

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil



COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE CHIMENEAS METÁLICAS FRENTE A CARGAS DE VIENTO POR AGITACIÓN TURBULENTA

Emanuel Isaac Carril Medina

**INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

Profesor Guía: Sr. Minor Nozaki

Profesor Informante: Dr. Claudio Oyarzo

Concepción, Abril 2016

*“Delítate así mismo en Jehová, y el
concederá las peticiones de tu corazón”*

Salmo 37:4

RESUMEN

En el presente documento se analizó el comportamiento estructural de chimeneas metálicas de sección circular y cuadrada, frente a cargas de viento por agitación turbulenta y sísmica, considerando las condiciones naturales del viento fluctuante generadas en la ciudad de Concepción.

Se basó en el los métodos estadístico y espectral, ambos complementarios para determinar la naturaleza irregular del viento, considerando además lo especificado en la norma Chilena NCh 432 Of.2010 (Diseño estructural – Cargas de viento), se logró caracterizar la acción del viento. La acción sísmica es determinada, según el método de análisis modal espectral de acuerdo a la normativa Chilena NCh 2369 Of 2003 (Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales).

Las estructuras estudiadas fueron modeladas mediante elementos finitos en el *software* comercial SAP 2000 v17, obteniéndose como conclusión principal que el viento como carga fluctuante produce mayores desplazamiento que la acción sísmica en las chimeneas circulares o cuadradas con las siguientes propiedades: esbelteces superior a 16.25, frecuencia natural inferior a 1 [Hz] y una altura mayor a los 65 [m].

ABSTRACT

This document analyses the structural behavior of metal chimneys with circular and square sections, under the action of turbulent wind and seismic loads. These actions were calculated considering the natural conditions of wind fluctuating produced in the city of Concepcion.

It was possible to characterize the wind action based on the statistical and spectral analysis –both of them were complementary to determine the wind nature- and considering the Chilean standard NCh 432 Of.2010 (structural design - Wind loads). The seismic action was determined according to the spectral modal analysis method, considering the Chilean standard NCh 2369 Of.2003 (seismic design of industrial facilities and structures).

The studied structures were modeled using the finite elements software SAP 2000. It was concluded that the wind as a fluctuating load produced higher displacements than the seismic action as specified in the NCh 2369 Of.2003 standard. This analysis took into account the specific natural conditions of Concepcion and considered circular or square chimneys whose slenderness is higher than 16.25, natural frequency lower than 1 [Hz] and higher than 65 [m].

AGRADECIMENTOS

Por sobre todo las cosas le doy gracias a Dios por su inmenso amor e incondicionalidad a mi vida.

Quisiera agradecer también, a mis padres por su apoyo incondicional durante todos los procesos que he tenido que pasar, tanto académicos como personales, de todo corazón gracias.

También agradecer a mi compañera de vida, Bárbara, quien me ha apoyado y acompañado en toda esta etapa y a mis dos grandes tesoros Antonella Carril y Lucas Carril, gracias por la felicidad que generan en mi vida cada día.

Agradecer por el apoyo brindado por mi profesor guía Minor Nozaki, quien ante cualquier inquietud surgida, estaba dispuesto en todo momento a responder mis consultas y abordar de mejor manera la solución a cada problema.

Muchas Gracias

Emanuel Carril Medina

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación	1
1.2. Hipótesis.....	5
1.3. Objetivo Generales y Específicos	5
1.4. Metodología.....	6
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	8
2.1. Caracterización del viento	8
2.1.1 Introducción.....	8
2.1.2 Estado de viento	9
2.1.3 Modelo estadístico	12
2.1.4 Modelo espectral.....	17
2.2. Caracterización del Sismo de acuerdo a la Normativa NCh 2369 Of. 2003 37	
2.2.1 Categoría de la estructura	38
2.2.2 Zonificación	38
2.2.3 Tipo de suelo.....	39
2.2.4 Razón de amortiguamiento ξ	41
2.2.5 Factor de modificación de la respuesta R.....	41
2.2.6 Coeficiente sísmico horizontal mínimo	41
2.2.7 Coeficiente sísmico horizontal máximo.....	41
2.2.8 Espectro de diseño.....	42
CAPÍTULO 3: VIENTO	44
3.1. Introducción.....	44

3.2.	Acción del viento	44
3.2.1	Medición del viento atmosférico	44
3.2.2	Espectro de potencia.....	48
3.2.3	Espectros potencia de acuerdo a la normativa	50
3.2.4	Presión equivalente del viento (NCh 432 Of.2010 y ASCE 7-10).....	57
CAPÍTULO 4: MODELACIÓN ESTRUCTURAL Y ASIGNACIÓN DE CARGAS		59
4.1.	Introducción y Comentarios	59
4.2.	Materiales.....	60
4.3.	Descripción de la estructura	61
4.4.	Cargas.....	64
4.4.1	Carga de viento.....	64
4.4.2	Carga Sísmica (SXD)	73
4.4.3	Combinación de carga	75
CAPÍTULO 5: RESULTADOS		76
5.1.	Introducción.....	76
5.2.	Chimenea de sección circular.....	76
5.2.1	Modos de vibración	76
5.2.2	Deformaciones	81
5.3.	Chimenea de sección cuadrada	94
5.3.1	Modos de vibración	94
5.3.2	Deformaciones	98
5.4.	Comparación del comportamiento de una chimenea de sección circular y chimenea de sección cuadrada.....	111
5.5.	Tensiones admisibles	115
5.5.1	Chimenea circular	115
5.5.2	Chimenea cuadrada.....	118

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES..... 122
CAPÍTULO 7: REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS 125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Perfil vertical de velocidades de acuerdo a la altura. [Fuente (ROM, 1995)].	9
Figura 2.2. Modelo estadístico de descripción de un estado de viento representativo. [Fuente: (ROM, 1995)].	12
Figura 2.3. Componente del viento predominante para un punto $m(0, 0, z)$	17
Figura 2.4. a) Componente del viento medio y viento turbulento b) componente del viento medio y viento turbulento en el tiempo.	18
Figura 2.5. Variación con la frecuencia del producto de la frecuencia por la función de densidad espectral del viento meteorológico, $nSuu(n)$. [Van der Hoven, 1957].	23
Figura 2.6. Espectro de respuesta NCh 2369 Of.2003.	43
Figura 3.1. Data Logger Ammonit, usado para el registro de datos en la estación meteorológica [Fuente: (Hidalgo y Nozaki, 2010)].	45
Figura 3.2. Ubicación de la estación de medición de viento.	45
Figura 3.3. Variación de la velocidad instantánea durante el día a una altura de 70 [m].	46
Figura 3.4. Velocidad turbulenta máxima del registro (13 hr).	47
Figura 3.5. Transformada de Fourier.	48
Figura 3.6. Función de densidad espectral, presentada tradicionalmente.	49
Figura 3.7. Función de densidad espectral o Espectro de potencia.	49
Figura 3.8. Perfil de velocidad de Velocidad media.	51
Figura 3.9. Perfil de Intensidad turbulenta.	52
Figura 3.10. Variación de la integral de longitud de la escala turbulenta con respecto a la altura a 100 [m].	53
Figura 3.11. Función de densidad espectral.	55
Figura 3.12. Factor de exposición <i>kzt</i>	57
Figura 3.13. Presión equivalente media.	58

Figura 4.1. Chimenea de sección cilíndrica a) modelo 1 altura de 20 [m], b) modelo 2 altura de 65 [m] y c) modelo 3 altura de 100 [m].	61
Figura 4.2. Chimenea de sección cuadrada a) modelo 1 altura de 55 [m], b) modelo 2 altura de 65 [m] y c) modelo 3 altura de 100 [m]......	62
Figura 4.3. Condición de borde para los apoyos chimenea cilíndrica.....	63
Figura 4.4. Representación de un elemento tipo Shell.	64
Figura 4.5. Espectro de función de densidad de carga a la altura 20 [m], modelo1 chimenea cilíndrica.	67
Figura 4.6. Espectro de función de densidad de carga a la altura 65 [m], modelo2 chimenea cilíndrica.	68
Figura 4.7. Espectro de función de densidad de carga a la altura 100 [m], modelo3 chimenea cilíndrica.	68
Figura 4.8. Espectro de función de densidad de carga a la altura 55 [m], modelo1 chimenea cuadrada.	69
Figura 4.9. Espectro de función de densidad de carga a la altura 65 [m], modelo2 chimenea cuadrada.	69
Figura 4.10. Espectro de función de densidad de carga a la altura 100 [m], modelo3 chimenea cuadrada.....	70
Figura 4.11. Espectro de función de densidad de carga a la altura de 65 [m].	70
Figura 4.12. Definición de la densidad espectral de carga en SAP2 2000 v17.....	71
Figura 4.13. Presión equivalente media [N/m ²] asignada en SAP 2000 v17 Chimenea cilíndrica.	72
Figura 4.14. Definición de la densidad espectral de carga en SAP 2000 v17.	73
Figura 4.15. Aceleración asociada para generación de sismo alrededor de eje cartesiano x.	74
Figura 5.1. Función de densidad espectral.	79
Figura 5.2. Chimenea cilíndrica modelo1, tres primeros modos de oscilación.	80
Figura 5.3. Chimenea cilíndrica modelo2, tres primeros modos de oscilación.	80
Figura 5.4. Chimenea cilíndrica modelo3, tres primeros modos de oscilación.	80
Figura 5.5. Deformación de la Chimenea circular debido a la función de densidad espectral del viento turbulenta [cm], modelo1.	81

Figura 5.6. Deformación de la Chimenea circular debido a la función de densidad espectral del viento turbulenta [cm], modelo2.	82
Figura 5.7. Deformación de la Chimenea circular debido a la función de densidad espectral del viento turbulenta [cm], modelo3.	82
Figura 5.8. Deformación de la Chimenea circular debido a la Presión media del viento [cm], modelo1.....	84
Figura 5.9. Deformación de la Chimenea circular debido a la Presión media del viento [cm], modelo2.....	85
Figura 5.10. Deformación de la Chimenea circular debido a la Presión media del viento [cm], modelo3.....	85
Figura 5.11. Deformación de la Chimenea circular debido a la acción sísmica [cm], modelo1.....	87
Figura 5.12. Deformación de la Chimenea circular debido a la acción sísmica [cm], modelo2.....	88
Figura 5.13. Deformación de la Chimenea circular debido a la acción sísmica [cm], modelo3.....	88
Figura 5.14. Deformación de la Chimenea circular debido a la Comb1 [cm], modelo1.....	90
Figura 5.15. Deformación de la Chimenea circular debido a la Comb1 [cm], modelo2.....	91
Figura 5.16. Deformación de la Chimenea circular debido a la Comb1 [cm], modelo3.....	91
Figura 5.17. Comparación entre los desplazamiento máximo frente a la acción del viento y sísmica.	93
Figura 5.18. Función de densidad espectral.	96
Figura 5.19. Chimenea cuadrada modelo1, tres primeros modos de oscilación....	97
Figura 5.20. Chimenea cuadrada modelo2, tres primeros modos de oscilación....	97
Figura 5.21. Chimenea cilíndrica modelo3, tres primeros modos de oscilación. ...	98
Figura 5.22. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la función de densidad espectral del viento turbulenta en [cm], modelo1.....	99

Figura 5.23. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la función de densidad espectral del viento turbulenta en [cm], modelo2.....	99
Figura 5.24. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la función de densidad espectral del viento turbulenta en [cm], modelo3.....	100
Figura 5.25. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la Presión media del viento [cm], modelo1.....	102
Figura 5.26. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la Presión media del viento [cm], modelo2.....	102
Figura 5.27. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la Presión media del viento [cm], modelo3.....	103
Figura 5.28. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la acción sísmica [cm], modelo1.....	105
Figura 5.29. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la acción sísmica [cm], modelo2.....	105
Figura 5.30. Deformación de la Chimenea circular debido a la acción sísmica [cm], modelo3.....	106
Figura 5.31. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la Comb1 [cm], modelo1.....	108
Figura 5.32. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la Comb1 [cm], modelo2.....	108
Figura 5.33. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la Comb1 [cm], modelo3.....	109
Figura 5.34. Comparación entre los desplazamiento máximo frente a la acción del viento y sísmica.....	110
Figura 5.35. Comparación entre desplazamiento, Modelo 2 a los 65 [m] de altura.....	113
Figura 5.36. Comparación entre desplazamiento, Modelo 3, a los 100 [m] de altura.....	113
Figura 5.37. Tensión de compresión S22 en [kgf/cm ²], PL_32mm para la comb1, modelo3.....	116
Figura 5.38. Tensión S11 en [kgf/cm ²], PL_32mm para la comb1, modelo3.....	117

Figura 5.39. Tensión de compresión S22 en [kgf/cm ²], PL_32mm para la comb1, modelo3.....	119
Figura 5.40 Tensión S11 en [kgf/cm ²], PL_32mm para la comb1, modelo3.	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Intervalo de tiempo mínimos utilizado para realizar mediciones de viento.	11
Tabla 2.2. Velocidad Básica para diferentes estaciones del país [Fuente: (NCh432, Diseño Estructural: Cargas de viento, 2010)]......	14
Tabla 2.3. Contantes de exposición de terreno [Fuente: (NCh432, Diseño Estructural: Cargas de viento, 2010)]......	16
Tabla 2.4. Densidad espectral de potencia para diferentes normas.	25
Tabla 2.5. Diferentes expresiones para determinar la integral de la longitud de la escala turbulenta con respecto a una altura z.	29
Tabla 2.6. Categoría de terreno de acuerdo Fuente: (EUROCODIGO, 2005).....	30
Tabla 2.7. Coeficiente de fuerza C_f [Fuente: (NCh432, Diseño Estructural: Cargas de viento, 2010)].	32
Tabla 2.8. Variables para el cálculo del factor por efecto de ráfaga (NCh432, Diseño Estructural: Cargas de viento, 2010).....	36
Tabla 2.9. Factor de importancia de acuerdo a la categoría de la estructura.	38
Tabla 2.10. Valor de la aceleración efectiva máxima A_0 tabla 5.2 (NCh2369, 2003).	39
Tabla 2.11. Factores que dependen del tipo de suelo.....	39
Tabla 2.12. Definición de los tipos de suelos de fundación Tabla 5.3 (NCh2369, 2003).	40
Tabla 2.13. Valores de coeficiente sísmico máximo de acuerdo a la razón de amortiguamiento y al factor de respuesta.	42
Tabla 3.1. Correlación de las funciones de densidad espectral con respecto a la señal turbulenta.	56
Tabla 4.1. Descripción de modelos de chimeneas cilíndricas.	65
Tabla 4.2. Descripción de modelos de chimeneas cuadradas.	65
Tabla 5.1. Modos de vibración modelo1 chimenea cilíndrica.	77
Tabla 5.2. Modos de vibración modelo2 chimenea cilíndrica.	78

Tabla 5.3. Modos de vibración modelo3 chimenea cilíndrica.	78
Tabla 5.4. Desplazamientos sufridos en los modelos cilíndricos, por causa de la función de densidad espectral de carga.....	83
Tabla 5.5. Desplazamientos sufridos en los modelos cilíndricos, por causa de la presión media del viento.	86
Tabla 5.6. Desplazamientos sufridos en los modelos cilíndricos, por causa de la acción sísmica.	89
Tabla 5.7. Desplazamientos sufridos en los modelos cilíndricos, por causa del viento total.	92
Tabla 5.8. Modos de vibración modelo1.	94
Tabla 5.9. Modos de vibración modelo2.	95
Tabla 5.10. Modos de vibración modelo3.	95
Tabla 5.11. Desplazamientos sufridos en los modelos cuadrados, por cauda de la función de densidad espectral de carga.....	100
Tabla 5.12. Desplazamientos sufridos en los modelos cuadrados, por causa de la presión media del viento.	103
Tabla 5.13. Desplazamientos sufridos en los modelos cuadrados, por causa de la acción sísmica.	107
Tabla 5.14. Desplazamientos sufridos en los modelos cuadrados, por causa del viento total.	109
Tabla 5.15. Resumen Chimenea circular.	111
Tabla 5.16 Resumen Chimenea cuadrada.....	112

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Chile es un país con una alta actividad sísmica debido a la interacción de la Placa Sudamericana y la Placa del Pacífico. Todas las estructuras ubicadas a lo largo de nuestro país son diseñadas para resistir esta eventualidad como cargas sísmicas. Debido a este análisis y a la mayor magnitud de estas cargas que la gran mayoría de las estructuras presentes en Chile sean catalogadas como edificaciones de una rigidez superior a la del promedio mundial. Pero en ocasiones surge la necesidad de edificar estructuras más esbeltas, debido principalmente a limitaciones de terreno disponibles lo que obliga a crecer en altura. Por otro lado el mercado de materiales para la construcción hoy ofrece nuevas tecnologías, lo que permite la construcción de estructuras cada vez más livianas y por lo tanto ayuda a la condición de esbeltez. De esta forma, el efecto dañino en estructuras provocado por las cargas sísmicas, puede ser incluso menor que el producido por viento. Dada su naturaleza variable, la acción directa del viento sobre la estructura resistente (fenómeno fluctuante en el tiempo), el viento puede inducir otro tipo de fenómenos en estructuras esbeltas, hasta el punto en que esta vibración puede modificar las propias cargas aerodinámicas, Bajo este punto las fluctuaciones de velocidades o ráfagas, debido a la turbulencia atmosférica poseen alto contenido de energía en el rango de frecuencia entre 0.01-1 [Hz], excitando dinámicamente a un grupo limitado de estructuras con bajo amortiguamiento estructural y frecuencia natural aproximadamente inferior a 1 [Hz].

El escurrimiento de un fluido turbulento sobre un cuerpo genera presiones superficiales dependientes del tiempo. Este es el caso de estructuras ubicadas en la capa límite atmosféricas, donde la variación de las velocidades del viento en magnitud y dirección generan cargas dinámicas. Donde la respuesta estructural es dependiente del tiempo, en relación a deformaciones y tensiones. Si la estructura en cuestión se deforma significativamente por la acción de las fuerzas provocadas

por el viento, estas deformaciones cambian las condiciones iniciales de contorno para el flujo, modificando las fuerzas aerodinámicas que el fluido ejerce sobre el obstáculo, afectando nuevamente a los desplazamientos generados en el cuerpo. La interacción entre el movimiento de la estructura y el fluido circundante, es el objeto de la disciplina denominada aeroelasticidad. Desde el punto de vista estructural es de interés analizar cuando la deformación de la estructura modifica la configuración del flujo incidente, de forma que las fuerzas aerodinámicas tienden a seguir aumentando aún más la deformación del cuerpo, dando origen al fenómeno conocido como inestabilidad aeroelásticas. (Paz, 2014)

La actual Norma Chilena NCh 432 Of 2010, plantea la determinación de la carga de viento mediante tres metodologías: método simplificado, método analítico y túnel de viento. Los dos primeros métodos consideran el viento como una fuerza o presión dinámica estática, desestimando la fluctuación que posee la componente turbulenta del viento, y el tercer método es un ensayo mediante túnel de viento para determinar las cargas de diseño.

La investigación se centra en la respuesta dinámica de las estructuras flexibles, altas y esbeltas con bajo amortiguamiento, al enfrentarse a la acción del viento como carga fluctuante.

La esbeltez de la estructura puede acentuar dicha condición que favorece la participación del viento con énfasis en el rango de frecuencia asociado a ráfagas de viento, las cuales tienden a ser intensas desde el punto de vista cinemático.

La normativa vigente en Chile condiciona las aristas asociadas al estudio del comportamiento dinámico del viento como una carga fluctuante y turbulenta. Es así como en el presente documento se realiza el análisis de turbulencias en el dominio de la frecuencia permitiendo descomponer la respuesta de acuerdo a los modos de vibración de la estructura y vincularla con las variaciones temporales de la excitación de manera de describir lo mejor posible el comportamiento aleatorio de ráfagas, condicionadas a su vez por la aplicación de velocidades medias distribuidas en altura en la Ciudad de Concepción, Octava Región, Chile.

En consideración de la territorialidad de la zona donde se realiza el análisis propuesto, es necesario observar el comportamiento del sismo como una componente absolutamente presente en las edificaciones de la región. Se hace esta mención en asociación al creciente desarrollo de estructuras cada vez más altas (parámetro directamente asociado a la esbeltez, y por ende a la participación del viento) y la periodicidad de eventos sísmicos que no deben ser despreciados en cualquier diseño estructural. Se abarcara en esta investigación la comparación entre las cargas dinámicas producidas por el viento y cargas sísmicas de acuerdo al análisis elástico dinámico (Análisis Modal Espectral Lineal) de la normativa sísmica NCh 2369 Of 2003 para la acción sísmica.

En la búsqueda de información bibliográfica se destaca el aporte propuesto por Alan Garnett Davenport (1932-2009) y su laboratorio (BLWTL), los que han contribuido notablemente en comprender de mejor manera la interacción viento-estructura.

Davenport dio un enfoque probabilístico a la acción del viento, reconociendo las características del viento dentro de la capa límite natural en el tiempo y dominio espaciales. Predijo las respuestas de estructuras utilizando la teoría de vibración aleatoria y datos aerodinámicos, desde el adecuado escalamiento de los modelos para realizar los ensayos de túnel de viento. Su enfoque innovador fue capaz de evaluar correctamente la respuesta oscilatoria de estructuras debida al viento inducido por vibraciones resonantes, detectando la vulnerabilidad que se requieren compensar y realizar cambios en el diseño. Es así que Alan Davenport se involucró en la participación de códigos y estándares de muchos países que se presentan en numerosos comités para mejorar las normas de construcción para soportar mejor las condiciones climáticas externas, como la aplicación de modelos físicos que aparecen en los principales códigos y normas de construcción, incluyendo el NBCC y la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles Norma ASCE 7. (Isyumov, 2009) Alan Davenport publicó ampliamente sus ideas, sus contribuciones se mencionan en libros y documentos técnicos en todo el mundo, además de ser autor de más 200 artículos científico durante su carrera. Esto hizo

que Alan Davenport fuera reconocido internacionalmente y muy solicitado como consultor es así que participó en el diseño y estudios de muchos edificios de gran altura y puentes con grandes longitudes de luz, a continuación se mencionan algunos de ellos (Isyumov, 2009): El World Trade Center en que incluía las torres gemelas en la Ciudad de Nueva York (EE.UU), con una altura de 526,3 metros (1973); El Edificio Steel Tower en la Ciudad de Pittsburgh (EE.UU), con una altura de 256 [m] (1970); El Edificio Bank of China Tower, Ciudad de Hong Kong (China), con una altura de 315 metros (1992) ;El Puente de la Confederación, Canadá con una longitud de 12,9 [km] (1997); El puente de Tsing Ma, Ciudad de Hong Kong (China) con una longitud de 2,16 [km] (1997); El puente Sunshine Skyway, Ciudad de Pittsburgh (EE.UU), con una longitud de 1,8 [km] (1987).

La importancia de mencionar a Alan Davenport, pionero en la investigación de interacción viento-estructura, radica en su participación en la génesis de diversos códigos de diseño como ASCE-7, fundamental en la definición de la normativa actual chilena, afectando directamente al diseño de estructuras tanto en la región, como en Chile.

Para la región del Bío Bío, Hidalgo y Nozaki (2010) caracterizaron el viento de la zona, su dirección, velocidad y carga estática entre otros tópicos, abriendo la posibilidad hacia futuras líneas de investigación asociadas al análisis dinámico del viento en estructuras esbeltas. En su estudio se realizaron mediciones instantáneas cada 2 segundos en intervalos de 1 hora, con lo que se consigue medir la turbulencia del viento, la distribución de velocidades con respecto a la altura, y finalmente el estudio de fenómenos dinámicos sobre la estructura.

En la presente investigación se hace énfasis en la importancia de la forma y esbeltez de la estructura, la implicancia en el desarrollo de las cargas producidas por el viento y cómo es posible a través de diversas herramientas computacionales que actualmente son utilizadas en la ingeniería estructural (SAP2000), obtener parámetros característicos posibles de emplear en el diseño estructural cotidiano.

1.2. Hipótesis

Considerando las condiciones naturales de viento y sísmicas de la región de Bío Bío, es posible que las cargas de viento fluctuantes generadas sobre chimeneas esbeltas sean más relevantes que las solicitaciones sísmicas.

1.3. Objetivo Generales y Específicos

Objetivos generales

- El objetivo general de esta investigación, es comparar el efecto producido por la acción del viento y sísmica en estructuras esbeltas con bajo amortiguamiento estructural y frecuencia natural aproximadamente inferior a 1 [Hz] ubicada en la ciudad de Concepción, Chile.

Objetivos específicos

- Determinar el comportamiento energético del viento como variable no estacionaria en función de la frecuencia.
- Encontrar la función de densidad espectral de viento y función de densidad de carga, producida por la componente turbulenta del viento meteorológico a partir de una muestra de la provincia de Concepción.

- Comparar la función de densidad espectral del viento turbulento, obtenida para la ciudad de Concepción, con las funciones de densidad espectral de viento propuestas por las normas internacionales más reconocidas ASCE-7, EUROCODIGO y AIJ (Norma Japonesa).
- Determinar con qué dimensiones de esbeltez (altura/ancho), la chimenea se ve afectada por la carga dinámica producida por el viento.
- Comparar resultados de la respuesta de la chimenea, frente a la carga dinámica producida por el viento, y carga dinámica producida por el sismo.
- Identificar si la sección transversal de la chimenea afecta directamente al comportamiento y fuerza ejercida por la acción del viento.

1.4. Metodología

Las velocidades utilizadas fueron proporcionadas desde una estación meteorológica provista de un anemómetro de marca AMMONIT, del tipo *first class*, con una veleta tipo “compact” y el data logger tipo WICO-32. La ubicación exacta de la estación es 36°49’47” Sur y 70°01’42” este, ubicada en el campus Concepción, de la Universidad de Concepción, a una altura de 120 [m] sobre el nivel del mar. La medición de las velocidades instantáneas fue captada cada dos segundos por una hora, durante 19 horas 52 minutos 32 segundos.

Esta investigación utiliza como base a la investigación propuesta por Hidalgo y Nozaki (2010) quienes estudiaron el viento con un enfoque probabilístico de la ciudad de Concepción, obteniendo la función de probabilidad que mejor se ajusta a la muestra (Weibull). Se realizó un análisis de valores extremos, probabilidad de excedencia y periodo de retorno, dirección del viento, etc.

Para lograr los objetivos de esta investigación se utilizará la herramienta matemática Matlab (2010), en el cual se realizarán rutinas a modo de filtrar la velocidad logrando identificar la fluctuación o turbulencia del viento como un registro aleatorio, mediante un análisis estadístico. Por consiguiente, implementar la formulación que permitirá obtener la función de densidad espectral de viento, como la densidad espectral de carga, con el fin de encontrar frecuencias relacionadas a la componente de agitación del viento, a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT).

Posteriormente, se analizará el efecto de la estructura mediante el programa estructural SAP2000 v17, en el cual se ingresará como *Input* la densidad espectral de carga de viento turbulento obtenida mediante Matlab y el espectro sísmico de acuerdo a la normativa sísmica NCh 2369 Of 2003 para la acción sísmica. Con este modelo se evaluará la respuesta de la chimenea al interactuar con el viento y sismo por separado mediante la aplicación del método de elementos finitos, con el fin de obtener el nivel de participación del viento por sobre el sismo.

El modelo estructural a evaluar consiste en una chimenea estándar, según su utilización cotidiana en la industria Chilena considerando diferentes grados de esbeltez.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Caracterización del viento

2.1.1 Introducción

La energía del viento deriva del sol, los gradientes de temperatura entre las diferentes partes de la superficie terrestre producen diferencias de presiones, generan la denominada circulación atmosférica. Adicionalmente, la circulación atmosférica es afectada por efectos estacionales, efectos geográficos y la rotación terrestre.

La circulación atmosférica se realiza de tal manera que los diferentes patrones de movimientos son usualmente independientes en el espacio y en el tiempo. En función de la dimensión espacial y de la duración del movimiento, los patrones de movimiento atmosférico se pueden clasificar en un rango que abarca desde los fenómenos de turbulencia, a sistemas climáticos locales, hasta las ondas planetarias. Estos fenómenos son referidos como de micro escala, de escala convectiva y macro escala (Páez, 2014).

A partir de la altura sobre la superficie terrestre, pueden diferenciarse tres zonas en el perfil de velocidad del viento:

- **Atmósfera libre o Región geográfica**, en este caso el flujo del aire se torna relativamente suave y regular para pequeños espacios de tiempo, ya que deja de ser afectado por las obstrucciones terrestres. A esta altura ($z > 200-1000$ [m]) la velocidad del viento es proporcional al gradiente de presiones atmosféricas local y es llamada velocidad gradiente (V_g).
- **Capa límite planetaria (PBL)**, forma parte de dos subcapas, capa de transición o región de Ekman ($100 \leq z \leq 200-1000$ [m]) y capa límite superficial (SBL) ($z < 100$ [m]) a nivel de la superficie terrestre. El libre flujo del aire es interrumpido por las fuerzas de fricción entre las masas de aire

en movimiento y las obstrucciones terrestres, denominada rugosidad del terreno. Esta interacción lleva al surgimiento de la llamada capa límite atmosférica, la cual es caracterizada por un flujo de aire turbulento. (Ver Figura 2.1).

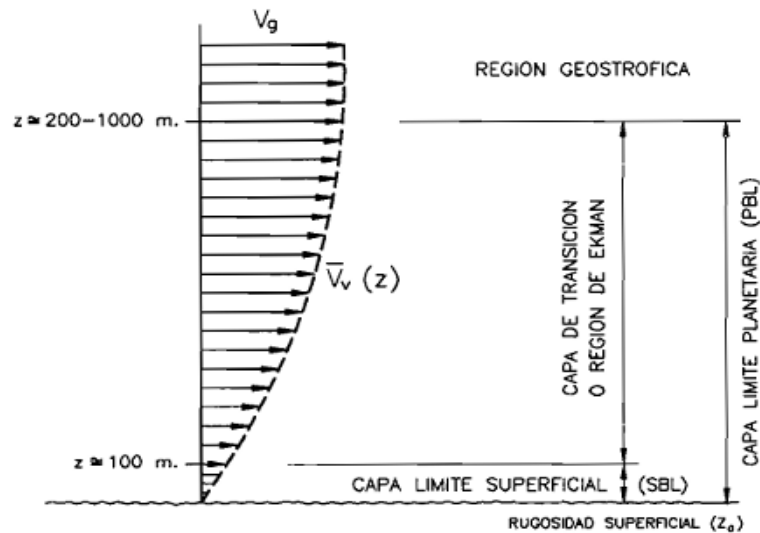


Figura 2.1. Perfil vertical de velocidades de acuerdo a la altura. [Fuente (ROM, 1995)].

2.1.2 Estado de viento

El modelo clásico general para la caracterización del viento en las capas bajas de la atmosfera (Capa límite atmosférica o planetaria) parte por admitir una serie de hipótesis simplificadoras en general limitadoras de la variabilidad aleatoria del mismo, que cumpliéndose razonablemente en la naturaleza permitan la descripción del viento en una área y durante un tiempo dados, mediante sus características en un punto y en un cierto instante. Dicho modelo está basando en suponer que un punto determinado el viento puede considerarse como una

sucesión continua de estados de viento o situaciones energéticas estacionarias de pequeña duración.

Se define como estado de viento a la situación temporal espacial del viento en el cual puede suponerse el fenómeno como energético y estadísticamente estable. Es decir, el tiempo durante el cual se puede considerar que los factores que afectan al viento (generación y disipación) en un área dada se mantienen en equilibrio. Representa, por lo tanto, cada una de las situaciones en la que se puede separar la continua evaluación del viento, en cada una de ellas el viento puede ser tratado como un proceso aleatorio estacionario¹ en el tiempo y Ergódico².

En situaciones ideales puede admitirse que en condiciones ideales³, el viento es horizontalmente homogéneo en el espacio, la no homogeneidad horizontal del viento es debida fundamental a condiciones de la superficie terrestre (cambios en la rugosidad superficial e irregularidades topográficas principalmente) o la naturaleza meteorológicas del fenómeno que lo causa (huracanes, ciclones tropicales, tornados).

La duración de un estado de viento depende de la magnitud del fenómeno y de las masas que se genere. Como orden de magnitud se puede considerar que un estado de viento tiene duración entre 1 y 3 horas (ROM, 1995). Bajo estas condiciones, puede admitirse la descripción del viento en periodos cortos de tiempo a partir de una única observación o registro. El intervalo mínimo de registro viene impuesto por la exigencia de calidad estadística de la muestra. Como intervalos aceptables se pueden considerar aquellos de registro entre 10 minutos y 1 hora, con una cadencia de 1 a 3 horas, se muestra en la Tabla 2.1 los intervalos de tiempo por diferentes Normas, en cual se muestra los intervalos de registro propuestos para una calidad estadística recomendada.

¹Estacionario: Sus parámetros estadísticos no cambian con el tiempo.

²Ergódico: Muestras temporales distintas de extensión finita suficiente, son estadísticamente iguales los parámetros estadísticos.

³Viento no locales o de gran escala soplando sobre una superficie plana de gran longitud y rugosidad uniforme.

Tabla 2.1 Intervalo de tiempo mínimos utilizado para realizar mediciones de viento.

Norma	Intervalo de muestreo	Intervalo de tiempo
ASCE 7-10 ⁴ (EE.UU)	3 [s]	1 [hora]
AIJ-04 ⁵ (Japón)-	3 [s]	10 [min]
EUROCÓDIGO-05 ⁶ (Europa)	3 [s]	10 [min]
CIRSOC 102-05 ⁷ (Argentina)	3 [s]	1 [hora]

La descripción de las características de un estado de viento puede llevarse a cabo según dos modelos aleatorios Modelo estadístico y Modelo espectral. Ambos modelos son complementarios para clarificar la naturaleza irregular del viento, y ambos son utilizados para calcular la acción del viento sobre las estructuras. Debido a que la variación de la velocidad del viento en el tiempo está compuesta de una parte media o constante y una parte fluctuante.

$$V(t) = \bar{V}_v + v_{vf}(t) \quad (2.1)$$

Donde,

$V(t)$: Variación de la velocidad en el tiempo.

\bar{V}_v : Velocidad media del viento.

$v_{vf}(t)$: Velocidad fluctuante del viento.

⁴ ASCE 7-10: Minimum design loads for buildings and other structures.

⁵ AIJ: Architectural Institute of Japan Recommendations for load on buildings.

⁶ EUROCODIGO: Eurocode 1, Actions on structures.

⁷ CIRSOC 102: Acción del viento sobre construcciones.

2.1.3 Modelo estadístico

2.1.3.1 Características del modelo estadístico

El viento queda caracterizado por los parámetros estadísticos deducidos a partir de registros de velocidades instantáneas.

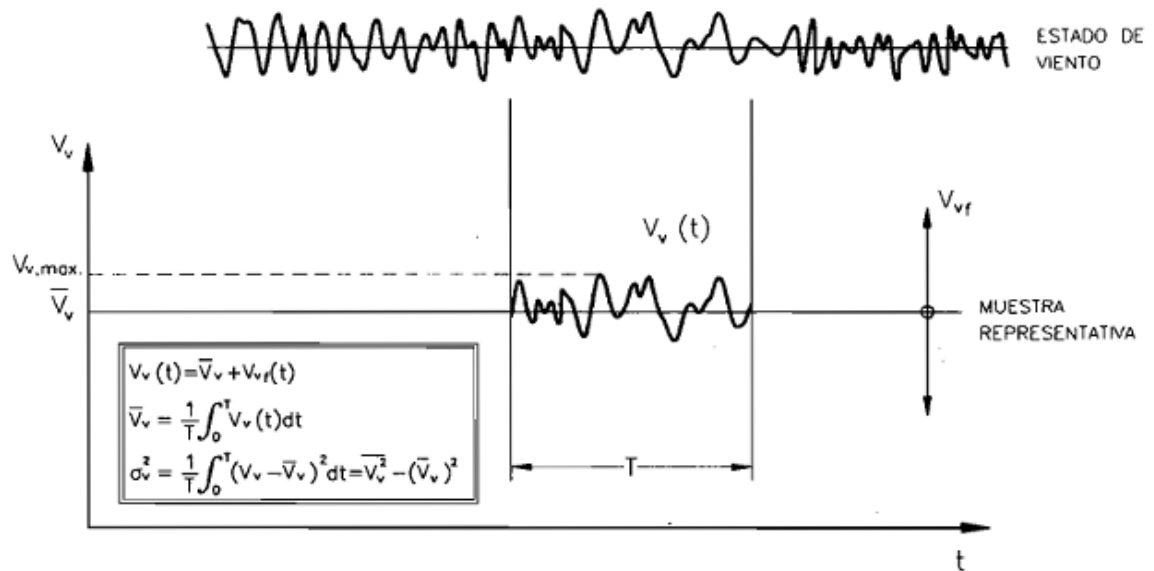


Figura 2.2. Modelo estadístico de descripción de un estado de viento representativo. [Fuente: (ROM, 1995)].

2.1.3.2 Velocidad media

La velocidad del viento, debido a la naturaleza turbulenta de la capa límite atmosférica, está siempre fluctuando. Es decir, el flujo de aire presenta variaciones de distintas escalas temporales, que van desde unos segundos hasta varios minutos. Por lo tanto, una evaluación de la intensidad del viento puede ser

obtenida mediante su velocidad media, promediada a lo largo de algún intervalo de tiempo.

$$\bar{V}_v = \frac{1}{T} \int_0^T v_v(t) dt \quad (2.2)$$

Se desprende de lo anterior, que el valor de la velocidad media del viento obtenido a partir de un registro de velocidades de viento no es único, siendo dependiente del período de muestreo T , del instante inicial t_1 y de la frecuencia de muestreo. Ya que en la práctica no contaríamos con datos continuos y por tanto en lugar de una integral deberíamos utilizar una sumatoria, es decir la media de los datos.

2.1.3.3 Velocidad Básica

La velocidad básica del viento V_b corresponde a un valor de referencia que ocupan distintas normas para el cálculo de solicitaciones de viento, y se determina a partir de registros históricos de velocidades de viento medidas en una estación meteorológica para una localidad en particular, medida a 10 metros de altura sobre la superficie en mar abierto o campo abierto sin obstáculos. La velocidad básica se transforma en velocidad de diseño, para un terreno en particular, introduciendo las condiciones locales de topografía y rugosidad, tamaño e importancia de la estructura.

$$V_b = \bar{V}_v \quad (2.3)$$

Las velocidades básicas del viento indicadas en los mapas de las distintas normas de diseño de estructuras, se obtienen a partir de registros de velocidades máximas del viento sin considerar su dirección (no direccionales). Debido a las continuas fluctuaciones que experimenta el viento por el hecho de ser un flujo turbulento y no laminar, generalmente no se reportan valores instantáneos de velocidad y dirección del viento, sino que se obtienen valores medios en un período de tiempo en particular. A partir de esta medición, distintas normas asumen diferentes criterios de diseño, dependiendo del intervalo de promedio que se considere.

Tabla 2.2. Velocidad Básica para diferentes estaciones del país [Fuente: (NCh432, Diseño Estructural: Cargas de viento, 2010)].

Nº	Latitud S	Longitud O	Estación	V m/s
1	18° 20'	70° 20'	Arica	23,0
2	20° 32'	70° 11'	Iquique	25,8
3	22° 27'	68° 55'	Calama	36,8
4	23° 26'	70° 26'	Antofagasta	24,3
5	29° 54'	71° 12'	La Serena	32,1
6	30° 14'	71° 38'	DGF-Lengua de Vaca	34,6
7	32° 08'	71° 31'	CENMA-Pichidanguí	29,2
8	33° 23'	70° 47'	Pudahuel	30,3
9	33° 26'	70° 39'	Torre Entel	24,1
10	33° 27'	70° 31'	La Reina	22,4
11	33° 34'	70° 37'	La Platina	16,7
12	35° 13'	72° 17'	Putú	29,0
13	36° 46'	73° 03'	Concepción	40,0
14	36° 47'	73° 07'	ENAP-Bío Bío	43,5
15	38° 45'	72° 38'	Temuco	35,2
16	41° 26'	73° 07'	Puerto Montt	33,9
17	42° 55'	72° 43'	Chaitén	49,2
18	43° 10'	73° 43'	Quellón	49,7
19	43° 38'	71° 47'	Palena	38,2
20	45° 35'	71° 07'	Coyhaique	44,8
21	45° 54'	71° 72'	Balmaceda	47,6
22	46° 32'	71° 41'	Chilo Chico	41,5
23	47° 14'	72° 55'	Cochrane	38,1
24	53° 00'	70° 51'	Punta Arenas	53,5

Estas velocidades han sido registradas principalmente en aeródromos y aeropuertos.

2.1.3.4 Perfil de velocidades

En la capa límite terrestre la velocidad media del viento aumenta de forma continua con la altura, para una condición determinada de exposición del terreno. Esta variación de velocidad con respecto a la altura se puede obtener mediante dos leyes, siendo la ley potencial y la ley logarítmica las que tradicionalmente han recibido mayor aceptación. La primera es utilizada por el ASCE 7 se basa en la apreciación empírica del fenómeno apoyada con el estudio de registro reales a distintas alturas. La segunda ley es utilizada por el EUROCODIGO la cual se deduce de las ecuaciones de mecánica de fluidos y del análisis dimensional, suponiendo que cerca del suelo el gradiente vertical de velocidad depende únicamente de la densidad del fluido de la altura del terreno y del esfuerzo cortante en la superficie. En esta investigación se utilizara lo propuesto por la ASCE 7 (Ley potencial).

En el modelo de variación potencial el perfil de velocidad media en la capa límite terrestre se expresa como:

$$\bar{V}_{vz} = \bar{b} \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\alpha}} V_b \quad (2.4)$$

Donde

\bar{z} : Corresponde a la altura en la cual se necesita evaluar la velocidad del viento, esta altura debe considera una reducción de acuerdo a la siguiente expresión $\bar{z} = 0.6h$, y si $h \leq \bar{z}_{min}$, entonces ($\bar{z} = \bar{z}_{min}$) [m].

$\bar{\alpha}$: Exponente de la ecuación de potencia para vientos promediados en un periodo de una hora.

\bar{b} : Factor de velocidad de viento promediado en un periodo de una hora de acuerdo al tipo de categoría de exposición de terreno.

V_b : Velocidad básica [m/s].

En el modelo de variación potencial el perfil de velocidad de ráfaga en la capa limite terrestre se expresa como:

$$\bar{V}_{3s} = \hat{b} \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{\hat{\alpha}} V_b \quad (2.5)$$

Donde,

$\hat{\alpha}$: Inverso del exponente de la ecuación de potencia de la velocidad de ráfaga de 3 segundos.

\hat{b} : Factor de ráfaga de 3 segundos.

Tabla 2.3. Contantes de exposición de terreno [Fuente: (NCh432, Diseño Estructural: Cargas de viento, 2010)].

Exposición	α	z_g m	$\hat{\alpha}$	\hat{b}	$\bar{\alpha}$	\bar{b}	c	ℓ m	\bar{z}	z_{min} m
B	7,0	365,76	1/7	0,84	1/4,0	0,45	0,30	97,54	1/3,0	9,14
C	9,5	274,32	1/9,5	1,00	1/6,5	0,65	0,20	152,4	1/5,0	4,57
D	11,5	213,36	1/11,5	1,07	1/9,0	0,80	0,15	198,12	1/8,0	2,13

z_{min} = mínima altura usada para asegurar que la altura equivalente \bar{z} es mayor que $0,6 h z_{min}$.

Para edificios con $h \leq z_{min}$ \bar{z} se debe tomar z_{min} .

2.1.4 Modelo espectral

2.1.4.1 Características del viento turbulento

La turbulencia es causada por el choque de las partículas del viento con obstrucciones tales como la topografía del terreno o con otras partículas de viento en direcciones opuestas, generándose de esta manera remolinos o ráfagas. La velocidad del viento se describe descomponiendo esta velocidad en una velocidad media $\bar{V}_v(z,t)$, a la que se le superponen las componentes de agitación turbulenta correspondientes en cada dirección del sistema de coordenadas: $u(t)$ componente lateral, $v_{vf}(t)$ componente longitudinal y $w(t)$ componente vertical, cabe señalar la componente vertical y lateral de velocidad de agitación turbulenta son raramente consideradas en el cálculo de la acción producidas por el viento, ya que la componente longitudinal es la más relevante para estimaciones de las acciones producidas por el viento sobre las estructuras (Ver Figura 2.3 y Figura 2.4).

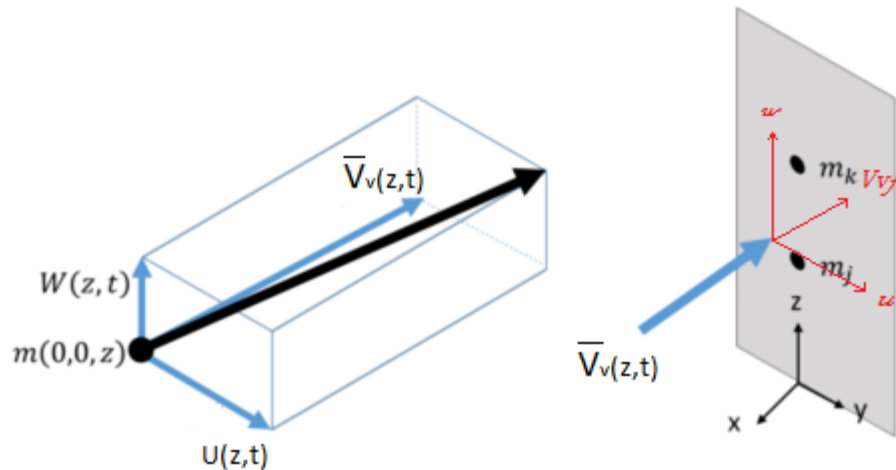


Figura 2.3. Componente del viento predominante para un punto $m(0, 0, z)$.

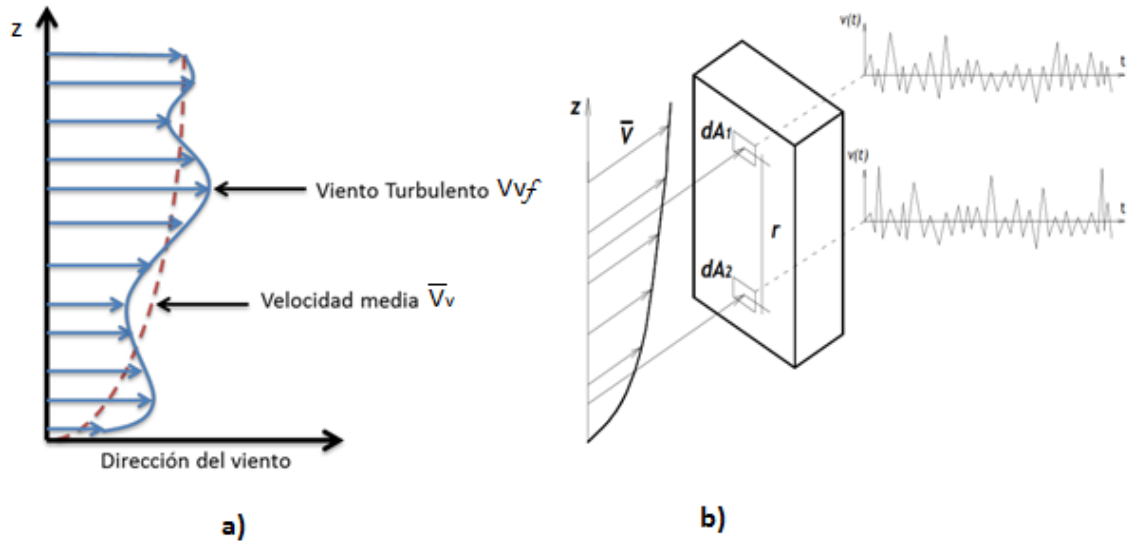


Figura 2.4. a) Componente del viento medio y viento turbulento b) componente del viento medio y viento turbulento en el tiempo.

2.1.4.2 Función de densidad espectral o de Potencia

Se considera a continuación solamente el análisis de la componente longitudinal turbulenta ($v_{vf}(t)$), como se mencionó anteriormente es la más importante en el estudio de la interacción viento – estructura. Bajo esta condición, si la componente turbulenta es periódica, con media nula y periodo T, su valor en cualquier instante de tiempo t se podría expresar mediante su desarrollo en serie de Fourier:

$$v_{vf}(t) = \sum_{j=1}^{\infty} C_j \cos\left(\frac{2\pi j}{T}t - \varphi_j\right) \quad (2.6)$$

Y al ser una función de media nula $\overline{v_{vf}}(t) = 0$, el valor cuadrático medio y la varianza coinciden, de modo que:

$$\sigma^2_{v_{vf}} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} v_{vf}^2(t) dt = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} C_j^2 \quad (2.7)$$

Según la expresión (2.7) los cuadrados de los coeficientes del desarrollo de Fourier, representan la contribución de cada armónico al valor cuadrático medio de la función, y en consecuencia son una medida de energía cinética asociada a cada frecuencia de la componente longitudinal de la turbulencia, es decir, la función de densidad espectral.

Sin embargo, este procedimiento no resulta aplicable al viento atmosférico porque la velocidad de fluctuación $v_{vf}(t)$ no es periódica; tal inconveniente podría quedar solventado de admitirse que $v_{vf}(t)$ se comporta como una función periódica de periodo infinito, lo cual exigiría que la función $v_{vf}(t)$ fuera diferenciable en partes en cualquier intervalo infinito de tiempo, y que existiera y fuera finita la integral.

$$I_{|v_{vf}|} = \int_{-\infty}^{\infty} |v_{vf}(t)| dt \quad (2.8)$$

Bajo estas circunstancias resulta factible efectuar el desarrollo de Fourier de $v_{vf}(t)$, de manera que esta función se puede expresar como la suma de infinitas funciones armónicas de frecuencia n , amplitud C_n y desfase φ_n , apropiados.

$$v_{vf}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} C_n \cos(2\pi n t - \varphi_n) d = \int_{-\infty}^{\infty} (A_n \cos(2\pi n t) - B_n \sin(2\pi n t)) dn \quad (2.9)$$

La comparación de los dos últimos términos de (2.9) resulta $C_n^2 = A_n^2 + B_n^2$, $\varphi_n = \arctan(A_n/B_n)$, estando los distintos coeficientes C_n, A_n y B_n dados por la expresiones:

$$C_n = \int_{-\infty}^{\infty} Vvf(t) \cos(2\pi nt - \varphi_n) dt \quad (2.10)$$

$$A_n = \int_{-\infty}^{\infty} Vvf(t) \cos(2\pi nt) dt \quad (2.11)$$

$$B_n = \int_{-\infty}^{\infty} Vvf(t) \sin(2\pi nt) dt \quad (2.12)$$

Para calcular la integral σ^2_{Vvf} (2.7) en el límite $T \rightarrow \infty$, en el integrando $Vvf^2(t)$ se sustituye una vez la función $Vvf(t)$ por su expresión según (2.9), tras invertir el orden de integración resulta:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} Vvf^2(t) dt &= \int_{-\infty}^{\infty} Vvf(t) \left[\int_{-\infty}^{\infty} C_n \cos(2\pi nt - \varphi_n) dn \right] dt \\ \Leftrightarrow \int_{-\infty}^{\infty} C_n \left[\int_{-\infty}^{\infty} Vvf(t) \cos(2\pi nt - \varphi_n) dt \right] dn &= \int_{-\infty}^{\infty} C_n^2 dn = 2 \int_0^{\infty} C_n^2 dn \end{aligned} \quad (2.13)$$

Nótese que la última de las igualdades de (2.13) se puede escribir gracias a que C_n^2 tiene un carácter simétrico respecto al origen. Planteando este razonamiento respecto a la turbulencia meteorológica habría que considerar que de la componente horizontal de la velocidad de agitación turbulenta $Vvf(t)$, que tiene media nula, se puede conocer su valor en un cierto intervalo de tiempo T , pero no en todo el intervalo que se extiende desde $-\infty$ hasta ∞ .

La alternativa para calcular la función de densidad espectral podría ser suponer que $Vvf(t)$, es nula fuera del intervalo T , calculando entonces su transformada de Fourier, que será también función del periodo T , y determinar su varianza como el límite para periodos de tiempo grandes, es decir:

$$\sigma^2_{Vvf} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} Vvf^2(t) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_0^{\infty} C_n^2(T) dn = \int_0^{\infty} Suu(n) dn \quad (2.14)$$

De donde se obtiene la función de densidad espectral:

$$Suu(n) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} C_n^2 \quad (2.15)$$

Se debe notar que el procedimiento así planteado resulta inconsistente, pues aun que se ha admitido que la función $Vvf(t)$ es desarrollable en serie de Fourier, en realidad no se cumple la condición relativa a la integral (2.8); para evitar este formalismo se puede recurrir a la función de autocorrelación $R_{uu}(t)$, definiendo la función de densidad espectral en términos de la transformada de Fourier de esta última. Para ello es parte de la expresión (2.15), sustituyendo A_n^2 y B_n^2 por (2.11) y (2.12) respectivamente, y tras cierta manipulación.

$$\begin{aligned} Suu(n) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} C_n^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} (A_n^2 + B_n^2) \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \left[\int_{-\infty}^{\infty} Vvf(\tau_1) \cos(2\pi n\tau_1) d\tau_1 \int_{-\infty}^{\infty} Vvf(\tau_2) \cos(2\pi n\tau_2) d\tau_2 \right. \\ &\quad \left. + \int_{-\infty}^{\infty} Vvf(\tau_1) \sin(2\pi n\tau_1) d\tau_1 \int_{-\infty}^{\infty} Vvf(\tau_2) \sin(2\pi n\tau_2) d\tau_2 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Vvf(\tau_1) Vvf(\tau_2) \cos(2\pi n(\tau_2 - \tau_1)) d\tau_1 d\tau_2 = \\
&= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Vvf(\tau) Vvf(\tau + t) \cos(2\pi nt) d\tau dt \\
&= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \cos(2\pi nt) \left[\int_{-\infty}^{\infty} Vvf(\tau) Vvf(\tau + t) d\tau \right] dt = \\
&\Rightarrow S_{uu}(n) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \cos(2\pi nt) R_{uu}(t) dt \tag{2.16}
\end{aligned}$$

La evaluación de la respuesta resonante de la estructura requiere el conocimiento de la distribución en frecuencias de la componente turbulenta de la velocidad del viento Vvf .

Los patrones de movimiento atmosférico pueden cuantificarse en función de las diferentes frecuencias (o escalas temporales) a través del espectro de viento o autoespectro. En otras palabras, el autoespectro muestra la variación del viento en función de las diferentes frecuencias.

En general, en un espectro típico como en el que se muestra según la Figura 2.5 aparece un peak en la zona de frecuencia altas, la que tiene periodos comprendidos entre dos segundos ($n = 0,5$ [Hz]) y unos cinco minutos ($n = 3 \times 10^{-3}$ [Hz]), que señala el régimen de ráfagas de la escala micrometeorológica. También parece un peak en la zona correspondiente a los periodos próximos a doce horas ($n = 2 \times 10^{-5}$ [Hz]), característicos del régimen de brisas que genera la alternancia de días y noches. Y un tercero cuyo origen está en los fenómenos meteorológicos asociados a anticiclones, que presentan periodos del orden de cuatro días ($n = 3 \times 10^{-6}$).

En el intervalo de periodos comprendido entre diez minutos y dos horas. Esta zona de frecuencia de poca energía se conoce como hueco espectral, y su existencia permite asegurar que las velocidades medias promediadas en intervalos de tiempo incluidos en dicho hueco (con periodos comprendidos entre diez minutos y una

hora) son magnitudes muy estables, cuyo valor cambia poco al modificar la duración del periodo de promedio. Por esta razón en las normas de cálculo de las acciones del viento de muchos países se toma como velocidad de referencia del viento el valor medio obtenido utilizando un periodo de diez minutos para promediar, como es el caso del EUROCODIGO-05 y ROM (1995). La existencia de este hueco espectral es la base para los métodos de determinación de cargas sobre estructuras, ya que permite separar el problema en la contribución de dos efectos. Por un lado se tiene en cuenta el efecto climático, que se estima considerando la distribución de probabilidad de la velocidad promediada en un intervalo de tiempo corto (diez minutos y 1 hora), que se introduce como una velocidad o presión dinámica de referencia, y como este promedio elimina la contribución de la turbulencia generada por la interacción del flujo con el suelo (capa límite terrestre). La contribución de esta turbulencia se considera por otro lado como el efecto de ráfaga asociadas al paso de los torbellinos generadas en la capa límite del suelo, que se modela generalmente como un factor de *peak* o de ráfaga en la presión dinámica o en la carga aerodinámica.

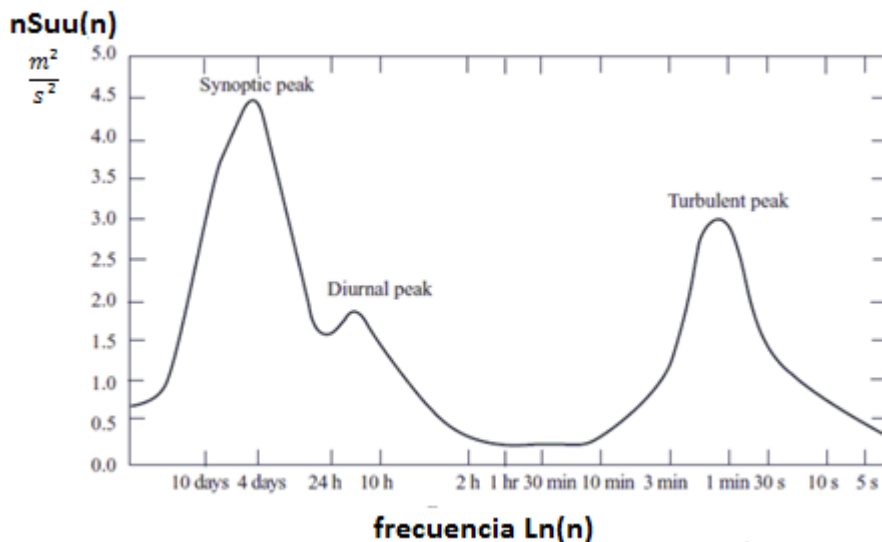


Figura 2.5. Variación con la frecuencia del producto de la frecuencia por la función de densidad espectral del viento meteorológico, $nSuu(n)$. [Van der Hoven, 1957].

2.1.4.3 Autocorrelación

La función de autocorrelación de una variable aleatoria describe la dependencia entre los valores de la variable en consideración en dos instantes de tiempo diferentes. Una estimación de la dependencia entre $Vvf(\tau)$ y $Vvf(\tau + t)$ se obtiene evaluando el valor medio del producto de esos dos valores de la variable en el periodo de observación T , es decir:

$$R_{uu}(t) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} Vvf(\tau)Vvf(\tau + t)dt \quad (2.17)$$

La cual permite obtener una medida de la independencia de la variable vf para los instantes t y $\tau + t$ para una altura determinada.

A continuación en la formulación que sigue se denotará la componente turbulenta como $Vvf(\tau) = u$

2.1.4.4 Función de densidad espectral o de Potencia

Para conocer la distribución de frecuencias de las ráfagas y determinar si existe riesgo de que las componentes no estacionarias de la velocidad del viento exciten la estructura de interés, es necesario establecer la función de densidad espectral de potencia, la cual es adimensional; la forma habitual de representar esta función es mediante:

$$R_N(z,n) = \frac{nS_{uu}(z,n)}{\sigma^2} \quad (2.18)$$

Donde,

n : Frecuencia [Hz].

$S_{uu}(z,n)$: Densidad espectral de la componente turbulenta (u) del viento [m²/s].

Este espectro de densidad de potencia, indica cómo se distribuye la energía cinética de la turbulencia entre diferentes frecuencias.

Los códigos de diseño establecen esta función de la forma (Muñoz C, 2008):

$$R_N(z,n) = \frac{af_L^\alpha}{(1 + bf_L^\beta)^\gamma} \quad (2.19)$$

Donde los parámetros α, β, γ se ajustan a partir de mediciones experimentales.

En Tabla 2.4 se muestra la función de densidad de potencia por diferentes códigos:

Tabla 2.4. Densidad espectral de potencia para diferentes normas.

ASCE 7-2010 y NCh 432-2010	$R_N(z,n) = \frac{7.47N_1}{(1 + 10.3N_1)^{5/3}}$	$N_1 = \frac{nL_{\bar{z}}}{\bar{V}_z}$
AIJ-2004	$R_N(z,n) = \frac{4x}{(1 + 71x^2)^{5/6}}$	$x = \frac{f_D L_H}{\bar{U}}$
EUROCODIGO-2005	$R_N(z,n) = \frac{6.8x}{(1 + 10.2x^2)^{5/3}}$	$x = \frac{nL(z)}{V_m}$

Donde,

n, f_D : Frecuencia [Hz].

$\overline{V_z}, \overline{U}, V_m = V_b$: Velocidad básica con respecto a una altura z [m/s].

$L_z, L_H, L(z)$: Integral de la longitud de la escala de turbulencia a una altura z [m].

2.1.4.5 Varianza y Desviación

La desviación estándar es el valor de la raíz cuadrada de la varianza y representa la medida de la dispersión de las velocidades de ráfaga en torno a la media.

$$\text{(Varianza)} \quad \sigma_u^2 = \int_0^\infty S_{uu}(n) dn \quad (2.20)$$

$$\text{(Desviación)} \quad \sigma_u = \sqrt{\sigma_u^2} \quad (2.21)$$

La integral de la función de densidad espectral (2.16) extendida a todo el intervalo de frecuencia es la varianza de la distribución de las velocidades de fluctuación del viento. Por consiguiente, la energía cinética media por unidad de masa de un estado de viento a una altura z , correspondiente a la componente de fluctuación del viento, es igual al área encerrada por la función espectral.

2.1.4.6 Intensidad de turbulencia

Es una medida adimensional de la energía cinética contenida en las componentes de las fluctuaciones de la velocidad. Es definida como cociente entre la desviación estándar de las fluctuaciones y una velocidad de referencia, se determina el valor de la intensidad mediante la expresión:

$$I_u = \frac{\sigma_u(z)}{\bar{V}_V} \quad (2.22)$$

La norma ASCE 7-10 considera la intensidad turbulenta asociadas a las características de exposición de la estructura como el tipo de terreno en que se emplazara y a la altura, estas constantes de exposición se encuentran en la Tabla 2.3.

$$I_z = c \left[\frac{10}{z} \right]^{1/6} \quad (2.23)$$

2.1.4.7 Longitud de escala turbulenta

La variación temporal y la variación espacial de la velocidad turbulenta, se describen a partir de las denominadas escalas de tiempo y longitudes integrales de la turbulencia. En caso de la escala de tiempo hace falta definir en particular el coeficiente de autocorrelación, que es el valor medio normalizado del producto de la componente turbulenta u en el tiempo t y de la misma componente en el tiempo $t + \tau$.

La función de correlación cruzada $R_{u_1u_2}(\tau_x)$ de la componente fluctuante longitudinal del viento en el instante t , para dos puntos separados longitudinalmente (τ), se expresa como:

$$R_{u_1u_2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{\sigma_u^2(z)T} \int_{t_1}^{t_1+\tau} u(x, y, z)u(x, y, z, t + \tau)dt \quad (2.24)$$

La expresión (2.24) indica la cantidad de información que una medida de la componente de fluctuación en la dirección media del viento, $u(x, y, z)$, realizada en el tiempo t , proporciona sobre una medida de la misma componente de la velocidad turbulenta realizada en el mismo sitio un tiempo τ más tarde, $u(x, y, z, t + \tau)$. Este coeficiente de autocorrelación, debido a la hipótesis introducida sobre la homogeneidad horizontal del flujo, depende solamente de la altura sobre el terreno y de la diferencia de tiempos, τ .

El tiempo promedio en el cual existe correlación entre las fluctuaciones de las velocidades del viento recibe el nombre de escala de tiempo, y se obtiene al integrar la función de autocorrelación de cero hasta la primera raíz de la función.

La escala integral del tiempo de la turbulencia se define como:

$$T_u(z) = \int_0^{\infty} R_{u_1u_2}(\tau) d\tau \quad (2.25)$$

La escala de longitud se calcula multiplicando la escala de tiempo por la velocidad media. Este parámetro representa la longitud promedio del tamaño de los vórtices o torbellinos y su forma matemática es la siguiente:

$$L_u = \bar{V}v(z)T_u(z) \quad (2.26)$$

Donde,

L_u : Integral de la longitud de la escala de turbulencia con respecto a la altura z.

Para una rugosidad constante z_0 , la escala de longitud guarda una dependencia funcional con la altura z. por lo cual las normativas plantean las siguientes expresiones:

Tabla 2.5. Diferentes expresiones para determinar la integral de la longitud de la escala turbulenta con respecto a una altura z.

Norma	Norma
ASCE 7-2010 y NCh 432-2010	$L_{\bar{z}} = l \left[\frac{\bar{z}}{10} \right]^{\bar{\epsilon}}$
AIJ-2004	$L_H 100 \left[\frac{z}{30} \right]^{0.5}$
EUROCODIGO-2005	$L(z) = 300 \left(\frac{z}{200} \right)^\alpha$ $\alpha = 0.67 + 0.05Ln(z_0)$

Donde

$l, \bar{\epsilon}$: Constantes de exposición de terreno. (Ver Tabla 2.3)

$L_{\bar{z}}, L_H, L(z)$: Integral de la longitud de la escala de turbulencia en una altura z [m].

\bar{z} : Corresponde a la altura en la cual se necesita evaluar la velocidad del viento, esta altura debe considerarse una reducción de acuerdo a la siguiente expresión $\bar{z} = 0,6h$, y si $h \leq \bar{z}_{min}$, entonces ($\bar{z} = \bar{z}_{min}$) [m].

z : Altura medida respecto al terreno [m].

z_0 : Constante que depende del tipo de terreno de acuerdo a la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Categoría de terreno de acuerdo Fuente: (EUROCODIGO, 2005)

Categoría del terreno	z_0 (m)
0 Mar o área de costa expuesta a mar abierto.	0.003
I Lagos o áreas horizontales planas con despreciable vegetación y sin obstáculos.	0.01
II Área con poca vegetación tal y como pastizales y obstáculos aislados (árboles, edificios) con separación de al menos 20 veces la altura del obstáculo.	0.05
III Área con cubierta regular de vegetación o edificios o con obstáculos aislados con separación máxima de 20 veces la altura del obstáculos (tal como villas, terreno suburbano y campos permanentes).	0.30
IV Área en la cual al menos 15% de la superficie está cubierta por edificios cuya altura promedio excede de 15m.	1.0

2.1.4.8 Función de densidad espectral de carga

La carga del viento característica, es la carga de viento máxima F_{max} , que ocurre durante un cierto periodo de tiempo (diez minutos por ejemplo). Esta carga de viento máxima es una muestra de una distribución estadística (con un valor medio F_q) y se expresa como el valor medio de la carga del viento en el periodo en consideración más un factor peak k_p , multiplicado por la desviación de fuerza σ_F , es decir.

$$F_{max} = F_q + k_p \sigma_F \quad (2.27)$$

Considerando un modelo aerodinámico cuasiestático⁸, la carga total del viento sobre la estructura será:

$$F_t = \frac{1}{2} \rho U_t^2 A C_f \quad (2.28)$$

Donde,

C_f : Coeficiente medio de fuerza.

ρ : Densidad del aire [kg/m³].

A : Área de ataque del viento [m²].

U_t : Velocidad instantánea del viento [m/s].

La velocidad instantánea del viento se puede expresar a su vez como:

$$U_t^2 = (U + u)^2 + v^2 + w^2 \cong U^2 + 2uU \quad (2.29)$$

Donde se considera que las componentes turbulentas lateral v , componente vertical w son inferiores en comparación a la componente longitudinal u , por lo cual se desprecian las otras componentes.

⁸ Cuasiestático en el que se considera que no hay variaciones temporales en la velocidad incidente

Sustituyendo (2.29) en (2.28), se obtiene que la carga total del viento, F_t , se puede expresar como la suma de una carga media F_q , y una fluctuante F_f , es decir, $F_t = F_q + F_f$ con:

$$\text{Fuerza media} \quad F_q = \frac{1}{2} \rho U^2 A C_f \quad (2.30)$$

$$\text{Fuerza fluctuante} \quad F_f = \rho U u A C_f \quad (2.31)$$

Tabla 2.7. Coeficiente de fuerza C_f [Fuente: (NCh432, Diseño Estructural: Cargas de viento, 2010)].

Sección transversal	Tipo de superficie	h/D		
		1	7	25
Cuadrada (viento normal a la cara)	Todas	1.3	1.4	2
Cuadrada (viento según la diagonal)	Todas	1.0	1.1	1.5
Hexagonal u octogonal	Todas	1.0	1.2	1.4
Circular ($D\sqrt{q_z} > 5.3$), D en m, q_z en N/m^2	Moderadamente suave	0.5	0.6	0.7
	Rugosa ($D'/D \cong 0.02$)	0.7	0.8	0.9
	Muy rugosa ($D'/D \cong 0.08$)	0.8	1.0	1.2
Circular ($D\sqrt{q_z} \leq 5.3$), D en m, q_z en N/m^2	Todas	0.7	0.8	1.2

Para ambas cargas, fluctuantes y media, A y C_f generalmente no varían, considerando la máxima fuerza que se encuentra asociada a la máxima presión dinámica q_{max} , que al igual que la carga de viento característica (2.27) se puede expresar como suma de las presiones media, q , más el factor de peak o factor pico, k_p , multiplicado por la desviación típica de la presión dinámica, σ_q , es decir.

$$q_{max} = q + k_p \sigma_q = q(1 + 2k_p I_u) \quad (2.32)$$

Donde,

I_u : Intensidad turbulenta (2.22).

$\sigma_q = 2qI_u$: Desviación de presión dinámica [N/m²].

$q = \frac{1}{2}\rho U^2$: Presión media [N/m²].

La carga fluctuante se puede representar en el dominio de la frecuencia mediante la siguiente expresión:

$$S_F(n) = (\rho C_f A U^2) S_{uu}(n) = \frac{4F_q^2}{U^2} S_{uu}(n) \quad (2.33)$$

Donde,

$S_F(n)$: Densidad espectral de carga [N²/Hz].

$S_{uu}(n)$: Densidad espectral [m²/s].

$U = \bar{V}$: Velocidad básica [m/s].

Algunas normas consideran un coeficiente de influencia aerodinámica que se determinan mediante expresiones teóricas, para esta investigación se asumirá 1 de manera conservadora.

La varianza de la carga de viento fluctuante se calcula integrando el espectro de potencia sobre la frecuencia n .

$$\sigma_F^2 = \int_0^{\infty} \frac{4F^2 q}{U^2} S_{uu}(n) dn = \frac{4F^2 q}{U^2} \sigma_u^2 \quad (2.34)$$

2.1.4.9 Presión y fuerza estática equivalente del viento (NCh 432 Of.2010 y ASCE 7)

La normativa NCh 432 Of.2010 y la ASCE 7 plantea la forma de determinar la presión media del viento considerando la velocidad media o velocidad de ráfaga, de acuerdo a la expresión (2.35), para el estudio de esta investigación se utilizara la velocidad de ráfaga, por lo cual formulación que a continuación se presenta está considerando esta última.

$$q_z = 0.613 \cdot \nabla_{3s}^2 \quad (2.35)$$

El valor correspondiente a 0.613 corresponde a la densidad del aire 1.23 por 0.5 de acuerdo a la formulación (2.28).

La presión media de acuerdo a la normativa agrega factores de acuerdo a la direccionalidad del viento (k_d), factor topográfico (k_{zt}), factor de importancia de la estructura (I) y factor de exposición (k_z) quedando de la siguiente manera:

$$q_z = 0.613 \cdot V_{3s}^2 \cdot [k_z \cdot k_{zt} \cdot k_d \cdot I] \quad (2.36)$$

El factor de exposición se calcula con:

$$k_z = 2.01 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \quad \text{Para } 4.6\text{m} \leq z \leq z_g \quad (2.37)$$

$$k_z = 2.01 \left(\frac{4.6}{z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \quad \text{Para } z \leq 4.6\text{m} \quad (2.38)$$

Para determinar la fuerza estática equivalente por efectos dinámicos de acuerdo a la normativa se utiliza la siguiente expresión:

$$F = q_z \cdot C_f \cdot A \cdot G_f \quad (2.39)$$

Para estructura flexible o susceptible al efecto del viento de acuerdo al punto 7.8.2 de la NCh 432 Of.2010 el factor debido al efecto ráfaga (G_f) se debe calcular con las siguientes expresiones:

Tabla 2.8. Variables para el cálculo del factor por efecto de ráfaga (NCh432, Diseño Estructural: Cargas de viento, 2010).

$L_{\bar{z}}$ es la integral de la longitud de la escala de turbulencia en la altura equivalente	$L_{\bar{z}} = \ell \left[\frac{\bar{z}}{10} \right]^{\bar{\epsilon}}$	
Respuesta de fondo	$Q^2 = \frac{1}{1 + 0.63 \left[\frac{B+h}{L_{\bar{z}}} \right]^{0.63}}$	
Velocidad de referencia, \bar{V}_{ref} es la velocidad básica (en millas/h en el código)	$\bar{V}_{\bar{z}} = b \left[\frac{\bar{z}}{10} \right]^{\bar{a}} \bar{V}_{ref}$	
Frecuencia reducida	$N_h = 4.6 \frac{n_1 h}{\bar{V}_{\bar{z}}}$	
Admitancia aerodinámica	$R_h = \frac{1}{N_h} - \frac{1}{2N_h^2} (1 - e^{-2N_h})$ Para $N_h > 0$	
	$R_h = 1$ Para $N_h = 0$	
Frecuencia reducida	$N_B = 4.6 \frac{n_1 B}{\bar{V}_{\bar{z}}} \bar{\epsilon}$	
Admitancia aerodinámica	$R_B = \frac{1}{N_B} - \frac{1}{2N_B^2} (1 - e^{-2N_B})$ Para $N_B > 0$	
	$R_B = 1$ Para $N_B = 0$	
Frecuencia reducida	$N_L = 15.4 \frac{n_1 L}{\bar{V}_{\bar{z}}}$	
	$R_L = \frac{1}{N_L} - \frac{1}{2N_L^2} (1 - e^{-2N_L})$ Para $N_L > 0$	
	$R_L = 1$ Para $N_L = 0$	
Factor de reducción de tamaño	$S = R_h R_B (0.53 + 0.47 R_L)$	
Densidad Espectral	$\left[\frac{n S_v(n)}{\sigma_v^2} \right] = R_n = \frac{7.47x}{(1+10.3x)^{5/3}}$	$x = \frac{n_1 L_{\bar{z}}}{\bar{V}_{\bar{z}}}$
Respuesta en resonancia	$R^2 = \frac{1}{\zeta_s} S \left[\frac{n S_v(n)}{\sigma_v^2} \right]$	donde ζ_s es el porcentaje de amortiguamiento con respecto al crítico.
$I_{\bar{z}}$ es la intensidad de turbulencia con la altura	$I_{\bar{z}} = c \left[\frac{10}{\bar{z}} \right]^{1/6}$	
Factor pico	$g_R = \sqrt{2 \ln(3600n_1)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(3600n_1)}}$	En donde $T = 3600s = 1h$.

Donde,

n_1 : Frecuencia natural del edificio [Hz].

B : Dimensión horizontal de la estructura perpendicular a la dirección del viento [m].

L : Dimensión horizontal de la estructura paralelo a la dirección del viento [m].

H : Altura de la estructura [m].

Factor debido al efecto de ráfaga (G_f):

Factor debido al efecto de ráfagas	$G_f = 0.925 \left[\frac{1 + 1.7 I_z \sqrt{g_Q^2 Q^2 + g_R^2 R^2}}{1 + 1.7 g_v I_z} \right]$	$g_Q = 3.4$ $g_v = 3.4$
------------------------------------	---	----------------------------

2.2. Caracterización del Sismo de acuerdo a la Normativa NCh 2369 Of. 2003

La influencia de la acción sísmica sobre las estructura de Carácter Industrial, se encuentra normalizada por la Norma Chilena 2369 Of. 2003, “Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales”. La normativa en su apartado de Análisis sísmico plantea tres métodos de calcular la acción sísmica, las dos primeras consisten en métodos lineales: análisis estático o fuerza equivalente y análisis modal espectral. El tercer método consiste en estudios no lineales, este método corresponde a un análisis de tiempo-historia.

La normativa plantea que para estudios de chimeneas elevadas, se deben diseñar por el método de análisis modal espectral lineal o también conocido como análisis elástico dinámico. Es por tal motivo que en esta investigación se aborda este procedimiento para realizar el análisis sísmico.

2.2.1 Categoría de la estructura

El tipo de estructura de acuerdo a nuestra investigación clasifica en la categoría C2. Obras normales, que pueden tener fallas menores susceptibles de reparación rápida que no causan detenciones prolongadas ni pérdidas importantes de producción y que tampoco pueden poner en peligro otras obras de la categoría C1.

Tabla 2.9. Factor de importancia de acuerdo a la categoría de la estructura.

FACTOR DE IMPORTANCIA	
C1	1.2
C2	1
C3	0.8
I	1

2.2.2 Zonificación

El estudio de la estructura se ubica en la zona 3, 8va Región, Ciudad de Concepción. La clasificación correspondiente fue realizada de acuerdo Tabla 5.1 (NCh2369, 2003), conociendo el tipo de suelo se puede conocer la aceleración efectiva máxima A_0 de acuerdo a la tabla 5.2 (NCh2369, 2003).

Tabla 2.10. Valor de la aceleración efectiva máxima A_0 tabla 5.2 (NCh2369, 2003).

ZONA SISMICA	
1	0,2
2	0,3
3	0,4
A_0/g	0,4

2.2.3 Tipo de suelo

La importancia de conocer el tipo de suelo, nos permitirá identificar los parámetros relativos al tipo de suelo de fundación de acuerdo a la tabla 5.4 (NCh2369, 2003). En consideración al objetivo de evaluar la peligrosidad de la acción del viento frente a la sísmica, se considera que el suelo más desfavorable para las estructuras de esta investigación, es un suelo de carácter Tipo 3, el cual corresponde a un suelo blando o arenoso.

Tabla 2.11. Factores que dependen del tipo de suelo.

TIPO DE SUELO	$T'(s)$	n
1	0.2	1
2	0.35	1.33
3	0.62	1.8
4	1.35	1.8
$T'(s),n$	0.62	1.8

Tabla 2.12. Definición de los tipos de suelos de fundación Tabla 5.3 (NCh2369, 2003).

Tipo de suelo	Descripción
I	<p>Roca: Material natural, con velocidad de propagación de ondas de corte in-situ v_s igual o mayor a 900 m/s, o bien, resistencia de la compresión uniaxial de probetas intactas (sin fisuras) igual o mayor que 10 MPa y RQD igual o mayor que 50% .</p>
II	<p>a) Suelo con v_s igual o mayor que 400 m/s en los 10 m superiores, y creciente con la profundidad; o bien,</p> <p>b) Grava densa, con peso unitario seco γ_d igual o mayor que 20 kN/m³, o índice de densidad $ID(DR)$ (densidad relativa) igual o mayor que 75%, o grado de compactación mayor que 95% del valor Proctor Modificado; o bien;</p> <p>c) Arena densa, con $ID(DR)$ mayor que 75%, o Índice de Penetración Estándar N mayor que 40 (normalizado a la presión efectiva de sobrecarga de 0,10 MPa), o grado de compactación superior al 95% del valor Proctor Modificado; o bien,</p> <p>d) Suelo cohesivo duro, con resistencia al corte no drenado s_u igual o mayor que 0,10 Pa (resistencia a la compresión simple q_u igual o mayor que 0,20 MPa) en probetas sin fisuras.</p> <p>En todo los casos, las condiciones indicadas deberán cumplirse independientemente de la posición del nivel freático y el espesor mínimo del estrato debe ser 20 m. Si el espesor sobre la roca es menor que 20 m, el suelo se clasificará como tipo I.</p>
III	<p>a) Arena permanentemente no saturada, con $ID(DR)$ entre 55 y 75%, o N mayor que 20 (sin normalizar a la presión efectiva de sobrecarga de 0,10 MPa); o bien,</p> <p>b) Grava o arena no saturada, con grado de compactación menor que el 95% del valor Proctor Modificado; o bien,</p> <p>c) Suelo cohesivo con s_u comprendido entre 0,025 y 0,10 MPa (q_u entre 0,05 y 0,20 MPa) independientemente del nivel freático; o bien,</p> <p>d) Arena saturada con N comprendido entre 20 y 40 (normalizado a la presión efectiva de sobrecarga de 0,10 Mpa).</p> <p>Espesor mínimo del estrato: 10 m. Si el espesor del estrato sobre la roca o sobre suelo correspondiente al tipo II es menor que 10 m, el suelo se clasificará como tipo II.</p>
IV	<p>Suelo cohesivo saturado con s_u igual o menor que 0,025 MPa (q_u igual o menor que 0,050 MPa).</p> <p>Espesor mínimo del estrato: 10 m. Si el espesor del estrato sobre suelo correspondiente a algunos de los tipos I, II o III es menor que 10 m, el suelo se clasificará como tipo III.</p>

2.2.4 Razón de amortiguamiento ξ

La razón de amortiguamiento que representa las chimeneas de acero sísmica resistentes corresponde a un 2%, de acuerdo a la tabla 5.6 (NCh2369, 2003).

2.2.5 Factor de modificación de la respuesta R

El factor de modificación está dada por el sistema resistente de estructuras de acero en su clasificación de chimeneas de acero $R=3$ de acuerdo a la tabla 5.6 (NCh2369, 2003).

2.2.6 Coeficiente sísmico horizontal mínimo

De acuerdo a la normativa en apartado 5.3.3.2 me indica en que ningún caso el valor del coeficiente sísmico C será menor a la siguiente expresión:

$$C_{min} = \frac{0,25 \cdot A_0}{g} \quad (2.40)$$

2.2.7 Coeficiente sísmico horizontal máximo

De acuerdo a la normativa en apartado 5.3.3.1 me indica que el coeficiente sísmico no necesita ser mayor al que se indica en la tabla 5.7 (NCh2369, 2003).

Con una razón de amortiguamiento de $\xi = 0.02$ y un factor de respuesta $R=3$, el coeficiente máximo corresponde $C_{max}=0.4$.

Tabla 2.13. Valores de coeficiente sísmico máximo de acuerdo a la razón de amortiguamiento y al factor de respuesta.

R	Cmax		
	$\xi = 0.02$	$\xi = 0.03$	$\xi = 0.05$
1	0.79	0.68	0.55
2	0.6	0.49	0.42
3	0.4	0.34	0.28
4	0.32	0.27	0.22
5	0.26	0.23	0.18

2.2.8 Espectro de diseño

El análisis modal espectral se debe realizar para el espectro de diseño siguiente:

$$S_a = \frac{2.75A_0I}{R} \left(\frac{T'}{T} \right)^n \left(\frac{0.05}{\xi} \right)^{0.4} \quad (2.41)$$

Donde,

A_0 : Aceleración efectiva máxima.

T', n : Parámetros relativos al tipo de suelo de fundación.

T : Periodo fundamental de vibración.

R : Factor de modificación de la respuesta.

ξ : Razón de amortiguamiento.

Reemplazando los valores obtenidos en cada uno de los apartados anteriores en la expresión (2.41) se obtiene el espectro de aceleración mostrado en Figura 2.6.

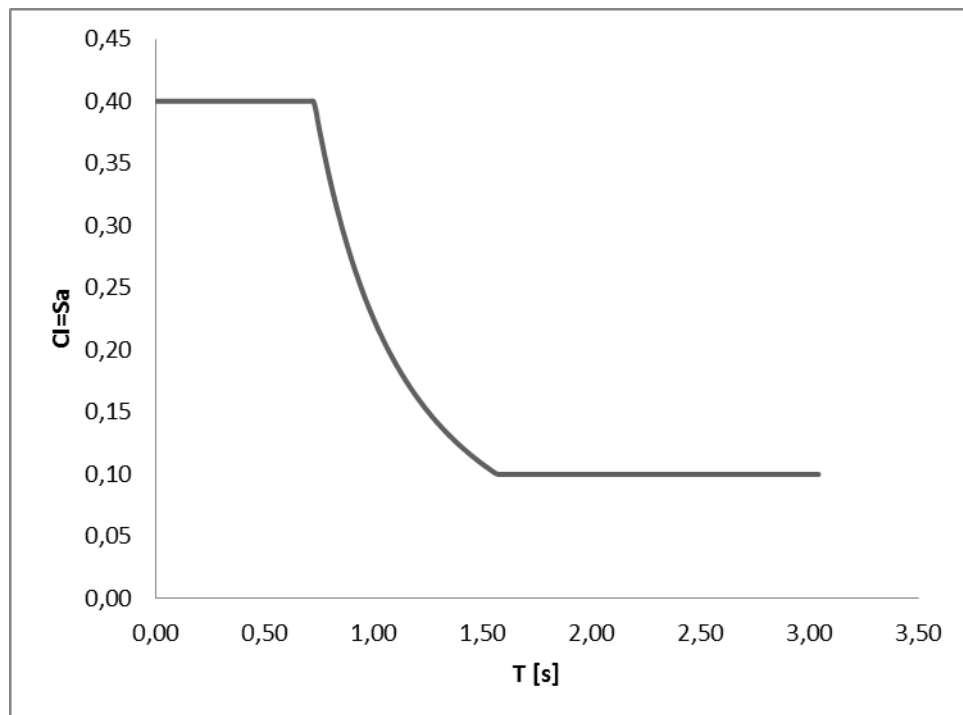


Figura 2.6. Espectro de respuesta NCh 2369 Of.2003.

CAPÍTULO 3: VIENTO

3.1. Introducción

En el presente capítulo se analizarán los conceptos más importantes para caracterizar el viento atmosférico, los cuales ayudaran finalmente a determinar la fuerza que ejerce el viento sobre las estructuras.

3.2. Acción del viento

3.2.1 Medición del viento atmosférico

Las velocidades utilizadas fueron proporcionadas desde una estación meteorológica provista de un anemómetro de marca AMMONIT, del tipo “first class”, con una veleta tipo “compact” y el data Logger tipo WICO-32, La ubicación exacta de la estación es 36°49’47” Sur y 70°01’42” Este, ubicada en el campus Concepción, de la Universidad de Concepción, a una altura de 120 [m] sobre el nivel del mar. La medición de las velocidades instantáneas fue captada a una altura de 70 [m] sobre el nivel del terreno cada dos segundos por una hora, durante 19 horas 52 minutos 32 segundos. La Figura 3.1 muestra el equipo de medición data Logger Ammonit, este equipo es el encargado de guardar las lecturas tomadas por el anemómetro.



Figura 3.1. Data Logger Ammonit, usado para el registro de datos en la estación meteorológica [Fuente: (Hidalgo H; Nozaki M, 2010)].



Figura 3.2. Ubicación de la estación de medición de viento.

Los registros de velocidad del viento instantáneas, corresponden a una muestra aleatoria de dos días, cada dos segundos, realizadas en el mes de Septiembre del cual se extrajeron las series más representativas.

En la mayoría de las localizaciones del planeta el viento sopla más fuerte durante el día que durante la noche, esta variación se debe sobre todo a las diferencias de temperatura, p.ej. entre la superficie del mar y la superficie terrestre son mayores las temperaturas durante el día que durante la noche y el viento presenta también más turbulencias, por lo que tiende a cambiar de dirección más rápidamente durante el día que durante la noche. En la Figura 3.3 se presenta esta variación de la velocidad del viento a lo largo del día de mediciones.

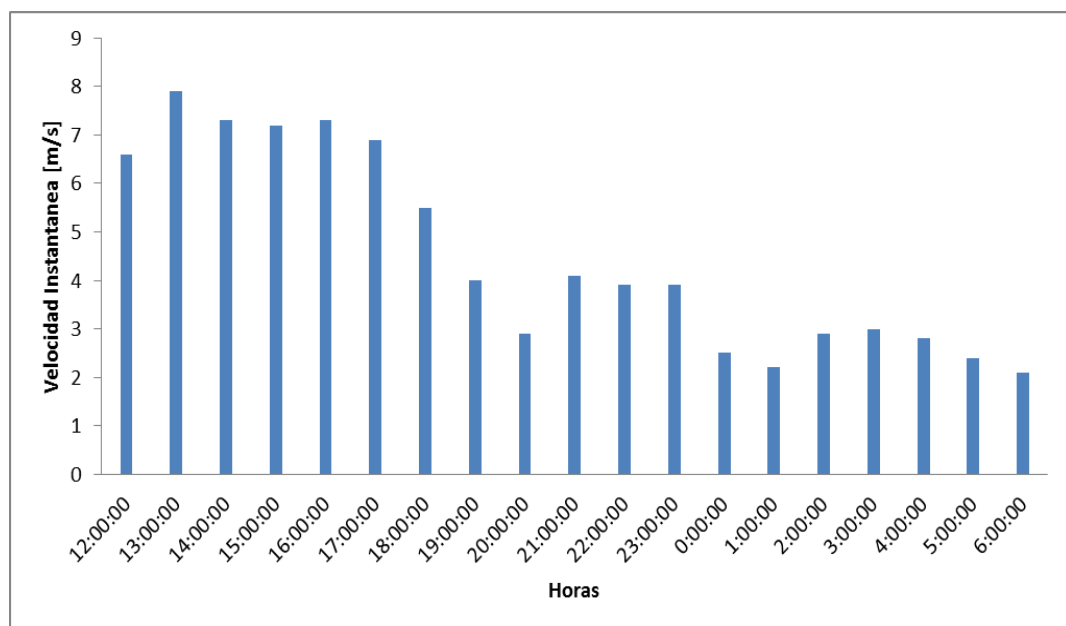


Figura 3.3. Variación de la velocidad instantánea durante el día a una altura de 70 [m].

Se puede apreciar en la gráfica anterior el intervalo en el cual se producen las mayores velocidades durante las 12 y 18 [hrs] del día, por lo cual se considera ese intervalo como el estudio para el análisis del comportamiento fluctuante del viento.

El tratamiento de las velocidades consiste en realizar intervalos de mediciones de una hora, con el fin de obtener las velocidades turbulentas. Para cada hora de medición se divide el intervalo descrito en seis partes de 10 [min], calculando la velocidad media en cada tramo y restándosela al mismo tramo se determina la componente de agitación turbulenta con media igual a cero.

A continuación se muestra como resultado la serie de velocidad fluctuante asociada a la máxima velocidad correspondiente a las 13 [hrs].

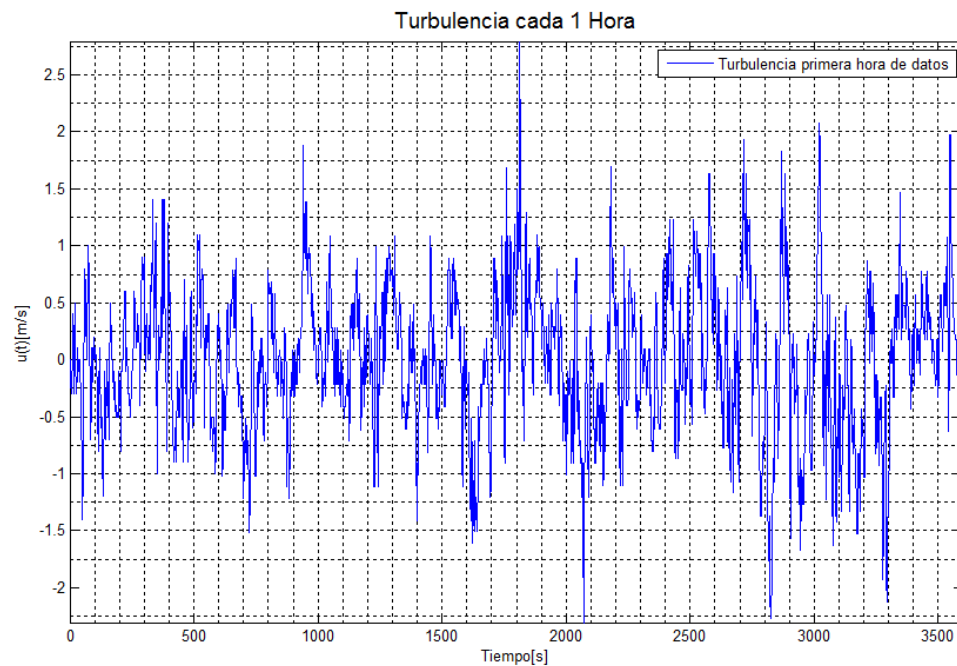


Figura 3.4. Velocidad turbulenta máxima del registro (13 hr).

3.2.2 Espectro de potencia

Una vez determinada la serie de velocidades turbulenta que se encuentran en el dominio del tiempo, estas se deben transformar al dominio de la frecuencia. La transformación es realizada por medio de la transformada de Fourier, mediante la FFT del software MATLAB. (Figura 3.5).

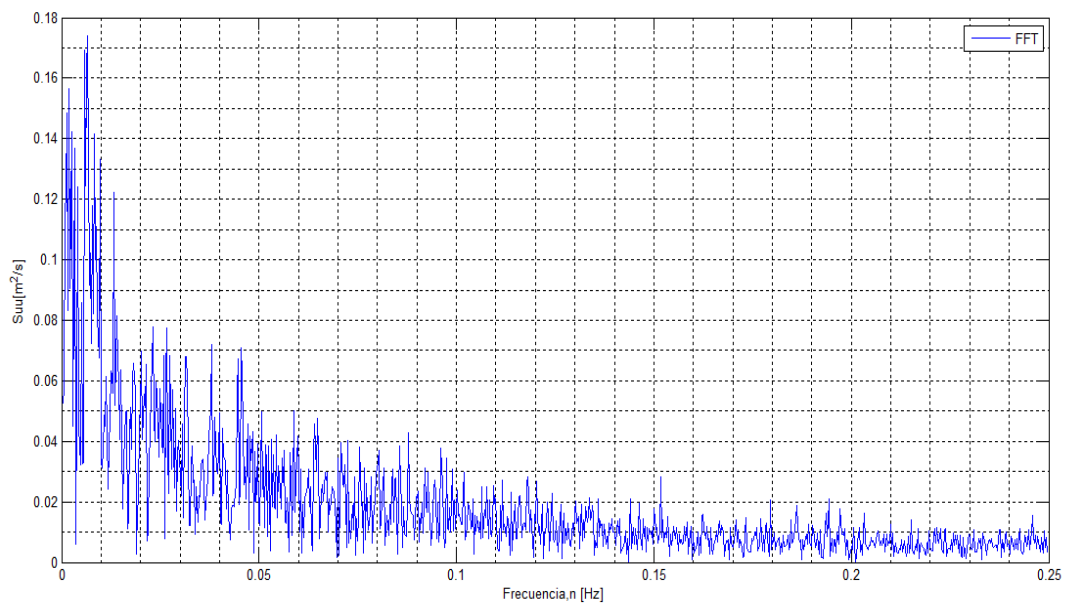


Figura 3.5. Transformada de Fourier.

La manera tradicional de representar gráficamente la función de densidad espectral en función de la frecuencia n , es mediante de un gráfico semilogarítmico.

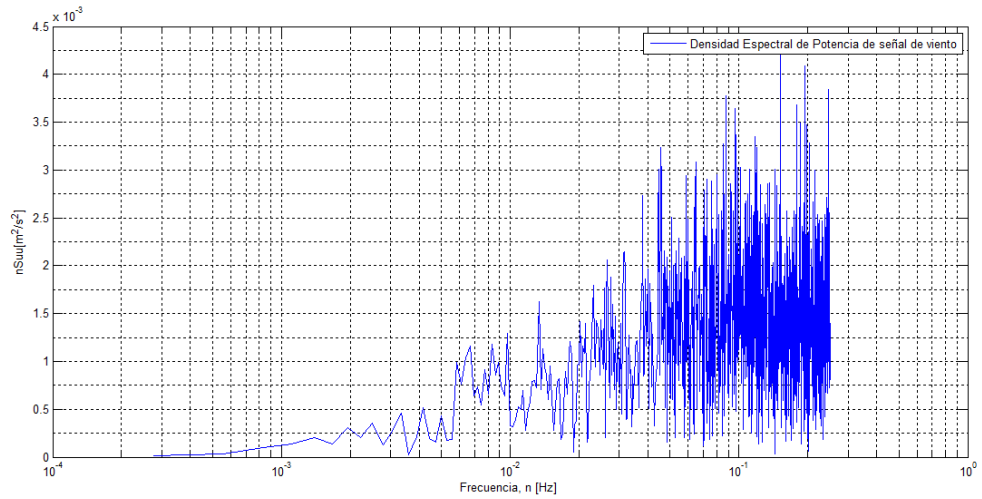


Figura 3.6. Función de densidad espectral, presentada tradicionalmente.

En la Figura 3.6 se puede observar que el contenido de frecuencia más importante se encuentra entre 0.1 y 0.33 [Hz], donde se tiene mayor energía cinética.

La densidad espectral o espectro de potencia de ahora en adelante será presentada mediante un gráfico logarítmico (Figura 3.7)

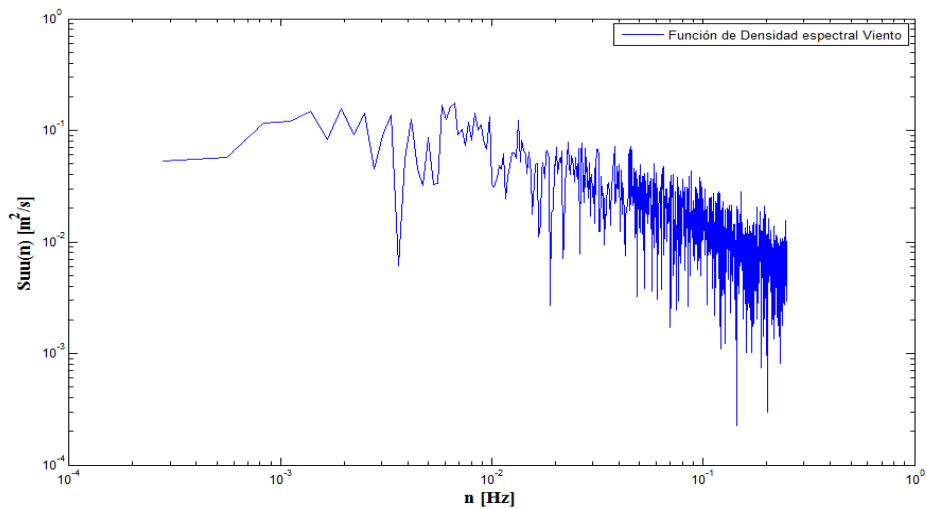


Figura 3.7. Función de densidad espectral o Espectro de potencia.

3.2.3 Espectros potencia de acuerdo a la normativa

La función de densidad espectral para la serie anterior será comparada con las normas o código de Diseño (ASCE 7-10, EUROCODIGO-05 y AIJ-04).

3.2.3.1 Consideraciones

- Los factores asociados a la condición de terreno y extraídos de las normativas consideradas, serán presentados asumiendo que la estructura de estudio se emplazar en la Ciudad de Concepción, Chile.
- La categoría de rugosidad de la superficie del terreno de acuerdo en lo expuesto en punto 7.6.3 de la NCh 432 Of.2010, clasifica en una superficie rugosa tipo B, áreas urbanas y sub urbanas con una exposición tipo B.

3.2.3.2 Perfil de velocidad

La velocidad media o básica del viento es determinada a partir de registros históricos de velocidades de viento, medida a 10 metros de altura sobre el terreno. En esta investigación se considera la velocidad media propuesta por la normativa Chilena NCh 432 Of.2010, basados en estudios históricos meteorológicos que determinaron la velocidad media, para la Ciudad de Concepción correspondiente a una velocidad de 40 [m/s], se puede construir de acuerdo a la velocidad media y la formulación planteada, el perfil de velocidad. (Figura 3.8).

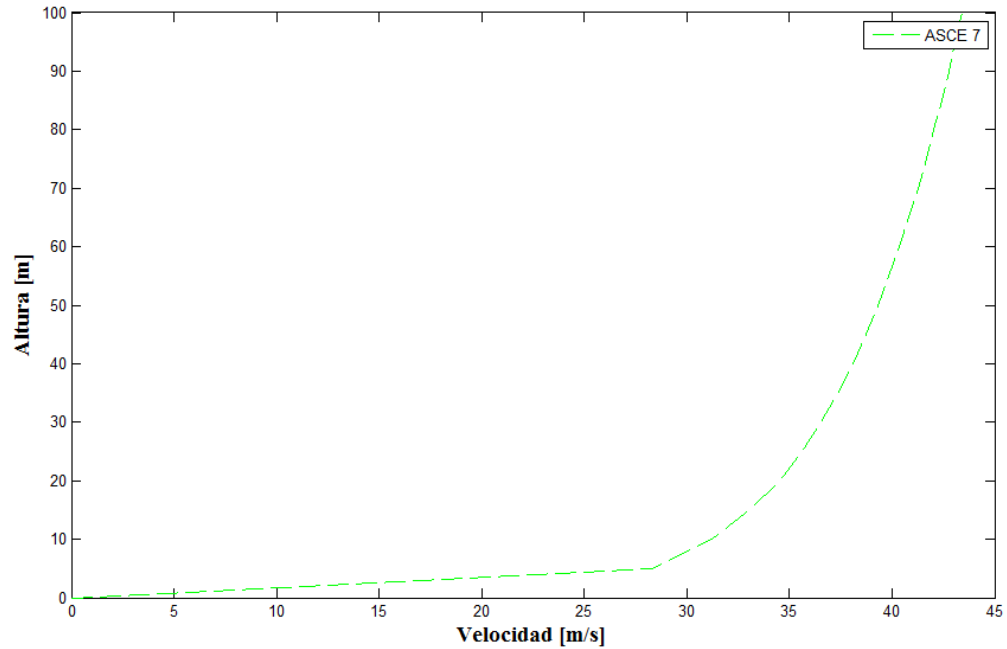


Figura 3.8. Perfil de velocidad de Velocidad media.

Como se puede apreciar en la figura anterior la velocidad aumenta linealmente con respecto a la altura, es decir es directamente proporcional al aumento de la altura; a la altura máxima de 100 [m] la velocidad media corresponde a 43.40 [m/s].

3.2.3.3 Intensidad turbulenta

La intensidad turbulenta en la atmosfera es un parámetro que me indica los movimiento aleatorios del viento medio, dando lugar a remolinos. Claramente la intensidad turbulenta depende de la rugosidad de la superficie como de los factores de exposición. Se utiliza la expresión (2.23) para determinar el perfil de intensidad turbulenta en función de la altura.

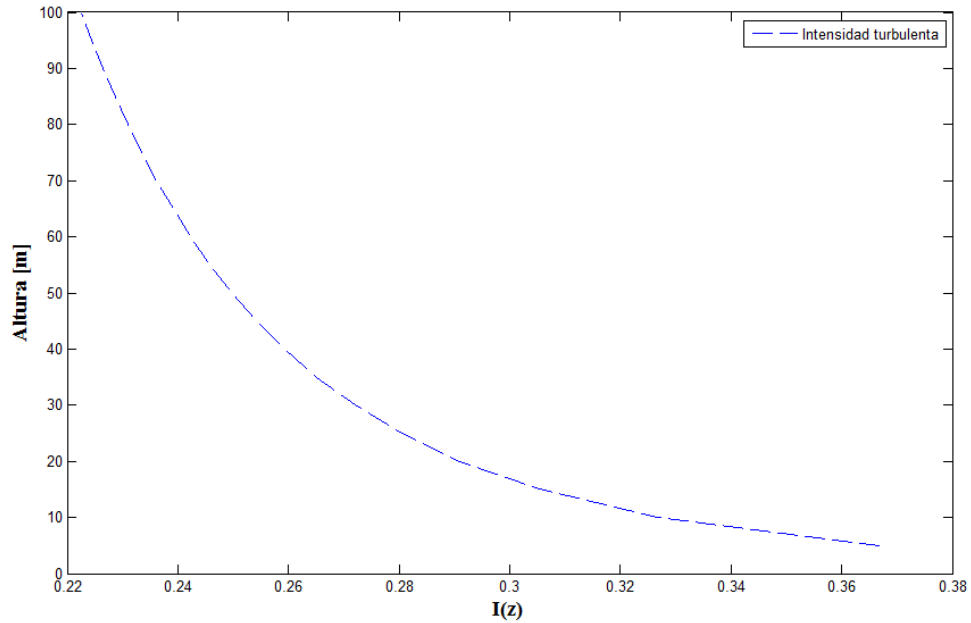


Figura 3.9. Perfil de Intensidad turbulenta.

En la Figura 3.9 se puede apreciar que el perfil de intensidad turbulenta desciende con respecto a la altura, esto atiende a que la velocidad tiene directa relación con la altura; al disminuir la altura disminuye la velocidad, por lo tanto hace que la intensidad turbulenta sea máxima en la superficie, donde se genera la mayor turbulencia.

3.2.3.4 Integral de la longitud de la escala turbulenta

La integral de la longitud de la escala turbulenta es un parámetro que viene a representar una medida del tamaño de los torbellinos o, en otras palabras, el tamaño medio de una ráfaga en una determinada dirección.

La longitud de escala turbulenta depende de la rugosidad de la superficie, como también de la altura sobre la tierra, este parámetro se determina utilizando la formulación propuesta por las normativas planteadas en esta investigación (ASCE 7, AIJ y EUROCODIGO) expresadas en la Tabla 2.5, considerando los factores de exposición tipo B.

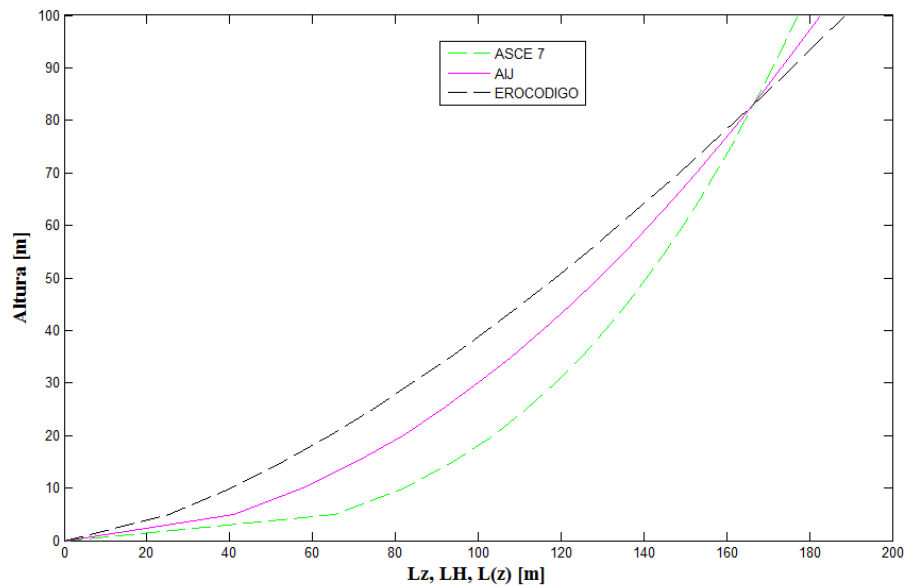


Figura 3.10. Variación de la integral de longitud de la escala turbulenta con respecto a la altura a 100 [m].

Se puede apreciar según la Figura 3.10 que la variación de la integral de longitud de escala correspondiente a los 70 [m] de altura. La normativa ASCE 7 arroja un valor de 157.37 [m], los códigos AIJ y EUROCODIGO toman los valores de 152.75 [m] y 148.47 [m], dando como resultado que la formulación propuesta por la ASCE 7 da una mayor longitud del tamaño de los remolinos. Ahora observando en la misma figura a una altura de 80 [m] las 3 normas convergen al mismo valor de 168 [m], pero superior a la altura de 80 [m] la norma ASCE 7 disminuye por sobre los otros códigos.

Cabe señalar que existe una relación inversa entre la longitud de escala turbulenta y la intensidad turbulenta, en cuanto mayor es la intensidad turbulenta menor es la longitud de escala y viceversa.

Se calculó la longitud de escala para las tres normas en cuestión, ya que es un factor importante en la formulación de la función de densidad espectral de las normativas y códigos en estudios.

3.2.3.5 Espectro de densidad de Potencia de acuerdo a la normativa

La formulación de los espectros de densidad de potencia caracteriza la energía cinética, asociada a la componente fluctuante del viento.

Los espectros de potencia de las normativas ASCE 7, AIJ y EUROCODIGO se muestran en la Tabla 2.4, cuya forma habitual de considerar el espectro de potencia es de acuerdo a la expresión (2.18) que presenta el espectro de forma adimensional (Normalizado).

La expresión (3.1) es manipulada de manera de expresarla en función de $S_{uu}(z, n)$. De esta forma los espectros de densidad considerados por las normativas quedarán definidos como se muestra en la siguiente expresión (3.2).

$$R_N(z, n) = \frac{nS_{uu}(z, n)}{\sigma^2} \quad (3.1)$$

$$S_{uu}(z, n) = \frac{R_N(z, n)\sigma^2}{n} \quad (3.2)$$

Con respecto a la integral de la función de densidad espectral (2.16) extendida a todo el intervalo de frecuencia, corresponde a la varianza de la distribución de las

velocidades de fluctuación del viento y queda definido de acuerdo al siguiente valor:

$$\sigma_u^2 = \int_0^{\infty} S_{uu}(n)dn = 0.0048 \text{ [m}^2/\text{s}^2]$$

La energía cinética media por unidad de masa de un estado de viento a una altura z , correspondiente a la componente de fluctuación del viento, es igual al área encerrada por la función espectral.

Considerando la velocidad media y la integral de longitud de escala turbulenta, ya antes determina para una altura de 70 [m], y utilizando la expresión (3.2) para obtener la función de densidad espectral, para cada una de las diferentes normativas se obtiene la gráfica mostrada en Figura 3.11.

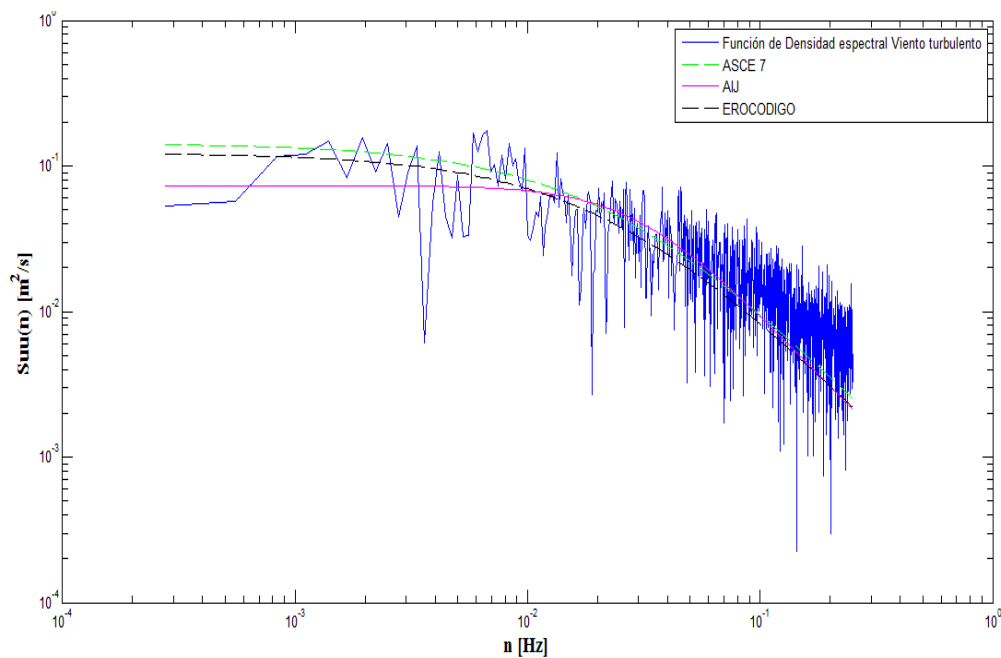


Figura 3.11. Función de densidad espectral.

De acuerdo a lo obtenido en Figura 3.11 se observa que la formulación propuesta por el código ASCE 7 y el EUROCODIGO tiene un ajuste aceptable en relación a la señal turbulenta estudiada, para dar una mayor confiabilidad estadística se propuso determinar la correlación de manera de obtener la relación que existe entre la señal turbulenta y las expresiones propuestas por las normativas.

Tabla 3.1. Correlación de las funciones de densidad espectral con respecto a la señal turbulenta.

	Correlación
ASCE 7-2010	0.81
AIJ-2004	0.79
EUROCODIGO-2005	0.80

Con respecto a la correlación entre la formulación propuesta por cada uno de los códigos y la señal que produce la componente fluctuante del viento, se pudo determinar que las tres normativas poseen similitud en el ajuste, por tal motivo y basándonos en la consideración de la actual normativa chilena NCh 432 Of.2010 que se basa en el código Norte Americano ASCE 7, se puede argumentar que la expresión genera muy buenos resultados con los datos medido, como recomendación es muy confiable utilizar estas expresión y tener buenos resultados para la ciudad de Concepción a la hora de calcular el contenido energético del viento.

3.2.4 Presión equivalente del viento (NCh 432 Of.2010 y ASCE 7-10)

3.2.4.1 Presión equivalente media del viento

La presión equivalente media se encuentra asociada a la componente media del viento (velocidad media). La presión media es determinada de acuerdo a la expresión (2.36), que considera un factor de direccionalidad, $k_d = 1$, un factor topográfico, $k_{zt} = 1$, un factor de importancia, $I = 1$, y un factor de exposición, k_{zt} , que es determinado mediante la expresión (2.37), cuyo valor depende de la condición específica del terreno.

En la figura que se muestra a continuación, se puede observar que el factor de exposición tiene directa relación con la altura.

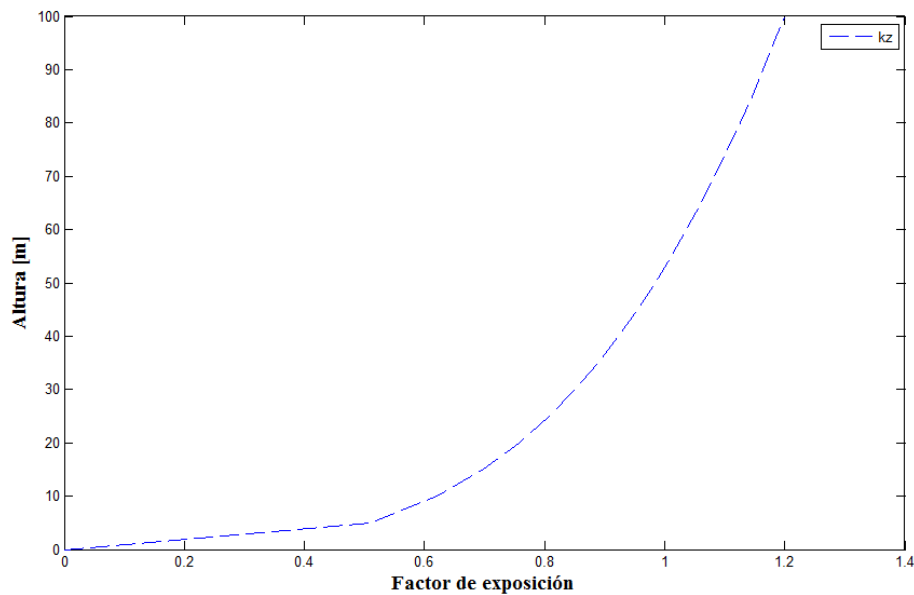


Figura 3.12. Factor de exposición k_{zt} .

La formulación para determinar la presión media del viento queda definida en por la velocidad media (Ley potencial), y el factor de exposición.

Presión equivalente media

$$q_z = 0.613 \cdot V_{3s}^2 \cdot [k_z \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1]$$

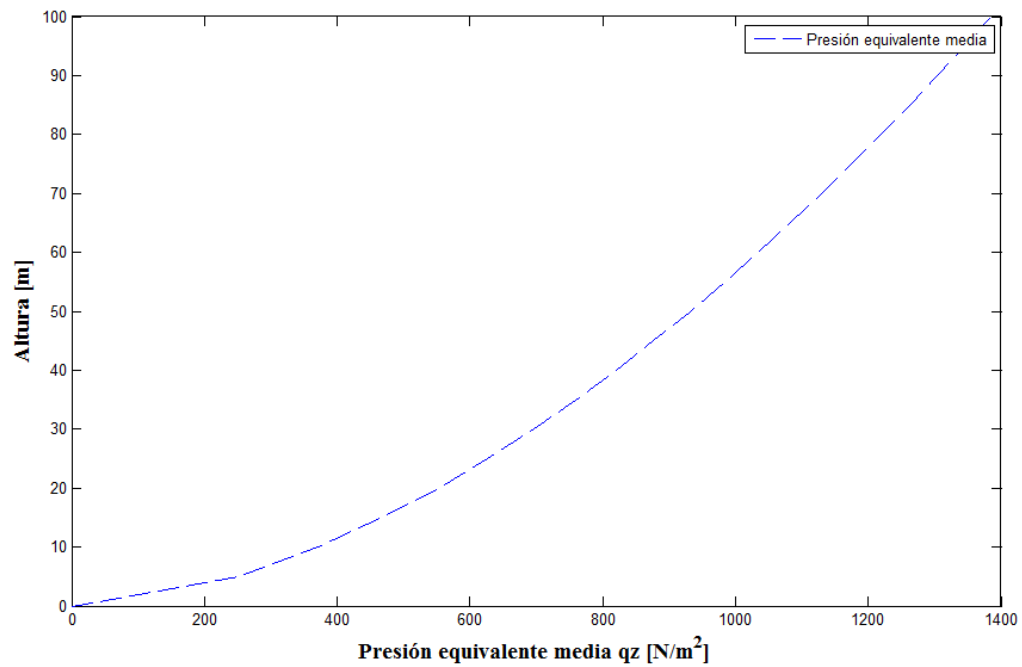


Figura 3.13. Presión equivalente media.

La Figura 3.13 muestra el resultado de la variación de la presión media en función de la altura de manera que el aumento es proporcional. La máxima presión media corresponde $q_z = 1385 [N/m^2]$ a los 100 [m] de altura.

CAPÍTULO 4: MODELACIÓN ESTRUCTURAL Y ASIGNACIÓN DE CARGAS

4.1. Introducción y Comentarios

Es esperable que ocurran efectos dinámicos no deseables y significativos; debido al viento principalmente en estructuras altas y esbeltas, especialmente cuando pueden oscilar para modelos en voladizo. Se utiliza como criterio lo propuesto en la Normativa española Acciones climáticas (ROM, 1995), que considera para estructuras cuya frecuencia natural o propia correspondiente al primer modo de oscilación en el plano donde se aplica horizontalmente la velocidad del viento, con valores menores a 1 [Hz], es posible considerarlas como estructuras esbeltas y a su vez ser afectadas directamente por la acción del viento.

La norma Acciones climáticas (ROM, 1995), considera que las estructuras verticales en voladizo de esbeltez⁹ $\lambda \geq 5$ en el plano perpendicular a la dirección de actuación del viento, presentan frecuencias naturales correspondiente, al primer modo de oscilación a flexión menores a 1 [Hz]. Basado en estas condiciones geométricas y frecuencias naturales propuestas para estas estructuras en voladizo. Se han planteado como condiciones iniciales, para realizar la confección de los modelos de chimeneas y de este modo evaluar la importancia del viento en este tipo de estructuras esbeltas.

Es de gran importancia conocer el efecto que provoca la acción del viento en las estructuras esbeltas como son las chimeneas; debido a que no siempre el sismo como carga controla el diseño de este tipo de estructuras, ya que, estas estructuras son sensibles al efecto de viento, debido a que son estructuras altas y delgadas, con una mayor área de ataque, como se observó en el capítulo 3 la presión media ejercida por el viento aumenta con la altura y si a esto, además le

⁹ $\lambda = l/b$, donde l corresponde a la altura y b al ancho de la estructura esbelta.

superponemos la componente de agitación turbulenta, es posible que los desplazamiento sufridos sean mayores a los desplazamiento ejercidos por la carga sísmica.

En la modelación de las estructuras se consideran dos tipos de chimeneas: circular y cuadrada, las cuales serán estructuradas con planchas de acero.

Se estudian estas secciones de chimeneas de tal forma de comparar, en cada una de ellas, los diferentes desplazamientos producidos por la acción del viento. De tal forma de evaluar el grado de peligrosidad del viento en cada una de estas estructuras.

4.2. Materiales

Las chimeneas en estudio serán de una estructuración metálica, el cual se considerará de acero ASTM-A-36 comúnmente utilizado en la industria nacional.

Propiedades mecánicas del acero ASTM-A-36:

Peso específico	$\gamma_s = 7.85$	[ton/m ³]
Tensión de fluencia	$F_y = 2.53$	[ton/cm ²]
Tensión de rotura	$F_u = 4.08$	[ton/cm ²]
Módulo de elasticidad	$E_s = 2100$	[ton/cm ²]

4.3. Descripción de la estructura

La modelación y análisis de resultados de las estructuras se realizará mediante el software SAP2000 v17. A continuación se presentan los modelos que corresponden a los casos más representativos del estudio en cuestión, las cuales manifiestan de mejor manera las diferencias de la acción del viento en las chimeneas, cuya dimensión y forma corresponde a las exhibidas en Figura 4.1 y Figura 4.2. Cabe destacar que el diámetro o ancho de la estructura se mantuvo constante, de modo que la altura sea considerada como un valor variable; obteniendo como resultado diferentes grados de esbeltez para ambas estructuras.

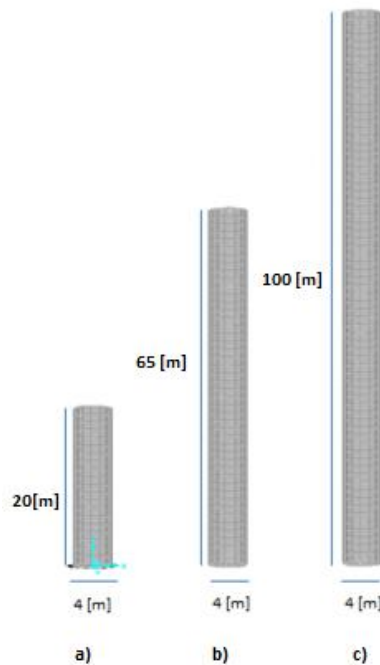


Figura 4.1. Chimenea de sección cilíndrica a) modelo 1 altura de 20 [m], b) modelo 2 altura de 65 [m] y c) modelo 3 altura de 100 [m].

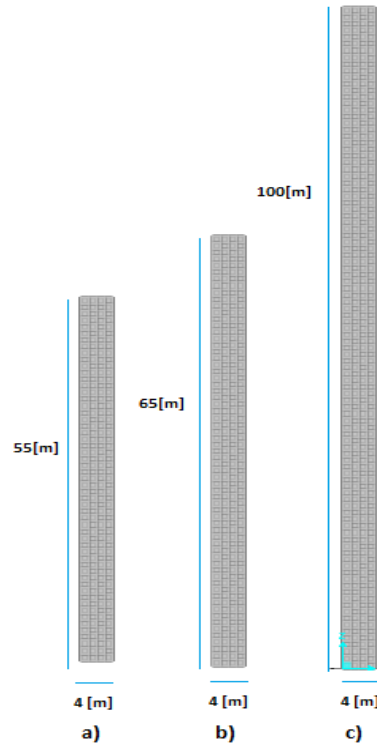


Figura 4.2. Chimenea de sección cuadrada a) modelo 1 altura de 55 [m], b) modelo 2 altura de 65 [m] y c) modelo 3 altura de 100 [m].

Las chimeneas de forma cilíndrica y cuadrada, se consideran con ejes en planta x e y y con eje z como eje vertical. La modelación se considera como una viga en voladizo, para ambas chimeneas en estudio, por lo cual se restringen los desplazamientos de los apoyos.

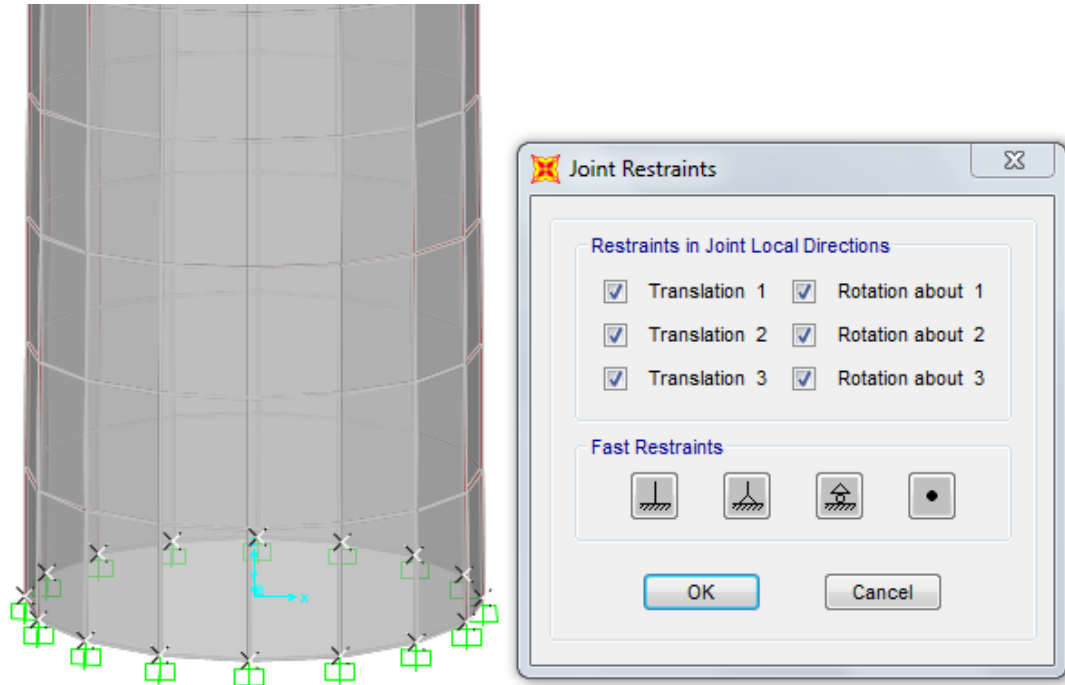


Figura 4.3. Condición de borde para los apoyos chimenea cilíndrica.

Los elementos para modelar el manto de las chimeneas corresponden a planchas de acero, cuya representación en el *software* serán de tipo Shell del tipo Thin (asociada a la teoría clásica de placas de Kirchhoff). Este tipo de elementos considera en su análisis esfuerzos de membrana y de flexión actuando simultáneamente, considerando seis grados de libertad por nodo (traslación en direcciones x , y , z (U_x , U_y , U_z)) y rotaciones en direcciones x , y , z (R_x , R_y , R_z)). El elemento está definido por cuatro nodos, con espesor y propiedades isotrópicas propias del material (acero).

Elemento Tipo Shell.

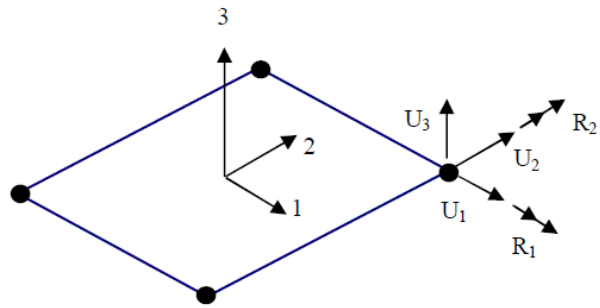


Figura 4.4. Representación de un elemento tipo Shell.

4.4. Cargas

A continuación se presentan la asignación de cargas en estudio al software SAP2000 v17, para un posterior análisis.

4.4.1 Carga de viento

4.4.1.1 Función de densidad espectral de carga turbulenta (PSD)

Para obtener el espectro de carga sobre los modelos, es necesario conocer las siguientes variables de manera de calcular el espectro con la expresión (2.33).

Tabla 4.1. Descripción de modelos de chimeneas cilíndricas.

	Modelo1	Modelo2	Modelo3
Altura, a [m].	20	65	100
Diámetro, D [m].	4	4	4
Esbeltez, λ .	5	16.25	25
Velocidad media o Básica, U [m/s].	34.5	40.81	43.40
Área de ataque, A [m ²].	125.6	408.2	628
Área en planta, [m ²].	12.5	12.5	12.5
Coefficiente de Fuerza, (C_f)	0.57	0.65	0.7
Densidad del aire [kg/m ³].	1.23	1.23	1.23
Fuerza media, F_q [N].	52406	271766	509228

Tabla 4.2. Descripción de modelos de chimeneas cuadradas.

	Modelo1	Modelo2	Modelo3
Altura, a [m].	55	65	100
Ancho, [m].	4	4	4
Esbeltez, λ .	13.75	16.25	25
Velocidad media o Básica, U [m/s].	39.84	40.81	43.40
Área de ataque, A [m ²].	220	260	400

Tabla 4.2. Descripción de modelos de chimeneas cuadradas. (Continuación).

Área en planta, [m ²].	16	16	16
Coefficiente de Fuerza, (C_f)	1.625	1.71	2
Densidad del aire [kg/m ³].	1.23	1.23	1.23
Fuerza media, F_q [N].	348971	455384	926712

Donde,

- La velocidad media es considerada en la parte superior de la estructura de acuerdo al perfil de velocidad.
- Área de ataque, el área de ataque es igual a la altura por el ancho de la estructura, con respecto a la cara perpendicular a la acción del viento. En el caso de una chimenea circular corresponde a la mitad del perímetro por la altura, considerando un radio de 2 [m] para cada modelo en estudio.

$$A = (\text{Perímetro} \cdot \text{altura}) = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{2} \cdot a$$

Donde,

- r : Radio [m]
- a : Altura [m]
- Coeficiente de fuerza, para chimeneas de sección circular según en lo dispuesto en Tabla 2.7).

- Densidad del aire es 1.23 [kg/m³].
- La fuerza media del viento queda definida de acuerdo a la expresión (2.30).

A continuación de la Figura 4.5 a la Figura 4.7: se presentan los resultados de las funciones espectrales de cargas, determinadas para la componente de agitación turbulenta. Estos espectros son aplicados a los 3 modelos de chimeneas cilíndricas anteriormente planteados (Figura 4.1). De igual manera en las Figura 4.8 a la Figura 4.10, se exponen los resultados de las funciones espectrales de cargas asociadas a los modelos de chimeneas cuadradas. Todas las funciones espectrales de carga se encuentran relacionadas a la máxima altura del modelo en consideración, debido que es la condición más desfavorable para la estructura como fuerza fluctuante.

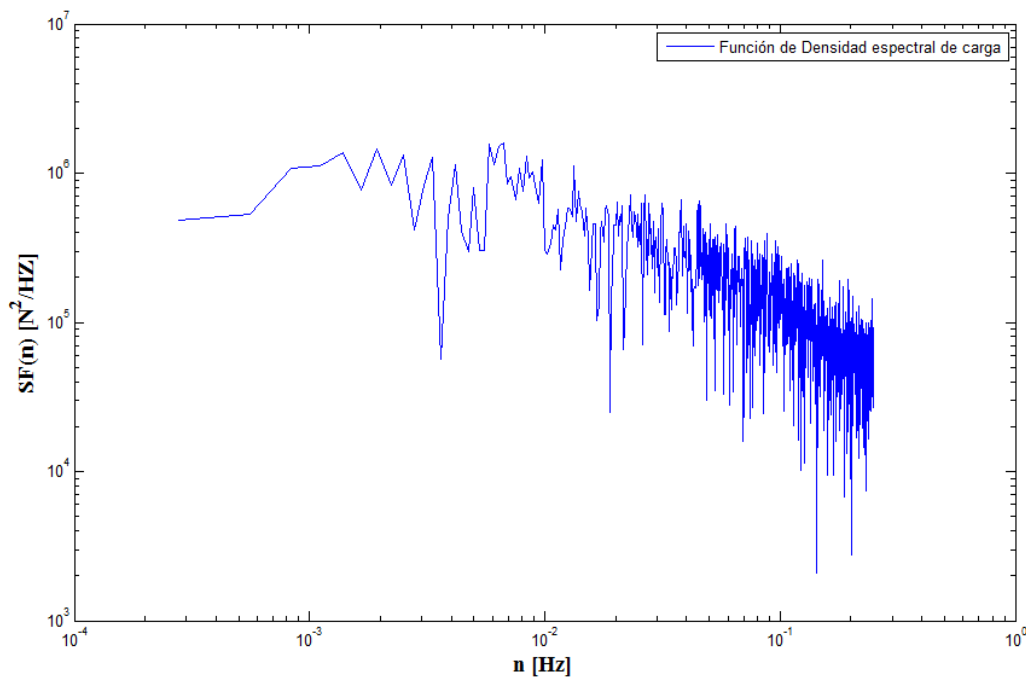


Figura 4.5. Espectro de función de densidad de carga a la altura 20 [m], modelo1 chimenea cilíndrica.

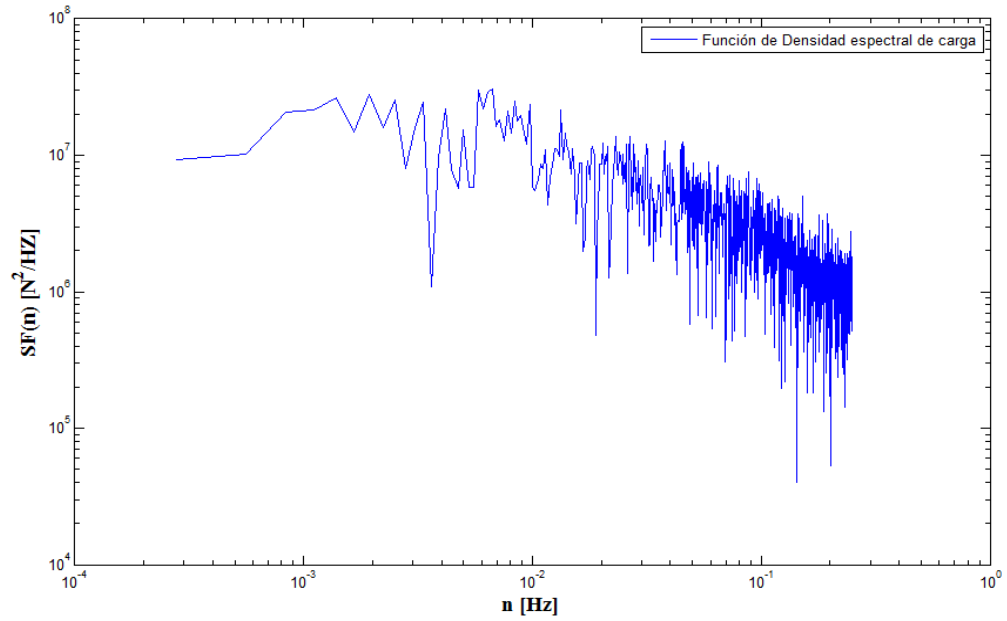


Figura 4.6. Espectro de función de densidad de carga a la altura 65 [m], modelo2 chimenea cilíndrica.

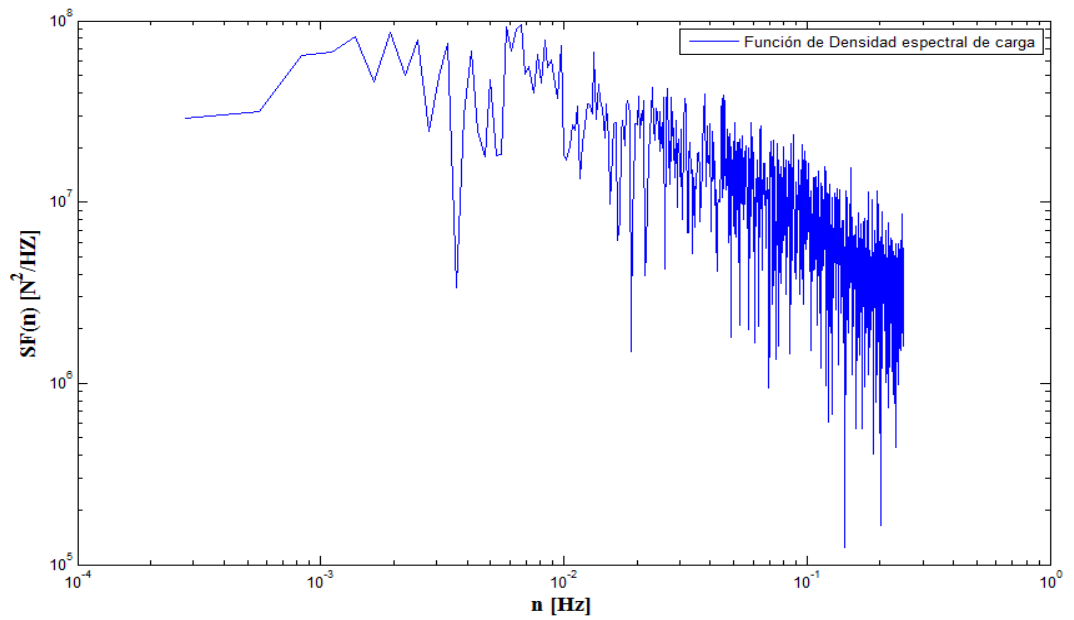


Figura 4.7. Espectro de función de densidad de carga a la altura 100 [m], modelo3 chimenea cilíndrica.

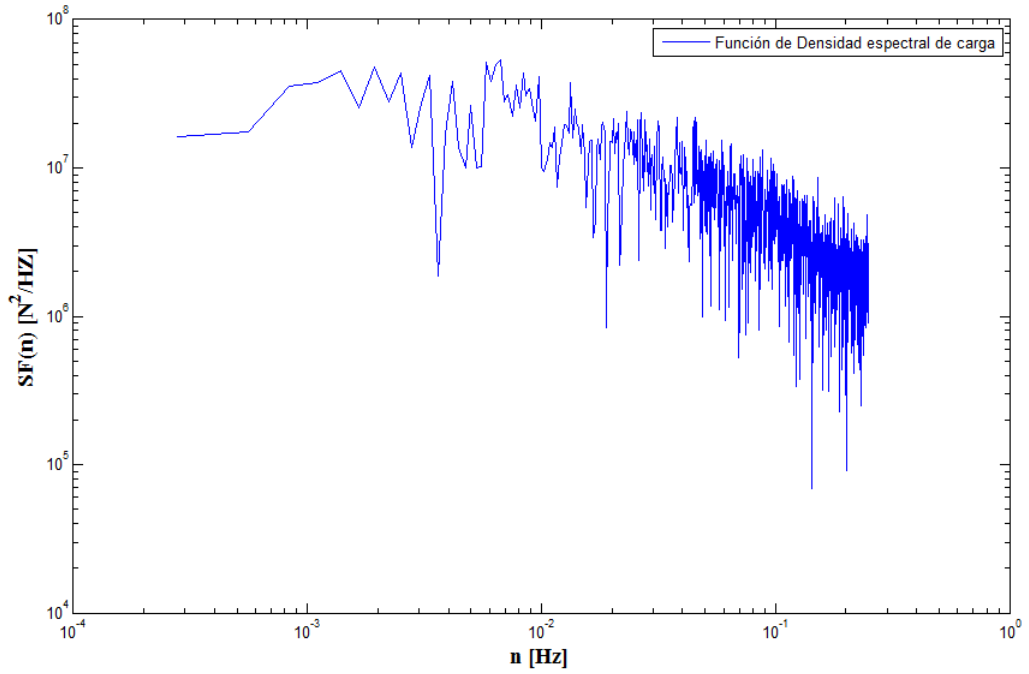


Figura 4.8. Espectro de función de densidad de carga a la altura 55 [m], modelo1 chimenea cuadrada.

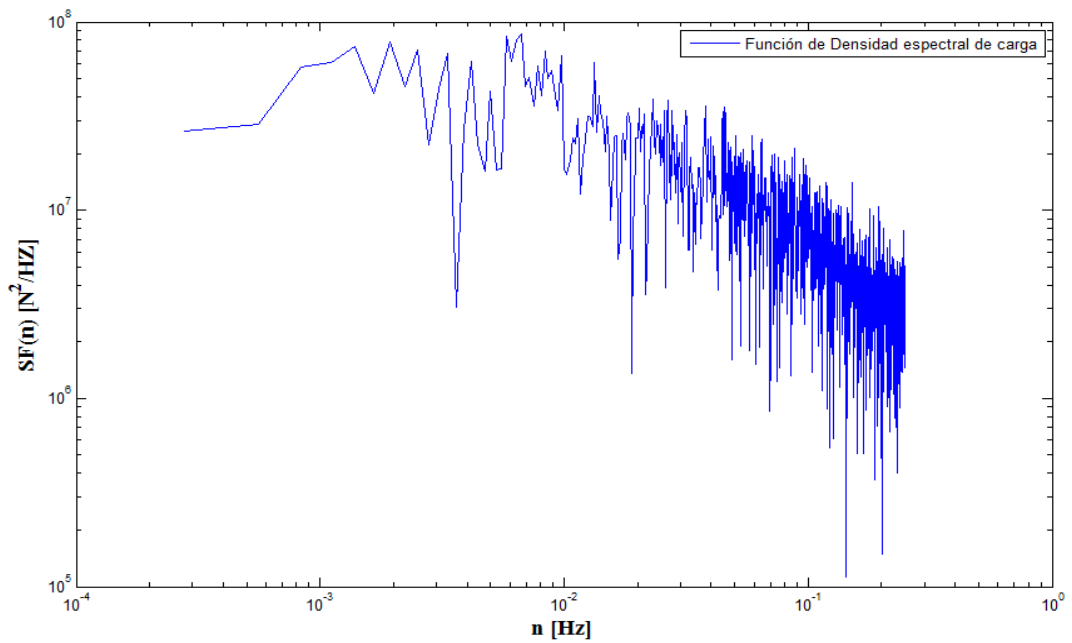


Figura 4.9. Espectro de función de densidad de carga a la altura 65 [m], modelo2 chimenea cuadrada.

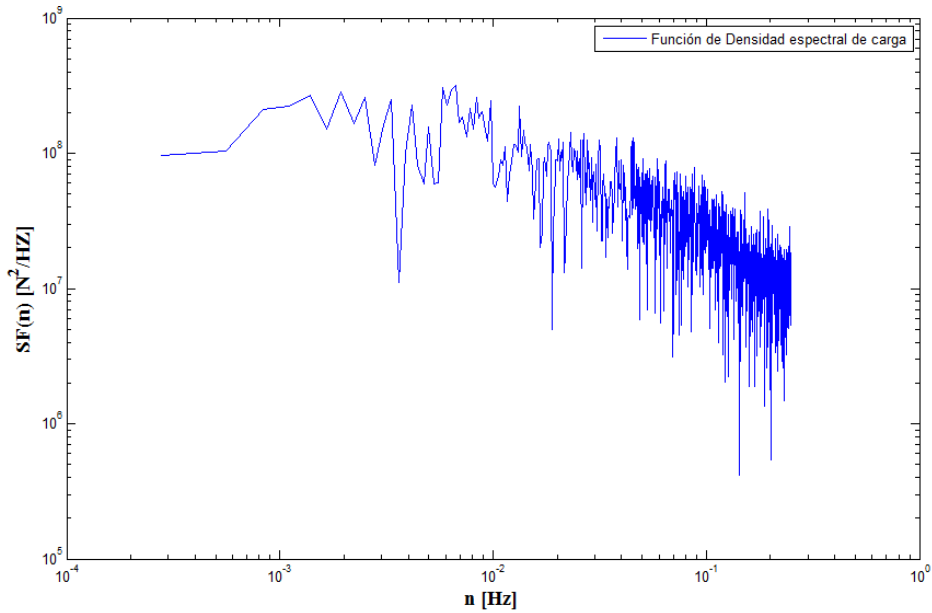


Figura 4.10. Espectro de función de densidad de carga a la altura 100 [m], modelo3 chimenea cuadrada.

Los espectros anteriormente señalados se encuentran en escala logarítmica que es la forma de presentar el espectro de carga en los libros y normas. Para ingresar la función de densidad espectral en el *software* SAP2000 es necesario utilizar una escala aritmética.

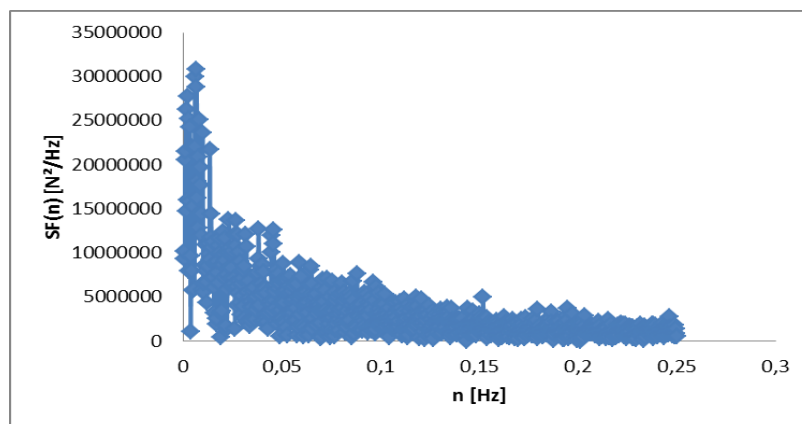


Figura 4.11. Espectro de función de densidad de carga a la altura de 65 [m].

De esta forma, la asignación de la función de densidad espectral aplicada en SAP2000 se muestra en Figura 4.12.

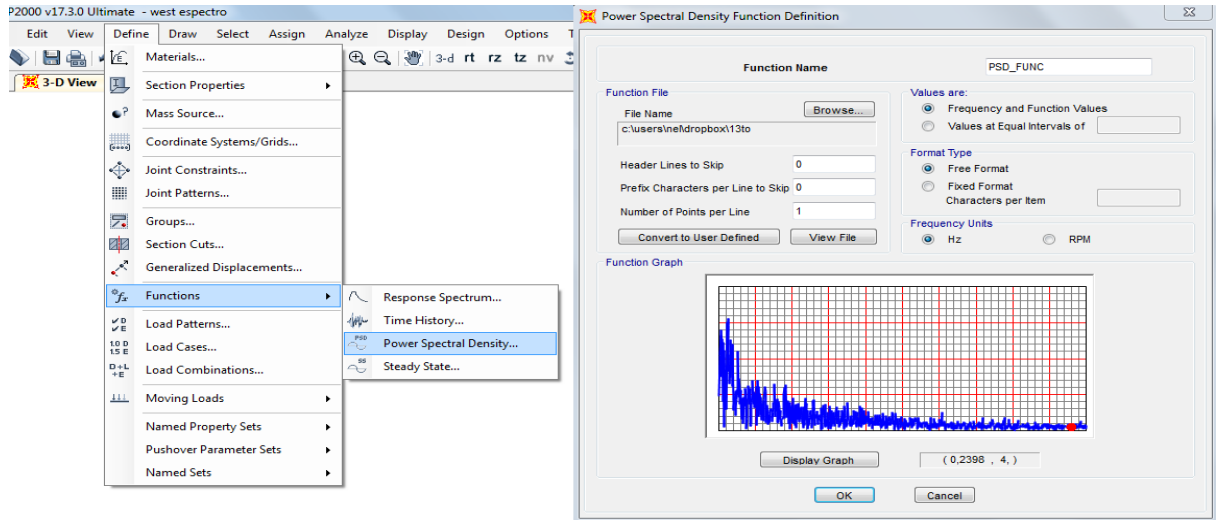


Figura 4.12. Definición de la densidad espectral de carga en SAP2 000 v17.

4.4.1.2 Presión equivalente media (q_z)

De acuerdo a lo determinado en la sección 3.2.4.1 la presión equivalente media no depende de la forma que posee el objeto que se oponga frente de la acción del viento, por tanto la presión media es aplicada en el centro de cada elemento Shell, ingresado en la cara perpendicular a la acción del viento en dirección del eje global cartesiano x positivo, considerando como máxima altura los 100 [m], debido a que la presión media solo varia con respecto a la altura y no depende de la forma de la estructura, a modo de reducción del texto se muestra continuación la asignación de la presión media del viento al modelo3 considerado en la chimenea cilíndrica.

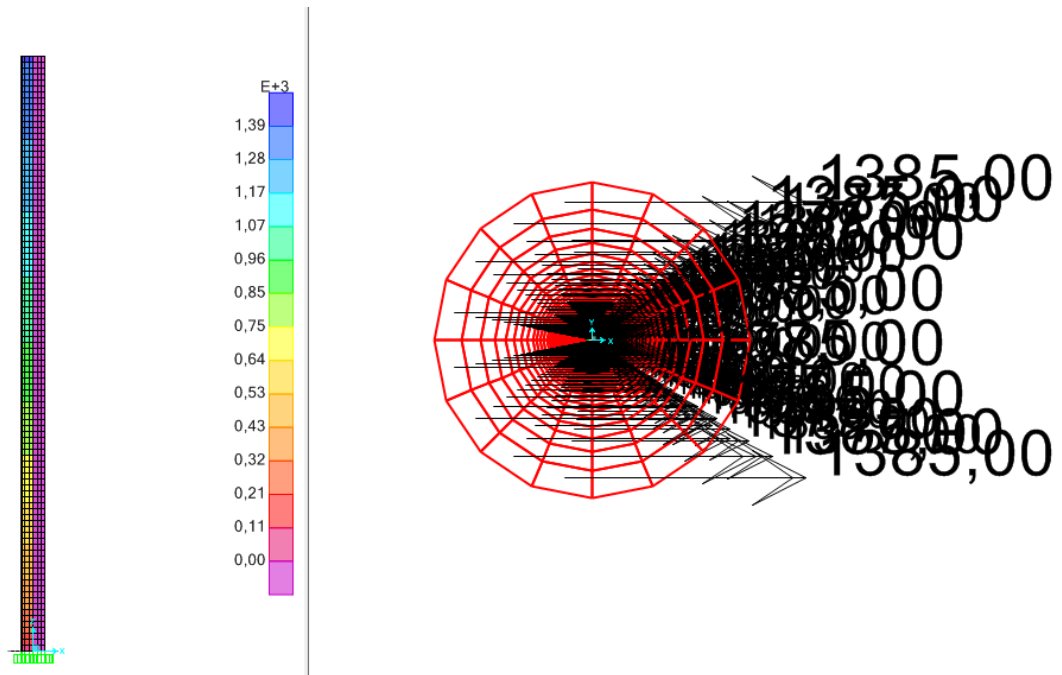


Figura 4.13. Presión equivalente media [N/m²] asignada en SAP 2000 v17
Chimenea cilíndrica.

4.4.2 Carga Sísmica (SXD)

El análisis sísmico será considerado en eje global cartesiano x, debido a la doble simetría y uniformidad de las estructuras estudiadas. Considerando la acción sísmica horizontal se realiza un análisis modal espectral, descrito por las aceleraciones y espectro definidos en Apartado 2.2 de este documento.

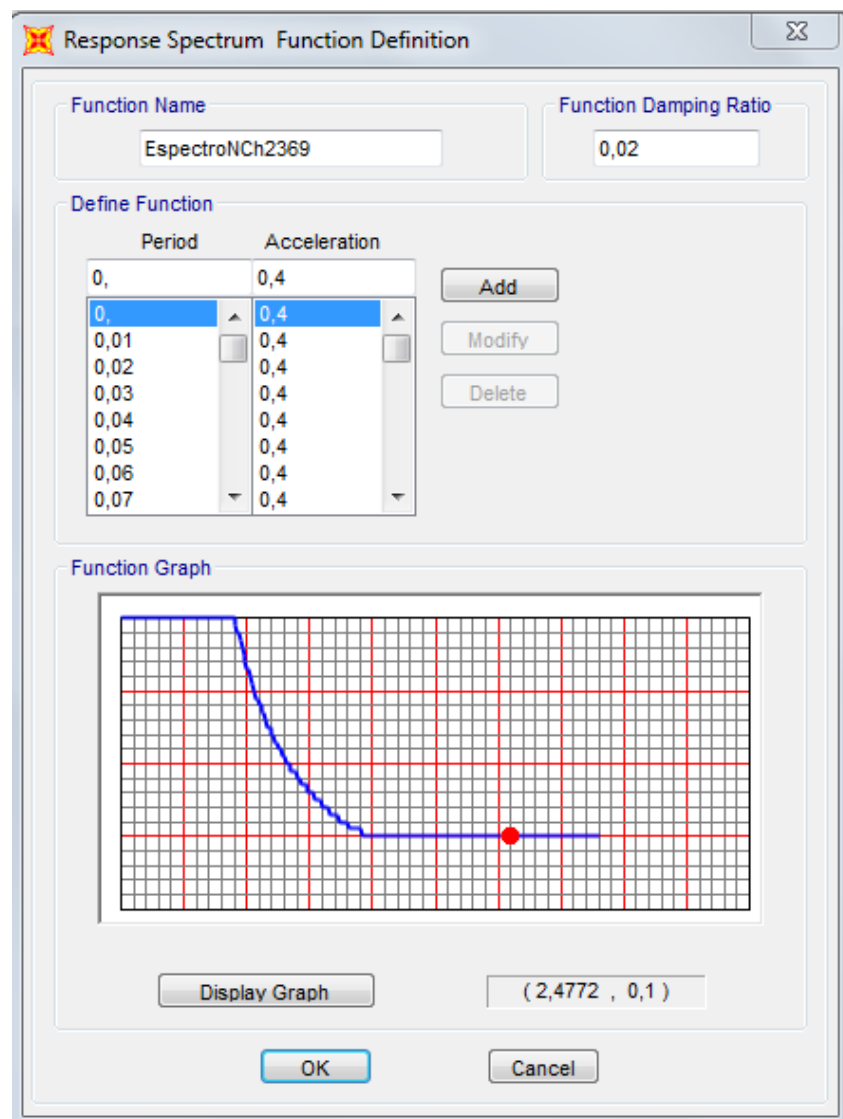


Figura 4.14. Definición de la densidad espectral de carga en SAP 2000 v17.

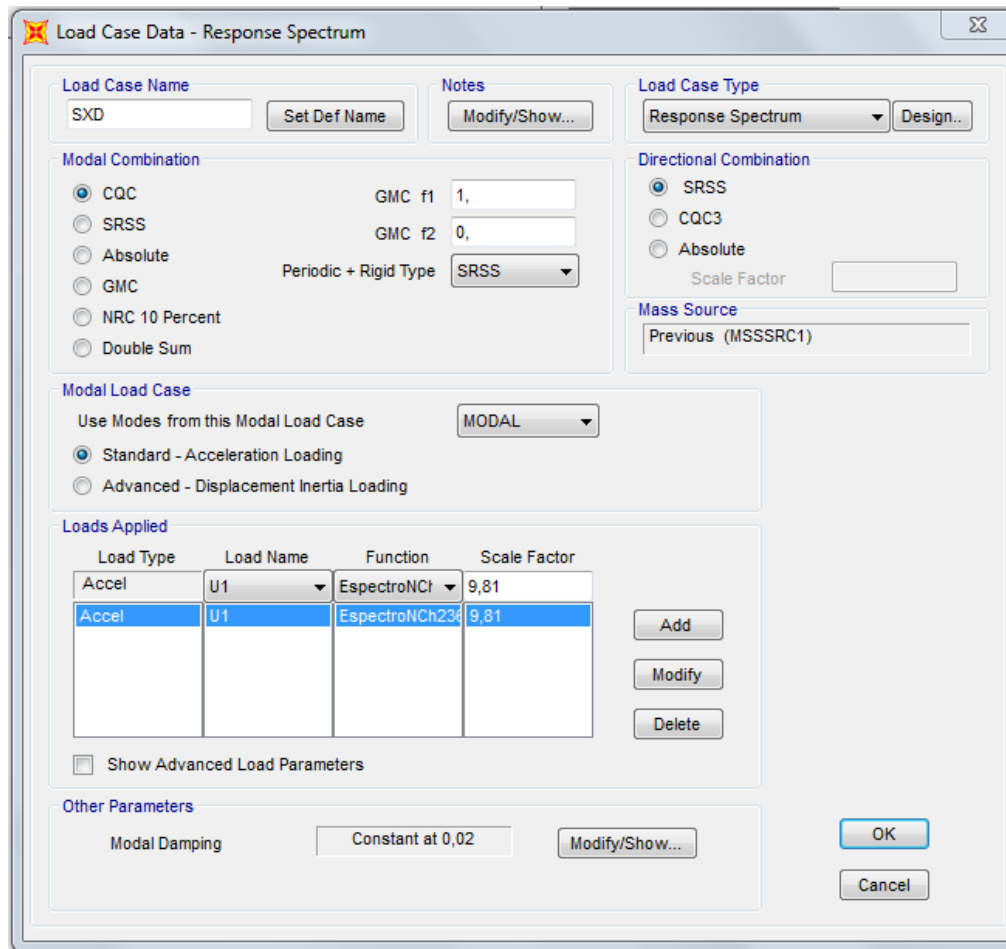


Figura 4.15. Aceleración asociada para generación de sismo alrededor de eje cartesiano x.

4.4.3 Combinación de carga

En esta sección se considera la combinación entre las siguientes cargas:

Comb1 : $q_z + \text{PSD}$

Donde,

q_z : Presión equivalente media [kg/m^2].

PSD : Función de densidad espectral de carga [N^2/Hz].

La combinación planteada anteriormente representa, la velocidad media asociada a la fuerza media o presión media más la velocidad turbulenta perteneciente a la función de densidad espectral de carga. En otras palabras se representa la fuerza total que el viento ejerce sobre la estructura, donde $F_t = F_q + F_f$ con:

$$\text{Fuerza media} \quad F_q = \frac{1}{2} \rho U^2 A C_f \quad (2.29)$$

$$\text{Fuerza fluctuantes} \quad F_f = \rho U u A C_f \quad (2.30)$$

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

5.1. Introducción

En este capítulo se expondrán la condición de serviciabilidad para los desplazamientos provocados por la acción del viento y sísmica, separando los resultados de acuerdo a la forma geométrica de la estructura (Cilíndrica y cuadrada) y realizando una comparación de los resultados obtenidos para cada uno de los efectos descritos.

Se verificarán las tensiones producidas para la carga que genera la mayor deformación en cada estructura, comparando los valores admisibles impuestos por el código AISC y la normativa Chilena NCh 2369 Of.2003 para tensiones de compresión y envolvente el manto de las chimeneas.

5.2. Chimenea de sección circular

5.2.1 Modos de vibración

En el análisis de eventuales problemas de vibración de una estructura, es importante determinar las frecuencias naturales del sistema, de manera de asegurar un comportamiento lejano a la resonancia en el caso de las cargas cíclicas analizadas.

El análisis modal es una técnica utilizada para determinar las características vibratorias de una estructura con comportamiento elástico y lineal, a modo de obtener frecuencias y formas naturales con la que vibra una estructura. Este tipo de análisis es primordial considerarlo en etapas iniciales del diseño, pues las

características vibratorias de una estructura están determinadas en el tiempo de respuestas ante las cargas dinámicas.

El efecto de resonancia es un estado de funcionamiento en el que una frecuencia de excitación es igual a la frecuencia natural de la estructura. Cuando ocurre la resonancia, los niveles de vibración que resultan pueden ser muy altos, los cuales pueden causar daños muy rápidamente en la estructura: por ejemplo la cantante de ópera que rompe un vaso al dar una nota aguda, aunque el vaso no esté vibrando aparentemente, está sometido a una minúscula vibración, cuya frecuencia coincide con su frecuencia natural. Cuando la onda sonora incide sobre el cuerpo, se genera una vibración de amplitud enorme y el sistema entra en resonancia hasta que se rompe.

Siguiendo con lo expuesto en el párrafo anterior, el análisis modal se llevará a cabo por medio del software SAP 2000 v17, tomando en cuenta la geometría y el tipo de material.

Del análisis descrito, se obtuvieron los 12 primeros modos de oscilación para los diferentes modelos de chimeneas cilíndricas los cuales se pueden apreciar en Tabla 5.1, Tabla 5.2 y Tabla 5.3.

Tabla 5.1. Modos de vibración modelo1 chimenea cilíndrica.

TABLE: Modal Periods And Frequencies						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	0,158706	6,300970606	39,59016593	1567,381238
MODAL	Mode	2	0,158706	6,300970606	39,59016593	1567,381238
MODAL	Mode	3	0,106605	9,380401444	58,93880053	3473,782208
MODAL	Mode	4	0,106605	9,380401444	58,93880053	3473,782208
MODAL	Mode	5	0,064643	15,46967571	97,1988391	9447,614323
MODAL	Mode	6	0,064643	15,46967571	97,1988391	9447,614323
MODAL	Mode	7	0,055245	18,10126155	113,7335806	12935,32735
MODAL	Mode	8	0,055245	18,10126155	113,7335806	12935,32735
MODAL	Mode	9	0,05226	19,13505875	120,22912	14455,0413
MODAL	Mode	10	0,05226	19,13505875	120,22912	14455,0413
MODAL	Mode	11	0,034207	29,23382879	183,6815635	33738,91678
MODAL	Mode	12	0,034207	29,23382879	183,6815635	33738,91678

Tabla 5.2. Modos de vibración modelo2 chimenea cilíndrica.

TABLE: Modal Periods And Frequencies						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	1,061957	0,941658055	5,916612058	35,00629825
MODAL	Mode	2	1,061957	0,941658056	5,916612059	35,00629825
MODAL	Mode	3	0,183596	5,446746641	34,22291847	1171,208149
MODAL	Mode	4	0,183596	5,446746641	34,22291847	1171,208149
MODAL	Mode	5	0,175681	5,692134486	35,76473577	1279,116325
MODAL	Mode	6	0,175681	5,692134486	35,76473577	1279,116325
MODAL	Mode	7	0,173223	5,772920083	36,27232664	1315,68168
MODAL	Mode	8	0,173223	5,772920083	36,27232665	1315,68168
MODAL	Mode	9	0,132241	7,561945	47,51310172	2257,494835
MODAL	Mode	10	0,132241	7,561945	47,51310172	2257,494835
MODAL	Mode	11	0,087355	11,44757669	71,92724568	5173,52867
MODAL	Mode	12	0,087355	11,44757669	71,92724568	5173,528671

Tabla 5.3. Modos de vibración modelo3 chimenea cilíndrica.

TABLE: Modal Periods And Frequencies						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	2,504399	0,399297416	2,50885966	6,294376793
MODAL	Mode	2	2,504399	0,399297417	2,508859661	6,294376797
MODAL	Mode	3	0,405945	2,463390837	15,47794112	239,5666612
MODAL	Mode	4	0,405945	2,463390837	15,47794112	239,5666612
MODAL	Mode	5	0,183854	5,43908392	34,17477217	1167,915053
MODAL	Mode	6	0,183854	5,43908392	34,17477217	1167,915053
MODAL	Mode	7	0,181672	5,504436426	34,58539408	1196,149484
MODAL	Mode	8	0,181672	5,504436426	34,58539408	1196,149484
MODAL	Mode	9	0,169602	5,896167189	37,04671105	1372,4588
MODAL	Mode	10	0,169602	5,896167189	37,04671105	1372,4588
MODAL	Mode	11	0,148437	6,736850802	42,32888197	1791,734249
MODAL	Mode	12	0,148437	6,736850802	42,32888198	1791,734249

Como resultado del análisis modal se obtuvieron las Tabla 5.1, Tabla 5.2 y Tabla 5.3, cuyas frecuencias naturales correspondientes a cada uno de los modelos son: 6.3 [Hz] modelo1, 0.94 [Hz] modelo2 y 0.39 [Hz] modelo3.

Las frecuencias naturales de los tres modelos expuestos, se encuentran fuera del rango del contenido de mayor energía cinética, al realizar la comparación con la función de densidad espectral. Se muestra en la Figura 5.1 la menor frecuencia natural, obtenida por el modelo 3.

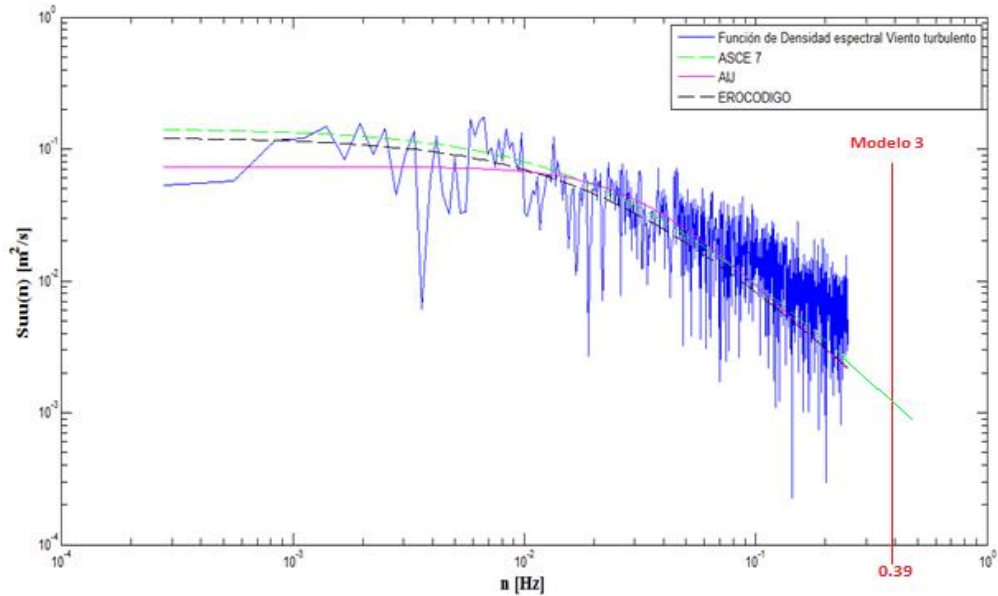


Figura 5.1. Función de densidad espectral.

Con relación a los resultados expuestos de las frecuencias naturales, los modelos 2 y 3, son propensos a los efectos del viento. La evaluación de este criterio se podrá apreciar en la sección 5.3.

Desde Figura 5.2 hasta Figura 5.4 se presentan los tres primeros modos de vibración para los tres modelos en estudio de chimeneas cilíndricas.

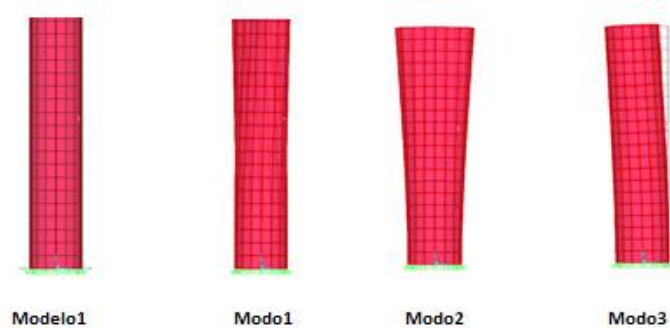


Figura 5.2. Chimenea cilíndrica modelo1, tres primeros modos de oscilación.

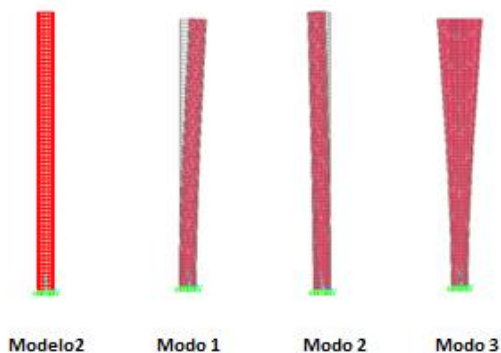


Figura 5.3. Chimenea cilíndrica modelo2, tres primeros modos de oscilación.

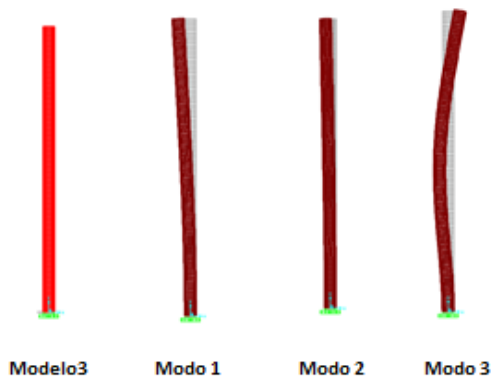


Figura 5.4. Chimenea cilíndrica modelo3, tres primeros modos de oscilación.

5.2.2 Deformaciones

A continuación se evaluarán los desplazamientos para cada uno de las cargas señaladas en el capítulo 4, con el objeto de evaluar el grado de peligrosidad de las cargas aplicadas a los modelos en estudio.

5.2.2.1 Función de densidad espectral de carga turbulenta (PSD)

En esta sección se muestran los desplazamientos sufridos de las chimeneas cilíndricas, debido a la fuerza que genera la densidad espectral de carga. Los desplazamientos se encuentran en la dirección del eje global x.

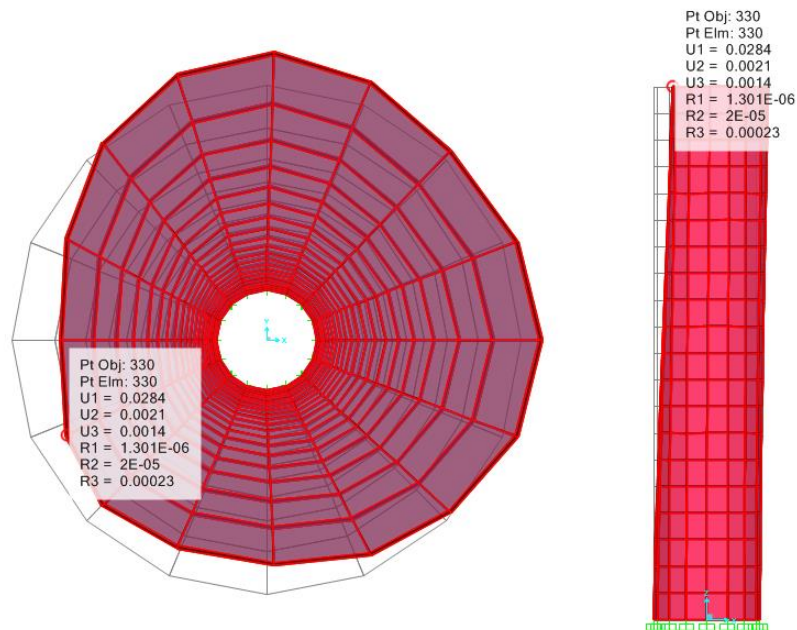


Figura 5.5. Deformación de la Chimenea circular debido a la función de densidad espectral del viento turbulenta [cm], modelo1.

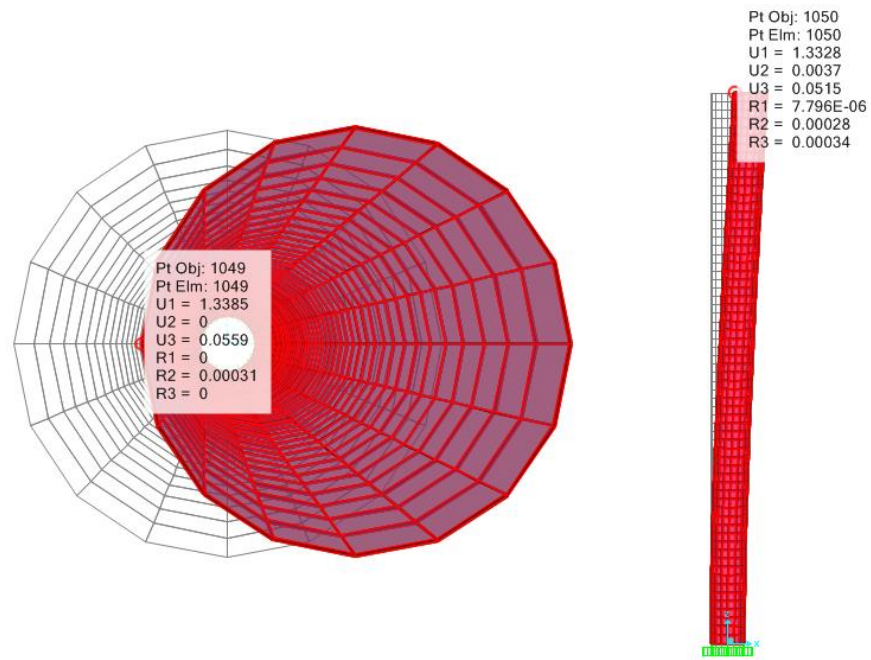


Figura 5.6. Deformación de la Chimenea circular debido a la función de densidad espectral del viento turbulenta [cm], modelo2.

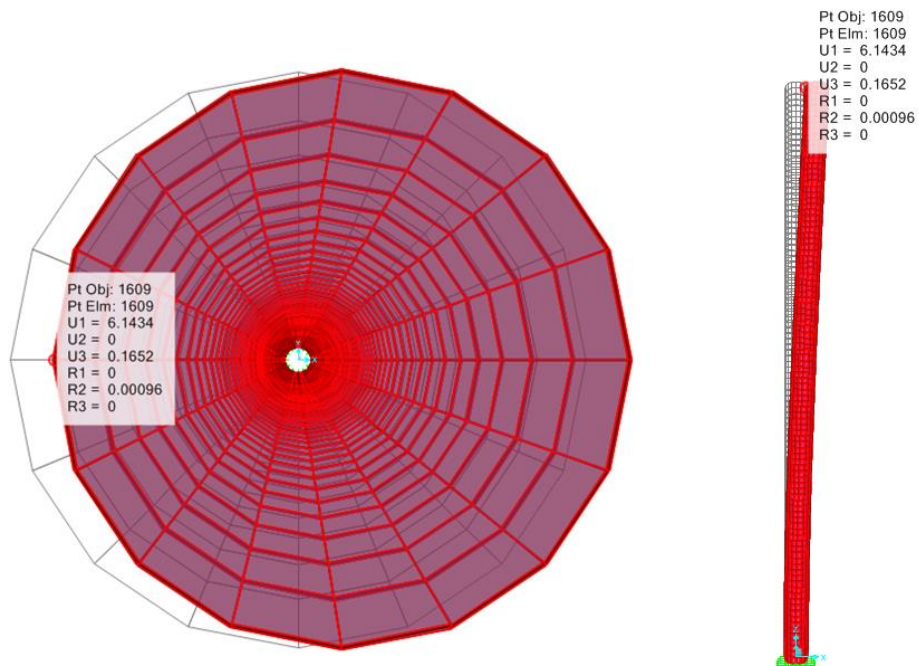


Figura 5.7. Deformación de la Chimenea circular debido a la función de densidad espectral del viento turbulenta [cm], modelo3.

Para columnas en voladizo expuestas a viento se considera una deformación admisible de $L/100$ donde L corresponde a la altura de la estructura.

Tabla 5.4. Desplazamientos sufridos en los modelos cilíndricos, por causa de la función de densidad espectral de carga.

Chimenea Cilíndrica	Coeficiente de Fuerza (C_f)	Desplazamientos [cm]	
		Función de densidad espectral de carga (PSD)	Deformación admisible
Modelo 1	0.57	0.0284	20
Modelo 2	0.65	1.3385	65
Modelo 3	0.7	6.1434	100

La función de densidad espectral de carga, aplicadas sobre las chimenea cilíndrica correspondiente a las alturas de 20[m], 65[m] y 100[m] sufren desplazamiento menores a la máxima deformación admisible expuesta a la acción del viento.

Los desplazamientos originados por causa de la función de densidad espectral se atribuyen a la componente turbulenta del viento y al coeficiente de fuerza. En particular para chimeneas de sección circular, se generan desplazamientos relativamente pequeños, esto se debe a la interacción suave que existe de la estructura al oponerse como obstáculo a la acción del paso del flujo, en otras palabras se genera una menor fuerza de arrastre por causa de la sección circular de la chimenea.

Se puede apreciar además que los desplazamiento aumenta en función de la altura esto se debe principalmente al perfil de velocidad media.

5.2.2.2 Presión equivalente media del viento (q_z)

La presión media sobre la estructura aplicada en la cara perpendicular a la acción del viento, generan los desplazamientos que a continuación se presentan en las Figura 5.8, Figura 5.9 y Figura 5.10 en la dirección del eje global x.

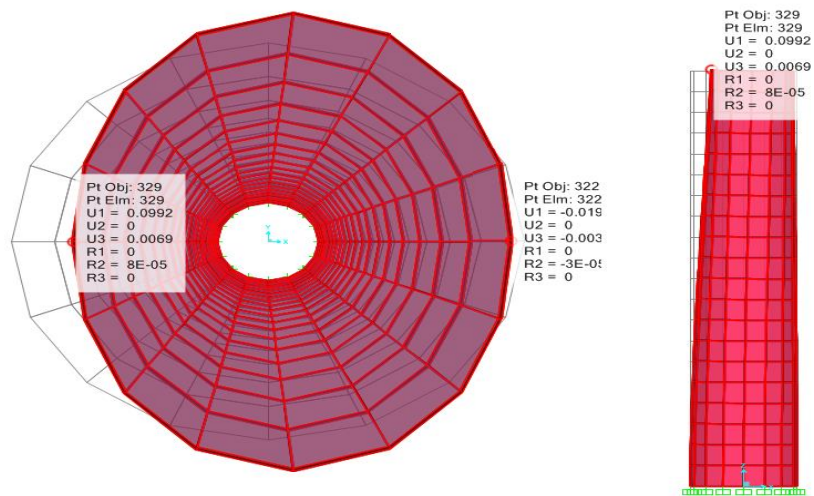


Figura 5.8. Deformación de la Chimenea circular debido a la Presión media del viento [cm], modelo1.

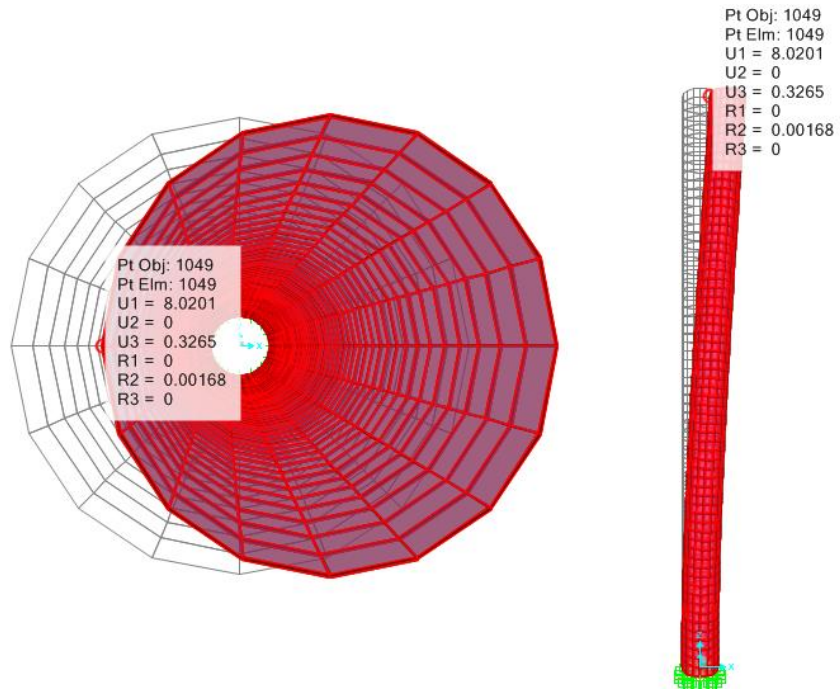


Figura 5.9. Deformación de la Chimenea circular debido a la Presión media del viento [cm], modelo2.

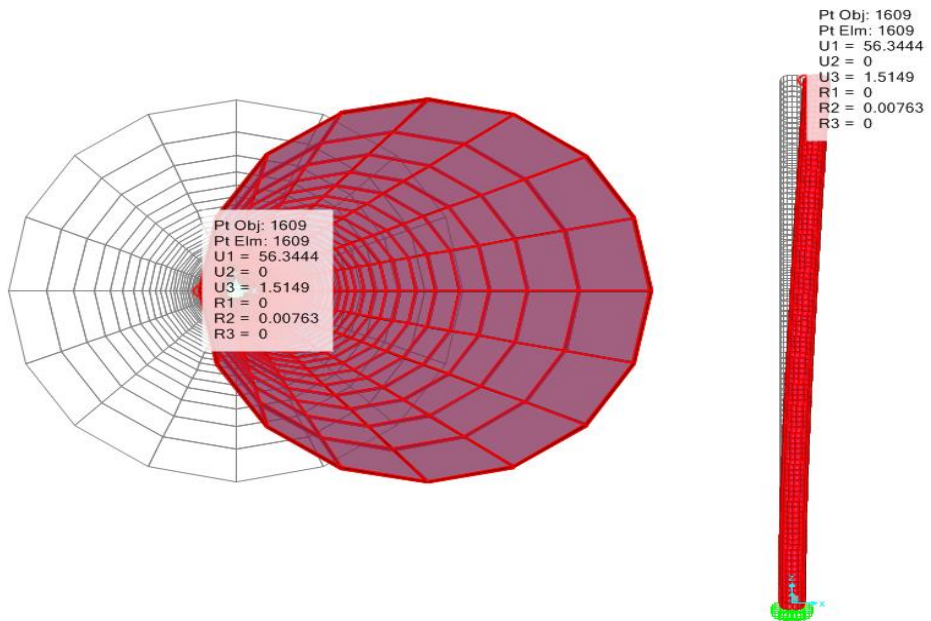


Figura 5.10. Deformación de la Chimenea circular debido a la Presión media del viento [cm], modelo3.

Tabla 5.5. Desplazamientos sufridos en los modelos cilíndricos, por causa de la presión media del viento.

Chimenea Cilíndrica	Área de ataque [m ²].	Desplazamientos [cm]	
		Presión media del viento (q_z)	Deformación admisible
Modelo 1	125	0.099	20
Modelo 2	408.2	8.02	65
Modelo 3	628	56.34	100

La presión media aplicada como carga sobre las chimeneas cilíndricas correspondientes a las alturas de 20[m], 65[m] y 100[m] sufren desplazamientos menores a la máxima admisible expuestas a la acción del viento.

Los desplazamientos originados por causa de la presión media y que se atribuyen a la velocidad media del viento y al área de ataque, generan mayores deformaciones que la velocidad de agitación turbulenta debido al aumento del área de aplicación. Del mismo modo, la velocidad de agitación turbulenta depende del coeficiente de fuerza, el cual tiene valores menores a 1 lo que disminuye la fuerza de arrastre, según la forma geométrica de la chimenea que no obstaculiza grandemente la acción del viento.

Los desplazamientos producidos por la presión media, al igual que el caso anterior aumentan en función de la altura, debido principalmente al perfil de velocidad media.

5.2.2.3 Carga Sísmica (SXD)

Al considerar la carga sísmica de acuerdo al espectro de diseño según la NCh 2369 Of.2003 aplicada en las estructuras cilíndricas, se considera la deformación obtenida para un modelo de columna en voladizo. Esta situación se muestra en Figura 5.11, Figura 5.12 y Figura 5.13.

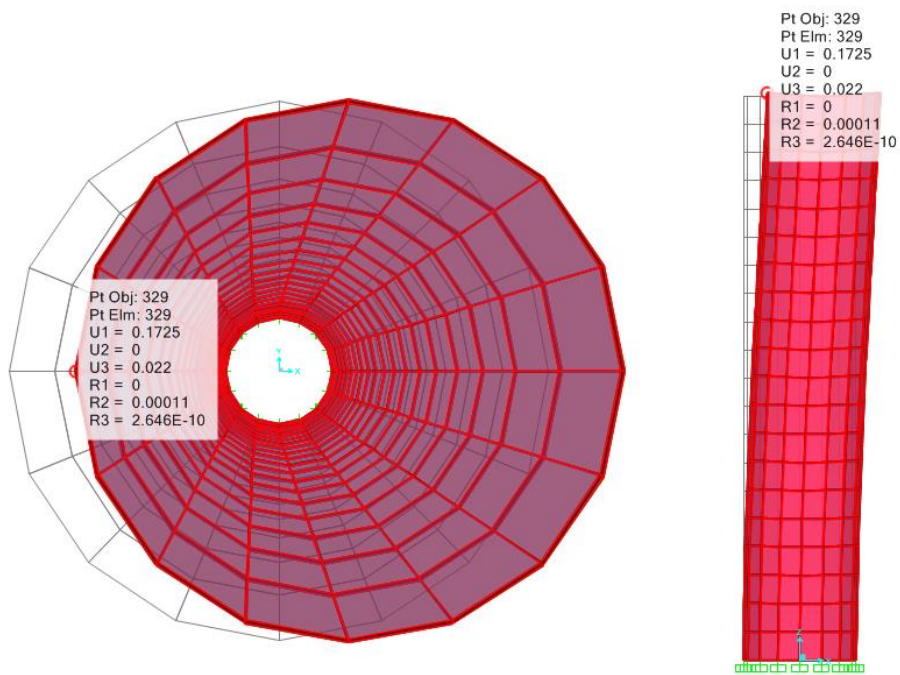


Figura 5.11. Deformación de la Chimenea circular debido a la acción sísmica [cm], modelo1.

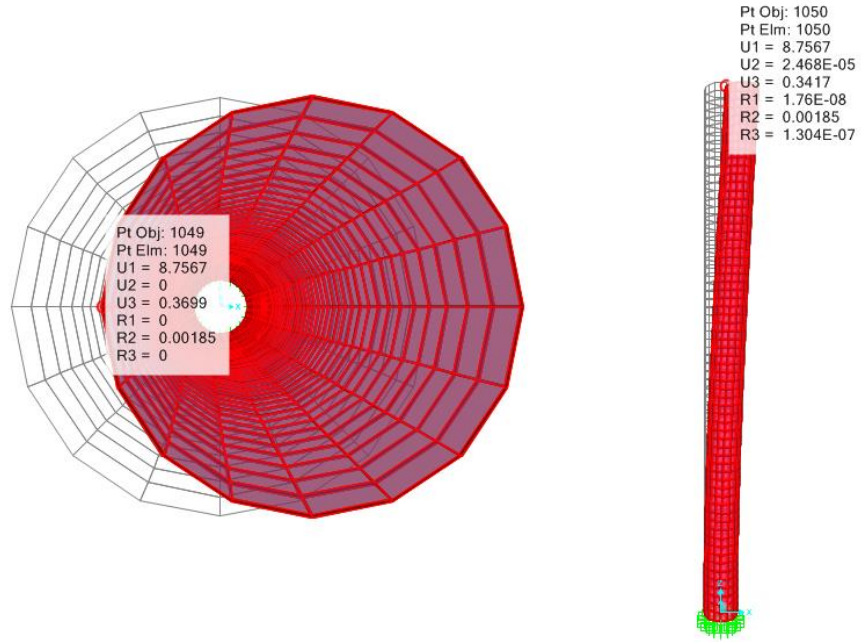


Figura 5.12. Deformación de la Chimenea circular debido a la acción sísmica [cm], modelo2.

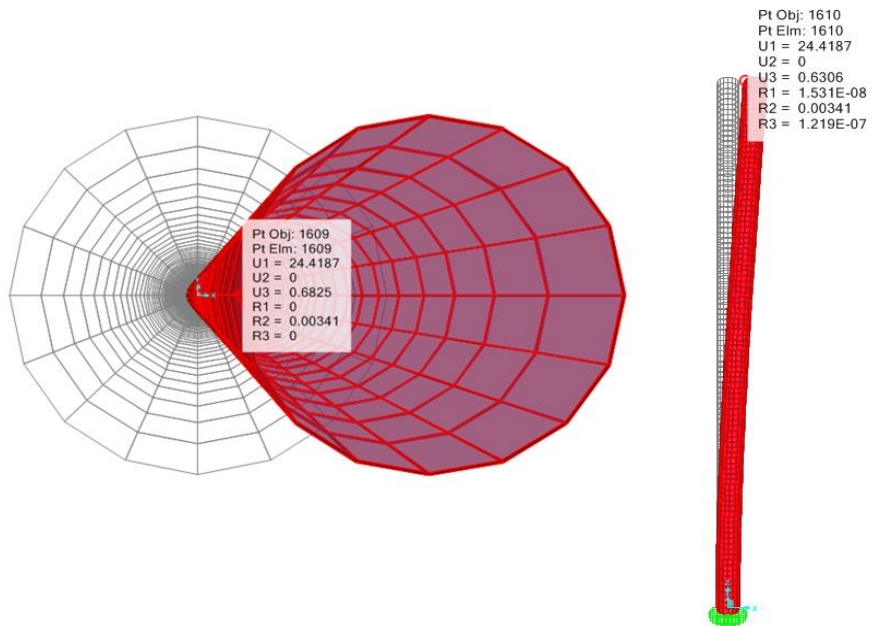


Figura 5.13. Deformación de la Chimenea circular debido a la acción sísmica [cm], modelo3.

La máxima deformación sísmica considerada en estructuras industriales de acero de acuerdo a la norma NCh 2369 Of.2003 es:

$$d^{\max} = 0.015h = d_{\text{adm}}$$

Donde,

h : Altura del piso o entre dos puntos ubicados sobre una misma vertical.

Tabla 5.6. Desplazamientos sufridos en los modelos cilíndricos, por causa de la acción sísmica.

Chimenea Cilíndrica	Peso [tonf]	Desplazamientos [cm]	
		Carga sísmica (SXD)	Deformación Máxima NCh 2369 Of.2003.
Modelo 1	62.72	0.173	30
Modelo 2	203.84	8.757	97.5
Modelo 3	313.6	24.419	150

La acción sísmica aplicada sobre las chimenea cilíndricas correspondientes a las alturas de 20[m], 65[m] y 100[m] sufren desplazamiento menores a la máxima deformación considerada en estructuras industriales de acuerdo a la norma NCh2360 Of.2003.

Los desplazamientos originados por causa de la acción sísmica se atribuyen a las fuerzas inerciales, que son generadas por el movimiento sísmico del suelo; esto se debe a que la masa de la estructura por inercia se opone a ser desplazada dinámicamente y seguir el movimiento de su base. La masa contenida por la estructura va a generar la fuerza sísmica que es directamente proporcional a ella y

a la aceleración. En la Tabla 5.6 se puede observar que el desplazamiento mayor, corresponde al modelo 3 con una masa de 313.6 [tonf].

Por lo general cuando el movimiento del terreno es lento, con periodos dominantes largos, son las estructuras altas y flexibles donde se amplifican las vibraciones y generan aceleraciones más elevadas y por ende fuerzas sísmicas mayores. Por el contrario, movimiento de periodo corto afectan más a las estructuras bajas y rígidas (Bazán. E ; Mely. R, 2001).

5.2.2.4 Combinación 1

Al considerar la presión media (q_z) más la función de densidad espectral de carga (PSD), como combinación aplicada sobre los modelos cilíndrico, se obtiene el efecto total del viento, generando los desplazamientos que a continuación se presentan en Figura 5.14, Figura 5.15 y Figura 5.16 para la dirección del eje global x.

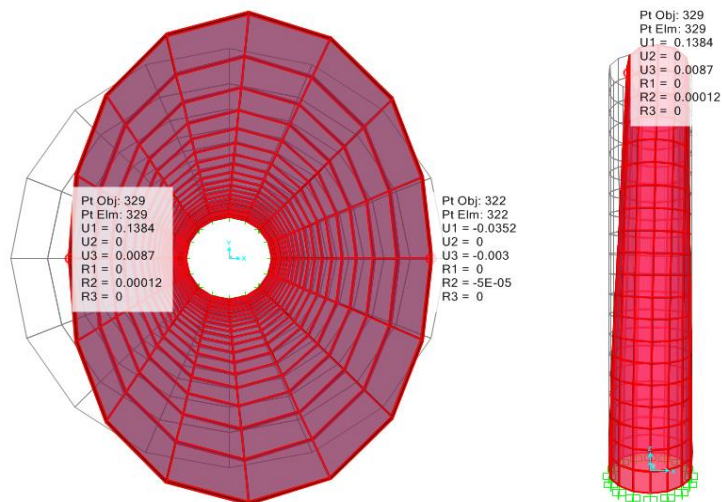


Figura 5.14. Deformación de la Chimenea circular debido a la Comb1 [cm], modelo1.

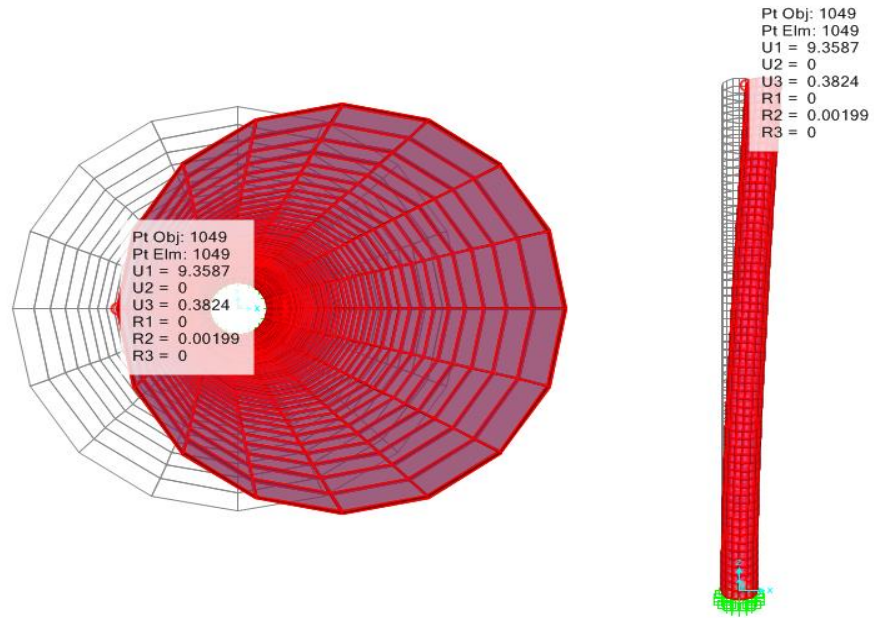


Figura 5.15. Deformación de la Chimenea circular debido a la Comb1 [cm], modelo2.

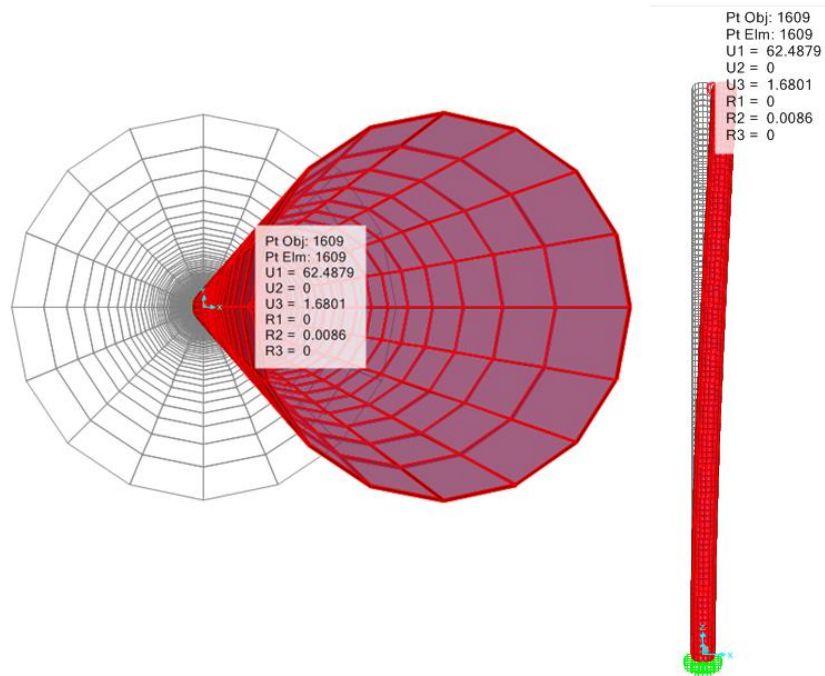


Figura 5.16. Deformación de la Chimenea circular debido a la Comb1 [cm], modelo3.

Tabla 5.7. Desplazamientos sufridos en los modelos cilíndricos, por causa del viento total.

Chimenea Cilíndrica	Desplazamientos [cm]	
	Combinación 1 (acción del viento total)	Deformación admisible
Modelo 1	0.138	20
Modelo 2	9.359	65
Modelo 3	62.488	100

Como resultado de la combinación propuesta, para obtener el efecto total de la acción del viento sobre las chimenea cilíndricas; correspondientes a las alturas de 20[m], 65[m] y 100[m] la cuales sufren desplazamiento menores al admisible expuestas a la acción del viento.

Los desplazamientos originados según la combinación, son la suma de los desplazamientos individualizados de cada una de las variables en consideración (Presión media y densidad espectral de carga), del mismo modo que los análisis anteriores, el modelo 3 considera el mayor desplazamiento.

Para concluir el estudio de deformaciones de chimeneas cilíndricas, se realiza una comparación entre los desplazamientos debido a la acción viento y sísmica, sufridos en cada uno de los modelos cilíndricos, contemplando como acción del viento la combinación 1. (Figura 5.17)

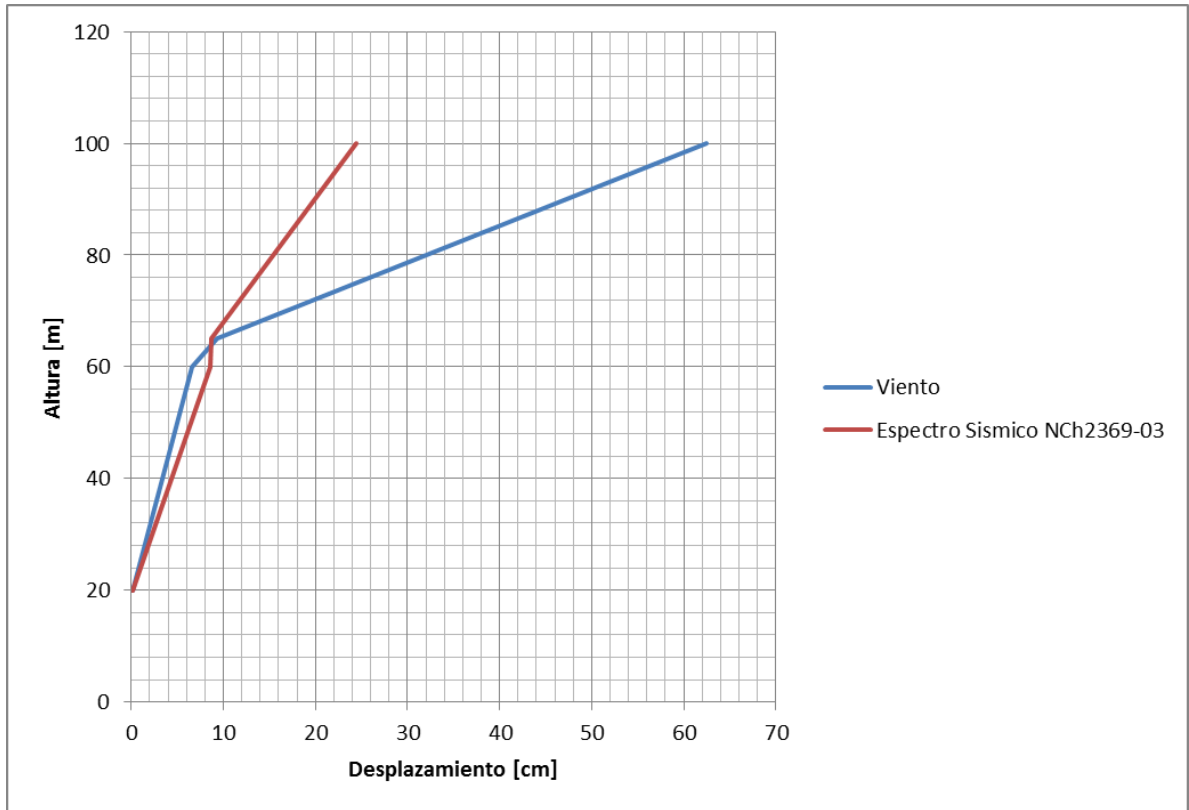


Figura 5.17. Comparación entre los desplazamiento máximo frente a la acción del viento y sísmica.

Según lo observado en la Figura 5.17 se puede identificar a la altura en que el desplazamiento debido al viento supera al desplazamiento originado por la fuerza sísmica: dicho valor corresponde a los 65 [m] de altura, es decir, la estructura circular sufre mayores desplazamiento debido al viento al igualar o superar los 65 [m] de altura. Del mismo modo, al considerar menores alturas de chimeneas según los modelos descritos, los desplazamientos mayores son generados por causa de la acción sísmica.

Con relación a la máxima deformación sufrida por las estructuras según a la carga expuesta, ninguna de ella pudo generar desplazamientos mayores a los admisibles, tanto para la acción del viento como sísmica.

5.3. Chimenea de sección cuadrada

5.3.1 Modos de vibración

Siguiendo con lo expuesto en la sección anterior, el análisis modal se llevara a cabo, en el *software SAP 2000 v17*. Para ello se considera la geometría y el tipo de material planteado, obteniendo luego los 12 primeros modos de oscilación para los diferentes modelos de chimeneas cuadradas (Tabla 5.8, Tabla 5.9 y Tabla 5.10).

Cabe señalar que las frecuencias naturales correspondientes a cada uno de los modelos son: 1.5 [Hz] modelo1, 1.1 [Hz] modelo2 y 0.46 [Hz] modelo3.

Tabla 5.8. Modos de vibración modelo1.

TABLE: Modal Periods And Frequencies						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	0,668731	1,495370421	9,395689459	88,27898042
MODAL	Mode	2	0,668731	1,495370421	9,395689459	88,27898042
MODAL	Mode	3	0,345125	2,897502844	18,2055473	331,4419523
MODAL	Mode	4	0,208935	4,786168817	30,07238559	904,3483751
MODAL	Mode	5	0,20664	4,839322405	30,40635943	924,546694
MODAL	Mode	6	0,202724	4,932818321	30,9938116	960,6163574
MODAL	Mode	7	0,197118	5,073090795	31,87516954	1016,026433
MODAL	Mode	8	0,190119	5,259856115	33,04865066	1092,21331
MODAL	Mode	9	0,182054	5,492879043	34,51277689	1191,131769
MODAL	Mode	10	0,173252	5,771923592	36,26606551	1315,227508
MODAL	Mode	11	0,164859	6,065786074	38,11245794	1452,55945
MODAL	Mode	12	0,164022	6,096761627	38,30708308	1467,432614

Tabla 5.9. Modos de vibración modelo2.

TABLE: Modal Periods And Frequencies						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	0,913696	1,094455871	6,876669046	47,28857717
MODAL	Mode	2	0,913696	1,094455871	6,876669046	47,28857717
MODAL	Mode	3	0,34801	2,873484528	18,05463577	325,9698727
MODAL	Mode	4	0,206196	4,84975526	30,47191099	928,5373595
MODAL	Mode	5	0,205889	4,85697693	30,51728608	931,30475
MODAL	Mode	6	0,204175	4,897749219	30,77346593	947,0062053
MODAL	Mode	7	0,201394	4,965386349	31,19844255	973,3428178
MODAL	Mode	8	0,197352	5,067082315	31,83741715	1013,621131
MODAL	Mode	9	0,192212	5,202602273	32,68891416	1068,565109
MODAL	Mode	10	0,186157	5,371816905	33,75212105	1139,205675
MODAL	Mode	11	0,180363	5,544378846	34,83635971	1213,571958
MODAL	Mode	12	0,180363	5,544378847	34,83635971	1213,571958

Tabla 5.10. Modos de vibración modelo3.

TABLE: Modal Periods And Frequencies						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	2,144523	0,466304078	2,92987493	8,584167108
MODAL	Mode	2	2,144523	0,466304078	2,92987493	8,584167108
MODAL	Mode	3	0,359587	2,780965581	17,47332208	305,3169844
MODAL	Mode	4	0,359587	2,780965581	17,47332208	305,3169844
MODAL	Mode	5	0,355355	2,814086051	17,68142413	312,6327593
MODAL	Mode	6	0,305398	3,274414209	20,57375125	423,2792404
MODAL	Mode	7	0,205901	4,856709369	30,51560495	931,2021455
MODAL	Mode	8	0,204956	4,879094324	30,65625377	939,805895
MODAL	Mode	9	0,203784	4,907145784	30,83250629	950,6434441
MODAL	Mode	10	0,202028	4,949809856	31,10057256	967,2456137
MODAL	Mode	11	0,199728	5,006810246	31,45871657	989,6508483
MODAL	Mode	12	0,196925	5,078080201	31,90651891	1018,025949

Las frecuencias naturales de los tres modelos, se encuentran fuera del rango del contenido de mayor energía cinética, al realizar la comparación con la función de densidad espectral. En Figura 5.18 se indica la menor frecuencia natural, obtenida por el modelo 3, de modo de apreciar que todos los modelos se encuentran fuera

de un posible efecto resonante por la interacción de la componente de agitación turbulenta del viento.

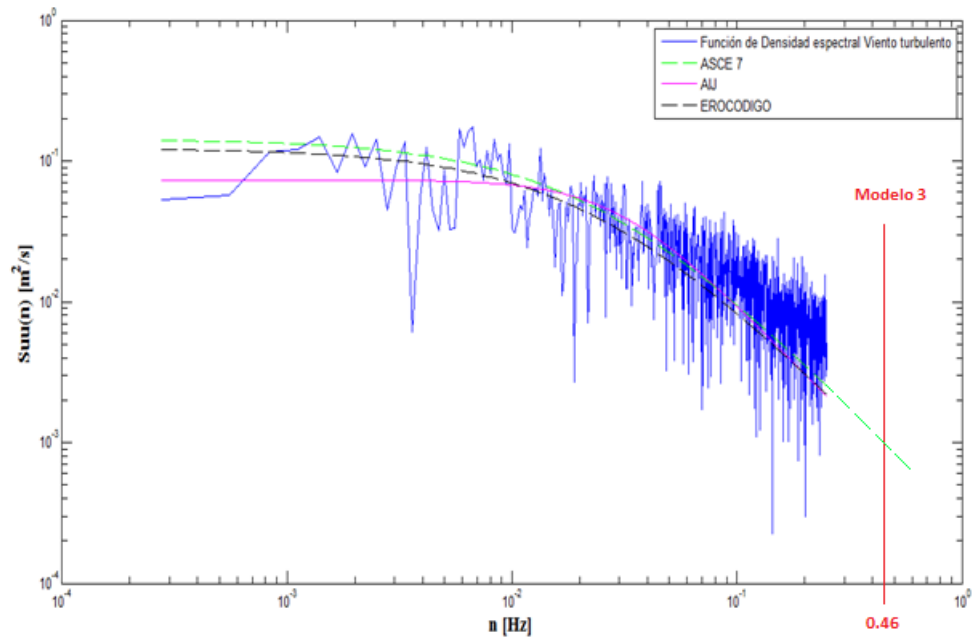


Figura 5.18. Función de densidad espectral.

Con relación a los resultados expuestos de las frecuencias naturales, los modelos 2 y 3, son propensos a los efectos del viento. La evaluación de este criterio se podrá apreciar en la sección 5.3.

De la Figura 5.2 a la Figura 5.4 se presentan los tres primeros modos de vibración para los tres modelos en estudio de chimeneas cuadradas.

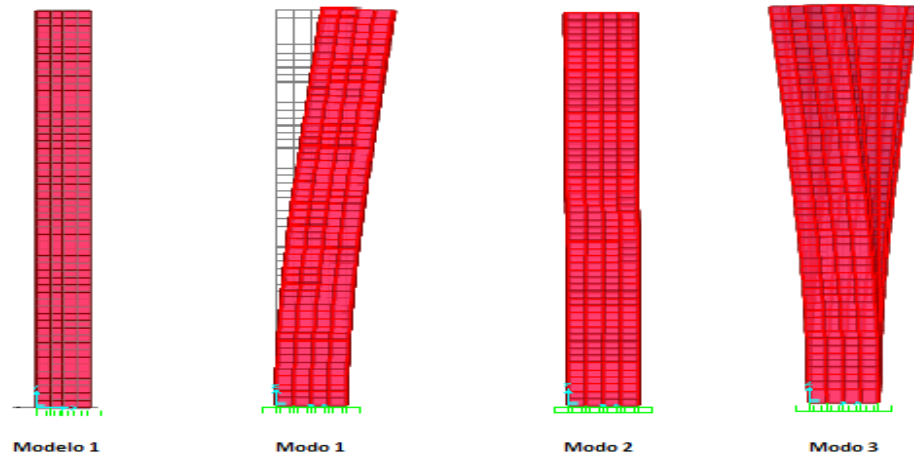


Figura 5.19. Chimenea cuadrada modelo1, tres primeros modos de oscilación.

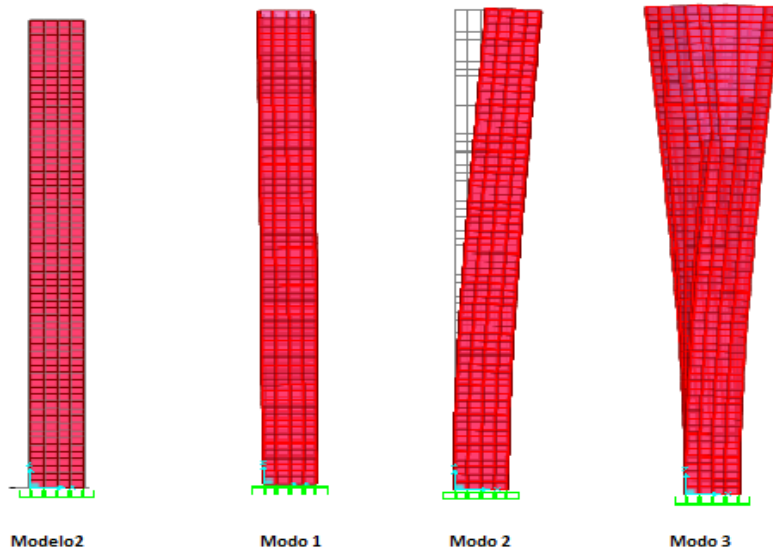


Figura 5.20. Chimenea cuadrada modelo2, tres primeros modos de oscilación.

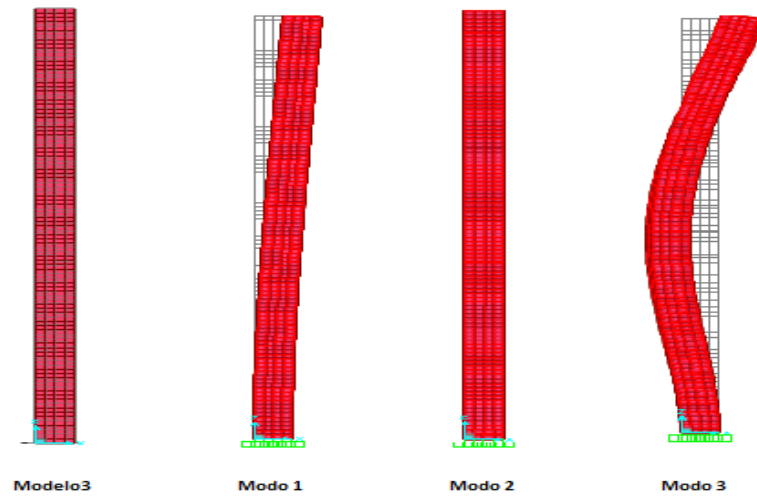


Figura 5.21. Chimenea cilíndrica modelo3, tres primeros modos de oscilación.

5.3.2 Deformaciones

En estas secciones se evaluarán los desplazamientos para cada uno de las cargas señaladas en el capítulo 4, con el objeto de evaluar el grado de peligrosidad de las cargas aplicadas a las chimeneas cuadradas.

5.3.2.1 Función de densidad espectral de carga turbulenta (PSD)

En esta sección se muestran los desplazamientos sufridos de las chimeneas cuadradas, debido a la fuerza que genera la densidad espectral de carga. Los desplazamientos se encuentran en la dirección del eje global x.

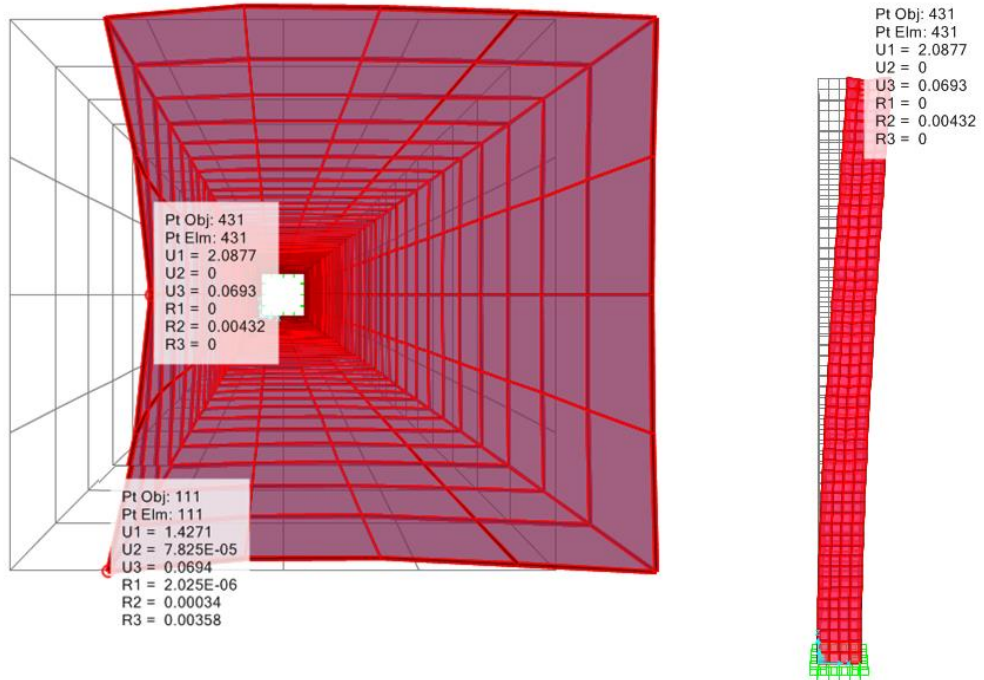


Figura 5.22. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la función de densidad espectral del viento turbulenta en [cm], modelo1.

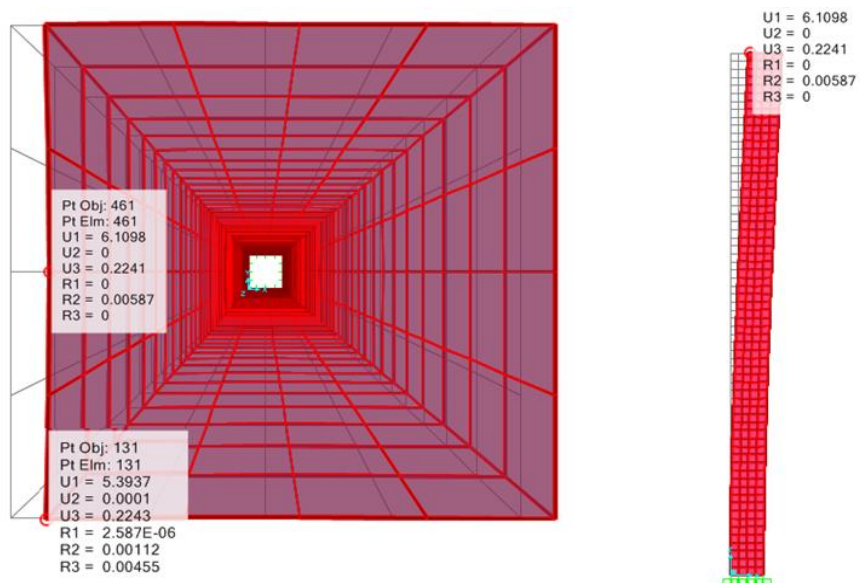


Figura 5.23. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la función de densidad espectral del viento turbulenta en [cm], modelo2.

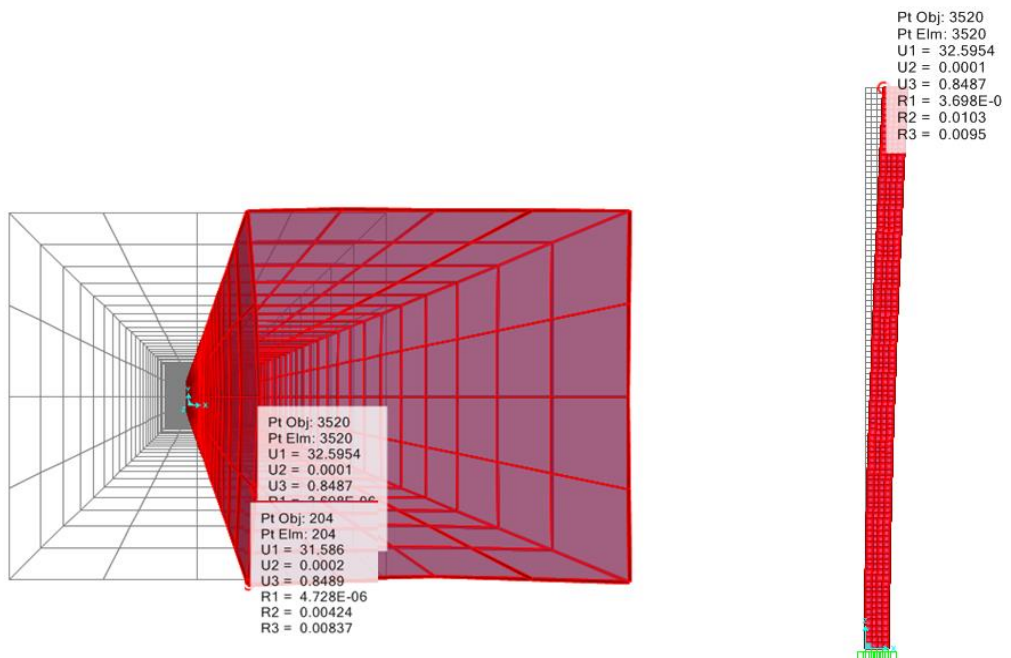


Figura 5.24. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la función de densidad espectral del viento turbulenta en [cm], modelo3.

Para columnas en voladizo expuestas a viento, se considera una deformación admisible de $L/100$, donde L corresponde a la altura de la estructura.

Tabla 5.11. Desplazamientos sufridos en los modelos cuadrados, por cauda de la función de densidad espectral de carga.

Chimenea Cuadrada	Coeficiente de Fuerza (C_f)	Desplazamientos [cm]	
		Función de densidad espectral de carga (PSD)	Deformación admisible
Modelo 1	1.625	2.087	55
Modelo 2	1.71	6.109	65
Modelo 3	2	32.595	100

La función de densidad espectral de carga, aplicadas sobre las chimeneas cuadradas correspondiente a las alturas de 55[m], 65[m] y 100[m] sufren desplazamiento menores al admisible expuestas a la acción del viento.

Los desplazamientos originados por causa de la función de densidad espectral se atribuyen a la componente turbulenta del viento y al coeficiente de fuerza, para este tipo de estructura de sección cuadrada, se generan mayores desplazamientos debido a la interacción brusca que existe al oponerse como obstáculo a la acción del paso del flujo, en otras palabras se genera una mayor fuerza de arrastre por causa de la estructura cuadrada.

Se puede apreciar además que los desplazamiento aumenta en función de la altura. Esto se debe principalmente al perfil de velocidad media.

5.3.2.2 Presión equivalente media del viento (q_z)

La presión media sobre la estructura considerada es aplicada en la cara perpendicular a la acción del viento, carga que genera los desplazamientos mostrados en Figura 5.25, Figura 5.26 y Figura 5.27 para la dirección del eje global x.

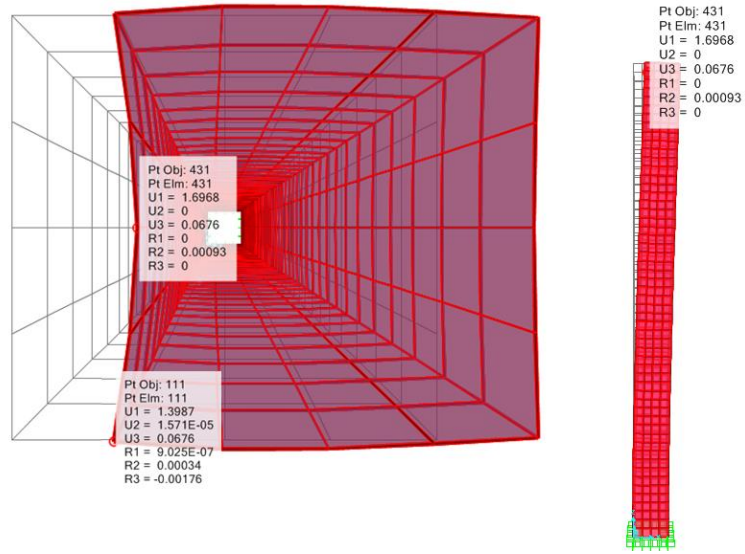


Figura 5.25. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la Presión media del viento [cm], modelo1.

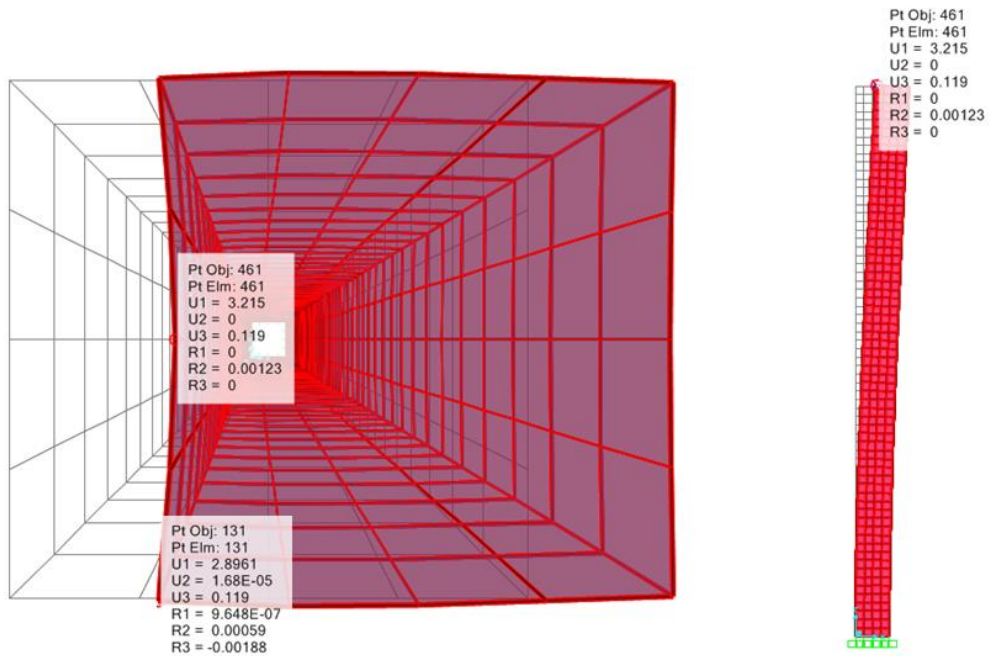


Figura 5.26. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la Presión media del viento [cm], modelo2.

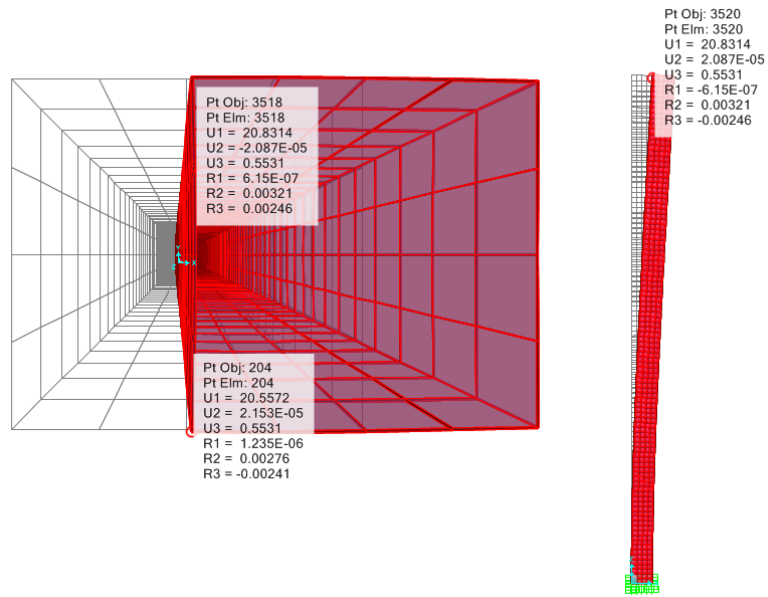


Figura 5.27. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la Presión media del viento [cm], modelo3.

Tabla 5.12. Desplazamientos sufridos en los modelos cuadrados, por causa de la presión media del viento.

Chimenea Cuadrada	Área de ataque [m ²]	Desplazamientos [cm]	
		Presión media del viento (q_z)	Deformación admisible
Modelo 1	220	1.6968	55
Modelo 2	260	3.215	65
Modelo 3	400	20.8314	100

La presión media aplicadas como carga sobre las chimenea cuadradas correspondientes a las alturas de 55[m], 65[m] y 100[m] sufren desplazamientos menores al admisible expuestas a la acción del viento.

Los desplazamientos originados por causa de la presión media se atribuyen a la velocidad media del viento y al área de ataque, en este caso se generaron menores deformaciones debido a la presión media en comparación a la función de densidad espectral, este hecho se debe a que la estructura posee menor área de ataque, en cambio la función de densidad espectral depende del aumento del coeficiente de fuerza, este coeficiente posee valores mayores a 1 aumentando la fuerza de arrastre, según la forma geométrica de la chimenea que obstaculiza considerablemente la acción del viento.

Los desplazamientos producidos por la presión media, al igual que el caso anterior aumenta en función de la altura, debido principalmente al perfil de velocidad media.

5.3.2.3 Carga Sísmica (SXD)

Al considerar la carga sísmica de acuerdo al espectro de diseño según la NCh 2369 Of.2003, aplicada en las estructuras cuadradas, se considera la deformación obtenida para un modelo de columna en voladizo, situación en la cual se obtienen las Figura 5.28, Figura 5.29 y Figura 5.30.

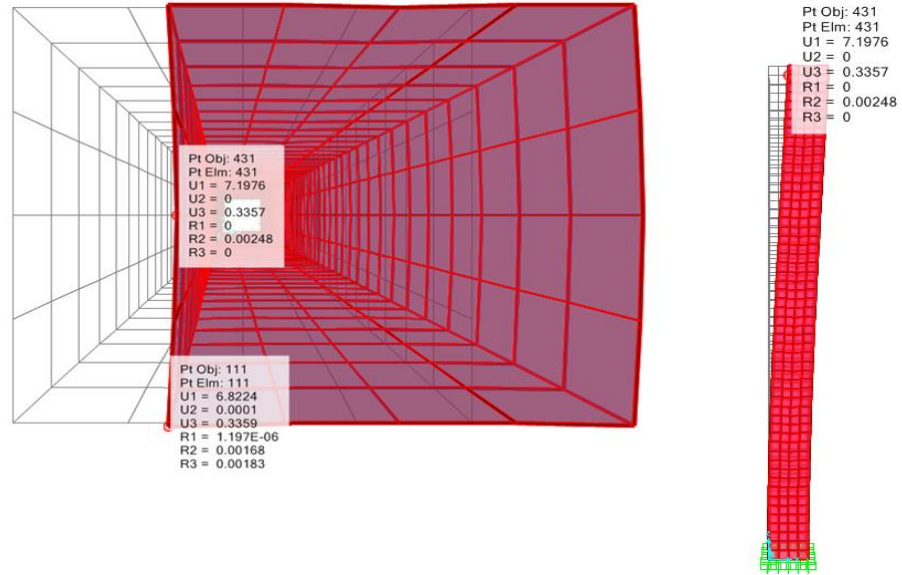


Figura 5.28. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la acción sísmica [cm], modelo1.

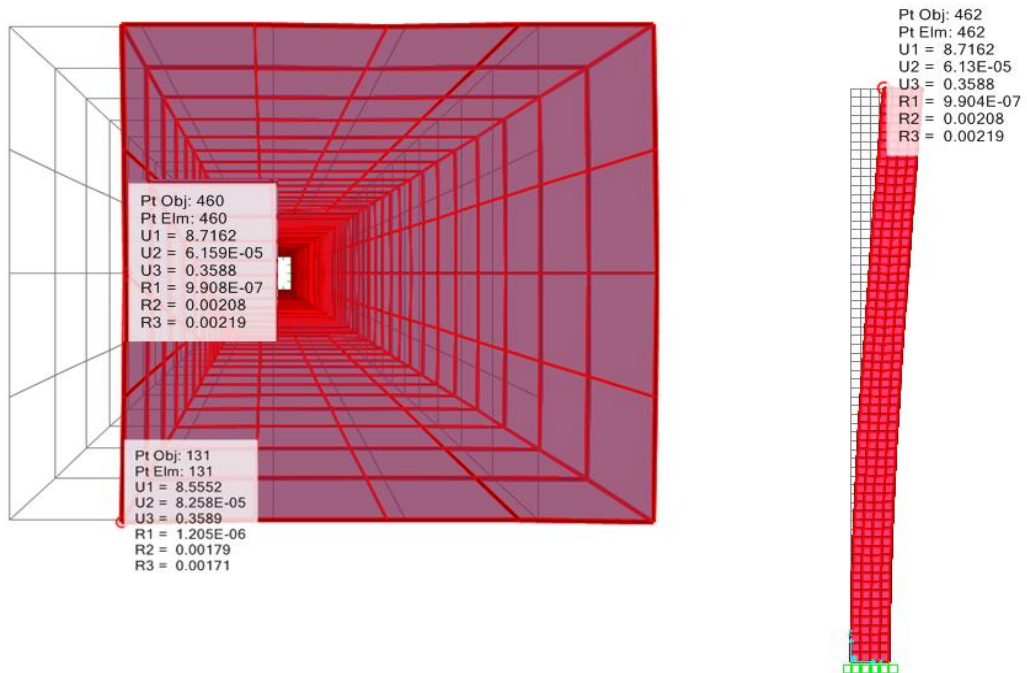


Figura 5.29. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la acción sísmica [cm], modelo2.

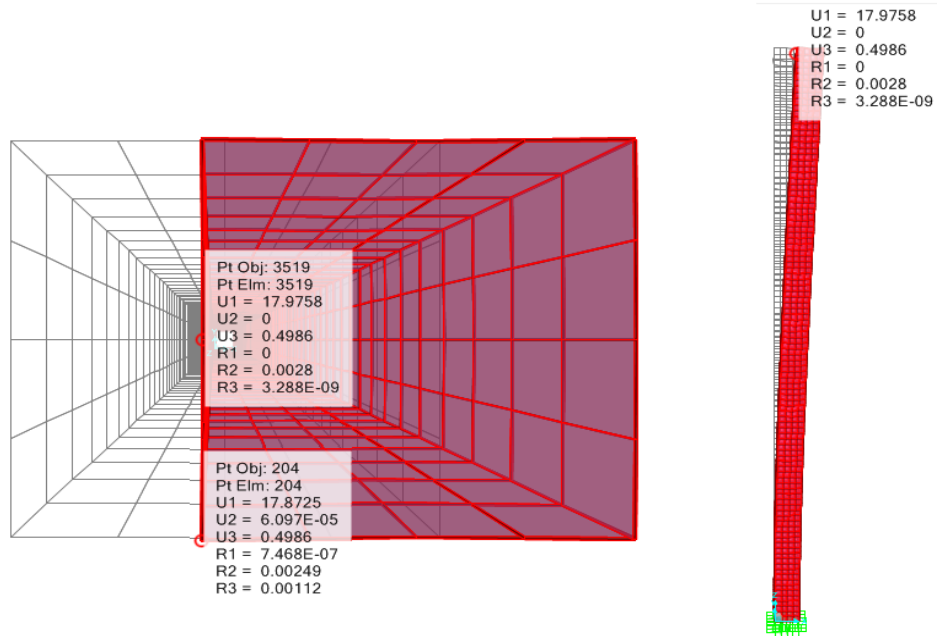


Figura 5.30. Deformación de la Chimenea circular debido a la acción sísmica [cm], modelo3.

La máxima deformación sísmica considerada en estructuras industriales de acero de acuerdo a la norma NCh 2369 Of.2003 es:

$$d^{\max} = 0.015h = d_{\text{adm}}$$

Donde,

h : Altura del piso o entre dos puntos ubicados sobre una misma vertical.

Tabla 5.13. Desplazamientos sufridos en los modelos cuadrados, por causa de la acción sísmica.

Chimenea Cuadrada	Peso [tonf]	Desplazamientos [cm]	
		Carga sísmica (SXD)	Deformación Máxima NCh 2369 Of.2003.
Modelo 1	221	7.19	30
Modelo 2	261.21	8.71	97.5
Modelo 3	401.87	17.9758	150

La acción sísmica aplicada sobre las chimenea cuadradas correspondientes a las alturas de 55[m], 65[m] y 100[m] sufren desplazamiento menores a la máxima deformación considerada en estructuras industriales de acuerdo a la norma NCh 2360 Of.2003.

Los desplazamientos originados por causa de la acción sísmica se atribuyen a las fuerzas inerciales, que son generadas por el movimiento sísmico del suelo; esto se debe a que la masa de la estructura por inercia se opone a ser desplazada dinámicamente y seguir el movimiento de su base. La masa contenida por la estructura va a generar la fuerza sísmica que es directamente proporcional a ella y a la aceleración. En la Tabla 5.13 se puede observar que el desplazamiento mayor, corresponde al modelo 3 con una masa de 401.87 [tonf].

5.3.2.4 Combinación 1

Al considerar la presión media (q_z) más la función de densidad espectral de carga (PSD), como combinación aplicada sobre los modelos cuadrados, se tiene el efecto total del viento, generando los desplazamientos que a continuación se presentan en Figura 5.31, Figura 5.32 y Figura 5.33 para la dirección del eje global x.

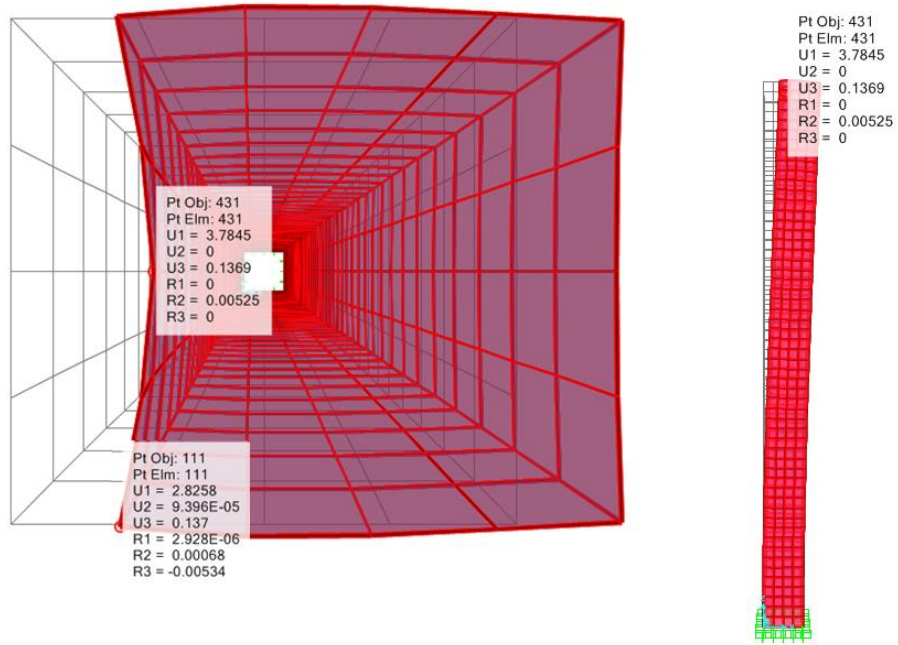


Figura 5.31. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la Comb1 [cm], modelo1.

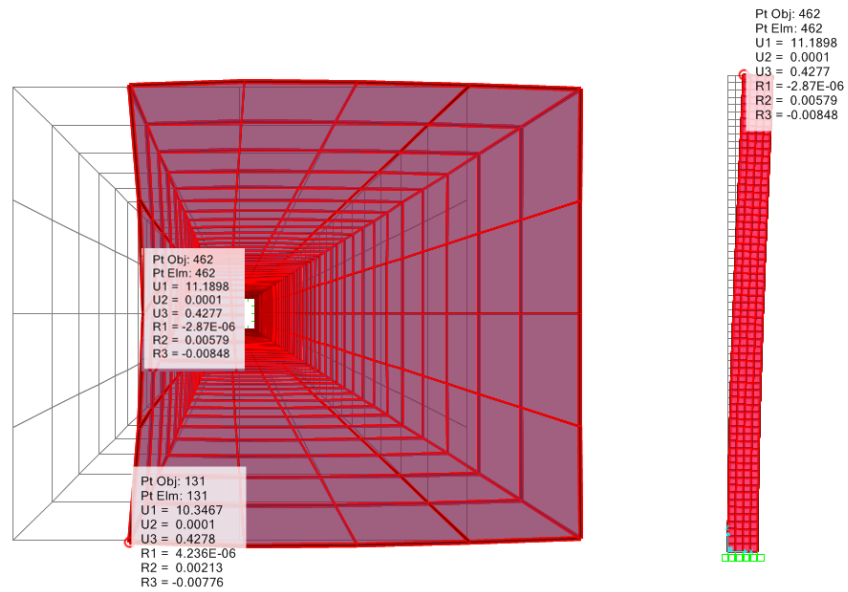


Figura 5.32. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la Comb1 [cm], modelo2.

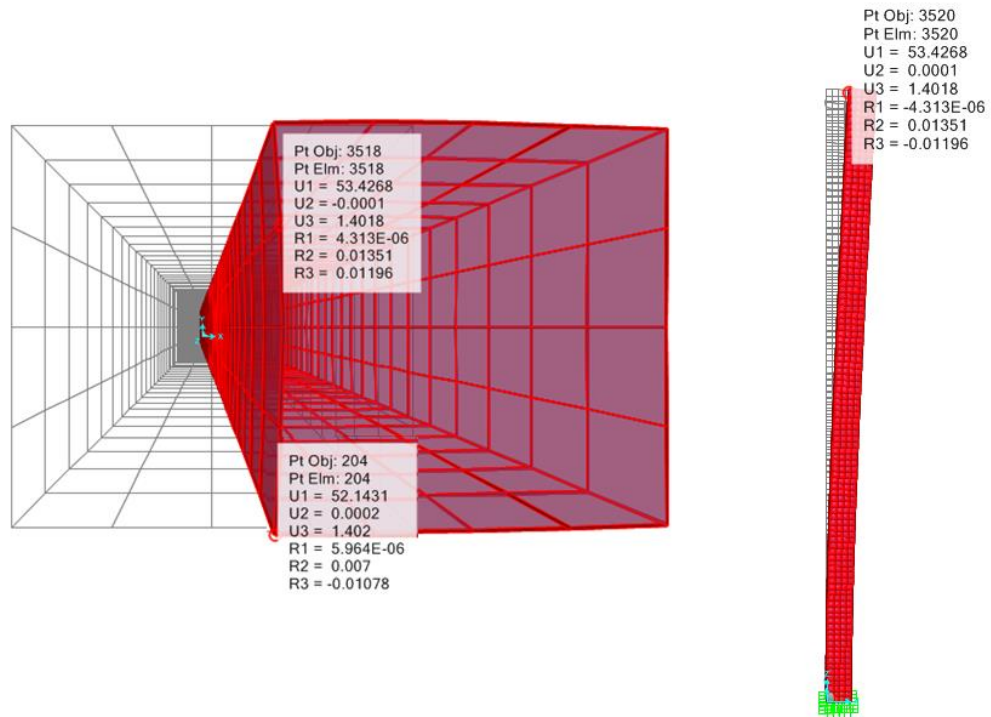


Figura 5.33. Deformación de la Chimenea cuadrada, debido a la Comb1 [cm], modelo3.

Tabla 5.14. Desplazamientos sufridos en los modelos cuadrados, por causa del viento total.

Chimenea Cuadrada	Desplazamientos [cm]	
	Combinación 1 (acción del viento total)	Deformación admisible
Modelo 1	3.7845	55
Modelo 2	11.1898	65
Modelo 3	53.4268	100

El efecto total de la acción del viento sobre chimeneas cilíndricas correspondientes a las alturas de 55[m], 65[m] y 100[m] sufren desplazamientos menores al admisible expuestas a la acción del viento.

Los desplazamientos originados según la combinación 1, corresponden a la suma de los desplazamientos individualizados de cada una de las variables en consideración (Presión media y densidad espectral de carga). Del mismo modo que los análisis anteriores, el modelo 3 considera el mayor desplazamiento.

Para concluir el estudio de deformaciones de chimeneas cuadradas, se realiza una comparación entre los desplazamientos debido a la acción viento y sísmica, sufridos en cada uno de los modelos cuadrados, contemplando como acción del viento la combinación 1. (Figura 5.17)

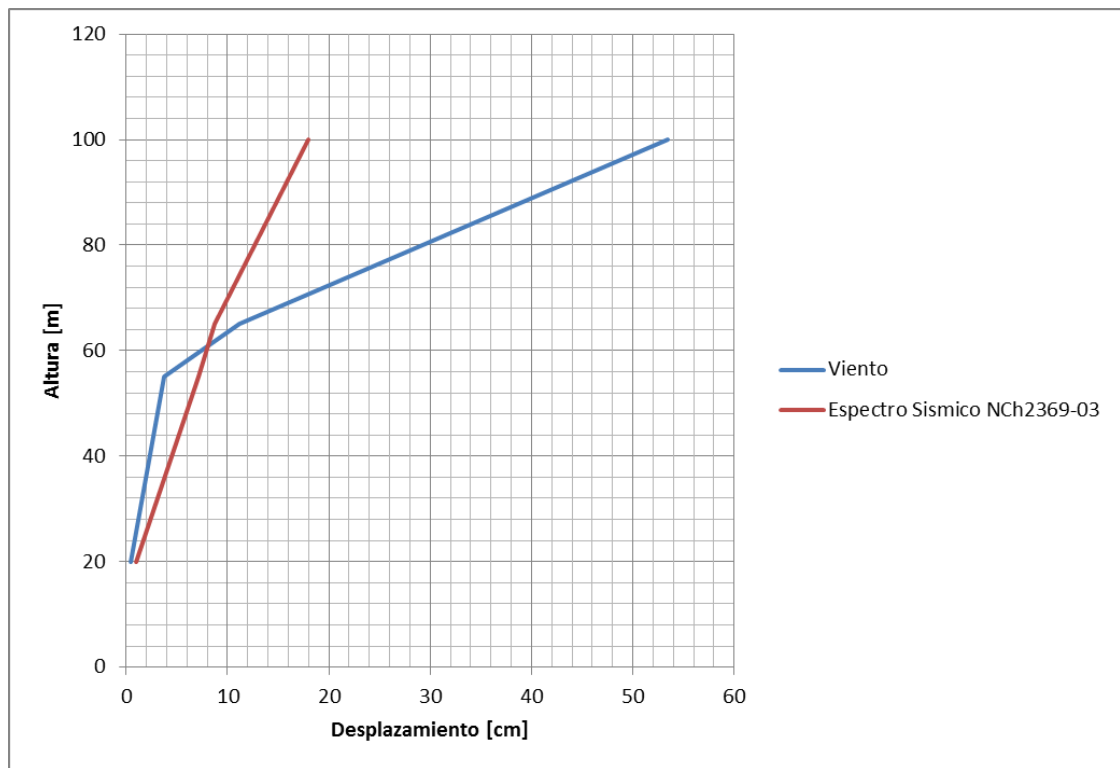


Figura 5.34 Comparación entre los desplazamiento máximo frente a la acción del viento y sísmica.

Según lo observado en la Figura 5.34 se puede identificar la altura en que el desplazamiento debido al viento supera a los desplazamiento originados por la

fuerza sísmica: dicho valor corresponde a los 65 [m] de altura, es decir la estructura cuadrada sufre mayores desplazamiento debido al viento al igualar o superar los 65 [m] de altura e inferior a esta los desplazamiento mayores son por causa de la acción sísmica.

Con relación a la máxima deformación sufrida por las estructuras según a la carga expuesta, ninguna de ella pudo generar desplazamientos mayores a los admisibles.

5.4. Comparación del comportamiento de una chimenea de sección circular y chimenea de sección cuadrada

Con el objeto de realizar una comparación entre la chimenea de sección circular y cuadrada, se presentan en la Tabla 5.13 y Tabla 5.14 los parámetros más relevantes realizadas en el estudio en cuestión.

Tabla 5.15. Resumen Chimenea circular.

	Modelo1	Modelo2	Modelo3
Altura, a [m].	20	65	100
Díámetro, D [m].	4	4	4
Esbeltez, λ .	5	16.25	25
Velocidad media o Básica, U [m/s].	34.5	40.81	43.40
Área de ataque, A [m ²].	125.6	408.2	628
Área en planta, [m ²].	12.5	12.5	12.5

Tabla 5.15. Resumen Chimenea circular. (Continuación)

Coeficiente de Fuerza, C_f .	0.57	0.65	0.7
Densidad del aire [kg/m ³].	1.23	1.23	1.23
Fuerza media, F_q [N].	52406	271766	509228
Frecuencia natural, [Hz]	6,3	0,94	0,39
Peso, [ton]	62.72	203.84	313.6

Tabla 5.16 Resumen Chimenea cuadrada.

	Modelo1	Modelo2	Modelo3
Altura, a [m].	55	65	100
Ancho, [m].	4	4	4
Esbeltez, λ .	13.75	16.25	25
Velocidad media o Básica, U [m/s].	39.84	40.81	43.40
Área de ataque, A [m ²].	220	260	400
Área en planta, [m ²].	16	16	16
Coeficiente de Fuerza, C_f .	1.625	1.71	2
Densidad del aire [kg/m ³].	1.23	1.23	1.23
Fuerza media, F_q [N].	348971	455384	926712
Frecuencia natural, [Hz]	1.5	1	0.46
Peso, [ton]	221	261.21	401.87

En las Figura 5.35 y Figura 5.36 se presenta los desplazamientos sufridos por las chimeneas de sección circular y cuadrada, debido a las fuerzas producidas por la acción del viento y sísmica.

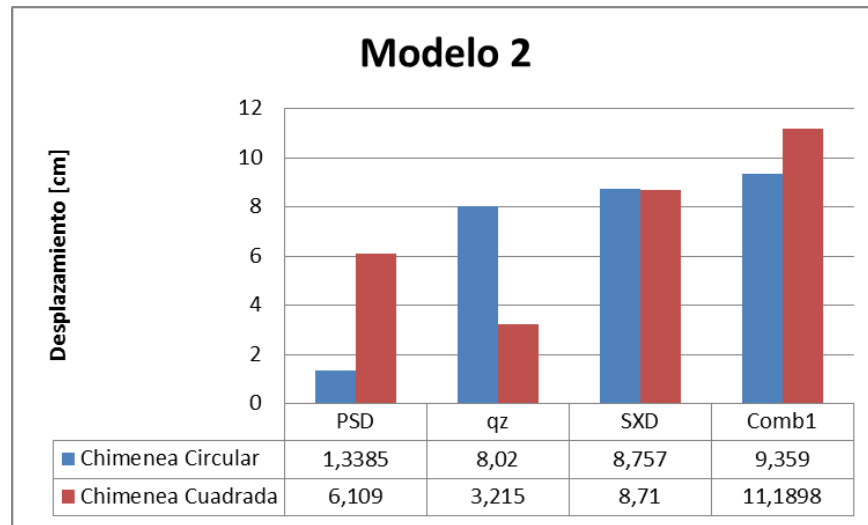


Figura 5.35. Comparación entre desplazamiento, Modelo 2 a los 65 [m] de altura.

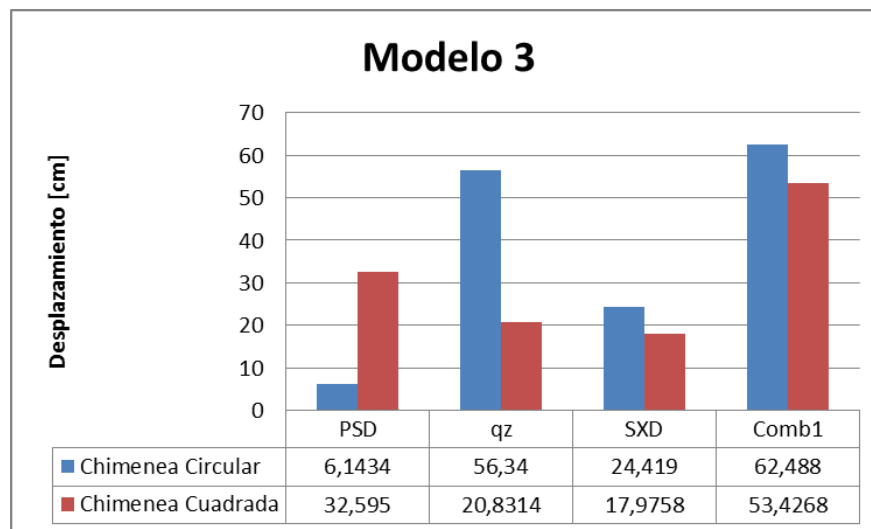


Figura 5.36. Comparación entre desplazamiento, Modelo 3, a los 100 [m] de altura.

Como se puede apreciar en Figura 5.35 y Figura 5.36, al realizar una comparación entre los desplazamientos sufridos por la función de la densidad espectral de carga en ambas chimeneas correspondiente a la altura de 65 y 100 metros de altura, se observa que la chimenea de sección cuadrada, sufre mayores desplazamientos influenciados por el aumento del coeficiente de fuerza que considera la capacidad de arrastre que posee el viento al enfrentarse con el obstáculo, se puede agregar además que el coeficiente de fuerza es influenciado por la esbeltez de la estructura, para esbeltez superiores 16.25 y frecuencia naturales inferiores 1 [Hz] se generan los mayores desplazamientos en estructuras cuadradas que circulares.

Con relación al desplazamiento sufrido por la componente media del viento (Presión media), frente a los dos modelos de chimeneas en consideración, la disminución del desplazamiento en la chimenea cuadrada tiene directa relación con el área de ataque, ya que la presión media no cambia para cada uno de los modelos 2 y 3, si no que esto tiene influencia en el área de aplicación de la carga, por lo que la chimenea cuadrada tiene menor de área de contacto en comparación a la chimenea circular, por lo que los mayores desplazamientos se generan en la chimenea circular para los modelos 2 y 3.

Al realizar la comparación ante el dominio de las cargas en estructuras esbeltas, se puede concluir que para la estructura con frecuencia propia inferior a 1 [Hz], es predominante la acción del viento, por sobre la sísmica y con frecuencia superior a 1 [Hz] el sismo predomina por sobre la acción del viento. De manera que si se quiere representar este cambio; entre sismo y el viento, a través del grado de esbeltez, se concluye que grados de esbeltez superior a 16.25; el comportamiento de la estructura lo controla el viento e inferior a 16.25 la estructura, debe ser diseñada a resistir las cargas sísmicas.

5.5. Tensiones admisibles

5.5.1 Chimenea circular

5.5.1.1 Tensión admisible de compresión

Para la evaluación de tensión de compresión en el manto de la estructura, se considera el modelo 3 como caso más desfavorable para evaluar los esfuerzos internos de los elementos tipo Shell, la tensión del manto en compresión no debe exceder el valor admisible de acuerdo a NCh 2369 Of.2003 ni ser utilizado para otra verificación, se considera el valor admisible como:

$$\sigma_{adm_comp} = 135F_y \cdot \frac{t}{D}$$

Donde D corresponde al diámetro de la chimenea cilíndrica y t al espesor la plancha de acero analizado. Esto corresponde a tensión de compresión admisible para el manto de la chimenea circular

$$\sigma_{adm_comp} = 135 \cdot 2530 \frac{0.032}{4} = 2732.4 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

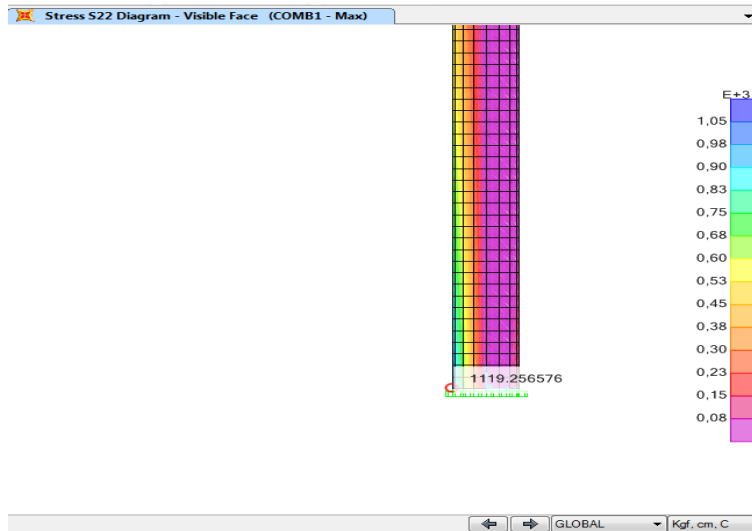


Figura 5.37. Tensión de compresión S22 en [kgf/cm²], PL_32mm para la comb1, modelo3.

Por la tanto el análisis de la tensión en compresión para el manto de la chimenea, se obtiene un valor de S22=1119.3 [kgf/cm²]. Esto genera una utilización del 40 % respecto a la tensión admisible en compresión $\sigma_{adm_comp}=2732.4$ [kgf/cm²] definida, cumpliendo con los requisitos de resistencia impuestos.

5.5.1.2 Verificación de tensión de Von Mises

Con el fin de evaluar la resistencia de las placas consideradas, se considera el límite de tensiones admisibles propuesto por AISC 2010:

$$\sigma_{adm} = 0.6F_y = 1518[\text{kgf/cm}^2]$$

Este valor se compara como criterio establecido en la práctica de la ingeniería, con la tensión de Von Mises en función de las tensiones principales del tensor:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22}}$$

Para su evaluación se considerarán los valores absolutos máximos analizado, ocupando tensiones σ_{11} y σ_{22} provenientes del modelo utilizado. Cabe señalar que σ_{11} y σ_{22} corresponden a tensiones principales de cada elemento finito de cuatro o tres nudos, tomados en un mismo punto de análisis. Se evaluará la condición más desfavorable.

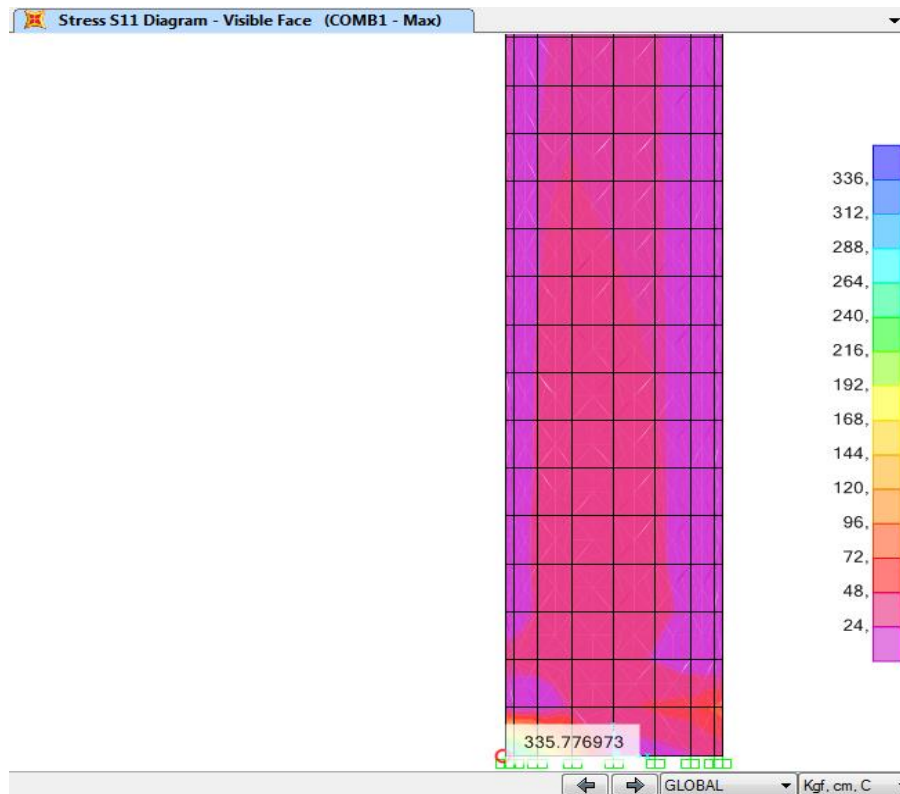


Figura 5.38 Tensión S11 en [kgf/cm²], PL_32mm para la comb1, modelo3.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{335.7^2 + 1119.3^2 - 335 \cdot 1119.3} = 995 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

Por la tanto el análisis de la tensión mediante Von Mises para el manto de la chimenea, se obtiene un valor de 995 [kgf/cm²]. Esto genera una utilización del 65.5% respecto a la tensión admisible definida, cumpliendo con los requisitos de resistencia impuestos.

5.5.2 Chimenea cuadrada

5.5.2.1 Tensión admisible de compresión

Para la evaluación de tensión de compresión en el manto de la estructura, se considera el modelo 3 como caso más desfavorable para evaluar los esfuerzos internos de los elementos tipo Shell, la tensión del manto en compresión no debe exceder el valor admisible de acuerdo a NCh 2369 Of.2003 ni ser utilizado para otra verificación, se considera el valor admisible como:

$$\sigma_{adm_comp} = 135F_y \cdot \frac{t}{D}$$

Donde D corresponde al ancho de la chimenea y t al espesor la plancha de acero analizado. Esto corresponde a tensión de compresión admisible para el manto de la chimenea cuadrada.

$$\sigma_{adm_comp} = 135 \cdot 2530 \frac{0.032}{4} = 2732.4 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

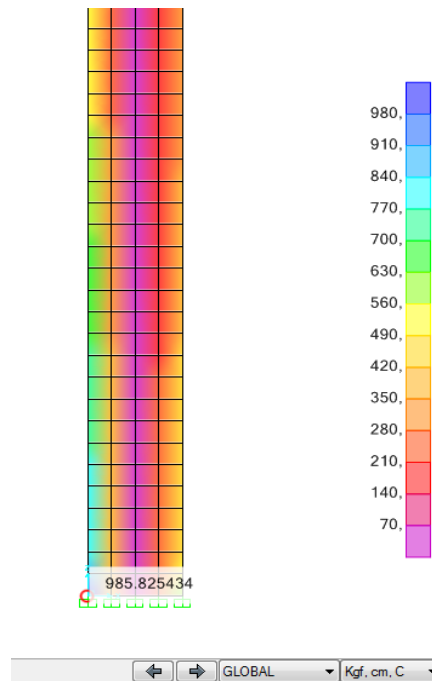


Figura 5.39. Tensión de compresión S22 en [kgf/cm²], PL_32mm para la comb1, modelo3.

Por la tanto el análisis de la tensión en compresión para el manto de la chimenea, se obtiene un valor de S22=985.82 [kgf/cm²]. Esto genera una utilización del 36 % respecto a la tensión admisible en compresión $\sigma_{adm_comp}=2732.4$ [kgf/cm²] definida, cumpliendo con los requisitos de resistencia impuestos.

5.5.2.2 Verificación de tensión de Von Mises

Con el fin de evaluar la resistencia de las placas consideradas, se considera el límite de tensiones admisibles propuesto por AISC 2010:

$$\sigma_{adm} = 0.6F_y = 1518[\text{kgf/cm}^2]$$

Este valor se compara como criterio establecido en la práctica de la ingeniería, con la tensión de Von Mises en función de las tensiones principales del tensor:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22}}$$

Para su evaluación se considerarán los valores absolutos máximos analizado, ocupando tensiones σ_{11} y σ_{22} provenientes del modelo utilizado. Cabe señalar que σ_{11} y σ_{22} corresponden a tensiones principales de cada elemento finito de cuatro o tres nudos, tomados en un mismo punto de análisis. Se evaluará la condición más desfavorable.

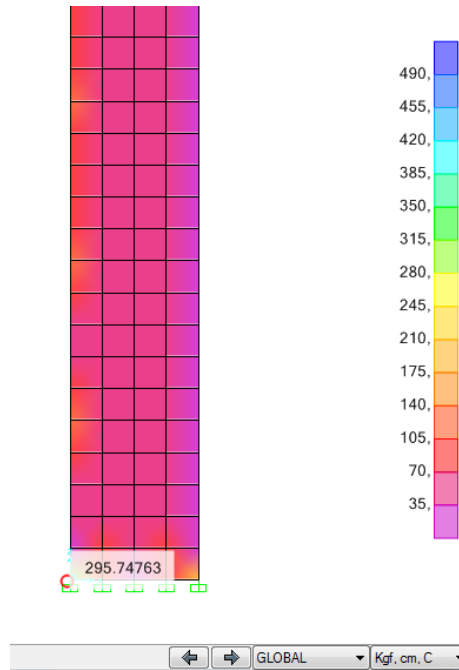


Figura 5.40 Tensión S11 en [kgf/cm²], PL_32mm para la comb1, modelo3.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{295.74^2 + 985.82^2 - 295.74 \cdot 985.82} = 875.43 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

Por la tanto el análisis de la tensión mediante Von Mises para el manto de la chimenea, se obtiene un valor de 875.43 [kgf/cm²]. Esto genera una utilización del 57.67 % respecto a la tensión admisible definida, cumpliendo con los requisitos de resistencia impuestos.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

La hipótesis de la presente investigación plantea que las condiciones naturales del viento y sísmicas de la región de Bío Bío, generan la posibilidad que las cargas del viento fluctuantes generadas sobre chimeneas esbeltas sean más relevantes que las solicitaciones sísmicas. Se valida este planteamiento para una condición de terreno tipo B clasificado en la actual norma Chilena NCh 432 Of.2010, basándose en consideraciones planteadas para la estimaciones de factores topográficos, factor de importancia, factor de exposición y de direccionalidad. Estos factores se utilizaron con el fin de obtener la presión media del viento de la ciudad de Concepción.

Considerando como resultado del estudio comparativo, se obtiene que sobre los 65 [m] de altura, la acción del viento domina frente a la acción sísmica, controlando el diseño de los modelos estudiados.

Para condiciones naturales y específicas de la ciudad de Concepción, en chimeneas circulares o cuadradas con esbelteces superior a 16.25, frecuencia natural inferior a 1 [Hz] y una altura por sobre los 65 [m], el viento como carga fluctuante produce mayores desplazamientos en las estructuras por sobre la acción sísmica consideradas en la normativa NCh 2369 Of 2003. Esto se debe a que la acción del viento se diferencia de la de los terremotos en que la primera persiste por un tiempo prolongado en una misma dirección, en tanto que la acción sísmica se manifiesta con periodos de retornos marcados, sin perder la capacidad resistente de la estructura durante los diversos ciclos de carga durante la vida útil de la estructura.

Otra diferencia entre la acción del viento y sísmica es que la primera es proporcional a la superficie de la estructura expuesta, en tanto que las cargas sísmicas son proporcionales a la masa de la estructura. Esta razón explica que bajo los 65 [m] de altura, frecuencia mayores a un 1 [Hz] el sismo tome mayor importancia y pueda eventualmente controlar el diseño por resistencia.

Con respecto a las frecuencias naturales de las chimeneas cilíndricas y cuadradas propuestas en el presente documento, es necesario tener en cuenta que el efecto resonante de la frecuencia natural de la estructura con la acción turbulenta del viento tiene una ocurrencia poco probable en consideración de los modelos propuestos y que plantean una medida representativa de chimeneas industriales. Esto se debe a que el rango de frecuencias obtenido para el registro considerado, es notoriamente inferior que las frecuencias naturales encontradas para la totalidad de los modelos estudiados. Cabe señalar que la estructura puede ser afectada por inestabilidades aerodinámicas que provocan que la estructura se autoexcite y aumente o disminuya sus deformaciones en distintos eje, como lo son el desprendimiento de torbellinos, bataneo, galope o flameo.

La variación de una sección transversal para cada chimenea al interactuar con la acción del viento, afecta directamente al comportamiento y al aumento de la fuerza. Estas consideraciones se ven reflejadas en el coeficiente de fuerza que aumenta o disminuye dependiendo de la forma y la esbeltez de la estructura. Esto explica que al considerar una sección transversal cuadrada y esbelta (esbeltez mayor a 16.25) el coeficiente de fuerza sea mayor a 1 representando la distorsión y aumento de fuerza que sufre el viento por la alteración espacial de la estructura cuadrada. Por ejemplo si el coeficiente es 1.2 para una superficie cuadrada la fuerza del viento aumenta en un 20%. En el caso de chimeneas circulares este coeficiente es inferior a 1, reduciendo la fuerza ejercida por el viento, ya que la estructura opone menor resistencia al interactuar con el fluido (se adapta de mejor manera a las líneas de flujo).

La formulación propuesta por los códigos ASCE 7 y el EUROCODIGO se ajustan de mejor manera a los datos atmosféricos, por sobre el código AIJ-04 con un coeficiente de correlación de un 80%, lo que explica la menor diferencia entre la formulación descrita y los datos atmosféricos considerados. Se sugiere para la ciudad de Concepción, plantear la formulación propuesta por la norma Chilena NCh 432 Of.2010, considerando que su formulación radica en lo expresado por el

código ASCE 7-10, lo que condice un nivel de confianza superior con respecto al ajuste local de la ciudad.

Las tensiones generadas por las solicitaciones inducidas por la acción del viento en el manto de las chimeneas estudiadas, no superan los valores admisibles impuestos por el código AISC. Se considera además que las tensiones de compresión generadas en el manto no superan las indicadas en la normativa Chilena, en relación a estructuras similares.

Considerando que las chimeneas corresponden a estructuras con una esbeltez no despreciable, se recomienda establecer en la totalidad de cualquier análisis estructural a realizar, la acción fluctuante del viento como una carga que controla el diseño incluso para un rango menor de frecuencias por sobre la acción sísmica.

Para líneas futuras de investigación se plantea realizar pruebas en ensayos de túnel de viento de las estructuras estudiadas, con el fin de que se puedan determinar las inestabilidades aerodinámicas, como lo son el desprendimiento de torbellinos, bataneo, galope o flameo.

CAPÍTULO 7: REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- AIJ. (2004). *Architctural Institute of Japan Recommendations for Loads on Bulldings.*
- ASCE7. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures.*
- Bazán. E ; Mely. R. (2001). *Diseño sísmico de edificios.*
- Ceja E. (2006). *Simulacion de ráfagas de viento para determinar el compartamiento eólico de estructuras.*
- Escobar J;Espinosa J;Gómez R;Pozo A. (2012). *Revisión técnica de la respuesta ante viento y sismo del monumento conmemorativo del Bicentenario de la Independencia.*
- EUROCODIGO. (2005). *Eurocode 1. Actions on structures.*
- Gómez W;Llano L. (2007). *Determinación de la función de densidad espectral en un proceso de simulación del viento atmosferico.*
- González R;Aguilar J;Borraz M;Narcia C;Ruiz J. (2009). *Efecto de la resonancia en el diseño por viento de estructuras flexibles de anuncios espectaculares.*
- Hidalgo H; Nozaki M. (2010). *Estudio del viento como carga y su influencia en las edificaciones.*
- Hugo Hernández;Elvira Ceja. (2004). *Respuesta dinámica de estructuras esbeltas ante carga eólicas.*
- Isyumov, N. (2009). *Obituary of Alan Garnett Davenport (1932-2009).*
- Muñoz C. (2008). *Respuesta Dinámica de Edificios debida a Ráfagas de Viento.*
- NCh2369. (2003). *Diseño sísmico de estructuras y instalaciones industriales.*
- NCh427. (1977). *Especificaciones para el cálculo de estructuras de acero para edificios.*

- NCh432. (1971). *Cálculo de la acción del viento sobre las construcciones.*
- NCh432. (2010). *Diseño Estructural: Cargas de viento.*
- Ossandón, R. (2008). *Determinación de la acción del viento sobre las estructuras en Chile.*
- Páez, P. (2014). *Acción del viento sobre edificios de hormigón: Estudio comparativo entre los principales códigos a nivel mundial, la norma Uruguay y otras de alcance Regional.*
- Payán O;Bojórquez E;Reyes A. (2014). *Simulación de la componente longitudinal del viento por representación espectral y el análisis dinámico en edificios de cortante.*
- Paz, R. (2014). *Una metodología de cálculo para la determinación de la respuesta dinámica longitudinal de estructuras altas bajo la acción del viento.*
- Rodriguez N;Martínez P;Marquez S. (2015). *Interacción dinámica entre viento turbulento y una torre esbelta.*
- ROM. (1995). *Acciones climáticas II:Viento.*
- Ruiz José. (2001). *Aerodinámica Civil Carga de viento en las Edificaciones.*
- Sentile, F. (2005). *Fundamento estadístico del efecto aleatorio del viento para el cálculo de estructuras delgadas.*
- Sordo E;Tapia E;García D. (2006). *Comportamiento de torres de transmisión de alta tensión sujeta a la acción del viento huracanados.*