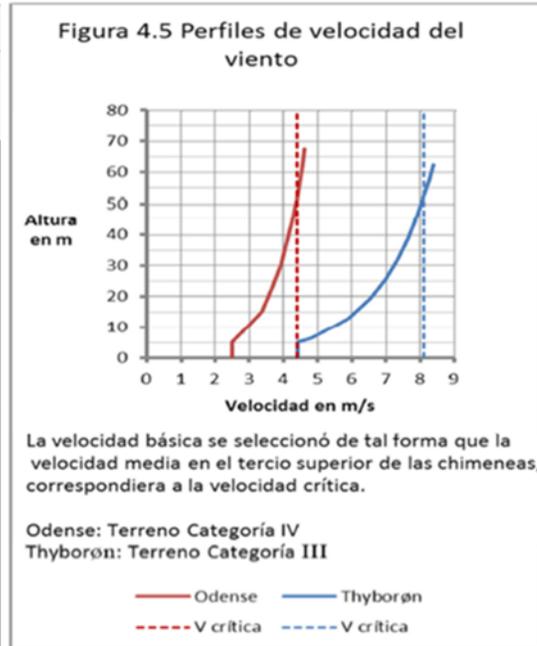
³² Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-4: General Actions –Wind actions; April 2005, Table E-4 p. 122

³³ Ruscheweyh H, “Practical Experiences with Wind Induced Vibrations”; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics; 33.

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

Tabla 4.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS CHIMENEAS EN ESTUDIO

Parámetro	Símbolo	Unidades	ODENSE	THYBORØN	
			Valores	Reportado como medido	Reportado como calculado según EC
Altura	h	m	75.00	64.00	na
Diámetro	D	m	2.40	2.80	na
Espesor de la pared superior	t	mm	5.00	8.00	na
Relación de esbeltez	h/d	[-]	31.00	22.90	22.90
Frecuencia natural	f_n	Hz	0.37	0.58	0.60
Decremento logarítmico	δ_s	[-]	0.03	0.014	0.03
Número de Scruton	S_c	[-]	4.08	3.03	4.42
Número de Strouhal	S_t	[-]	0.20	0.20	0.20
Velocidad crítica	U_{crit}	m/s	4.40	8.10	8.40
Número de Reynolds	Re	[-]	7.10E+05	1.50E+06	1.57E+06
Relación de Masa	m/pd^2	[-]	68	108	na



4.2.1. Longitud de correlación efectiva como función del perfil de velocidades del viento.

El perfil de velocidades del viento afecta a la longitud de correlación efectiva de dos maneras:

- Determina la frecuencia del desprendimiento de vórtices, de acuerdo al número de Strouhal. Este efecto, es lineal y depende de la velocidad del viento.
- Determina la fuerza transversal como una función armónica con amplitud dependiente del cuadrado de la velocidad del viento.

Para ilustrar este concepto se realizó el cálculo de los desplazamientos en dos Chimeneas mediante modelos ⁽³⁴⁾ a los que se aplicaron series de tiempo de velocidades de viento simuladas, derivadas de perfiles calculados conforme a las normas del Eurocódigo.

Los datos relevantes de las Chimeneas son los que se presentan en la Tabla 4.2, y en la Figura 4.5 se presentan los perfiles de velocidades del viento aplicables.

Las Chimeneas fueron seleccionadas de la Referencia 1, corresponden a dos localidades en Dinamarca (Odense y Thyborøn) y son de interés por haber presentado grandes desplazamientos, mayores a los previstos por el diseñador y por las normas.

La amplitud máxima de las fuerzas en las series de tiempo se calculó con la expresión:

$$F_y(z, t) = \frac{1}{2} * \rho_m * u(z, t)^2 * A * C_L \quad (4.2)$$

³⁴ Se empleó el programa SAP2000 V.14

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

En donde:

- ρ_m es la densidad del aire:

$$\rho_m = \frac{G \cdot \rho}{g} = \frac{1.1328 \cdot 1.2251}{g} = 0.1414 \frac{kg \cdot s^2}{m^4}$$

- ρ es el peso volumétrico del aire, $\rho = 1.2251 \text{ kg/m}^3$;
- g la aceleración de la gravedad;
- G es un factor correctivo de la densidad del aire que depende de la altura sobre el nivel del mar, y la temperatura ambiente, derivado de la Ley de los gases ideales⁽³⁵⁾:

$$G = \frac{0.392 \cdot \Omega}{273 + \tau} \quad (4.3)$$

- Ω es la presión barométrica del lugar expresada en milímetros de mercurio, $\Omega=760$;
- τ es la temperatura ambiente⁽³⁶⁾, $\tau=-10 \text{ }^\circ\text{C}$
- $u(z, t)$ es la velocidad del viento para la altura 'z' en el instante 't'.
- A es el área tributaria para el intervalo de velocidad considerado.
- C_L es el coeficiente de fuerza lateral, en este caso se aplicó $C_L=0.55$, derivado de una simulación modelada con el programa COMSOL Multiphysics. Más adelante se analiza este factor y sus variaciones.

La variación en el tiempo se consideró senoidal, con la expresión:

$$F_y(z, t) = F_y(z) * \text{sen}[2 * \pi * f_v(z) * t] \quad (4.4)$$

- $f_v(z)$ se calcula con la relación de Strouhal para las velocidades del perfil ya definido. (cada Chimenea se dividió en 10 tramos iguales);
- t es el tiempo, en incrementos de 0.01 s, desde $t=0.00 \text{ s}$ hasta $t= 500.00 \text{ s}$

Los desplazamientos resultantes para cada sección de altura media z se muestran en las Figuras 4.6 y 4.7, y los desplazamientos totales ⁽³⁷⁾, resultado de la superposición de los anteriores, se presentan en las Figuras 4.8 y 4.9. En dichas figuras se aprecia que:

- Los desplazamientos significativos se presentan en los últimos 4 tramos, que implican el 30 o 35 % de la longitud de las Chimeneas;
- La extensión temporal de la fase transitoria es mayor en la Chimenea de Thyborøn, como consecuencia de un menor amortiguamiento estructural;
- La respuesta mayor, se presenta por el viento aplicado en la altura cuya velocidad del viento es más próxima a la velocidad crítica;
- La diferencia en las amplitudes de los desplazamientos por el viento aplicado a diferentes alturas no es proporcional a la diferencia de las velocidades de viento

³⁵ Comisión Federal de Electricidad; Manual de Diseño de Obras Civiles; Diseño por Viento; México, 2008. (p. 4.2 I.15)

³⁶ La importancia de incluir el factor G, se debe a que las grandes deformaciones observadas en las Chimeneas del ejemplo, ocurrieron en días con temperaturas muy bajas, del orden de -10°C , lo que incrementó la densidad del viento, y en consecuencia las fuerzas derivadas, en aproximadamente un 13%.

³⁷ En todos los casos se trata de los desplazamientos de la corona de la Chimenea

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

respectivas, ya que las amplitudes obedecen en mayor medida al efecto resonante, que ocurre si la velocidad del viento es cercana o igual a la crítica. Lo anterior es un aspecto más del efecto no lineal de la velocidad del viento sobre la estructura.

- Los desplazamientos totales, no son la suma lineal de los desplazamientos calculados para cada altura, ya que estos presentan diferentes frecuencias, y por lo tanto se encuentran en fases distintas entre ellos. Lo anterior causa las irregularidades de la respuesta total. (Figuras 4.8 y 4.9) Sin embargo, al presentarse el fenómeno de bloqueo aeroelástico, la frecuencia del desprendimiento de vórtices se iguala con la frecuencia de la respuesta, lo que origina un incremento en la amplitud de los desplazamientos. Este aspecto se analizará más adelante.

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

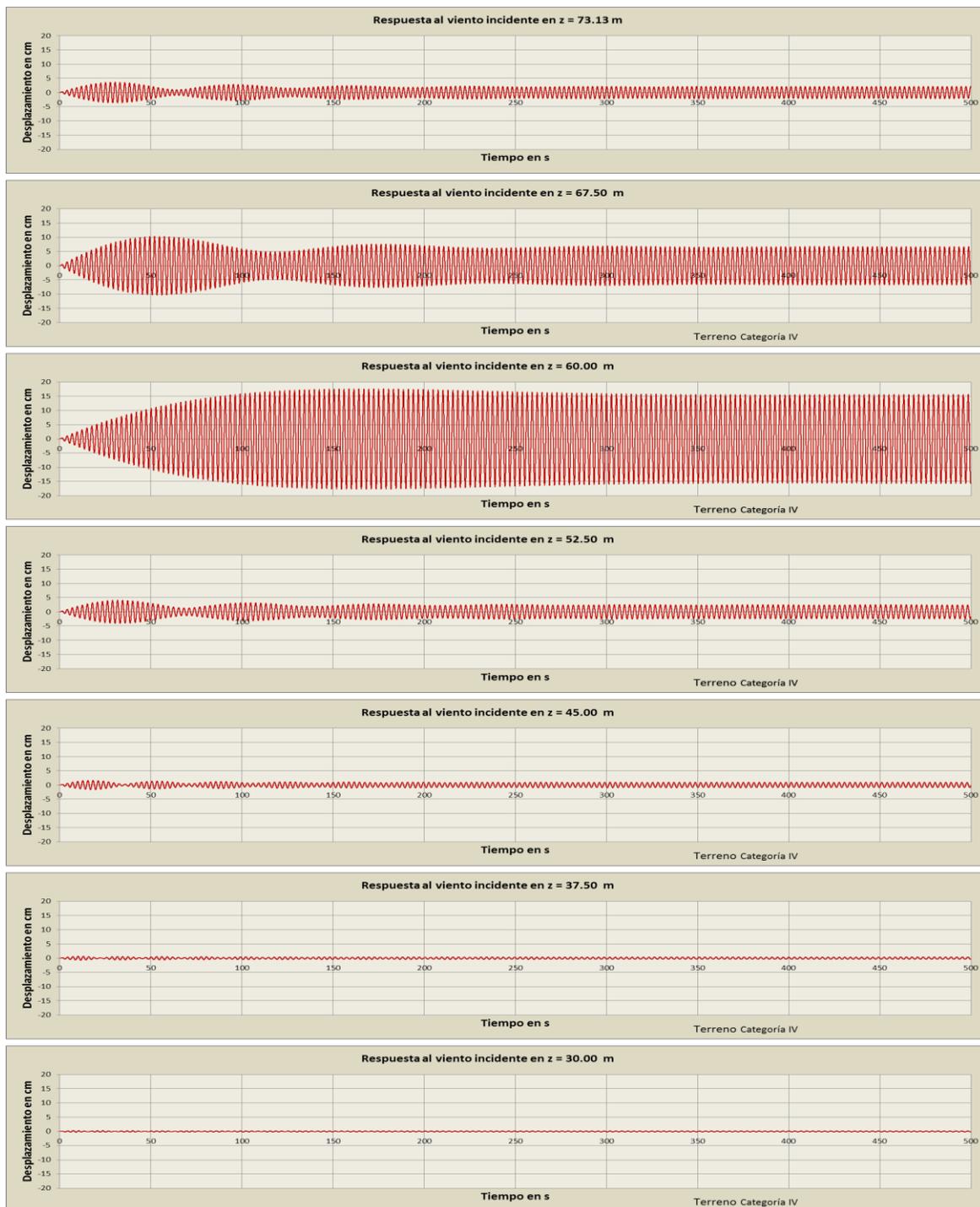


Figura 4.6 Odense: Desplazamientos de la corona de la Chimenea por la aplicación de fuerzas de viento a diferentes alturas. Terreno Categoría IV

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

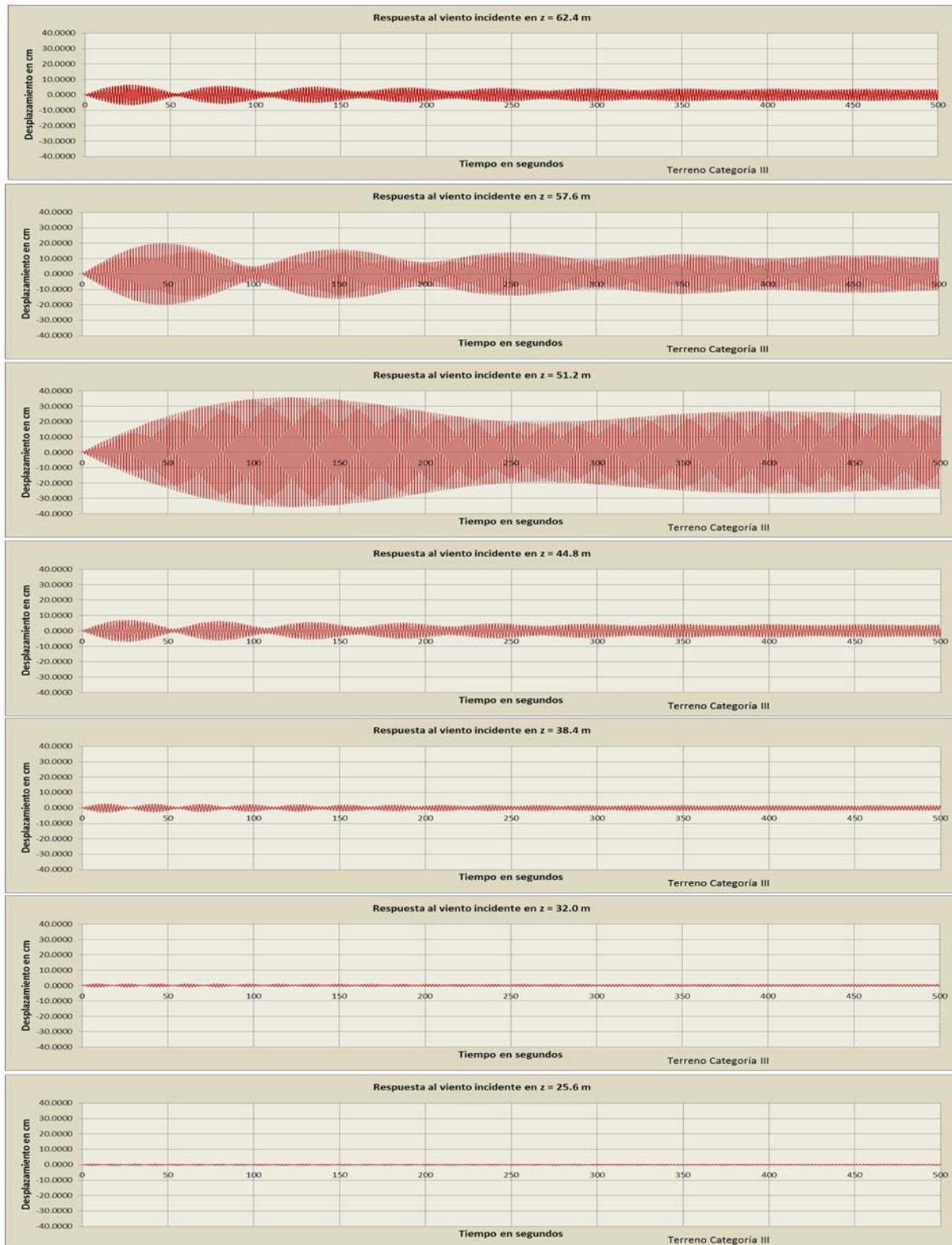
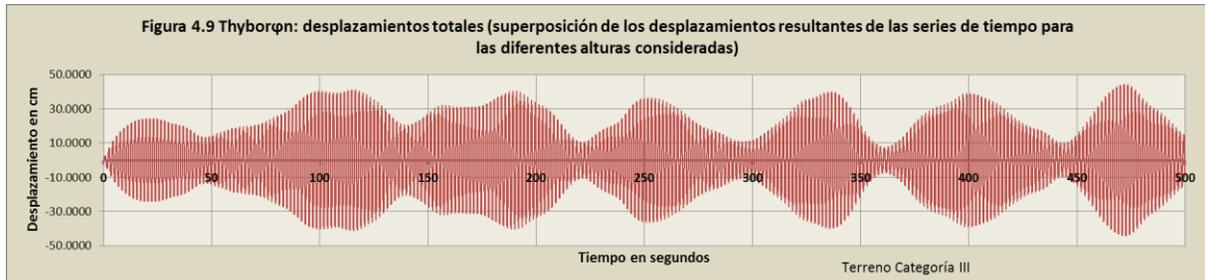


Figura 4.7 Thyborøn: Desplazamientos de la corona de la Chimenea por la aplicación de las fuerzas de viento a diferentes alturas. Terreno Categoría III.

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

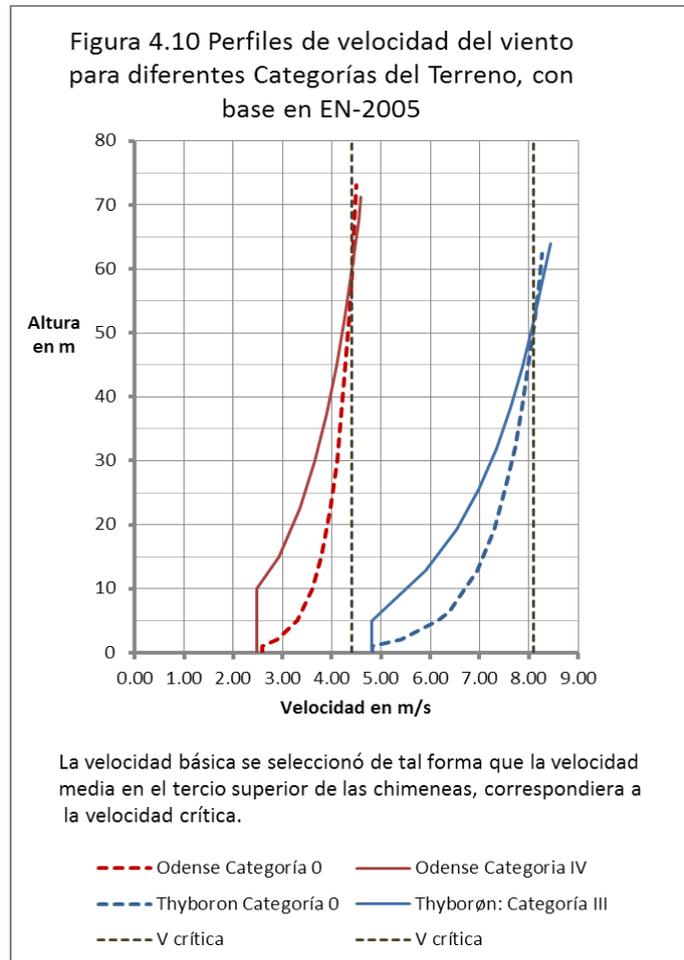


Los desplazamientos comentados corresponden a perfiles de viento de las Categorías de Terreno III y IV para Thyborøn y Odense respectivamente.

Con objeto de ilustrar el efecto del perfil de velocidades del viento, en la Figura 4.10 se muestran los perfiles de viento para Terreno Categoría 0, y se comparan con los perfiles mostrados en la Figura 4.5.

En la parte superior de la Chimenea, las velocidades calculadas para Terreno Categoría 0 se ciñen más a la velocidad crítica, lo que, como se verá enseguida, se traduce en desplazamientos condicionados por un mayor efecto resonante.

En la Figura 4.11 se muestra la respuesta de la Chimenea en Odense ante las diferentes velocidades de viento en los tramos de altura considerados, resultantes del perfil para Terreno Categoría 0: En dicha figura destacan las amplitudes mayores y menos variables en la parte superior de la Chimenea, en comparación con las mostradas en la Figura 4.6.



4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

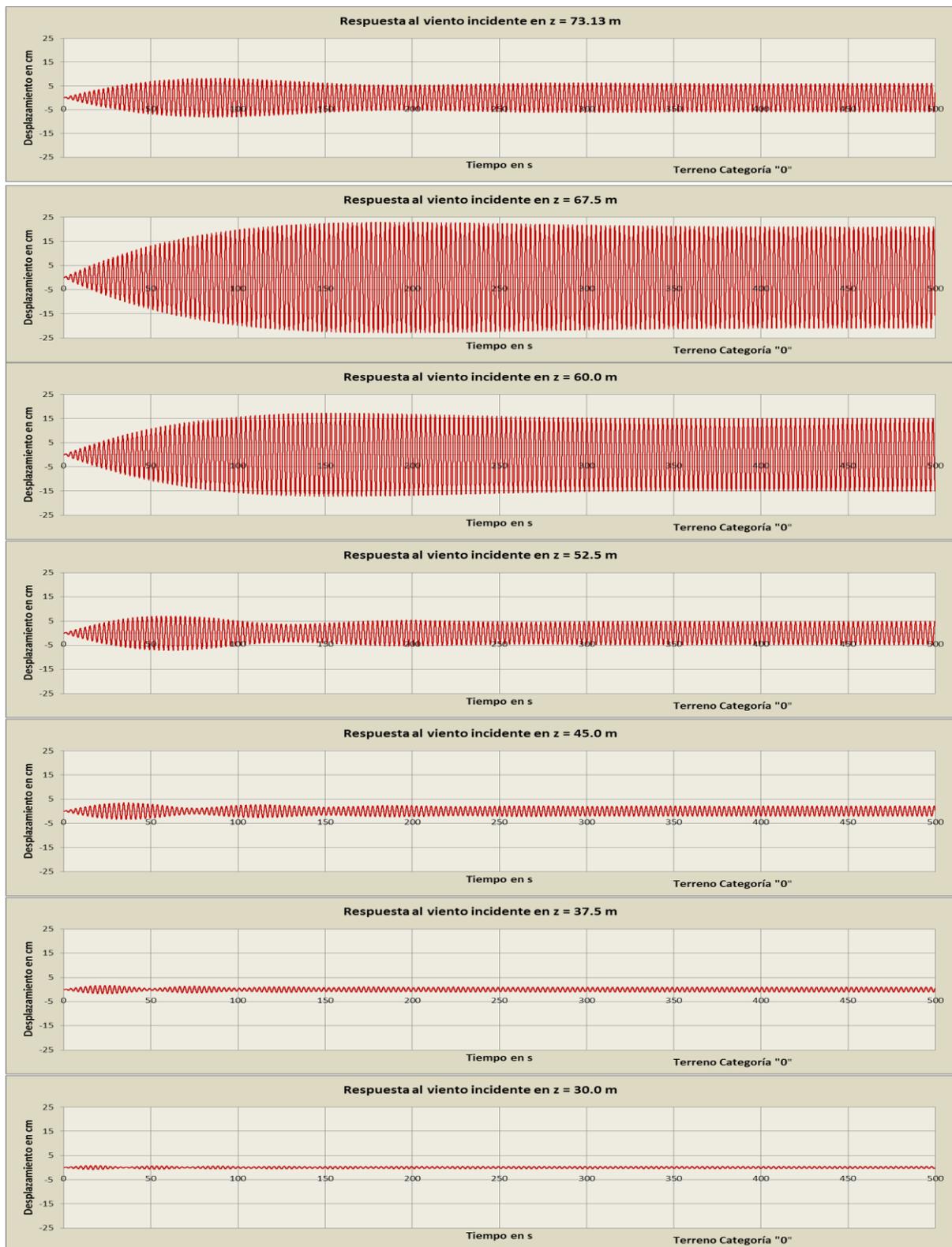
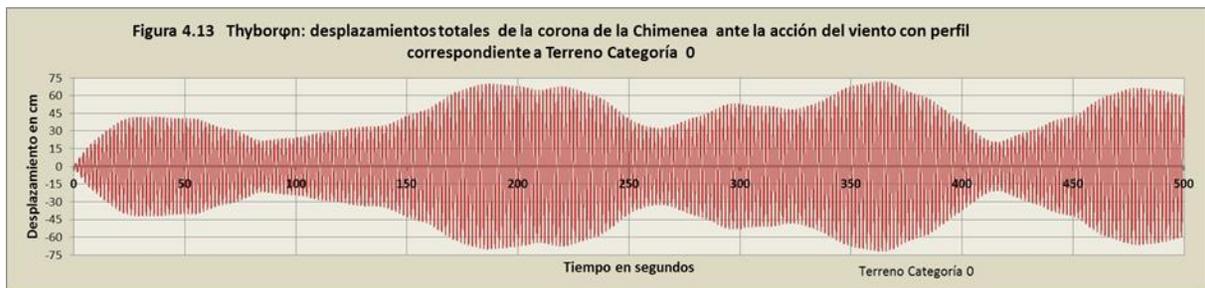
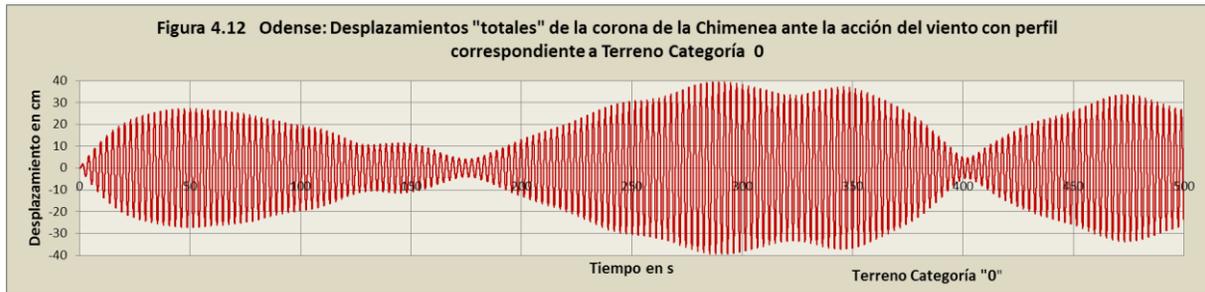


Figura 4.11 Odense: Desplazamientos de la corona de la Chimenea por la aplicación de fuerzas de viento a diferentes alturas Categoría de Terreno 0.

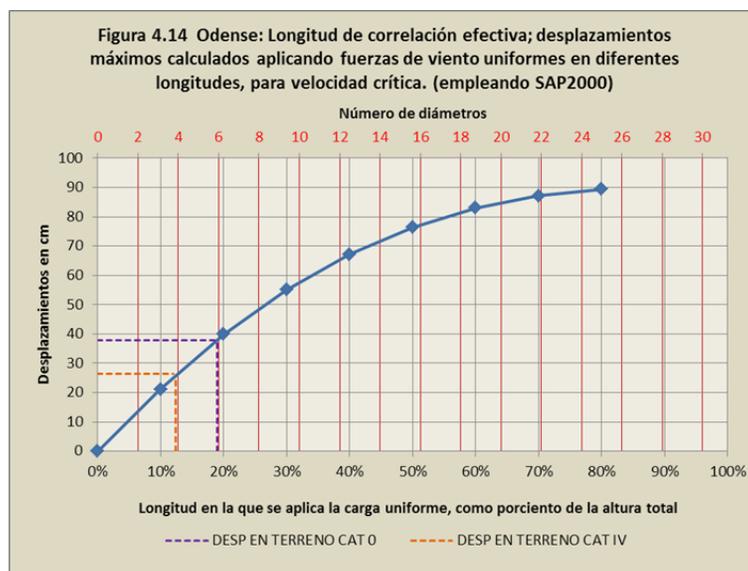
4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

Los desplazamientos totales de la corona, para Terreno Categoría 0, y para ambas Chimeneas se muestran en las Figuras 4.12 y 4.13:



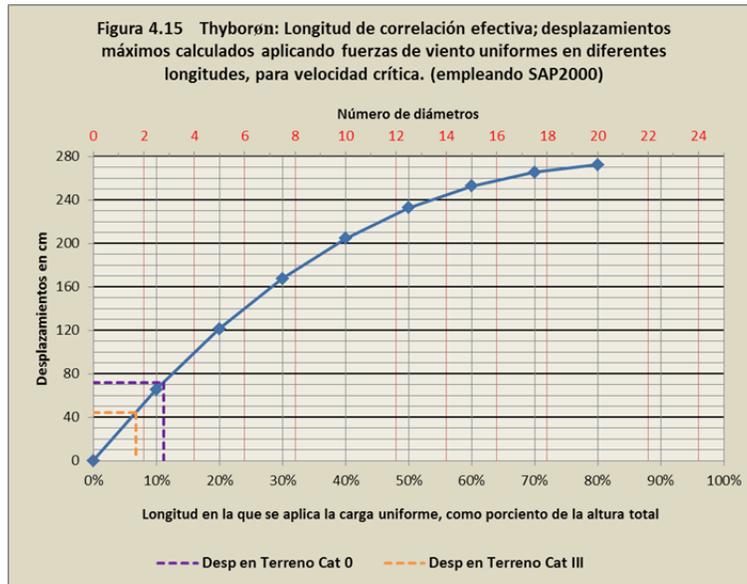
De nuevo, las diferentes frecuencias de la respuesta en cada tramo conducen a una respuesta total con lapsos de desplazamientos máximos y mínimos, efecto que puede ser anulado por el fenómeno de bloqueo aeroelástico, durante el cual se mantienen relativamente constantes los desplazamientos máximos.

Con el objeto de encontrar la longitud de correlación efectiva, $L1$, se calcularon los desplazamientos mediante el análisis con series de tiempo (con la velocidad crítica para definir la amplitud de la presión de viento sobre la chimenea), para distintas longitudes del fuste, los resultados se presentan en las Figuras 4.14, y 4.15.



4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

Dichas gráficas corresponden con precisión a la variación determinada por el factor $\frac{(8*\beta^3-6*\beta^2+1)}{\beta^4}$ contenido en la expresión 3.38c y prevista en la Figura 4.3.



En la Tabla 4.3 se presenta un resumen de los desplazamientos obtenidos en el análisis modelado de ambas Chimeneas.

Tabla 4.3 Comparativa de desplazamientos y longitudes de correlación efectiva para diferentes perfiles de la velocidad del viento.		Odense		Tyhborøn	
		Terreno categoría 0	Terreno categoría IV	Terreno categoría 0	Terreno categoría III
Desplazamiento calculado aplicando fuerzas en diferentes alturas	cm	37.9	26.3	71.9	44.1
Longitud de Correlación efectiva	Diámetros	6.0	3.75	2.8	1.7
	L1/h en %	19.2%	13.2%	11.5%	7.0%
Desplazamiento calculado con la expresión 4.38c***	cm	43.2	28.9	65.3	41.2
Diferencias respecto al análisis	%	14%	10%	-9%	-7%

*** Aplicando la longitud de correlación efectiva obtenida en el análisis por SAP000.

Las no tan grandes diferencias entre los desplazamientos obtenidos mediante modelado, respecto a los calculados con la expresión 4.38c podrían ser alentadoras. Sin embargo no se debe olvidar que la longitud de correlación efectiva se obtuvo a partir de la curva integrada con datos obtenidos a partir de modelar con diversas L1.

Lo anterior conlleva la necesidad de encontrar medios prácticos y precisos para determinar la LCE.

Asimismo, es aparente que la longitud de correlación efectiva, L1, en condición de resonancia, no sólo es una función del diámetro, sino de las propiedades dinámicas de la

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

estructura, las cuales están determinadas, entre otros, por la altura, la masa equivalente, y el material de la Chimenea.

En la literatura se reconoce que la información experimental con que se cuenta es escasa y los resultados dispersos ⁽³⁸⁾, y en la normatividad se define la LCE en función de la amplitud del desplazamiento, lo que conduce a un proceso iterativo en el cálculo de los desplazamientos.

Este punto ofrece oportunidades de investigación.

4.3 Efecto de la Turbulencia.

En el Capítulo 3, se analizó la respuesta de las Chimeneas ante las fuerzas derivadas del desprendimiento de vórtices, calculadas mediante la expresión (4.4):

$$F_y(z, t) = F_y(z) * \text{sen}[2 * \pi * f_v(z) * t] \quad (4.4)$$

En el viento real, tal acción, armónica, se ve afectada por la componente transversal de la turbulencia.

De acuerdo con Holmes ⁽³⁹⁾, o con Hansen ⁽⁴⁰⁾ la turbulencia lateral corresponde al 88 % o 75 %, respectivamente, de la turbulencia paralela.

En los ejemplos que se analizan en esta sección se tomaron valores $I_u = 0.40$ y de $I_v = 0.88 * I_u$ a fin de acentuar, el efecto de la turbulencia.

En la Figura 4.16 se presentan las diferencias entre las acciones del viento con y sin turbulencia: (naranja y rojo)

La serie de tiempo aplicada en el modelo, es la que se muestra en color naranja. Sin embargo, la respuesta no mostró variaciones significativas ni en los valores máximos ni en su uniformidad, respecto a la respuesta que resulta de aplicar solo la fuerza por desprendimiento de vórtices. (armónica)

En la Figura 4.17 se muestran las gráficas de desplazamientos en respuesta a la acción del viento con velocidad crítica, en función de la turbulencia, así como los espectros de Fourier de los propios desplazamientos.

Se concluye que es necesario elevar la turbulencia a valores muy altos, mucho más allá de los que se presentan en la práctica, para que sus efectos sean notables

En la Figura 5.1 se analiza el caso en que el amortiguamiento es nulo, y por lo tanto los desplazamientos aumentan indefinidamente cuando la velocidad del viento es crítica (parte superior de la figura). Sin embargo, al disminuir la velocidad en 1%, situación equiparable al efecto de turbulencia de gran escala, la gráfica muestra como los desplazamientos tienen un comportamiento fluctuante, y su magnitud se ve limitada.

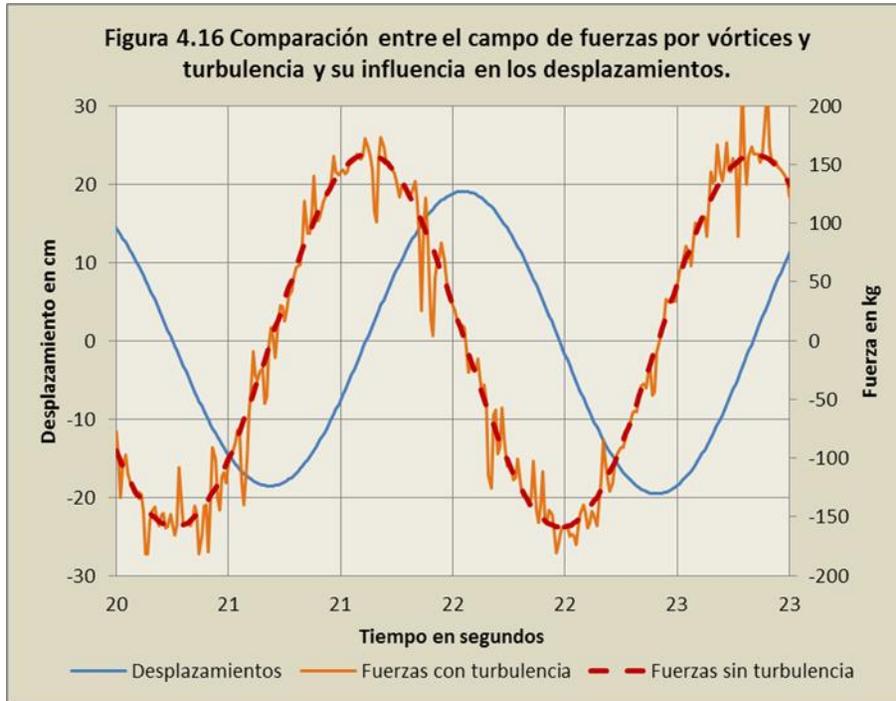
³⁸ Vickery, B.J., Basu, R.I.; Across-Wind Vibrations of Structures of Circular Cross-Section. Part I. Development of a Mathematical Model for Two-Dimensional Conditions; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 12, 75-97 Elsevier Science Publishers; Amsterdam Netherlands; 1983; p. 53

³⁹ Holmes John D.; "Wind Loading of Structures"; Taylor and Francis; 2001, p. 54

⁴⁰ Dyrbye C.; Hansen S. O., "Wind Loads on Structures", Wiley and Sons; 1997; p. 39

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

Lo anterior explica que la turbulencia coadyuve a disminuir la amplitud máxima de los desplazamientos. ⁽⁴¹⁾



Por el contrario, si el viento se encuentra estratificado y con turbulencia mínima o nula, no existen los efectos de turbulencia de gran escala, por lo que la estructura tiene tiempo para desarrollar grandes desplazamientos, que a su vez conducirán a estados de esfuerzos inaceptables.

Se reconoce que es necesaria más investigación para determinar con precisión el papel que desempeña la turbulencia en la respuesta. ⁽⁴²⁾

⁴¹Vickery, B.J., Basu, R.I.; Across-Wind Vibrations of Structures of Circular Cross-Section. Part I. Development of a Mathematical Model for Two-Dimensional Conditions; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 12, 75-97 Elsevier Science Publishers; Amsterdam Netherlands; 1983; pp. 52 y 57

⁴² Hansen, S. O.; Vortex - induced vibrations of structures; Structural Engineers World Congress; Bangalore, India; 2007, p. 9

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

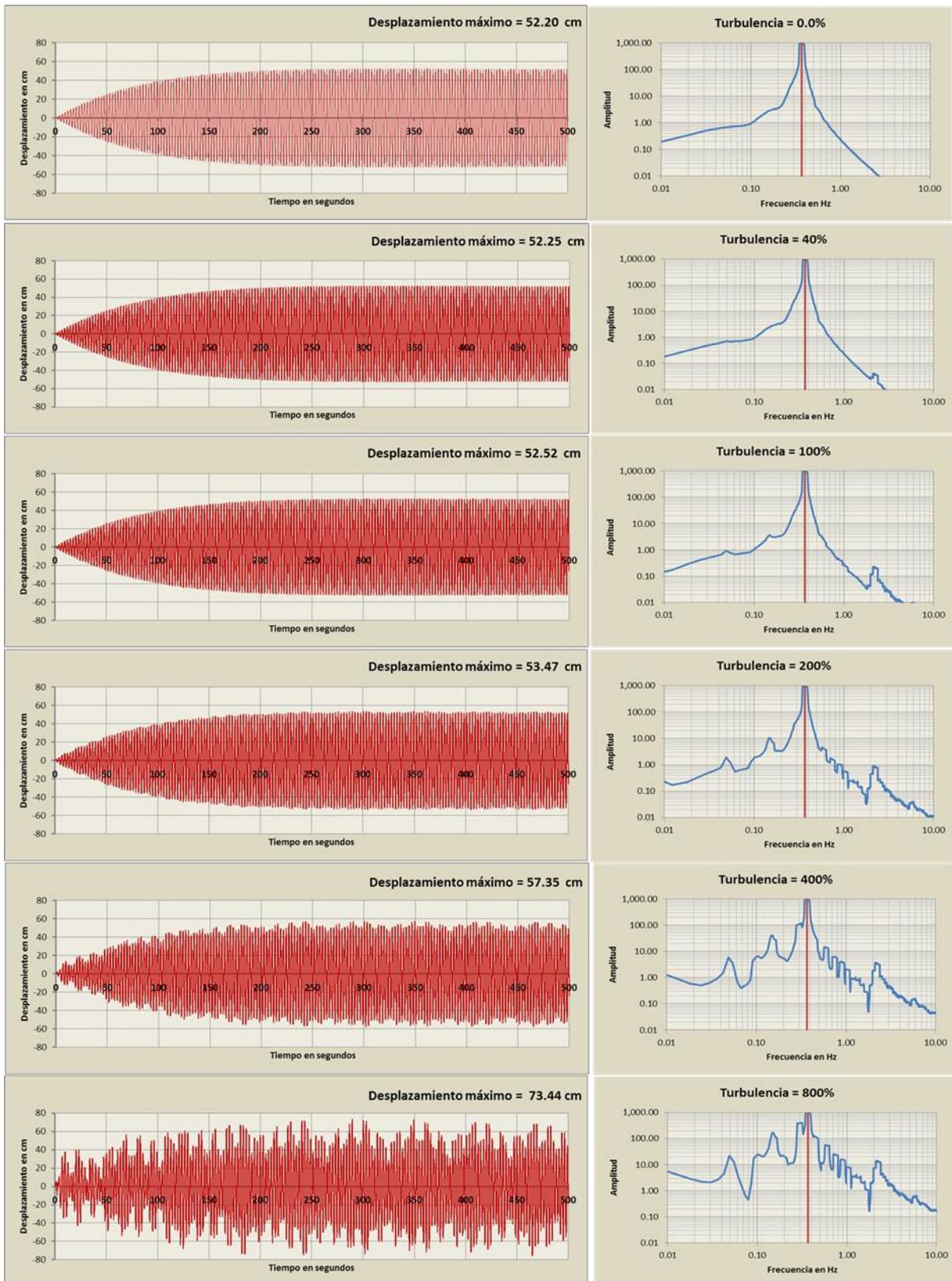


Figura 4.17 Odense: Desplazamientos y espectros de Fourier para distintos valores de la turbulencia, ante la acción del viento con velocidad crítica

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

4.4 Efecto del amortiguamiento.

Se define el amortiguamiento como una fuerza que se opone al movimiento y que es función de la velocidad del desplazamiento.

La fuerza total (F) que induce el movimiento transversal al viento en una estructura se puede en general clasificar en los siguientes rubros:

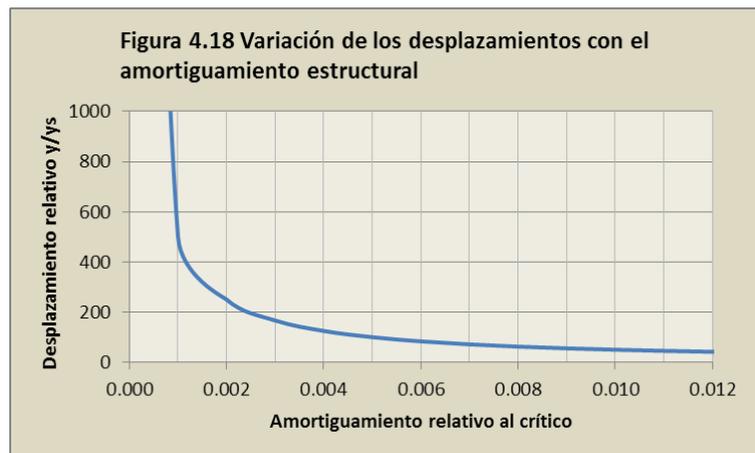
- Fuerzas causadas por la turbulencia lateral. (F_t)
- Fuerzas ocasionadas por el desprendimiento de vórtices. (F_v)
- Fuerzas aeroelásticas como resultado de la interacción viento-estructura, que dependen del movimiento de la estructura. (F_m)

$$F = F_t + F_v + F_m \quad (4.5)$$

En la mayoría de las ocasiones, las fuerzas transversales derivadas de la turbulencia son de poca importancia en comparación con las resultantes por el desprendimiento de vórtices.

Por el contrario, las condiciones de flujo laminar con mínima (o nula) turbulencia aumentan la propensión de una estructura a experimentar vibraciones violentas.

Las fuerzas causadas por el desprendimiento de vórtices han sido comentadas en el Capítulo 3, donde se mostró que la magnitud de los desplazamientos depende del amortiguamiento, y que es proporcional a la cantidad $1/(2*\xi)$, tal como se infiere de la expresión (3.27), y se ilustra en la Figura 4.18



El parámetro más importante que limita los desplazamientos de una chimenea metálica es el amortiguamiento.

Por naturaleza, el acero, y aún más si es soldado, presenta amortiguamientos muy bajos en relación a otros materiales usuales en la construcción de chimeneas, por ejemplo el concreto.

Los sistemas más económicos para reducir los desplazamientos de una chimenea consisten en la instalación de dispositivos que incrementen el amortiguamiento.

Se sabe también, que el amortiguamiento estructural, de naturaleza viscosa, es mayor a medida que aumentan los desplazamientos de la estructura. Este efecto, no ha sido considerado en los modelos analizados.

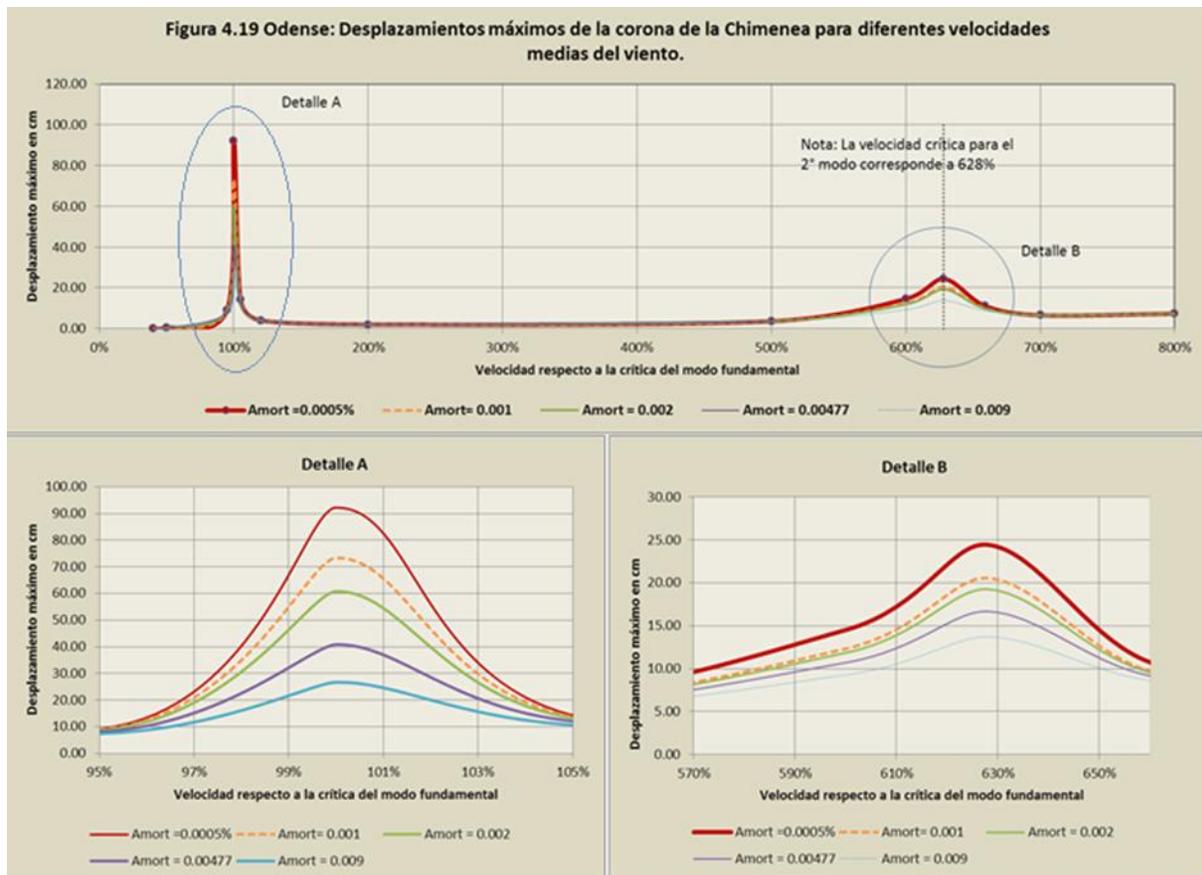
En la Figura 4.19 se muestra el efecto del amortiguamiento en los desplazamientos transversales causados por diferentes velocidades del viento. La turbulencia se consideró igual a 40%.

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

Los ejemplos mostrados, han sido modelados con el valor del amortiguamiento estructural. Diversos investigadores y la evidencia experimental demuestran la existencia de una fuerza que depende de la propia velocidad del desplazamiento, y que es inducida por el movimiento de la estructura en interacción con el viento.

Las fuerzas causadas por el desprendimiento de vórtices o la turbulencia lateral, se presentan sin importar si la estructura es infinitamente rígida o si tiene libertad para desplazarse.

Las fuerzas dependientes del movimiento, requieren, por el contrario, que la estructura vibre. En las palabras de Hansen,⁽⁴³⁾ “...Las vibraciones cambian el ancho efectivo de la estructura que ve el viento...”



En la referencia mencionada, la fuerza causada por el movimiento, (fuerza aerodinámica) se expresa como:

$$F_m = -h_a * \ddot{y} - c_a * \dot{y} \quad (4.6)$$

En donde h_a se considera como la masa adherida y representa la masa de fluido que debe ser desplazada por la chimenea al oscilar por efecto del viento. Hansen considera que esta

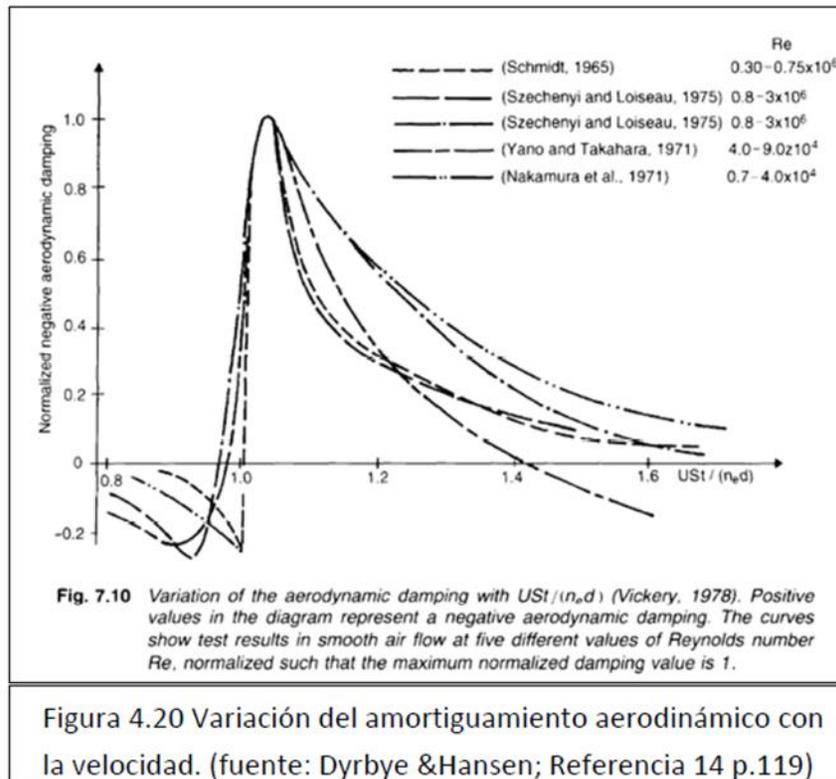
⁴³ Dyrbye C.; Hansen S. O., “Wind Loads on Structures”, Wiley and Sons; 1997; p.111

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

fuerza es pequeña para estructuras en el aire, y por lo tanto puede ser ignorada. (Referencia 12, p. 118)

El término $c_a * \dot{x}_{def}$ incorpora la fuerza debida al amortiguamiento aerodinámico, y puede adquirir valores negativos, sobre todo para la velocidad crítica. Ocurre entonces una condición en donde el amortiguamiento estructural es disminuido o incluso anulado por el amortiguamiento aerodinámico, lo que aumenta la magnitud de los desplazamientos.

Para vibraciones cuya amplitud es hasta del orden de 10 - 20% del diámetro de la estructura, la fuerza de amortiguamiento conserva una dependencia lineal del coeficiente c_a ⁽⁴⁴⁾



Por su parte, Vickery⁽⁴⁵⁾ considera que la fuerza aerodinámica se puede expresar como: (se conserva la notación original)

$$w(t) = h_a * y + k_a * \dot{y} \quad (4.7)$$

En este modelo, $w(t)$ es la fuerza aerodinámica, el término h_a representa un parámetro que modifica la rigidez de la estructura; y depende del desplazamiento, no de la aceleración.

⁴⁴ Dyrbye C.; Hansen S. O., "Wind Loads on Structures", Wiley and Sons; 1997; p. 118

⁴⁵ Vickery, B.J., Basu, R.I.; Across-Wind Vibrations of Structures of Circular Cross-Section. Part I. Development of a Mathematical Model for Two-Dimensional Conditions; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 12, 75-97 Elsevier Science Publishers; Amsterdam Netherlands; 1983; p. 55

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

En los términos de Vickery: "...el valor de la fuerza de rigidez de origen aerodinámico, es despreciable en comparación con la rigidez mecánica proveniente de la elasticidad de la estructura....".

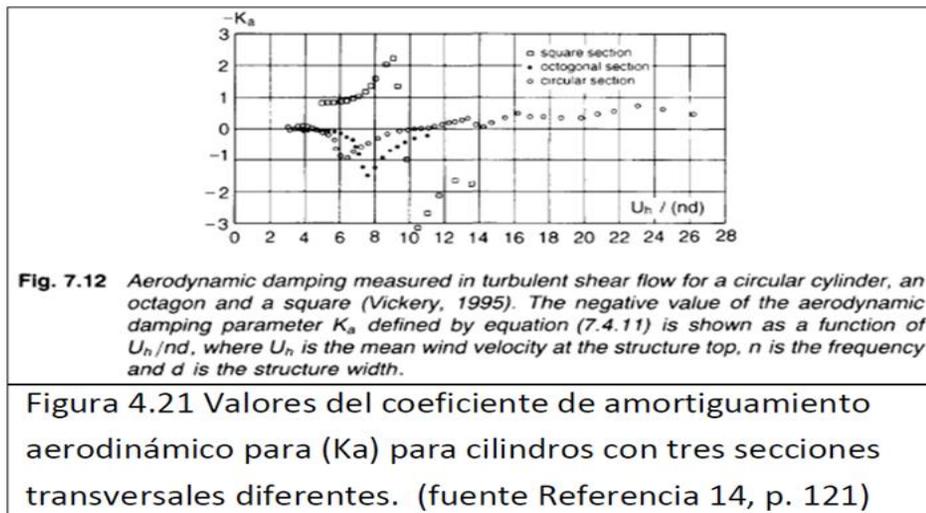
Ambos autores coinciden en considerar sólo la fuerza de amortiguamiento aerodinámico para el análisis, mediante una expresión del tipo:

$$w(t) = K_a * (\dot{y} - G * \dot{y}^3) \quad (4.8)$$

En donde K_a es un coeficiente de amortiguamiento aerodinámico, G es una constante y el término no lineal asegura que la respuesta sea auto-limitante.

El mismo investigador, con base en una compilación de resultados obtenidos por diversos autores, muestra que el amortiguamiento aerodinámico máximo ocurre si la velocidad es crítica. (Figura 4.20)

Asimismo, y con base en resultados experimentales, presenta los valores del coeficiente de amortiguamiento aerodinámico K_a : (Figura 4.21)



Los amortiguamientos de masa y aerodinámico, quedan definidos por las expresiones:^{(46),(47)}

$$K_s = \frac{m_e * \xi_s}{\rho * D^2} \quad (4.8)$$

$$K_a = - \frac{m_e * \xi_a}{\rho * D^2} \quad (4.9)$$

En donde ξ_s y ξ_a son los amortiguamientos estructural y aerodinámico expresados como fracción del amortiguamiento crítico.

El amortiguamiento de masa, al expresarse en función del decremento logarítmico, es conocido como el Número de Scruton, S_c :

⁴⁶Vickery, B.J., Basu, R.I.; Across-Wind Vibrations of Structures of Circular Cross-Section. Part I. Development of a Mathematical Model for Two-Dimensional Conditions; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 12, 75-97 Elsevier Science Publishers; Amsterdam Netherlands; 1983; pp. 54 y 64

⁴⁷Dyrbye C.; Hansen S. O., "Wind Loads on Structures", Wiley and Sons; 1997; p. 118

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

$$S_c = \frac{2 * \delta * m_e}{\rho * D^2} \quad (4.10)$$

Al tomar en cuenta los valores del amortiguamiento de la Figura 4.21, se deduce que en secciones circulares y para velocidades cercanas a la de resonancia, es posible que se anule el amortiguamiento total, (por el efecto aeroelástico) expresado como la suma de los amortiguamientos estructural y aerodinámico. ($\xi_{total} = \xi_s + \xi_a = 0$)

En secciones con aristas, la Figura 4.21 sugiere que el amortiguamiento total alcance valores negativos, por lo que los desplazamientos de la estructura, causan fuerzas adicionales, que a su vez conducen a desplazamientos mayores y menos predecibles. Para tales secciones, deberá tomarse en cuenta que el efecto del viento cambia con el ángulo de ataque.

Al considerar que la anulación del amortiguamiento total como resultado del efecto aeroelástico en una chimenea circular se produce para la condición de velocidad crítica, (Figura 4.21), y al recordar que en una estructura con amortiguamiento nulo los desplazamientos crecen indefinidamente con independencia de la magnitud de la fuerza, siempre que esta se aplique con la frecuencia fundamental, es posible concluir que:

Si las propiedades de la estructura son tales que la velocidad crítica es tan baja como para presentarse con frecuencia, y las condiciones locales son adecuadas para que la turbulencia del viento sea mínima, entonces es de esperarse que se presente la condición de resonancia, y el subsecuente bloqueo aeroelástico, que llevarán a la estructura a desplazamientos y esfuerzos mayores a su resistencia.

El amortiguamiento estructural ha sido considerado como constante, en favor de una simplificación del análisis, ya que se reconoce su carácter no lineal.

Asimismo, se ha logrado identificar la dependencia del amortiguamiento respecto a la condición modal.

Kareem ⁽⁴⁸⁾ proporciona una expresión para calcular el amortiguamiento relativo en función del modo:

$$\frac{\xi_n}{\xi_1} = 1 + C * \left(\frac{f_n}{f_1} - 1\right) \quad (4.11)$$

En donde el subíndice indica el número de modo, ξ el amortiguamiento como fracción del crítica f la frecuencia, y $C \approx 0.38$.

4.5 Coeficiente de Fuerza Lateral.

En la expresión (4.38.c) aparece también el factor C_{ML} , que fue definido e interpretado como la amplitud máxima del coeficiente de fuerza lateral, esta última de carácter senoidal, resultante de la acción de los vórtices, de acuerdo a:

$$C_{ML} = \frac{\text{Amplitud máxima de la fuerza lateral debida al desprendimiento de vórtices}}{\frac{1}{2} * \rho * U^2 * A}$$

⁴⁸ Kijewsky T., Kareem A.; Estimation and Modeling of Damping and Engineering Auxiliary Damping Systems in Civil Engineering Structures: An Overview; NatHaz Modeling Laboratory; University of Notre Dame.

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

Aunque existen numerosas investigaciones al respecto, se puede considerar que el valor de C_{ML} aún presenta incertidumbres, para números de Reynolds altos, en el intervalo correspondiente al régimen crítico, es decir, aquel en el que se presenta la velocidad crítica para estructuras esbeltas, (ver Figura 4.1) lo que corresponde en general a condiciones de resonancia.

Ruscheweyh ⁽⁴⁹⁾ (1990) establece el valor del coeficiente de fuerza lateral C_{lat} , como función del número de Reynolds, tal y como se muestra en la Figura 4.22.

En contraste, Hirata et al ⁽⁵⁰⁾, mediante simulación numérica, determina la amplitud del coeficiente de fuerza lateral $\overline{A_{CL}}$ como una función de la amplitud del desplazamiento relativo $A = y/D$, y de la frecuencia del cilindro.

En la Figura 4.23 se muestran los valores de $\overline{A_{CL}}$ que se encuentran en la Referencia 21 para $Re=10^5$, frecuencia $f=0.23$ Hz, como función de la amplitud relativa.

No existe acuerdo entre los valores informados por ambos autores.

Robinson y Hamilton ⁽⁵¹⁾ presentan los criterios establecidos por la ESDU ⁽⁵²⁾, de acuerdo a las siguientes expresiones y definiciones:

La amplitud de la fuerza que impulsa la resonancia (excitation force) por unidad de longitud está dada por:

$$F = \frac{1}{2} * p_a * Cl_j * D * V_{crit}^2 \quad (4.50)$$

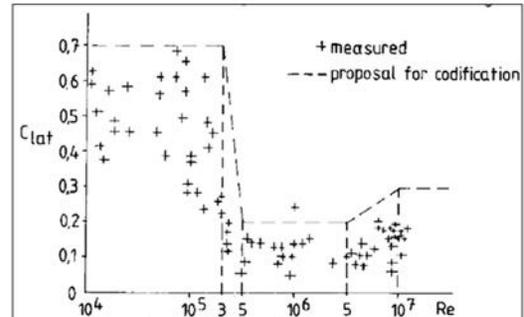


Fig. 4: Exciting force coefficient c_{lat} for a circular cylinder versus Reynoldsnumber Re

Figura 4.22 Coeficiente de fuerza lateral (C_{lat}) en cilindros circulares como función del Número de Reynolds. (fuente Referencia 20, p.213)

Table 4. Results for high frequency of oscillations.

Angular Frequency (ω)	Amplitude (A)	$\overline{C_L}$	$\overline{C_D}$	St	St_v	$\overline{A_{CL}}$
1,5	0,01	0,018	1,278	0,203	0,239	1,177
	0,05	-0,009	1,095	0,240	0,239	1,094
	0,1	0,054	0,886	0,240	0,239	1,211
	0,15	0,023	0,631	0,240	0,239	1,234
	0,2	0,008	0,347	0,239	0,239	1,467
	0,3	0,044	0,172	0,238	0,239	1,805
	0,5	0,102	-0,14	0,239	0,239	2,231

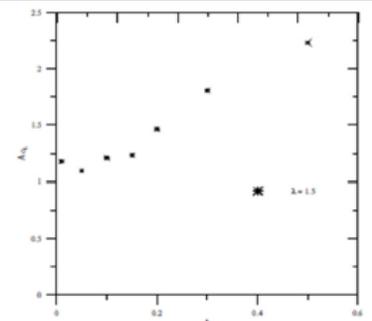


Figure 10. Lift coefficient amplitude for high frequency.

Figura 4.23 Coeficientes de arrastre y de sustentación en función del desplazamiento relativo y la frecuencia del cilindro.

(Fuente: Hirata et al, Referencia 21)

⁴⁹ Ruscheweyh, H.; "Practical Experiences with Wind -Induced Vibrations"; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 33 (1990), 211-218.

⁵⁰ Hirata, M. et al; "High Reynolds Oscillations of a Circular Cylinder"; J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. and Eng.; October-December 2008; Vol. XXX, No. 4 – 304-312.

⁵¹ Robinson, R.W., Hamilton, J.; A Criterion for Assessing Wind Induced Crossflow Vortex Vibrations in Wind Sensitive Structures; Brown & Root Limited; London. pp.

⁵² Engineering Sciences Data Unit (ESDU); Data Item Numbers: (Circular Cylindrical Structures, Dynamic Response to Vortex Shedding), 85038 pt 1, Calculation Procedures and Derivation, 85039 pt 2, Simplified Calculation Procedures, 85040 pt 3, Computer Programs.

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

En donde Cl_j es el factor de fuerza lateral media y se integra por diversos coeficientes para respuestas de banda angosta, se expresa como:

$$Cl_j = C_1 * C_2 * C_3 * C_4 * C_5 * C_6 * S_t^2 \quad (4.11)$$

Dichos factores se calculan con la Figura 4.24, y se definen como:

- C_1 indica la variación de la fuerza de sustentación para un cilindro estacionario como función del Número de Reynolds para la velocidad crítica, i.e. $N_s * D^2 / v * S_t$ (N_s = frecuencia fundamental)
- C_2 representa los efectos de la rugosidad del cilindro en la fuerza lateral, definida la primera como: ϵ/D , y ϵ es la dimensión media de las rugosidades de la superficie del cilindro.
- C_3 define el efecto de la forma modal en la fuerza lateral, en función del número de modo. (N)
- C_4 se deriva de los efectos de punta y la longitud de correlación (spanwise coherences) de la fuerza lateral, en función de la relación de aspecto H/D , y depende del Número de Reynolds para la velocidad crítica.
- C_5 corresponde al efecto de la intensidad de la turbulencia I_u en la fuerza lateral.
- C_6 es un factor de corrección para ajustar el coeficiente de sustentación en función de la amplitud del desplazamiento, en la condición de bloqueo aeroelástico.

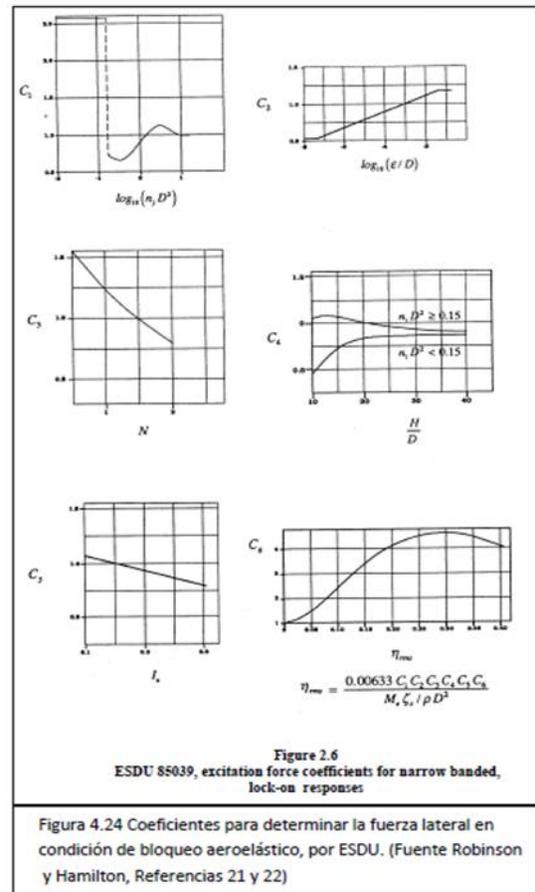
Cuando la amplitud de la repuesta no exceda el 2% del diámetro, entonces la respuesta deberá ser tratada como de banda ancha, para lo cual se proporcionan una serie de coeficientes R_n con el mismo significado que los factores C_n para banda angosta, con excepción del efecto de bloqueo aeroelástico, ya que en tal caso la fuerza no depende de la amplitud del desplazamiento, por ser este de poca magnitud; la expresión correspondiente es:

$$Cl_j = R_1 * R_2 * R_3 * R_4 * R_5 * S_t^2 \quad (4.12)$$

Los coeficientes R_n se determinan de igual manera, si bien no se incluyen en este trabajo las gráficas respectivas, estas se presentan en la Figura 2.7 de la Referencia 21.

4.6 Bloqueo aeroelástico.

A lo largo del presente trabajo se ha mostrado como responden las estructuras esbeltas, y en particular las chimeneas, a una fuerza periódica aunada a la fuerza de la turbulencia.



4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

Ante una acción externa cualquiera la estructura abandona su posición de reposo y si la acción cesa en forma súbita, regresa a su posición original vibrando con sus frecuencias naturales. Si la acción permanece y es periódica, se establece una pugna entre la fuerza externa que intenta adaptar los movimientos de la estructura a su propia frecuencia, la de la acción externa, y la chimenea, que trata de encontrar su equilibrio, en sus propias frecuencias.

Para esto último, es decir para vibrar en sus propias frecuencias, la estructura cuenta con su masa, amortiguamiento viscoso interno o externo y rigidez elástica. El resultado final es una superposición de los movimientos derivados de todas y cada una de las fuerzas activas o reactivas que obran sobre la estructura, con la dominancia aparente de aquellas con mayor valor relativo. Lo anterior se aprecia con claridad al calcular la respuesta en el dominio de la frecuencia, a través de los espectros de Fourier.

4.6.1. El bloqueo aeroelástico estudiado a través de espectros de Fourier.

En las siguientes figuras, (Figura 4.25-a y b) se muestran 16 espectros de Fourier calculados⁽⁵³⁾ a partir de los desplazamientos de la corona de una chimenea a la cual se le han aplicado fuerzas simuladas por desprendimiento de vórtices.

Las series de tiempo de las fuerzas se obtuvieron mediante simulación de las velocidades del viento⁽⁵⁴⁾, a las cuales se les incluyó turbulencia con valor $I_x = 0.4$, y turbulencia lateral $I_y = 0.88 * I_x$.

Las series fueron calculadas para diferentes velocidades medias del viento, desde $U = 0.40 * U_{cr}$ hasta $U = 8.00 * U_{cr}$. (desde $U \approx 1.8$ hasta $U \approx 35$ m/s) En donde U_{cr} es la velocidad crítica. ($U_{cr} = 4.41$ m/s, $f_1 = 0.37$ Hz)

El intervalo seleccionado permite evaluar los efectos por velocidades de viento menores, iguales y mayores que las de resonancia para el primer y segundo modos.

Los desplazamientos fueron calculados mediante modelado en SAP2000 V.14, incluyendo exclusivamente el amortiguamiento estructural.

En los espectros que se muestran se identifican las frecuencias de los modos con líneas en rojo y verde, y la frecuencia de vórtices para la velocidad analizada se ha señalado con una flecha roja.

La velocidad crítica para el 2° modo corresponde a 628% de la velocidad crítica para el primer modo.

Se nota que:

- Para velocidades de viento menores a U_{cr} del primer modo, las amplitudes espectrales asociadas a la frecuencia de vórtices son mayores que la asociada a la frecuencia del primer modo.

⁵³ Ordaz M., Montoya D. C. “DEGTRA” (programa para análisis de señales). Instituto de Ingeniería, UNAM

⁵⁴ Ver Apéndice D “Simulación de series de velocidad del viento vs tiempo, método de Montecarlo”

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

- Para $U=40\%$ la amplitud máxima del espectro es del orden de 10^1 y corresponde a la frecuencia de los vórtices, f_v , mientras que la amplitud asociada a la frecuencia fundamental es del orden de 10^0 .
- Al acercarse la velocidad del viento a la crítica del primer modo las amplitudes espectrales aumentan, y al igualarla, la amplitud es máxima, del orden de 10^3 .
- Al continuar el aumento en la velocidad del viento, ya en el intervalo comprendido entre las frecuencias del primer y segundo modo, las amplitudes disminuyen hasta alcanzar el orden de $2 \cdot 10^1$, asociadas ahora a la frecuencia fundamental, para aumentar de nuevo a medida que la frecuencia de vórtices se acerca e iguala a la frecuencia del 2º modo.
- Al alcanzarse $f_v = f_2$ las amplitudes llegan a un nuevo valor máximo del orden de 10^2 , y disminuyen al continuar el aumento de velocidades del viento y la consecuente frecuencia de desprendimiento de vórtices.
- En la medida que la velocidad del viento es diferente de las respectivas velocidades críticas del primer y 2º modos, las amplitudes espectrales en general, son menores a las asociadas a las frecuencias modales. Si la frecuencia de vórtices es diferente a las modales, aumenta la importancia relativa de las amplitudes asociadas a la gama de componentes frecuenciales de la turbulencia.
- La amplitud correspondiente a la velocidad crítica del primer modo, es diez veces mayor que las amplitudes para velocidades 10% inferior o superior, lo que ilustra el efecto del Factor de Amplificación Dinámica, ya mencionado en la expresión (3.8):

$$R_d = \frac{x_{max}}{x_{st}} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{f}{f_n})^2]^2 + [2 \cdot \xi \cdot \frac{f}{f_n}]^2}} \quad (3.8)$$

4.6.2. Efecto del cambio de fase en la respuesta si en la estructura actúa una fuerza armónica.

La dinámica estructural nos muestra que el ángulo de fase de la respuesta es variable, y que está determinado por la expresión (3.9):

$$\emptyset = \tan^{-1} \frac{2 \cdot \xi \cdot \frac{f}{f_n}}{1 - (\frac{f}{f_n})^2} \quad (3.9)$$

La variación del ángulo de fase, (dependiente del amortiguamiento y de la relación de frecuencias de la acción externa y la propia de la estructura) se muestra en la Figura 4.26⁽⁵⁵⁾, y con objeto de analizar su impacto sobre las frecuencias determinadas por la relación de Strouhal se realizó el modelado para diferentes velocidades.

Los resultados se concentran en la Figura 4.27, en donde se muestra el efecto de bloqueo aeroelástico, ya que la relación de frecuencias se mantiene constante, sin que la frecuencia de la respuesta siga a la frecuencia de los vórtices que dicta la relación de Strouhal.

⁵⁵ Chopra A. K.; "Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering"; Third Edition, Pearson, Prentice Hall, 2007. (pp. 76-79)

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

En resumen, el bloqueo aeroelástico es un fenómeno que se presenta si el amortiguamiento estructural es suficientemente pequeño y la velocidad del viento coincide con la velocidad crítica. Tiene como consecuencia un incremento notable en los desplazamientos, así como la sincronización de frecuencias, puede dar origen a una reducción del amortiguamiento total, y por lo tanto incrementar aún más los desplazamientos.

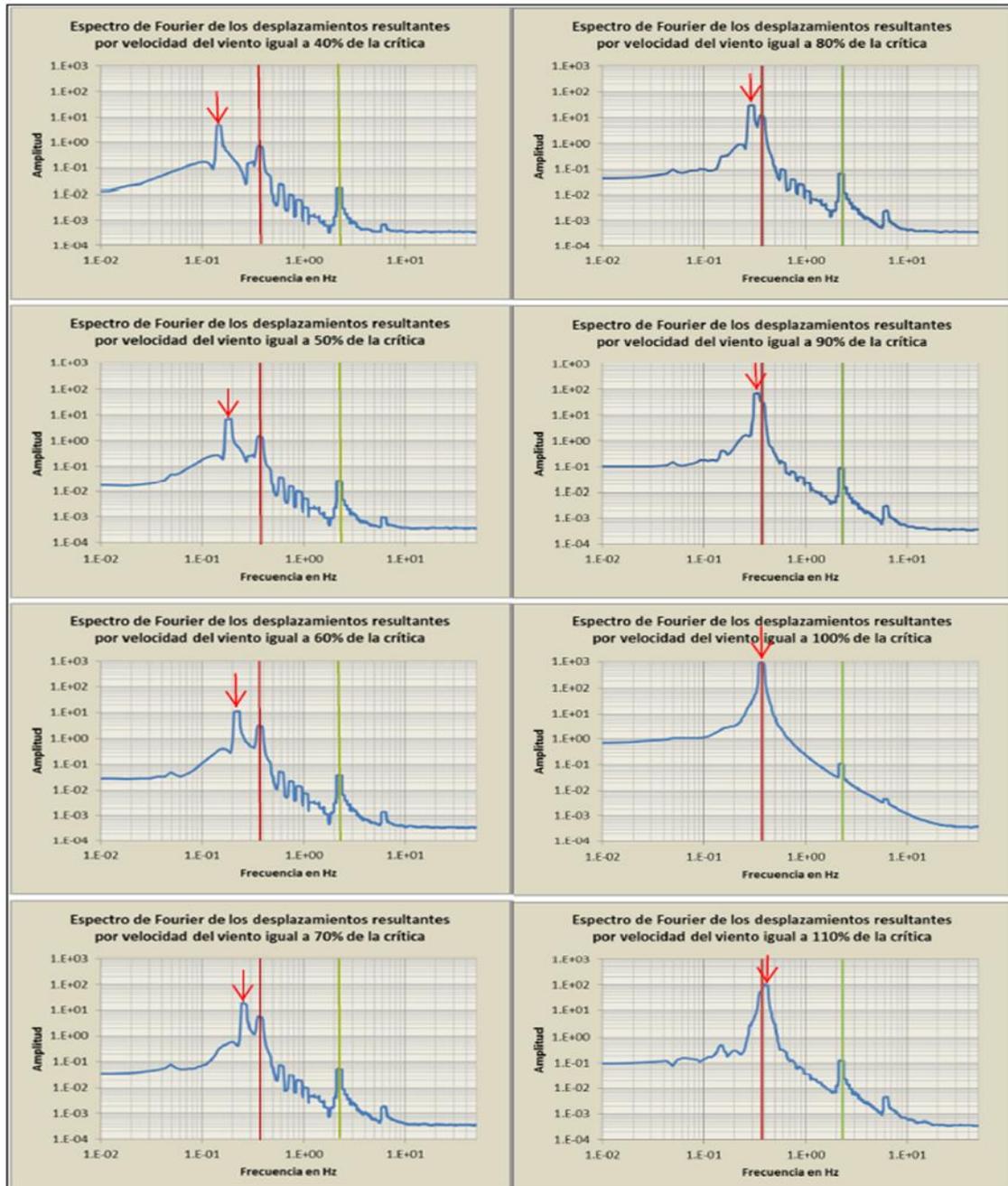


Figura 4.25-a Respuesta de la estructura analizada a través de las amplitudes del espectro de Fourier, considerando diversas velocidades del viento.

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

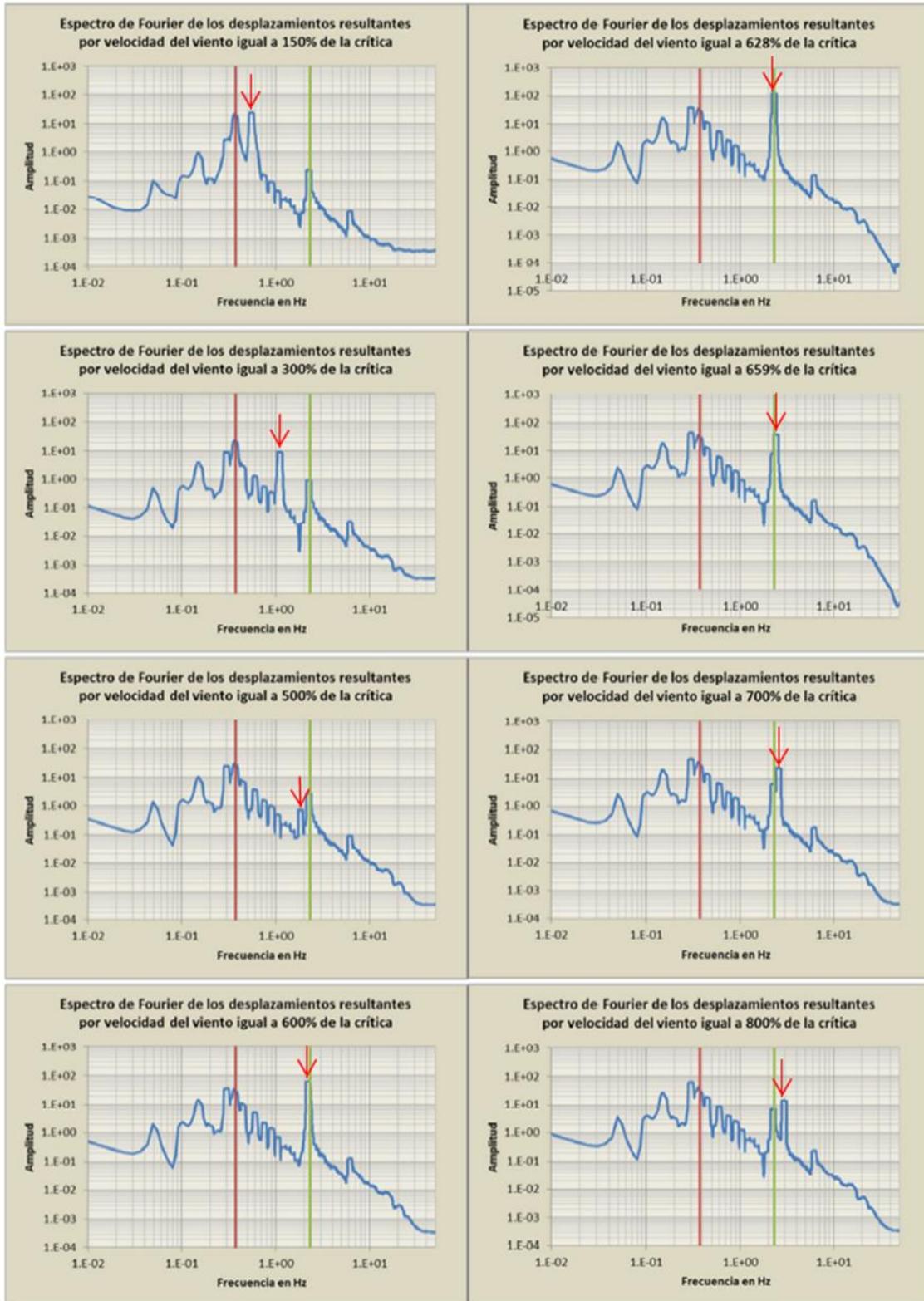


Figura 4.25-b Respuesta de la estructura analizada a través de las amplitudes del espectro de Fourier, considerando diversas velocidades del viento.

4.- Principales parámetros que controlan la respuesta transversal al viento.

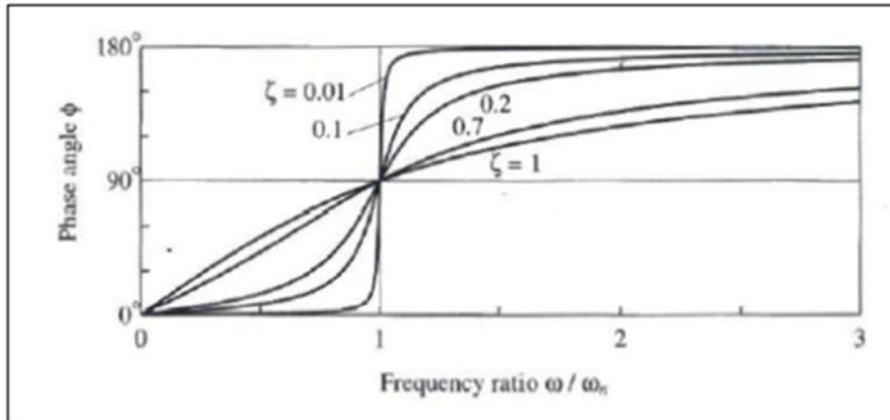
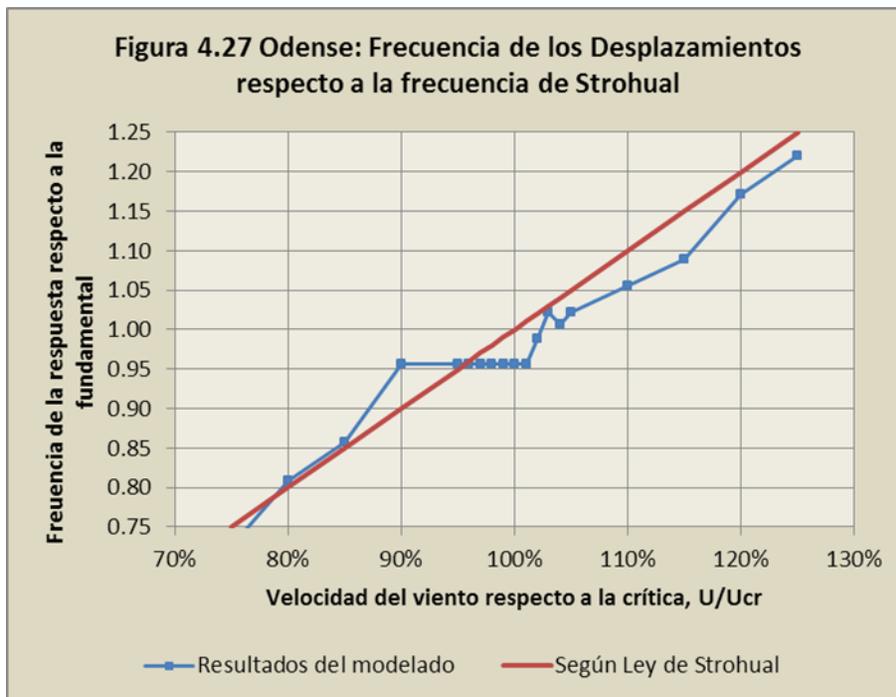


Figura 4.26 Variación del ángulo de fase de la respuesta de un sistema amortiguado, sujeto a una fuerza armónica (Fuente Referencia 25)



5.- Análisis de la respuesta transversal de Chimeneas existentes.

Con el fin de verificar la conveniencia de modelar la respuesta transversal mediante programas comerciales, se realiza el análisis de dos Chimeneas ya contempladas en la literatura ⁽⁵⁶⁾, ⁽⁵⁷⁾, y se comparan los resultados con los valores medidos y observados en las mismas.

De acuerdo a la información disponible,⁽⁵⁸⁾ los desplazamientos medidos en Thyborøn no excedieron a los calculados conforme al Eurocódigo. Estas mediciones fueron realizadas poco después de construida, a fines de los 70'.

Sin embargo, en ambas Chimeneas, en el invierno 1995-1996, se presentaron vibraciones de grandes e inaceptables amplitudes, sin que en los casi 20 años transcurridos desde su construcción se hubiera sabido circunstancias anormales.

Las amplitudes mayores ocurrieron en periodos con temperaturas comprendidas entre -5° y -10 °C, ocurrieron en la mañana y al anochecer, lo que significa que el viento se caracterizaba por muy bajos niveles de turbulencia, debido a una estratificación estable de la atmósfera. Las bajas temperaturas contribuyeron también al incrementar la densidad del aire.

En la Chimenea de Thyborøn las vibraciones causaron una fisura de 1 m de longitud en la boca de la misma.

La información anterior permite suponer que se dieron las condiciones adecuadas para que se presentara el bloqueo aeroelástico, y además el amortiguamiento aerodinámico debió alcanzar valores iguales al estructural, por lo que los desplazamientos alcanzaron grandes magnitudes, y cesaron al cambiar las propiedades dinámicas de la estructura como consecuencia del daño estructural.

Para que se desarrolle un proceso de resonancia es necesario que la velocidad del viento se mantenga constante e igual a la velocidad crítica, y por lo tanto la turbulencia debe ser muy baja, ya que interfiere con el proceso de incremento en la amplitud de las vibraciones, puesto que la turbulencia de gran escala correspondiente a bajas frecuencias es interpretada por la estructura como variaciones armónicas y graduales de la velocidad media ⁽⁵⁹⁾, lo que a su vez altera la frecuencia del desprendimiento de vórtices.

Para ilustrar lo anterior la Figura 5.1 presenta la respuesta de una Chimenea sin amortiguamiento, para dos velocidades, $V_1 = V_{cr}$ y $V_2 = 0.99*V_{cr}$.

En la Chimenea con viento en velocidad crítica, por el efecto de resonancia los desplazamientos crecen indefinidamente. En la Chimenea con velocidad de viento $V=0.99*V_{cr}$, el desprendimiento de vórtices con frecuencia diferente a la fundamental

⁵⁶ Dyrbye C.; Hansen S. O., "Wind Loads on Structures", Wiley and Sons; 1997; p.134

⁵⁷ Hansen, S. O.; Vortex Induced Vibrations of Line-Like Structures; CICIND's 50th meeting; Oxford, 1998; p.21

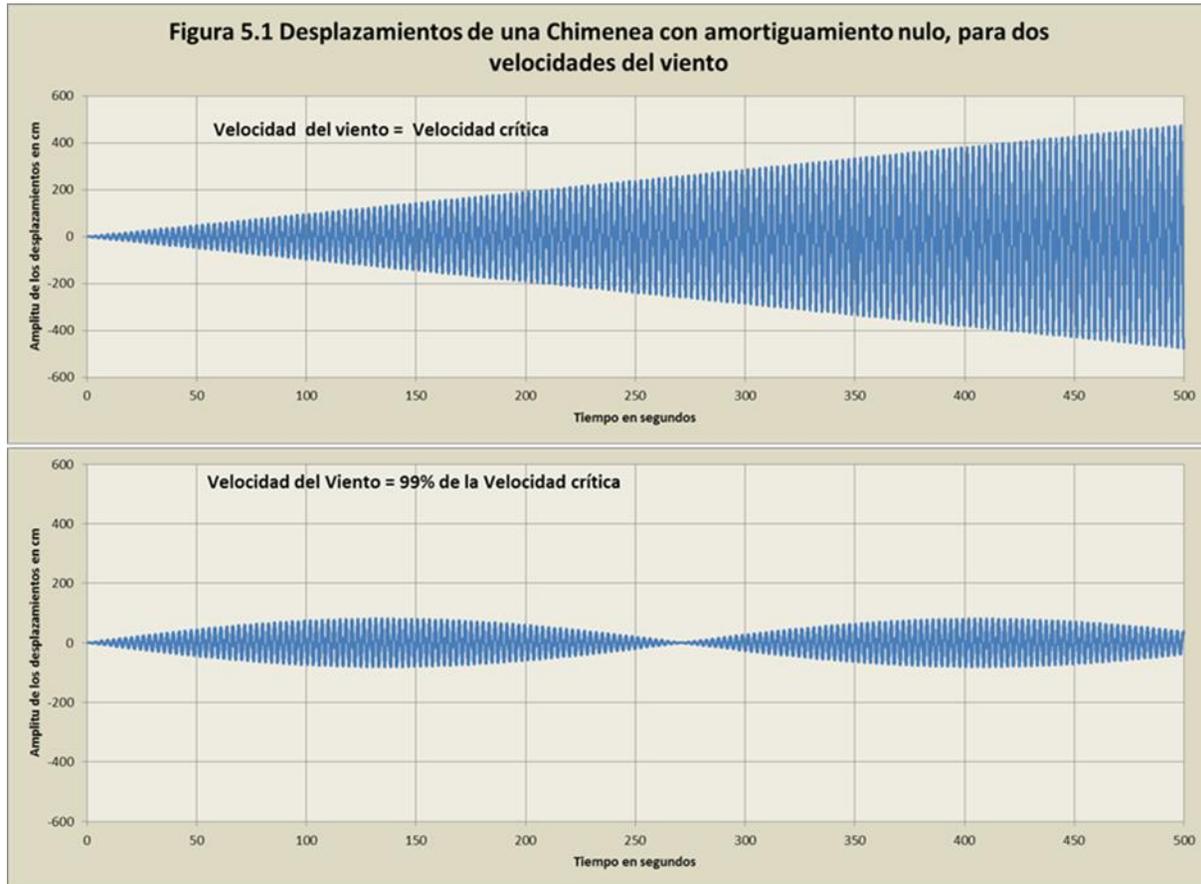
⁵⁸ Las características y desplazamientos observados/medidos de las Chimeneas analizadas (Odense y Thyborøn) ya fueron presentadas en la Tabla 4.2.

⁵⁹ Dyrbye C.; Hansen S. O., "Wind Loads on Structures", Wiley and Sons; 1997; p.114

5.- Análisis de la respuesta transversal de Chimeneas existentes.

ocasiona que en forma periódica los desplazamientos oscilen entre un máximo y un mínimo.

El ejemplo anterior ilustra el efecto de amortiguamiento nulo, condición que puede ocurrir si los desplazamientos son suficientemente amplios para generar el efecto aeroelástico, al aumentar el amortiguamiento aerodinámico en su fase negativa, y llegar así a anular el amortiguamiento estructural.



Si el amortiguamiento es nulo y la velocidad es crítica y constante, la respuesta se manifestaría con un permanente incremento de los desplazamientos, tal y como se muestra en la parte superior de la figura.

En contraparte, un efecto de la turbulencia de gran escala sería el de convertir la velocidad crítica en velocidades próximas pero no iguales a la crítica, lo que a su vez, generaría una respuesta de la estructura en forma cíclica y con límites al desplazamiento, como se muestra en la parte inferior de la propia Figura 5.1.

Asimismo, los ciclos de máximos y mínimos ⁽⁶⁰⁾ que se presentan para $U = 0.99 \cdot U_{cr}$, tienen una duración de aproximadamente 4.5 minutos ⁽⁶¹⁾, durante los cuales debe mantenerse

⁶⁰ En algunos documentos en idioma inglés se les denomina beats

⁶¹ Esta duración es variable, y depende de las propiedades dinámicas de cada estructura, principalmente del amortiguamiento.

constante la velocidad del viento a fin de conformar la respuesta como se muestra en la figura.

Las consideraciones anteriores resaltan lo complejo del fenómeno de bloqueo aeroelástico al actuar conjuntamente con un amortiguamiento aerodinámico negativo del orden del estructural, así como la diversidad de factores que deben concurrir para que se presente.

Las chimeneas seleccionadas fueron analizadas por cuatro diferentes métodos, el método simplificado de Vickery, contenido en el Código Canadiense, el método espectral contenido en el Eurocódigo ⁽⁶²⁾, la simulación mediante programas comerciales, y el método basado en la respuesta resonante.

5.1. Método Simplificado de Vickery, Código Canadiense

Consiste en calcular el valor de una carga uniforme equivalente, F_L , la cual, aplicada en el tercio superior de la chimenea permite obtener los desplazamientos y elementos mecánicos actuantes en la estructura.

Las expresiones y condiciones para aplicarlo son las siguientes:

- $St = 0.2$ si $Re > 2 * 10^5$ (5.1)

- $Re = 6 * V_H * 10^4$ (5.2)

- H es la altura de la Chimenea.

- V_H es la velocidad media del viento en el extremo superior e igual a la velocidad crítica en m/s.

$$F_L = \frac{C_1}{\sqrt{\lambda} * \sqrt{\beta - C_2 * \frac{\rho * D^2}{M}}} * q_H * D \quad (5.3)$$

- β es el amortiguamiento estructural relativo al crítico.

- λ es la relación de aspecto (h/D)

- q_H es la presión del viento correspondiente a la velocidad V_H

- $q_H = 0.6 * V_H^2$ en $\frac{N}{m^2}$

- M es la masa promedio por unidad de longitud en el tercio alto de la Chimenea. (en kg/m)

Los otros parámetros ya han sido definidos.

En la mayor parte de los casos:

$$C_1 = 3 \text{ para } \lambda > 16; \quad C_1 = \frac{3 * \sqrt{\lambda}}{4} \text{ para } \lambda < 16; \quad C_2 = 0.6$$

" Si $\beta < C_2 * \frac{\rho * D^2}{M}$ pueden resultar desplazamientos hasta de 1 diámetro"

⁶² Eurocode 1 EN 1991-1-4:2005, "Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions", European Standard EN 1991-1-4:2005.

5.- Análisis de la respuesta transversal de Chimeneas existentes.

“... Si V_H es baja, pueden existir gradientes de temperatura que ocasionen niveles de turbulencia muy bajos, y en tal caso se incrementan significativamente los movimientos inducidos por vórtices, en particular en estructuras muy esbeltas. Si V_H es menor que 10 m/s y λ es mayor que 12, entonces:...”

$$C_1=6 \quad \text{y} \quad C_2=1.2$$

Al aplicar los criterios anteriores en ambas Chimeneas, se encuentra que el amortiguamiento estructural es menor que el aerodinámico, es decir: $\beta < C_2 * \frac{\rho * D^2}{M}$, por lo que la conclusión, en los términos establecidos en el Código es que “... pueden resultar desplazamientos hasta de 1 diámetro...”.

Los términos dentro del radical mayor en la expresión (5.3) son los dos amortiguamientos, y su diferencia negativa deberá interpretarse como la anulación del amortiguamiento total, lo que en teoría debe conducir a desplazamientos crecientes en forma indefinida.

5.2. Método espectral, Eurocódigo

Este método se deriva de las propuestas de diversos investigadores, entre los que destacan Vickery, Basu, Dyrbye y Hansen.

Brevemente, el método consiste en emplear los valores estadísticos del viento para calcular la desviación estándar del desplazamiento, y a esta a su vez, aplicarle un factor de amplificación para tomar en cuenta su excedencia, factor que para pequeñas amplitudes del desplazamiento (1%-2%) es del orden de 3.5 a 4.0 y para grandes amplitudes es $\sqrt{2}$.

El desplazamiento se calcula mediante la expresión:

$$\frac{\sigma_{y,max}}{b} = \frac{1}{S_t^2} * \frac{C_c}{\sqrt{\frac{S_c - K_a * \left\{ 1 - \left\{ \frac{\sigma_{y,max}}{a_L * b} \right\}^2 \right\}}{4 * \pi * K_a}}} * \sqrt{\frac{\rho * b^2}{m_e}} * \sqrt{\frac{b}{h}} \quad (5.4)$$

La constante aerodinámica C_c depende de la forma de la sección transversal, y para secciones circulares también del Número de Reynolds.

a_L es un factor normalizado limitante de la amplitud, y los demás parámetros ya han sido definidos.

La ecuación (5.4) tiene la solución dada por la expresión:

$$\frac{\sigma_{y,max}}{b} = c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2} \quad (5.5)$$

En donde

$$c_1 = \frac{a_L^2}{2} * \left(1 - \frac{S_c}{4 * \pi * K_a} \right) \quad c_2 = \frac{a_L^2}{k_a} * \frac{\rho * b^2}{m_e} * \frac{C_c^2}{S_t^4} * \frac{b}{h} \quad (5.6)$$

El parámetro de amortiguamiento aerodinámico, K_a , es una función del número de Reynolds, y también se ve afectado por la turbulencia.

Al aplicar el método anterior se obtienen los siguientes desplazamientos para las chimeneas en estudio:

5.- Análisis de la respuesta transversal de Chimeneas existentes.

Desplazamiento máximo en Odense: $\sigma_{y,max od} = 102.1 \text{ cm}$

Desplazamiento máximo en Thyborøn: $\sigma_{y,max thy} = 137.6 \text{ cm}$

5.3. Simulación de la respuesta mediante programas comerciales ⁽⁶³⁾

Algunas características importantes del modelado son:

- El amortiguamiento se calculó como:

$$\xi_{total} = \xi_{estructural} - \xi_{aerodinámico} \quad (5.7)$$

El amortiguamiento estructural corresponde al estimado (Odense) ⁽⁶⁴⁾ o al medido (Thyborøn).

El amortiguamiento aerodinámico se calculó con la expresión: ⁽⁶⁵⁾

$$\xi_a = \frac{\rho * b_{ref}^2}{m_e} * K_{a,ref} * \left[\gamma_K - \left(\frac{\sigma_{y,ref}}{\gamma_{aL} * a_{L,ref} * b_{ref}} \right)^2 \right] \quad (5.8)$$

Los dos factores fuera del paréntesis constituyen el amortiguamiento aerodinámico cuando los desplazamientos tienden a ser nulos. La expresión dentro del paréntesis es un factor correctivo que permite tomar en cuenta la amplitud de los desplazamientos, la forma modal y la longitud de correlación.

En las estructuras seleccionadas, el amortiguamiento aerodinámico, calculado como se indica, es mayor que el amortiguamiento estructural, por lo que en su totalidad resulta negativo.

Por consecuencia, los desplazamientos en el modelo se calcularon exclusivamente con el amortiguamiento estructural.

La situación anterior debe entenderse como la propensión de la estructura a presentar desplazamientos mayores, por lo que los desplazamientos calculados son indicativos sólo del límite inferior de los esperados.

- La velocidad media es constante e igual a la velocidad crítica, a fin de simular las condiciones de turbulencia nula consideradas ⁽⁶⁶⁾.
- La fuerza lateral:

$$F_L(t) = \frac{\rho}{2} * U^2 * \text{sen}(2 * \pi * f_v * t) * D * C_L \pm \frac{\rho}{2} * \left(\frac{l_v}{l_u} * u' \right)^2 * D * C_D \quad (5.9)$$

En donde la fuerza lateral en cada instante es función del desprendimiento de vórtices y de la turbulencia lateral. Para el cálculo del máximo desplazamiento la frecuencia de vórtices se igualó a la frecuencia fundamental de la estructura.

La amplitud máxima del desplazamiento en cada Chimenea es:

⁶³ Se empleó SAP2000 V.14

⁶⁴ No se informa como medido.

⁶⁵ Hansen, S. O.; Vortex - induced vibrations of structures; Structural Engineers World Congress; Bangalore, India; 2007.

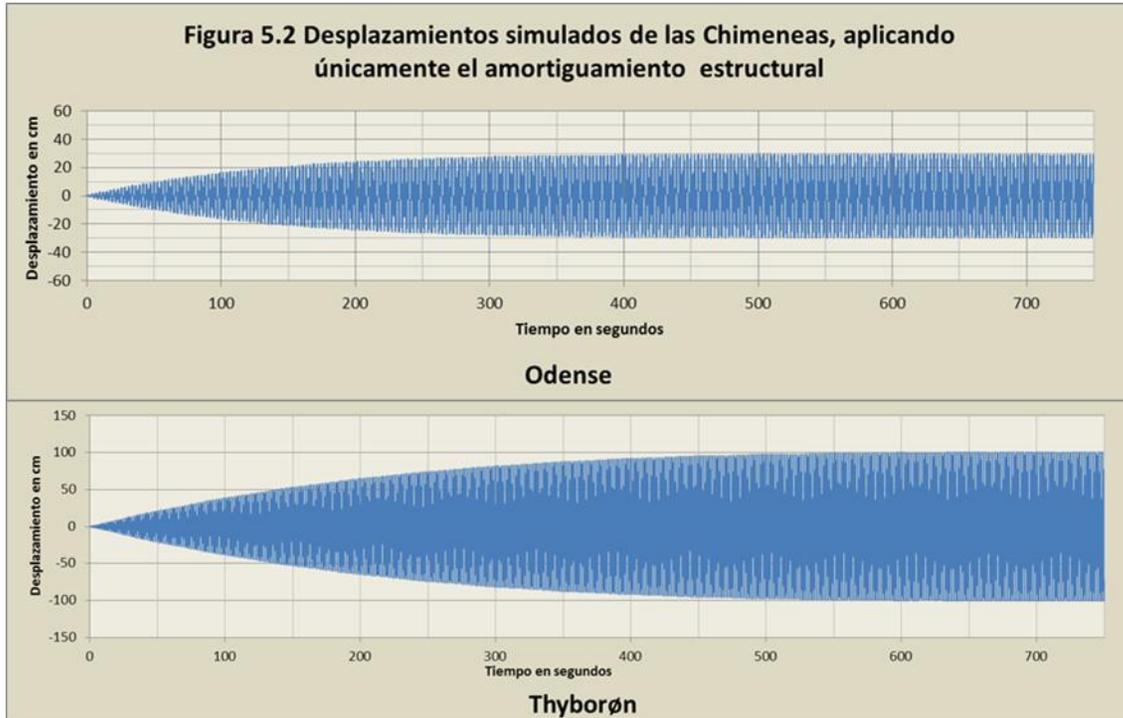
⁶⁶ Se consideró turbulencia nula en ambas Chimeneas.

5.- Análisis de la respuesta transversal de Chimeneas existentes.

Odense: $\sigma_{y,max od} = 29.6 \text{ cm}$

Thyborøn: $\sigma_{y,max thy} = 100.5 \text{ cm}$

Las gráficas del desplazamiento vs tiempo se muestran en la Figura 5.2:



5.4. Cálculo de la respuesta por el método resonante:

En la Sección 3.2.1 se obtiene la expresión que permite calcular los desplazamientos como consecuencia del desprendimiento de vórtices con frecuencia igual a la de la frecuencia fundamental de la estructura.

Tal expresión está consignada en la literatura y en los códigos con la siguiente forma general:

$$\frac{y_{max}}{D} = K_{\xi} * K_w * C_{Lat} * \frac{1}{S_c} * \frac{1}{S_t^2} \quad (5.10)$$

Los dos primeros coeficientes están asociados a la forma modal y a la longitud de correlación efectiva, y el tercero es el coeficiente de fuerza lateral, función a su vez del Número de Reynolds.

En general, este método conduce a desplazamientos menores que el espectral, lo que podría explicarse al considerar que no incluye la interacción fluido estructura, puesto que proviene del análisis resonante conforme a la dinámica estructural. (ver sección 3.2.1).

Odense: $\sigma_{y,max od} = 18.1 \text{ cm}$

Thyborøn: $\sigma_{y,max thy} = 37.8 \text{ cm}$

5.5. Resumen

En la Tabla 5.1 se muestra el resumen de los resultados obtenidos por los diferentes métodos.

Tabla 5.1 Amplitud máxima de los desplazamientos de la corona, observados y calculados con diferentes métodos.				
			Odense	Thyborøn
Amplitud transversal máxima (observada)	y_{max}	cm	>100	>100
Amplitud transversal máxima calculada con el método simplificado de Vickery (Código Canadiense)	y_{max}	cm	Pueden ser hasta de un diámetro (240 cm)	Pueden ser hasta de un diámetro (280 cm)
Amplitud transversal máxima calculada con el método resonante (Eurocódigo)	y_{max}	cm	18.1	37.8
Amplitud transversal máxima calculada con el método espectral (Eurocódigo)	y_{max}	cm	102	138
Amplitud transversal máxima calculada mediante modelado en SAP200 (V.14)	y_{max}	cm	29.6	100.5
Amplitud paralela máxima mediante modelado en SAP2000 (V.14)	x_{max}	cm	5	7
* Cuando el amortiguamiento aerodinámico es mayor que el estructural				

La diversidad de resultados obtenidos hace evidente, nuevamente, la complejidad del problema.

Los siguientes comentarios son procedentes:

- Los desplazamientos transversales son significativamente mayores que los desplazamientos en la dirección paralela al viento. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que los desplazamientos paralelos mostrados corresponden a la velocidad crítica, que en los ejemplos analizados es relativamente baja, (4.4 m/s y 8.1 m/s) en relación a la que podría ser la velocidad máxima de diseño para desplazamientos paralelos.
- La amplitud calculada con el método resonante según EN1 es menor que la obtenida mediante modelado en SAP2000. Estos dos métodos son comparables puesto que ambos parten de la ecuación general del equilibrio y su solución cuando la fuerza actúa con la misma frecuencia que la de la estructura, y en ambas situaciones no toma en cuenta la reducción del amortiguamiento total por el efecto aeroelástico.
- Los desplazamientos calculados con el método espectral son más cercanos a los desplazamientos observados. En Odense debe considerarse que el decremento logarítmico informado, $\delta=0.03$, es mayor que los correspondientes y recomendados para chimeneas metálicas similares. En la Chimenea de Thyborøn el desplazamiento previsto por este método, es mayor que el informado, y también es conocido que esta Chimenea presentó un grieta de 1 m de longitud, daño que debió alterar las propiedades dinámicas de la estructura y en consecuencia los propios desplazamientos.

5.- Análisis de la respuesta transversal de Chimeneas existentes.

- Debe tenerse en cuenta, que la amplitud calculada con el método espectral para la Chimenea de Odense corresponde a $\frac{y_o}{D} = 0.4$, y a $\frac{y_t}{D} = 0.5$ para Thyborøn.

El nivel de esfuerzos correspondiente a tales desplazamientos, a partir de la Figura 2.1, es en para Thyborøn, superior a los 2500 kg/cm², y el correspondiente de Odense del orden de 1300 kg/cm².

Las velocidades del viento necesarias para alcanzar los niveles de esfuerzo señalados, son de 4.4 m/s y 8.1 m/s, las cuales debieron presentarse en numerosas ocasiones. Por lo tanto, es explicable la fisura informada en la Chimenea de Thyborøn, al considerar el efecto de fatiga.

- A fin de tomar en cuenta el efecto aeroelástico, es deseable realizar el modelado en SAP con el amortiguamiento total, esto no es posible ya que el amortiguamiento aerodinámico calculado conforme a (5.8) es mayor que el estructural. Lo anterior abona en favor de lo expuesto en el método simplificado del Código Canadiense, al concluir que son de esperarse grandes desplazamientos, sin comprometerse a predecir valores.

6.- Algunos aspectos relativos al diseño con base en la respuesta transversal. Fatiga.

Esta sección ha sido elaborada con base en los requisitos establecidos en el Eurocódigo y en el código del Comité Internacional de Chimeneas Industriales, (CICIND).

Para el diseño por fatiga, el Eurocódigo acepta dos métodos:

- Método con tolerancia de daño
- Método de vida útil segura

El primero puede ser aplicado si posteriormente a la falla por fatiga en alguna parte de la estructura, puede generarse una redistribución de esfuerzos entre sus elementos, y además la estructura cuenta con un programa de mantenimiento e inspección a lo largo de su vida de útil, que permita detectar fallas incipientes en forma oportuna.

El método de vida útil segura debe proporcionar suficiente confianza en que la estructura tendrá un comportamiento satisfactorio durante su vida útil, sin la necesidad de mantenimiento o inspecciones periódicas. Este método debe ser aplicado cuando la formación local de fisuras pueda conducir rápidamente al colapso del elemento o de la estructura.

Al considerar que la velocidad crítica en Chimeneas metálicas de gran esbeltez es baja en relación a la velocidad regional del viento, se hace evidente que ocurrirá en diversas ocasiones durante el periodo considerado como vida útil.

El código del CICIND ⁽⁶⁷⁾, así como el Eurocódigo, ⁽⁶⁸⁾ recomiendan el diseño por fatiga con base en el número de Miner factorizado para seguridad, (M^*) el cual es una medida del daño acumulado en un elemento, relativo a su capacidad total.

La cantidad de ciclos por categoría de esfuerzo está determinada por la duración de la vida útil asignada a la Chimenea, y por la probabilidad de que ocurra la velocidad crítica, que a su vez es inversamente proporcional a la magnitud relativa de la velocidad crítica respecto a la de diseño. El proceso es probabilístico.

La distribución de estados de esfuerzo, con base en estudios de campo de larga duración ⁽⁶⁹⁾ se idealiza con la expresión:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{max}} = \left\{ 1 - \frac{\log n}{\log N} \right\}^{\lambda} \quad (6.1)$$

En donde:

- σ_{max} es el esfuerzo máximo debido a VIV.
- σ es el esfuerzo de interés para determinar el histograma.
- λ determina la relación carga vs ciclos, $= (V_{cr}/8)^{1.2}$
- V_{cr} es la velocidad crítica.

⁶⁷ CICIND; "Model Code for Steel Chimneys"; Amendment A March 2002

⁶⁸ EN 1993-1-9; Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue; May 2005

⁶⁹ CICIND; "Model Code for Steel Chimneys"; Commentaries and Appendices; December 2000

6.- Algunos aspectos relativos al diseño con base en la respuesta transversal. Fatiga.

- n es el número de ciclos de interés.
- N es el número de ciclos a ocurrir en la vida útil requerida.

El número de ciclos puede determinarse al considerar el número de ocasiones en que el viento alcanza la velocidad crítica, al calcular su probabilidad de ocurrencia con la expresión:

$$P(V_{cr}) = 2 * \frac{V_{cr}}{V_0^2} * e^{-\left(\frac{V_{cr}}{V_0}\right)^2} \quad (6.2)$$

En donde:

- V_0 es la velocidad del viento promediada durante un año = aprox. $V_b(h)/4$
- $V_b(h)$ es la velocidad regional de diseño en el extremo superior de la Chimenea, con periodo de retorno de 50 años.
- Se considera que la Chimenea responde a velocidades del viento comprendidas entre $0.9*V_{cr}$ y $1.1*V_{cr}$.

También, debe incluirse una reducción para tomar en cuenta los cambios de dirección del viento, y la expresión para calcular el número de ciclos resulta:

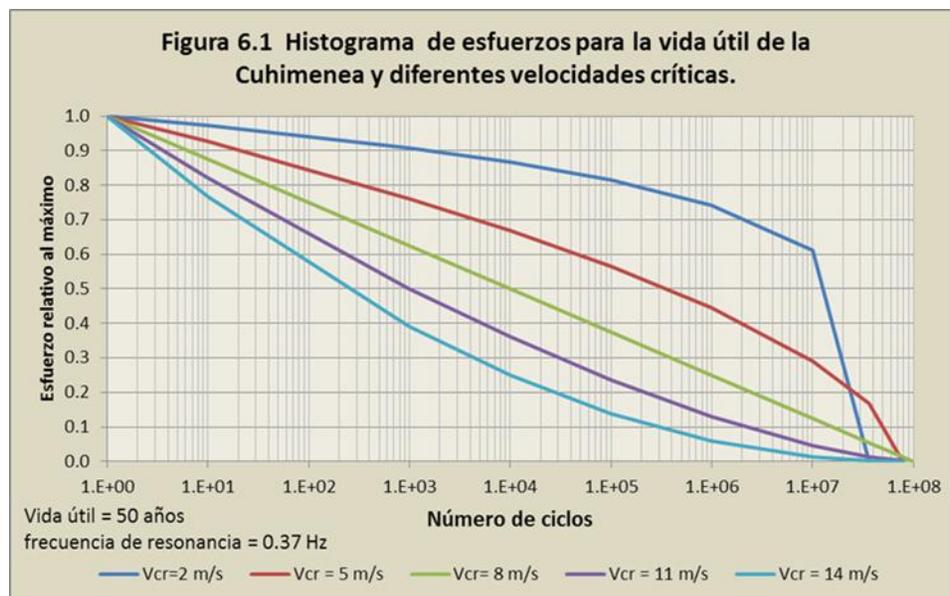
$$N = 1.26 * 10^7 * T * f * A * e^{-A^2} \quad (6.3)$$

En donde:

- T es la vida útil, en años, asignada a la Chimenea.
- f es la frecuencia de resonancia.
- $A = 4*V_{cr}/V_b(h)$

La Figura (6.1) muestra los histogramas calculados para diferentes velocidades críticas, manteniendo fija la vida útil (50 años) y la misma frecuencia de resonancia.

La resistencia en fatiga depende fundamentalmente de:



6.- Algunos aspectos relativos al diseño con base en la respuesta transversal. Fatiga.

- El número de ciclos de cambio de esfuerzo.
- El intervalo de esfuerzo $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$
- La forma de resolver los detalles constructivos y la verificación de calidad.

Para verificar que el número acumulado de ciclos de esfuerzo no ocasione falla por fatiga, se aplica la regla de Palmgren-Miner, al definir un número de Miner factorizado, como límite aceptable.

La regla establece que al existir diferentes magnitudes de esfuerzo, (k) cada magnitud contribuye con un número de ciclos n_i de acuerdo al espectro, y si N_i es el número de ciclos para fatiga en esfuerzo (amplitud) constante, asociado a cada magnitud de esfuerzo, entonces, la falla ocurrirá cuando:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = C \quad (6.4)$$

C se obtiene experimentalmente y se encuentra en el intervalo de 0.7 a 2.2. Para fines de diseño debe ser menor que la unidad.

El Código propone diversas categorías de resistencia en fatiga, todas ellas para $N=2 \cdot 10^6$; la resistencia de cada categoría depende de los diferentes tipos de detalles estructurales a diseñar, en especial las conexiones soldadas.

la Figura (6.2) presenta una muestra de la clasificación de dichos detalles.

El siguiente ejemplo ilustra el método: En la Chimenea de Thyborøn se desea verificar la resistencia de un empalme cercano a la base la Chimenea, que une dos placas mediante soldadura de penetración con biselado por ambos lados. El esfuerzo cíclico máximo es de 400 N/mm² calculado a partir del análisis por VIV.

$$V_{cr} = 8.12 \text{ m/s}$$

$$V_b(64) = 50 \text{ m/s Velocidad regional de diseño a la altura } h = 64 \text{ m}$$

$$T = \text{Vida útil requerida} = 50 \text{ años}$$

$$f = \text{frecuencia fundamental de la Chimenea} = 0.58 \text{ Hz}$$

Con los valores anteriores y al emplear la expresión (6.3) se obtiene el número esperado de ciclos en la vida útil $N = 1.56 \cdot 10^8$

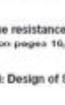
Case No.	Detail Category	Constructional Details		Description
		Type of welding: (see notes)	Sketch of the Detail	
1.1	125	1		Transverse splices in shell. Butt weld carried out from both sides.
1.2	112	2 in flat position		Transverse splices in shell. Butt weld made from one side only.
1.3	90	2		Transverse splices in shell. Butt weld made on a permanent backing strip.
2	80	3		Transverse splices in shell.
3	71	4		Transverse splices in shell.

Figure 6.2 - Fatigue resistance of typical details
(continued on pages 16, 17 and 18)

From ENV 1993-3-2: 1997 - "Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 3.2 - Chimneys"

Notes to Fig. 6.2

1. butt weld, when high quality has to be achieved and verified: - developed root, cap pass counter welding - evenly machined surface in stress direction.	4. butt weld - welded one side only
2. butt weld - developed root, cap pass counter welding	5. T - joint by double-bayed butt weld
3. butt weld: - welded one side only - through-welding of seam root and plate surfaces - secured on opposite side by auxiliary welding aid e.g. weld root backing ceramics or copper rail	6. T - joint by double Y - butt weld with broad root face
	7. T - joint with special quality double fillet weld
	8. T - joint double fillet weld

Figura 6.2 Ejemplo de tipificación de detalles en el código del CICIND.
Fuente : CICIND; "Model Code for Steel Chimneys"; Amendment A March 2002

6.- Algunos aspectos relativos al diseño con base en la respuesta transversal. Fatiga.

$$\Delta\sigma = 400 \text{ N/mm}^2$$

Por lo tanto, puede calcularse el histograma de esfuerzos mediante la expresión (6.1); la Tabla 6.1, en las columnas 2ª y 3ª contiene el número de los ciclos y los niveles de esfuerzo respectivamente.

Se procede a definir la Categoría que corresponde a la sección o elemento a diseñar, de acuerdo a las que define el Código, como muestra la Figura 6.2. Por facilidad, el número que las identifica, también representa al nivel de esfuerzo en N/mm². Para este ejemplo supóngase que el empalme pertenece a la Categoría 125. Tal valor es el esfuerzo de referencia en fatiga correspondiente a $2 \cdot 10^6$ ciclos.

A continuación debe determinarse el número de ciclos correspondientes a la curva de Wöhler, mediante la aplicación de la relación:

$$\Delta\sigma_R^m \cdot N_R = \Delta\sigma_C^m \cdot 2 \cdot 10^6 \quad (6.6)$$

Donde:

- $\Delta\sigma_C$ es la resistencia en fatiga para amplitud constante y 2,000,000 de ciclos.
- $\Delta\sigma_R$ es la resistencia en fatiga para amplitud constante y N_R ciclos.
- m es el exponente de la curva de resistencia en fatiga.

La cuarta columna de la Tabla contiene los valores calculados.

Finalmente las columnas 5ª y 6ª muestran el cálculo del número de Miner, (amarillo) y al resultar este menor que la unidad puede concluirse que el nivel de daño acumulado en la vida útil de la estructura no sobrepasa el de falla por fatiga. Por lo tanto, la sección diseñada es aceptable para un nivel de esfuerzo de 125 N/mm².

Tabla 6.1 Cálculo del índice de daño, mediante la regla de Palmgren-Miner					
Pendiente de la curva de Wöhler	Nivel de esfuerzo en N/mm²	No de ciclos según histograma n_i	No. De ciclos según curva de Wöhler N_i	Relación de ciclos n_i/N_i	Suma de relación de ciclos $\sum n_i/N_i$
3	400	1	60,475	1.7E-05	0.0000
3	350	10	89,949	1.1E-04	0.0001
3	301	100	141,995	7.0E-04	0.0008
3	252	1,000	242,969	4.1E-03	0.0049
3	202	10,000	466,544	2.1E-02	0.0264
3	153	100,000	1,071,095	9.3E-02	0.1197
3	125	390,000	2,000,000	2.0E-01	0.3147
límite para amplitud constante 92 N/mm² en $n=5 \cdot 10^6$					
5	71	5,000,000	18,264,904	2.7E-01	0.5885
límite para duración indefinida 50 N/mm² en $n = 10^8$					
	9	100,000,000	-----	-----	-----
	0	155,620,512	-----	-----	-----

6.- Algunos aspectos relativos al diseño con base en la respuesta transversal. Fatiga.

Como requisito complementario, el Código CICIND requiere que:

“.... Cuando se prevea posible daño por fatiga debido a VIV, los pernos de anclaje deberán pre-esforzarse. Se tomarán medidas para asegurar que el pre-esfuerzo no se pierda durante la vida útil de la Chimenea. Un dispositivo de anclaje deberá colocarse en el extremo inferior del perno de anclaje. El máximo esfuerzo en los pernos de anclaje no debe exceder del 73% de la resistencia en tensión del material del perno. Cuando no se prevea la acción de VIV, se pueden usar métodos alternativos a discreción del diseñador....”

El análisis mediante el índice de Miner de daño acumulado también deberá realizarse en estos elementos.

7.- Conclusiones y comentarios.

Las siguientes son las principales conclusiones del trabajo realizado:

- Las Chimeneas metálicas esbeltas y otras estructuras con similares propiedades dinámicas y mecánicas, son vulnerables a la fatiga, y deben diseñarse adecuadamente para resistir el efecto de las vibraciones inducidas por vórtices, como consecuencia de vientos cuyas velocidades son frecuentes.
 - La respuesta transitoria de una Chimenea que recibe una carga súbita, por ráfaga de viento paralelo, consiste en un desplazamiento inicial igual al doble del ocasionado estáticamente por la fuerza correspondiente al incremento repentino de la velocidad. Este efecto no ha sido tratado en las normas y debe ser considerado en el diseño.
 - La turbulencia en la dirección del viento, tiene como consecuencia un incremento en el desplazamiento medio igual al cuadrado de la turbulencia. (I_u^2)
 - En la respuesta transversal a la dirección del viento intervienen diversos parámetros, configurando un fenómeno de gran complejidad. Entre los principales, están el número de Strouhal, la longitud de correlación efectiva, el amortiguamiento en sus diversas manifestaciones, y la fuerza lateral. La turbulencia interviene atenuando la amplitud de la respuesta máxima.
 - El número de Strouhal (St) se considera constante e igual a 0.2 para secciones circulares, sin embargo, en los intervalos usuales del número de Reynolds que corresponden a la velocidad crítica, St se incrementa y es además dependiente de la rugosidad, lo que disminuiría la velocidad crítica. Esta variación de St no suele aplicarse en el análisis.
 - La longitud de correlación efectiva requiere de más estudios y experimentación a fin de encontrar una forma precisa para determinarla.
 - El amortiguamiento debe comprenderse en su valor total como la suma del amortiguamiento estructural más el amortiguamiento aerodinámico. El primero tiene dependencia de los modos de la estructura y el segundo adquiere valores negativos al aumentar los desplazamientos, por lo que se retroalimentan; este efecto de interacción fluido-estructura conduce con frecuencia al bloqueo aeroelástico. El número de Scruton refleja la combinación del amortiguamiento con la relación de masas estructura-viento.
 - El coeficiente de fuerza lateral es altamente dependiente del número de Reynolds, y además recibe la influencia de la rugosidad de la superficie de la Chimenea, de la forma modal, de la propia LCE, de la intensidad de la turbulencia y posiblemente también, en retroalimentación, de la amplitud de los desplazamientos.
 - El bloqueo aeroelástico es un fenómeno que se presenta cuando el número de Scruton es suficientemente pequeño y la velocidad del viento se encuentra en el entorno cercano ($\pm 5\%$) a la crítica. Entonces, la frecuencia en el desprendimiento de vórtices se mantiene igual a la de la estructura, en violación al principio de Strouhal. Tiene como
-

7.- Conclusiones y comentarios.

consecuencia un incremento notable en los desplazamientos y puede dar origen a un estado de interacción fluido-estructura, incrementando aún más los desplazamientos.

- La respuesta transversal de una Chimenea metálica o de estructuras con propiedades dinámicas semejantes, es máxima para la velocidad crítica, y esta última suele ser notablemente baja y por lo tanto frecuente.
- El cálculo por diferentes procedimientos muestra que aún no se cuenta con un método que conduzca a una solución única para obtener las características de la respuesta con precisión aceptable.
- El método resonante conduce a amplitudes de la respuesta menores que las máximas consignadas.
- El método espectral proporciona las amplitudes con mayor aproximación a valores observados/medidos, sin embargo aún existe gran dispersión entre los valores calculados y aquellos, indicando la necesidad de un mejor modelo.
- El modelado con programas comerciales, requiere conocer con precisión los valores del amortiguamiento, considerado como la suma del estructural y del aerodinámico. Los valores de la fuerza lateral consignados en la literatura podrían considerarse adecuados.
- Cuando las propiedades de la estructura son tales que definen una velocidad crítica baja y por lo tanto frecuente, y además las condiciones locales son adecuadas para que la turbulencia del viento sea mínima, entonces es de esperarse que se presente la condición de resonancia, y el subsecuente bloqueo aeroelástico, que llevarán a la estructura a desplazamientos y esfuerzos considerables.
- Si además de lo señalado en el párrafo previo, los desplazamientos llegan a magnitudes suficientes para modificar el amortiguamiento aerodinámico hasta el grado de igualar el estructural, entonces los desplazamientos quedarán fuera de control, conduciendo a situaciones de falla en la estructura.
- Cuando la respuesta transversal está asociada a velocidades críticas del orden de 10 m/s y menores, la probabilidad de ocurrencia es grande, y obliga a que el diseño tome en cuenta la resistencia en fatiga. El método que aplica la regla de Palmgren-Miner es laborioso, pero puede ser programado con relativa facilidad.

Se ha mostrado la importancia de las vibraciones inducidas por vórtices en la respuesta de Chimeneas metálicas esbeltas ante la acción del viento; el tema aún presenta varios aspectos que deben ser investigados.

Existen además otras acciones que requieren la misma atención en el proceso de análisis y diseño, que no se mencionaron por no ser tema del presente trabajo.

La existencia del Comité Internacional sobre Chimeneas Metálicas (CICIND), la extensa gama de trabajos e investigaciones realizadas globalmente, y el énfasis de las normas establecidas en diversos códigos al respecto, prueban el gran significado económico y social del tema.

En un deseable mundo en equilibrio, las Chimeneas entendidas como estructuras para dispersión de contaminantes, no deben existir, sin embargo, tal objetivo está aún lejos de

7.- Conclusiones y comentarios.

alcanzarse. Mientras tanto, se debe procurar diseñarlas, construirlas y operarlas en la forma más eficiente y segura posible.

Por otra parte existirán siempre otro tipo de estructuras, necesarias a la actividad humana, (los generadores eólicos por ejemplo) cuya respuesta ante el viento presente las mismas características que la de las Chimeneas metálicas.

Apéndice A

Glosario de términos relacionados con Chimeneas ⁽⁷⁰⁾

Alfarda.- Elemento vertical de las escaleras (marinas) al cual se fijan los escalones.

Amortiguador de masa sincronizada.- Dispositivo para amortiguar que emplea un péndulo, sincronizado a la frecuencia fundamental de la chimenea. La parte móvil del péndulo está conectada a la chimenea mediante un dispositivo disipador de energía.

Amortiguador.- Dispositivo adosado a la carcasa para aumentar su amortiguamiento estructural.

Anclas.- Pernos ahogados en la cimentación de concreto, base de ladrillo, o marco de soporte, a fin de proporcionar anclaje de la chimenea a su base.

Anillo de retenidas.- Banda de acero adosada en el exterior de la chimenea con preparaciones para fijar las retenidas.

Anillo de rigidez.- Elementos anulares horizontales que sirven para evitar la deformación de la carcasa, y mantener su forma durante la fabricación y transporte.

Anillos de escalera.- Aros de acero que forman una jaula alrededor de las escaleras.

Banda de remate.- Sección de acero adosada a la punta y alrededor de la salida de la chimenea, para proveer resistencia mecánica y a la corrosión en esa zona.

Base de tiro.- Soporte colocado a altura conveniente sobre la placa de base de la chimenea, y que sirve para recibir el peso del o los tiros.

Boca.- Abertura o conducto sujeto al fuste o placa de base, por el que entran los gases al conducto o tiro de la chimenea.

Brida de base, brida de apoyo.- Elemento formado por cartelas y anillos de acero que forman un elemento rígido en la base de la chimenea, y a través del cual pasan las anclas.

Brida de remate, botaguas.- Brida colocada externamente en el extremo del o los ductos de expulsión, que cubre la placa de sello para evitar el ingreso del agua de lluvia.

Brida de unión.- Placa de acero en el extremo de una sección que permite unirla a otra.

Carcasa, fuste.- Principal estructura externa de la chimenea, sin incluir refuerzos o bridas.

⁷⁰ El glosario se integró con términos encontrados principalmente en: CICIND;

- "Model Code for Steel Chimneys"; Commentaries and Appendices; December 2000;
 - Krishna P., Kumar K., Bhandari M.N., "A Commentary on Indian Standard Code of practice for design loads (other than earthquake) For buildings and structures" Part 3 Wind Loads, Second Revision, Indian Institute of Technology, 1987
 - Riviello V. V., "Diccionario de Términos", Pemex Refinación, sin fecha.
 - Lara M. G. A. et al, "SISTEMAS DE DESFOGUES Y QUEMADORES EN INSTALACIONES DE PEMEX", Comité de Normalización, NRF-031-PEMEX-2011
-

Chimenea.- estructura vertical que sirve para descargar en la atmósfera gases de deshecho, de tal forma que se logre la dispersión de contaminantes, y cuando corresponda, se abata la radiación de calor.

Chimenea atirantada o chimenea con retenidas.- Chimenea en la cual no todas las cargas externas, (p. ej. viento), se soportan exclusivamente por la carcasa o fuste estructural, y a la que se le colocan retenidas para asegurar la estabilidad.

Chimenea auto-soportada.- Chimenea en la cual las cargas externas (p.ej. viento), son soportadas exclusivamente por la carcasa o fuste, y que, conjuntamente con la cimentación, y sin ningún soporte adicional, debe permanecer estable ante todas las acciones de diseño.

Chimenea de doble capa.- Una chimenea que consta de la carcasa exterior para soportar las cargas y un ducto interior para la circulación de los gases. También conocida como chimenea de doble pared.

Chimenea de múltiples tiros.- Un grupo de dos o más chimeneas soportadas por una sola estructura; ó una chimenea que contiene dos o más tiros dentro de la carcasa o fuste.

Chimenea montada en caldera.- Una chimenea soportada por la caldera y su cimentación.

Chimenea rigidizada.- Chimenea en la cual no todas las cargas externas (p.ej. viento) son soportadas exclusivamente por la carcasa o fuste, a la que se adicionan elementos (brackets) rigidizantes, sujetos a una estructura adyacente, para proporcionar estabilidad.

Coefficiente de arrastre.- Relación entre la presión del viento en la chimenea y la presión equivalente en la misma área normal a la dirección del viento.

Cono de base.- Cono truncado apoyado en la placa de base de la chimenea.

Cono de punta.- Cono truncado u otro dispositivo, colocado en la punta de la chimenea y que sirve para aumentar la velocidad de salida de los gases.

Cono intermedio.- Cono truncado que forma parte de la carcasa a niveles intermedios.

Ducto de gases.- Ducto contenido en el fuste o carcasa estructural.

Estabilizador aerodinámico.- Dispositivo colocado en la carcasa estructural de la chimenea para reducir las oscilaciones causadas por el viento, alterando, por su forma, el desprendimiento de vórtices.

Estay, soporte lateral.- Miembro estructural rígido que proporciona resistencia en tensión y compresión, para evitar el desplazamiento lateral de la chimenea.

Fondo falso.- Una placa cónica estanca colocada inmediatamente debajo de la boca de la chimenea para evitar que los gases, los condensados y el hollín lleguen al fondo de la misma.

Humo.- Mezcla visible de gases producida por la combustión incompleta de una sustancia, generalmente compuesta de carbono, y que arrastra partículas en suspensión.

Penacho.- Masa de aire sobresaturado de vapor de agua y que contiene a menudo contaminantes sólidos, líquidos o gaseosos, vertida a la atmósfera por una chimenea.

Placa de base.- Placa horizontal empotrada en la base de la chimenea.

Placa de refuerzo, placa doble.- Placa adosada a la carcasa para reforzarla en donde se requiera por incremento de esfuerzos.

Placa de sello.- Placa inclinada o convexa fija en el extremo del fuste o carcasa, que sirve para cubrir el área entre la carcasa y él o los revestimientos, a la que se le incorporan capuchas, a través de las cuales sobresalen los revestimientos o tiros.

Placa de techo, faldón, botaguas.- Placa alrededor del fuste, que sigue el contorno de un techo o cubierta, cuando la chimenea pasa a través de dicho techo o cubierta de un edificio.

Placa desviadora, desviador.- Placa vertical soldada en el interior de la carcasa y colocada entre dos bocas opuestas, que sirve para orientar hacia arriba el flujo de los gases en el tiro, y evitar que los gases pasen de una boca a la otra.

Puerta de acceso.- Puerta de entrada para el personal u otros medios de inspección.

Puerta de limpieza.- Una puerta, normalmente en la base de la chimenea, para efectuar la limpieza de los polvos o sólidos (hollín) provenientes del humo de la chimenea.

Recubrimiento.- Material aplicado en la cara interna de la chimenea que sirve para evitar el contacto directo entre los gases y la carcasa de la chimenea.

Refuerzos.- Formas estructurales o placas, en o cerca de las aberturas en el fuste, que sirven para reforzar a este último.

Retenida.- Cable de acero que en un extremo sujeta a la chimenea y en el otro está anclado, y sirve para proporcionar resistencia al desplazamiento lateral de la chimenea trabajando a tensión.

Sección neta.- Área de la sección de la carcasa o fuste destinada a soportar las cargas, sin incluir el sobre-espesor para corrosión.

Sección transversal.- Área de la sección de la carcasa de acero para soportar las cargas, incluyendo el sobre-espesor para corrosión.

Sistema de protección contra incendio; pararrayos.- Sistema que permite continuidad eléctrica entre la chimenea y tierra.

Sistema de seguridad.- Sistema diseñado para evitar caídas en escaleras, y que permite la fijación de los arneses de seguridad de los operadores.

Sombbrero o botaguas.- Capucha cónica o en forma de plato invertido, colocada en la punta de la chimenea para evitar el ingreso del agua de lluvia.

Soporte.- Estructura que proporciona resistencia al desplazamiento lateral de la chimenea y/o soporta parte o todo el peso de la misma.

Soportes laterales, soportes de tiro.- Elementos colocados en diferentes niveles de la carcasa o fuste que sirven para soportar los ductos o tiros interiores, y que permiten la dilatación de estos últimos en forma independiente de la carcasa.

Testigo de corrosión.- Pieza de acero, fija o removible, generalmente de menos espesor que la carcasa, que está en contacto con los gases de expulsión, y que se coloca estratégicamente en los sitios donde se espera la mayor corrosión.

Tiros.- Ductos que se encuentran dentro de la carcasa o fuste de la chimenea y que sirven para conducir los gases.

Tubo de drenaje.- Tubería que conecta el falso fondo con un punto fuera de la carcasa y sirve para desalojar los condensados.

Venturi.- Véase: Cono de punta.

Apéndice B

Propuesta para denominar bloqueo aeroelástico al fenómeno conocido como lock-in.

De la descripción y definición del fenómeno que se ha hecho en el cuerpo de la tesis, se han encontrado las siguientes acepciones, que pueden ser adecuadas para identificarlo en nuestro idioma:

Bloquear (del fr. *bloquer*).

1. tr. Interceptar, obstruir, cerrar el paso. *La nieve bloqueó la carretera.* U. t. c. prnl.
2. tr. Impedir el funcionamiento normal de algo. *Bloquear un circuito, una cerradura.* U. t. c. prnl.
3. tr. Dificultar, entorpecer la realización de un proceso. *Bloquear las negociaciones.* U. t. c. prnl.

Sincronizar.

1. tr. Hacer que coincidan en el tiempo dos o más movimientos o fenómenos.

Acoplar. (del lat. *copulāre*, juntar).

5. tr. Ajustar o unir entre sí a las personas que estaban discordes, o las cosas en que había alguna discrepancia. U. t. c. prnl.

Durante el lock-in existe una sincronización de las frecuencias, (de los vórtices y de la estructura), y también se puede decir que existe un acoplamiento de las frecuencias, sin embargo, es la estructura, y su forma de vibrar, la que ocasiona un detenimiento o retraso en la variación del desprendimiento de vórtices conforme a la relación de Strouhal, por ello es más correcta la primera acepción propuesta.

Se propone designar a este fenómeno como **bloqueo aeroelástico**.

Apéndice C

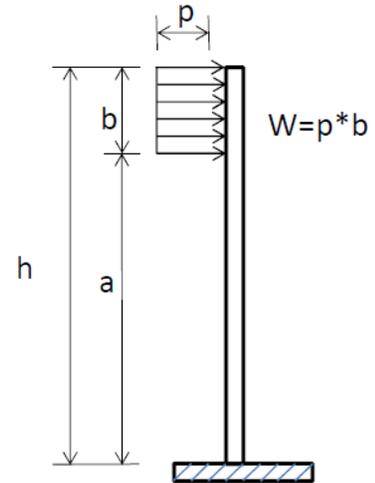
Cálculo de la rigidez de una viga en voladizo cuando está sometida a una carga uniforme y en el extremo opuesto al empotramiento.

Para una viga como la mostrada en la figura, el desplazamiento máximo en el extremo libre, está dado por la expresión⁷¹:

$$\delta = \frac{W}{24 * E * I} * (8 * a^3 + 18a^2 * b + 12 * a * b^2 + 3 * b^2)$$

a , b y h están relacionados:

$$b = \frac{h}{\beta}; \quad a = h - \frac{h}{\beta}$$



$$\delta = \frac{W}{24 * E * I} * (8 * (h - \frac{h}{\beta})^3 + 18(h - \frac{h}{\beta})^2 * \frac{h}{\beta} + 12 * (h - \frac{h}{\beta}) * (\frac{h}{\beta})^2 + 3 * (\frac{h}{\beta})^3)$$

$$\delta = \frac{W}{24 * E * I} * (8 * (\frac{\beta h - h}{\beta})^3 + 18(\frac{\beta h - h}{\beta})^2 * \frac{h}{\beta} + 12 * (\frac{\beta h - h}{\beta}) * (\frac{h}{\beta})^2 + 3 * (\frac{h}{\beta})^3)$$

$$\delta = \frac{W}{24 * E * I} * (8 * \frac{h^3}{\beta^3} * (\frac{\beta - 1}{1})^3 + 18 * \frac{h^3}{\beta^3} * (\frac{\beta - 1}{1})^2 + 12 * \frac{h^3}{\beta^3} * (\frac{\beta - 1}{1}) + 3 * \frac{h^3}{\beta^3})$$

$$\delta = \frac{W * h^3}{24 * E * I * \beta^3} * (8 * (\beta - 1)^3 + 18 * (\beta - 1)^2 + 12 * (\beta - 1) + 3)$$

$$\delta = \frac{W * h^3}{24 * E * I * \beta^3} * (8 * \beta^3 - 6 * \beta^2 + 1)$$

$\delta = 1$ por lo tanto:

$$W = k = \frac{E * I}{h^3} * \frac{24 * \beta^3}{(8 * \beta^3 - 6 * \beta^2 + 1)}$$

Que es la rigidez de una viga en voladizo, sometida a una carga uniforme en una longitud h/β en el extremo opuesto al apoyo.

⁷¹ Manual AHMSA para construcción con acero. p.60

Apéndice D

Simulación de series de velocidad del viento por el método de Montecarlo

La simulación de series de tiempo de la velocidad del viento requiere que las series simuladas posean las mismas propiedades estadísticas que las series reales esperadas. Las propiedades estadísticas del viento son:

- Velocidad media.
- Turbulencia
- Espectro de potencia.

La velocidad media y la turbulencia han sido ampliamente comentadas en el cuerpo principal de la tesis.

El viento tiene su representación en el dominio de la frecuencia a través del espectro de Fourier. O, en el dominio del tiempo, la velocidad del viento es el resultado de la superposición de una gama de series armónicas, con ángulos de fase distribuidos aleatoriamente.

El espectro de potencia del viento ha sido estudiado por diversos autores, quienes han propuesto expresiones para representarlo, todas ellas aplicables para ciertas condiciones particulares.

Entre otros están los modelos propuestos por Davenport, Harris, Karman, y Kaimal. Diversos códigos también proponen modelos específicos.

El proceso de simulación es el siguiente:

1. Asignar las frecuencias dentro del intervalo conveniente a la simulación. En las simulaciones de este trabajo, desde 10^{-3} hasta 10^2 Hz.
2. Elegir el incremento de muestreo, así como la duración de la serie. El muestreo fue de 10^{-2} s, y la duración variable, ajustándola a conveniencia hasta lograr la estabilidad de la respuesta. (para amortiguamientos menores se requieren tiempos mayores a fin de que la respuesta alcance la fase estacionaria).

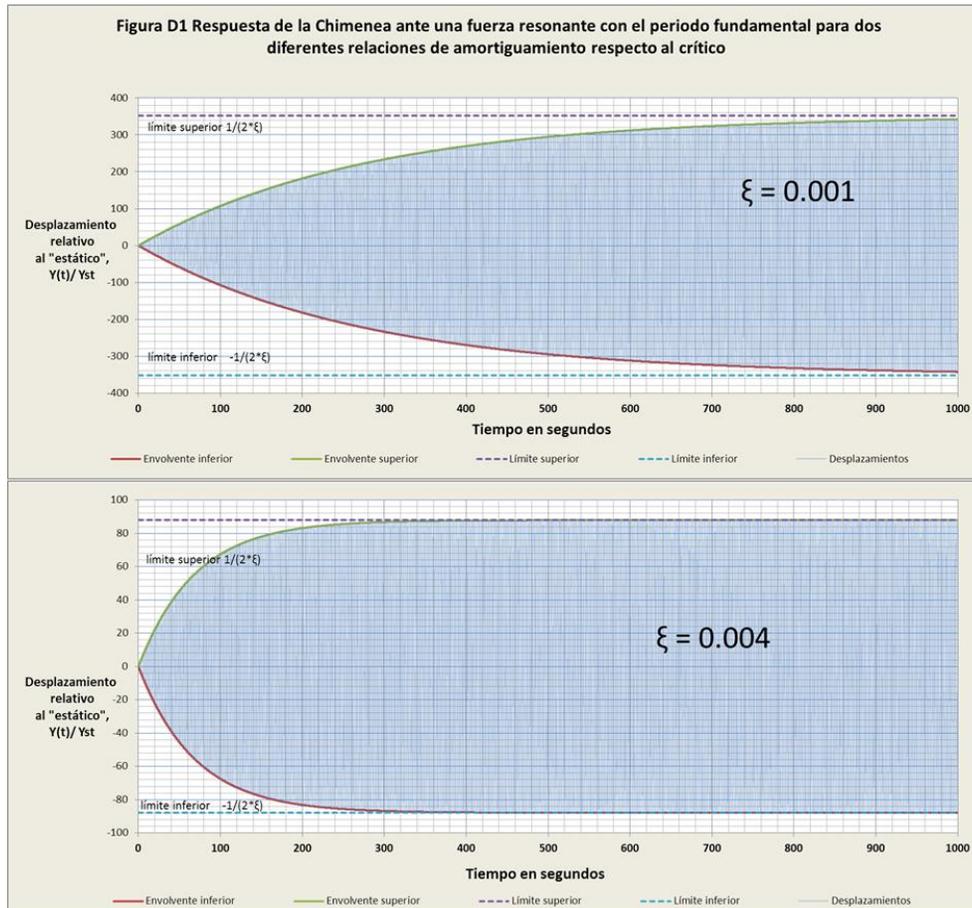
La Figura D1 ilustra lo anterior: Las dos gráficas han sido desarrolladas para un tiempo de 1000 s, tal tiempo escasamente es suficiente para que la respuesta de la Chimenea con amortiguamiento $\xi=0.001$ alcance su límite, mientras que en la Chimenea con amortiguamiento $\xi = 0.004$ el desplazamiento máximo ocurre en menos de la tercera parte del tiempo. (Obsérvese también la magnitud de los desplazamientos máximos respectivos).

En el segundo caso la serie de tiempo puede limitarse a 350 segundos, y el análisis paso a paso concluirá más rápidamente. (El análisis de 500 s para una Chimenea requiere de aproximadamente 25 minutos por serie, en el equipo usado para el presente trabajo.)

3. Calcular para cada frecuencia su densidad espectral, de conformidad con el modelo seleccionado. En las simulaciones realizadas se aplicó el modelo de Harris definido por las expresiones:

$$S(n, z) = \frac{2 \cdot \sigma^2 \cdot fl}{3 \cdot n \cdot (2 + fl^2)^{5/6}} \quad fl = \frac{n \cdot L}{U(z)} \quad (D1)$$

En donde $S(n,z)$ es la función de densidad espectral, fl la frecuencia adimensional, n la frecuencia considerada, σ la desviación estándar y $L=1800$ m, la longitud de escala. La Figura D2 muestra el espectro resultante.



4. Determinar las velocidades instantáneas para toda la serie de tiempo con la siguiente expresión ⁽⁷²⁾:

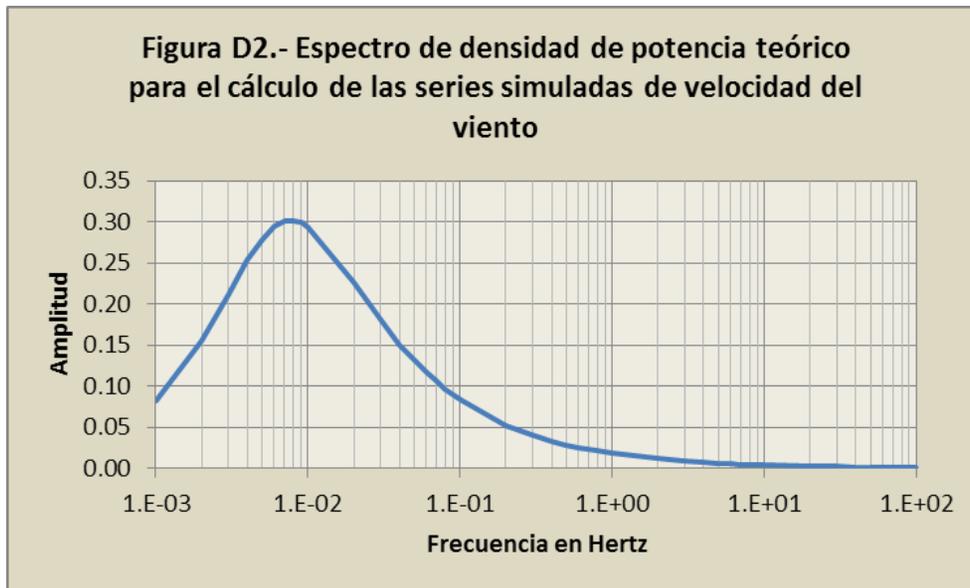
$$u(t) = U(z) + \sum_{j=1}^N \sqrt{2 \cdot S(n_j) \cdot \Delta n} \cdot \cos(n_j \cdot t + \phi_j) \quad (D2)$$

⁷² Paola M., Digital simulation of wind field velocity., Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 74-76 (1998) 91-109]

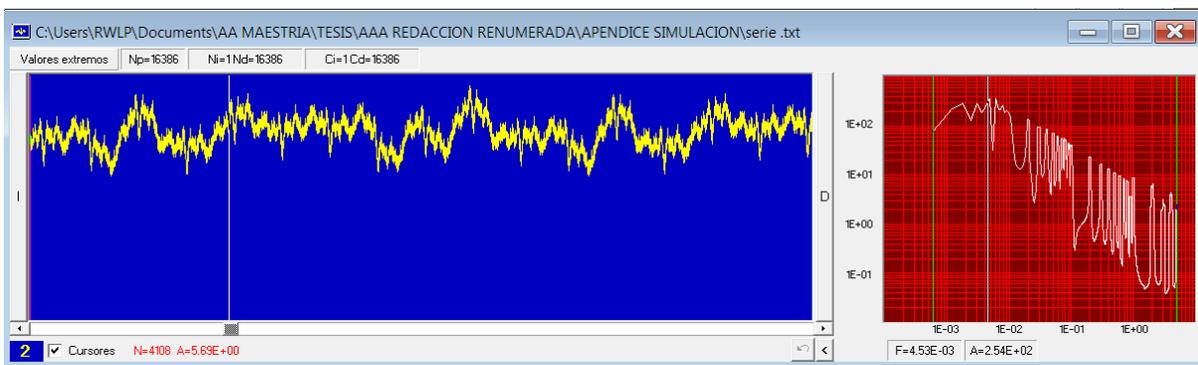
Apéndice D: Simulación de series de velocidad del viento por el método de Montecarlo.

En donde n_j es el vector de frecuencias consideradas, $S(n_j)$ es la densidad espectral de cada frecuencia, y ϕ_j es el ángulo de fase, calculado aleatoriamente y distribuido uniformemente en el intervalo $0 < \phi_j < \pi$.

Las series así calculadas cumplen con los tres requisitos mencionados, los dos primeros valores se desprenden fácilmente de cada serie considerada, y el tercero puede comprobarse obteniendo el espectro de Fourier.



En la Figura D3 se muestra una serie de tiempo simulada y el espectro de Fourier correspondiente, calculado mediante DEGTRA.



Hay una muy buena correlación en los espectros, teniendo en cuenta que para una mayor precisión se habría requerido un número muy grande de frecuencias, (así como tiempo), para que el espectro incluya las frecuencias del orden de 0.001 ($t=1000$ s).

Referencias

Alpsten, Göran; Dynamic Behaviour under Wind Loading of a 90 m Steel Chimney; Alstom Power Sweden AB; Report S-01041, Report 9647-3; 2002

Blackburn, H. M., Govardan, R. N., and Williamson, H. K.; A complementary Numerical and Physical Investigation of Vortex - Induced Vibration; Journal of Fluids and Structures 15, (481 - 488); 2000

Boggs, D.W.; Validation of the Aerodynamic Model Method; Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41 - 44 (1992) 1011-10022 Elsevier; 1992

Bureau of Indian Standards; Design and Construction of Steel Chimney - Code of Practice; Part I, Mechanical Aspect; 1989

Ceja S. E., Hernández B. H., "Simulación de ráfagas de viento para determinar el comportamiento eólico de estructuras", Ciencia Nicolaita No. 45, Diciembre 2006

Chopra A.K. Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering. Third Edition. Prentice Hall.

CICIND; "Model Code for Steel Chimneys"; Commentaries and Appendices; December 2000

CICIND; "Model Code for Steel Chimneys"; December 2000

Clobes, M. Willecke, A. Peil, U.; Vortex Excitation of steel chimneys:Two ultimate limit states; Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Institute of Steel Structures, Braunschweig, Germany.

Comisión Federal de Electricidad; "MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES, DISEÑO POR VIENTO"; México 2008.

Constructor, the; Civil Engineering Home; Types and Design of Steel chimney; <http://theconstructor.org/>

Coordinación: Fesnedo V. H.; Diccionario de Términos de PEMEX Refinación.;

Dyrbye C., Hansen S.O.; Wind Loads on Structures; John Wiley & Sons; 1997

Edinburg, University of; 2nd Chimney Design Symposium and Exhibition; Volume 2; Centre of Industrial Consultancy and Liaison; March 1976

ESDU, Engineering Sciences Data Unit ; Data Item Numbers: (Circular Cylindrical Structures, Dynamic Response to Vortex Shedding), 85038 pt 1, Calculation Procedures and Derivation, 85039 pt 2, Simplified Calculation Procedures, 85040 pt 3, Computer Programs.

ESDU; "RESPONSE OF STRUCTURES TO VORTEX SHEDDING. Structures of Circular or Polygonal Cross Sections" 96030

Eurocode 1 EN 1991-1-4:2005, "Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions", European Standard EN 1991-1-4:2005

Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue, European Standard EN 1993-1-9:May 2000

Referencias.

- George, William K., Professor of Turbulence; Lectures in Turbulence for the 21 st Century; Department of Applied Mechanics; Chalmers University of Technology; Gotenborg Sweden
- Giosan, I., Eng, P.; Vortex Shedding Induced Loads on Free Standing Structures;
- Gobierno del Distrito Federal NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO POR VIENTO, Gaceta Oficial del Distrito Federal; 6 de octubre de 2004.
- Gobierno del Distrito Federal: "NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO POR VIENTO", Gaceta Oficial del Distrito Federal; 6 de octubre de 2004.
- Gopalkrishnan R; Vortex induced forces on oscillating bluff cylinders; doctoral thesis; MIT 1993
- Hansen, S. O.; Vortex - induced vibrations of structures; Structural Engineers World Congress; Bangalore, India; 2007
- Hansen, S. O.; Vortex Induced Vibrations of Line-Like Structures; CICIND's 50th meeting; Oxford, 1998;
- Hirata, M. et al; "High Reynolds Oscillations of a Circular Cylinder"; J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. and Eng.; October-December 2008; Vol. XXX, No. 4 – 304-312.
- Holmes D, John; Wind Loading of Structures; Taylor and Francis; 2001
- Jauvtis, N., and Williamson, H. K.; The effect of two degrees of freedom on vortex - induced vibration at low mass and damping; J. Fluid Mech, vol. 509, (23 - 62); Cambridge University Press; 2004
- Kijewsky T., Kareem A.; Estimation and Modeling of Damping and Engineering Auxiliary Damping Systems in Civil Engineering Structures: An Overview; NatHaz Modeling Laboratory; University of Notre Dame.
- Krishna P., Kumar K., Bhandari M.N., "A Commentary on Indian Standard Code of practice for design loads (other than earthquake) For buildings and structures" Part 3 Wind Loads, Second Revision, Indian Institute of Thecnology, 1987
- Lara M. G: A. et al, "SISTEMAS DE DESFOGUES Y QUEMADORES EN INSTALACIONES DE PEMEX", Comite de Normalización, NRF-031-PEMEX-2011
- Levi, E., Rodríguez C. N. and Echavez, A. G.; Fluid - Structure Interaction; Institute of Engineering Series No E-57; Universidad Nacional Autónoma de México; Feb - 1988
- Li Q. S., Yang K., Zhang N., Wong C.K., Jeary A: P.; "FIELD MEASUREMENTS OF AMPLITUD DEPENDENT DAMPING IN A 79-STORY TALL BUILDING AND ITS EFFECTS ON THE STRUCTURAL DYNAMIC RESPONSES"; Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com); 2002
- Marco E. E., "METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS A FATIGA MEDIANTE EL CÓDIGO PRO ENGINEER: APLICACIÓN A UN EJE FERROVIARIO", Universidad Carlos III de Madrid, 2010
- Martínez V. P., Rodríguez C. N.; Response of a MDOF structure subjected to wind loading: Comparison between stochastic approach and dynamic analysis; Series Investigación y Desarrollo, Instituto de Ingeniería, UNAM, SID/654, Junio 2007;
-

Referencias.

- Muñoz B. C. J., Hernández, B. H., López, L. A.; A comparison of cross-wind response evaluation for chimneys following different international codes; 11th Americas Conference on Wind Engineering- San Juan Puerto Rico June 22-26; 2009
- Ordaz M., Montoya D. C. "DEGTRA" (programa para análisis de señales). Instituto de Ingeniería, UNAM
- Paola M., Digital simulation of wind field velocity., Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 74-76(1998) 91-109]
- Preidikman, S., Massa, J. C., Rocca, B.A.; Análisis dinámico de mástiles arriostrados; Rev. Int. De Desastres Naturales, Accidentes e infraestructura Civil Vol. 6(1)85; 2006
- Pritchard, B. N.; Steel chimney oscillations: a comparative study of their reported performance versus predictions; Eng. Str. Vol. 6 (315 - 323); Oct - 1984
- Riviello V. V., "Diccionario de Términos", Pemex Refinación, sin fecha.
- Robinson, R. W., Hamilton, J.; A CRITERION FOR ASSESSING WIND INDUCED CROSSFLOW VORTEX VIBRATIONS IN WIND SENSITIVE STRUCTURES; Brown and Root Limited, 150 The Broadway Wimbledon London SW19 1RX; 1992
- Roshko A.; "Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number";
- Roshko A.; "Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number"; Guggenheim Aeronautical Laboratory, California Institute of Technology, 1960
- Ruschenweyh H., "PRACTICAL EXPERIENCES WITH WIND-INDUCED VIBRATIONS", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 38 (1990) 211-218
- Sanchis, A., Saelevik, G. and Grue J.; Study of vortex induced vibrations in two degrees of freedom on a spring - mounted circular cylinder with PIV; Mechanics Division, Department of Mathematics, University of Oslo, Norway
- Techet, Alexandra. 2.22 Design Principles for Ocean Vehicles (13.42), Spring 2005. (Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare), <http://ocw.mit.edu>
- Vandiver, J. K., Dunwoody, A.B., Campbell, R.B., Cook, M.F.; A mathematical basis for the random decrement vibration signature analysis technique;
- Vickery, B.J., Basu, R.I.; Across-Wind Vibrations of Structures of Circular Cross-Section. Part I. Development of a Mathematical Model for Two-Dimensional Conditions; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 12, 75-97 Elsevier Science Publishers; Amsterdam Netherlands; 1983;
- Whitney, S.; Vibrations of Cantilever Beams: Deflection, Frequency, and research Uses; 1999
- Williamson, C.H.K.; Dynamics and Instabilities of Vortex Pairs in Open Flow or Close to the Ground; Submission for the Int Workshop on Fundamental Issues related to Aircraft trailing Wakes, 27-29 May 2008, Marseille; 2008
- Zhang, Z., Cho, Ch.; Experimental Study on damping Ratios of in-situ Buildings; World Academy of Science, Engineering and Technology 50 2009;