



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

LA RESPUESTA DINÁMICA INDUCIDA POR EL VIENTO TURBULENTO Y SU TRATAMIENTO EN LAS RECOMENDACIONES CONTENIDAS EN REGLAMENTOS

T E S I S

PARA OPTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

P R E S E N T A :

MACIEL CRUZ ALARCÓN

DIRECTOR DE TESIS: ING. NEFTALÍ RODRÍGUEZ CUEVAS

MÉXICO, D.F., MAYO 2009





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Esteva Maraboto Luis
Secretario: Dr. Ayala Milián Amado Gustavo
Vocal: Ing. Rodríguez Cuevas Neftalí
1^{er}. Suplente: M.I. García Domínguez Octavio
2^{do}. Suplente: Dr. Juárez Luna Gelacio

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Ing. Neftalí Rodríguez Cuevas

*Dedico este pequeño logro a Dios,
A mi madrina del alma, a mis padres,
a mis hermanos , a mis sobrinas
a mi ahijada , a Paula
y a mi alma mater el IPN*

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme cuidado todo este tiempo y sobre todo por haberme mandado a muchos ángeles en cada instante de mi vida.

A mi alma mater el INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, y a la UNAM.

A mi madrina del alma, a mis padres, y a toda mi familia, por su apoyo incondicional.

A mis hermanos (Brenda, Jacinto, Teresa, Israel y Daniel), a mis sobrinas Keshiry y Caitlin y a mi ahijada Chelsea.

*A Erika Aidé por todo el cariño, apoyo y sobre por todo el amor que me dio en esta etapa de mi vida, ** *** ∞.*

A mis compañeros y amigos Oscar Godoy Marroquin y Oscar Suarez, por haberme acompañado en este camino, y sobre todo por haberme brindado su amistad y su apoyo incondicional.

A Paula por todo el cariño que me dio y sobre todo por la ayuda que me brindó para terminar esta tesis, mil gracias Pau.

A mis amigos Fermin, Gilgamesh, Javier, Sergio, Miguel, Ulises, Oscar, Paco, Juan Carlos, Diana, Selene, gracias por todo su apoyo y sobre todo por su amistad, ya que con ellos he compartido muchos momentos buenos y malos de mi vida, mil gracias por haberme brindado su amistad.

A Gelacio Juárez y José Barradas por haberme brindado su apoyo y su amistad.

A mis amigos, Mauricio, Cata, Diego, Edgar, y mi primo Santos.

Al Ing, Juan Arnoldo Medina Dávalos (que en paz descanse) y a su esposa Evita Cruces Carbajal.

Al profesor Neftalí por compartir sus conocimientos conmigo, y por todas las asesorías durante el desarrollo de este trabajo. Gracias a todos los sinodales por su apoyo.

Finalmente, a todas las personas que me ayudaron incondicionalmente.

CONTENIDO

RESUMEN	6
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	8
1 IDENTIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA ATMOSFÉRICA.....	11
1.1 ORIGEN DEL VIENTO.....	11
1.2 TIPOS DE FLUJO.....	12
1.3 VIENTO TURBULENTO.....	13
1.3.1 <i>Turbulencia</i>	13
1.4 ÍNDICE DE TURBULENCIA	14
1.5 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE LAS RÁFAGAS DEL VIENTO	17
1.5.1 <i>Variación de la velocidad media con la altura</i>	18
1.6 PERFIL REPRESENTATIVO DE LA VELOCIDAD MEDIA.....	20
1.6.1 <i>Perfil de variación de la velocidad media</i>	20
1.6.2 <i>Perfil logarítmico</i>	21
1.7 INFLUENCIA DE LA TOPOGRAFÍA EN LA VELOCIDAD DEL VIENTO.....	22
1.8 ESPECTRO DE POTENCIA.....	23
1.8.1 <i>Espectros de potencia propuestos por diferentes autores</i>	23
2 MÉTODOS PARA GENERAR SERIES DE TIEMPO REPRESENTATIVOS DEL RÉGIMEN TURBULENTO DE LA ATMÓSFERA	27
2.1 ESTIMACIÓN DE LA ACCIÓN TURBULENTO DEL VIENTO SOBRE UNA ESTRUCTURA.....	27
2.2 ESTUDIO DE LA RESPUESTA DEL MODELO ANALÍTICO DEL EDIFICIO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO.	29
3 RESPUESTA DINÁMICA DE MODELOS REPRESENTATIVOS DE ESTRUCTURAS FLEXIBLES.....	32
3.1 EDIFICIO PRISMÁTICO DE CONCRETO	32
3.2 CHIMENEA DE ACERO	34
3.3 MODELOS EN SAP 2000.....	36
3.4 VERIFICACIÓN DE ACCIONES DE DISEÑO ANTE LA ACCIÓN DEL VIENTO.....	36
3.5 INFLUENCIA DE LA CIMENTACIÓN EN LOS DESPLAZAMIENTOS PROVOCADOS POR EL VIENTO.....	36
4 PROCEDIMIENTO ESTOCÁSTICO PARA EVALUAR EL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DINÁMICA EN ESTRUCTURAS SOMETIDAS A LA ACCIÓN TURBULENTO DEL VIENTO	39
4.1 MÉTODO CON BASE ESTADÍSTICA, PARA EVALUAR EL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DINÁMICA DE LA RESPUESTA MEDIA DE UNA ESTRUCTURA	39
4.2 BASES DEL MÉTODO ESTADÍSTICO PARA ESTIMAR RESPUESTA DINÁMICA	40
4.3 APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO ESTOCÁSTICO PARA EVALUAR LA RESPUESTA MÁXIMA DE UN SISTEMA DE 1GL EQUIVALENTE.....	43
5 APLICACIÓN A ESTRUCTURAS DE CONTROL, DE DIFERENTES NORMAS REGLAMENTARIAS EN EL MUNDO	47
5.1 EDIFICIO.....	48
5.1.1 <i>RCDF (MÉXICO)</i>	48
5.1.2 <i>EUROCÓDIGO</i>	52
5.1.3 <i>CHILE</i>	57
5.1.4 <i>ASCE (USA)</i>	60
5.1.5 <i>INDIA</i>	63
5.1.6 <i>AUSTRALIA</i>	66

5.1.7	RUSIA	69
5.1.8	SUDÁFRICA	72
5.1.9	JAPÓN	74
5.2	CHIMENEA.....	79
5.2.1	RCDF (MÉXICO)	79
5.2.2	EUROCÓDIGO.....	83
5.2.3	CHILE	87
5.2.4	ASCE	90
5.2.5	INDIA	93
5.2.6	AUSTRALIA	96
5.2.7	RUSIA	98
5.2.8	SUDÁFRICA.....	101
5.2.9	JAPÓN	103
6	RESULTADOS DE MEDICIONES DE ESTRUCTURAS FLEXIBLES	110
7	PERIODOS DE LAS ESTRUCTURAS SENSIBLES A LA ACCIÓN DEL VIENTO TURBULENTO.....	118
7.1	AMORTIGUAMIENTO.....	118
7.2	IMPORTANCIA DEL FACTOR DE PROMEDIACIÓN EN EL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DINÁMICA	119
7.3	EFEECTO DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS ANTE LA ACCIÓN DEL VIENTO	120
7.4	ACELERACIONES DEBIDO A LA ACCIÓN DEL VIENTO.....	121
	COMENTARIOS FINALES.....	122
	REFERENCIAS	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Variación de la velocidad media en distintas superficies.....	13
Figura 1.2: Serie de tiempo de la velocidad del viento.....	14
Figura 1.3: Perfil de velocidad media e índice de turbulencia.....	15
Figura 1.4: Variación de los valores n para diferentes tipos de turbulencia.....	19
Figura 1.5: Variación de la velocidad del viento con la altura sobre el terreno según la rugosidad del terreno.....	23
Figura 3.1: Características generales del edificio.....	32
Figura 3.2: Geometría de la chimenea.....	35
Figura 4.1: Procedimiento para estimar la respuesta dinámica de una estructura.....	39
Figura 4.2: Densidad de potencia de la entrada.....	41
Figura 4.3: Función de transferencia del sistema.....	41
Figura 4.4: Densidad de potencia de la respuesta del sistema.....	41
Figura 5.1: Desplazamientos medios calculados con el RCDF.....	50
Figura 5.2: Desplazamientos totales calculados con el RCDF.....	51
Figura 5.3: De la velocidad media con altura para cada tipo de terreno.....	53
Figura 5.4: Desplazamientos medios calculados con el EUROCÓDIGO.....	55
Figura 5.5: Desplazamientos totales calculados con el EUROCÓDIGO.....	56
Figura 5.6: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Chile.....	58
Figura 5.7: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de Chile.....	59
Figura 5.8: Desplazamientos medios calculados con el reglamento ASCE USA.....	61
Figura 5.9: Desplazamientos totales calculados con el reglamento ASCE USA.....	62
Figura 5.10: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de India.....	65
Figura 5.11: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de India.....	65
Figura 5.12: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Australia.....	67
Figura 5.13: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de Australia.....	68
Figura 5.14: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Rusia.....	70
Figura 5.15: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de Rusia.....	71
Figura 5.16: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Sudáfrica.....	73
Figura 5.17: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Japón.....	75
Figura 5.18: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de Japón.....	76
Figura 5.19: Desplazamientos medios del edificio con respecto a cada reglamento.....	77
Figura 5.20: Desplazamientos totales del edificio con respecto a cada reglamento.....	78
Figura 5.21: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de RCDF.....	81
Figura 5.22: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de RCDF.....	82
Figura 5.23: Variación de la velocidad con la altura para diferentes tipos de terreno.....	84
Figura 5.24: Desplazamientos medios calculados con el EUROCÓDIGO.....	86
Figura 5.25: Desplazamientos totales calculados con el EUROCÓDIGO.....	86
Figura 5.26: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Chile.....	88
Figura 5.27: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de Chile.....	89
Figura 5.28: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de ASCE USA.....	91
Figura 5.29: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de ASCE USA.....	92
Figura 5.30: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de India.....	95
Figura 5.31: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de India.....	95
Figura 5.32: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Australia.....	97
Figura 5.33: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de Australia.....	97
Figura 5.34: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Rusia.....	99
Figura 5.35: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de Rusia.....	100
Figura 5.36: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Sudáfrica.....	102
Figura 5.37: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Japón.....	104
Figura 5.38: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de Japón.....	105

Figura 5.39: Desplazamientos medios de la chimenea con respecto a todos los reglamentos.....	107
Figura 5.40: Desplazamientos totales de la chimenea con respecto a todos los reglamentos.....	108
Figura 6.1: Fotografías de los dos edificios instrumentados y las selecciones de las direcciones 1 2 de cada edificio:(a) fotografía del edificio citic ,(b) sección transversal y localización de los acelerómetros(marcados por 1 y 2),(c) fotografía del edificio	110
Figura 6.2: Variación del coeficiente de amortiguamiento con la amplitud de la vibración.....	111
Figura 6.3: Variación del coeficiente de amortiguamiento con la amplitud de la vibración.....	112
Figura 6.4: Variación del coeficiente de amortiguamiento con la amplitud de la vibración.....	112
Figura 6.5: Variación del coeficiente de amortiguamiento con la amplitud de la vibración.....	113
Figura 6.6: Relación entre la velocidad del viento y la aceleración de la respuesta y comparada con las pruebas de túnel de viento (edificio cpt) :(a) dirección 1, (b) dirección 2.	114
Figura 6.7: Relación entre la velocidad del viento y la aceleración de la respuesta y comparada con las pruebas de túnel de viento (edificio dwt) :(a) dirección 1, (b) dirección 2.	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Valores de la rugosidad del terreno para distintas superficies.....	15
Tabla 1.2: Factores para Distintos Tiempos de Promediación.....	16
Tabla 1.3: Parámetros para Evaluar la Expresión Propuesta por Davenport (2).....	21
Tabla 1.4: Longitud de Rugosidad para distintas categorías de terreno.....	22
Tabla 2.1: Escala de Van Koten.....	30
Tabla 3.1: Masas de cada nivel.....	33
Tabla 3.2: Discretización de masas para análisis dinámico.....	33
Tabla 3.3: Frecuencias modales del edificio	34
Tabla 3.4: Formas modales del edificio.....	34
Tabla 5.1: Fuerzas sobre las masas	50
Tabla 5.2: Categoría del Terreno.....	53
Tabla 5.3: Fuerzas sobre las masas	55
Tabla 5.4: Fuerza sobre las masas (Chile).....	58
Tabla 5.5: Fuerza sobre las masas (ASCE USA).....	61
Tabla 5.6: Factor del terreno, altura y tamaño de la estructura.....	63
Tabla 5.7: Fuerzas sobre las masas India.....	64
Tabla 5.8: Fuerzas sobre las masas Australia.....	67
Tabla 5.9: Fuerzas sobre las masas (Rusia).....	70
Tabla 5.10: Fuerzas sobre las masas Sudáfrica.....	72
Tabla 5.11: Fuerzas sobre las masas Japón.....	75
Tabla 5.12: Tabla comparativa de los diferentes aspectos que toma cada reglamento.....	76
Tabla 5.13: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio (RCDF).....	81
Tabla 5.14: Categoría del terreno.....	84
Tabla 5.15: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio EUROCÓDIGO.....	85
Tabla 5.16: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio Chile.....	88
Tabla 5.17: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio ACSE.....	91
Tabla 5.18: Factor del terreno, altura y tamaño de la estructura.....	93
Tabla 5.19: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio India.....	94
Tabla 5.20: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio Australia.....	96
Tabla 5.21: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio Rusia.....	99
Tabla 5.22: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio Sudáfrica.....	102
Tabla 5.23: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio Japón.....	104
Tabla 5.24: Tabla comparativa de los diferentes aspectos que toma cada reglamento.....	106
Tabla 6.1: Comparación de la velocidad y la aceleración de la respuesta (Edificio CPT).....	114
Tabla 6.2: Comparación de la velocidad y la aceleración de la respuesta (Edificio DWT).....	115
Tabla 6.3: Comparación de frecuencias.....	116
Tabla 7.1: Velocidades regionales para el edificio y la chimenea, para diferentes intervalos de promediación.....	120

RESUMEN

En este trabajo se realizó la comparación de normas de viento de diferentes partes del mundo (México, Europa, Chile, Estados Unidos, India, Australia, Rusia, Sudáfrica, Japón, Hong Kong), específicamente se comparó la respuesta dinámica inducida por el viento turbulento.

Este trabajo se hizo con la finalidad de entender y comprender las diferencias que existen en cada reglamento, ya que con la globalización de la industria de la construcción, hoy en día estamos diseñando estructuras en diferentes partes del mundo.

Se calcularon los desplazamientos de un edificio y una chimenea en un sitio determinado, con las diferentes normas mencionadas en el párrafo anterior y después se compararon los desplazamientos totales de cada ejemplo.

Para la comparación de los desplazamientos totales, primero, se calcularon los desplazamientos medios para cada ejemplo, con cada norma, después se calcularon los factores de amplificación dinámica para cada ejemplo, y después se multiplicaron los desplazamientos medios por el factor de amplificación dinámica, y como resultado se obtuvieron los desplazamientos totales para ambos casos de estudio.

A pesar de que todos los reglamentos siguen la misma filosofía de diseño, se puede observar que existe, una gran dispersión en los resultados (desplazamientos totales) de los ejemplos.

Algunas de las razones por las que se obtienen desplazamientos diferentes se deben a los diferentes coeficientes de presión, diferentes niveles de amortiguamiento sugeridos, y diferentes distribuciones de presiones.

ABSTRACT

In this work, I focused on the comparison of the wind safety regulations used for the structures designing in different parts of the World (México, Europe, Chile, United States of America, India, Australia, Russia, Southafrica, Japan and Hong Kong), comparing specifically the dynamic answer induced by the turbulent wind effects.

The main purpose of this essay is to understand the current differences between each regulation, as because of the globalization impact on the Construction field nowadays we are designing structures all over the world.

Part of the work involved the analysis of the displacements from a building and a chimney calculated in a certain place using the regulations mentioned before, for each example, and then the final results were compared between in them.

As an used procedure for carry out the correct comparison between the resulting displacements, first, the average displacements were calculated in each example with each different regulation, then the dynamic amplification factors were calculated for each case and subsequently the average displacements multiplied the dynamic amplification factor gives us as a result the total displacements for both studios.

Despite all the regulation follows basically the same designing profile and they are quite similar, we can notice that exists an evident difference and dispersion on the results from the total displacements obtained after the analysis.

Some of the reasons because we get these differences on the displacements are because of the different pressure coefficient applied, the different suggested cushion levels and the different pressure area distribution.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo se dedica a los aspectos relacionados con la respuesta dinámica de estructuras inducida por el viento y su tratamiento en las recomendaciones de diferentes reglamentos de varias partes del mundo. El objetivo de este trabajo es la comparación de las diferentes normas de viento que existen en el mundo, en específico a los efectos dinámicos que se inducen sobre las estructuras en la dirección del viento.

La comparación no contempla el efecto de empujes dinámicos transversales a la dirección principal del viento generado por la acción de vórtices alternantes que se pueden presentar en estructuras flexibles como antenas, chimeneas, anuncios, etc.

Para este trabajo, es importante conocer el efecto de ráfagas de viento sobre las estructuras, ya que se ha observado, a través de ensayos en túnel de viento y en mediciones de campo sobre estructuras reales, que el efecto dinámico del viento sobre los cuerpos (estructuras) que se oponen a su trayectoria, en muchos casos rebasa el efecto del viento medio y puede ser la condición que determine el diseño de una gran cantidad de estructuras.

La mayoría de los códigos y normas del mundo utilizan el factor de ráfaga, para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento. Este concepto de factor de ráfaga fue presentado por primera vez por Davenport en 1967, el cual se basa en un método estadístico. Después aparecieron varios modelos basados en el de Davenport, pero no cambian mucho ya que siguen su misma filosofía.

Otro aspecto importante que afecta al factor de ráfaga son los tiempos de promediación ya que de una misma serie de tiempo, al tomar diferentes valores de promediación, se obtienen diferentes perfiles de velocidades medias y, por lo tanto, también diferentes factores de ráfaga, por eso es muy importante que todos los reglamentos digan cual es el tiempo de promediación que se utiliza.

En la actualidad, varios de estos modelos han sido adoptados por los principales reglamentos internacionales y, como ya se mencionó antes en este trabajo, se buscó comparar la aplicación de estos reglamentos a dos estructuras, un edificio y una chimenea, y encontrar las diferencias existentes en los reglamentos y entender esas diferencias, considerando que la mayoría de reglamentos siguen la misma filosofía.

Por otra parte, con la globalización de la industria de la construcción, es importante comprender las diferencias que existen entre los diferentes reglamentos en varias partes del mundo.

CAPÍTULO 1

1 IDENTIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA ATMOSFÉRICA

1.1 ORIGEN DEL VIENTO

El origen del viento se atribuye principalmente a la energía que se desprende del sol, la cual se trasmite por el espacio y llega a la superficie terrestre.

El viento es el desplazamiento de las masas de aire en la atmósfera que rodea a nuestro planeta; estos movimientos de aire son causados por las diferencias de presión y temperatura. Es decir, que las distintas temperaturas existentes en la tierra y en la atmósfera, por la desigual distribución del calentamiento solar y las diferentes propiedades térmicas de las superficies terrestres y oceánicas, producen corrientes de aire. Las masas de aire más caliente tienden a subir y en su lugar se ubican masas de aire más denso y frío.

El desequilibrio de energía que proporciona el sol sobre la superficie terrestre es la principal causa de la aparición del viento, que no es otra cosa que el movimiento de masas de aire.

La existencia de gradientes térmicos provoca el cambio de densidades de las masas de aire y esto induce el movimiento al intercambiar energía calorífica, y producir energía cinética en las masas de aire, lo que produce la aparición de vientos.

En el intercambio de energía en la atmósfera, controlado por la termodinámica, se presentan cambios de presión y cambios de velocidad, provocados por las temperaturas que se presentan en los diversos puntos de la atmósfera.

En diversas épocas del año, la atmósfera experimenta diversas temperaturas, lo cual tiende a provocar cambios en la densidad del aire. Esto induce la aparición de vientos.

La densidad de las masas de aire se debe a los gases componentes que forman el aire. En términos generales la composición del aire en la tropósfera presenta la siguiente composición:

Nitrógeno.....	78.00 %
Oxígeno.....	20.95 %
Argón.....	0.93 %
Bióxido de Carbono.....	0.03%
Otros gases (Neón, Helio, Kriptón, Hidrógeno, Xenón)...	0.01%

El peso volumétrico de 1 m^3 del aire es aproximadamente a 1.2 kg

La densidad y la presión son los factores primordiales que provocan el movimiento del aire.

En el transcurso de un año, al moverse la Tierra sobre su órbita, se presentan cambios térmicos que inducen cambios de densidad en el aire, lo que provoca principalmente el movimiento de las masas de aire. Este movimiento se produce en diversos niveles de velocidad, lo que produce zonas con diferentes velocidades sobre la superficie terrestre.

En la vecindad de la superficie terrestre se han hecho mediciones en torres instrumentadas que describen los cambios de velocidad variables que se presentan en diversos instantes de medición. En los primeros 75 m de la atmósfera se presentan fenómenos turbulentos provocados por cambios de velocidad inducidos por cambios de densidad y de presión. Pero al aumentar la altitud y aproximarse a la tropopausa, donde la temperatura es constante, los campos de velocidad tienden a ser uniformes (flujos laminares).

Para el diseño de estructuras sobre la superficie terrestre, es necesario considerar vientos turbulentos que actúan sobre las estructuras y para ello es necesario generar modelos matemáticos que describan con suficiente aproximación las velocidades cambiantes del aire a distintos niveles sobre la superficie terrestre. Mientras mejor sea la descripción del viento turbulento, mejores resultados se tendrán en el diseño de estructuras que soportan la acción turbulenta del viento.

1.2 TIPOS DE FLUJO

En el movimiento de las masas de aire es posible encontrar flujos en los cuales las trayectorias se mueven prácticamente sobre líneas rectas, las cuales se conocen como flujos laminares.

En otras ocasiones las partículas de aire se desorganizan y se presenta un flujo turbulento, y cuando las estructuras se someten a su acción seguramente sufrirán algún daño ó en ocasiones hasta el colapso de la misma.

1.3 VIENTO TURBULENTO

1.3.1 TURBULENCIA

En ocasiones las tormentas suelen venir asociadas a ráfagas de viento que cambian tanto en velocidad, como en dirección.

En áreas cuya superficie es muy accidentada y con obstáculos como edificios, también se producen muchas turbulencias, con flujos de aire muy irregulares, con remolinos y vórtices en los alrededores.

La estructura del viento en la superficie terrestre presenta corrientes en todos los sentidos provocadas por cambios de velocidad del viento, variación de la densidad del aire y principalmente de los obstáculos que se encuentre en la superficie terrestre.

Mediciones en torres instrumentadas, han demostrado los cambios de velocidad existentes en distintos instantes de medición, y en distintas alturas; y se ha encontrado que en los primeros 75 m de altura de la atmosfera existe o se presenta turbulencia considerable.

En general si las corrientes de viento no encuentran obstáculos, se mueven bajo la acción de los gradientes de presión con una velocidad llamada velocidad gradiente, pero cerca de la superficie de la tierra se presenta un fenómeno de fricción con el suelo; este flujo de aire se modifica y la velocidad es menor que la velocidad gradiente, por eso se dice que la velocidad del aire disminuye al disminuir la altura, y el flujo de aire se vuelve turbulento (Figura 1.1).

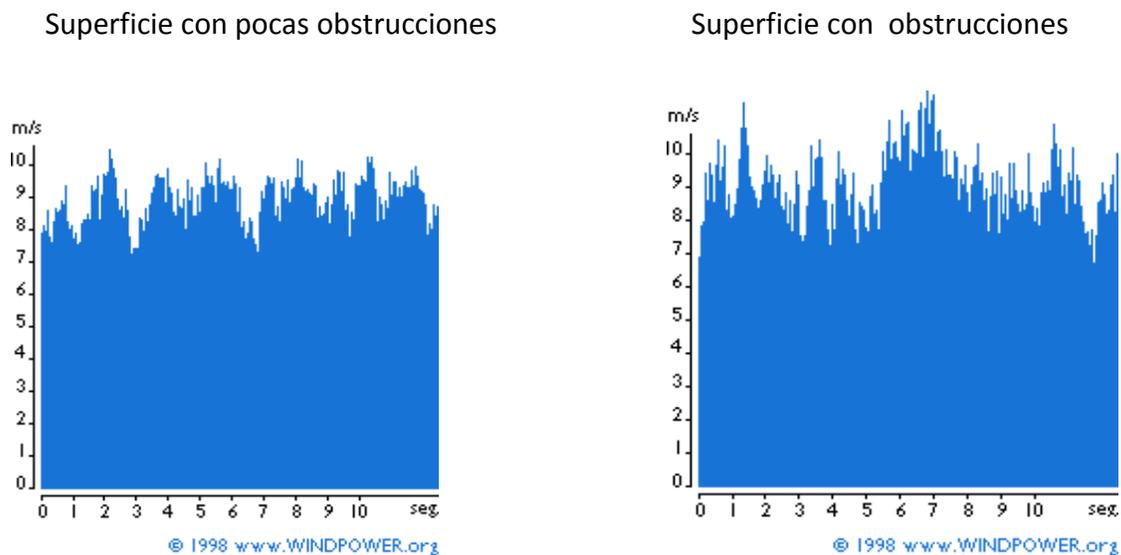


Figura 1.1: Variación de la velocidad media en distintas superficies

En flujos turbulentos es posible describir a sus series de tiempo mediante un valor medio y la desviación estándar de la región turbulenta (Figura 1.2).

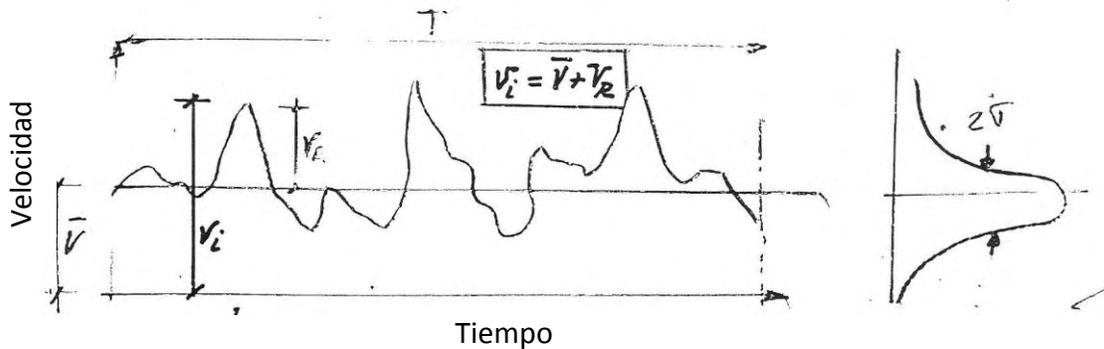


Figura 1.2: Serie de tiempo de la velocidad del viento

La serie de tiempo indica que la velocidad instantánea está dada por;

$$V_i = \bar{V} + V_R(t) = \bar{V} \left(1 + \frac{V_R}{\bar{V}}\right) \dots (1)$$

donde la velocidad de Reynolds se define como:

$$V_R = g(t) \dots (2)$$

Sustituyendo la ec. (2) en la ec. (1), la velocidad instantánea se define como:

$$V_i = \bar{V} \left(1 + g(t)\right) \frac{\sigma}{\bar{V}}$$

$\sigma =$ Desviación estandar

$\frac{\sigma}{\bar{V}}$ Se define estadísticamente como el coeficiente de variación de la velocidad del viento, este coeficiente se le conoce como índice de turbulencia, cuando se expresa como por ciento de la velocidad media.

1.4 ÍNDICE DE TURBULENCIA

Estadísticamente el índice de turbulencia se utiliza como una medida de la turbulencia del viento; al conocer σ es posible estimar la desviación estándar.

En la naturaleza el índice de turbulencia depende de la rugosidad del terreno que rodea a la estación de medición.

El índice de turbulencia depende de la rugosidad del terreno (K), la cual depende del tipo de terreno en la vecindad de la estación de medición. Los valores de K, que se pueden esperar se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Valores de la rugosidad del terreno para distintas superficies

TIPO DE SUPERFICIE	INTERVALO DE LOS VALORES DE K
Superficie del mar tranquilo	0.001-0.002
Campo abierto	0.003-0.005
Zona suburbana	0.015-0.036
Centro de ciudades	0.036-0.050

La rugosidad del terreno tiende a producir pequeños vórtices que al desprenderse generan la variabilidad de la serie de tiempo.

El índice de turbulencia describe estadísticamente la variabilidad del movimiento de las masas de aire ocasionadas por la aparición de vórtices en el movimiento de las masas de aire.

Mediciones de campo en la atmósfera de un punto, muestran que la magnitud de la velocidad media se modifica con la altura Z sobre el terreno, además el índice de turbulencia también se modifica y tiende a disminuir a medida que se aleja el aparato de medición de la superficie (Figura 1.3).

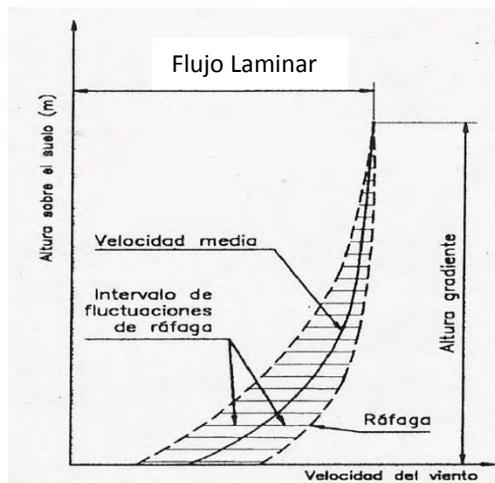


Figura 1.3: Perfil de velocidad media e índice de turbulencia

Las mediciones indican que la velocidad, en magnitud y dirección, cambia continuamente en el tiempo y que para poder describir esa variación, se deben definir expresiones matemáticas, para establecer tanto la velocidad media, el índice de turbulencia y el coeficiente de variación.

Otro aspecto que se ha encontrado es que cuando cambia la amplitud del intervalo de promediación de la velocidad, cambia la magnitud de la velocidad media.

El Prof. Mc. Key (1) estableció, de estudiar registros de viento, la siguiente expresión:

$$\frac{V_t}{V_{1h}} = 1 - 0.6226 \left(\frac{\sigma}{\bar{V}} \right)^{1.2717} \log_e \left(\frac{t}{T} \right)$$

Que permite hacer la conversión de la velocidad promediada en “t” segundos respecto a la de la promedio horaria.

Se ha estudiado el cambio de la velocidad con distintos intervalos de medición y de turbulencia. Algunos de estos resultados se presentan en la Tabla 1.2

Tabla 1.2: Factores para Distintos Tiempos de Promediación

Intensidad de la turbulencia(I)	Tiempo de promediación(s).								
	3600	600	300	60	30	10	5	3	1
Ciudades I = 0.26	1.000	1.202	1.279	1.461	1.538	1.662	1.738	1.797	1.922
Campo I = 0.16	1.000	1.108	1.150	1.248	1.290	1.356	1.398	1.430	1.496
Costa I = 0.08	1.000	1.047	1.062	1.102	1.120	1.147	1.164	1.177	1.205

1.5 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE LAS RÁFAGAS DEL VIENTO

La velocidad del viento en un punto $p(x_1, x_2, x_3)$, es un vector que cambia a cada instante. Mediciones en campo muestran que debido a que los componentes transversales perpendiculares a la dirección del viento son pequeñas, en el diseño de estructuras por la acción del viento generalmente se considera que este actúa en una sola dirección.

La velocidad de Reynolds se produce por movimientos vorticosos dentro de ráfagas que se trasladan con la velocidad del viento.

Con el fin de obtener una medida de la magnitud que representa al tamaño de la ráfaga, se recurre a la función de autocovarianza del fenómeno.

Se puede disponer de valores de la velocidad en distintos instantes

$$V_R(t) \quad V_R(t + \tau)$$

La covarianza de la función se define como:

$$C(\tau) = \langle V_R(t)V_R(t + \tau) \rangle$$

$\langle \rangle$ =esperanza

Para todos los valores posibles de τ , que es un tiempo de retorno

Por ejemplo si $\tau = 0$, se tiene que el valor de la $C(\tau = 0) = \sigma^2$, que resulta ser la varianza de la velocidad de Reynolds.

La función de autocorrelación se define como:

$$R(\tau) = \frac{C(\tau)}{C(0)} = \frac{C(\tau)}{\sigma^2(\mu)}$$

La cual es una función que empieza en 1 cuando $\sigma = 0$, y tiende al valor cero a medida que τ tiende a infinito.

La función de autocorrelación se puede interpretar como medida de la información de un registro de la señal en un instante determinado, con respecto a un registro distinto tomado en ese mismo punto, τ segundos después. Si τ es pequeño, el segundo registro será similar al primero, en cambio si τ es grande entonces la función de autocorrelación es cero, lo cual indica que los dos valores son virtualmente independientes y que la primera medición no proporciona información acerca de la segunda.

De lo anterior, es claro que la información de la señal proporcionada por la función de autocorrelación está asociada con el tiempo, de tal manera que esta característica de memoria a través del tiempo puede ser evaluada mediante una escala de tiempo T , esto es que la medición realizada en un punto proporcionará información razonable acerca de la señal registrada en ese mismo sitio segundos después si $\tau < T$, y escasa información si $\tau > T$.

1.5.1 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD MEDIA CON LA ALTURA

Como ya se mencionó anteriormente, el viento es inducido por gradientes de presión en gran escala que se presentan en la atmósfera, cerca de la superficie terrestre el viento es frenado por la fricción del terreno, y la velocidad disminuye pero aumenta la turbulencia, obviamente la disminución de la velocidad es gradual, respecto al punto de referencia donde el viento se mueve como flujo laminar (viento gradiente), hasta la superficie de la tierra donde la velocidad es la menor.

Las características del viento, a nivel micrometeorológico, dependen principalmente de:

1. Gradientes térmicos
2. Condiciones locales de topografía
3. Topografía general de la zona
4. Las características de turbulencia
5. Localización geográfica del punto
6. El espesor de la capa turbulenta, definido por

$$\delta = \frac{8\vartheta}{\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}}$$

donde:

ϑ = Viscosidad del aire

ρ = Masa específica

τ = Cortante en la zona

Mediante planteamientos estadísticos de correlación entre velocidades verticales y horizontales, y al considerar el intercambio de energía entre diversas capas, y considerando que la capa permanece constante y que la correlación es decreciente con la altura, se puede establecer la siguiente ecuación que controla la variación horizontal de la velocidad media del viento, en función de la altura z .

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^{4-3n} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)^{2n-2} = M$$

donde:

u = Velocidad media a la altura z sobre el terreno

n = Parametro que mide la turbulencia $0 < n < 1$

M = Constante

De aceptar que u es solo función de z , la ecuación diferencial anterior tiene como solución

$$u = QZ^{\frac{n}{2-n}}$$

donde:

Q = Constante

Z = altura sobre el terreno

n = Parametro de la rugosidad del terreno

De la ecuación anterior considerando una atmosfera donde la covarianza entre velocidades disminuya con la altura, es posible definir qué:

$$V_z = V_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^{\frac{n}{2-n}}$$

Donde n es un parámetro que oscila entre 0 y 1 (Figura 1.4).

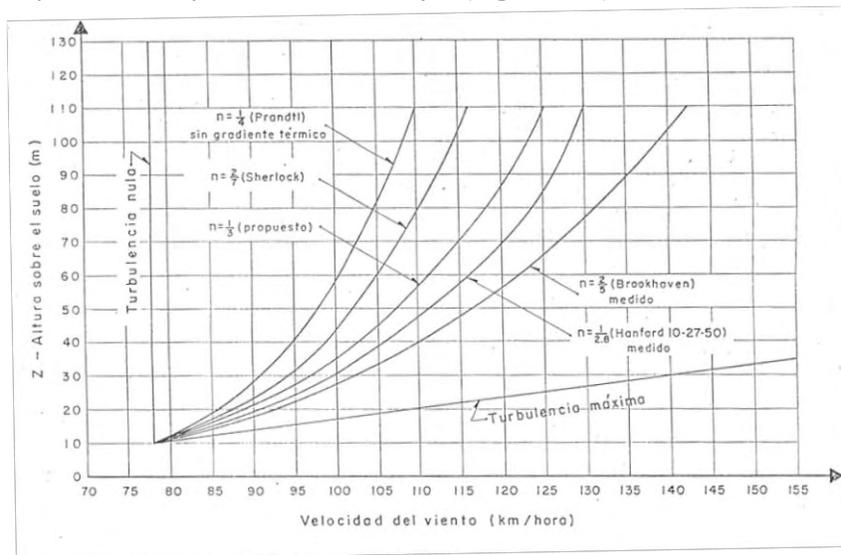


Figura 1.4: Variación de los valores n para diferentes tipos de turbulencia

En reglamentos del continente americano, es común encontrar que las normas de diseño definen a la variación de la velocidad media con la altura, por expresiones como la siguiente:

$$V_z = V_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha$$
$$\alpha = \frac{n}{2 - n}$$

Mediante mediciones en determinado punto, se pueden llegar a obtener los valores del parámetro α . Este parámetro α es dependiente del intervalo de promediación que se seleccione para definir a la velocidad media. Se ha encontrado que para el mismo punto en estudio y para diferentes intervalos de promediación se obtienen diversas velocidades, diversos índices de turbulencia, y diversos valores de α .

Para evitar las incertidumbres sobre la amplitud de los intervalos de promediación de la velocidad media, las normas de los diversos países fijan cual es el intervalo de promediación que debe usarse, para fines del diseño aprobado por normas oficiales.

En las normas de diseño de diversos países, se han seleccionado intervalos de promediación que varían entre un segundo y una hora.

Por ejemplo para el D.F., las normas técnicas complementarias de diseño por viento establecen un intervalo de promediación de 3 segundos, a diferencia de lo que se hace en Canadá, donde el intervalo se define igual a 3600 segundos (1 hora).

1.6 PERFIL REPRESENTATIVO DE LA VELOCIDAD MEDIA

Para representar a la variación de la velocidad media del viento con la altura se ha recurrido a ecuaciones empíricas y teóricas. En general existen tres familias de ecuaciones las cuales son: la espiral de Eckam, la variación logarítmica y la ley de potencia. En la mayoría de los reglamentos la más usada es la ley de potencia por su simplicidad.

1.6.1 PERFIL DE VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD MEDIA

El perfil de la variación de la velocidad media se define como:

$$V_z = KZ^\alpha$$

donde:

$V_z =$ velocidad a la altura Z
 k y $\alpha =$ constantes

Davenport (2) propone representar el perfil de la velocidad de viento medio con la siguiente función exponencial:

$$V_z = V_z \left(\frac{z}{z_G} \right)^\alpha$$

En la ecuación anterior las variables z_G , α dependen de la rugosidad en el suelo, ver Tabla 1.3

Tabla 1.3: Parámetros para Evaluar la Expresión Propuesta por Davenport (2)

TIPO DE SUPERFICIE	EXPONENTE α	ALTURA GRADIENTE $Z_G(m)$	FACTOR DE TOPOGRAFIA K
a) Campo abierto: playa, pradera, tundra, desierto	0.16	275	0.005
b) Terreno uniforme cubierto con obstáculos de 10-15 m de altura: suburbios, pequeños poblados, campo con pequeños arbustos	0.28	395	0.015
c) Terreno con objetos grandes e irregulares: Centro de grandes ciudades, con árboles o construcciones de gran tamaño	0.40	520	0.05

1.6.2 PERFIL LOGARÍTMICO

El perfil de la velocidad media variable con la altura se puede calcular también con una función logarítmica:

$$V_z = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

Donde se considera $k= 0.4$, z es la altura sobre la superficie, z_0 es la rugosidad del suelo y V_z es la velocidad media del viento, en la Tabla 1.4 se presentan valores de Z_0 para distintos tipos de terreno.

Tabla 1.4: Longitud de Rugosidad para distintas categorías de terreno

Longitud de rugosidad(m)	Tipo de Terreno
0.00001	Hielo plano
0.0001	Mar abierto son olas
0.001	Zona costera, viento en playa
0.01	Campo abierto con poca vegetación y pocas construcciones
0.05	Áreas agrícolas con pocas construcciones y rompevientos
0.3	Villas y zonas agrícolas con alta densidad de rompevientos
1 a 10	Zona urbana

Se ha observado que la función logarítmica coincide con registros de campo hasta una altura determinada, fuera de este límite el perfil de velocidad es conservador e impreciso; en 1980 Harris y Deaves (3) desarrollaron una expresión que proporciona mejores resultados.

1.7 INFLUENCIA DE LA TOPOGRAFÍA EN LA VELOCIDAD DEL VIENTO

A una gran altura de la superficie del suelo, alrededor de un kilómetro, la superficie terrestre apenas ejerce influencia alguna sobre el viento. Sin embargo, en las capas más bajas de la atmósfera, las velocidades del viento se ven afectadas por la fricción con la superficie terrestre. En diseño eólico se conoce como rugosidad del terreno, a la influencia de los obstáculos, y la influencia del contorno del terreno, también llamada orografía del terreno.

En la zona inferior de la atmósfera se presentan cambios constantes de velocidad y dirección del viento ocasionado por la turbulencia, la turbulencia está relacionada con la densidad de obstáculos que existen en la superficie terrestre.

A través de varias investigaciones, se ha encontrado una relación entre la velocidad del viento y el tipo de superficie que circula; de estas investigaciones se ha encontrado que la velocidad del aire es mayor en zonas con poca densidad de construcciones y terrenos planos y que en estas condiciones la turbulencia es pequeña, mientras que en zonas de alta densidad de construcciones como son centros de grandes ciudades, la velocidad media del viento es menor y la turbulencia es mayor como se observa en la Figura 1.5.

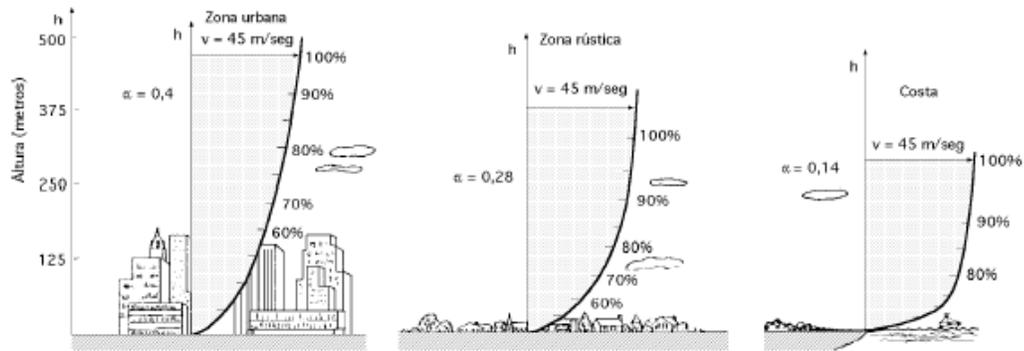


Figura 1.5: Variación de la Velocidad del Viento con la Altura Sobre el Terreno Según la Rugosidad del Terreno

1.8 ESPECTRO DE POTENCIA

Para representar la energía asociada al movimiento de masas de aire, generalmente se utilizan espectros de potencia cuyas densidades espectrales están representadas por:

$$S_n = \frac{K\bar{V}_{10}}{n} f(x)$$

Donde x es una variable adimensional que depende de una longitud característica L (m).

Este tipo de espectros representa estadísticamente, al valor medio de un número grande de mediciones que se registran en series de tiempo.

1.8.1 ESPECTROS DE POTENCIA PROPUESTOS POR DIFERENTES AUTORES

En la literatura, desde hace varios años a la fecha, existen varios planteamientos para estimar los efectos de la turbulencia.

1.8.1.1 DAVENPORT (4)

$$S(n) = \frac{4KV_{10}^2}{n} \frac{x^2}{(1+x^2)^{4/3}}$$

donde las variables x y L se definen como:

$$x = \frac{n * L}{V_{10}}$$

$$L = 1800 \text{ m}$$

Otra expresión para calcular el espectro de potencia es el de:

1.8.1.2 HARRIS (5)

$$S(n) = \frac{4KV_{10}^2}{n} \frac{x}{(1+x^2)^{5/6}}$$

donde las variables x y L se definen como:

$$x = \frac{n * L}{V_{10}}$$

$$L = 1200 \text{ m}$$

$S(n)$ = densidad espectral de potencia correspondiente a la frecuencia n

L = longitud representativa de la escala de turbulencia(m).

n = frecuencia donde se evalua la densidad espectral en (Hertz).

K = coeficiente de rugosidad del terreno, (adimensional).

V_{10} = Velocidad media a 10 m de altura(m).

La densidad espectral en una frecuencia dada, depende del índice turbulencia, al cuadrado.

Mientras más turbulento sea el viento, mayor será la potencia en la velocidad de Reynolds.

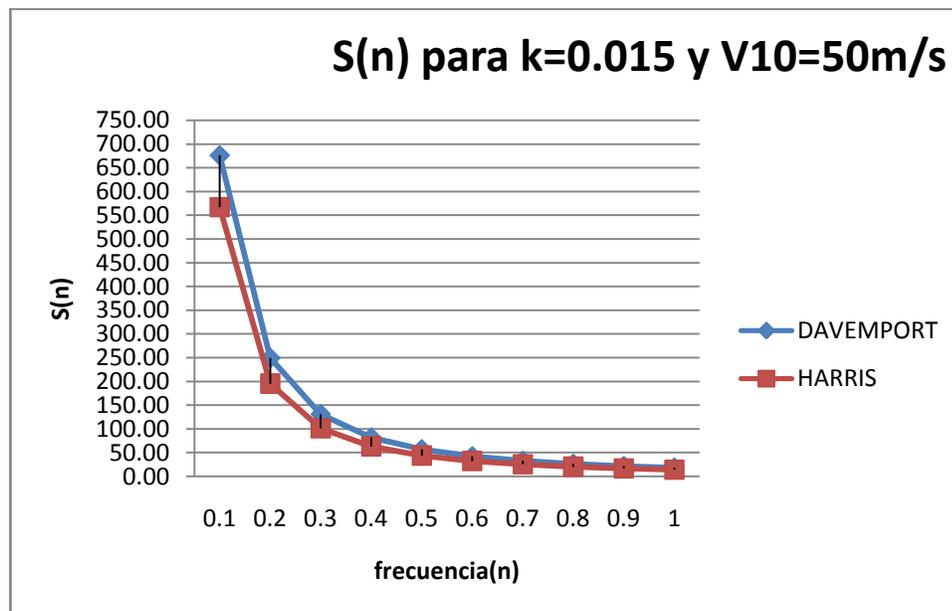


Figura 1.6: Comparación de espectros

Al comparar las S_n entre el espectro de Davenport y el de Harris se observa que el espectro de Harris proporciona en promedio 76 % del valor del espectro de Davenport, para un mismo sitio.

Al observar la forma del espectro, se ve que los valores más altos de la densidad espectral se encuentran ráfagas con frecuencia pequeña, lo cual significa que existe un alto contenido de energía en la parte inicial del espectro, mientras que las ráfagas con valores altos de frecuencia, tienen una contribución moderada de energía.

Mediciones realizadas en campo indican que el espectro de potencia propuesto por Harris desarrollado con una base teórica es el que mejor se ajusta a los resultados experimentales en terreno planos, en tanto que el espectro de Davenport, de origen empírico, es obviamente más conservador.

CAPÍTULO 2

2 MÉTODOS PARA GENERAR SERIES DE TIEMPO REPRESENTATIVOS DEL RÉGIMEN TURBULENTO DE LA ATMÓSFERA

2.1 ESTIMACIÓN DE LA ACCIÓN TURBULENTO DEL VIENTO SOBRE UNA ESTRUCTURA

En la literatura técnica, a partir de los años 60 del siglo XX se establecen metodologías para evaluar la acción turbulenta del viento. Se han establecido dos aproximaciones básicas:

1. Estudio de la respuesta del modelo analítico del edificio en el dominio del tiempo.
2. Evaluación de la respuesta en el dominio de frecuencias, mediante una aproximación estocástica de la acción del viento y de los movimientos resultantes.

En el primer tipo de aproximación se intenta simular series de tiempo que reproduzcan a las velocidades de las masas de aire que interactúan contra la estructura portante de un edificio, para evaluar la evolución de los desplazamientos absolutos y; los desplazamientos relativos entre masas y las aceleraciones que aparecen en cada nivel del edificio, para juzgar si los movimientos son perceptibles por los ocupantes del edificio.

Existen dos procedimientos conocidos:

- a) Generación de eventos en tiempo mediante paseos casuales (Random Walk)
- b) Mediante redes neuronales para reproducir ráfagas con propiedades que satisfagan espectros de turbulencia conocidas.

En la segunda aproximación (Evaluación de la respuesta en el dominio de las frecuencias) en vez de resolver el problema en el dominio del tiempo, se busca mediante transformación de Fourier, transformar el problema al dominio de las frecuencias y mediante razonamientos estadísticos, establecer una estimación de la respuesta máxima, en función de densidades espectrales del movimiento.

Se parte de espectro de fuerza inducidos por la turbulencia y se busca el espectro de respuesta de un sistema de un grado de libertad (1GL) equivalente, para estimar la variación de la respuesta y la desviación estándar del movimiento. Se suma el valor medio de la respuesta, a la desviación estándar amplificada, mediante el teorema de Rice, para estimar la respuesta máxima, del sistema equivalente.

El método (evaluación de la respuesta en el dominio de las frecuencias) sigue los siguientes pasos:

1) Se definen las propiedades de la estructura para conseguir un modelo matemático de masas-resortes que presente características dinámicas calculables, las cuales definen periodos y formas características.

2) Se busca definir la variación del viento en cada punto notable de la estructura por la superposición del valor medio del flujo, al cual se suman las velocidades instantáneas producidas por ráfagas grandes y pequeñas, para lograr que el espectro de turbulencia en cada nivel, sea el espectro de Diseño (Davenport o Harris).

3) Conocidas las velocidades instantáneas se evalúan las fuerzas instantáneas mediante la expresión:

$$F_{Di} = \frac{1}{2} \rho C_{Dd} A_i V_{ZTi}^2$$

donde los coeficientes C_{Dd} y X_a^2

$$C_{Dd} = \sqrt{X_a^2} C_D$$

$$X_a^2 = \frac{1}{1 + \left[\frac{2\sqrt{A}}{T_o V_{10}} \right]^{4/3}}$$

X_a^2 = coeficiente de admitancia (adimensional, obtenido de forma experimental)

T_o = periodo del primer modo de vibrar

V_{10} = velocidad a 10 m.

A=área expuesta en m²

4) Se resuelven las ecuaciones del movimiento para cada masa, para ir paso a paso calculando los desplazamientos de cada masa y se obtiene los desplazamientos máximos y aceleraciones máximas.

2.2 ESTUDIO DE LA RESPUESTA DEL MODELO ANALÍTICO DEL EDIFICIO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO.

La velocidad de Reynolds es la combinación del efecto de las ráfagas grandes y las ráfagas pequeñas.

Para simular la acción turbulenta del viento se considera que en cualquier instante la velocidad del viento se representa por la velocidad media, más la velocidad de ráfagas grandes, más la velocidad de ráfagas pequeñas.

Para describir las características de la ráfaga se utiliza una escala de tiempo θ .

Una vez que se definen los parámetros de turbulencia descritas por el tamaño de las ráfagas, descritas por los parámetros λ , β , θ , se procede a establecer series de tiempo que describen la variación de las fuerzas en cada masa de la estructura, y se plantean las ecuaciones del movimiento.

$$[M][\ddot{X}] + [C][\dot{X}] + [K][X] = \{F(t)\}$$

[M] - matriz de masas

[C] - matriz de amortiguamientos

[K] - matriz de rigideces

El amortiguamiento se aproxima como de Rayleigh y queda descrito por:

$$[C] = b_0[M] + b_1[K]$$

Con el conocimiento de la matriz de masas, la matriz de amortiguamiento y la de rigideces se plantea la solución instante por instante de la ecuación del movimiento, aceptando que las condiciones iniciales de un evento son las condiciones finales del intervalo anterior.

La solución de las ecuaciones del movimiento proporciona la evolución de desplazamientos en el transcurso del tiempo, en cada uno de los niveles donde se asoció la masa.

Conocida la evolución de los desplazamientos de las masas en el tiempo se obtiene:

- La evolución de los desplazamientos relativos entre masas contiguas.
- Las velocidades de cada masa en el transcurso del tiempo.
- Las aceleraciones y su evolución.

Con estos valores se puede determinar si la estructura se encuentra dentro de los estados límites de servicio permitidos por normas y por pruebas que indique si los ocupantes experimentan movimientos inaceptables.

Para juzgar si los movimientos son aceptables para seres humanos se puede recurrir a la escala Van Koten (6) dada en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1: Escala de Van Koten

Nivel	Aceleración (g)
Imperceptible	< 0.0015
Apenas perceptible	<0.005
Perceptible	<0.015
Muy perceptible	<0.050
Altamente perceptible	<0.15
Produce fatiga	<0.50
Intolerable	>0.50

A mayor turbulencia, mayor factor de amplificación. Estos efectos dinámicos modifican también la rotación de la base de los edificios y la fuerza cortante que se genera en la base, lo que indica que se deben considerar efectos dinámicos en la revisión de elementos de la subestructura de soporte de un edificio.

Análisis de este tipo han mostrado las siguientes tendencias en los factores de amplificación:

Al aumentar la velocidad media a 10 m de altura aumenta el factor de amplificación por efecto de ráfagas. Se ha observado que al cambiar la frecuencia natural del sistema el factor de amplificación se modifica. A mayor frecuencia menor factor de amplificación.

Por otra parte el nivel de amortiguamiento influye significativamente en el factor de amplificación, al aumentar el amortiguamiento el factor de amplificación se reduce.

Finalmente se ha observado que entre mayor sea el ancho de la cara de barlovento de una estructura, el factor de amplificación dinámica se reduce.

CAPÍTULO 3

3 RESPUESTA DINÁMICA DE MODELOS REPRESENTATIVOS DE ESTRUCTURAS FLEXIBLES

3.1 EDIFICIO PRISMÁTICO DE CONCRETO

Se trata de un edificio de concreto de 15 niveles; la estructura tiene 43.80 m de altura, 19.80 m de largo y 11.38 de ancho, el edificio tiene una geometría regular, tanto en planta como en elevación; las alturas de entrepiso son variables, desde 2.80 a 3.50 m. El amortiguamiento usado depende de cada reglamento.

Las características generales del edificio se muestran en la Figura 3.1.

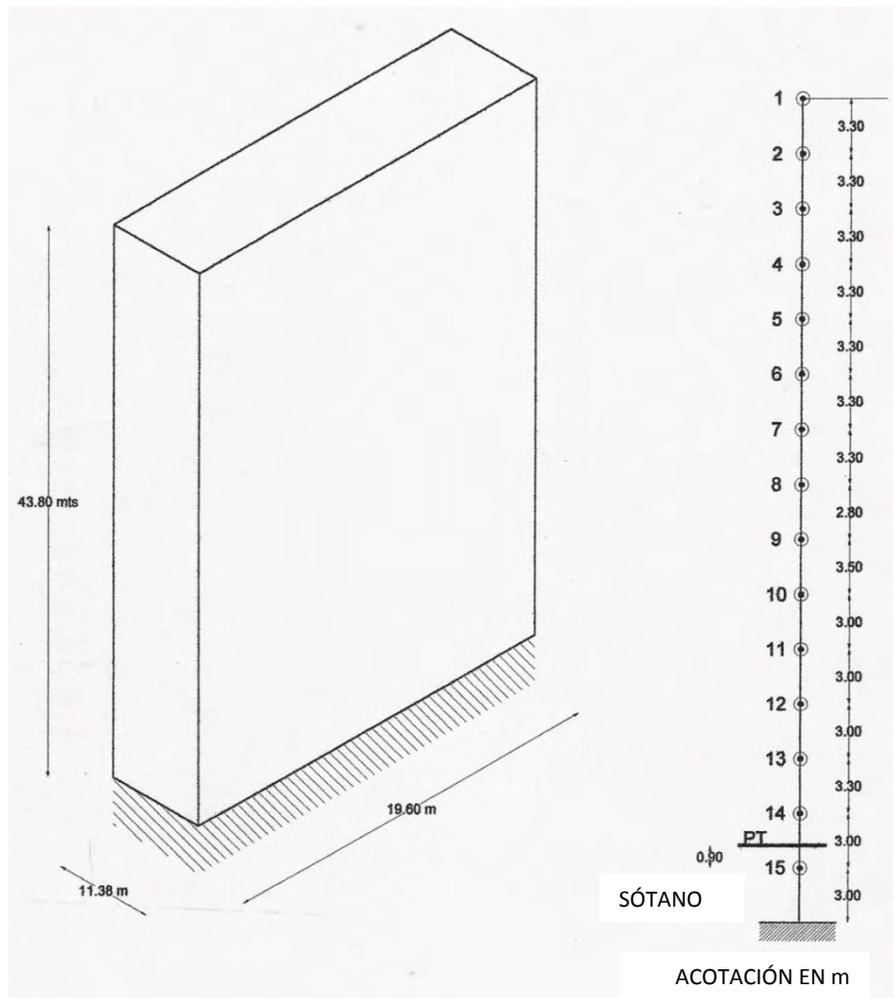


Figura 3.1: Características generales del edificio

En las Tabla 3.1 a Tabla 3.3 , las propiedades dinámicas del edificio

Tabla 3.1: Masas de cada nivel

MASA	mi Ton Seg ² /m
1	21.4100
2	20.3900
3	20.3900
4	20.3900
5	20.3900
6	20.3900
7	20.3900
8	20.3900
9	18.3500
10	18.3500
11	18.3500
12	18.3500
13	18.3500
14	17.3300
15	17.3300
	290.5500
PESO TOTAL(t)	2850.2955

Tabla 3.2: Discretización de masas para análisis dinámico

ALTURA(m)	PISO	MASA
43.80	15	1
40.50	14	2
37.20	13	3
33.90	12	4
30.60	11	5
27.30	10	6
24.00	9	7
20.70	8	8
17.90	7	9
14.40	6	10
11.40	5	11
8.40	4	12
5.40	3	13
2.10	2	14
	1	15

Tabla 3.3: Frecuencias modales del edificio

CÁLCULO DE LOS FACTORES DE PARTICIPACIÓN MODAL																
Modos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Frecuencia circular	(rad/s)	5.485534	21.94463	49.15651	81.293638	118.2383	151.8044	190.8623	222.3349	258.2485	291.4279	316.5332648	347.5213	362.7705143	385.70812	412.553
Periodos	(s)	1.14541	0.28632	0.12782	0.07729	0.05314	0.04139	0.03292	0.02826	0.02433	0.02156	0.01985	0.01808	0.01732	0.01629	0.01523
Frecuencia natural	(Hz)	0.87305	3.492596	7.823502	12.938284	18.81822	24.16043	30.37667	35.3857	41.10152	46.38219	50.37783375	55.30973	57.73672055	61.387354	65.6599

Tabla 3.4: Formas modales del edificio

FORMAS MODALES															
MASA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	-0.1001	0.097	0.0829	-0.0733	-0.0632	-0.0559	-0.0517	0.0404	-0.0417	-0.0276	-0.0268	0.0175	0.0086	-0.0012	-0.0003
2	-0.0933	0.0662	0.0325	-0.0045	0.0212	0.0406	0.0631	-0.0665	0.09	0.0726	0.0803	-0.0598	-0.031	0.0046	0.001
3	-0.086	0.0338	-0.0175	0.0546	0.0742	0.0748	0.0598	-0.0259	-0.018	-0.0521	-0.0876	0.0907	0.0531	-0.0093	-0.0021
4	-0.0784	0.0019	-0.0562	0.0776	0.0563	0.0124	-0.0486	0.0726	-0.0853	-0.0246	0.0322	-0.0938	-0.0691	0.0157	0.0036
5	-0.0704	-0.0276	-0.0751	0.0557	-0.0136	-0.0681	-0.0792	0.0243	0.0605	0.0744	0.044	0.0705	0.0784	-0.0248	-0.006
6	-0.062	-0.0523	-0.0721	0.0023	-0.0735	-0.0679	0.0199	-0.0728	0.0528	-0.0485	-0.0905	-0.0263	-0.0793	0.0378	0.0105
7	-0.0534	-0.0705	-0.0435	-0.0533	-0.0709	0.0135	0.0853	-0.0208	-0.0884	-0.0278	0.0745	-0.0259	0.0721	-0.0567	-0.019
8	-0.0447	-0.0806	-0.003	-0.0806	-0.0077	0.0776	0.0092	0.0731	-0.0075	0.0747	-0.0063	0.071	-0.0572	0.0851	0.0363
9	-0.0374	-0.0825	0.0328	-0.0689	0.0514	0.06	-0.0699	0.0277	0.0795	-0.0265	-0.0601	-0.0724	0.0225	-0.0983	-0.0558
10	-0.0283	-0.0866	0.0706	-0.017	0.0816	-0.0386	-0.0568	-0.0861	-0.0084	-0.077	0.069	0.0122	0.037	0.0761	0.0755
11	-0.0209	-0.0654	0.0876	0.037	0.0464	-0.0791	0.0327	-0.0369	-0.0666	0.0726	-0.0135	0.0463	-0.0744	-0.0465	-0.1009
12	-0.0141	-0.0501	0.0867	0.0769	-0.0238	-0.0383	0.0748	0.0734	0.0155	0.0405	-0.0585	-0.066	0.0618	-0.0056	0.1088
13	-0.0082	-0.0328	0.0693	0.0873	-0.0818	0.0454	0.0101	0.0552	0.0637	-0.0924	0.0602	0.0303	-0.0093	0.0526	-0.0951
14	-0.003	-0.0146	0.0386	0.0637	-0.0893	0.0956	-0.0838	-0.0757	-0.0349	0.0185	0.0046	0.0322	-0.0551	-0.0947	0.0863
15	-0.0008	-0.0044	0.0134	0.0251	-0.0041	0.0519	-0.0588	-0.0708	-0.0549	0.0786	-0.0629	-0.0714	0.0891	0.1095	-0.0766

3.2 CHIMENEA DE ACERO

Se trata de una chimenea de acero soldado, cuya altura total es de 16.8 m como se muestra en la Figura 3.2.

El diámetro de la sección transversal es constante en toda la estructura. El espesor de la pared es constante en la parte superior e igual a 0.00635 m. En su parte inferior, es espesor aumenta a 0.00952 m. el diámetro de toda la chimenea es igual a 0.61 m. se consideró que la masa equivalente del cilindro con los revestimientos interiores es igual a $95.5 \text{ kg}\cdot\text{s}^2 / \text{m}$.

El tramo horizontal es otro cilindro de acero de 1.5 m de longitud, con diámetro externo igual a 20", con espesor igual a 12.7 mm, que se conecta a la pared de un cuerpo de concreto, que se conecta al horno.

El amortiguamiento usado fue de 4 %.

La velocidad regional de sitio para el análisis fue de 45 m/s para un intervalo de promediación de 3 segundos a 10 m de altura.

Propiedades dinámicas: T_o (primer modo)=2.18 (Hz)

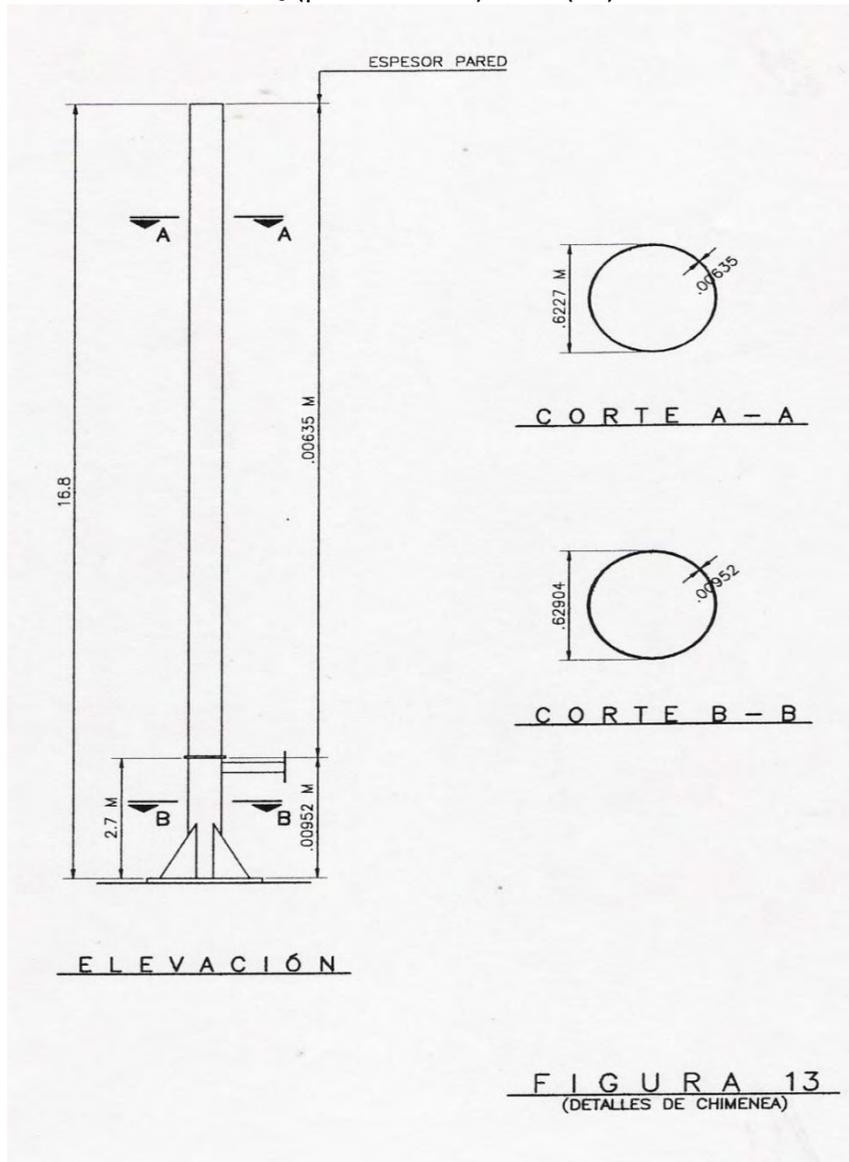


Figura 3.2: Geometría de la chimenea

3.3 MODELOS EN SAP 2000

Con la información presentada anteriormente del edificio y de la chimenea es posible hacer la representación en este programa de análisis y diseño, con el propósito de calcular la respuesta debido al viento medio y posteriormente obtener la respuesta máxima debido a la turbulencia del viento, que se obtiene de cada reglamento.

La realización de estos modelos en el programa SAP 2000 permitió comparar los resultados en términos de desplazamientos, de los diferentes reglamentos en estudio.

3.4 VERIFICACIÓN DE ACCIONES DE DISEÑO ANTE LA ACCIÓN DEL VIENTO

En general al interactuar el viento sobre las estructuras se deben verificar varias acciones de diseño como:

1. La estabilidad general de la estructura
2. El movimiento relativo de las partes (masas) que forman a la estructura.
3. Acciones locales provocadas por vórtices
4. Efectos sobre los elementos que conforman a la cimentación

Es común idealizar para fines de estabilidad general de la estructura portante que está conformada por un sistema de masas conectadas por resortes que se conectan a la cimentación, la cual puede trasladarse y girar; y por lo tanto esto genera elementos mecánicos en las estructuras, por lo tanto hay que ver cuánto influye en tipo de cimentación al actuar el viento, en los desplazamientos totales.

3.5 INFLUENCIA DE LA CIMENTACIÓN EN LOS DESPLAZAMIENTOS PROVOCADOS POR EL VIENTO

Las fuerzas resultantes debido a la acción del viento tanto en barlovento como en sotavento, producen un momento de volteo y un cortante basal que producen traslación y rotación en la base.

Estas acciones son las causantes de los desplazamientos que se generan en las masas, y de aquí se puede obtener los movimientos relativos entre ellas, el cual puede causar daño en los elementos (columnas, muros, contravientos etc.) que se conectan con las masas.

Estas acciones provocan que la cimentación experimente giros y traslaciones que afectan a los elementos que transmiten las acciones al subsuelo de apoyo de la estructura del edificio.

Una vez que se resuelve el análisis de estabilidad general de la construcción, es necesario revisar que los efectos locales en revestimientos exteriores no produzcan daño o separación de ellos de la estructura.

Todo lo anterior debe verificarse tanto para la acción media del viento (estático) como por los efectos de viento turbulento (dinámico).

CAPÍTULO 4

4 PROCEDIMIENTO ESTOCÁSTICO PARA EVALUAR EL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DINÁMICA EN ESTRUCTURAS SOMETIDAS A LA ACCIÓN TURBULENTO DEL VIENTO

4.1 MÉTODO CON BASE ESTADÍSTICA, PARA EVALUAR EL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DINÁMICA DE LA RESPUESTA MEDIA DE UNA ESTRUCTURA

El método busca establecer de manera simplificada la evaluación de un sistema de un grado de libertad equivalente, a un sistema de múltiples grados de libertad (Figura 4.1).

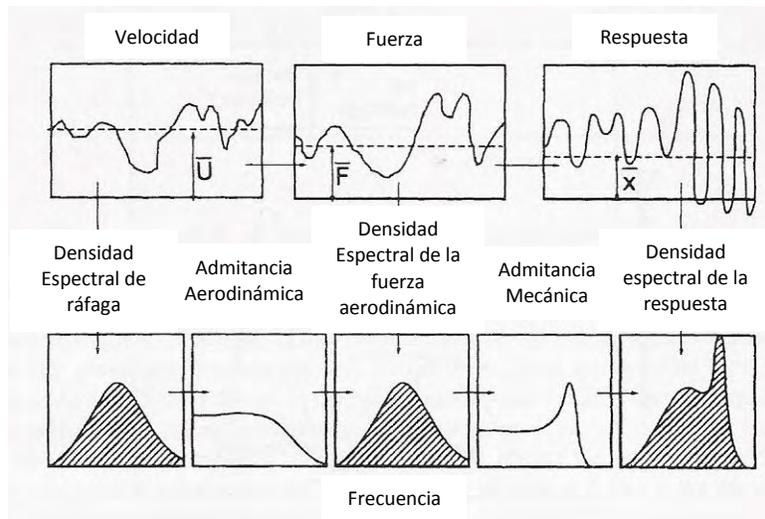


Figura 4.1: Procedimiento para estimar la respuesta dinámica de una estructura

Se trata de un método estadístico aproximado simplificado, que considera las condiciones locales de turbulencia provocada por la topografía existente en la vecindad de una construcción sobre un modelo equivalente con un solo grado de libertad.

Busca evaluar el factor de amplificación máximo del sistema de 1GL, que acepta por equivalencia en energía cinética y potencial de ambos sistemas, al factor de amplificación dinámica en la masa de mayor altura del sistema de múltiples grados de libertad.

4.2 BASES DEL MÉTODO ESTADÍSTICO PARA ESTIMAR RESPUESTA DINÁMICA

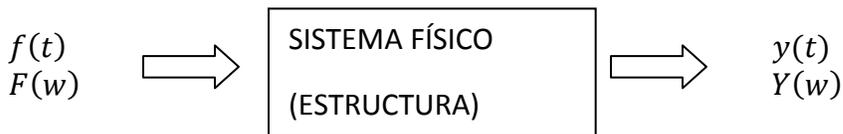
Al considerar un sistema físico que transforma una función de entrada $f(t)$ en una función de salida $y(t)$, se dice que el sistema es lineal si a una entrada

$$af_1(t) + bf_2(t)$$

Produce una salida

$$ay_1(t) + by_2(t)$$

Donde a y b son constantes arbitrarias



Se puede demostrar que en dominio de frecuencias la transformada de Fourier de la salida del sistema $y(t)$ es $Y(w)$.

Un sistema físico es invariante si la conversión de un sistema de entrada $f(t)$ produce $y(t)$ y que cuando se aplica $f(t+t_0)$ se produce $y(t+t_0)$, donde t es un tiempo cualquiera. Un sistema lineal invariante en el tiempo se define por un par de transformadas de Fourier su función de respuesta a un impulso $h(t)$, y su transformada de Fourier.

Se puede demostrar que en el dominio de frecuencias, la transformada de la Fourier de la salida del sistema $Y(w)$ es el producto de la transformada de Fourier de la entrada al sistema $F(w)$ y la función de transferencia $H(w)$ o sea:

$$Y(w) = H(w)F(w)$$

Cuando la función de entrada es estacionaria y también la función de salida y el sistema lineal e invariante (Figura 4.2, Figura 4.3, Figura 4.4).

$$S_y(w) = |H(w)|^2 S_F(w)$$



Figura 4.2: Densidad de potencia de la entrada

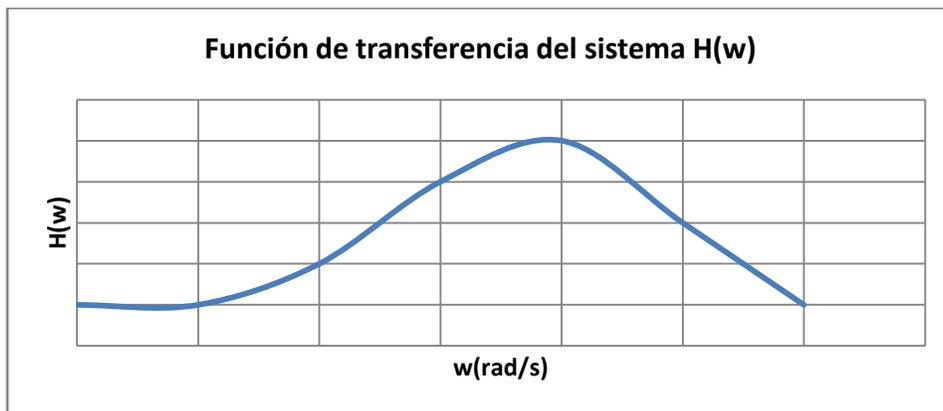


Figura 4.3: Función de transferencia del sistema



Figura 4.4: Densidad de potencia de la respuesta del sistema

Se puede partir de un sistema de 1GL con amortiguamiento viscoso, en el cual se aplica un sistema de fuerzas equivalentes variables en el tiempo, que presentan como respuesta un valor medio y una parte variable en el tiempo.

Al conocer el espectro de potencia de las fuerzas variables en el tiempo se puede llegar a obtener el espectro de respuesta del sistema, cuya área representa la varianza de la respuesta.

En este paso, se acepta la existencia de una admitancia mecánica que depende de las propiedades de rigidez y amortiguamiento del sistema. Al conocer la varianza de la respuesta, su raíz cuadrada define la desviación estándar de la respuesta.

En este planteamiento para el problema de viento turbulento, se necesita conocer el espectro de fuerzas, el cual se puede obtener del espectro de velocidades de Reynolds y del conocimiento de la admitancia aerodinámica. Así a partir del espectro de velocidades de Reynolds y al conocer las admitancias aerodinámica y mecánica del sistema, se llega a conocer la desviación estándar de la respuesta del sistema.

El método se aplica a un sistema equivalente al sistema de múltiples GL al aceptar la existencia de una masa generalizada, de una rigidez generalizada y una fuerza generalizada que se define en función de la distribución de masas y distribución de fuerzas, y la forma característica del primer modo de vibrar.

$$\text{Masa Generalizada: } M^* = \int m(z)\mu^2(z)dz$$

$$\text{Rigidez Generalizada: } K^* = \omega^2 M^*$$

$$\text{Fuerza Generalizada: } F^*(t) = \int f(z,t)\mu(z)dz$$

El método presupone que el sistema es lineal e invariante en el tiempo, con lo cual se pueden relacionar los espectros, mediante funciones de transferencias.

Con estas aproximaciones el método acepta implícitamente que el cuadrado de las velocidades de Reynolds son muy pequeñas, en comparación con las velocidades medias y que el modelo del sistema físico es un sistema de masas soportada por un material Kelviniano.

4.3 APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO ESTOCÁSTICO PARA EVALUAR LA RESPUESTA MÁXIMA DE UN SISTEMA DE 1GL EQUIVALENTE

El procedimiento parte de la idea de que la acción del viento se representa por

$$v = \bar{V} + V_R(t)$$

Y que la respuesta del sistema

$$Y = \bar{Y} + y'(t)$$

Al evaluar el efecto máximo, el procedimiento acepta que:

$$\begin{aligned} Y_{\text{máx}} &= \bar{Y} + g_{\rho} \sigma y \\ Y_{\text{máx}} &= \bar{Y} \left(1 + g_{\rho} \frac{\sigma y}{\bar{y}}\right) \\ Y_{\text{máx}} &= \bar{y} * G \end{aligned}$$

donde:

g_{ρ} = factor de pico (obtenido de planteamientos estadísticos)

\bar{Y} = respuesta media provocada por la velocidad media

σy = desviación estándar del proceso aleatorio de respuesta

g_{ρ} = factor de pico que indica el número de veces que se debe usar para establecer la respuesta máxima

$\frac{\sigma y}{\bar{y}}$ = coeficiente de variación de la respuesta del sistema de un grado de libertad equivalente

Este método simplificado trata de describir la respuesta media, como el cociente de la fuerza generalizada entre la rigidez generalizada.

$$\bar{Y} = \frac{F^*}{K^*}$$

La fuerza generalizada para estructuras cuya área expuesta tenga forma rectangular se puede escribir

$$F^* = \frac{C_D \rho b h}{2} \int_0^1 V_n^2 \left(\frac{z}{n}\right)^{2\alpha} \left(\frac{z}{n}\right)^{\epsilon} d\left(\frac{z}{n}\right)$$

Donde ϵ es un exponente adimensional que depende del tipo de estructura.

Para edificios cuya estructura portante esté formada por elementos reticulares y muros la fuerza generalizada se acepta que:

$$F^* = \frac{1}{(2\alpha + 2)} \frac{C_D \rho V_n^2}{2} bh$$

Con $\epsilon = 1$

Por el planteamiento estocástico se puede o se acepta que la varianza de la parte variable de la respuesta se puede escribir:

$$\sigma y^2 = \frac{1}{2\pi k^{*2}} \left[\frac{C_D \rho V_n bh}{\alpha + 2} \right]^2 \int_0^\alpha Hr(w)^2 C^2(w, A) S_w(w) dw$$

Al aceptar que el espectro de respuesta se puede dividir en dos partes, como lo propuso Davempot, se obtiene:

Factor de amplificación dinámica

$$G = 1 + g \frac{2\alpha + 2}{\alpha + 2} \left[4k^{\frac{1}{2}} \left(\frac{10}{n}\right)^\alpha \sqrt{\frac{\pi^2 c^2(n_0, A) \left(\frac{1200n_0}{V_{10}}\right)^2}{4\beta \left[1 + \left(\frac{1200n_0}{V_{10}}\right)^2\right]^{4/3}} + \int_0^\infty \frac{C^2(n, A) \left(\frac{1200n_0}{V_{10}}\right)^2 dn}{n \left[1 + \left(\frac{1200n_0}{V_{10}}\right)^2\right]^{4/3}} \right]$$

$$\frac{\sigma y}{y} = \frac{2\alpha + 2}{\alpha + 2} \left[4k^{\frac{1}{2}} \left(\frac{10}{n}\right)^\alpha \sqrt{\frac{\pi^2 c^2(n_0, A) \left(\frac{1200n_0}{V_{10}}\right)^2}{4\beta \left[1 + \left(\frac{1200n_0}{V_{10}}\right)^2\right]^{4/3}} + \int_0^\infty \frac{C^2(n, A) \left(\frac{1200n_0}{V_{10}}\right)^2 dn}{n \left[1 + \left(\frac{1200n_0}{V_{10}}\right)^2\right]^{4/3}} \right]$$

$$G = 1 + g \sqrt{\frac{K \left(\frac{SE}{\beta} + B\right)}{c_c}}$$

donde:

C_e = factor de exposición

K = coeficiente de rugosidad del terreno

S = factor de reducción

F = factor de energía de ráfaga, en la frecuencia n_0

B = factor de turbulencia de fondo

β = factor de amortiguamiento

En Canadá se propusieron gráficas para evaluar los términos que aparecen en la definición del factor de amplificación máximo.

El reglamento de Canadá (7) acepta valores estadísticos de las distintas variables que aparecen en la expresión matemática de G y propone una expresión simplificada para evaluar el factor de amplificación dinámica.

Aparecen como variables K , que depende de la rugosidad del terreno; C_e que es el factor de exposición que depende de la Ley de variación del viento con la altura; B que es el factor de excitación de fondo el cual depende de las características geométricas de la estructura; S que es factor de reducción por tamaño que depende de la frecuencia reducida que es $n_o H / V_H$, V_A viento medio en la parte alta de la estructura; F que mide la energía de ráfaga el cual depende de la frecuencia natural dividido entre la velocidad del viento medio n_o / V_H .

Define además al factor de respuesta máxima g_p en términos de la rapidez de fluctuación promedia \bar{V} . Además, es necesario conocer el porcentaje de amortiguamiento crítico β , que mide la disipación de la energía cuando se presentan ciclos de vibración.

CAPÍTULO 5

5 APLICACIÓN A ESTRUCTURAS DE CONTROL, DE DIFERENTES NORMAS REGLAMENTARIAS EN EL MUNDO

El presente capítulo se dedica a la comparación de las diferentes normas de viento que existen en el mundo, en específico a los efectos dinámicos en la dirección del viento, en los cuales se mencionan procedimientos para evaluarlo.

La comparación no contempla el efecto de empujes dinámicos transversales a la dirección principal del viento, generados, por la acción de vórtices alternantes que se pueden presentar en estructuras flexibles como sucede en antenas, chimeneas, anuncios, entre otros.

En este trabajo comparativo de las normas de viento se aplica a dos estructuras descritas en el capítulo III:

La mayoría de los códigos y normas del mundo utilizan el factor de ráfaga, para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento. Este concepto de factor de ráfaga se presentó por primera vez por Davenport en 1967, se basó en un método estadístico. Después aparecieron varios modelos basados en el de Davenport, pero no cambian mucho, ya que siguen su misma filosofía.

En la actualidad varios de estos modelos han sido adoptados por los principales reglamentos y normas internacionales. Por otra parte, con la globalización de la industria de la construcción, es importante comprender las diferencias que existen entre reglamentos.

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos de aplicar las diferentes normas reglamentarias de diferentes países. A continuación se presenta una tabla con los diferentes reglamentos aplicados a las dos estructuras de estudio, así como algunas detalles a considerar de cada reglamento.

5.1 EDIFICIO

5.1.1 RCDF (MÉXICO) (8)

5.1.1.1 Determinación de la velocidad de diseño

$$V_D = F_{TR} F_{\alpha} V_R$$
$$V_r = 27 \left(\frac{m}{s} \right) \text{ Tiempo de promediación (3s)}$$

5.1.1.2 Determinación de la presión de diseño

$$p_z = 0.048 C_p V_D^2$$

5.1.1.3 Factores de presión

$$\text{Pared de barlovento } C_p = 0.8$$
$$\text{Pared de sotavento}^1 C_p = -0.4$$

La succión se considerará constante en toda la altura de la pared de sotavento y se calculará para un nivel z igual a la altura media del edificio.

5.1.1.4 Empujes dinámicos paralelos al viento

El factor de amplificación dinámica se determina con la siguiente expresión:

$$G = 0.43 + g \sqrt{\frac{R}{C_e} \left(B + \frac{SF}{\beta} \right)} \geq 1$$

donde:

$$g = \left(\sqrt{2 \ln(3600v)} + \frac{0.58}{\sqrt{2 \ln(3600v)}} \right) \frac{1}{2.3} \geq 1.48 ;$$

$$v = n_o \sqrt{\frac{SF}{SF + \beta B}} ;$$

$$B = \frac{4}{3} \int_0^{914/H} \left(\frac{1}{1 + \frac{xH}{457}} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{xb}{122}} \right) \left(\frac{x}{(1+x^2)^{4/3}} \right) dx ;$$

$$S = \frac{\pi}{3} \left(\frac{1}{1 + \frac{8n_o H}{3V_H}} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{10n_o b}{V_H}} \right) ;$$

$$F = \frac{x_o^2}{(1+x_o^2)^{4/3}} ;$$

donde:

$$x_o = (1220n_o/V_H) ;$$

$$V_H = V_R\sqrt{RC_e} ;$$

G = factor de amplificación dinámica;

g = factor de respuesta máxima;

R = factor de rugosidad;

B = factor de excitación de fondo;

S = factor reductivo por tamaño;

n_o = frecuencia del modo fundamental de la estructura, Hz;

H = altura de la estructura, m;

β = fracción del amortiguamiento crítico, igual a 0.01 en estructuras de acero, y 0.02 en estructuras de concreto;

Ln = logaritmo natural;

F = relación de energía en ráfaga; y

C_e = factor correctivo por exposición.

En la Tabla 5.1 se muestran los datos del edificio, altura de entresuelo, número de niveles, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles del edificio según el RCDF. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

Tabla 5.1: Fuerzas sobre las masas

CÁLCULO DE FUERZAS SOBRE LAS MASAS (RCDF) 1												
k				1								
α	3.9		α=	0.17								
Vregional	(m/s)	27	(m/s)				PRESIÓN MEDIA(kg/m ²)		FUERZA(kg)		Fuerza total	Momento de Volteo
Piso	hi(m)	hi(m)	Zmax	Zmin	Área Trib.(m ²)	Vd(m/s)	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento	Ton	ton*m
1	2.1	6	3.75	0	73.5	27.00	27.9936	18.27173366	2058	1343	3.401	20.4030121
2	5.4	9.3	6.9	3.75	61.74	27.00	27.9936	18.27173366	1728	1128	2.856	26.5647218
3	8.4	12.3	10	6.9	58.8	27.00	27.9936	18.27173366	1646	1074	2.720	33.4609399
4	11.4	15.3	12.9	10	58.8	27.63	29.31248367	18.27173366	1724	1074	2.798	42.8086653
5	14.4	18.3	16.15	12.9	63.7	28.77	31.78178173	18.27173366	2024	1164	3.188	58.3478834
6	17.9	21.8	19.3	16.15	61.74	29.76	34.0077638	18.27173366	2100	1128	3.228	70.3646486
7	20.7	24.6	22.35	19.3	59.78	30.59	35.92341836	18.27173366	2148	1092	3.240	79.6987402
8	24	27.9	25.65	22.35	64.68	31.33	37.69906463	18.27173366	2438	1182	3.620	101.003335
9	27.3	31.2	28.95	25.65	64.68	32.03	39.38710426	18.27173366	2548	1182	3.729	116.356457
10	30.6	34.5	32.25	28.95	64.68	32.65	40.94529813	18.27173366	2648	1182	3.830	132.140438
11	33.9	37.8	35.55	32.25	64.68	33.23	42.39617246	18.27173366	2742	1182	3.924	148.327206
12	37.2	41.1	38.55	35.55	64.68	33.73	43.69650932	18.27173366	2826	1182	4.008	164.733155
13	40.5	44.4	41.85	38.55	64.68	34.20	44.92577842	18.27173366	2906	1182	4.088	181.49011
14	43.8	47.7	43.8	41.85	32.34	34.57	45.90244924	18.27173366	1484	591	2.075	98.9962497
A _r (m ²)=					858.48		36.425616	18.27173366	31270.66283		46.706	1274.69556

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.1 , estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

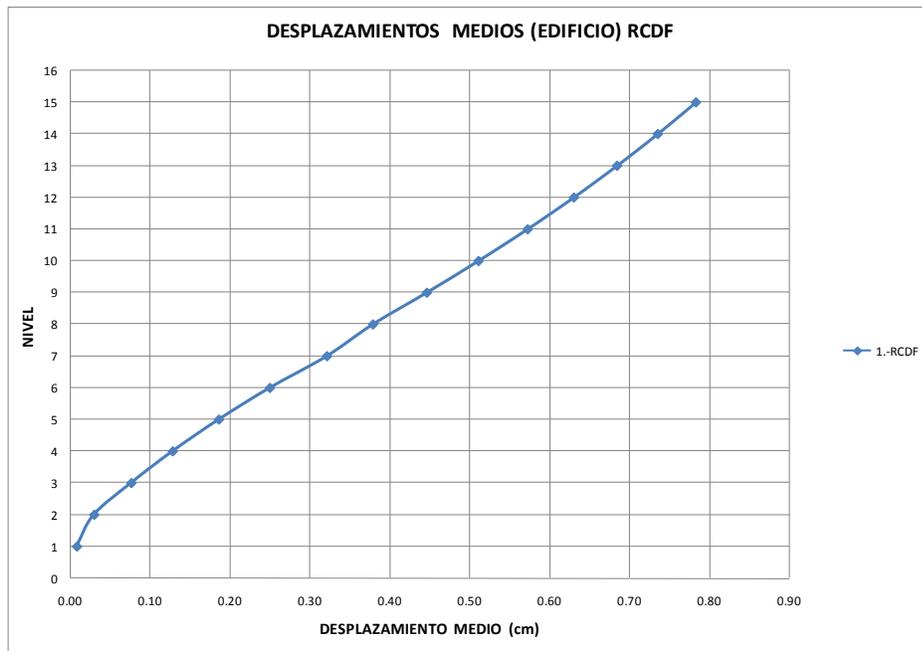


Figura 5.1: Desplazamientos medios calculados con el RCDF

Y por último para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento, el RCDF propone que se deben multiplicar los desplazamientos medios por un factor de amplificación dinámica (G), y como resultado se obtienen los desplazamientos totales debido a la acción turbulenta del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.2.

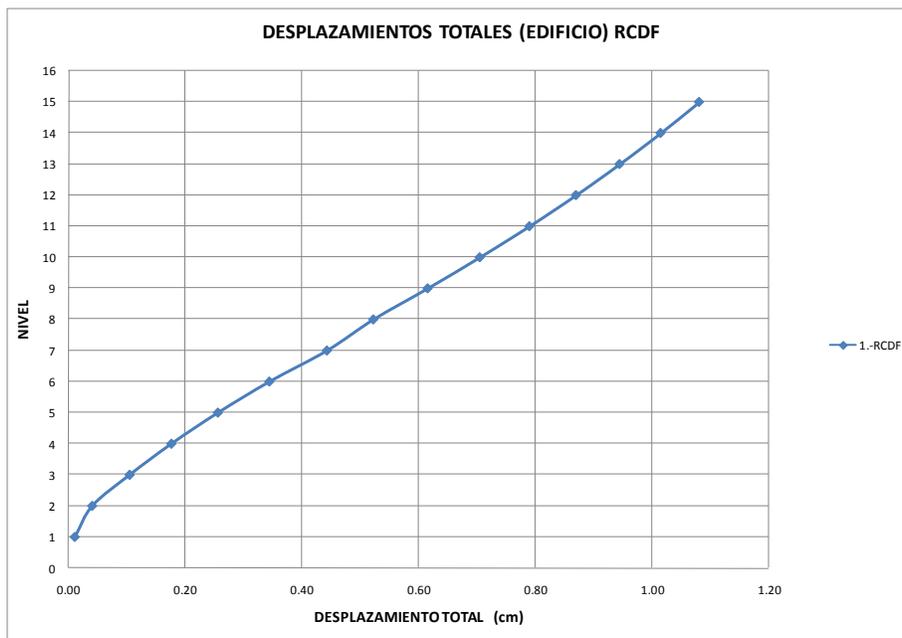


Figura 5.2: Desplazamientos totales calculados con el RCDF

El factor de amplificación dinámica calculado con el RCDF fue de 1.37995.

5.1.2 EUROCÓDIGO (9)

5.1.2.1 Determinación de la velocidad de diseño

$$V_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot V_{b,0}$$

$$c_{season} = 1$$

$$c_{dir} = 1$$

$$V_{b,0} = 18.06 \frac{m}{s} \text{ (Tiempo de promediación 600 s)}$$

$$V_m(z) = C_r(z) \cdot C_o(z) \cdot V_b$$

La categoría de terreno es IV (ver Tabla 5.2)

donde:

$C_r(z)$ es el factor de rugosidad definido por

$$C_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ para } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$C_r(z) = c_r(z_{min}) \text{ para } z \leq z_{max}$$

$C_o(z)$ es el factor de orografía, tomado como 1

donde:

z_0 =Es la longitud de rugosidad (Tabla 5.2)

k_r =Es el factor del terreno dependiendo de la longitud de rugosidad z_0

$$0.19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07}$$

donde:

$z_{0,II} = 0.05\text{m}$ (Categoría II del terreno)(Tabla 5.2)

z_{min} =Es la altura mínima definida en la tabla de las categorías y parámetros del terreno

z_{max} = Es tomado como 200 m

z_0, z_{min} dependen de la categoría del terreno. Los valores recomendados están en la tabla de las categorías y parámetros del terreno, dependen de cinco categorías representativas del terreno.

Tabla 5.2: Categoría del Terreno

Categoría del terreno	Zo (m)	Zmin (m)
0 Mar ó área costera expuesta a mar abierto.	0.003	1
I Lagos ó areas llanas y horizontales con insignificante vegetación y sin obstaculos.	0.01	1
II Área con baja vegetación tales como pastos y obstáculos aislados (árboles, edificios) con separaciones de al menos 20 veces la altura de los obstáculos.	0.05	2
III Área con una cobertura regular de vegetación ó edificios ó con obstáculos aislados con separaciones de un máximo de 20 veces la altura de los obstáculos (tales como son aldeas, terrenos suburbanos y bosque permanente).	0.3	5
IV Área en la cual al menos el 15% de la superficie está cubierta con edificios y su altura promedio no excede los 15m.	1.0	10

Las categorías del terreno son ilustradas en el Anexo A.1.

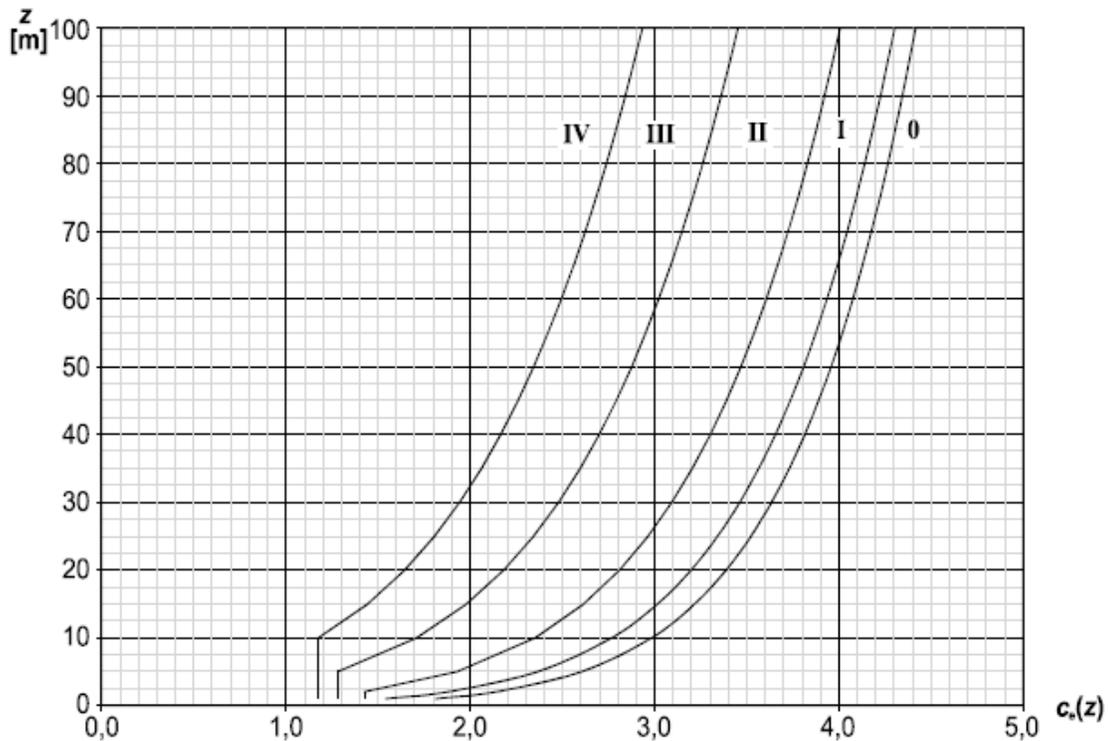


Figura 5.3: de la velocidad media con altura para cada tipo de terreno

Nota: una de las principales diferencias con respecto al RCDF es que la velocidad puede empezar a aumentar desde cero, en cambio en el RCDF los perfiles empiezan a variar desde los 10m, abajo de 10 m la velocidad es constante.

5.1.2.2 Determinación de la presión de diseño

$$q_p(z) = [1 + 7l_v(z)] \frac{1}{2} \rho V_m^2(z) = c_e(z) q_b$$

donde:

$$c_e(z) q_b = \frac{q_p(z)}{q_b}$$
$$q_b = \frac{1}{2} \rho V_b^2$$

5.1.2.3 Factores de presión

$$C_f = 2.3$$

5.1.2.4 Empujes dinámicos paralelos al viento

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

donde

:

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot l_v(z_e) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot l_v(z_e)}$$

En la Tabla 5.3 se muestran los datos del edificio, altura de entrepiso, número de niveles, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles del edificio según el Eurocódigo. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

Tabla 5.3: Fuerzas sobre las masas

CÁLCULO DE FUERZAS SOBRE LAS MASAS (EUROCÓDIGO) 2													
k		Co(z)		1									
rain category V													
Vregional (m/s)	Vb=	27	18.06	(m/s)			PRESIÓN MEDIA(kg/m ²)		FUERZA(kg)		Fuerza total	Momento de Volteo	
Piso	h edificio	Kr	Cr(z)	Co(z)	Área Trib.(m ²)	Vm(m/s)	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento	Ton	ton*m	
1	2.1	0.23432882	0.53956204	1	73.5	9.74	10.48315873		771		0.771	4.623073	
2	5.4	0.23432882	0.53956204	1	61.74	9.74	10.48315873		647		0.647	6.01924104	
3	8.4	0.23432882	0.53956204	1	58.8	9.74	10.48315873		616		0.616	7.58183972	
4	11.4	0.23432882	0.57026574	1	58.8	10.30	11.71019007		689		0.689	10.5349554	
5	14.4	0.23432882	0.62500843	1	63.7	11.29	14.06634078		896		0.896	16.3972741	
6	17.9	0.23432882	0.67599194	1	61.74	12.21	16.45479278		1016		1.016	22.1470322	
7	20.7	0.23432882	0.71004765	1	59.78	12.82	18.15450313		1085		1.085	26.6977944	
8	24	0.23432882	0.7447096	1	64.68	13.45	19.97023991		1292		1.292	36.0377358	
9	27.3	0.23432882	0.77489885	1	64.68	13.99	21.62217687		1399		1.399	43.6338989	
10	30.6	0.23432882	0.80163889	1	64.68	14.48	23.14019076		1497		1.497	51.6364101	
11	33.9	0.23432882	0.82563767	1	64.68	14.91	24.54643269		1588		1.588	60.0136715	
12	37.2	0.23432882	0.84740536	1	64.68	15.30	25.85781305		1672		1.672	68.7390656	
13	40.5	0.23432882	0.86732171	1	64.68	15.66	27.08755598		1752		1.752	77.7898266	
14	43.8	0.23432882	0.88567712	1	32.34	16.00	28.24621343		913		0.913	43.5731173	
					A _T (m ²)=	858.48	P.PROM.=	18.73613754				15.832	475.424936

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.4, estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

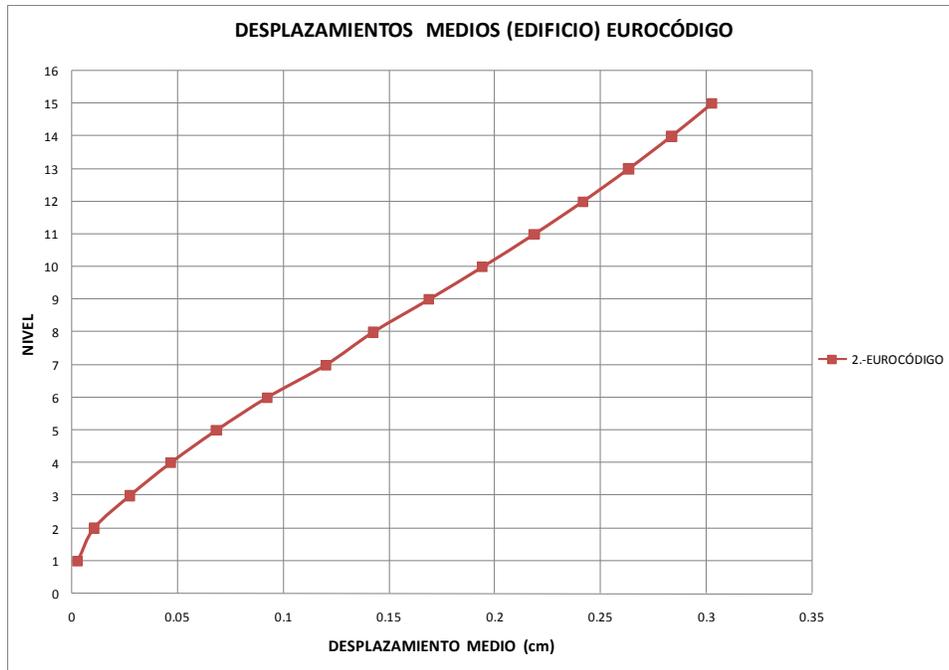


Figura 5.4: Desplazamientos medios calculados con el EUROCÓDIGO

Y por ultimo para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento, el Eurocódigo propone que se deben multiplicar los desplazamientos medios por un factor de amplificación dinámica ($C_s C_d$), y como resultado se obtienen los desplazamientos totales debido a la acción turbulenta del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.5.

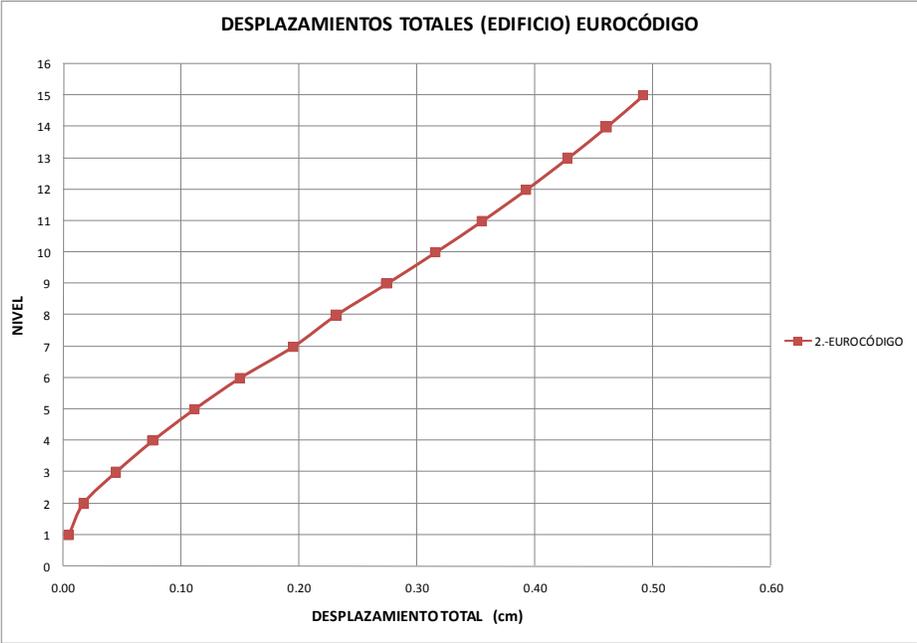


Figura 5.5: Desplazamientos totales calculados con el EUROCODIGO

El factor de amplificación dinámica ($C_s C_d$) calculado con el Eurocódigo es 1.6252

5.1.3 CHILE (10)

5.1.3.1 Determinación de la velocidad de diseño.

Parte de presiones en función de una velocidad a los 10 m., y no da expresiones para hacer variar la velocidad con la altura, si no que da una expresión para calcular las presiones a diferentes alturas.

5.1.3.2 Determinación de la presión de diseño.

$$q = \frac{u^2}{16}$$

donde:

q presión básica, $\left(\frac{kg}{m^2}\right)$

u velocidad máxima instantánea del viento, $\left(\frac{m}{s}\right)$

Para establecer la presión a alturas distintas a la que fue medida, se puede usar la siguiente ecuación:

$$P_x = P_h \left(\frac{x}{h}\right)^{2\alpha}$$

donde:

P_x es la presión a la altura x

h es la altura a que se midió la presión P_h

α es el coeficiente de rugosidad que se toma igual a 0.16 en campo abierto o frente al mar o en condiciones similares, y 0.28 en la ciudad o condiciones o lugares asimilables a la ciudad en cuanto a rugosidad del terreno para los efectos del viento.

5.1.3.3 Factores de presión

$C=1.2$

5.1.3.4 Empujes dinámicos paralelos al viento.

$$P_{max} = R * P_x$$

$$R = 1 + a * b * \sqrt{c + d}$$

$a, b, c, d =$ valores obtenidos de figuras en la norma chilena

En la Tabla 5.4 se muestran los datos del edificio, altura de entrepiso, número de niveles, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles del edificio según la norma Chilena. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

Tabla 5.4: Fuerza sobre las masas (Chile)

CÁLCULO DE FUERZAS SOBRE LAS MASAS (CHILE) 3													
						qu=	20.3854511						
	3.9	α		0.28		no hay factor de topografía, pero se incrementaran en 20 % en condiciones críticas como cimas promontorios							
Vregional(m/s)			18.06				PRESIÓN MEDIA(kg/m2)		FUERZA(kg)		Fuerza total	Momento de Volteo	
Piso	hi	hi	Zmax	Zmin	Área Trib.(m2)	Vd(m/s)	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento	Ton	ton*m	
1	2.1	6	3.75	0	73.5		8.506739463		750		0.750	4.50176652	
2	5.4	9.3	6.9	3.75	61.74		14.436464		1070		1.070	9.94698933	
3	8.4	12.3	10	6.9	58.8		18.48914068		1305		1.305	16.0465033	
4	11.4	15.3	12.9	10	58.8		21.93749544		1548		1.548	23.6830181	
5	14.4	18.3	16.15	12.9	63.7		25.00364489		1911		1.911	34.9763987	
6	17.9	21.8	19.3	16.15	61.74		28.24346811		2093		2.093	45.616545	
7	20.7	24.6	22.35	19.3	59.78		30.6382334		2198		2.198	54.0674621	
8	24	27.9	25.65	22.35	64.68		33.28423826		2583		2.583	72.0765653	
9	27.3	31.2	28.95	25.65	64.68		35.77432179		2777		2.777	86.6317845	
10	30.6	34.5	32.25	28.95	64.68		38.13505048		2960		2.960	102.116208	
11	33.9	37.8	35.55	32.25	64.68		40.38612246		3135		3.135	118.488231	
12	37.2	41.1	38.55	35.55	64.68		42.54263377		3302		3.302	135.71175	
13	40.5	44.4	41.85	38.55	64.68		44.61646315		3463		3.463	153.755042	
14	43.8	47.7	43.8	41.85	32.34		46.61716179		1809		1.809	86.2949675	
					858.48						30.903	943.913232	

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.6, estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

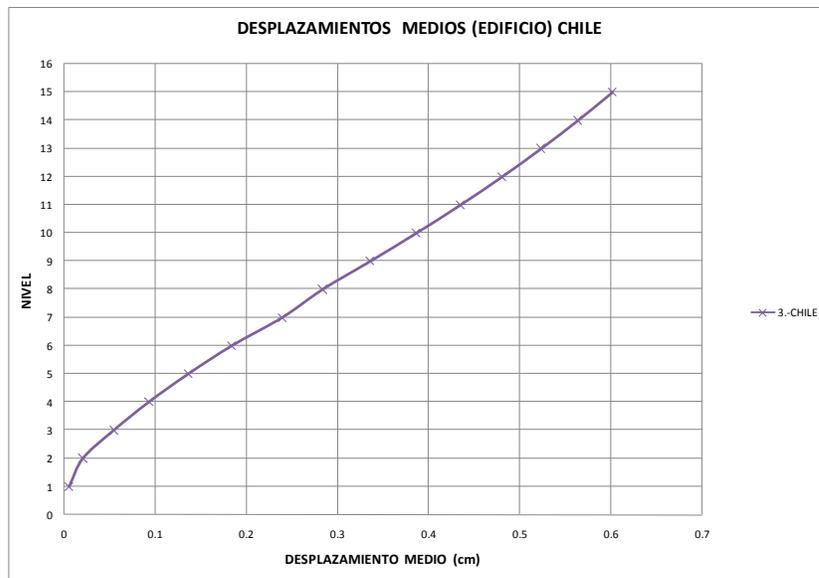


Figura 5.6: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Chile

Y por último para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento, la norma Chilena propone que se deben multiplicar los desplazamientos medios por un factor de amplificación dinámica (R), y como resultado se obtienen los desplazamientos totales debido a la acción turbulenta del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.7.

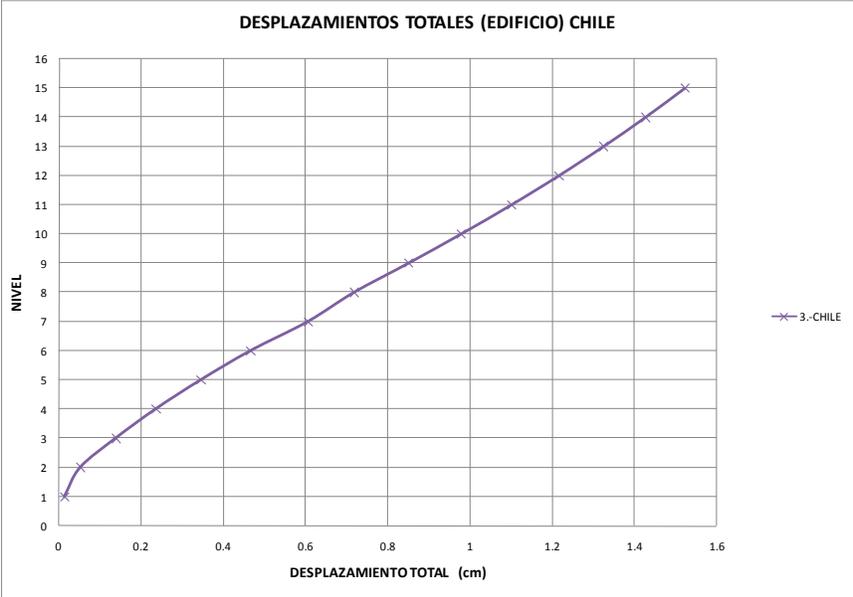


Figura 5.7: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de Chile

El factor de amplificación dinámica (R) calculados con la norma chilena es 2.5284

5.1.4 ASCE (USA) (11)

5.1.4.1 Determinación de la velocidad de diseño

$$q = 0.00256K(IV)^2$$

donde:

q es la presión de la velocidad
K coeficiente de la velocidad de presión
I factor de importancia
V velocidad básica de diseño del viento

5.1.4.2 Determinación de la presión de diseño

$$P = q \cdot C \cdot GRF$$

donde:

P es la presión de diseño
q es la presión de la velocidad
C coeficiente de fuerza

5.1.4.3 Factores de presión

$$C = 1.3$$

5.1.4.4 Empujes dinámicos paralelos al viento

En la Tabla 5.5 se muestran los datos del edificio, altura de entrepiso, número de niveles, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles del edificio según la norma ASCE USA. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

Tabla 5.5: Fuerza sobre las masas (ASCE USA)

CÁLCULO DE FUERZAS SOBRE LAS MASAS (ASCE USA) 4												
k			1		exposure A							
α	3.9		7									
Vregional(m/s)			15.03	33.6172469	mph		PRESIÓN MEDIA(kg/m ²)		FUERZA(kg)		Fuerza total	Momento de Volteo
Piso	hi	hi	K	I	Área Trib.(m ²)	Vd(mph)	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento	Ton	ton*m
1	2.1	6	0.12	1	73.5	33.62	1.695700074	12.92996534	100	475	0.575	3.44930034
2	5.4	9.3	0.15	1	61.74	33.62	2.119625092	12.92996534	105	399	0.504	4.68571714
3	8.4	12.3	0.2	1	58.8	33.62	2.82616679	12.92996534	133	380	0.513	6.31093156
4	11.4	15.3	0.22	1	58.8	34.25	3.227371821	12.92996534	152	380	0.532	8.13893524
5	14.4	18.3	0.25	1	63.7	35.41	3.920615279	12.92996534	200	412	0.612	11.1925353
6	17.9	21.8	0.3	1	61.74	36.53	5.006483289	12.92996534	247	399	0.646	14.0921359
7	20.7	24.6	0.35	1	59.78	37.30	6.088538813	12.92996534	291	386	0.678	16.6703116
8	24	27.9	0.4	1	64.68	38.10	7.258712037	12.92996534	376	418	0.794	22.1456215
9	27.3	31.2	0.42	1	64.68	38.80	7.9074232	12.92996534	409	418	0.827	25.8122837
10	30.6	34.5	0.45	1	64.68	39.44	8.753018719	12.92996534	453	418	0.871	30.0519591
11	33.9	37.8	0.48	1	64.68	40.02	9.613790601	12.92996534	497	418	0.916	34.6100981
12	37.2	41.1	0.5	1	64.68	40.56	10.2837158	12.92996534	532	418	0.950	39.05633
13	40.5	44.4	0.55	1	64.68	41.05	11.59015011	12.92996534	600	418	1.018	45.1936858
14	43.8	47.7	0.6	1	32.34	41.51	12.92996534	12.92996534	335	209	0.544	25.9297965
					858.48						9.979	287.339642

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.8, estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

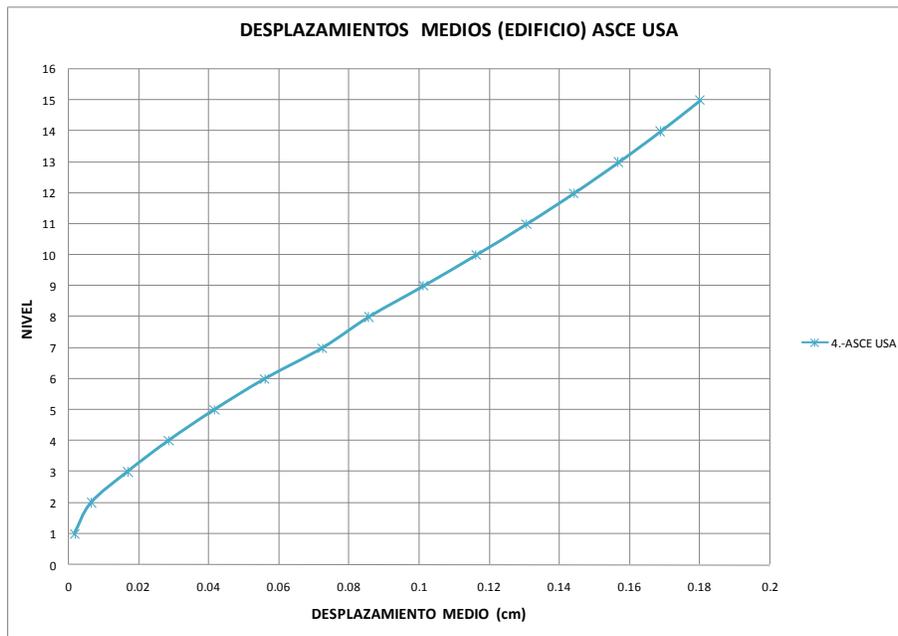


Figura 5.8: Desplazamientos medios calculados con el reglamento ASCE USA

Y por último para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento, el ASCE USA propone que se deben multiplicar los desplazamientos medios por un factor de amplificación dinámica (GRF), y como resultado se obtienen los desplazamientos totales debido a la acción turbulenta del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.9.

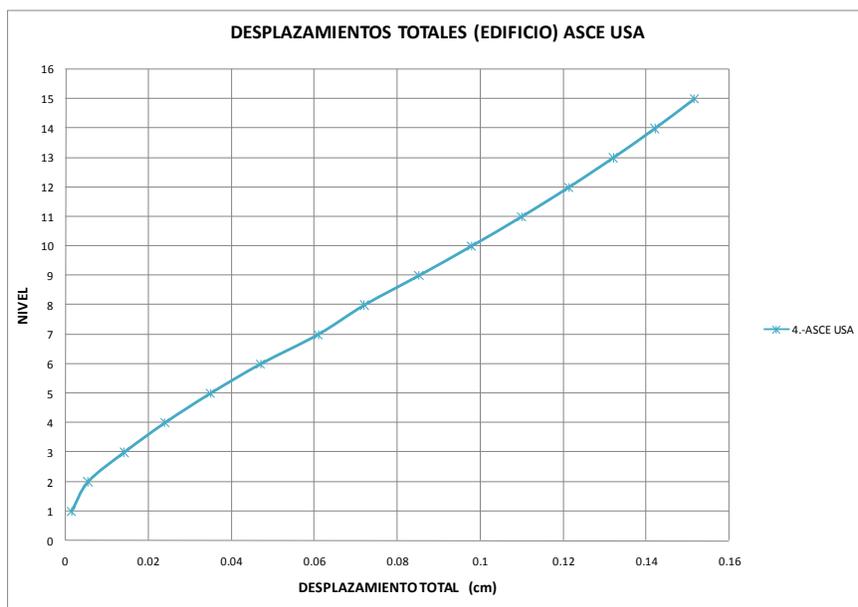


Figura 5.9: Desplazamientos totales calculados con el reglamento ASCE USA
El factor de amplificación dinámica (GRF) calculados con la norma ASCE es 0.84106

5.1.5 INDIA (12)

5.1.5.1 Determinación de la velocidad de diseño

$$V_z = V_b k_1 k_2 k_3$$

donde:

V_z es la velocidad del diseño el viento a cualquier altura z en m/s;

k_1 es el factor de probabilidad (coeficiente de riesgo);

k_2 es el factor del terreno, altura y tamaño de la estructura (Tabla 5.6 Tabla 5.6: Factor del terreno, altura y tamaño de la estructura);

k_3 es el factor de topografía

Tabla 5.6: Factor del terreno, altura y tamaño de la estructura

HEIGHT m	TERRAIN CATEGORY 1 CLASS			TERRAIN CATEGORY 2 CLASS			TERRAIN CATEGORY 3 CLASS			TERRAIN CATEGORY 4 CLASS		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
10	1.05	1.03	0.99	1.00	0.98	0.93	0.91	0.88	0.82	0.80	0.76	0.67
15	1.09	1.07	1.03	1.05	1.02	0.97	0.97	0.94	0.87	0.80	0.76	0.67
20	1.12	1.10	1.06	1.07	1.05	1.00	1.01	0.98	0.91	0.80	0.76	0.67
30	1.15	1.13	1.09	1.12	1.10	1.04	1.06	1.03	0.96	0.97	0.93	0.83
50	1.20	1.18	1.14	1.17	1.15	1.10	1.12	1.09	1.02	1.10	1.05	0.95
100	1.26	1.24	1.20	1.24	1.22	1.17	1.20	1.17	1.10	1.20	1.15	1.05
150	1.30	1.28	1.24	1.28	1.25	1.21	1.24	1.21	1.15	1.24	1.20	1.10
200	1.32	1.30	1.26	1.30	1.28	1.24	1.27	1.24	1.18	1.27	1.22	1.13
250	1.34	1.32	1.28	1.32	1.31	1.26	1.29	1.26	1.20	1.28	1.24	1.16
300	1.35	1.34	1.30	1.34	1.32	1.28	1.31	1.28	1.22	1.30	1.26	1.17
350	1.37	1.35	1.31	1.36	1.34	1.29	1.32	1.30	1.24	1.31	1.27	1.19
400	1.38	1.36	1.32	1.37	1.35	1.30	1.34	1.31	1.25	1.32	1.28	1.20
450	1.39	1.37	1.33	1.38	1.36	1.31	1.35	1.32	1.26	1.33	1.29	1.21
500	1.40	1.38	1.34	1.39	1.37	1.32	1.36	1.33	1.28	1.34	1.30	1.22

5.1.5.2 Determinación de la presión de diseño

$$\rho_z = 0.6V_z^2$$

donde:

ρ_z presión de diseño del viento en N/m^2 a una altura z

V_z velocidad de diseño del viento en m/s a una altura z

5.1.5.3 Factores de presión

$$C_f=1.3$$

5.1.5.4 Empujes dinámicos paralelos al viento

$$F_z = C_f A_0 \bar{p}_z G$$

donde:

$$G = 1 + g_1 r \sqrt{\left[B(1 + \phi)^2 + \frac{SE}{\beta} \right]}$$

En la Tabla 5.7 se muestran los datos del edificio, altura de entrepiso, número de niveles, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles del edificio según la norma de la India. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

Tabla 5.7: Fuerzas sobre las masas India

CÁLCULO DE FUERZAS SOBRE LAS MASAS (INDIA) 5												
k			0.98									
α	3.9		0.17									
Vregional(m/s)			27				PRESIÓN MEDIA(kg/m2)		FUERZA(kg)		Fuerza total	Momento de Volteo
Piso	hi	K1	K2	K3	Área Trib.(m2)	Vd(m/s)	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento	Ton	ton*m
1	2.1	1	0.76	1	73.5	20.52	33.47960367		2461	0	2.461	14.7645052
2	5.4	1	0.76	1	61.74	20.52	33.47960367		2067	0	2.067	19.2233858
3	8.4	1	0.76	1	58.8	20.52	33.47960367		1969	0	1.969	24.2137886
4	11.4	1	0.76	1	58.8	20.52	33.47960367		1969	0	1.969	30.1195906
5	14.4	1	0.76	1	63.7	20.52	33.47960367		2133	0	2.133	39.0275088
6	17.9	1	0.76	1	61.74	20.52	33.47960367		2067	0	2.067	45.0612699
7	20.7	1	0.76	1	59.78	20.52	33.47960367		2001	0	2.001	49.2347034
8	24	1	0.828	1	64.68	22.36	39.73871295		2570	0	2.570	71.7113687
9	27.3	1	0.8841	1	64.68	23.87	45.30601921		2930	0	2.930	91.4282717
10	30.6	1	0.9336	1	64.68	25.21	50.52133403		3268	0	3.268	112.736336
11	33.9	1	0.9534	1	64.68	25.74	52.68699373		3408	0	3.408	128.814642
12	37.2	1	0.9732	1	64.68	26.28	54.89810129		3551	0	3.551	145.938258
13	40.5	1	0.993	1	64.68	26.81	57.15465672		3697	0	3.697	164.136286
14	43.8	1	1.0128	1	32.34	27.35	59.45666001		1923	0	1.923	91.718914
	26.28	1	0.3028	1	858.48	8.1756	vh				36.013	1028.12883

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.10, estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

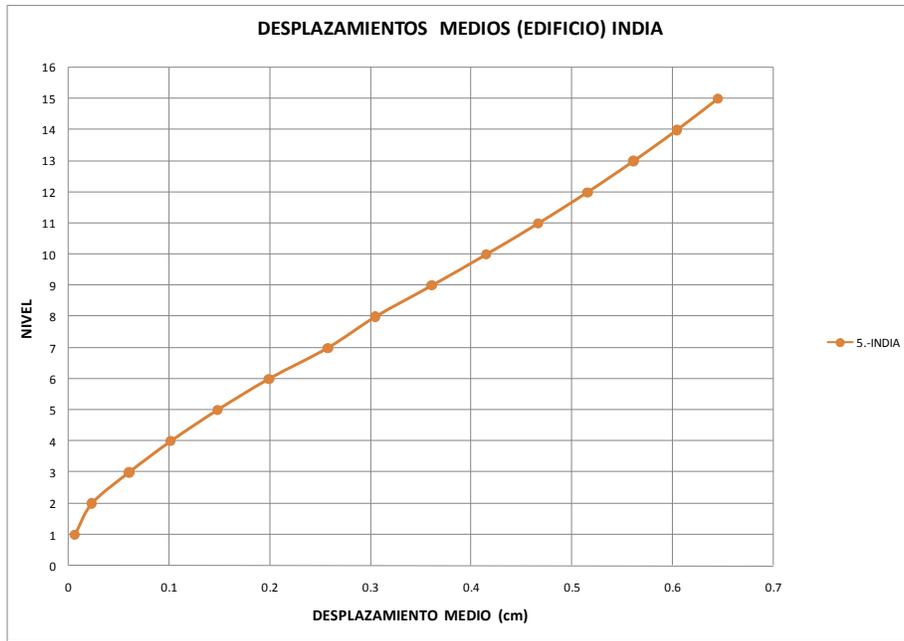


Figura 5.10: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de India

Y por último para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento, la norma de la India propone que se deben multiplicar los desplazamientos medios por un factor de amplificación dinámica (G), y como resultado se obtienen los desplazamientos totales debido a la acción turbulenta del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.11.

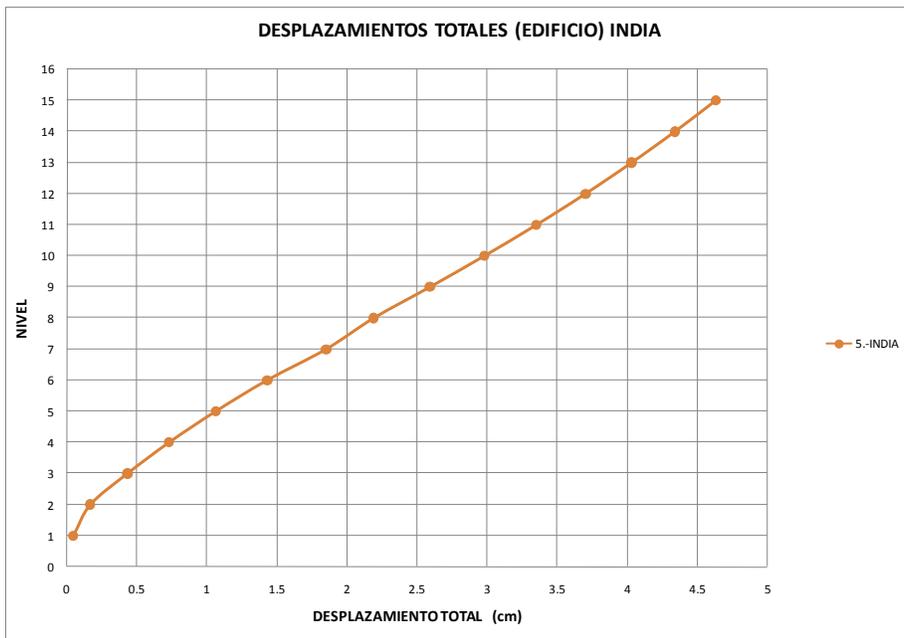


Figura 5.11: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de India

El factor de amplificación dinámica (G) calculados con la norma de la India es 7.1724

5.1.6 AUSTRALIA (13)

5.1.6.1 Determinación de la velocidad de diseño

$$V_{des} = Mzcat * Ms * Mt$$

V_{des} = Velocidad de diseño

$Mzcat$ = Factor de corrección con la altura

Ms = Factor de protección

Mt = Factor de Topografía

5.1.6.2 Determinación de la presión de diseño

$$P = 0.5 \rho_{air} * V_{des}^2 * C_{fig}$$

ρ_{air} = Densidad del aire

C_{fig} = Factor de la forma aerodinámica

5.1.6.3 Factores de presión

Pared de barlovento $C_{fig} = 0.8$

Pared de sotavento¹ $C_{fig} = -0.5$

5.1.6.4 Empujes dinámicos paralelos al viento

$$f = 0.5 \rho_{air} * V_{des}^2 * C_{fig} * C_{dyn}$$

f = fuerza unitaria

C_{dyn} = coeficiente dinámico

En la Tabla 5.8 se muestran los datos del edificio, altura de entrepiso, número de niveles, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles del edificio según la norma de Australia. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

Tabla 5.8: Fuerzas sobre las masas Australia

CÁLCULO DE FUERZAS SOBRE LAS MASAS (AUSTRALIA) 6													
Vregional(m/s)		27.00					PRESIÓN MEDIA(kg/m ²)		FUERZA(kg)		Fuerza total	Momento de Volteo	
Piso	hi	Mzcat	Ms	Mt	Área Trib.(m ²)	Vd(m/s)	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento	Ton	ton*m	
1	2.1	0.75	1	1	73.5	20.25	20.06422018	12.54013761	1475	922	2.396	14.3785218	
2	5.4	0.75	1	1	61.74	20.25	20.06422018	12.54013761	1239	774	2.013	18.7208354	
3	8.4	0.75	1	1	58.8	20.25	20.06422018	12.54013761	1180	737	1.917	23.5807757	
4	11.4	0.75	1	1	58.8	20.25	20.06422018	12.54013761	1180	737	1.917	29.3321844	
5	14.4	0.75	1	1	63.7	20.25	20.06422018	12.54013761	1278	799	2.077	38.0072259	
6	17.9	0.75	1	1	61.74	20.25	20.06422018	12.54013761	1239	774	2.013	43.8832485	
7	20.7	0.7535	1	1	59.78	20.34	20.25192319	12.657452	1211	757	1.967	48.3961322	
8	24	0.77	1	1	64.68	20.79	21.14857982	13.21786239	1368	855	2.223	62.0167193	
9	27.3	0.7865	1	1	64.68	21.24	22.06465861	13.79041163	1427	892	2.319	72.3561054	
10	30.6	0.803	1	1	64.68	21.68	23.00015956	14.37509972	1488	930	2.417	83.4013961	
11	33.9	0.8195	1	1	64.68	22.13	23.95508268	14.97192667	1549	968	2.518	95.1728009	
12	37.2	0.836	1	1	64.68	22.57	24.92942796	15.58089248	1612	1008	2.620	107.690529	
13	40.5	0.8525	1	1	64.68	23.02	25.92319541	16.20199713	1677	1048	2.725	120.974791	
14	43.8	0.869	1	1	32.34	23.46	26.93638503	16.83524064	871	544	1.416	67.5228976	
					858.48		Cfig=	Cfig=			30.538	825.434164	

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.12, estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

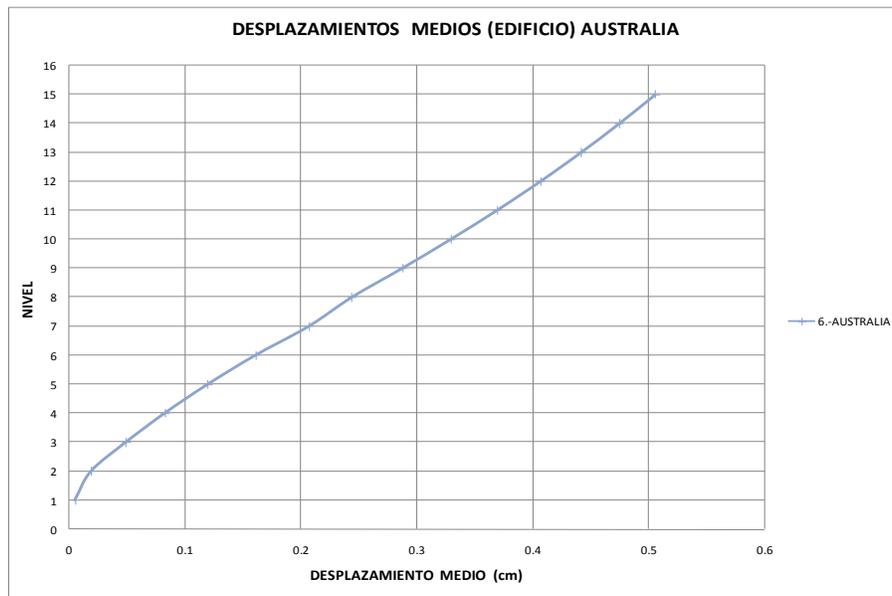


Figura 5.12: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Australia

Y por último para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento, la norma Australiana propone que se deben multiplicar los desplazamientos medios por un factor de amplificación dinámica (C_{dyn}), y como resultado se obtienen los desplazamientos totales debido a la acción turbulenta del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.13.

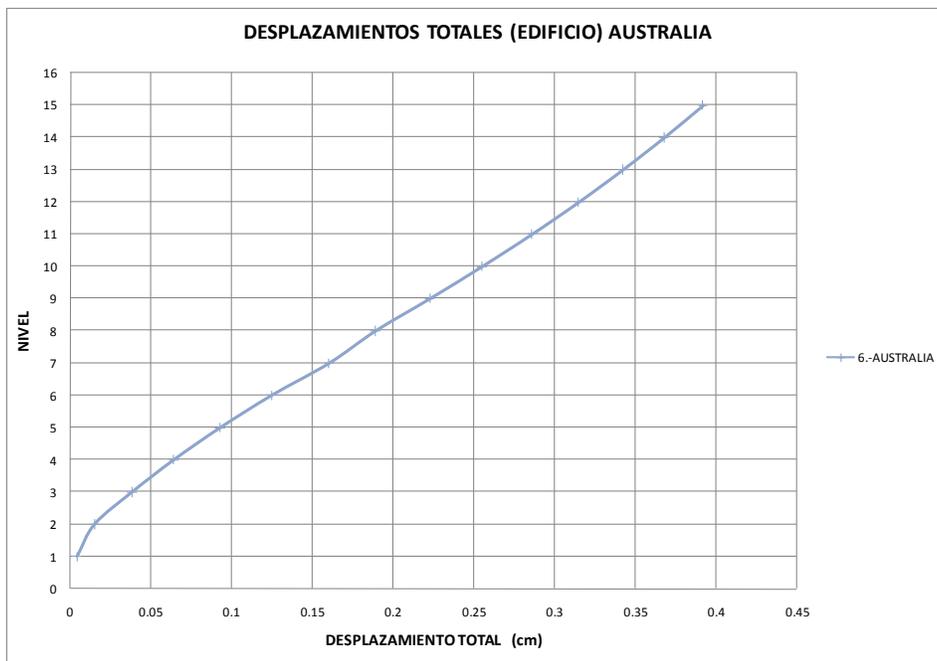


Figura 5.13: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de Australia

El factor de amplificación dinámica (C_{dyn}) calculados con la norma de Australia es 0.7741

5.1.7 RUSIA (14)

5.1.7.1 Determinación de la velocidad de diseño

Parte de presiones en función de una velocidad a los 10 m., y no da expresiones para hacer variar la velocidad con la altura, si no que da una expresión para calcular las presiones a diferentes alturas.

5.1.7.2 Determinación de la presión de diseño

$$w_0 = 0.61V_{10}^2, \text{ en Pa}$$

$$w_m = w_0kc$$

donde:

k es el coeficiente que toma en cuenta el cambio de presión con la altura

c es el coeficiente aerodinámico

w_0 valor específico de la presión

5.1.7.3 Factores de presión

Pared de barlovento $C_p = 0.8$

Pared de sotavento $C_p = 0.6$

5.1.7.4 Empujes dinámicos paralelos al viento

Coeficiente dinámico = 1.3, el cual se obtiene de una gráfica

En la Tabla 5.9 se muestran los datos del edificio, altura de entrepiso, número de niveles, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles del edificio según la norma de Rusia. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

Tabla 5.9: Fuerzas sobre las masas (Rusia)

CÁLCULO DE FUERZAS SOBRE LAS MASAS (RUSIA) 7												
k			0.98									
α	3.9		0.17									
Vregional(m/s)			18.06				PRESIÓN MEDIA(kg/m ²)		FUERZA(kg)		Fuerza total	Momento de Volteo
Piso	hi	hi	wo	k	Área Trib.(m ²)	Vd(m/s)	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento	Ton	ton*m
1	2.1	6	20.2815497	0.4	73.5	27.00	6.490095919	4.867571939	477	358	0.835	5.00873153
2	5.4	9.3	20.2815497	0.4	61.74	27.00	6.490095919	4.867571939	401	301	0.701	6.52136845
3	8.4	12.3	20.2815497	0.4	58.8	27.00	6.490095919	4.867571939	382	286	0.668	8.2143197
4	11.4	15.3	20.2815497	0.421	58.8	27.16	6.830825954	5.123119466	402	301	0.703	10.7542475
5	14.4	18.3	20.2815497	0.466	63.7	27.17	7.560961745	5.670721309	482	361	0.843	15.4243053
6	17.9	21.8	20.2815497	0.5185	61.74	27.18	8.412786834	6.309590126	519	390	0.909	19.8153183
7	20.7	24.6	20.2815497	0.55875	59.78	27.19	9.065852736	6.799389552	542	406	0.948	23.3312349
8	24	27.9	20.2815497	0.6	64.68	27.20	9.735143878	7.301357908	630	472	1.102	30.7435941
9	27.3	31.2	20.2815497	0.64125	64.68	27.21	10.40443502	7.803326265	673	505	1.178	36.7435536
10	30.6	34.5	20.2815497	0.6825	64.68	27.22	11.07372616	8.305294621	716	537	1.253	43.2435097
11	33.9	37.8	20.2815497	0.72375	64.68	27.23	11.7430173	8.807262977	760	570	1.329	50.2434625
12	37.2	41.1	20.2815497	0.765	64.68	27.24	12.41230844	9.309231333	803	602	1.405	57.7434118
13	40.5	44.4	20.2815497	0.805	64.68	27.24	13.06131804	9.795988527	845	634	1.478	65.6414301
14	43.8	47.7	20.2815497	0.838	32.34	27.25	13.59675095	10.19756321	440	330	0.770	36.7055373
						858.48					14.122	410.134025

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.14, estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio

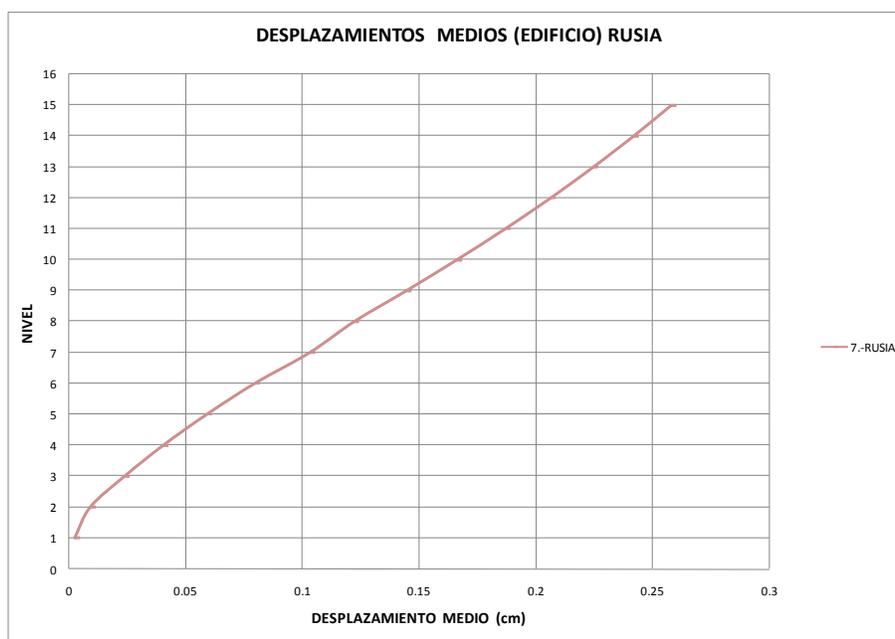


Figura 5.14: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Rusia

Y por último para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento, la norma de Rusia propone que se deben multiplicar los desplazamientos medios por un factor de amplificación dinámica (G), y como resultado se obtienen los desplazamientos totales debido a la acción turbulenta del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.15.

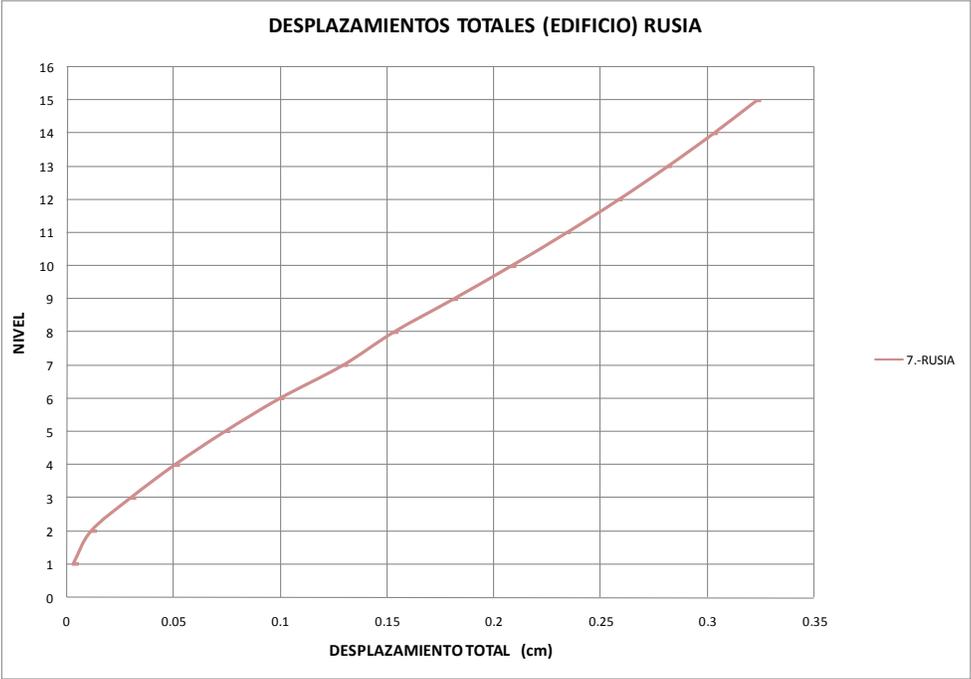


Figura 5.15: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de Rusia
El factor de amplificación dinámica (G) calculados con la norma de Rusia es 1.25

5.1.8 SUDÁFRICA (15)

5.1.8.1 Determinación de la velocidad de diseño

$$V_z = V_r k_z, \text{ en } \left(\frac{m}{s}\right)$$

5.1.8.2 Determinación de la presión de diseño

$$q_z = 0.47V_z^2, \text{ en } \left(\frac{N}{m^2}\right)$$

5.1.8.3 Factores de presión

$$C_f = 1.05$$

5.1.8.4 Empujes dinámicos paralelos al viento

Este reglamento no considera expresiones para calcular los efectos dinámicos, pero si recomienda que se debe tomar esto en cuenta para el diseño de las estructuras, y da referencias sobre algunas publicaciones aplicables a los efectos dinámicos.

En la Tabla 5.10 se muestran los datos del edificio, altura de entrepiso, número de niveles, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles del edificio según la norma ASCE USA. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

Tabla 5.10: Fuerzas sobre las masas Sudáfrica

CÁLCULO DE FUERZAS SOBRE LAS MASAS (SUDÁFRICA) 8													
						CLASE B							
	Vregional(m/s)			27					PRESIÓN MEDIA(kg/m ²)	FUERZA(kg)		Fuerza total	Momento de Volteo
Piso	hi	hi	Zmax	Zmin	Área Trib.(m ²)	Vd(m/s)	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento	Ton	ton*m	
1	2.1	6	3.75	0	73.5	16.74	13.42578716		1036		1.036	6.21681074	
2	5.4	9.3	6.9	3.75	61.74	16.74	13.42578716		870		0.870	8.09428759	
3	8.4	12.3	10	6.9	58.8	16.74	13.42578716		829		0.829	10.1955696	
4	11.4	15.3	12.9	10	58.8	16.74	13.42578716		829		0.829	12.6822939	
5	14.4	18.3	16.15	12.9	63.7	16.74	13.42578716		898		0.898	16.4331031	
6	17.9	21.8	19.3	16.15	61.74	16.74	13.42578716		870		0.870	18.9737064	
7	20.7	24.6	22.35	19.3	59.78	16.88	13.649027		857		0.857	21.0757001	
8	24	27.9	25.65	22.35	64.68	17.53	14.72623662		1000		1.000	27.903282	
9	27.3	31.2	28.95	25.65	64.68	18.19	15.84435509		1076		1.076	33.5728702	
10	30.6	34.5	32.25	28.95	64.68	18.84	17.00338238		1155		1.155	39.839486	
11	33.9	37.8	35.55	32.25	64.68	19.49	18.20331851		1236		1.236	46.7306346	
12	37.2	41.1	38.55	35.55	64.68	20.15	19.44416348		1321		1.321	54.2738207	
13	40.5	44.4	41.85	38.55	64.68	20.80	20.72591728		1408		1.408	62.4965496	
14	43.8	47.7	43.8	41.85	32.34	21.45	22.04857991		749		0.749	35.7131631	
					858.48						14.133	394.201278	

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.16, estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

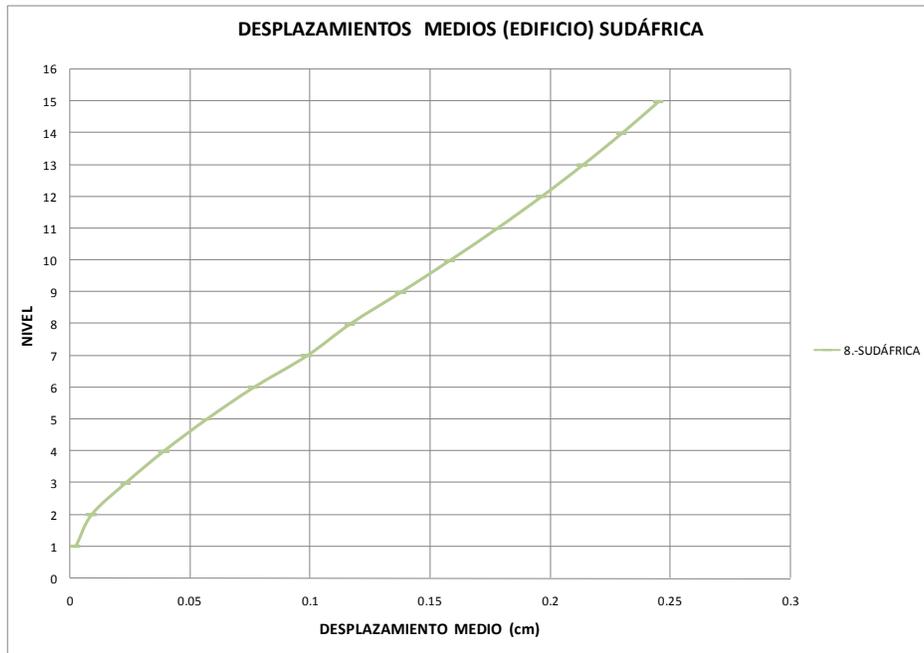


Figura 5.16: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Sudáfrica

5.1.9 JAPÓN (16)

5.1.9.1 Determinación de la velocidad de diseño

$$V_z = V_0, \text{ en } \left(\frac{m}{s}\right)$$

5.1.9.2 Determinación de la presión de diseño

$$q_z = 0.6EV_0^2, \text{ en } \left(\frac{kg}{m^2}\right)$$

$$E = Er^2$$

$$Er = 1.7 \left(\frac{H}{Z_G}\right)^\alpha$$

$Z_G =$ altura Gradiente (550 m para terreno IV)

$H =$ altura

$\alpha = 0.27$ (terreno IV)

5.1.9.3 Factores de presión

Pared de barlovento $C_p = 0.8$

Pared de sotavento¹ $C_p = -0.4$

$$C_t = 1.2$$

5.1.9.4 Empujes dinámicos paralelos al viento

$$G_f = 2.3$$

En la Tabla 5.11 se muestran los datos del edificio, altura de entrepiso, número de niveles, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles del edificio según la norma de Japón. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

CÁLCULO DE FUERZAS SOBRE LAS MASAS (JAPÓN) 9													
k			0.98										
α	3.9		0.17										
Vregional(m/s)			18.06				PRESIÓN MEDIA(kg/m ²)		FUERZA(kg)		Fuerza total	Momento de Volteo	
Piso	hi	hi	Zmax	Zmin	Área Trib.(m ²)	Vo(m/s)	Er	q--	Barlovento	Sotavento	Ton	ton*m	
1	2.1	6	3.75	0	73.5	18.06	0.378050838	2.851169011	251		0.251	1.50883864	
2	5.4	9.3	6.9	3.75	61.74	18.06	0.487862358	4.748070657	352		0.352	3.27150805	
3	8.4	12.3	10	6.9	58.8	18.06	0.549675528	6.027474162	425		0.425	5.2311725	
4	11.4	15.3	12.9	10	58.8	18.06	0.596918866	7.108094002	502		0.502	7.67367083	
5	14.4	18.3	16.15	12.9	63.7	18.06	0.635782937	8.063810042	616		0.616	11.2800768	
6	17.9	21.8	19.3	16.15	61.74	18.06	0.674250557	9.069120652	672		0.672	14.6477036	
7	20.7	24.6	22.35	19.3	59.78	18.06	0.701234038	9.809537447	704		0.704	17.3109457	
8	24	27.9	25.65	22.35	64.68	18.06	0.72980701	10.62523669	825		0.825	23.0088056	
9	27.3	31.2	28.95	25.65	64.68	18.06	0.755639949	11.39075136	884		0.884	27.5840622	
10	30.6	34.5	32.25	28.95	64.68	18.06	0.779284037	12.11474042	940		0.940	32.4402704	
11	33.9	37.8	35.55	32.25	64.68	18.06	0.801133539	12.80360832	994		0.994	37.5643118	
12	37.2	41.1	38.55	35.55	64.68	18.06	0.821481125	13.46225245	1045		1.045	42.9448223	
13	40.5	44.4	41.85	38.55	64.68	18.06	0.840550579	14.09451887	1094		1.094	48.5718318	
14	43.8	47.7	43.8	41.85	32.34	18.06	0.858517209	14.70349447	571		0.571	27.2182503	
					858.48						9.874	300.25627	

Tabla 5.11: Fuerzas sobre las masas Japón

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.17, estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

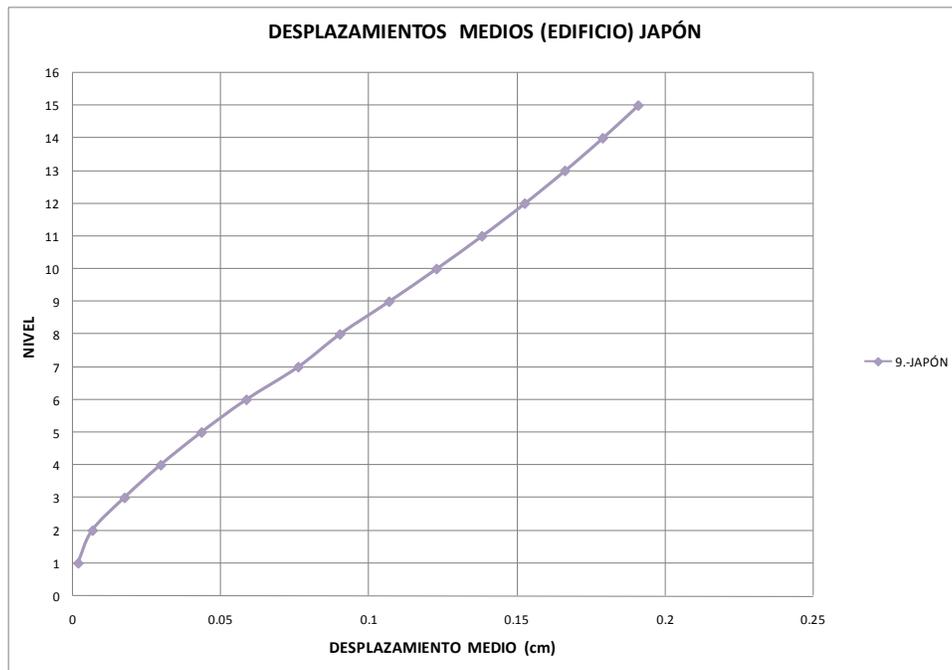


Figura 5.17: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Japón

Y por último para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento, el reglamento de Japón propone que se deben multiplicar los desplazamientos medios por un factor de amplificación dinámica (G), y como resultado se obtienen los desplazamientos totales debido a la acción turbulenta del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.18.

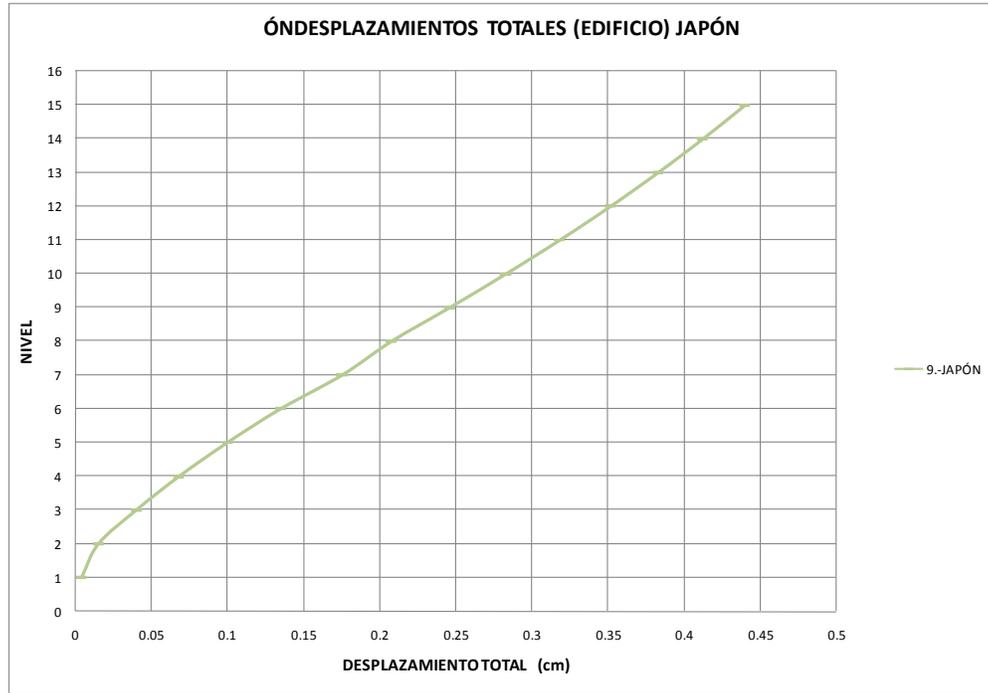


Figura 5.18: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de Japón

El factor de amplificación dinámica (G) calculados con la norma de Japón es 2.3

Tabla 5.12: Tabla comparativa de los diferentes aspectos que toma cada reglamento

RESUMEN DE LAS DIFERENTES PARAMETROS DE CADA REGLAMETO (EJEMPLO EDIFICIO)							
CÓDIGO		VELOCIDAD DE DISEÑO (VIENTO MEDIO)		Cpresión			F. A. DINÁMICA
		TIEMPO PROMEDIO	Vr(m/s)	BARLOVENTO	SOTAVENTO	TOTAL	
#		s					(G)
1	RCDF	3	27.00	0.8	0.4	1.2	1.379946882
2	EUROCÓDIGO	600	18.06			2.3	1.625197471
3	CHILE	600	18.06			1.2	2.528433959
4	ASCE	3600	15.03			1.3	0.841061296
5	INDIA	3	27.00			1.3	7.172371604
6	AUSTRALIA	3	27.00	0.8	0.5	1.3	0.774093297
7	RUSIA	600	18.06	0.8	0.6	1.4	1.25
8	SUDÁFRICA	3	27.00			1.05	NO HAY
9	JAPÓN	600	18.06	0.8	0.4	1.2	2.3

En este trabajo se realizó la comparación de 10 reglamentos, los nueve que se muestran en la Tabla 5.12 mas el de Hong Kong, pero este último no se pudo utilizar para la comparación, ya que este reglamento parte de presiones de diseño, ya que se nos dice cual es la presión de diseño en cada parte de Hong Kong, sin saber cuáles son las velocidades de diseño de cada sitio específico.

En la Tabla 5.12 se pueden apreciar los tiempos de promediación, así como los coeficientes de presión. Sé puede ver que los tiempos de promediación mas usados en los diferentes reglamentos son 3 s y 600 s, en cuanto a los coeficientes de presión se puede ver que la mayoría de los reglamentos tienen un valor que entre 1.2 y 1.4.

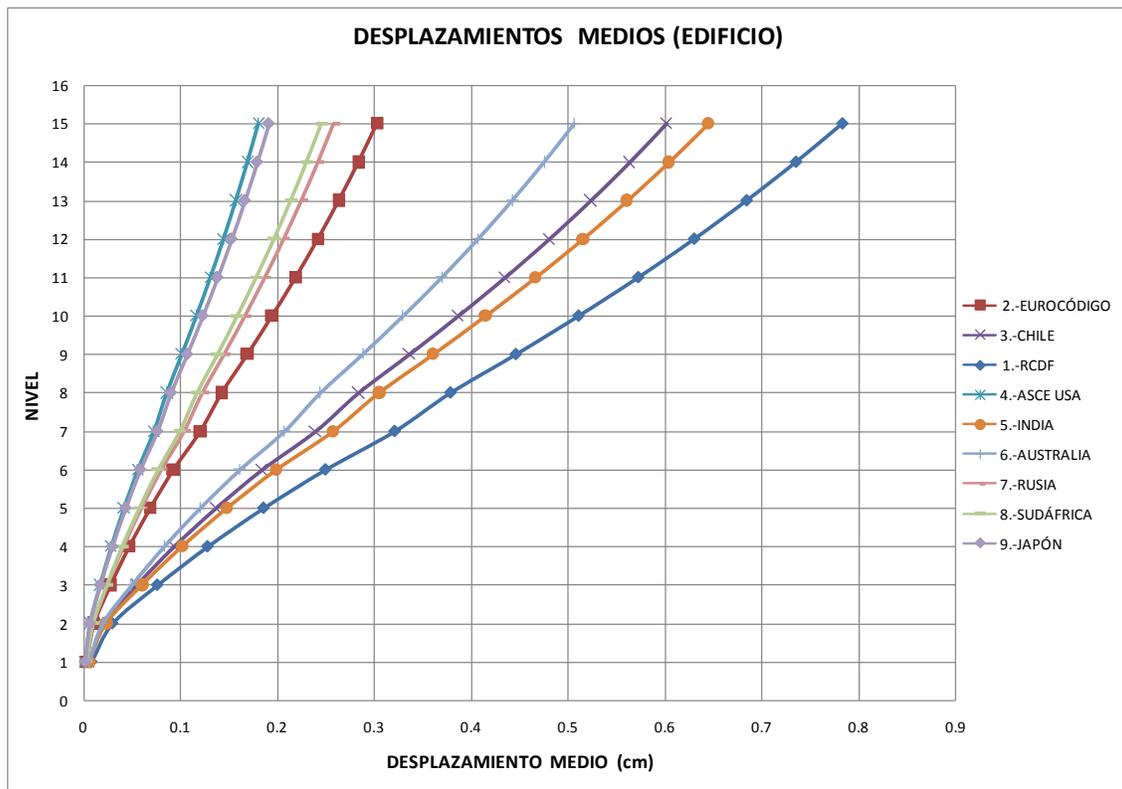


Figura 5.19: Desplazamientos medios del edificio con respecto a cada reglamento

En los resultados de los desplazamientos medios (Figura 5.19), los más pequeños fueron los del reglamento de ASCE y el reglamento de Japón, mientras que los resultados obtenidos con el RCDF mostraron los desplazamientos más grandes debido a la presión media del viento.

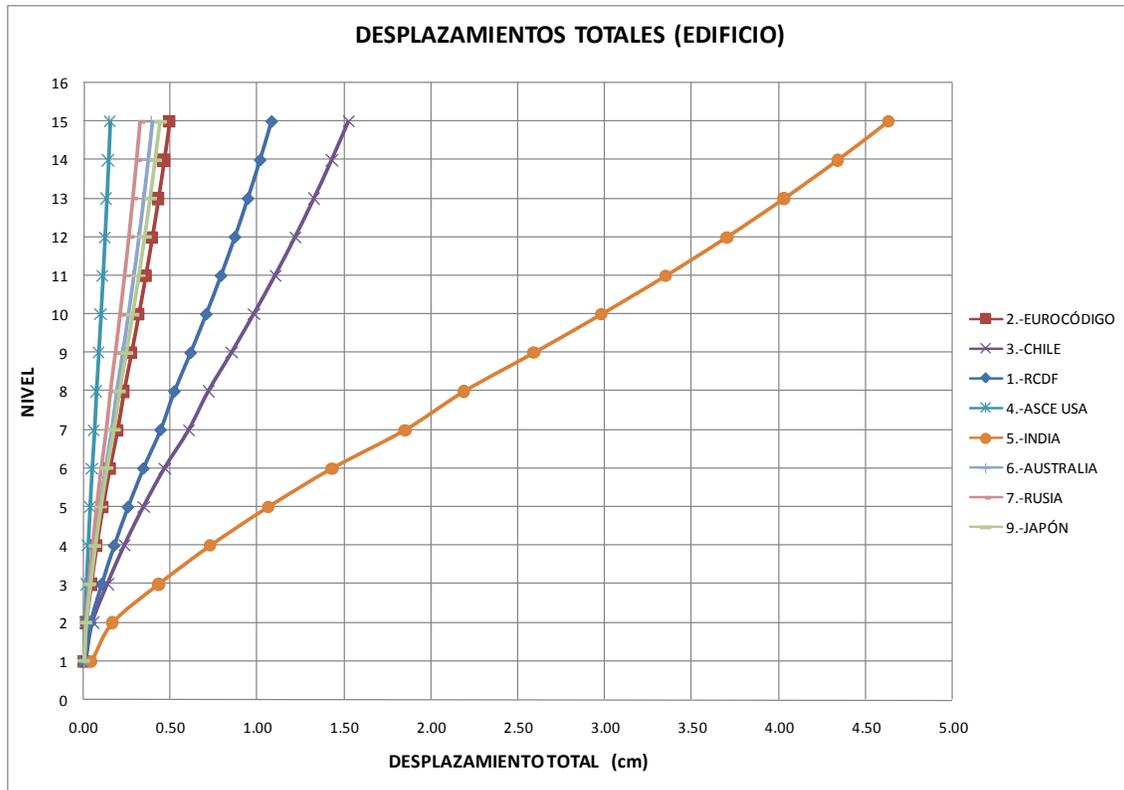


Figura 5.20: Desplazamientos totales del edificio con respecto a cada reglamento

Como se ve en la Figura 5.20 los desplazamientos máximos son aquellos que se obtuvieron con el Reglamento de la India, aunque realmente son mucho mayores que los demás. Excluyendo el Reglamento de la India, los desplazamientos máximos se obtuvieron con el Reglamento de Chile y Distrito Federal.

Con el Reglamento de ASCE USA se obtuvieron los menores desplazamientos totales. Como se aprecia en los resultados hay una gran dispersión de los mismos; y eso que se encuentran basados bajo la misma filosofía de diseño.

Algunos factores que influyen en los desplazamientos totales son:

- Se utilizan diferentes coeficientes de presión, ya sea barlovento o sotavento.
- Diferentes distribuciones de presiones con la altura.
- Diferentes niveles de amortiguamiento para la misma estructura.

5.2 CHIMENEA

5.2.1 RCDF (MÉXICO) (8)

5.2.1.1 Determinación de la velocidad de diseño

$$V_D = F_{TR} F_{\alpha} V_R$$
$$V_r = 27 \left(\frac{m}{s} \right) \text{ Tiempo de promediación (3s)}$$

5.2.1.2 Determinación de la presión de diseño

$$p_z = 0.048 C_p V_D^2$$

5.2.1.3 Factores de presión

$$C_p = 0.7$$

5.2.1.4 Empujes dinámicos paralelos al viento

El factor de amplificación dinámica se determina con la siguiente expresión:

$$G = 0.43 + g \sqrt{\frac{R}{C_e} \left(B + \frac{SF}{\beta} \right)} \geq 1$$

donde:

$$g = \left(\sqrt{2 \ln(3600v)} + \frac{0.58}{\sqrt{2 \ln(3600v)}} \right) \frac{1}{2.3} \geq 1.48 ;$$

$$v = n_o \sqrt{\frac{SF}{SF + \beta B}} ;$$

$$B = \frac{4}{3} \int_0^{914/H} \left(\frac{1}{1 + \frac{xH}{457}} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{xb}{122}} \right) \left(\frac{x}{(1+x^2)^{4/3}} \right) dx ;$$

$$S = \frac{\pi}{3} \left(\frac{1}{1 + \frac{8n_o H}{3V_H}} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{10n_o b}{V_H}} \right) ;$$

$$F = \frac{x_o^2}{(1+x_o^2)^{4/3}} ;$$

donde:

$$x_o = (1220n_o/V_H) ;$$

$$V_H = V_R\sqrt{RC_e} ;$$

G factor de amplificación dinámica;

g factor de respuesta máxima;

R factor de rugosidad;

B factor de excitación de fondo;

S factor reductivo por tamaño;

n_o frecuencia del modo fundamental de la estructura, Hz;

H altura de la estructura, m;

β fracción del amortiguamiento crítico, igual a 0.01 en estructuras de acero, y 0.02 en estructuras de concreto;

Ln logaritmo natural;

F relación de energía en ráfaga; y

C_e factor correctivo por exposición.

En la Tabla 5.13 se muestran los datos de la chimenea, así como la discretización de su masa y sus alturas de cada masa, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles de la chimenea según el RCDF. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

Tabla 5.13: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio (RCDF)

CHIMENEA RCDF												
k			$F_{TR} =$	1	T5							
relación de esbeltez=	26.7073636		$\alpha =$	0.17	R4							
Vregional(m/s)			45	(m/s)			PRESIÓN MEDIA(kg/m ²)		FUERZA(kg)		Fuerza total	Momento de Volteo
Piso	hi(m)	h entrepiso(m)	Zmax	Zmin	Área Trib.(m ²)	Vd(m/s)	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento	Ton	ton*m
1	2.7	2.7	2.7	0	1.698408	45.00	68.04		116	0	0.116	0.312011137
2	6	3.3	6	2.7	2.05491	45.00	68.04		140	0	0.140	0.838896458
4	10	4	10	6	2.4908	45.00	68.04		169	0	0.169	1.69474032
5	13	3	13	10	1.8681	46.08	71.3512475		133	0	0.133	1.732786451
6	16.8	3.8	16.8	13	2.36626	48.16	77.91976538		184	0	0.184	3.097557524
											10.478478	7.67599189

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.21, estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

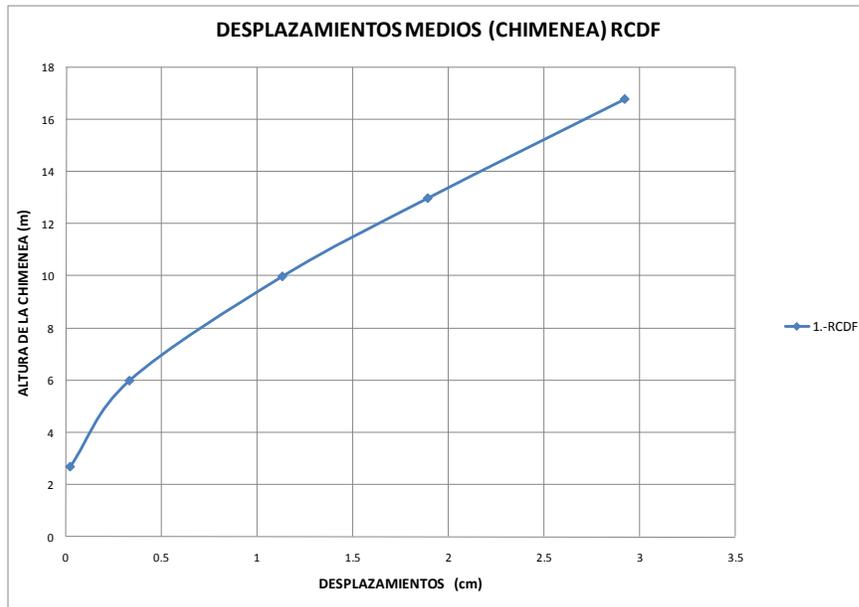


Figura 5.21: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de RCDF

Y por último para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento, el RCDF propone que se deben multiplicar los desplazamientos medios por un factor de amplificación dinámica (G), y como resultado se obtienen los desplazamientos totales debido a la acción turbulenta del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.22.

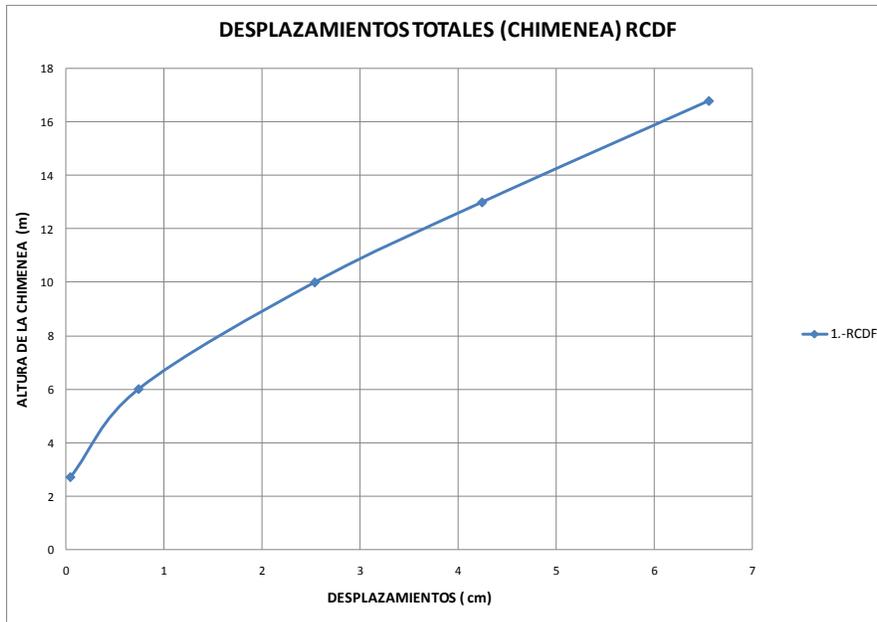


Figura 5.22: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de RCDF
 El factor de amplificación dinámica (G) calculado con el RCDF es 2.2474

5.2.2 EUROCÓDIGO (9)

5.2.2.1 Determinación de la velocidad de diseño

$$V_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot V_{b,0}$$

$$c_{season} = 1$$

$$c_{dir} = 1$$

$$V_{b,0} = 18.06 \frac{m}{s} \text{ (Tiempo de promediación 600 s)}$$

$$V_m(z) = C_r(z) \cdot C_o(z) \cdot V_b$$

La categoría de terreno es IV como se observa en la Tabla 5.14

donde:

$C_r(z)$ es el factor de rugosidad

$C_o(z)$ es el factor de orografía, tomado como 1

$$C_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ para } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$C_r(z) = c_r(z_{min}) \text{ para } z \leq z_{max}$$

donde:

z_0 es la longitud de rugosidad

k_r es el factor del terreno dependiendo de la longitud de rugosidad z_0

$$0.19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07}$$

donde:

$z_{0,II} = 0.05\text{m}$ (Categoría II del terreno) (Tabla 5.14)

z_{min} = Es la altura mínima definida en la Tabla 5.14 de las categorías y parámetros del terreno

z_{max} = Considerado igual a 200 m

z_0, z_{min} dependen de la categoría del terreno. Los valores recomendados están en la tabla de las categorías y parámetros del terreno, dependiendo de cinco categorías representativas del terreno.

Tabla 5.14: Categoría del terreno

Categoría del terreno	Zo (m)	Zmin (m)
0 Mar ó área costera expuesta a mar abierto.	0.003	1
I Lagos ó areas llanas y horizontales con insignificante vegetación y sin obstaculos.	0.01	1
II Área con baja vegetación tales como pastos y obstáculos aislados (árboles, edificios) con separaciones de al menos 20 veces la altura de los obstáculos.	0.05	2
III Área con una cobertura regular de vegetación ó edificios ó con obstáculos aislados con separaciones de un máximo de 20 veces la altura de los obstáculos (tales como son aldeas, terrenos suburbanos y bosque permanente).	0.3	5
Área en la cual al menos el 15% de la superficie está cubierta con edificios y su altura promedio no excede los 15m.	1.0	10

Las categorías del terreno son ilustradas en el Anexo A.1.

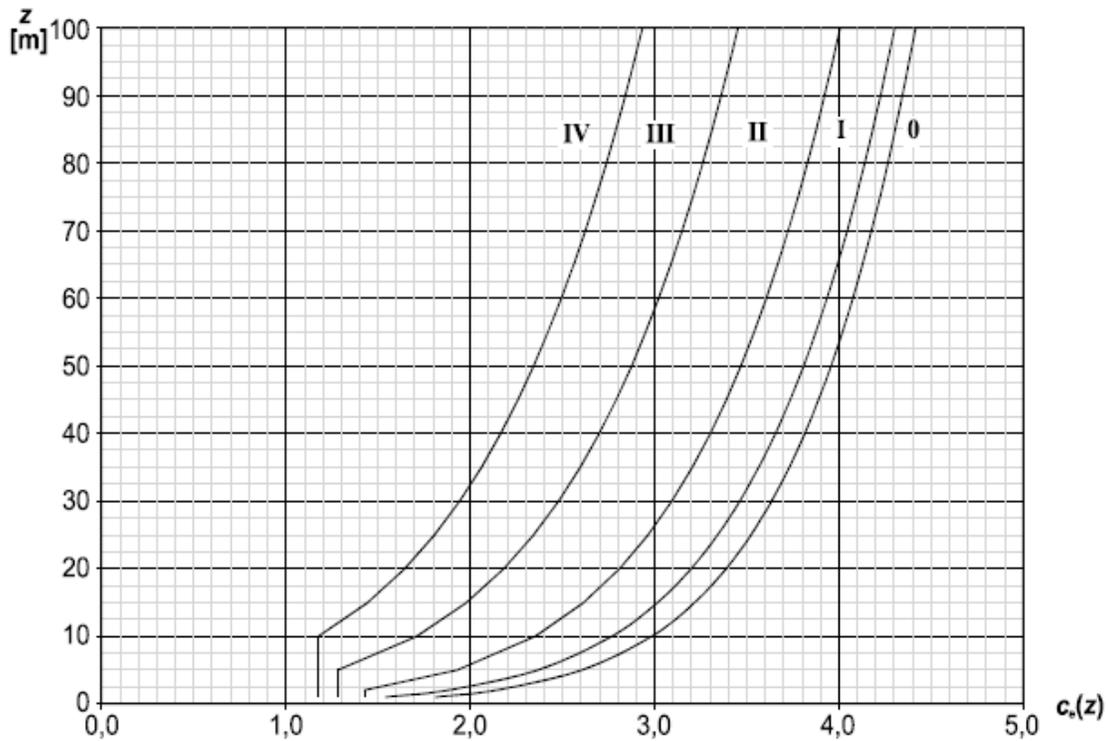


Figura 5.23: Variación de la velocidad con la altura para diferentes tipos de terreno

Nota: una de las principales diferencias con respecto al RCDF es que los la velocidad empieza a aumentar desde cero, en cambio en el RCDF los perfiles empiezan a variar desde los 10m, abajo de 10 m la velocidad es constante.

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.24 estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

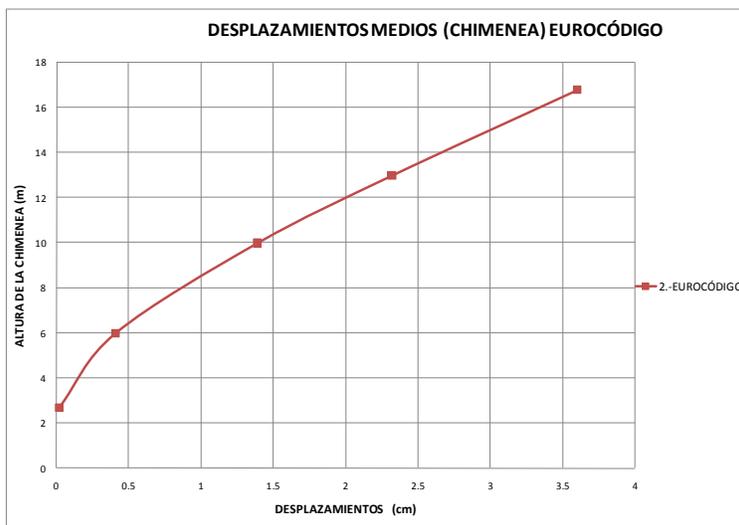


Figura 5.24: Desplazamientos medios calculados con el Eurocódigo

Y por último para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento, el Eurocódigo propone que se deben multiplicar los desplazamientos medios por un factor de amplificación dinámica ($C_s C_d$), y como resultado se obtienen los desplazamientos totales debido a la acción turbulenta del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.25.

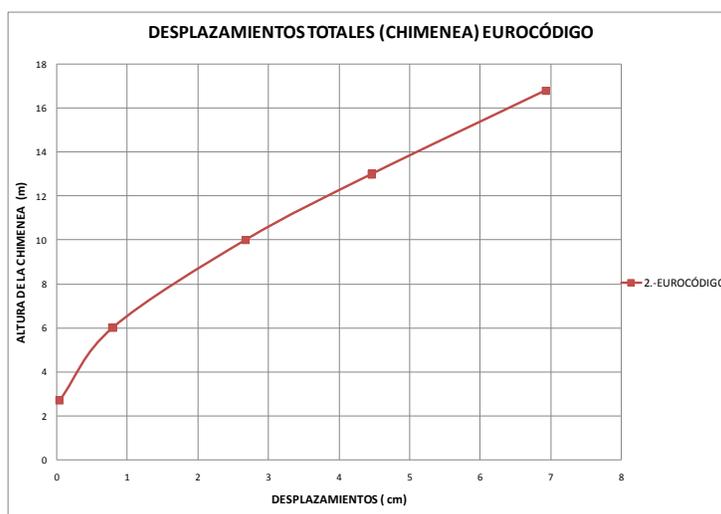


Figura 5.25: Desplazamientos totales calculados con el EURO

El factor de amplificación dinámica ($C_s C_d$) calculado con el Eurocódigo es 1.9259

5.2.3 CHILE (10)

5.2.3.1 Determinación de la velocidad de diseño.

Parte de presiones en función de una velocidad a los 10 m., y no da expresiones para hacer variar la velocidad con la altura, si no que nos da una expresión para calcular las presiones a diferentes alturas en función.

5.2.3.2 Determinación de la presión de diseño.

$$q = \frac{u^2}{16}$$

donde:

q Presión básica, $\left(\frac{kg}{m^2}\right)$

u Velocidad máxima instantánea del viento, $\left(\frac{m}{s}\right)$

Para establecer la presión a alturas distintas a la que fue medida, se puede usar la siguiente ecuación:

$$Px = Ph \left(\frac{x}{h}\right)^{2\alpha}$$

donde:

Px = es la presión a la altura x

h = es la altura a que se midió la presión Ph

α = es el coeficiente de rugosidad que se toma igual a 0.16 a campo abierto o frente al mar o en condiciones similares, y 0.28 en la ciudad o condiciones o lugares asimilables a la ciudad en cuanto a rugosidad del terreno para los efectos del viento.

5.2.3.3 Factores de presión

$C=0.7$

5.2.3.4 Empujes dinámicos paralelos al viento.

$$Pmax = R * Px$$

$$R = 1 + a * b * \sqrt{c + d}$$

$a, b, c, d =$ valores obtenidos de figuras en la norma chilena

En la Tabla 5.16 se muestran los datos de la chimenea, así como la discretización de su masa y sus alturas de cada masa, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles de la chimenea según la norma Chilena. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

Tabla 5.16: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio Chile

CHIMENEA CHILE													
k		$F_{TR} =$	1		$q_u =$	56.6262531							
relación de esbeltez=	26.7073636	$\alpha =$	0.28										
$V_{regional}(m/s)$			30.10	(m/s)			PRESIÓN MEDIA		FUERZA(kg)		Fuerza total	Momento de Volteo	
Piso	$h_i(m)$	$h_{entrepiso}(m)$	Z_{max}	Z_{min}	Área Trib.(m ²)	$V_d(m/s)$	(kg/m ²)	(kg/m ²)	Barlovento	Sotavento	Ton	ton*m	
1	2.7	2.7	2.7	0	1.698408		27.20079103		32		0.032	0.087314298	
2	6	3.3	6	2.7	2.05491		42.53853473		61		0.061	0.367134014	
3	10	4	10	6	2.4908		56.62625313		99		0.099	0.987312699	
5	13	3	13	10	1.8681		65.58825905		86		0.086	1.114981383	
6	16.8	3.8	16.8	13	2.36626		75.71658601		125		0.125	2.106981915	
					10.478478						0.403	4.663724308	

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.26, estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

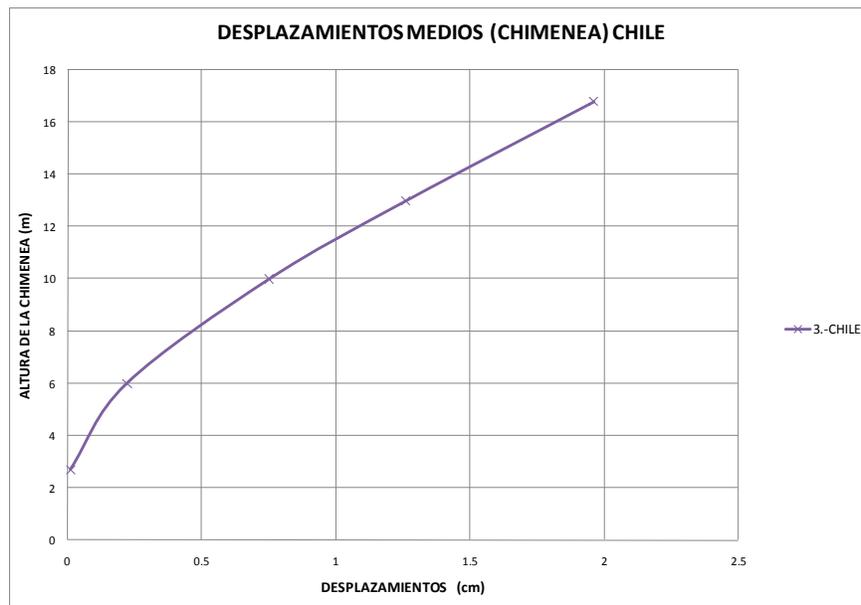


Figura 5.26: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Chile

Y por último para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento, la norma Chilena propone que se deben multiplicar los desplazamientos medios por un factor de amplificación dinámica (R), y como resultado se obtienen los desplazamientos totales debido a la acción turbulenta del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.27.

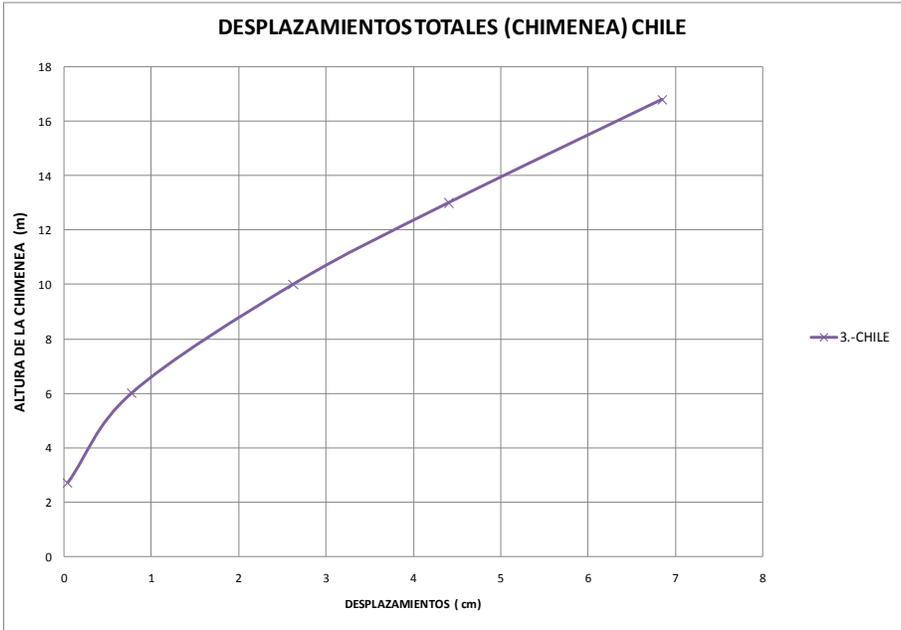


Figura 5.27: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de Chile
El factor de amplificación dinámica (R) calculados con la norma chilena es 3.4956

5.2.4 ASCE (11)

5.2.4.1 Determinación de la velocidad de diseño.

$$q = 0.00256K(IV)^2$$

donde:

q es la velocidad de presión

K coeficiente de la velocidad de presión

I factor de importancia

V velocidad básica de diseño del viento

5.2.4.2 Determinación de la presión de diseño.

$$P = q \cdot C \cdot GRF$$

donde:

P es la presión de diseño

q es la velocidad de presión

C coeficiente de fuerza

5.2.4.3 Factores de presión

Cf=0.7

5.2.4.4 Empujes dinámicos paralelos al viento.

En la Tabla 5.17 se muestran los datos de la chimenea, así como la discretización de su masa y sus alturas de cada masa, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles de la chimenea según el ASCE USA. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

Tabla 5.17: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio ACSE

CHIMENEA ASCE USA												
					exposure B							
relación de esbeltez=	26.7073636		7									
Vregional(m/s)			25.04	(m/s)	56.02874482	mph	PRESIÓN MEDIA		FUERZA(kg)		Fuerza total	Momento de Volteo
Piso	hi(m)	h entrepiso(m)	Kz	I	Área Trib.(m2)	Vd(mph)	(kg/m2)	(kg/m2)	Barlovento	Sotavento	Ton	ton*m
1	2.7	2.7	0.375	1	1.698408	56.03	14.72715804		12		0.012	0.033091833
2	6	3.3	0.4	1	2.05491	56.03	15.70896857		16		0.016	0.094904719
3	10	4	0.5	1	2.4908	56.03	19.63621071		24		0.024	0.239658381
5	13	3	0.55	1	1.8681	58.17	23.28121344		21		0.021	0.277041714
6	16.8	3.8	0.65	1	2.36626	60.34	29.60568518		34		0.034	0.576690691
					10.478478						0.108	1.221387337

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.28, estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

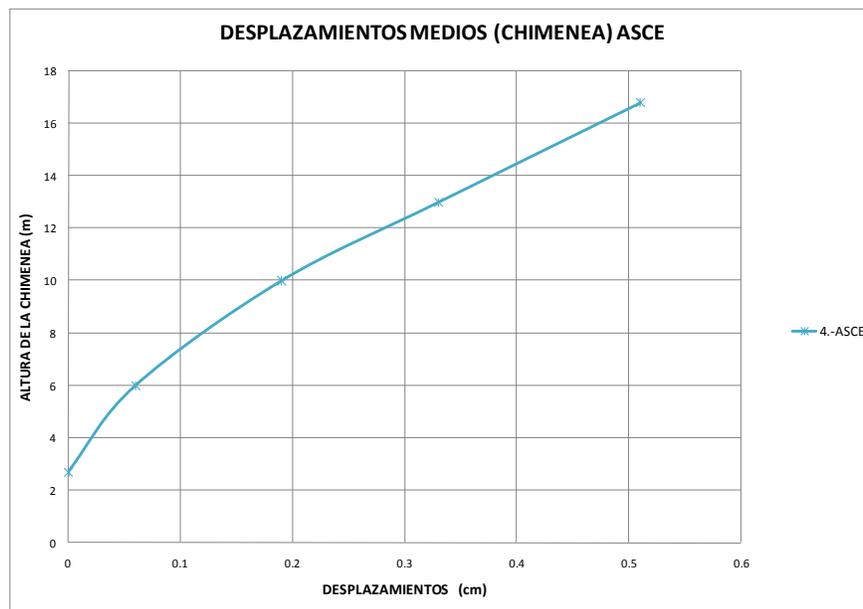


Figura 5.28: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de ASCE USA

Y por último para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento, el ASCE USA propone que se deben multiplicar los desplazamientos medios por un factor de amplificación dinámica (GRF), y como resultado se obtienen los desplazamientos totales debido a la acción turbulenta del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.29.

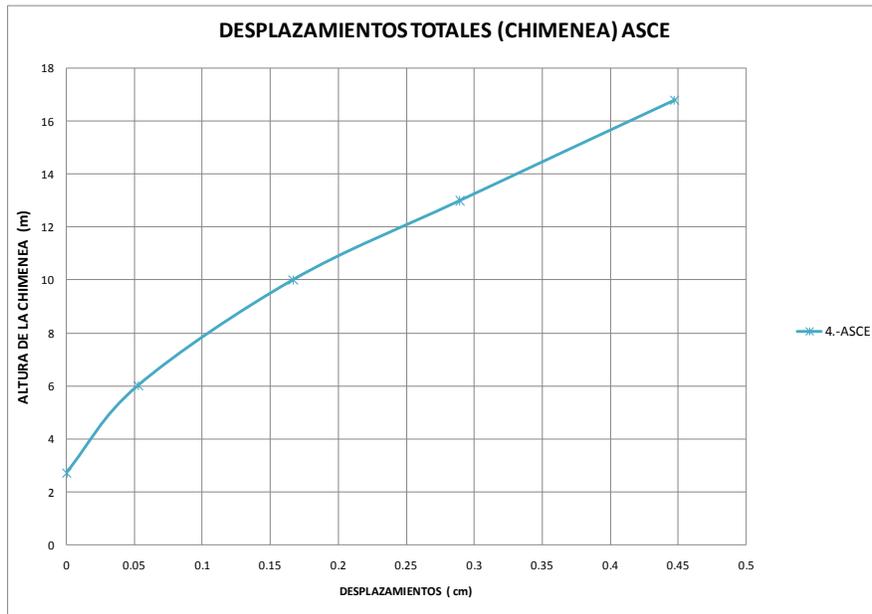


Figura 5.29: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de ASCE USA
 El factor de amplificación dinámica (GRF) calculados con la norma ASCE es 0.8775

5.2.5 INDIA (12)

5.2.5.1 Determinación de la velocidad de diseño

$$V_z = V_b k_1 k_2 k_3$$

donde:

V_z Es la velocidad del diseño el viento a cualquier altura z en m/s;

k_1 Es el factor de probabilidad (coeficiente de riesgo;

k_2 Es el factor del terreno, altura y tamaño de la estructura (Tabla 5.18: Factor del terreno, altura y tamaño de la estructura)

k_3 Es el factor de topografía

Tabla 5.18: Factor del terreno, altura y tamaño de la estructura

HEIGHT m	TERRAIN CATEGORY 1 CLASS			TERRAIN CATEGORY 2 CLASS			TERRAIN CATEGORY 3 CLASS			TERRAIN CATEGORY 4 CLASS		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
10	1.05	1.03	0.99	1.00	0.98	0.93	0.91	0.88	0.82	0.80	0.76	0.67
15	1.09	1.07	1.03	1.05	1.02	0.97	0.97	0.94	0.87	0.80	0.76	0.67
20	1.12	1.10	1.06	1.07	1.05	1.00	1.01	0.98	0.91	0.80	0.76	0.67
30	1.15	1.13	1.09	1.12	1.10	1.04	1.06	1.03	0.96	0.97	0.93	0.83
50	1.20	1.18	1.14	1.17	1.15	1.10	1.12	1.09	1.02	1.10	1.05	0.95
100	1.26	1.24	1.20	1.24	1.22	1.17	1.20	1.17	1.10	1.20	1.15	1.05
150	1.30	1.28	1.24	1.28	1.25	1.21	1.24	1.21	1.15	1.24	1.20	1.10
200	1.32	1.30	1.26	1.30	1.28	1.24	1.27	1.24	1.18	1.27	1.22	1.13
250	1.34	1.32	1.28	1.32	1.31	1.26	1.29	1.26	1.20	1.28	1.24	1.16
300	1.35	1.34	1.30	1.34	1.32	1.28	1.31	1.28	1.22	1.30	1.26	1.17
350	1.37	1.35	1.31	1.36	1.34	1.29	1.32	1.30	1.24	1.31	1.27	1.19
400	1.38	1.36	1.32	1.37	1.35	1.30	1.34	1.31	1.25	1.32	1.28	1.20
450	1.39	1.37	1.33	1.38	1.36	1.31	1.35	1.32	1.26	1.33	1.29	1.21
500	1.40	1.38	1.34	1.39	1.37	1.32	1.36	1.33	1.28	1.34	1.30	1.22

5.2.5.2 Determinación de de la presión de diseño

$$\rho_z = 0.6V_z^2$$

donde:

ρ_z Presión de diseño del viento en N/m^2 a una altura z

V_z Velocidad de diseño del viento en m/s a una altura z

5.2.5.3 Factores de presión

$$C_f=1.0$$

5.2.5.4 Empujes dinámicos paralelos al viento

$$F_z = C_f A_0 \bar{p}_z G$$

donde:

$$G = 1 + g_1 r \sqrt{\left[B(1 + \phi)^2 + \frac{SE}{\beta} \right]}$$

En la Tabla 5.19 se muestran los datos de la chimenea, así como la discretización de su masa y sus alturas de cada masa, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles de la chimenea según la norma de la India. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

Tabla 5.19: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio India

CHIMENEA INDIA													
k			$F_{TR} =$	1		exposure B							
relación de esbeltez=	26.7073636			7									
Vregional(m/s)				45.00	(m/s)	100.6836544	mph	PRESIÓN MEDIA		FUERZA(kg)		Fuerza total	Momento de Volteo
Piso	hi(m)	K_1	K_2	K_3	Área Trib.(m2)	Vd(m/s)	(kg/m2)	(kg/m2)	Barlovento	Sotavento	Ton	ton*m	
1	2.7	1	0.8	1	1.698408	36.00	79.26605505		135	0	0.135	0.363490475	
2	6	1	0.8	1	2.05491	36.00	79.26605505		163	0	0.163	0.977307655	
3	10	1	0.8	1	2.4908	36.00	79.26605505		197	0	0.197	1.974358899	
5	13	1	0.8	1	1.8681	36.00	79.26605505		148	0	0.148	1.924999927	
6	16.8	1	0.8	1	2.36626	36.00	79.26605505		188	0	0.188	3.151076803	
					10.478478						0.831	8.391233759	

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.30, estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

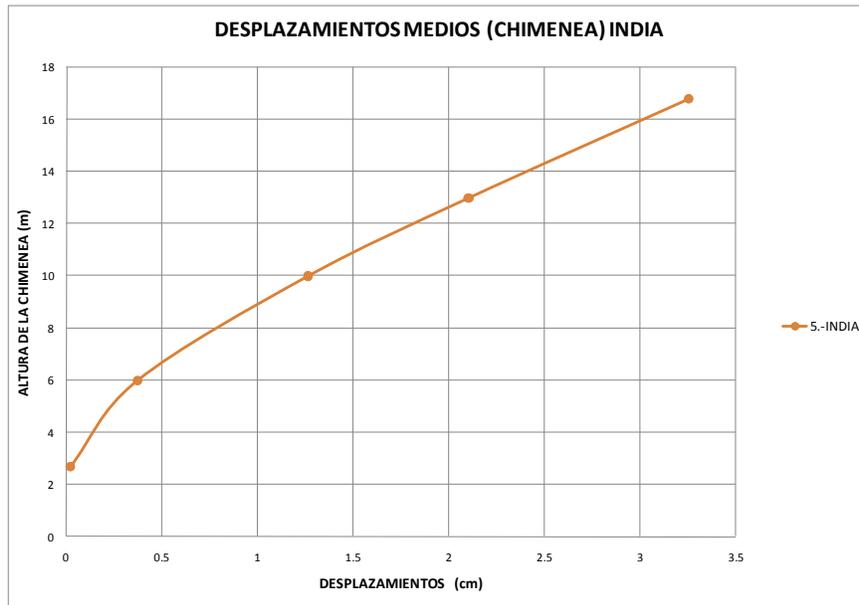


Figura 5.30: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de India

Y por último para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento, la norma de la India propone que se deben multiplicar los desplazamientos medios por un factor de amplificación dinámica (G), y como resultado se obtienen los desplazamientos totales debido a la acción turbulenta del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.31.

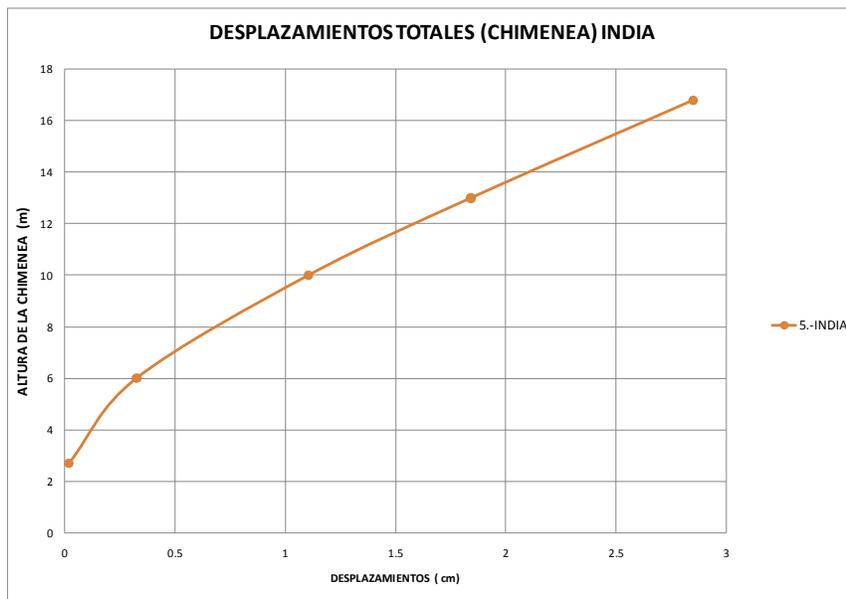


Figura 5.31: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de India

El factor de amplificación dinámica (G) calculados con la norma de la India es 7.1666.

5.2.6 AUSTRALIA (13)

5.2.6.1 Determinación de la velocidad de diseño

$$V_{des} = Mzcat * Ms * Mt$$

V_{des} = Velocidad de diseño

$Mzcat$ = Factor de corrección con la altura

Ms = Factor de protección

Mt = Factor de Topografía

5.2.6.2 Determinación de la presión de diseño

$$P = 0.5 \rho_{air} * V_{des}^2 * C_{fig}$$

ρ_{air} = Densidad del aire

C_{fig} = Factor de la forma aerodinámica

5.2.6.3 Factores de presión

$$C_{fig} = 0.85$$

5.2.6.4 Empujes dinámicos paralelos al viento

$$f = 0.5 \rho_{air} * V_{des}^2 * C_{fig} * C_{dyn}$$

f = fuerza unitaria

C_{dyn} = coeficiente dinámico

En la Tabla 5.20 se muestran los datos de la chimenea, así como la discretización de su masa y sus alturas de cada masa, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles de la chimenea según la norma australiana. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

Tabla 5.20: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio Australia

CHIMENEA AUSTRALIA												
					exposure B							
relación de esbeltez=	26.7073636		7									
Vregional(m/s)			45.00 (m/s)		100.6836544 mph							
Piso	hi(m)	Mzcat	Ms	Mt	Área Trib.(m2)	Vd(m/s)	(kg/m2)	(kg/m2)	Barlovento	Sotavento	Ton	Momento de Volteo ton*m
1	2.7	0.75	1	1	1.698408	33.75	69.66743119		101		0.101	0.271552943
2	6	0.75	1	1	2.05491	33.75	69.66743119		122		0.122	0.730117535
3	10	0.75	1	1	2.4908	33.75	69.66743119		147		0.147	1.47498492
5	13	0.75	1	1	1.8681	33.75	69.66743119		111		0.111	1.438110297
6	16.8	0.75	1	1	2.36626	33.75	69.66743119		140		0.140	2.354075932
					10.478478						0.621	6.268841627

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.32, estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

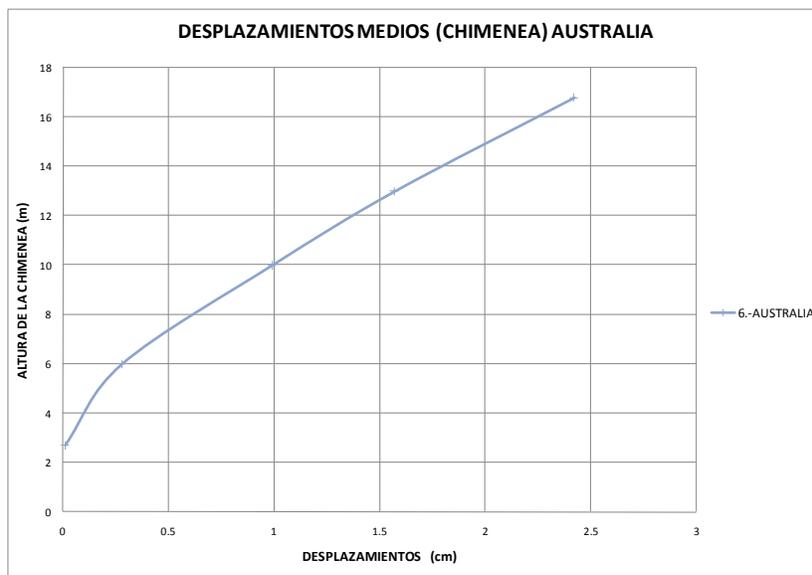


Figura 5.32: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Australia

Y por último para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento, la norma Australiana propone que se deben multiplicar los desplazamientos medios por un factor de amplificación dinámica (C_{dyn}), y como resultado se obtienen los desplazamientos totales debido a la acción turbulenta del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.33.

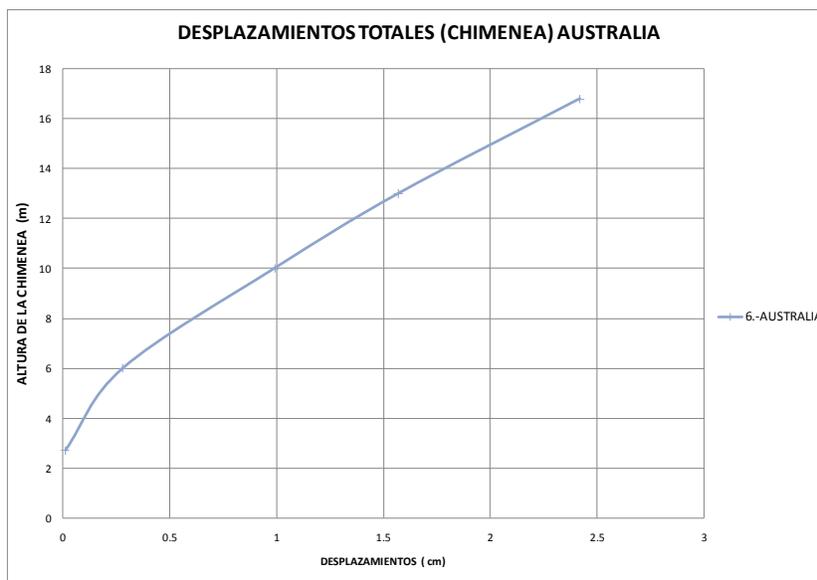


Figura 5.33: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de Australia

El factor de amplificación dinámica (C_{dyn}) calculado con la norma de Australia es < 1

5.2.7 RUSIA (14)

5.2.7.1 Determinación de la velocidad de diseño

Parte de presiones en función de una velocidad a los 10 m., y no da expresiones para hacer variar la velocidad con la altura, si no que nos da una expresión para calcular las presiones a diferentes alturas en función.

5.2.7.2 Determinación de la presión de diseño

$$w_0 = 0.61V_{10}^2, \text{ en Pa}$$

$$w_m = w_0kc$$

donde:

k es el coeficiente que toma en cuenta el cambio de presión con la altura

c es el coeficiente aerodinámico

w_0 valor específico de la presión

5.2.7.3 Factores de presión

$$Cp1 = 1$$

5.2.7.4 Empujes dinámicos paralelos al viento

Coeficiente dinámico = 1.3, el cual se obtiene de una gráfica

En la Tabla 5.21 se muestran los datos de la chimenea, así como la discretización de su masa y sus alturas de cada masa, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles de la chimenea según la norma de Rusia. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

Tabla 5.21: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio Rusia

CHIMENEA RUSIA												
relación de esbeltez=	26.7073636											
Vregional(m/s)			30.10 (m/s)		67.34655128 mph	PRESIÓN MEDIA		FUERZA(kg)		Fuerza total	Momento de Volteo	
Piso	hi(m)	wo	k		Área Trib.(m2)	Vd(m/s)	(kg/m2)	(kg/m2)	Barlovento	Sotavento	Ton	ton*m
1	2.7	56.33763818	0.4		1.698408	0.00	22.53505527		38		0.038	0.103339039
2	6	56.33763818	0.4		2.05491	0.00	22.53505527		46		0.046	0.277845063
3	10	56.33763818	0.4		2.4908	0.00	22.53505527		56		0.056	0.561303157
5	13	56.33763818	0.445		1.8681	0.00	25.07024899		47		0.047	0.608838518
6	16.8	56.33763818	0.502		2.36626	0.00	28.28149437		67		0.067	1.124278997
					10.478478						0.254	2.675604773

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.34, estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

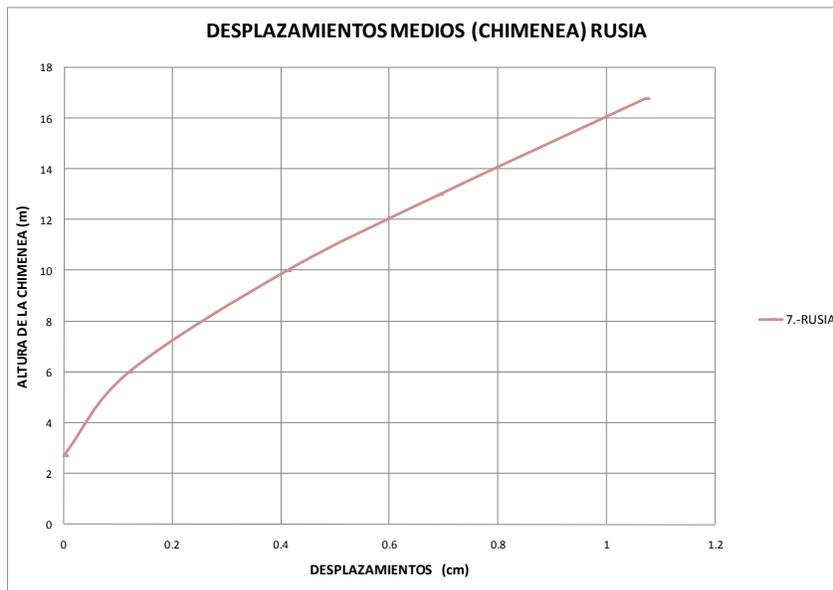


Figura 5.34: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Rusia

Y por último para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento, la norma de Rusia propone que se deben multiplicar los desplazamientos medios por un factor de amplificación dinámica (G), y como resultado se obtienen los desplazamientos totales debido a la acción turbulenta del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.35.

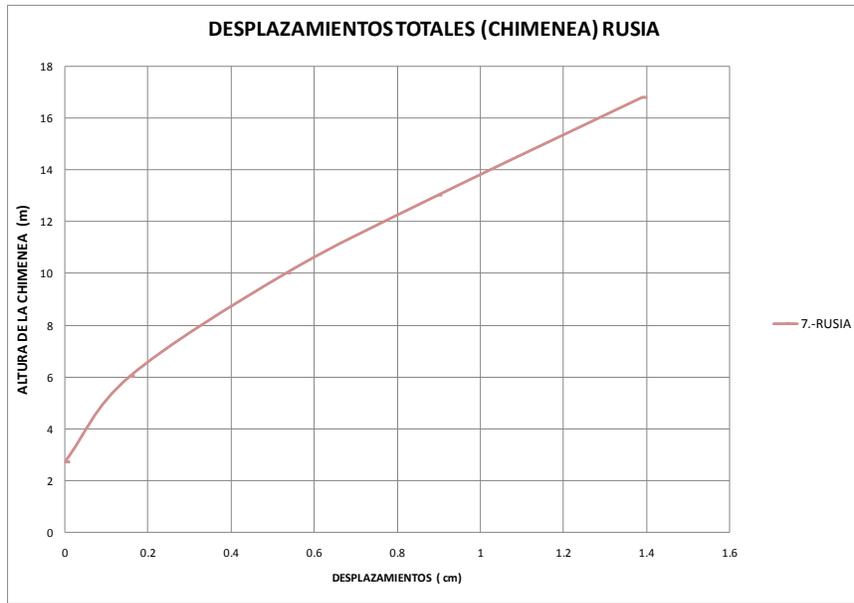


Figura 5.35: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de Rusia
El factor de amplificación dinámica (G) calculados con la norma de Rusia es 1.3

5.2.8 SUDÁFRICA (15)

5.2.8.1 Determinación de la velocidad de diseño

$$V_z = V_r k_z, \text{ en } \left(\frac{m}{s}\right)$$

5.2.8.2 Determinación de la presión de diseño

$$q_z = 0.47V_z^2, \text{ en } \left(\frac{N}{m^2}\right)$$

5.2.8.3 Factores de presión

$$C_f = 1.0$$

5.2.8.4 Empujes dinámicos paralelos al viento

Este reglamento no considera expresiones para calcular los efectos dinámicos, pero recomienda que debe tomarse esto en cuenta para el diseño de las estructuras, y da referencias sobre algunas publicaciones aplicables a los efectos dinámicos.

En la Tabla 5.22 se muestran los datos de la chimenea, así como la discretización de su masa y sus alturas de cada masa, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles de la chimenea según la norma de Sudáfrica. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

Tabla 5.22: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio Sudáfrica

CHIMENEA SUDÁFRICA												
relación de esbeltez=	26.7073636											
Vregional(m/s)			45.00 (m/s)		100.6836544 mph	PRESIÓN MEDIA		FUERZA(kg)		Fuerza total	Momento de Volteo	
Piso	hi(m)	wo	Kz	Área Trib.(m2)	Vd(m/s)	(kg/m2)	(kg/m2)	Barlovento	Sotavento	Ton	ton*m	
1	2.7		0.62	1.698408	27.90	37.29385321		63		0.063	0.171018482	
2	6		0.62	2.05491	27.90	37.29385321		77		0.077	0.459813071	
3	10		0.62	2.4908	27.90	37.29385321		93		0.093	0.928915296	
5	13		0.62	1.8681	27.90	37.29385321		70		0.070	0.905692413	
6	16.8		0.62	2.36626	27.90	37.29385321		88		0.088	1.482548812	
				10.478478						0.391	3.947988075	

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.36, estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

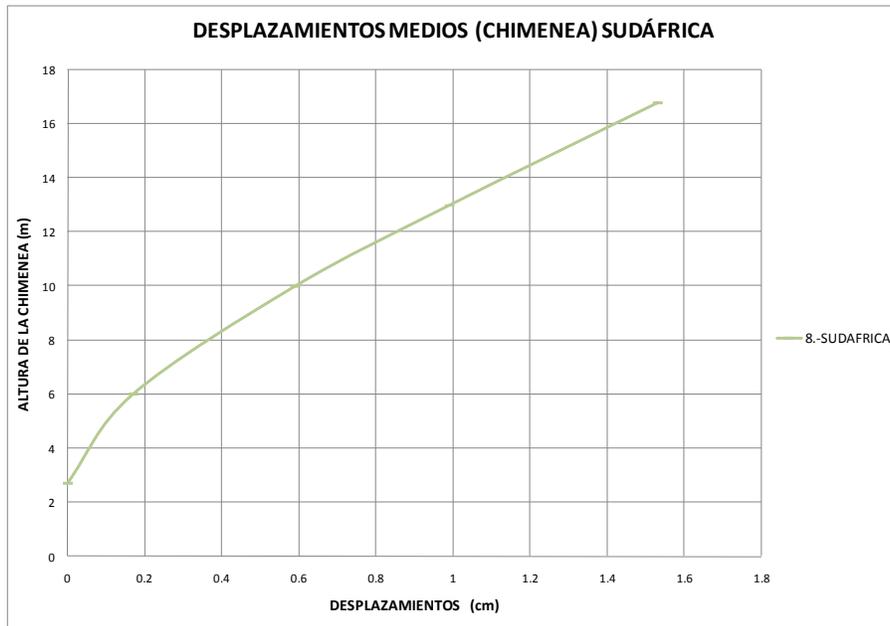


Figura 5.36: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Sudáfrica

5.2.9 JAPÓN (16)

5.2.9.1 Determinación de la velocidad de diseño

$$V_z = V_0, \text{ en } \left(\frac{m}{s}\right)$$

5.2.9.2 Determinación de la presión de diseño

$$q_z = 0.6EV_0^2, \text{ en } \left(\frac{kg}{m^2}\right)$$

$$E = Er^2$$

$$Er = 1.7 \left(\frac{H}{Z_G}\right)^\alpha$$

$Z_G =$ altura Gradiente(450 m para terreno III)

$H =$ altura

$\alpha = 0.2$ (terreno III)

5.2.9.3 Factor de presión

$$C_f = 0.9$$

5.2.9.4 Empujes dinámicos paralelos al viento

$$G_f = 2.41$$

En la Tabla 5.23 se muestran los datos de la chimenea, así como la discretización de su masa y sus alturas de cada masa, áreas tributarias, así como el cálculo de las velocidades de diseño en los diferentes niveles de la chimenea según la norma de Japón. Las velocidades sirvieron para calcular las fuerzas sobre las masas de cada nivel.

Tabla 5.23: Cálculo de las fuerzas debidas al viento medio Japón

CHIMENEA JAPÓN												
relación de esbeltez=	26.7073636											
Vregional(m/s)			30.10 (m/s)				PRESIÓN MEDIA		FUERZA(kg)		Fuerza total	Momento de Volteo
Piso	hi(m)	wo	Kz		Área Trib.(m2)	Er	(kg/m2)	(kg/m2)	Barlovento	Sotavento	Ton	ton*m
1	2.7		0.62		1.698408	0.61	20.69085297		32		0.032	0.08539387
2	6		0.62		2.05491	0.72	28.47694452		53		0.053	0.315994813
3	10		0.62		2.4908	0.79	34.9327591		78		0.078	0.783094647
5	13		0.62		1.8681	0.84	38.79807961		65		0.065	0.848000702
6	16.8		0.62		2.36626	0.88	42.98892663		92		0.092	1.53805142
					10.478478						0.319	3.570535453

Después de haber obtenido las fuerzas sobre cada nivel, se hizo un análisis elástico lineal para obtener los desplazamientos medios, los cuales se muestran en la Figura 5.37, estos desplazamientos medios son los que se esperan debido a la presión del viento medio.

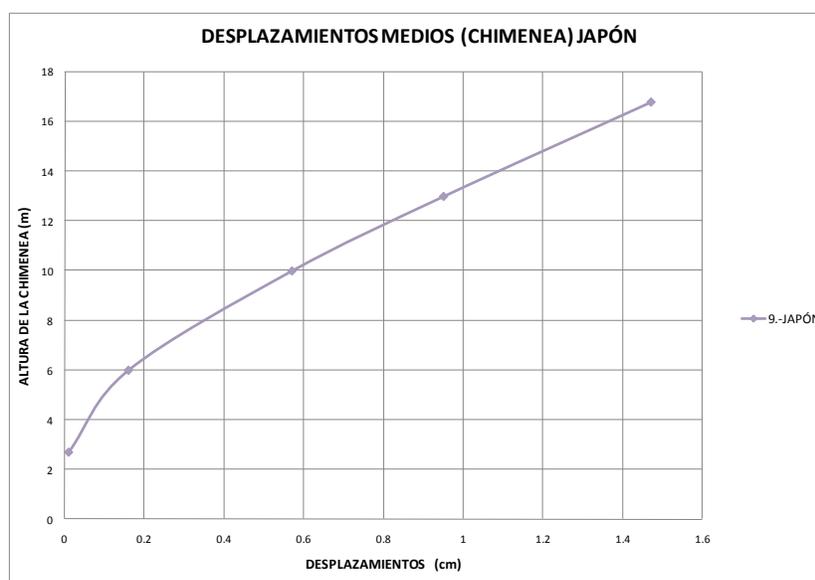


Figura 5.37: Desplazamientos medios calculados con el reglamento de Japón

Y por último para evaluar el efecto dinámico en la dirección del viento, la norma de Japón propone que se deben multiplicar los desplazamientos medios por un factor de amplificación dinámica (G), y como resultado se obtienen los desplazamientos totales debido a la acción turbulenta del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.38.

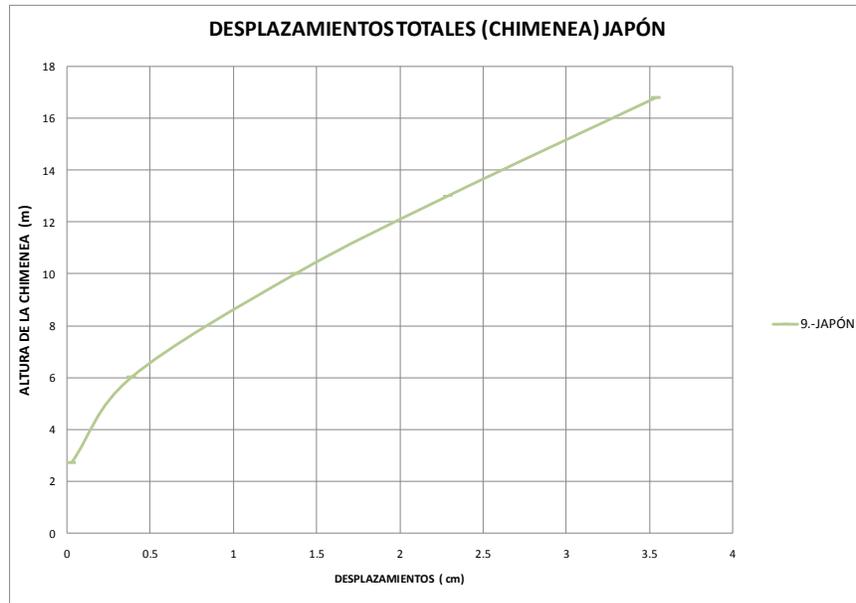


Figura 5.38: Desplazamientos totales calculados con el reglamento de Japón
 El factor de amplificación dinámica (G) calculados con la norma de Japón es 2.3

Tabla 5.24: Tabla comparativa de los diferentes aspectos que toma cada reglamento

CHIMENEA					
CÓDIGO		VELOCIDAD DE DISEÑO (VIENTO MEDIO)		C _{presion}	F. A. DINÁMICA
		t(PROMEDIACIÓN)	V _r (m/s)		
#		s			(G)
1	RCDF	3	45.00	0.7	1.379946882
2	EUROCODE	600	30.10	1.1	1.625197471
3	CHILE	600	30.10	0.7	3.495604924
4	ASCE	3600	25.04	0.7	0.877507342
5	INDIA	3	45.00	1	7.166601966
6	AUSTRALIA	3	45.00	0.85	< 1
7	RUSSIA	600	30.10	1	1.3
8	SUDAFRICA	3	45.00	1	NO DA EXPRESIONES
9	JAPÓN	600	30.10	0.9	2.409333333

Igualmente para la chimenea se realizó la comparación de 10 reglamentos, los nueve que se muestran en la Tabla 5.24 mas el de Hong Kong, pero este último no se pudo utilizar para la comparación, ya que este reglamento parte de presiones de diseño, ya que se nos dice cual es la presión de diseño en cada parte de Hong Kong, sin saber cuáles son las velocidades de diseño de cada sitio específico.

En la Tabla 5.24 se pueden apreciar los tiempos de promediación, así como los coeficientes de presión, se puede ver que los tiempos de promediación mas usados en los diferentes reglamentos son 3 s y 600 s, en cuanto a los coeficientes de presión se puede ver que la mayoría de los reglamentos tienen un valor que entre 0.7 Y 1.

En cuanto a los factores de amplificación dinámica se puede ver que existe una gran dispersión en los valores, en teoría uno se esperaría que entre mayor es el tiempo de promediación, mayor seria en factor de amplificación dinámica, algunos reglamentos si concuerdan con esto último.

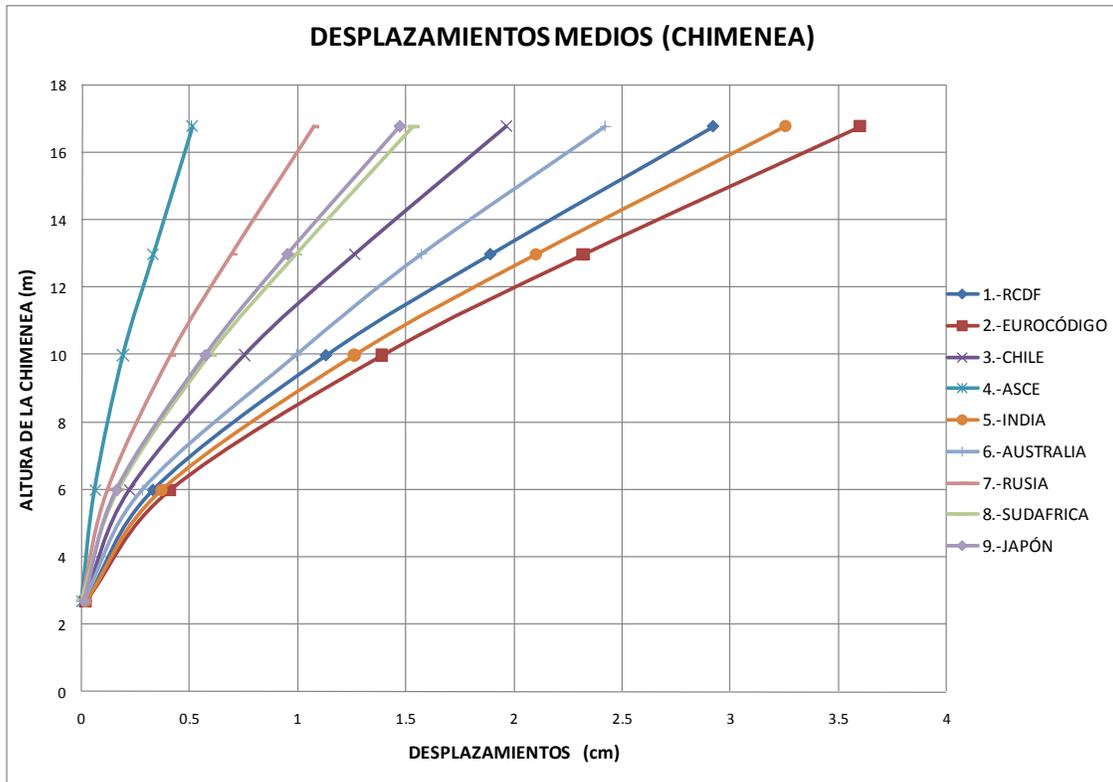


Figura 5.39: Desplazamientos medios de la chimenea con respecto a todos los reglamentos

En los resultados de los desplazamientos medios (Figura 5.39), los más pequeños fueron los del reglamento de ASCE, mientras que los resultados obtenidos con el Eurocódigo mostraron los desplazamientos más grandes debido a la presión media del viento.

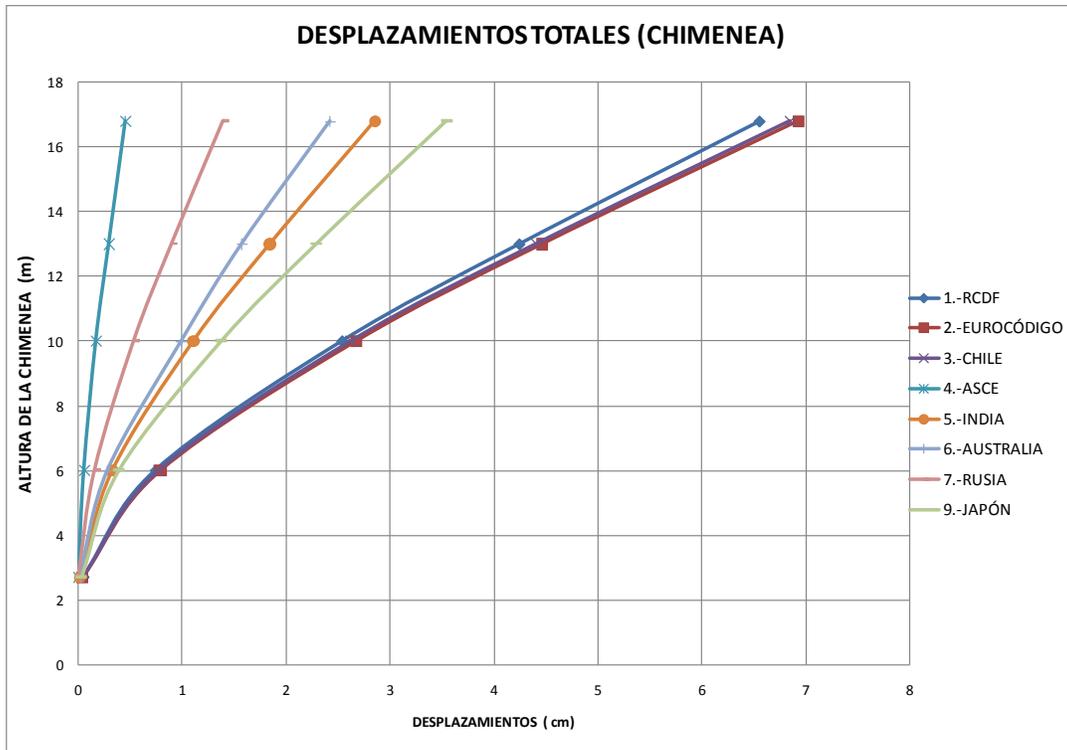


Figura 5.40: Desplazamientos totales de la chimenea con respecto a todos los reglamentos

Como se ve en la Figura 5.40 los desplazamientos máximos son aquellos que se obtuvieron con los Reglamentos de México, Chile y el Eurocódigo.

Con el Reglamento de ASCE (USA) se obtuvieron los menores desplazamientos totales. Como se aprecia en los resultados hay una gran dispersión de los mismos; y eso que se encuentran basados bajo la misma filosofía de diseño.

CAPÍTULO 6

6 RESULTADOS DE MEDICIONES DE ESTRUCTURAS FLEXIBLES

En la actualidad con los avances en el uso de innovadores sistemas estructurales y de alta resistencia, materiales ligeros, permiten hoy en día estructuras más flexibles. Como consecuencia de ello, la sensibilidad de edificios altos debidos a excitación dinámica por el viento ha aumentado. Esto ha dado lugar a un mayor énfasis en la comprensión del comportamiento estructural de los modernos edificios altos, ante la existencia de las fuertes acciones de viento.

Aunque ha habido muchos avances en el túnel de viento, pruebas numéricas, técnicas de simulación para la investigación de los efectos del viento sobre los edificios y estructuras, todavía existen muchos fenómenos críticos que sólo pueden investigarse por completo con experimentos a escala, por eso en China se llevaron a cabo los estudios de dos edificios altos.

Los edificios estudiados fueron CITIC Plaza Torre (CPT), de 391m de altura y 80 pisos y Di Wang Torre (TPM), de 384m de altura y 78 pisos (17)se encuentran en Shenzhen y Guangzhou, respectivamente (Figura 6.1). Las relaciones de aspecto altura-ancho de la CPT y TPM son alrededor de 7 y 9, respectivamente, que han superado los criterios pertinentes establecidos en el actual diseño de los códigos y las normas en China (GB50009-2001, 2002). Guangzhou y Shenzhen situado en el sureste de la región costera de China es una de las regiones más gravemente afectadas por los tifones en el mundo. Por lo tanto, estos edificios altos pueden ser sometidos a grandes fuerzas de viento inducidos por los tifones.

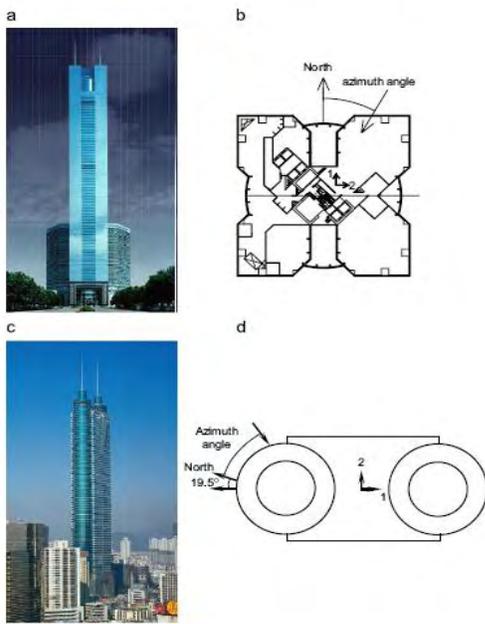


Figura 6.1: Fotografías de los dos edificios instrumentados y las selecciones de las direcciones 1 2 de cada edificio:(a) fotografía del edificio CITIC ,(b) sección transversal y localización de los acelerómetros(marcados por 1 y 2),(c) fotografía del edificio

Todos estos factores obligaron a hacer un estudio detallado de los efectos del viento sobre los edificios altos. Con el fin de investigar las características del viento generadas por los tifones, a fin de determinar las propiedades dinámicas de las estructuras, para evaluar el desempeño de los altos edificios sometidos a fuertes vientos, así como a proporcionar los datos de medición sobre el terreno para la validación de los resultados de pruebas de túnel de viento.

Estos resultados experimentales se utilizaron para verificar la fiabilidad de las pruebas de túnel de viento y técnicas para perfeccionar los modelos numéricos para análisis estructural. La comparación de las pruebas a escala real y los resultados de la prueba en túnel de viento son importantes, ya que pueden ayudar en la evaluación de la exactitud de los resultados de las pruebas de modelos y la adecuación de las técnicas utilizadas en las pruebas de túnel de viento.

Uno de los resultados que se obtuvieron de este estudio:

1. El coeficiente de amortiguamiento aumenta cuando la amplitud de la vibración aumenta, la curva ajustada tiende a la del modelo eológico de Burgers modificado (ver Figura 6.2, Figura 6.3, Figura 6.4, Figura 6.5), en el intervalo de velocidades estudiadas.

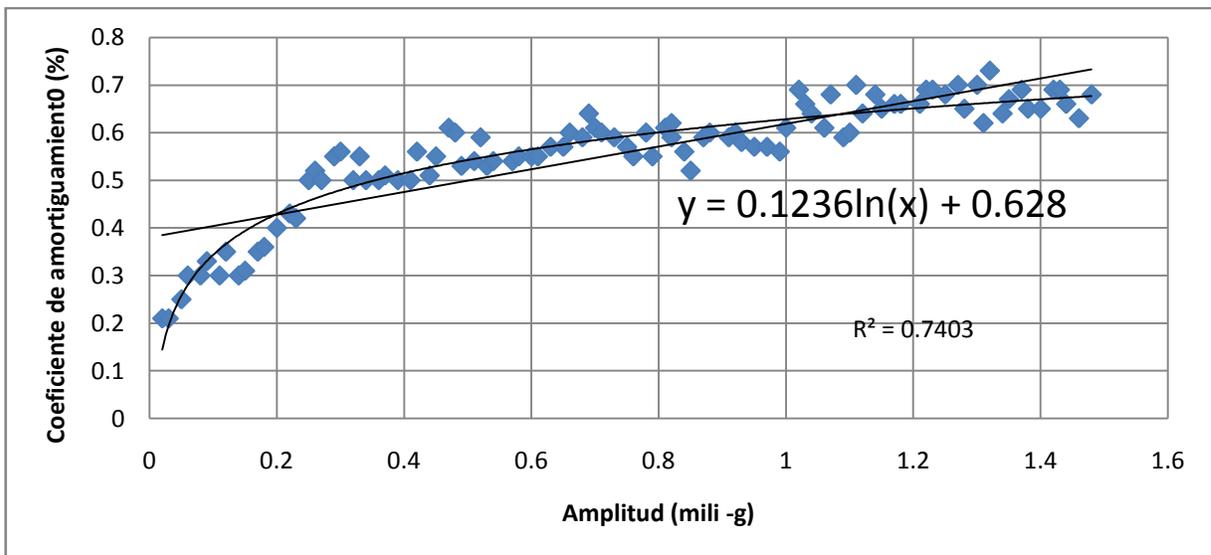


Figura 6.2: Variación del coeficiente de amortiguamiento con la amplitud de la vibración (Edificio Dwt)- dirección 1

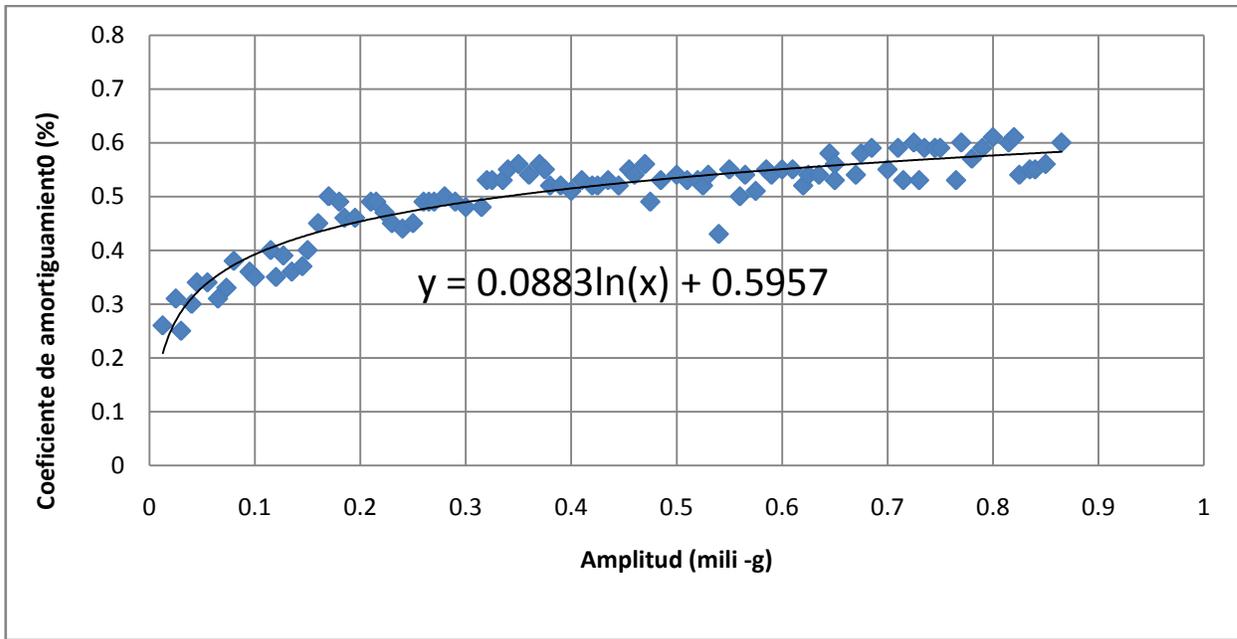


Figura 6.3: Variación del coeficiente de amortiguamiento con la amplitud de la vibración (Edificio Dwt)- dirección 2

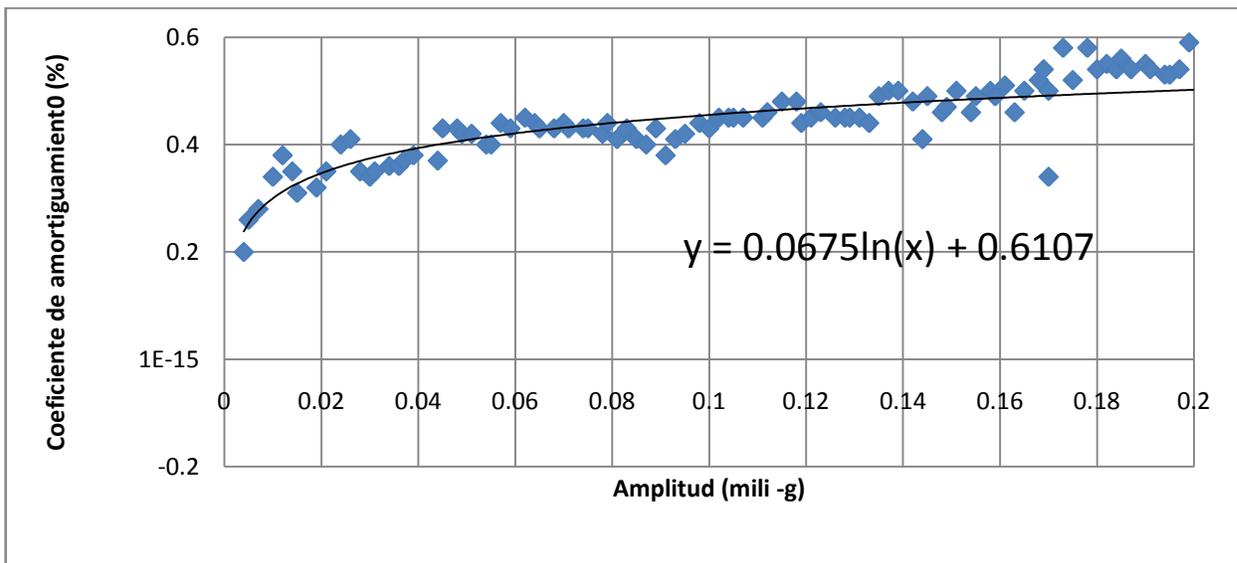


Figura 6.4: Variación del coeficiente de amortiguamiento con la amplitud de la vibración (Edificio Cpt)- dirección 1

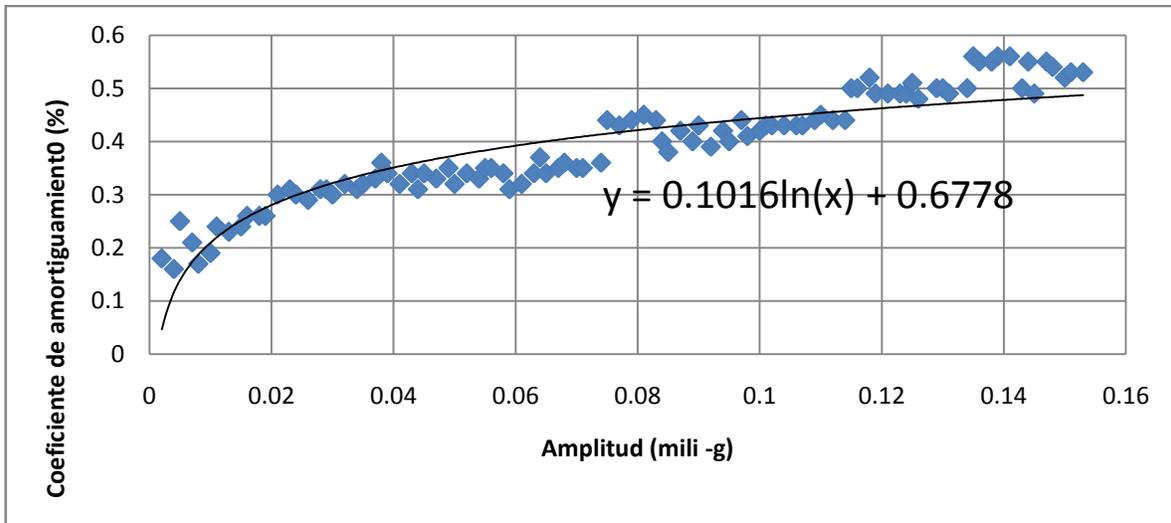


Figura 6.5: Variación del coeficiente de amortiguamiento con la amplitud de la vibración (Edificio Cpt)- dirección 2

2. La curvas de aceleración de la respuesta ajustada de los datos medidos, corresponde con las pruebas de túnel de viento, la conclusión de estas pruebas es que se puede ver que al aumentar la velocidad del viento aumenta la aceleración en el último nivel del edificio (ver Figura 6.6 y Figura 6.7) y sobre todo, lo más importante, es que se puede ver que lo medido a escala real es muy similar a los resultados de las pruebas de túnel de viento; el error varía entre 7 y 15 % (ver Tabla 6.1 y Tabla 6.2).

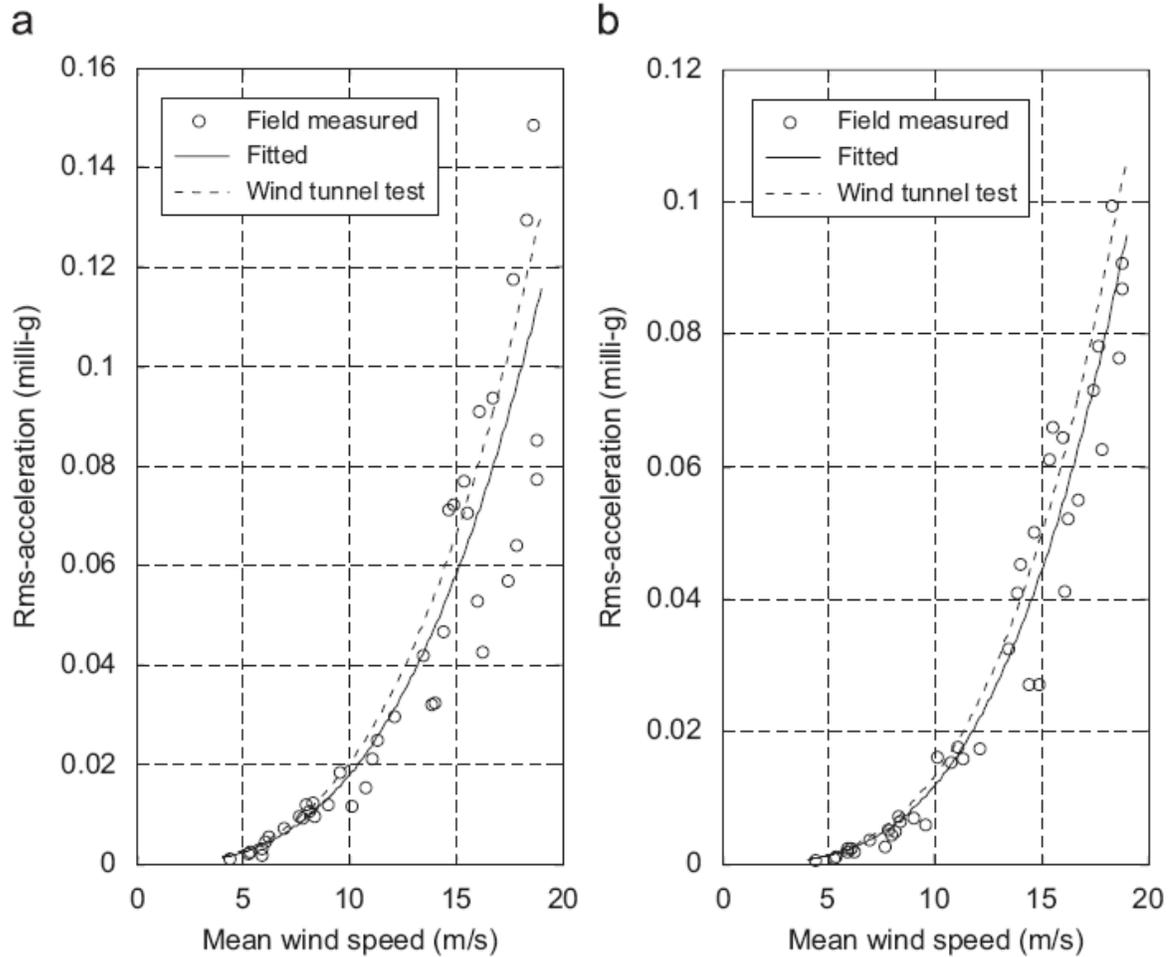


Figura 6.6: Relación entre la velocidad del viento y la aceleración de la respuesta comparada con las pruebas de túnel de viento (Edificio CPT) : (a) dirección 1, (b) dirección 2.

Tabla 6.1: Comparación de la velocidad y la aceleración de la respuesta (Edificio CPT)

COMPARACIÓN DE LA VELOCIDAD Y LA ACELERACIÓN DE LA RESPUESTA (EDIFICIO CPT)							
DIRECCIÓN 1				DIRECCIÓN 2			
V(m/s)	Ajustada	Túnel de Viento	ERROR (%)	V(m/s)	Ajustada	Túnel de Viento	ERROR (%)
10	0.055	0.063	12.70	10	0.025	0.027	7.41
15	0.2	0.237	15.61	15	0.107	0.119	10.08
20	0.525	0.6	12.50	20	0.3125	0.35	10.71

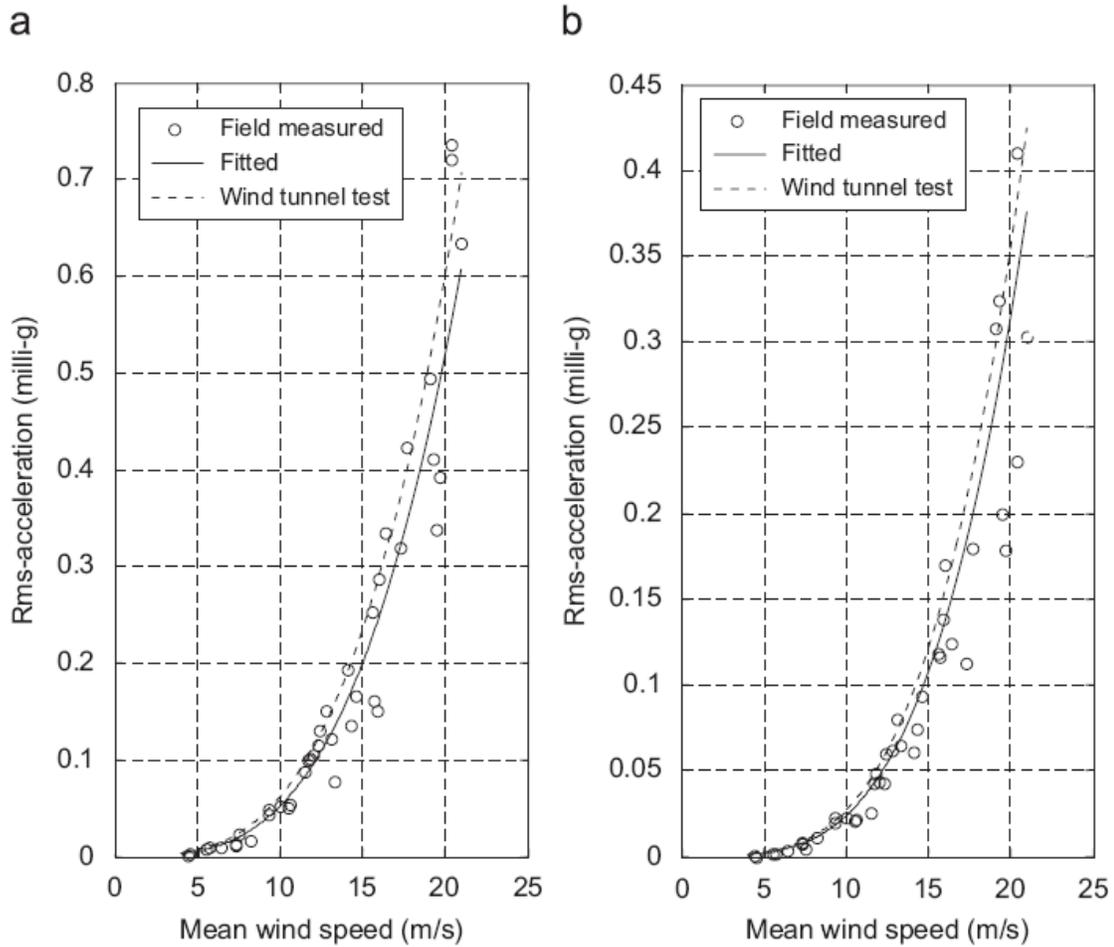


Figura 6.7: Relación entre la velocidad del viento y la aceleración de la respuesta y comparada con las pruebas de túnel de viento (Edificio DWT) : (a) dirección 1, (b) dirección 2.

Tabla 6.2: Comparación de la velocidad y la aceleración de la respuesta (Edificio DWT)

COMPARACIÓN DE LA VELOCIDAD Y LA ACELERACIÓN DE LA RESPUESTA (EDIFICIO DWT)							
DIRECCIÓN 1				DIRECCIÓN 2			
V(m/s)	Ajustada	Túnel de Viento	ERROR (%)	V(m/s)	Ajustada	Túnel de Viento	ERROR (%)
10	0.0185	0.02	7.50	10	0.012	0.0135	11.11
15	0.0585	0.065	10.00	15	0.045	0.051	11.76
17.5	0.09	0.103	12.62	17.5	0.074	0.084	11.90

3. En cuanto a las frecuencias naturales se aprecia una notable diferencia en cuanto a las frecuencias medidas con las calculadas (Tabla 6.3); en el artículo no se explican las diferencias existentes, uno de los factores entre lo medido y lo calculado puede ser el nivel de excitación, es decir, que en el momento de hacer las pruebas para determinar las frecuencias, los elementos no estructurales aporten rigidez y por lo tanto las frecuencias registradas sean mayores a las calculados; otro factor importante sería la interacción suelo estructura, si es que existe ; no se menciona nada en el artículo.

Tabla 6.3: Comparación de frecuencias

Edificio	Modo	Medido(Hz)	Calculado(Hz)	Diferencia (%)	
CPT	1st	0.171	0.124	27.49	Dirección 1
	2nd	0.171	0.124	27.49	Dirección 2
	3rd	0.371	0.273	26.42	Torsión
DWT	1st	0.173	0.168	2.89	Dirección 1
	2nd	0.208	0.181	12.98	Dirección 2
	3rd	0.293	0.286	2.39	Torsión

CAPÍTULO 7

7 PERIODOS DE LAS ESTRUCTURAS SENSIBLES A LA ACCIÓN DEL VIENTO TURBULENTO

En la actualidad los avances recientes en los materiales han hecho que las estructuras sean más flexibles y por lo tanto el periodo aumente o lo que es lo mismo la frecuencia sea menor comparado con otras estructuras hechas en años pasados.

Los requerimientos arquitectónicos ó de uso son los que determinan la forma y dimensiones de las estructuras, como se mencionó en el párrafo anterior algunas estructuras son susceptibles a la acción del viento turbulento, por lo que es muy importante considerar esta característica durante la etapa de diseño.

El viento turbulento ha mostrado que las construcciones esbeltas pueden alcanzar grandes desplazamientos. Para determinar si una estructura o parte de ella es susceptible a las fuerzas provocadas por la presión del viento es necesario conocer las características dinámicas de la estructura en estudio. El periodo fundamental de vibración es el parámetro que permite conocer el grado de importancia que tendrá el efecto del viento turbulento en la respuesta, por lo que durante la etapa de diseño es de vital importancia determinar lo mejor posible el periodo de vibración.

En general los reglamentos establecen criterios de diseño para estructuras con $T < 1$ s. (para su diseño es suficiente con el viento medio). También los reglamentos establecen criterios particulares para construcciones donde la turbulencia del viento puede ocasionar desplazamientos excesivos. Por ejemplo las normas de la Comisión Federal de Electricidad indican, que las estructuras con relación de esbeltez en planta de 5 como máximo y periodo fundamental de vibración mayor a un segundo (18), requieren la revisión del efecto del viento turbulento. Esta revisión consiste en calcular la respuesta dinámica del sistema a partir del factor de amplificación dinámica (G) el cual es un criterio adoptado del reglamento NBC (CANADA).

Para construcciones con problemas aeroelásticos ó con formas raras (cubiertas colgantes, cables, líneas de transmisión, tuberías colgantes) se recomiendan estudios más detallados en un túnel de viento.

7.1 AMORTIGUAMIENTO

Las estructuras poseen un mecanismo interno mediante el cual se disipa energía. Este mecanismo puede no ser suficiente para evitar deformaciones excesivas. Las juntas (uniones) proveen amortiguamiento adicional por fricción. Los tabiques y ventanas contribuyen también, pero, por el contrario, se someten a esfuerzos y pueden sufrir daños.

Las componentes del amortiguamiento son:

- amortiguamiento estructural (incluida fricción interna)
- amortiguamiento producido por deformaciones elásticas del subsuelo
- amortiguamiento aerodinámico
- amortiguamiento por deformación de elementos estructurales (mecanismos)

La estimación de este parámetro es muy importante para fines de diseño ya que es un factor muy importante en la respuesta del edificio, en la actualidad se puede estimar el coeficiente de amortiguamiento para edificios menores de 40 pisos con cierta precisión, pero el coeficiente de amortiguamiento para edificios muy altos (mayores a 40 pisos) es difícil de estimar, debido a los escasos datos para este tipo de edificios. Una manera de determinar los coeficientes de amortiguamiento sería con pruebas de vibración ambiental, y análisis espectral, método ampliamente aceptado para evaluar los coeficientes de amortiguamiento de los edificios.

7.2 IMPORTANCIA DEL FACTOR DE PROMEDIACIÓN EN EL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DINÁMICA

Se ha encontrado que para diversos valores de promediación se obtienen diversas velocidades medias, diversos índices de turbulencia y diversos valores de α , el cual es dependiente del intervalo de promediación que se seleccione para definir a la velocidad media.

Para evitar incertidumbres sobre la amplitud de los intervalos de promediación de la velocidad media, las normas de diversos países fijan cual es el intervalo de promediación que se debe usar. En este trabajo para evitar incertidumbres sobre las amplitudes de la velocidad media se recurrió a la expresión del Profesor Mckey (1), con la cual se pueden obtener las velocidades medias correspondientes a cada intervalo de promediación.

Para los ejemplos mostrados (edificio y la chimenea) las velocidades de diseño se muestran en la Tabla 7.1 :

Tabla 7.1: Velocidades regionales para el edificio y la chimenea, para diferentes intervalos de promediación

CÁLCULO DE VELOCIDADES REGIONALES O BÁSICAS PARA DIFERENTES INTERVALOS DE PROMEDIACIÓN(m/s),CALCULADAS CON LA EXPRESIÓN DE McKEY									
t promediación (s)	3600	600	300	60	30	10	5	3	1
CHIMENEA	25.04	30.10	34.53	36.59	38.51	40.57	43.52	45.00	48.13
EDIFICIO	15.03	18.06	20.72	21.95	23.11	24.34	26.11	27.00	28.25

Es decir, para poder usar el EUROCODIGO y aplicarlo al ejemplo del edificio se tiene que usar 18.06 m/s en vez de 27 m/s, ya que los 27m/s corresponden a un intervalo de promediación de tres segundos.

En general entre mayor sea el intervalo de promediación de la velocidad media, mayor será la turbulencia y mayor el factor de amplificación dinámica.

El factor de amplificación dinámica es altamente dependiente del intervalo de promediación de la velocidad de diseño. Por ejemplo para velocidades de diseño horarias los factores de amplificación resultan ser grandes, ya que las velocidades de diseño son menores, como resulta de aplicar las normas de CANADA, y si el intervalo de promediación de la velocidad media es muy pequeño, por ejemplo 3 segundos (RCDF), el factor de amplificación resulta ser menor, y la velocidad de diseño sería mayor, en teoría ambos deberían conducir desplazamientos totales similares.

7.3 EFECTO DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS ANTE LA ACCIÓN DEL VIENTO

En general la propiedad dinámica más importante es periodo natural de vibración; según la mayoría de las normas si el periodo es mayor a un segundo se tendrá que evaluar la acción turbulenta del viento, es decir se tendrá que calcular el factor de amplificación dinámica; este factor de amplificación dinámica máximo debe multiplicar a todos los elementos mecánicos y los desplazamientos, es decir se tendrá que hacer estructuras más rígidas ya que los reglamentos imponen ciertos desplazamientos máximos permitidos, que en general, son los que determinan el diseño en la estructura provocados por la acción media del viento .

7.4 ACCELERACIONES DEBIDO A LA ACCIÓN DEL VIENTO

Se han propuesto expresiones para evaluar las aceleraciones máximas que se presentan en la parte más alta de los edificios, tanto en dirección longitudinal como transversal.

Los resultados de aplicar esas expresiones a varios edificios mostraron que las aceleraciones transversales resultan ser mayores que las longitudinales. Por lo tanto se debe calcular la aceleración total, y considerar la existencia simultánea de ambas aceleraciones, para obtener la aceleración total. La acción simultánea de ambas aceleraciones para obtener la aceleración total resultante, se debe comparar con los niveles de aceleración propuestos en las normas (si es que existen estos parámetros) y compararlos con los del profesor Van Koten (6).

COMENTARIOS FINALES

La mayoría de los códigos coinciden en que los efectos dinámicos deben considerarse, cuando el periodo de la estructura en estudio es mayor que 1 s., o cuando la relación de esbeltez es mayor que 5.

En general cualquier norma, deberá especificar cuál es el tiempo de promediación de la velocidad media, es decir que si se quiere diseñar un edificio en Cancún con el reglamento de Canadá; primero se deberá escoger la velocidad regional de diseño y ver cuál es el tiempo de promediación de esta velocidad y posteriormente ver cuál es el tiempo de promediación que se especifica en la norma a usarse, para así obtener una nueva velocidad de diseño que corresponda a la reglamentación para el sitio en estudio.

Los parámetros más importante que se toman en cuenta para el cálculo del factor de amplificación dinámica es el periodo o frecuencia y el amortiguamiento, es decir se ha observado que al cambiar el periodo o la frecuencia natural del sistema el factor de amplificación se modifica, entre menor sea la frecuencia mayor será el factor de amplificación dinámica y entre mayor sea el amortiguamiento menor será el factor de amplificación dinámica, por lo tanto es conveniente reducir lo mas que se pueda el periodo y aumentar el nivel de amortiguamiento.

Entre mayor es el tiempo de promediación de la velocidad media, la magnitud de la velocidad será menor, pero a su vez el factor de amplificación dinámica será mayor, y si el tiempo de promediación es pequeño (3s) la magnitud de la velocidad media será mayor, pero a su vez el factor de amplificación será menor comparado con el factor de amplificación de un tiempo de promediación mayor a 3 segundos.

En teoría, los desplazamientos totales deberían ser muy similares ya que casi la mayoría de los reglamentos están basados en la misma filosofía de diseño, pero como se ve en los resultados obtenidos en esta tesis y en otros artículos, existen variaciones en los desplazamientos totales. Algunas de las razones de que haya diferencias en los resultados son: diferentes coeficientes de presión, ya sea barlovento o sotavento, diferentes distribuciones de presiones con la altura, diferentes niveles de amortiguamiento para la misma estructura, diferentes factores de amplificación dinámica.

En cuanto a las aceleraciones máximas permitidas debidas a la acción del viento sobre las estructuras, la mayoría de los reglamentos no existen restricciones, ni mucho menos dicen como calcularlas, pero aunque los reglamentos no traten algo con respecto a las aceleraciones máximas, siempre resulta necesario verificar si los movimientos son aceptables para seres humanos; se puede recurrir a la escala de Van Koten (6).

El perfil más usado para describir la variación de la velocidad con la altura en los reglamentos queda descrito por un exponente α .

En cuanto a los coeficientes de presión (edificio) la mayoría de reglamentos consideran 0.8 para barlovento y 0.4 para sotavento, pero en general la suma de estos dos coeficientes resulta comprendido entre de 1.2 a 1.5. Y para la chimenea los coeficientes de presión se encuentran desde 0.7 hasta 1.1.

Para los tiempos de promediación, la mayoría usa 3 segundos; algunos recomiendan 600 segundos.

El amortiguamiento estructural es muy importante en la respuesta de las estructuras, a mayor amortiguamiento el factor de amplificación dinámica será menor, y por lo tanto los desplazamientos totales serán menores.

Los coeficientes de amortiguamiento mostraron una evidente dependencia de la amplitud de la vibración, es decir entre mayor sea la amplitud de vibración mayor es el coeficiente de amortiguamiento, la curva de ajuste se parece al modelo reológico de Burgers modificado (material Visco elástico).

La aceleración en los últimos niveles de los edificios, inducida por el viento se incrementa al aumentar la velocidad de diseño por viento.

REFERENCIAS

1. **Ghiocel, Dan y Lungu, Dan.** "Wind, snow and temperature effects on structures based on probability". Ed. Abacus Press. Romania, 1975.
2. **Davenport, A.G.** "Rationale for Determining Design Wind Velocities". Journal of the Structural Division. Vol. 86. ST5. 1960
3. **Vázquez Martínez, Pedro.** Tesis: "Respuesta de estructuras sometidas a viento turbulento mediante análisis espectral". México, 2001.
4. **Davenport, A.G.** "The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds". Qu. Jnl. Roy. Met. Soc., Vol. 87. 1961.
5. **Harris.** "Nature of wind, Seminar on Modern Design on Wind-Sensitive Structures". CIRIA Londres, 1971.
6. **Van Koten, H.** "Proceedings of the International Research Seminar on Wind Effects on Buildings and Structures". University of Toronto Press. Toronto, 1968.
7. *The National Building Code of Canada (NBC).* 2005.
8. *Reglamento de Construcción del Distrito Federal: "Normas técnicas complementarias para diseño por viento".* México : Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal, 2004
9. *Eurocode. "Actions on structures - General actions: Wind actions".* 2004. Part 1-4.
10. *Norma Chilena Oficial. "Cálculo de la acción del viento sobre las estructuras".* 2000.
11. *American Society of Civil Engineers. "Minimum design loads for Buildings and other structures".* ASCE 7 - 05, 2005.
12. **Prem Krishna, Krishan Dumar, N.M. Bhandari.** "A Commentary on Indian Standard Code or practice for design loads (other than earthquake) For buildings and structures. Part 3. Wind Loads (Second Revision)". 1987.
13. "Australian/New Zealand Standard" .AS/NZS 1170.2:2002
14. *National codes and standards of Russia: Loads and effects.* 2004.
15. *South African Standard. "The general procedures and loadings to be adopted in the design of buildings".* 1993.
16. The Building Center of Japan: "The Building Standard Law of Japan, June 2004.
17. **J.Y.Fu Q.S.Li., J.R.Wu, Y.Q.Xiao, L.L.Song.** "Field measurements of boundary layer wind characteristics and wind-induced responses of super-tall buildings". Hong Kong : s.n., 2008.
18. *Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Viento.* México, 1993.

19. **Yukio Tamara, Ahsan Kareem, Giovanni Solari, Kenny C.S. Kwok John D. Holmes and William H. Melbourne.** *"Aspects of the dynamic wind-induced response of structures and codification"*. 2005.
20. **Zhou, Yin, Tracy Kijewski, S.M.ASCE y and Ahsan Kareem, M.ASCE.***Along-Wind Load "Effects on Tall Buildings: Comparative Study of Major International Codes and Standards"*. 2002.
21. **Rodríguez Cuevas, N.** *"Notas del curso de Diseño Eólico"*. México : Universidad Nacional Autónoma de México. México. 2007.
22. **Vergum., Ambrose .** *"Diseño simplificado de edificios para cargas de viento y sismo"*. 2007.