



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

RESPUESTA ESTRUCTURAL ANTE
CARGAS DE TORNADO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JUAN CARLOS GONZÁLEZ PASTOR

TUTOR PRINCIPAL
ING. NEFTALÍ RODRIGUEZ CUEVAS
INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F. AGOSTO DE 2014



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. Luis Esteva Maraboto
Secretario:	Dra. Sonia Elda Ruiz Gómez
Vocal:	Ing. Neftalí Rodríguez Cuevas
1 ^{er} . Suplente:	M.I. José Luis Trigos Suárez
2 ^{do} . Suplente:	M.I. Octavio García Domínguez

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

ING. NEFTALÍ RODRÍGUEZ CUEVAS

Agradecimientos

Deseo expresar mi más profunda y sincera gratitud al Profesor Neftalí Rodríguez Cuevas por haberme dado la posibilidad de realizar esta Tesis de Maestría e iniciado en los caminos de la investigación científica. Gracias por compartir su conocimiento, por el evidente interés para que aprendiera, por la paciencia y comprensión mostrada en todo este tiempo y finalmente por compartir ese amor y pasión a la ciencia.

A mis sinodales: Dr. Luis Esteva Maraboto, Dra. Sonia Elda Ruíz Gómez, M.I. Octavio García Domínguez y de manera especial al M.I. José Luis Trigós Suárez, por revisar este trabajo y darme sugerencias para el mejoramiento del mismo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico brindado durante mis estudios de posgrado.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por las facilidades técnicas y económicas proporcionadas durante la realización de esta tesis.

*A mis padres y hermanos.
Su cariño y apoyo significa
más de lo que imaginan,
siempre los llevo en mi*

$$\rho = a(1 + \cos \theta)$$

RESUMEN

En nuestro país existen las condiciones meteorológicas que dan lugar a la aparición de tornados, los cuales han aparecido ocasionalmente en el norte y en el centro del país. Debido a que estos eventos meteorológicos producen un impacto económico en las actividades de la zona donde se generan, se inició una búsqueda encaminada a conocer las características de estos fenómenos, los efectos que producen en las construcciones y los procedimientos de análisis que permitan establecer las acciones que estos eventos producen en las construcciones. Se encontró que este tipo de fenómenos atmosféricos son tratados como vientos en la atmosfera neutra en movimiento, a pesar de tener una estructura del campo de flujo distinto y producir otro tipo de efectos en las construcciones. Se revisaron modelos matemáticos representativos que toman en consideración la estructura del campo de flujo. Se realizó un estudio comparativo de la respuesta estructural de una chimenea metálica de 75 m de altura ante las fuerzas obtenidas por los modelos matemáticos representativos. Se presentan los resultados obtenidos de la investigación.

ABSTRACT

In our country there are weather conditions that result in the occurrence of tornadoes, which have occasionally appeared in the north and center of the country. Because these weather events produce an economic impact on the activities of the area where they are generated, a search aimed to determine the characteristics of these phenomena, the effects produced in the construction and analysis procedures that establish the actions started that these events occur in buildings. It was found that this type of weather events are treated as straight-line winds, despite having a structure of the flow field and produce different effects in other constructions. Representative models that take into account the structure of the flow field were reviewed. A comparative study of the structural response of a steel chimney 75 m high to the forces obtained by the representative mathematical models was conducted. Results obtained from the investigation are presented in this document.

CONTENIDO

RESUMEN.....	V
ABSTRACT	VI
INTRODUCCIÓN.....	11
CAPÍTULO 1 MÉXICO, UN PAÍS SUSCEPTIBLE A LA OCURRENCIA DE TORNADOS. 15	
1.1 Antecedentes históricos.....	15
1.2. Registro y distribución de tornados en México	17
1.3. Tornados recientes registrados en México.....	19
1.3.1. El tornado de Piedras Negras	19
1.3.2. El tornado del Zócalo	22
CAPÍTULO 2 FÍSICA DE LOS TORNADOS	27
2.1. Aspectos generales.....	27
2.2. Génesis de los tornados.....	29
2.2.1. Divergencia y vorticidad	29
2.2.2. Procesos convectivos.....	31
2.2.3. Tormentas eléctricas.....	31
2.2.4. Condiciones necesarias para la formación de un tornado	34
2.2.5. Tornados mesociclónicos	34
2.2.6. Tornados no mesociclónicos	36
2.2.7. Escalas de intensidad.....	38
2.3. Dinámica del tornado.....	40
2.3.1. Antecedentes	41
2.3.2. Estructura del campo de flujo del tornado observado en las simulaciones numéricas y de laboratorio	42
2.3.3. Principales resultados para fines de Ingeniería estructural.....	46
CAPÍTULO 3 ACCIONES DEL TORNADO SOBRE LAS CONSTRUCCIONES	49
3.1. Efectos que genera un tornado en las estructuras.....	49

3.2.	Fuerzas de presión inducidas por el viento	50
3.3.	Fuerza inducida por el cambio de presión atmosférica	52
3.4.	Fuerzas de impacto por escombros	54
CAPÍTULO 4 REVISIÓN DE LAS NORMAS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS ANTE LA ACCIÓN DE TORNADOS		57
4.1.	Antecedentes	57
4.2.	Normas de construcción para instalaciones nucleares.....	57
4.3.	Normas de construcción para refugios comunitarios	68
CAPÍTULO 5 EVALUACIÓN DE LAS ACCIONES DEL TORNADO EN LAS CONSTRUCCIONES		71
5.1.	Consideraciones generales.....	71
5.2	Practica actual de diseño	71
5.3	Presión del viento	72
5.4	Cambio de la presión atmosférica.	74
5.5.	Impacto de proyectiles	77
5.6.	Combinaciones de carga	77
5.7.	Necesidad de una nueva normatividad para el diseño de estructuras ante la acción del tornado	80
CAPÍTULO 6 MODELOS MATEMÁTICOS REPRESENTATIVOS		85
6.1.	Modelo de la capa límite atmosférica	85
6.2.	Modelo de Dutta	86
6.3	Modelo de Yi-Kwei Wen.....	88
CAPÍTULO 7 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE TORNADO PARA EVALUAR LA RESPUESTA ESTRUCTURAL		95
7.1.	Detalles de la estructura	95
7.2.	Condiciones de análisis	95
7.3.	Detalles del modelo analítico	97
7.4.	Características de los eventos de tornado	99

7.5.	Fuerzas de viento generadas por tornados	100
7.6.	Respuesta Estructural.....	103
7.7.	Influencia de la componente de inercia	107
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		109
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS		113
APÉNDICE A RESPUESTA DE UNA CHIMENEA ANTE LA ACCIÓN DEL VIENTO TURBULENTO.....		121
A.1.	Comportamiento de una chimenea ante la acción del viento turbulento	121
A.2.	Respuesta transversal y longitudinal de la chimenea Odense.....	126
APÉNDICE B CÁLCULO DE LA ACELERACIÓN		129

INTRODUCCIÓN

En nuestro país existen las condiciones meteorológicas que dan lugar a la aparición de tornados, los cuales han aparecido ocasionalmente en diversas partes del país, especialmente en la zona Noreste, en la región cercana a Piedras Negras Coahuila, donde es frecuente la aparición de este tipo de fenómenos meteorológicos; sin embargo, existe evidencia de la generación de eventos en diversas partes de la República.

Recientemente, en el mes de marzo de 2014, en la localidad de Tangancicuaro, en el norte del estado de Michoacán, se generó un tornado que afectó a tres comunidades y causó daños en viviendas, vehículos e infraestructura de suministro eléctrico. En el mes de marzo de 2012, en un tramo de la carretera Monterrey-Laredo, se generó un tornado que afectó un área importante del Estado de Nuevo León, que ocasionó daños. Ese mismo año, en el mes de junio, se conjuntaron las condiciones meteorológicas que produjeron una tormenta multicelda que produjo una serie de tornados que causaron afectaciones en la Ciudad de México y el Área Metropolitana. Estos eventos causaron daños, consistentes en la caída de árboles, anuncios espectaculares, y en techos y ventanas de algunas construcciones.

Debido a que estos eventos meteorológicos producen un impacto económico en las actividades de la zona donde se generan, se inició una búsqueda encaminada a conocer la distribución y la frecuencia de aparición de estos fenómenos, la intensidad de los vientos que producen, los efectos que pueden producir en construcciones y los procedimientos de análisis que permitan establecer las acciones que estos eventos producen en construcciones.

La revisión de los reglamentos de construcción de países que son afectados por los tornados sugirieron que la baja probabilidad de ocurrencia combinada con las fuerzas intensas y destructivas que imponen los tornados en las construcciones hace que el diseño estructural, cuyas premisas son garantizar la seguridad de los ocupantes y el control de los daños bajo restricciones económicas, sea un problema complejo y difícil de abordar.

Así mismo, se encontró que únicamente existen disposiciones de diseño y construcción para estructuras de uso especial (como centrales nucleares o instalaciones de almacenamiento de materiales peligrosos) y refugios comunitarios, que están destinados a resistir tornados de muy alta intensidad (F4 o superior). Se encontró que estas disposiciones están basadas en procedimientos de diseño para viento en la atmósfera neutra en movimiento (es decir, flujo del viento en una dirección que permanece en estado estacionario por un intervalo de tiempo), y debido al desconocimiento del campo de flujo y a la interacción tornado-estructura, se proponen velocidades de muy alta intensidad que garantizan amplios factores de seguridad, donde la resistencia de las construcciones y las acciones que produce un tornado tienen probabilidades pequeñas de no ser alcanzadas y de ser rebasadas respectivamente.

OBJETIVOS Y ALCANCES

El objetivo de los reglamentos de construcción es proteger a la población y sus bienes materiales de posibles fenómenos naturales. En México existe un documento normativo, para instalaciones de la C.F.E., que atiende el problema del viento en términos de amenaza a la seguridad de las construcciones y se denomina “Manual de diseño de obras civiles. Diseño por viento”. En esta norma se reconoce la existencia de tornados y vientos de alta intensidad (microráfagas) en el país; sin embargo, no proporciona los criterios de diseño para tomar en cuenta los efectos que causan los tornados en

construcciones urbanas. Por esta razón se plantea la necesidad de elaborar un documento normativo que sirva de base en el diseño de construcciones en zona de tornados, acorde a las condiciones climatológicas y constructivas de nuestro país.

Sin embargo, se considera que el documento normativo destinado a establecer las acciones que producen los tornados en las construcciones requiere un planteamiento diferente, ya que la variación espacial del campo de flujo, la naturaleza no estacionaria de las componentes de velocidad y la interacción fluido-estructura difieren del planteamiento de los reglamentos de construcción convencionales.

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar la importancia de la variación espacial y temporal del campo de flujo de un tornado en la respuesta estructural, debido a que la falla de las construcciones no solo se debe a la alta intensidad de las velocidades, sino también, a las distintas componentes de velocidad que produce el campo de flujo y que impone fuerzas que usualmente no son tomadas en cuenta en los procedimientos de análisis y diseño.

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

Este trabajo pretende ser un compendio del conocimiento actual de los tornados, de los efectos que pueden producir en las construcciones y de las metodologías de diseño para tomar en cuenta las acciones que estos eventos producen en las construcciones.

El primer capítulo de este trabajo proporciona evidencia clara de la existencia de tornados en la República Mexicana, mediante la presentación de registros y de la distribución de tornados en el territorio nacional. Con base a los reportes oficiales, se presenta información sobre los daños que ocasionan este tipo de fenómenos atmosféricos. En el segundo capítulo se habla de los diferentes orígenes meteorológicos del tornado y de las condiciones que se requieren para su formación. Se discute la dinámica del tornado en base a las observaciones de tornados reales y de los resultados de las simulaciones de laboratorio. Se comentan los principales parámetros de los simuladores de tornado que permiten controlar el flujo en su interior para obtener las características que reproducen las condiciones del flujo de los tornados reales. La última parte de este capítulo se dedica a dar una somera descripción de los principales resultados obtenidos en las simulaciones numéricas y de laboratorio para fines de ingeniería estructural.

Los siguientes tres capítulos: el tercero, cuarto y quinto, se dedican a estudiar los efectos que causan los tornados en las construcciones y hacer una revisión de los procedimientos de análisis y diseño que se han empleado para determinar las acciones del tornado y evaluar la respuesta de las construcciones. En la parte final del quinto capítulo se plantean las limitaciones existentes en los procedimientos de análisis y diseño de construcciones especiales, destinadas a resistir eventos extremos de tornados (F4 o superior), y se pone de manifiesto que las disposiciones de los reglamentos convencionales no garantizan la seguridad de las construcciones de uso general ante la acción del tornado, a pesar de que éste sea de muy baja intensidad, por lo que se plantea la necesidad de un nuevo enfoque en la reglamentación.

Los dos últimos capítulos están destinados a mostrar el logro del objetivo: el penúltimo capítulo presenta el modelo del viento turbulento en la capa límite atmosférica, el cual considera que el flujo posee una dirección y que ésta permanece en estado estacionario en un intervalo de tiempo; el modelo de Dutta, que incorpora las componentes de velocidad que produce el campo de flujo del tornado, pero considerando que estas se encuentran en estado estacionario; y se finaliza con el modelo de Wen, que

toma en cuenta la variación espacial del campo de flujo y su estado no estacionario e incorpora la componente de inercia en el cálculo de las fuerzas de viento. En el último, séptimo capítulo, se hace una comparación de la respuesta estructural de los diferentes modelos aplicados a una chimenea de acero de 75 m de altura.

Por último, se incluyen dos apéndices: a) Respuesta de una chimenea ante la acción del viento turbulento y, b) Cálculo de la aceleración. El primer apéndice, aunque no es indispensable para el desarrollo de este trabajo, se consideró necesaria su inclusión para tratar de deducir la posible respuesta de la chimenea metálica ante la acción del tornado, ya que no existen estudios experimentales que describan el comportamiento de una chimenea ante la acción de estos eventos. El segundo apéndice muestra la deducción y la lista completa de las ecuaciones para el cálculo de la aceleración que se requiere en el modelo de Wen.

CAPÍTULO 1

MÉXICO, UN PAÍS SUSCEPTIBLE A LA OCURRENCIA DE TORNADOS

México es afectado por varios tipos de fenómenos hidrometeorológicos entre los que se encuentran las lluvias e inundaciones, granizadas, nevadas, heladas, tormentas eléctricas y tornados. Todos los fenómenos anteriores son manifestaciones de las tormentas severas que se presentan en gran parte del territorio nacional, y que año tras año provocan la pérdida de vidas humanas o daños materiales importantes.

Uno de los fenómenos hidrometeorológicos poco estudiado en México son los tornados. El tornado, como fenómeno natural potencialmente destructivo, es considerado por organizaciones gubernamentales, instituciones, población en general e incluso la comunidad científica, como un evento excepcional y de baja ocurrencia. Se cree que solo se producen en el norte del país y a lo largo de la costa del golfo de México. La finalidad de éste capítulo es mostrar un panorama diferente, ya que la presencia de tornados en gran parte del territorio nacional es contundente.

1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

En México se puede encontrar una innumerable cantidad de nombres y de rituales que aluden al fenómeno tornádico ubicándolos en los más diversos lugares de la República. Los nombres, que a lo largo de los siglos han ocultado a los tornados mexicanos son: “culebras de agua”, “culebras de aire”, “víboras de aire, agua o granizo”, “cola de nube”, “colas”, “torito”, “manga de agua”, “serpiente”, “dragones”, “cutzanda”, “yecacoatl”, trombas, etc. (Avendaño, 2012; Macías, 2001).

Los tornados, como fenómenos potencialmente destructivos, tienen una interpretación en la mitología prehispánica y están asociados al Dios chichimeca Mixcóatl (Macías, 2001). Mixcóatl tiene el siguiente significado: “mixtli”, nube; “cóatl”, serpiente: “serpiente de nube” (Siméon, 2002, p. 279).

Avendaño (2007) señala que en el Dios Mixcóatl denominado “serpiente de nube” se observa una cosmovisión de la cultura prehispánica que se asocia a la “serpiente”, y existe una similitud de la formación de un tornado, la cual siempre está asociada a movimientos violentos en la atmósfera, es decir, el movimiento circular del viento producto de la convergencia de dos corrientes de aire con diferente temperatura hace parecer que del cielo desciende una enorme serpiente de “aire” o de “agua”.

En el Boletín de la Sociedad Meteorológica de los Estados Unidos, aparece un artículo de Velasco Fuentes (2010), que describe múltiples testimonios históricos en los cuales se menciona la ocurrencia de tornados en el Valle de México. Menciona el avistamiento de un fenómeno similar a un tornado en el año de 1521, cerca de Tlatelolco, el cual ocurrió en la víspera de la caída de México-Tenochtitlan. Este tornado auguró la caída del imperio Azteca, ocurrió el 21 de agosto de 1521 y se documentó en el Códice Florentino¹.

¹ La fuente más importante de información sobre los nahuas en la época de la conquista es la “Historia General de las Cosas de Nueva España”, también conocido como código florentino y es el resultado de más de 30 años de trabajo del fraile franciscano Bernardino de Sahagún. El código florentino, dividido en 12 libros, es una compilación enciclopédica de los textos en náhuatl y español, relativo a todos los aspectos de la cultura y la vida nahua, de la estructura social y las cuestiones religiosas a la historia natural. Particularmente el Libro XII, es el único completamente dedicado a cuestiones históricas, es un relato de la conquista española de México (1519-1521).



Figura 1. 1. Mixcōatl: Serpiente de Nubes

El capítulo 39 del libro XII del código florentino comienza con una descripción de un fenómeno meteorológico observado por los “mexicas” y “tlatelolcas” en los últimos días del asedio². A continuación se reproduce el fragmento: “... y cuando había caído la noche, acto seguido llovió a intervalos; que roció a intervalos. Ya entrada la noche apareció un fuego. Como fue visto, como apareció, era como si viniera de los cielos como un torbellino. Pasó girando continuamente alrededor; se fue girando. Era como si el carbón ardiente se rompiera en muchos pedazos, unos muy grandes, unos sólo muy pequeños, unos solos como chispas. Surgió como un viento cobrizo. Mucho hizo rechinar, crujir, chasquear. Sólo rodeó los taludes de la orilla del agua, y se dirigió hacia Coyonacazco”. En el artículo publicado por [Velasco Fuentes \(2010\)](#) se encuentra la transcripción en nahúatl. En ese mismo capítulo se describe que no hubo combates en el día después de la tormenta, y que Tenochtitlan-Tlatelolco cayó al día siguiente. Esto establece la fecha del tornado como 11 (21) Agosto de 1521. En cuanto a su trayectoria, se cree que el tornado llegó desde la dirección del “Tepeyacac” (Tepeyac), a unos 5 km al norte-noreste de Tlatelolco.

Asimismo, Velasco Fuentes ofrece descripciones textuales de dos científicos mexicanos, Antonio Alzate y José Gómez de la Cortina, que hablan de la ocurrencia de tornados en el área de la Ciudad de México en 1786, 1791 y 1848, a los que describe como “víboras, tifones, o víboras de agua” y menciona Alzate haber observado una en el mes de octubre, así como la aparición de tres de ellas simultaneas, dos de ellas que se movieron hacia el sur y la tercera hacia el oeste. Pintores paisajistas de la época, como Cleofás Almanza, en su obra “Tempestad en los Llanos de Aragón”, (Figura 1.2) realizada en 1885, muestra claramente la imagen de un tornado. José María Velasco también realizó pinturas y dibujos de tornados, que son evidencia de la aparición de tornados en el Valle de México.

² En noviembre de 1519 los españoles entraron a México-Tenochtitlan de forma pacífica, a los pocos días se convirtió en una ocupación militar apoyada en el sometimiento y prisión del monarca mexica, Moctezuma. Tal ocupación se prolongó durante siete meses, de noviembre de 1519 a junio de 1520, tiempo que los españoles aprovecharon para obtener información y recursos, pero sobre todo para establecer alianzas con los otros señoríos. Al mismo tiempo se generó el movimiento de resistencia mexica que culminó con la deposición de Moctezuma y la expulsión de los españoles y sus aliados, evento popularmente conocido como “La Noche Triste”. Casi en seguida se presentó en tierras mexicanas una epidemia de viruela cuyo efecto devastador fue inmediato, causando la muerte de no menos de tres millones de personas. Fue entonces cuando empezó la guerra propiamente dicha de la Conquista de México. El episodio dominante de la guerra fue el sitio de México-Tenochtitlan, que a pesar de verse debilitada por la viruela resistió a lo largo de un año que culminó con la toma de la ciudad y la captura de su último rey, Cuauhtémoc, el 13 de agosto de 1521. Como es habitual, esta fecha se da en el calendario juliano vigente en el momento, en nuestro calendario la fecha de la caída es 23 de agosto 1521.



Figura 1. 2. Oleo de C. Almanza “Tempestad en los Llanos de Aragón”

1.2. REGISTRO Y DISTRIBUCIÓN DE TORNADOS EN MÉXICO

Existe una recopilación de eventos inherentes a la aparición de tornados en el país, realizada por un par de investigadores: Oscar Velasco Fuentes y Jesús Macías, realizadas de manera independiente. Estas distribuciones deben considerarse como preliminares, ya que no existe una documentación suficiente de cada uno de los eventos registrados.

A partir de reportes provenientes de libros, periódicos, revistas científicas y boletines gubernamentales, Velasco Fuentes construyó un registro de 182 tornados observados entre 1521 y 2010. De éstos más de un centenar corresponde a tornados y el resto a trombas marinas, nubes conoidales y tormentas de vórtices múltiples. Velasco Fuentes señala que la mitad de esos eventos ocurrieron en una franja delgada, 19°-20° N, que se extiende desde el Golfo de México hasta el océano Pacífico y que coincide con el eje Neovolcánico. Así mismo, sugiere que en México los tornados ocurren preferentemente en zonas montañosas y durante los meses de mayo a agosto; con una distribución horaria entre las tres y seis de la tarde; en cuanto a la distribución por altitud, la mayoría de los tornados registrados sucedieron entre los mil 500 y tres mil 500 metros, y ocurren con mayor persistencia en Oaxaca, Morelia, Cuernavaca, Tepic y la Ciudad de México (Venegas, 2013).

Macías y Avendaño (2013) construyeron un registro de tornados, el cual está basado en notas periodísticas publicadas entre 2000 y 2012 y trabajos de campo, y que consta de 126 eventos. Macías y Avendaño registraron la presencia de tornados en la mayor parte del país, exceptuando los estados de San Luis Potosí, Querétaro y Morelos. Observaron que los estados que presentan mayor presencia de tornados son: Coahuila, Estado de México, Chihuahua, Tamaulipas, Veracruz, Tlaxcala y Chiapas. La Figura 1.3 muestra la distribución espacial de los tornados en la República Mexicana. Se observa claramente que la dispersión de eventos es indicativa de la posibilidad de aparición de eventos en diversas partes de la República, no solo en el norte del país, como indica los alcances del “Manual de diseño de obras civiles. Diseño por viento” de la CFE.



Figura 1. 3. Distribución espacial de tornados en la República Mexicana (Macías y Avendaño, 2013)

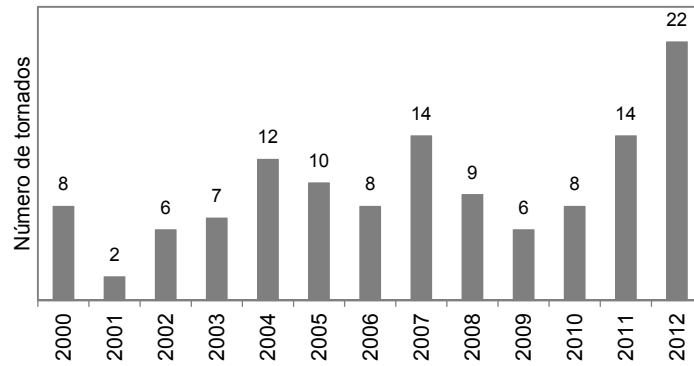


Figura 1. 4. Tornados por año en el periodo 2000 a 2012 (Macías y Avendaño, 2013)

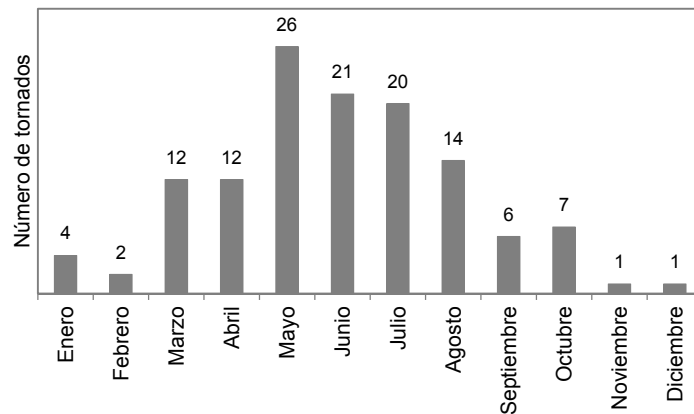


Figura 1. 5. Ocurrencia de tornados por mes en el periodo de 2000 a 2012 (Macías y Avendaño, 2013)

La Figura 1.4 muestra el número de tornados por año de acuerdo a los registros de Macías y Avendaño. Se observa claramente que para los últimos cuatro años se tiene un comportamiento creciente en la ocurrencia de tornados; sin embargo, debido al corto periodo, los datos son poco concluyentes. Macías y Avendaño señalan que los tornados pueden ocurrir en cualquier época del año; sin embargo, sugieren que su frecuencia es mayor durante los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio y agosto, tal como indica la Figura 1.5, y el 70% de los eventos ocurrió entre las 3 y 7 de la tarde.

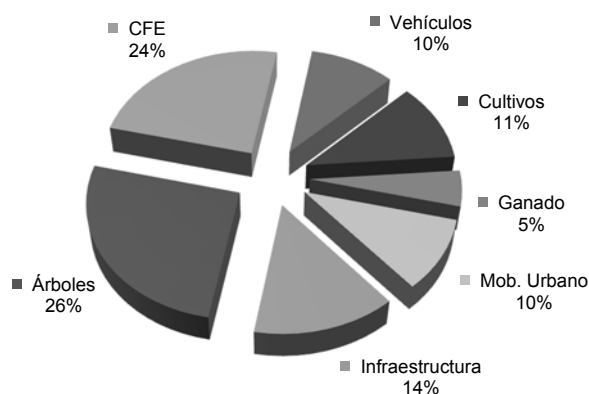


Figura 1. 6. Porcentaje de daños asociados a la ocurrencia de tornados de 2000 a 2012 (Macías y Avendaño, 2013)

En referencia a los daños y pérdidas humanas producidas por los tornados, los registros indicaron que los 126 tornados produjeron 409 lesionados, 11 muertes y afectaciones en 3357 viviendas. En la Figura 1.6 se muestra el daño ocasionado por tornados en otros rubros de acuerdo a lo observado por Macías y Avendaño. Como se puede observar, prácticamente el 50% de los reportes consignan daños en instalaciones de generación y distribución de energía (CFE) y árboles, que, evidentemente son los rubros que muestran la mayor exposición a las características de la amenaza de tornados.

1.3. TORNADOS RECIENTES REGISTRADOS EN MÉXICO

1.3.1. El tornado de Piedras Negras

El tornado del 24 de abril de 2007 en realidad formó parte de una serie de tornados generados por condiciones atmosféricas severas producidas a finales de ese mes y ocurridas en la Serranía del Burro ubicada en la frontera de México y Estados Unidos entre los estados de Coahuila y Texas respectivamente, llegándose a contabilizar 93 tornados, siendo el de Piedras Negras e Eagle Pass el más dañino (Marshall y Eblen).

Los estudios realizados por Edwards (2006) mostraron que las características que posee la Serranía del Burro son adecuadas para la gestación y sustentación de tormentas supercelda: áreas de terreno a una gran elevación, proximidad a la capa límite saturada de humedad proveniente del oeste del Golfo de México, y su posición latitudinal que es afectada por las corrientes de chorro subtropicales (subtropical jet streams) contribuyen a la generación de tornados (Figura 1.7).

La tormenta supercelda, proveniente de la Serranía del Burro (Figura 1.8), se estacionó alrededor de las 6:00 pm (hora local de México) sobre la colonia Año 2000. El tornado tocó tierra a las 6:21 pm, y afectó inicialmente a una maderera, cruzó la unidad deportiva Santiago V. González, siguiendo una trayectoria errática, posteriormente se trasladó a la colonia Deportiva y Colinas 2, pasó sobre la

empresa Labasa y entró a Villa de Fuente y a la Villa Campestre, luego por el ejido Villa de Fuente, cruzando hacia Estados Unidos para tocar el sector de Rosita Valley de Eagle Pass en Texas, donde terminó por disiparse.

El tipo de daños que se observó en las comunidades de Piedras Negras fue provocado por granizo y viento, mientras que la lluvia que se produjo fue relativamente poca (22.3 mm, según el observatorio meteorológico de Piedras Negras). El granizo fue de tal tamaño que provocó el rompimiento de ventanas en viviendas y de autos, mientras que el viento provocó también la rotura de ventanas de viviendas, falla de techumbres de madera, de algunas estructuras de concreto, y arrastre o levantamiento de autos particulares y autobuses (Figura 1.9).

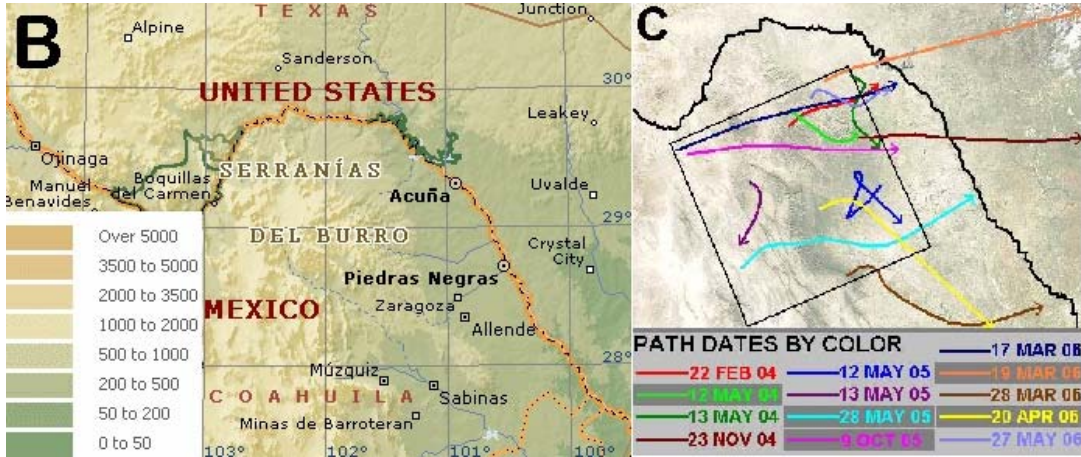


Figura 1. 7. La imagen del lado izquierdo muestra la ubicación y topografía de la Serranía del Burro; la imagen del lado derecho muestra las trayectorias de las tormentas supercelda reportadas por (Edwards, 2006) para el periodo de 2004 a 2006



Figura 1. 8. Sistema meteorológico correspondiente al 24 de abril de 2007. Fuente: CONAGUA



Figura 1. 9. Daños ocasionados por el tornado en Piedras Negras, Coahuila (CENAPRED, 2009)



Figura 1. 10. Daños ocasionados por el tornado en Eagle Pass, Texas (Marshall y Eblen)

La supercelda cruzó el río Bravo cerca de las 7:00 pm y afectó a Rosita Valley, en Eagle Pass, cerca de las 7:00 pm. Las velocidades de los vientos severos de la tormenta se estimaron entre 130 y 160 km/h y causaron daños de menor importancia en casas y hogares móviles. Los techos fueron levantados parcialmente, los exteriores de hogares fueron dañados y los árboles fueron abatidos. Después se produjo la precipitación de granizo que alcanzó el tamaño de pelotas de golf, junto con lluvia intensa. El tornado fue valorado como un EF-3 en la escala de Fujita mejorada, con un diámetro de cerca de medio kilómetro y una longitud aproximada de 6.5 kilómetros.

Tabla 1. 1. Resumen de daños ocasionados por el tornado del 24 de abril de 2007 en el municipio de Piedras Negras, Coahuila (CENAPRED, 2009)

Concepto	Daños directos (miles de pesos)	Daños indirectos (miles de pesos)	Total (miles de pesos)	Porcentaje del total
Infraestructura social				
Vivienda	27279	2988	30267	24.2
Educación	7231	2535	9766	7.8
Salud	150	362	512	0.4
Infraestructura hidráulica	0	80	80	0.1
Subtotal	34661	5965	40625	32.5
Infraestructura económica				
Sector eléctrico	25168	24960	50128	40
Subtotal	25168	24960	50128	40
Sectores productivos				
Comercio e industria	0	6197	6197	5
Subtotal	0	6197	6197	5
Otros sectores				
Medio ambiente*	0	22656	22656	18.1
Atención a la emergencia	0	5565	5565	4.4
Subtotal	0	28221	28221	22.5
Total	59829	59146	125171	100

* El monto de daños en medio ambiente corresponde a los recursos ejercidos en las labores de remoción de escombros, retiro de árboles caídos y reforestación.

El tornado de Piedras Negras dejó como resultado la pérdida de vidas humanas; fue mayor en territorio norteamericano que en México, siete y tres, respectivamente. Las pérdidas económicas se estimaron en poco más de 125 millones de pesos, de los cuales 47.8 se consideraron como daños directos y 52.2 como efectos indirectos asociados al impacto del fenómeno. Sin duda el sector más afectado fue el sector eléctrico, que concentró el 40% de los mismos, Tabla 1.1 (CENAPRED, 2009).

1.3.2. El tornado del Zócalo

El día 1 de junio de 2012 ocurrió una tormenta multicelda que afectó extensiones importantes de la Ciudad de México y Área Metropolitana. Ocasionó lluvias moderadas y fuertes. Esa tormenta produjo al menos cuatro tornados no mesociclónicos (o no supercelda), de los que al menos tres se presentaron en territorio del municipio de Ecatepec, en el Estado de México, y uno apareció atravesando la parte

central de la Ciudad de México. El pronóstico meteorológico advertía en términos muy generales de la inestabilidad atmosférica que dominaba sobre todo el centro del país y se anticiparon condiciones tormentosas generales. La Figura 1.12 muestra la masa nubosa que albergó la tormenta multicelda y que generó los tornados que afectaron el Valle de México.

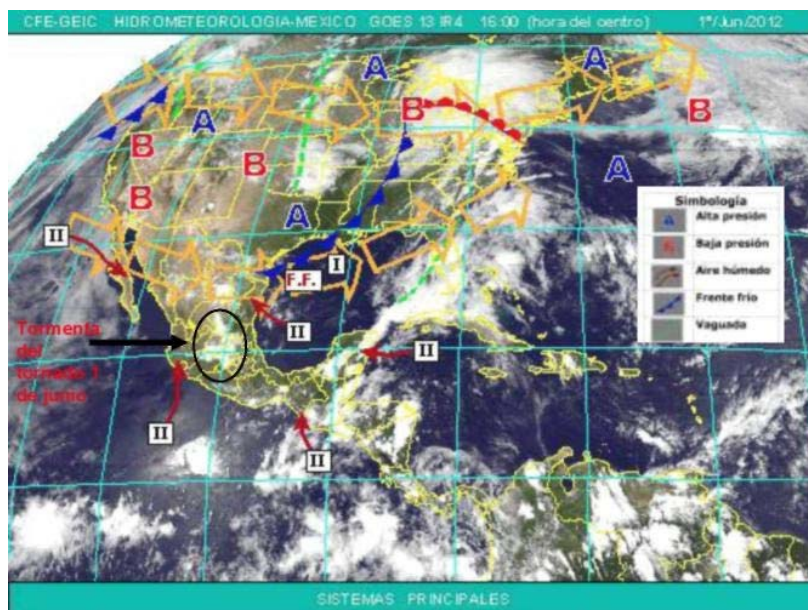


Figura 1. 11. Boletín meteorológico de la CFE del primero de junio de 2012. El ovalo negro indica la masa nubosa que albergó la tormenta multicelda que dio origen a los tornados en la Ciudad de México y Área Metropolitana (Macías, 2012)

Según Macías (2012) el tornado no mesociclónico que cruzó el centro de la ciudad, al que denominó “Zócalo”, tuvo un trayecto cuya longitud estimó en 8.1 km. El tornado tuvo dos direcciones, la primera fue de norte a sur, comenzando en el cruce de las avenidas Montevideo e Instituto Politécnico Nacional, a las 5:38 pm (hora local de México), pasando luego por la Unidad Habitacional Tlatelolco, para girar hacia el sureste cerca de la esquina de Eje Central y la avenida Ricardo Flores Magón, donde tomó una nueva dirección noroeste a sureste, llegando al Zócalo de la Ciudad de México a las 5:50 pm destruyendo un campamento de profesores y disipándose a la altura del cruce de las avenidas Fray Servando Teresa de Mier y Calzada de la Viga (Figuras 1.12 y 1.13). Tuvo una velocidad de desplazamiento promedio de 23 km/h. La disipación del tornado se registró a las 5:58 pm, por lo que su duración total fue de 20 minutos.

En el caso de los tres tornados ocurridos en el municipio de Ecatepec, en el Estado de México, el primero se registró alrededor de las 5:55 pm y se ubicó en un terreno baldío atrás del “Hospital de las Américas”; el segundo tornado se registró a las 5:59 pm en Ciudad Azteca y el tercero se registró en la avenida Jardines de Morelos en la colonia “Las Américas” (Figura 1.14). Estos tres tornados se presentaron por un breve tiempo de manera simultánea.

En referencia a los daños que ocasionaron estos eventos, el tornado que atravesó la Ciudad de México se clasificó como EF-2 en la escala de Fujita Mejorada, es decir de baja intensidad, con una longitud estimada de 8.1 km, con velocidades máximas de viento que oscilan entre los 100 y 136 km/h. Se reportaron 34 lesionados, de los cuales dos fueron de gravedad y no se reportó ningún deceso. En términos muy generales, los daños asociados al paso del tornado se debieron principalmente al abatimiento y posterior lanzamiento de árboles y a los intensos vientos que colapsaron estructuras

sensibles a las ráfagas de viento, como son anuncios espectaculares y construcciones ligeras con grandes áreas de exposición. Estos daños se condensan en la Tabla 1.2. En el caso de los eventos ocurridos en el municipio de Ecatepec, no se encontraron indicadores de daño que permitieran estimar las velocidades del viento y su potencial de daño.

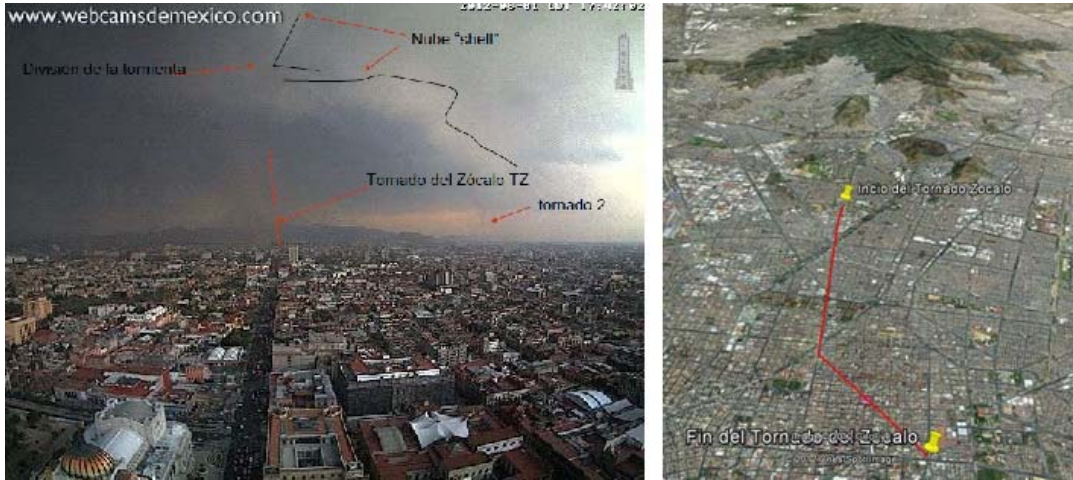


Figura 1. 12. La imagen de la izquierda muestra la tormenta multicelda que afecto a la Ciudad de México y Área Metropolitana. La imagen de la derecha muestra el trayecto del tornado del Zócalo, con una longitud estimada en 8.1 km



Figura 1. 13. Daños ocasionados por el tornado en la Ciudad de México (Macías, 2012)



Figura 1. 14. Localización y trayectos de los tornados ocurridos en el Municipio de Ecatepec

Tabla 1. 2. Resumen de daños del tornado del Zócalo del primero de junio de 2012

Concepto	Cantidad
Personas lesionadas	34
Vehículos afectados	20
Anuncios espectaculares con daños	9
Fugas de Gas LP	6
Árboles caídos	102
Postes de luz	5
Postes de teléfono	4
Postes de alumbrado público	7

A partir de los registros, [Macías \(2012\)](#) estimó que las pérdidas económicas que generaron los tornados ascienden a más de 1 679 millones de pesos, por lo que está claro que la capacidad destructiva de estos fenómenos no se puede despreciar y se puede comprender la importancia y urgencia de invertir en los aspectos necesarios, tanto del desarrollo científico y tecnológico, como de los sistemas de alerta y en general lo concerniente a los preparativos en la sociedad, para reducir los impactos de los tornados.

CAPÍTULO 2

FÍSICA DE LOS TORNADOS

La palabra “tornado” proviene del latín “tornare” que significa “girar”. El tornado, como fenómeno meteorológico, es de naturaleza ciclónica y de poca extensión horizontal, que se prolonga desde la base de una nube madre, básicamente un “cumulonimbus” o “cumulus potentes” y es capaz de generar los vientos más violentos que hay en la naturaleza. Debido a la esbeltez y corta duración, los tornados son mucho más difíciles de detectar que los huracanes.

La física del tornado implica dos cuestiones: ¿cuál es la fuente de la rotación de un tornado? y ¿de qué manera esta rotación se convirtió en un vórtice concentrado?. La primera cuestión se refiere a la formación e intensificación de los tornados, es decir, la génesis de los tornados. En ésta se busca entender las fuentes de circulación y el flujo de fuerzas que establecen y mantienen esta circulación. Por consiguiente, estos problemas generalmente se han investigado como una especialidad dentro del área de la dinámica del “cumulus”. Los medios principales han sido las mediciones con radar doppler de grandes tormentas y simulación numérica de sistemas de tormentas convectivas. La segunda cuestión se refiere a la dinámica del tornado, es decir, al intenso vórtice que forma la columna del tornado. Los objetivos de esta especialidad son describir el proceso por el cual la vorticidad de la nube madre se concentró para producir el vórtice y para explicar físicamente la distribución del viento y la presión en los alrededores del vórtice. Los métodos de enfoque incluyen el modelado numérico y simulaciones de laboratorio.

En este capítulo se muestran los avances logrados que permiten identificar los tipos y las características de los tornados; así como los principales parámetros que controlan el campo de velocidades y diferenciales de presión asociados al tornado.

2.1. ASPECTOS GENERALES

La definición de un tornado según el Glosario de Meteorología ([Huschke y Brooks, 1959](#)) comienza con lo siguiente: “una columna de aire que gira violentamente, que cuelga de una nube “cumulonimbus”, y casi siempre visible como una “nube embudo o manga”. Esta definición parece relativamente sencilla, pero en realidad los conceptos implícitos en esta definición son ambiguos.

Los tornados son sistemas dinámicos de pequeña escala en la atmósfera, generados por sistemas convectivos altamente organizados conocidos como “tormentas eléctricas”. La formación de tornados, tormentas eléctricas y otros fenómenos atmosféricos están asociados a procesos convectivos en la atmósfera ([Doswell III, 2001](#)).

[Browning \(1964; 1963\)](#) observó que los tornados más fuertes y violentos se formaban dentro de las grandes, estables y virulentas tormentas eléctricas. Estas parecían ser una “supercelda”, por lo que les llamo “tornado supercelda”. Las tormentas supercelda son tormentas muy energéticas con velocidades del viento superiores a los 240 km/h. Pueden durar varias horas y producir más de un tornado. Los tornados generados por una supercelda producen daños (F4 ó F5 en la escala de Fujita³) cuantiosos y pérdida de vidas humanas. Las condiciones necesarias para la formación de tornados supercelda se

³ Véase sección 2.2.8

presentan rara vez, por esta razón los tornados supercelda son poco frecuentes. Un tratamiento integral de los tornados y tormentas supercelda se puede encontrar en [Doswell III y Burgess \(1993\)](#).

La mayoría de los tornados son débiles y no están asociados a una tormenta supercelda. [Bluestein \(1985\)](#) fue el primero en referirse a este tipo de tornados como “landspout”. Los tornados de este tipo están asociados con frecuencia a los “frentes fríos” y se cree que son más débiles que los que acompañan a los mesociclones, observados por los ecos de radar, pero sus efectos no pueden ser ignorados, ya que como muestra la escala de Fujita, pueden causar daños significativos e incluso muertes.

La velocidad con que se traslada un tornado típico es de 50 km/h, habiendo registros de hasta 112 km/h o de tornados estacionarios ([Finley, 1884](#)). La dirección usual es de suroeste a noreste y aunque el efecto de Coriolis es muy pequeño, el giro más común es ciclónico. El ancho característico es de unos 100 m y su recorrido es de unos pocos kilómetros, con grandes desviaciones. La velocidad de rotación es típicamente de unos 500 km/h, con registros hasta de 800 km/h. La altura del embudo superior, que se desvanece en la nube madre, alcanza entre 800 y 4000 m.

La máxima aparición de tornados le corresponde a los Estados Unidos, con más de 650 por año; en 1965 se registraron 898 tornados. Australia, con más de 100 eventos anuales ocupa el segundo lugar. En forma eventual ocurren en casi todo el mundo. Sin que la estación del año o la hora del día (o la noche) tengan algo que ver con sus apariciones, su frecuencia es ligeramente mayor durante los meses de mayo, junio y julio entre las tres y siete de la tarde.

Cuando un tornado pasa o se forma sobre una superficie de agua recibe el nombre de “tromba” o “tromba marina”. Como los tornados, puede tener formas distintas y ocurren frecuentemente en grupos; se tienen registros de la ocurrencia de 15 trombas simultáneamente. La intensidad de la tromba parece ser menor que la de los tornados “landspouts”, aunque los datos son escasos. Contrario a lo que se cree, las trombas no elevan el agua a grandes alturas, si acaso a unos cuantos metros.

Las trombas aparecen en cualquier época del año y a cualquier hora, son más frecuentes entre mayo y octubre. Frecuentemente aparecen en las costas de los Estados Unidos y Australia. Existen registros de ocurrencia en el Golfo de México, en la zona petrolera del activo Cantarell.

Tabla 2. 1. Características de los tornados, trombas marinas y remolinos de tierra

Características	Tornados	Tromba marina	Remolino de tierra
Sistema de tormenta	Mesociclón (tornados F4 - F5) Cumulonimbus (tornados F0-F3)	Cumulonimbus o cumulus congestus	Ninguno o cúmulos de buen tiempo
Escala Horizontal	30 – 1,600 m	5-100 m	1-50 m
Velocidad del viento	~ 30 a 140 m/s	20-70 m/s	40 m/s
Duración	5 - 90 min	0,5-30 min	2-15 min
Altura	800-4,000 m	300-3,000 m	1,500 m (columna de polvo) 4,000 m (corriente ascendente térmica)
Movimiento del Sistema	5-13 m/s	5-9 m/s	5 m/s

Otro tipo de vórtices atmosféricos de gran interés son los remolinos de tierra. Tienen la forma de columnas o de conos invertidos y el movimiento del aire es giratorio, en cualquier dirección, y ascendente. Cerca del piso la corriente es de forma espiral y es capaz de arrastrar toda clase de objetos

pequeños. La altura que alcanzan es entre 2 y 1,500 m, siendo característica la de 100 m. El diámetro oscila entre 1 y 50 m, siendo el más común el de 10 m.

Los remolinos de tierra típicos tienen una duración del orden de pocos minutos, habiendo registros de múltiples remolinos que duraron varias horas. Uno de ellos apareció en las planicies de Utah, en Estados Unidos, de 800 m de altura, y viajó 65 km durante 7 horas. Otro apareció en la orilla del desierto de Sonora, en México, se mantuvo estacionario y activo por un lapso de 4 horas.

Usualmente, los remolinos de tierra resultan de la estratificación térmica del aire y aparecen en condiciones de mucho calor y cielos despejados, como los desiertos del mundo; cientos de informes provienen de los desiertos de Estados Unidos, México, Sudán, Egipto, Arabia Saudita, Iraq y Etiopía, entre otros. A diferencia de los tornados, un remolino de tierra no tiene una nube madre que lo acompañe. Las características generales de los tornados, trombas marinas y remolinos de tierra se muestran en la Tabla 2.1.

2.2. GÉNESIS DE LOS TORNADOS

2.2.1. Divergencia y vorticidad

La dinámica atmosférica y los procesos que ocurren en ésta pueden ser discutidos en términos de divergencia y vorticidad.

Considérese una partícula de fluido (por ejemplo, aire) con cierta forma, es fácil demostrar que lo más que puede pasar, desde el punto de vista de la mecánica de fluidos, es una de tres posibilidades: cambio de posición, trasladándose con la misma orientación y forma; cambio de orientación, sin trasladarse o deformarse; se deforma, sin rotar o trasladarse. Cualquier otra cosa puede explicarse como una combinación de estas tres acciones simples. La divergencia es lo que caracteriza a la tercera transformación, mientras que la vorticidad queda definida por la segunda transformación. En términos generales, la divergencia es una medida de la contracción o expansión de una partícula de fluido y la vorticidad es una medida de la rotación de la partícula de fluido. En un flujo bidimensional, la expresión matemática para la divergencia horizontal viene dada por:

$$\text{div } \vec{V} = \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \quad (2.2.1)$$

dónde $\vec{\nabla}$ es el operador nabra, u y v son las componentes horizontales de la velocidad y A es el área ocupada por el fluido considerado. El concepto de “divergencia” se refiere a la “densidad” de un campo vectorial, es decir, describe situaciones que producen acumulación (convergencia, confluencia, $\text{div } \vec{V} < 0$) o vacío (divergencia, difluencia, $\text{div } \vec{V} > 0$) en un campo vectorial. Por otra parte, la vorticidad se define como el rotacional de un campo vectorial, es decir:

$$\text{rot } \vec{V} = \vec{\nabla} \times \vec{V} \quad (2.2.2)$$

dónde $\text{rot } \vec{V}$ es una cantidad vectorial. Para fines de la dinámica atmosférica y a escala sinóptica interesa fundamentalmente la rotación alrededor de un eje vertical. La vorticidad queda definida por:

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.2.3)$$

Cuando la vorticidad es positiva ($\zeta > 0$) se dice que es ciclónica y cuando es negativa ($\zeta < 0$) se dice que es anticiclónica. La vorticidad puede medirse respecto a un sistema de coordenadas absoluto, llamándose vorticidad absoluta y denotándose por η ; o se puede medir respecto a la Tierra, llamándose vorticidad relativa y denotándose por ζ . La vorticidad absoluta toma en cuenta el giro de la Tierra, es decir, considera la fuerza de Coriolis. La vorticidad absoluta puede reescribirse en términos de la variación con el tiempo mediante la ecuación de continuidad que establece la mecánica de fluidos:

$$\frac{d\eta}{dt} = -\eta \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (2.2.4)$$

dónde η es la vorticidad absoluta, u, v, w son las componentes de la velocidad del flujo, ρ es la densidad del aire y P es la presión. El primer sumando del segundo miembro de la ecuación es el término de la divergencia y establece que la vorticidad cambia debido a la divergencia (o convergencia) horizontal. En los movimientos de escala sinóptica, este término es el más importante, ya que determina los movimientos verticales del aire en la atmósfera que son los que determinan el clima.

Todos los movimientos atmosféricos se encuentran conectados de algún modo. Cualquier movimiento horizontal produce un movimiento vertical y viceversa. Una acumulación de aire en un punto del planeta (en superficie o altura) se compensa con un movimiento vertical hacia arriba (o hacia abajo).

Los movimientos son producidos por la variación de la presión atmosférica, la cual es ocasionada por el desigual calentamiento de las distintas partes de la superficie terrestre. Estas variaciones horizontales de presión sobre la superficie suponen un movimiento compensatorio que desplaza el aire desde las zonas de mayor presión a las de menor presión.

A partir de la ecuación de vorticidad se deduce que la vorticidad positiva (es decir, rotación ciclónica o anti-horario) en el aire está asociada a la convergencia y al movimiento ascendente. Por tanto, en una región de baja presión existirá convergencia y movimiento vertical ascendente; mientras que en una zona de alta presión hay divergencia y movimiento vertical descendente. Esto se muestra en la figura que aparece a continuación.

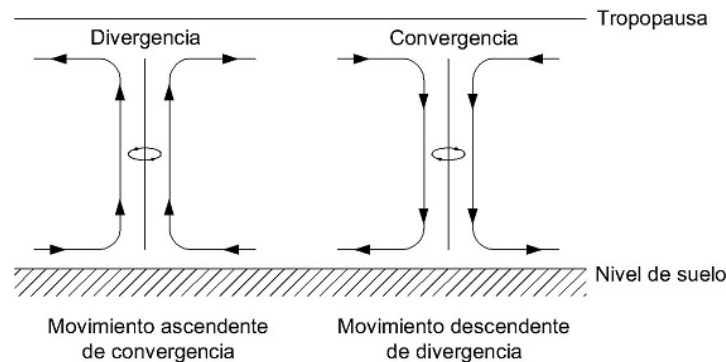


Figura 2. 1. Convergencia y divergencia de los sistemas atmosféricos

Las altas presiones indican movimiento vertical descendente, y normalmente se asocian con cielos despejados; las bajas presiones indican movimiento vertical ascendente y están asociados a la formación de nubes y posibles precipitaciones.

2.2.2. Procesos convectivos

Se llama convección al transporte de calor (o de otras propiedades) por el movimiento del aire generalmente a lo largo de la vertical. Las condiciones necesarias para que se presente la convección son: humedad e inestabilidad. La humedad se refiere al vapor de agua contenido en un volumen de aire, mientras que la inestabilidad⁴ se refiere al movimiento vertical del aire, particularmente al movimiento de ascensión. La fuerza motriz que produce el movimiento vertical procede del sol. Los rayos solares producen un aumento de la temperatura y, por tanto, de la energía interna de la atmósfera, que es proporcional a su energía potencial de gravitación. Una parte de esa energía potencial se transforma en energía cinética o energía de movimiento. En general esta transformación tiene lugar por expansión y contracción, que en la atmósfera están ligadas al movimiento vertical. A causa del campo de gravitación, el aire ascendente debe ser menos denso y más caliente, por término medio, que el aire descendente que es más frío, lo que significa que baja el centro de gravedad de todo el sistema. En su movimiento ascendente la masa de aire caliente irá enfriándose hasta que alcanza el nivel de condensación, en que la masa se satura y su temperatura es la del punto de rocío. A partir de ahí se desarrolla una nube, que por su especial naturaleza se conoce por nube convectiva, celda convectiva o simplemente “cumulonimbus”.

Las nubes convectivas pueden formarse por los siguientes procesos en el ambiente, que hacen que el aire sea inestable:

- Calentamiento del suelo por radiación solar directa
- Aire frío en los niveles altos
- Calentamiento de aire en niveles bajos al moverse sobre una superficie más caliente

La nube convectiva produce invariablemente una tormenta eléctrica.

2.2.3. Tormentas eléctricas

La “tormenta eléctrica” se define como un fenómeno atmosférico de naturaleza local y de relativamente corta duración, siempre acompañada de rayos y truenos. Generalmente contiene rachas de vientos fuertes, lluvia concentrada y en ocasiones granizo.

En una tormenta eléctrica es posible distinguir tres fases: (1) desarrollo, (2) madurez y (3) disipación. La fase de “desarrollo” comienza con una corriente ascendente de aire caliente y, por tanto, menos denso que el medio ambiente circundante. En esta fase la nube crece verticalmente y en menor medida aumenta sus dimensiones horizontales. En la fase de “madurez” las gotas y cristales de hielo de la nube aumentan de tamaño y número a medida que se condensa más vapor de agua en la fuerte corriente ascendente. Con el tiempo las partículas crecen tanto que su velocidad terminal supera a la velocidad de la corriente ascendente y comienza la precipitación en la forma de aguacero de grandes gotas y granizo. Se observa que la aparición de lluvia marca el final del periodo de crecimiento de la nube. Finalmente, en la etapa de “disipación”, las furiosas corrientes ascendentes y descendentes de las fases inicial y de madurez son reemplazadas por corrientes descendentes más suaves que finalmente se extienden por todas las partes de la nube. A medida que se reduce la cantidad total de agua liberada por condensación, el fuerte aguacero da paso a una lluvia ligera. El aire descendente produce un descenso temporal en la temperatura de la nube, pero al cesar el movimiento vertical el aire de la nube adquiere gradualmente la temperatura del ambiente y desaparece gradualmente, como se indica en la Figura 2.2.

⁴ La inestabilidad se mide con un parámetro llamado CAPE ó “energía potencial convectiva disponible”, por sus siglas en inglés.

Es importante mencionar que las corrientes descendentes que surgen en la etapa de madurez de la tormenta, chocan contra el suelo y divergen hacia afuera, para producir un rasgo característico de las tormentas eléctricas: viento superficial con rachas fuertes que soplan lejos de la zona de fuerte lluvia. A este último fenómeno descrito se le llama “microráfaga”⁵. Wakimoto (1982) propuso cuatro estados para describir la corriente descendente (Figura 2.3):

- Etapa formativa
- Etapa inicial de madurez
- Etapa final de madurez
- Etapa de disipación

La corriente descendente coincide con la etapa de madurez de la tormenta convectiva y genera vorticidad vertical que recorre una gran distancia desde el origen.

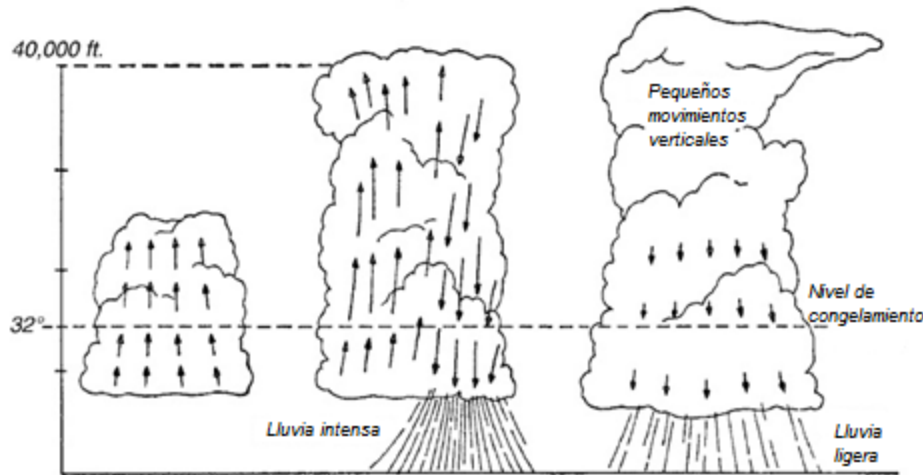


Figura 2.2. Ciclo de vida de una tormenta eléctrica: 1) Fase de desarrollo, 2) Fase de maduración y 3) fase de disipación. Las flechas indican el sentido del movimiento de la corriente de aire

El mecanismo de elevación de las masas de aire descrito anteriormente no se puede mantener por procesos internos solos, se ha tenido que suponer lo que sucedería si ocurriera la elevación. Los factores externos que activan el mecanismo de elevación, y que hacen posible las tormentas, son los siguientes:

- Levantamiento forzado sobre las montañas
- Regiones localizadas de exceso de calentamiento de la superficie
- Frentes (límites entre las masas de aire con diferentes propiedades térmicas)
- Frentes de ráfagas (ráfagas frías de otras tormentas)
- Líneas secas (límites entre las masas de aire con diferentes contenidos de humedad)

⁵ En aeronáutica se utiliza el término “microburst”.

Las tormentas derivadas de los primeros dos casos se conocen como tormentas de masa de aire, ya que se producen dentro de una misma masa de aire, y usualmente no son tormentas severas. Las tormentas producidas por los “frentes”⁶ generan tormentas severas, y en consecuencia, tornados.

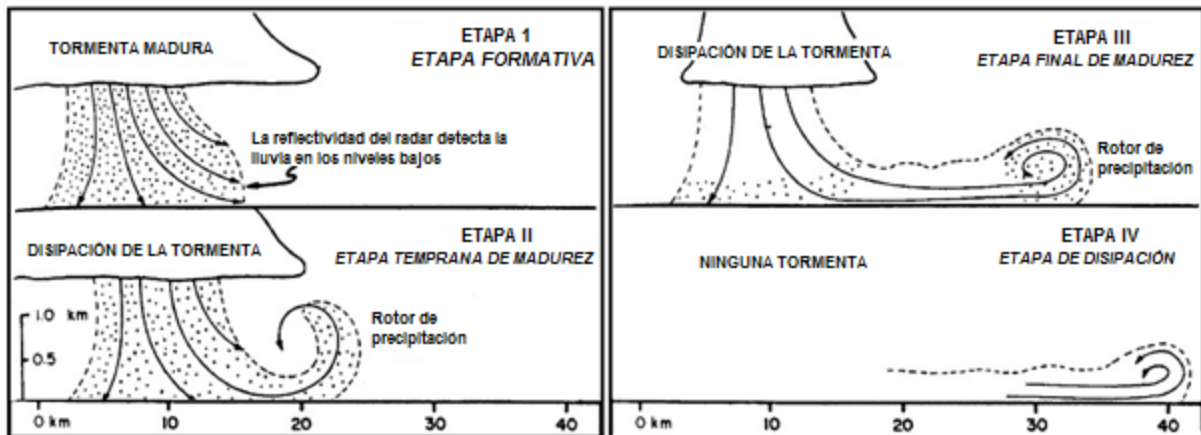


Figura 2. 3. Etapas de la corriente descendente en una tormenta eléctrica. La corriente descendente con velocidades de gran intensidad constituye el fenómeno de “microráfaga” (Wakimoto, 1982)

Una tormenta eléctrica aislada, tal como se acaba de describir, constituye un hecho poco frecuente. La tormenta eléctrica más bien se presenta en grupos de celdas, cada una de las cuales se encuentra en un diferente estado de su ciclo de vida. Los diferentes grupos en que usualmente tienden a concentrarse las celdas convectivas son:

- Una celda
- Múltiples celdas: conglomerado de múltiples celdas (cluster multiple cell) y línea de múltiples celdas (Squal line)
- Supercelda

La Figura 2.4 muestra los diferentes grupos de tormentas eléctricas así como la fase en la que se encuentra. En esta figura se puede apreciar que las nubes se agrupan e interrelacionan para evolucionar de manera individual y en el conjunto. Cada celda tiene un ciclo de vida pero el grupo persiste y en él hay celdas dominantes en estado maduro, mientras que otras se encuentran en fase de disipación y otras se encuentran en estado de desarrollo.

Finalmente, la clasificación en cuanto a las condiciones de mesoescala es en dos tipos: “las tormentas mesociclónicas” y “tormentas no mesociclónicas”. Las tormentas mesociclónicas son las formadas por las tormentas eléctricas supercelda, mientras que las tormentas no mesociclónicas son las formadas por las tormentas eléctricas de una celda y múltiples celdas. Las tormentas mesociclónicas producen “tornados mesociclónicos” o “supercelda”, mientras que las tormentas no mesociclónicas producen

⁶ Un frente es una zona de interacción entre dos masas de aire con características diferentes de temperatura y/o humedad. Se distinguen dos tipos de frentes: cálido y frío. El frente cálido se produce cuando una masa de aire caliente avanza hacia latitudes mayores y su borde delantero asciende sobre el aire más frío. Si hay humedad suficiente se observan todos los géneros de nubes estratiformes (St, Sc, Ns, As, Cs) las cuáles podrían provocar precipitaciones de tipo continuo. Por otra parte, un frente frío se produce cuando una masa de aire frío avanza hacia latitudes menores y su borde delantero se introduce como una cuña entre el suelo y el aire caliente. Al paso de este sistema, se pueden observar nubes de desarrollo vertical (Sc, Cu, Cb) las cuales podrían provocar chubascos o nevadas si la temperatura es muy baja. Durante su desplazamiento la masa de aire que viene desplazando el aire más cálido provoca descensos rápidos en las temperaturas de la región por donde pasa.

“tornados no mesociclónicos” o “landspouts”. Los tornados más fuertes y violentos que causan gran destrucción son los generados por las tormentas mesociclónicas o superceldas.

Hasta este momento se ha analizado la formación de nubes convectivas, que al agruparse forman tormentas eléctricas, lo cual es requisito básico para la formación de los tornados. Sin embargo, no se ha explicado cómo es que la nube adquiere la rotación, ni cómo es que el tornado se las arregla para hacer una conexión entre la nube y el suelo tan rápidamente.

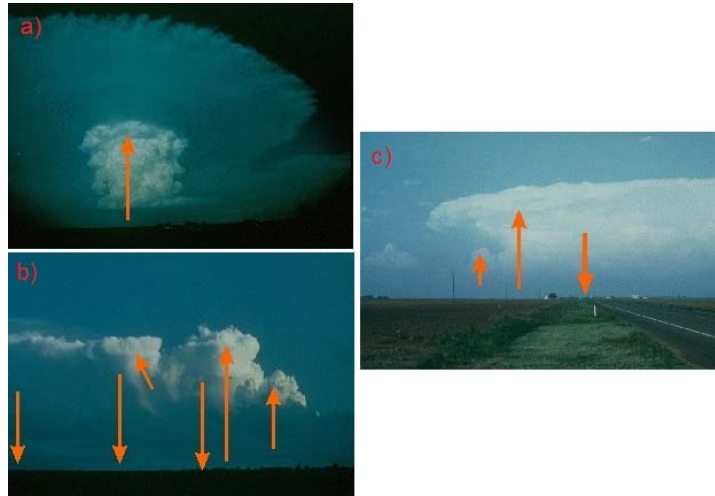


Figura 2. 4. Agrupación de nubes convectivas: a) una celda, b) multicelda y c) supercelda. Las flechas indican el sentido de la corriente de aire. Una corriente ascendente indica que la nube está en estado de desarrollo, mientras que una corriente descendente indica que la nube está en estado de madurez o disipación.

2.2.4. Condiciones necesarias para la formación de un tornado

A pesar de los grandes avances en la meteorología, hoy en día no es posible explicar con claridad, o al menos cuantitativamente, la génesis y el desarrollo de los tornados. Se aceptado una serie de condiciones que son necesarias para la génesis de los tornados, pero éstas no garantizan su aparición. Estas condiciones establecen que en la atmósfera exista una fuente de humedad y que existan mecanismos de activación de la corriente de aire ascendente ya sea a través de la elevación o del calentamiento de la superficie y que exista una zona de flujos que se encuentran con suficiente vorticidad, durante varias horas y en escala de kilómetros. Estas condiciones son propias de una tormenta eléctrica generada por frentes, donde chocan masas de aire frío y caliente, o en zona de ráfagas, en la vecindad de huracanes. Algunos autores (Caruso y Davies, 2005; Davies, 2004; Doswell III, 2001; Doswell III y Burgess, 1993; Funk, 2002) han sugerido “factores” adicionales para la génesis y el desarrollo de tornados mesociclónicos y no mesociclónicos que se enlistan a continuación.

2.2.5. Tornados mesociclónicos

Los tornados supercelda o asociados a un mesociclón son los más desastrosos, también son fenómenos que han sido mayormente observados en los instrumentos meteorológicos, como el radar. También fueron el tipo de tornados que mejor se han comprendido y para los que hay un importante desarrollo

en los sistemas de alerta temprana⁷ dependientes de las imágenes de radar Doppler cuya aparición en sus imágenes tiene peculiaridades que han podido ser inequívocas para registrar su ocurrencia.

Como se mencionó previamente, las tormentas eléctricas mesociclónicas presentan características bien conocidas. Aunque estas características están relacionadas con la génesis de los tornados mesociclónicos o supercelda, no son los factores principales que se necesitan para la aparición. Funk (2002) resume algunos de los que denomina “factores” para la formación de tornados supercelda:

- Desarrollo de una persistente corriente ascendente giratoria
- Desarrollo de una corriente descendente giratoria en el flanco trasero de la tormenta que ayude a generar vorticidad horizontal cerca del suelo
- Desarrollo de vorticidad vertical, en niveles medios, mediante la inclinación de la vorticidad horizontal

El factor determinante en la formación de tornados supercelda (además de la inestabilidad y del mecanismo de activación) es el fuerte flujo de cortante del viento. El flujo de cortante del viento se da generalmente en los frentes (usualmente los frentes fríos), donde chocan las masas de aire frío y caliente. El flujo de cortante del viento puede configurar un rotor, o superficies cilíndricas de aire que giran alrededor de los ejes horizontales que se encuentran alineados normalmente a la dirección del viento. El aire que gira en los rotors se dice que tiene vorticidad horizontal. La fuerte corriente ascendente deforma el rotor hacia arriba, formando dos vórtices con rotación contraria o un dipolo. La vorticidad horizontal se transforma en vorticidad vertical mediante la fuerte corriente ascendente, tal como indica la Figura 2.5.

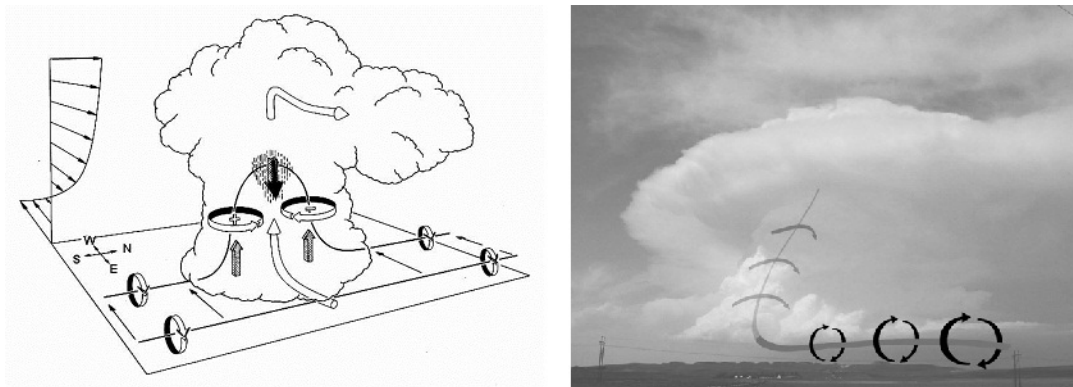


Figura 2. 5. La vorticidad vertical que adquiere la supercelda es mediante la inclinación de la vorticidad horizontal asociada al flujo cortante del viento en el ambiente (Doswell III, 2001; Markowski y Richardson, 2009)

La Figura 2.5 muestra dos vórtices, uno con giro ciclónico, y otro con giro anticiclónico. La corriente de aire descendente entre los vórtices puede dividir la tormenta en dos, pero esto no siempre sucede. La dinámica de viento dentro de la tormenta tiende a reforzar el vórtice ciclónico y debilitar el vórtice anticiclónico, y el vórtice ciclónico desarrolla en un gran elemento giratorio dentro de la tormenta, conocido como un mesociclón. La vorticidad en el mesociclón puede aumentar mediante la elevación vertical y el estiramiento del vórtice, esto causa contracción horizontal y convergencia, y el consiguiente aumento en la rotación es para conservar el momento angular. El aire frío y seco que se

⁷ Actualmente es posible efectuar pronósticos con 8 horas de anticipación, sobre la posible aparición de un tornado mesociclónico en algún sitio, mediante el Sistema Regional de Predicción Avanzado (ARPS), desarrollado en el Centro para Análisis y Predicción de Tormentas, existente en la Universidad de Oklahoma.

encuentra en los niveles altos de la tormenta tiende a hundirse, formando una fuerte corriente descendente que ayuda a generar y mantener la vorticidad horizontal a nivel del suelo. En última instancia, la parte interior del vórtice puede girar en una nube embudo, que puede propagarse hacia el suelo para formar un tornado, tal como se muestra en la Figura 2.6.

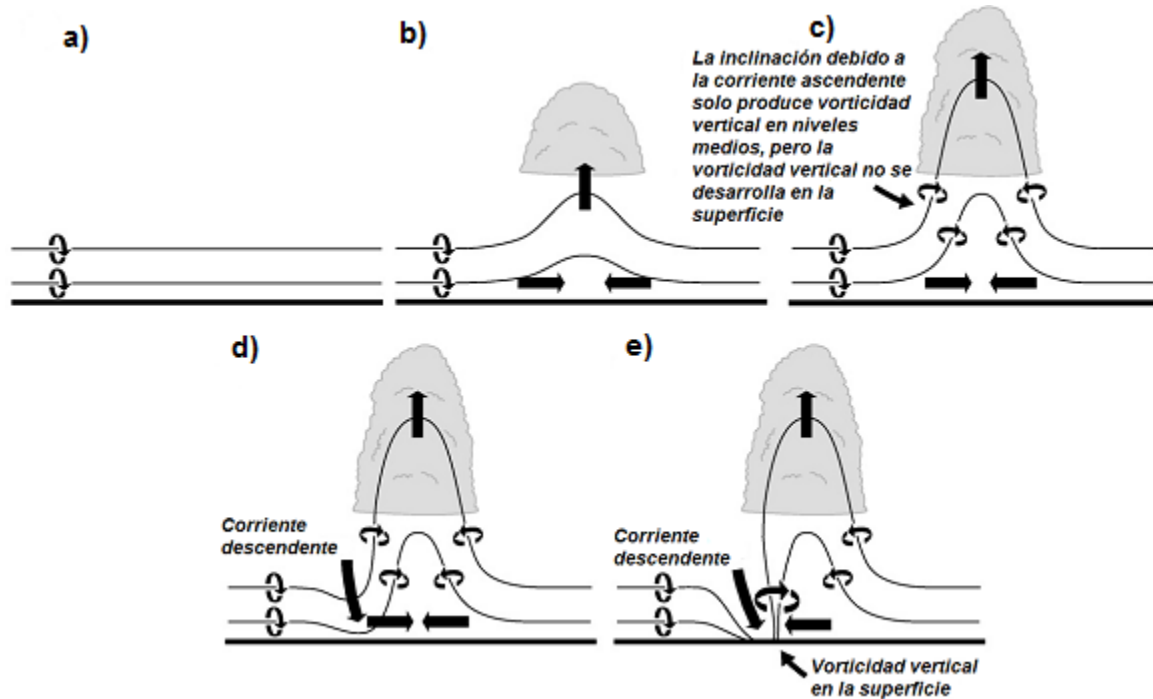


Figura 2. 6. Esquema que muestra la importancia de las corrientes ascendentes y descendentes en la formación y persistencia del flujo de cortante del viento que genera vorticidad vertical y horizontal (Markowski y Richardson, 2009)

La mayoría de los tornados tienen vorticidad positiva o giro ciclónico (es decir, que giran en el mismo sentido de los sistemas de tormentas grandes: en sentido anti-horario en el hemisferio norte), pero algunos han sido conocidos por tener vorticidad anticiclónica.

La caída de presión en el centro de un tornado puede ser del orden de 150-190 mm de Hg, esto provoca que el aire húmedo en la entrada del vórtice alcance la condensación, haciendo que el embudo del tornado sea visible. Los tornados se mueven con una dirección arbitraria y la velocidad (de traslación) queda determinada por el movimiento del aire en la tropósfera inferior. Los vientos que se presentan al nivel del suelo son una combinación de la velocidad de traslación y de la velocidad de rotación. Para los tornados con giros ciclónicos, las velocidades más fuertes se encuentran en el flanco derecho del tornado, donde las velocidades de rotación y de traslación se superponen. El vórtice de un tornado supercelda tiene un diámetro del orden de cientos de metros. Los vientos más rápidos pueden llegar a 50-140 m/s.

2.2.6. Tornados no mesociclónicos

En ocasiones los tornados se desarrollan en sistemas convectivos de múltiples celdas (conglomerado de múltiples celdas y líneas de múltiples celdas). A este tipo de tornados se les conoce como “tornados no supercelda”, “tornados landspout”, “mesovórtices”, “gustandos” o “tornados no mesociclónicos”.

Los tornados no mesociclónicos tardaron más en ser entendidos debido a su menor extensión horizontal y su breve ciclo de vida. Davis (2004) resumió algunos de los “factores” que propician la formación de este tipo de tornados, a saber:

- Cambio del viento con un movimiento lento o estacionario en el límite de la tormenta con bolsas de vorticidad vertical
- Desarrollo de corrientes ascendentes de la tormenta (en la convergencia directamente sobre los límites) que pueden fortalecer la vorticidad vertical de nivel bajo dentro de los tornados si las corrientes ascendentes están apropiadamente localizadas con la vorticidad disponible.

La Figura 2.7 muestra gráficamente la forma general en la que se ha observado la generación y ciclo de vida de los mismos. La línea negra representa el límite de la convergencia de los vientos. Las flechas horizontales indican el flujo del viento de superficie. Las flechas verticales indican corrientes ascendentes. Los vórtices de nivel bajo están señalados con letras (Wakimoto y Wilson, 1989).

King, et al., (2003) analizaron siete casos de tornados no mesociclónicos y encontraron las siguientes características comunes:

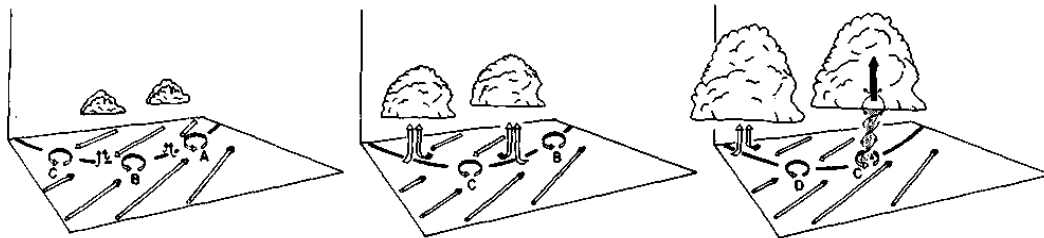


Figura 2. 7. Modelo esquemático del ciclo de vida de un tornado “no mesociclónico” (Wakimoto y Wilson, 1989)

- Son relativamente débiles causando daños en la escala Fujita con valores F0 -F2
- Ocurren bajo un rápido desarrollo de nubes cumulonimbos
- Ocurren a lo largo de un límite superficial o en un punto donde dos límites o fronteras chocan o se mezclan
- Tienden a moverse a lo largo de límites en superficie, algunas veces contra el flujo medio de la tropósfera

B.D. Lee y Wilhelmson (1997a, 1997b, 2000) realizaron modelación numérica a escala de tormenta (LES) para identificar los mecanismos de generación de este tipo de tornados. Encontraron que a diferencia de los tornados supercelda que se generan en sistemas convectivos con una circulación rotatoria, los tornados no mesociclónicos están asociados a sistemas convectivos que no tienen esa condición.

Concluyeron que algunos frentes fríos se caracterizan por un cambio muy fuerte en la velocidad y dirección del viento a cada lado de la parte frontal. El flujo de cortante del viento horizontal puede desarrollar una serie de pequeños vórtices en el límite de convergencia de las masas de aire. Cuando los vórtices se desarrollan bajo una corriente ascendente, entonces, ésta se encargara de extender el vórtice en una circulación más y más fuerte hasta que se forme un tornado no mesociclónico, tal como se muestra en la Figura 2.8. Bajo estas condiciones se puede esperar no solo un tornado, sino una serie

de tornados que se producen al mismo tiempo a lo largo de una frontera común, es decir, una familia de tornados.

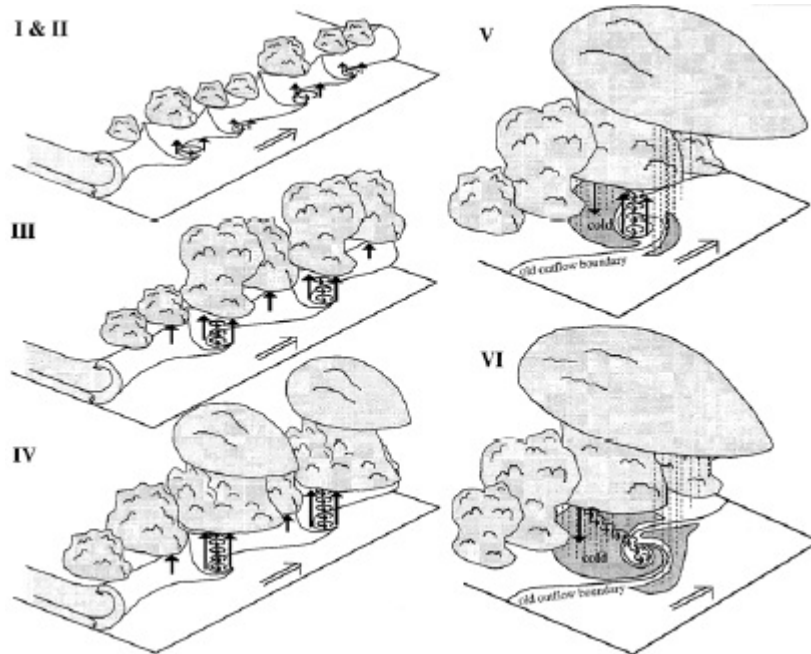


Figura 2. 8. Condiciones ambientales favorables para el desarrollo de los tornados no mesociclónicos (B. D. Lee y Wilhelmson, 1997b)

2.2.7. Escalas de intensidad

La estimación de la intensidad de los tornados se ha realizado como una necesidad de identificar la fuerza de éstos y para poder diferenciar los niveles de peligrosidad que portan. A mediados de la década de los setenta, en los Estados Unidos se adoptó una escala para cubrir esos propósitos, que se denominó "Fujita" en honor a Theodore Fujita, que fue quien la ideó. La escala Fujita fue definida para estimar las velocidades de vientos de los tornados a partir de los daños que dejan, ya que es prácticamente imposible realizar mediciones con dispositivos debido a la alta intensidad de los vientos y a la variación espacial y temporal de la velocidad.

La escala Fujita fue propuesta considerando la importancia de la velocidad de los vientos en un tornado y sus efectos dañinos. Al igual que la escala Saffir-Simpson ideada para medir la intensidad de los huracanes, la escala Fujita fue diseñada a partir de la velocidad del viento y sus efectos sobre estructuras o elementos materiales que toca. Ambas consideran de base la escala Beaufort que fue erigida justamente para estimar la velocidad del viento con fines náuticos.

La escala Fujita cierra la brecha entre la escala de Beaufort, de la fuerza de los vientos, y el número Mach (relación de la velocidad de un objeto con la velocidad del sonido) mediante la conexión del número de Beaufort 12 con el número Mach 1 a través de doce categorías, tal como indica la Figura 2.9. La ecuación que relaciona la velocidad del viento (v en m/s) con la escala de Fujita (F) es:

$$V = 6.30(F + 2)^{3/2}.$$

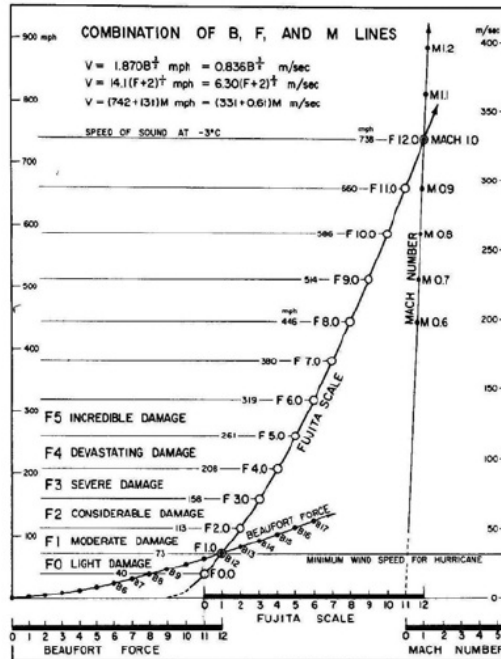


Figura 2. 9. Conexión de la escala de Beaufort y la escala Mach mediante la escala de Fujita

La categoría “F1” en la escala de Fujita es igual a la fuerza del viento “B12” (118 km/h) en la escala de Beaufort, que es la velocidad mínima del viento necesario para actualizar una tormenta tropical a un huracán. La categoría “F12” en la escala de Fujita es igual a “M1” (1,188 km/h) en la escala Mach. Aunque la escala de Fujita llega hasta la categoría “F12”, los tornados más fuertes no superan la categoría “F5” (estimada originalmente para estar entre 421 a 510 km/h).

Tabla 2. 2. Escala de Fujita para tornados, basada en los daños causados

Categoría	Denominación de intensidad	velocidad del viento ⁸ (km/h)	Tipo de daños
F0	Vendaval	72-126	Daños en chimeneas, rotura de ramas, árboles pequeños rotos, daños en señales y rótulos.
F1	Tornado moderado	127-188	Desprendimiento de algunos tejados, mueve coches y camper, arranca algunos árboles pequeños.
F2	Tornado importante	189-259	Daños considerables. Arranca tejados y grandes árboles de raíz, casas débiles destruidas, así como objetos ligeros que son lanzados a gran velocidad.
F3	Tornado severo	260-336	Daños en construcciones sólidas, trenes afectados, la mayoría de los árboles son arrancados.
F4	Tornado devastador	227-420	Estructuras sólidas seriamente dañadas, estructuras con cimientos débiles arrancadas y arrastradas, coches y objetos pesados arrastrados.
F5	Tornado increíble	421-510	Edificios grandes seriamente afectados o colapsados, coches lanzados a distancias superiores a los 100 metros, estructuras de acero sufren daños.

⁸ Las velocidades corresponden al intervalo de observación de 3 segundos. Anteriormente las estaciones meteorológicas de los EUA utilizaban el intervalo de observación de la “la milla más rápida”

En la Tabla 2.2 se pueden apreciar las características de la escala de Fujita, a saber, seis niveles de intensidad o categorías, que van de F0 a F5, una denominación cualitativa, de vendaval a increíble, el rango de velocidad de viento para cada categoría y una breve descripción de daños correspondientes.

Los tornados devastadores en Jarrell, Texas, el 27 de mayo de 1997, y en Moore, Oklahoma, el 3 de mayo de 1999, demostraron a meteorólogos e ingenieros estadounidenses que las estimaciones de los vientos de tornado con la escala de Fujita podían ser demasiado altas. Los resultados se describen en el documento [FEMA-341 \(1999\)](#). Se encontró que la escala de Fujita se basaba solo en la subjetividad sobre el daño causado por un tornado; no reconocía las diferencias en las construcciones y tenía dificultades para aplicarse en ausencia de indicadores de daño y por sobre estimar las velocidades de vientos mayores para F3.

Tabla 2. 3. Escala operacional de Fujita Mejorada

Categorías escala Fujita Mejorada	Rangos de velocidad (km/h)
EF0	105 – 137
EF1	138 – 177
EF2	178 – 217
EF3	218 – 266
EF4	267 – 321
EF5	> 322

La revisión de la “Escala Fujita” dio origen a la “Escala Fujita Mejorada”. La escala de Fujita Mejorada fue elaborada por James McDonald y Kishor Mehta, del Centro de Ingeniería y Ciencia del Viento de la Universidad Tecnológica de Texas ([James R. McDonald y Mehta, 2004](#)). Fue ideada para ser aplicada a una determinada estructura, a edificación individual u otro indicador de daño. Pero también para obtener una clasificación de una ocurrencia de tornado para lo que se deben considerar varios indicadores de daños⁹ (DI). La escala de Fujita mejorada se adoptó oficialmente en los Estados Unidos a partir de febrero de 2007. Los rangos de velocidad del viento se muestran en la Tabla 2.3.

[Doswell, Brooks y Dotzek \(2009\)](#) consideraron que la adopción de la escala Fujita Mejorada fue apresurada y presenta algunas desventajas, ya que solo considera construcciones típicas de los Estados Unidos, y por tanto, no tiene un carácter universal, es decir, solo es válido para aplicarse en ese país. Por el contrario, la escala Fujita se basa únicamente en las velocidades de vientos y por lo tanto no depende de las prácticas de construcción de un lugar determinado.

2.3. DINÁMICA DEL TORNADO

Los tornados aunque tienen diferente mecanismo de generación, meteorológicamente corresponden al mismo fenómeno. La estructura del campo de viento de un tornado ha sido un tema de investigación entre la comunidad científica desde hace varias décadas. Un gran número de trabajos teóricos y experimentales han sido efectuados. A partir de estos estudios se han generado conocimientos básicos que permiten explicar la estructura del campo de viento asociado a un tornado. Estos resultados se presentan a continuación.

⁹ Los indicadores de daño pueden consultarse en la siguiente dirección electrónica: <http://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/ef-scale.html>

2.3.1. Antecedentes

Las observaciones de los tornados de [Hoecker \(1960\)](#), de los remolinos de tierra de [Sinclair \(1964; 1969, 1973\)](#) y de los vórtices de laboratorio de [Chang \(1969, 1971\)](#) sugirieron que el movimiento de las masas de aire pueden ser descritos en términos de un sistema de referencia cilíndrico (R, radial, T, tangencial y W, vertical) móvil, cuyo centro coincide con el origen del vórtice.

[Hoecker \(1960\)](#), mediante el uso de imágenes de video, observó que el perfil de velocidad tangencial en un tornado es cualitativamente similar a la de un vórtice combinado de Rankine y para alturas cercanas a la superficie del suelo, el comportamiento difiere un poco de éste. También estimó la subpresión que ocurre en el centro del vórtice mediante la ecuación del balance ciclostrófico propuesta por [Glasser \(1960\)](#); y determinó que el excesivo gradiente de presión en el interior del vórtice ocasiona convergencia horizontal uniforme en las masas de aire que se encuentran fuera del vórtice, y divergencia vertical de éstas el interior del vórtice.

[Sinclair \(1964; 1969, 1973\)](#) logró medir la distribución de temperaturas en remolinos de tierra en el desierto de Tucson, Arizona, y observó que la temperatura de las masas de aire en el interior del vórtice son ligeramente superiores (~ 3.5 a 5.0 °C) a las masas de aire circundante. De lo anterior se deduce que las masas de aire en el interior del vórtice, al tener una mayor temperatura tienen una menor densidad, y por tanto, existirá un ligero movimiento ascendente. También encontró que en el centro del vórtice existe la presencia de una corriente de aire descendente ligeramente más fresco ($\sim 0.5 - 1.0$ °C) que la corriente cálida ascendente en el centro del vórtice. Las observaciones anteriores permitieron sugerir que el movimiento de las masas de aire en un tornado puede ser asociado a la combinación de cinco flujos potenciales teóricos:

- Un flujo vertical de aire caliente ascendente
- Un flujo vertical de aire frío descendente
- El flujo asociado a un vórtice helicoidal de Rankine
- Vórtice libre con eje vertical coincidente con el de Rankine
- Flujo paralelo perpendicular al eje del vórtice

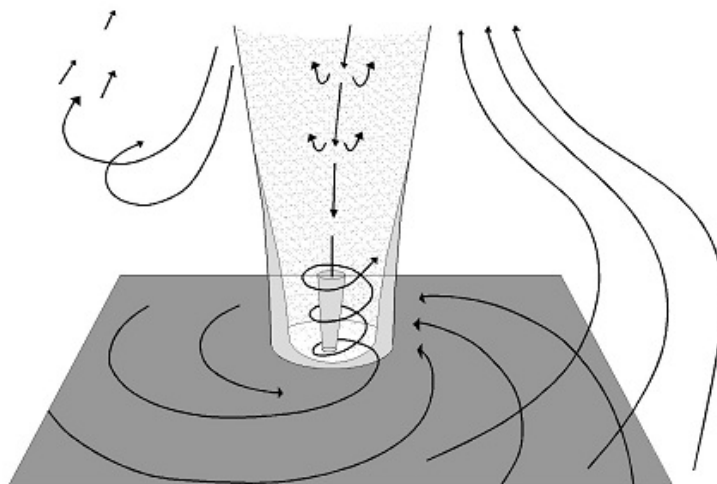


Figura 2. 10 Combinación de cinco flujos potenciales teóricos

La Figura 2.10 muestra la superposición de los cinco flujos teóricos. La combinación de estos cinco flujos generaría un campo de velocidades de viento similar al de un tornado. Sin embargo, el comportamiento del campo de velocidades y la física implicada son mucho más complejos. La complejidad, en gran parte, se debe a la presencia de una frontera sólida, como el suelo, y la naturaleza caótica del entorno meteorológico. Se sabe que en un vórtice forzado, el campo de velocidad está dominado por la velocidad tangencial y las fuerzas centrífugas. Sin embargo, cuando una frontera sólida está presente, éste equilibrio se destruye por el retraso del movimiento tangencial cerca de la frontera.

En años posteriores se realizaron una serie de investigaciones (Kuo, 1966, 1969, 1971; Turner, 1966) en las que se propusieron modelos de flujos tridimensionales en la capa límite de un vórtice tipo tornado que tiene una estructura similar a la de un vórtice combinado de Rankine, a saber, una región dentro del núcleo con vorticidad y una región externa al núcleo de vorticidad pequeña o nula. La complejidad que involucró la solución se debió a la no linealidad de las ecuaciones y al hecho de que los perfiles de velocidad tangencial y radial cambian con la distancia radial. Estas soluciones, aunque limitadas, indicaron de manera teórica la estructura del campo de flujo de un tornado y expusieron la distribución de las componentes de la velocidad con la altura, tomando en cuenta los mecanismos físicos impuestos en la Figura 2.10.

Recientemente, los esfuerzos realizados en la obtención de datos con radar Doppler en tornados reales han permitido calibrar modelos numéricos y de laboratorio que han mostrado aspectos relevantes sobre la estructura del campo de flujo de un tornado.

2.3.2. Estructura del campo de flujo del tornado observado en las simulaciones numéricas y de laboratorio

Durante los años de 1960 a 1970, se iniciaron investigaciones para simular físicamente a un tornado en el laboratorio y estudiar sus características dinámicas. De acuerdo con la revisión crítica de los simuladores de laboratorio de tornados por Davies-Jones (1976), se estableció que para poder simular un tornado hay dos factores importantes a considerar:

- Un medio de producción de vorticidad
- Una forma de concentrar la vorticidad por la convergencia

Sin embargo, de los muchos simuladores revisados, Davies-Jones llegó a la conclusión de que el simulador de Ward era el más realista.

El simulador de tornados tipo Ward (1972) consiste en una cámara cilíndrica que está delimitada en la parte superior por una rejilla y un ventilador de succión, el cual endereza el vórtice que se genera en la región de convección, y una pantalla giratoria que proporciona circulación al flujo de aire en la región de convergencia en la parte inferior. El esquema del simulador de tipo Ward se ilustra en la Figura 2.11. La configuración inicial del simulador tipo Ward solo es capaz de producir tornados de un solo vórtice. Con el tiempo, este arreglo se convertiría en el prototipo de los futuros simuladores de tornado, como el de la Universidad de Purdue (Church, Snow, y Agee, 1977; Lund y Snow, 1993), el de la Universidad de Oklahoma (Davies-Jones, 1976; Diamond y Wilkins, 1984; M. C. Jischke y Parang, 1974; Leslie, 1977), el de la universidad de Texas (Mishra, James, y Letchford, 2008a, 2008b) y el de la universidad de Iowa (Fouts, 2003; F. Haan Jr, Balaramudu, y Sarkar, 2009; F. L. Haan Jr, Sarkar, y Gallus, 2008; Sarkar, Haan, Balaramudu, y Sengupta, 2006; Wang, 2002) que mejorarían la similitud entre las simulaciones de laboratorio y los eventos de tornado a gran escala.

La dinámica del vórtice en el interior del simulador de laboratorio queda controlada por tres parámetros adimensionales, que se definen como:

$$Re_r = \frac{Q'}{2\pi\nu} \quad S = \frac{r_1\Gamma}{2Q'h} = \frac{\Gamma}{2Q'a} \quad a = \frac{h}{r_1} \quad (2.3.1)$$

donde Re_r es el número de Reynolds radial, S es el índice de vorticidad y a es la relación de aspecto. En las ecuaciones, Q' es la relación del volumen de flujo por unidad de longitud axial, ν es la viscosidad cinemática, r_1 es el radio del dominio, Γ es la circulación y h es la altura de entrada.

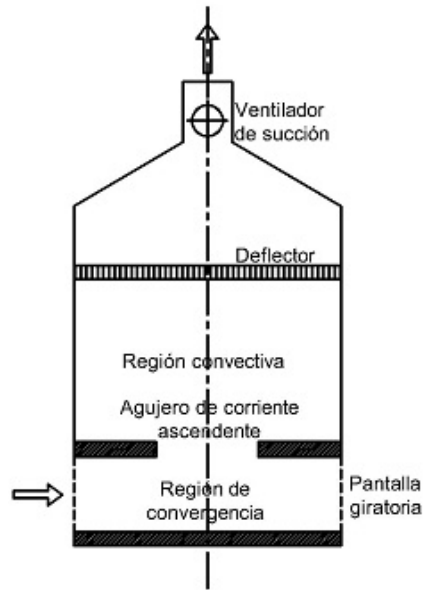


Figura 2. 11. Esquema conceptual de la Cámara de Vórtice de Tornado (TVC) de Ward (Ward, 1972)

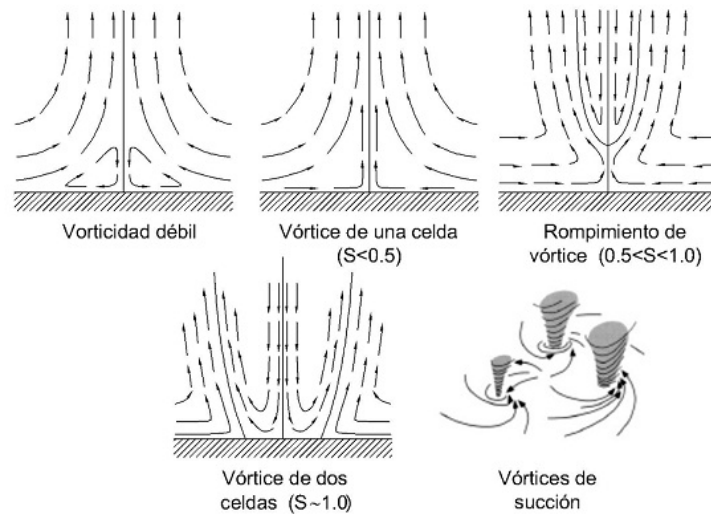


Figura 2. 12. Valores del índice de vorticidad y su correlación con la estructura del campo de flujo del tornado

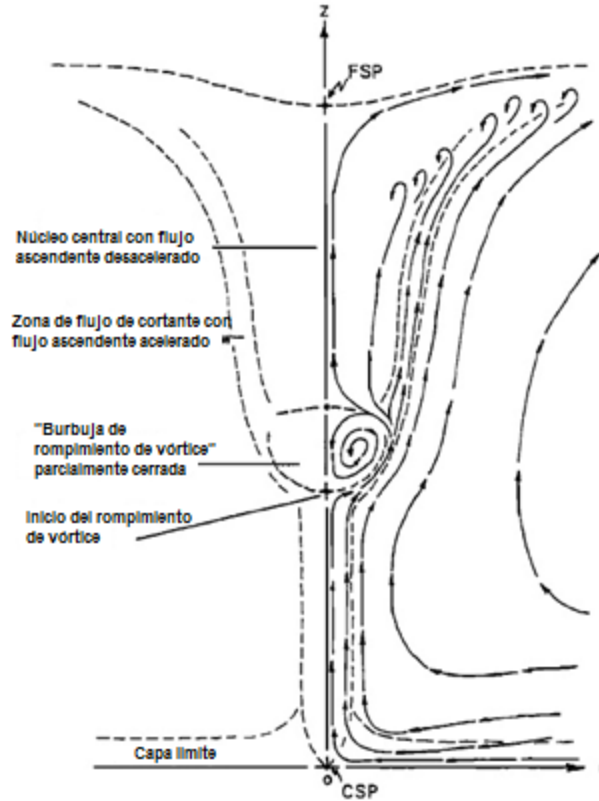


Figura 2. 13. Flujo de recirculación que surge en el fenómeno de rompimiento de vórtice (Snow, 1982)

El índice de vorticidad, S , es el parámetro más significativo, ya que determina la configuración del campo de flujo, es decir, la aparición de un vórtice, dos vórtices o múltiples vórtices, tal como indica la Figura 2.12. El índice de vorticidad, S , se define como la relación entre la energía de rotación y la energía de convección que hay en el vórtice y su magnitud se correlaciona bien con la estructura del campo de flujo del tornado. Rotunno (1979) informó que para valores pequeños del índice de vorticidad aparecen vórtices estrechos con flujo axisimétrico. A medida que aumenta el valor del índice de vorticidad aparece un flujo de recirculación en el centro del vórtice que ocasiona que el vórtice se descomponga en dos o más vórtices. Este fenómeno se conoce como "rompimiento de vórtice" (Vortex Breakdown) y se ilustra en la Figura 2.13. Davies-Jones (1973) explicó que el fenómeno de rompimiento de vórtice es atribuible a circulaciones altas porque en ese momento no se puede generar suficiente convergencia radial para contrarrestar la fuerza centrífuga. La Figura 2.12 muestra la estructura del flujo en la interfaz del vórtice y el suelo para distintos índices de vorticidad. Para índices menores a 0.5 se producen vórtices de una celda; para valores comprendidos entre 0.5 y 1.0 aparece la transición entre vórtices de una celda y dos celdas, y para valores mayores a 1.0 la estructura es de dos vórtices.

Por otra parte, las simulaciones numéricas de los vórtices de tornado se implementaron con el avance de la tecnología informática, y a medida que se desarrollaron, proporcionaron formas eficaces de análisis de los flujos de vórtices. Las simulaciones numéricas se pueden dividir en dos grandes categorías: simulación a escala de tormenta y simulación a escala de tornado (Nolan y Farrell, 1999). Las simulaciones a escala de tormenta (LES) son modelos esencialmente meteorológicos que tienden a reproducir el patrón de tormentas y representan una excelente herramienta en el estudio de la génesis

de los tornados. Las simulaciones a escala de tornado son modelos de ingeniería destinados a estudiar la interacción de la parte inferior del vórtice del tornado con la superficie del suelo.

Harlow y Stein (1974) desarrollaron el primer modelo numérico para simular vórtices de tornado en un simulador de tipo Ward. El modelo bidimensional axisimétrico produjo vórtices de una celda y dos celdas utilizando la condición de deslizamiento en la frontera inferior de análisis. Rotunno (1977, 1979) fue capaz de reproducir el rompimiento de vórtice (Vortex Breakdown) utilizando una condición de no deslizamiento en la frontera inferior de análisis. Las simulaciones mostraron que el tamaño del vórtice es una función del índice de vorticidad y es casi independiente del número de Reynolds, confirmando así los resultados experimentales de Ward (1972) y Davies-Jones (1973). Rotunno (1984) simuló múltiples vórtices mediante la introducción de ruido aleatorio a un modelo tridimensional de tipo Ward y observó vórtices secundarios con incremento de 20-30% de la velocidad tangencial que el flujo medio. Wilson y Rotunno (1986) simularon un índice de vorticidad bajo ($S = 0.28$) de un vórtice laminar que coincidió con los resultados experimentales de Baker (1981). Los resultados han identificado cuatro regiones principales en el flujo de vórtice de una sola celda con bajo índice de vorticidad, tal como se muestra en la Figura 2.14. Encontraron que el vórtice era en su mayoría no viscoso y rotacional con una pequeña subcapa viscosa cuya profundidad disminuye hacia el eje del vórtice y una región delgada viscosa a lo largo del eje del vórtice. También indicaron que el índice de vorticidad es el parámetro más importante en el modelado de la estructura del vórtice.

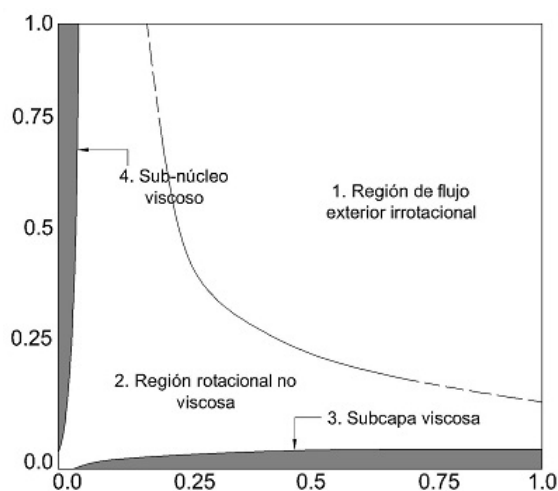


Figura 2. 14. Principales regiones en el flujo de vórtice de tornado de una celda (Wilson y Rotunno, 1986)

Lewellen, et al., (1997) y Lewellen, et al., (2000) modelaron un flujo de vórtice de tornado a escala real en un dominio de $1\text{km} \times 1\text{km} \times 2\text{km}$ con simulación LES y analizaron la dinámica del flujo cerca de la superficie del suelo con énfasis en las condiciones para la formación de múltiples vórtices, así como de mecanismos para generar velocidades extremadamente altas y los efectos de la traslación del vórtice. Los resultados mostraron la influencia de la turbulencia en la generación de altas velocidades del viento cerca del suelo y la producción de múltiples vórtices para altos índices de vorticidad. Los resultados mostraron que la velocidad máxima se presenta a menos de 50 m sobre la superficie del suelo. También observaron la formación de vórtices secundarios más pequeños cerca del vórtice de una celda. Encontraron que el modelo más simple que satisface la ecuación de Navier-Stokes para la simulación de tornado es el vórtice combinado de Rankine. Xia et al. (2003) extendió la simulación para incluir la compresibilidad y coincidió con los resultados teóricos de Fiedler (1997), y concluyó

que es poco probable que los efectos de compresibilidad cambien la dinámica básica del flujo de vórtice cerca del suelo.

Nolan y Farrell (1999) estudiaron la estructura y dinámica de un vórtice de tornado con un modelo de flujo incompresible axisimétrico. Encontraron que el momento angular en la profundidad del vórtice y la viscosidad turbulenta determinan la estructura del tornado. También establecieron que la estructura y la dinámica de los tornados reales dependen de la viscosidad turbulenta en la capa límite y observaron que un parámetro adimensional denominado número de vórtice de Reynolds, definido como la relación de la circulación lejana del campo entre la viscosidad turbulenta, es más eficiente que el índice de vorticidad S en la predicción de la estructura del vórtice.

Hangan y Kim (2008) utilizaron el modelo de esfuerzos de Reynolds (RSM) en una simulación numérica controlada con los datos de radar Doppler de tornados reales y mediciones de laboratorio de tornados tipo Ward para investigar la relación del índice de vorticidad con la escala de Fujita. Los resultados mostraron que un tornado de intensidad F4, en la escala de Fujita, corresponde a un índice de vorticidad $S = 2.0$ aproximadamente. Kuai, et al, (2008) extendieron la investigación al incluir los parámetros que afectan el comportamiento del fluido dentro del simulador de tornados tipo Ward. Observaron que a medida que aumenta la rugosidad de la superficie disminuye la velocidad tangencial y tiende a aumentar el radio del vórtice. Encontraron que radio del vórtice es función del índice de vorticidad y la velocidad tangencial máxima depende de la magnitud de la velocidad total del flujo de entrada. Concluyeron que es posible simular numéricamente los vientos en la superficie de un tornado y controlar ciertos parámetros del simulador de laboratorio para obtener las características que reproducen las condiciones del flujo de los tornados reales y que son de interés para los ingenieros.

2.3.3. Principales resultados para fines de Ingeniería estructural

Jischke y Light (1983) utilizaron una versión modificada del simulador de tornados de tipo Ward para estudiar la interacción entre modelos estructurales y el campo de flujo similar a un tornado. Probaron modelos rectangulares y cilíndricos en tres posiciones radiales, de los cuales sólo uno ($r/r_0 \approx 0.27$) se colocó en el interior del vórtice simulado. El índice de vorticidad s , que se probó varió entre 0 y 1, que es el índice correspondiente al tornado de Lubbock, Texas. Los experimentos indicaron que al incrementar la vorticidad al flujo, se puede cambiar significativamente las fuerzas y momentos que se inducen en los modelos, cuando éstas se comparan con las fuerzas de viento ordinario. También concluyeron que, junto con la velocidad tangencial máxima del viento, la ubicación y la orientación de las estructuras con respecto al vórtice del tornado son factores importantes que influyen en la capacidad del tornado para inducir daño.

Bienkiewicz y Dudhia (1993) estudiaron los efectos de la rugosidad en la superficie en el campo de flujo generado por un simulador del tipo Ward para relaciones de vorticidad $S = 0.37$ y 0.5 y la variación del coeficiente de presión en un modelo cúbico colocado en el centro del simulador. Las mediciones indicaron que los coeficientes de presión en la parte superior del modelo cúbico variaron de -2 a -5 para $S = 0.37$ y en el modelo cilíndrico de -4 a -12 para $S = 0.5$. Con respecto al efecto que causa la rugosidad de la superficie, concluyeron que la rugosidad retarda la aparición de múltiples vórtices a medida que se incrementa el índice de vorticidad S .

Wang (2002) y Fouts (2003) utilizaron el simulador TTU-VSI de la Universidad de Texas, para visualizar el fenómeno de rompimiento de vórtice y estudiar la interacción fluido-estructura en modelos a escala, con geometría cubica y cilíndrica, sometidos a un vórtice de tornado. Los resultados de Wang mostraron que la geometría influye de manera determinante en la distribución de presión, es

decir, las mediciones realizadas en la cara superior del cilindro registraron más succión que las mediciones registradas en la cara superior del cubo. Los coeficientes de presión medidos en la cara superior del cilindro variaron de -4 a -1 , mientras que los coeficientes de presión medidos en la cara superior del cubo variaron de -2.5 a 0.5 para cuando la relación de aspecto es igual a 1 y el índice de vorticidad es igual a 0.5. Los resultados de Fouts indicaron que la distribución de presión cambia rápidamente dependiendo de la ubicación del modelo con respecto al centro del vórtice del tornado. También reportó que la distribución de la presión en un modelo cúbico cambia de presión positiva a presión negativa dependiendo de su ubicación con respecto al vórtice del tornado. [Sarkar et al, \(2006\)](#) y [Sengupta et al, \(2008\)](#) han reportado coeficientes de presión en un modelo cúbico con magnitudes similares a las presentadas anteriormente por Wang y Fouts.

[Mishra, et al, \(2008a, 2008b\)](#) utilizaron el simulador TTU-VSII de la Universidad de Texas para comparar el campo de velocidades y de presiones obtenidos del simulador con los datos obtenidos de tornados reales, de intensidad F4 en la escala de Fujita, ocurridos en los condados de Manchester ([J. J. Lee, Samaras y Young, 2004](#)) y Spencer ([Alexander y Wurman, 2005; Wurman y Alexander, 2005](#)) en el estado de Dakota del Sur, Estados Unidos, el 24 de Junio de 2003 y 30 de Mayo de 1998, respectivamente. También estudiaron la interacción fluido-estructura en un modelo a escala permeable, de geometría cúbica, colocado en varias posiciones en el interior del vórtice y compararon los resultados con los obtenidos en un modelo equivalente de flujo unidireccional en condiciones de capa límite. Encontraron que el campo de velocidades del tornado de Spencer puede ser simulado adecuadamente con el modelo modificado del vórtice combinado de Rankine para valores que van de $1/r^{0.69}$ a $1/r^{0.87}$ dependiendo de la altura sobre el nivel de la superficie. La presión dentro del vórtice simulado fue comparada con los datos obtenidos del tornado de Manchester y se encontró similitud entre ambos registros. Se concluyó que el campo de velocidades y de presiones del vórtice generado con el TTU-VSII es una representación razonable de los tornados reales. Con respecto a la interacción fluido-estructura en el modelo permeable, observaron que la distribución de presión generada por el vórtice en las caras del modelo es muy diferente a la distribución de presión obtenida por la aplicación de flujo unidimensional, como el generado en un túnel de viento convencional. Con base en estas observaciones, concluyeron que no se pueden utilizar los coeficientes de presión obtenidos de la aplicación de flujo unidimensional para estimar las fuerzas de viento generadas por tornados, a pesar de que se emplee un amplio factor de seguridad.

[Natarajan y Hangan \(2012\)](#) estudiaron numéricamente el efecto de la velocidad de traslación y la alta rugosidad de la superficie (equivalente a la rugosidad que proporciona el centro de una ciudad) para un amplio conjunto de índices de vorticidad ($S = 0.28, 0.5, 1.0$ y 2.0) en un vórtice de tornado. Se estudiaron estos índices de vorticidad porque simulan características específicas del flujo en un vórtice, como son: la aparición del Vortex-Break-Down (VBD $S = 0.28$) y del Vortex-Touch-Down (VTD $S = 0.5$), así como la ocurrencia de múltiples vórtices ($S = 1$ y 2). Los resultados mostraron que a medida que el índice de vorticidad aumenta, se pueden reproducir numéricamente los perfiles de velocidad esperados que se presentan en tornados con un solo vórtice, dos vórtices o vórtices múltiples. Se observó que la velocidad tangencial de un tornado se incrementa al aumentar el índice de vorticidad S . Se estableció que la velocidad máxima media de un tornado se presenta cuando el vórtice toca la superficie del terreno, para $S = 0.5$, ó cuando $S = 2.0$. En estas condiciones, las velocidades máximas se presentan a alturas inferiores a $0.04 \cdot R_0$, donde R_0 es el radio de la zona central del tornado. Al alcanzar valores de $S = 2.0$, se presenta la aparición de vórtices múltiples, con velocidades transitorias mayores al 36 por ciento de las velocidades medias. Se logró mostrar que cuando el vórtice toca la superficie del terreno, o en la etapa de vórtices múltiples, se generan los efectos más destructivos que aparecen durante un tornado. Así mismo se observó que el índice de turbulencia del viento y los esfuerzos cortantes

máximos en el flujo, se concentran dentro del vórtice único, y continúan en esa posición a medida que el tornado se mueve a lo largo de la superficie del terreno. Para valores mayores del índice de vorticidad, los esfuerzos cortantes máximos se concentran en una región anular al derredor del eje del vórtice. Los análisis numéricos mostraron un hecho significativo: el efecto de la velocidad de translación del tornado no es uniforme en el intervalo de valores de S que se analizó. Para valores de S pequeños, la velocidad de translación afecta de manera adversa en la formación de las paredes con flujo laminar y por ello reduce la velocidad tangencial. Para valores altos del índice de vorticidad, la velocidad de translación produce un ligero incremento en la máxima velocidad media tangencial. También se observó que el radio del vórtice se incrementa al aumentar el índice de vorticidad.

CAPÍTULO 3

ACCIONES DEL TORNADO SOBRE LAS CONSTRUCCIONES

El viento turbulento en la capa límite atmosférica es de naturaleza caótica: varía en el tiempo y en el espacio. Alan Davenport encontró que, para fines de ingeniería estructural, la velocidad del viento turbulento podía descomponerse en dos componentes: una componente estacionaria y una componente que varía con el tiempo debido a la turbulencia. La componente estacionaria se encarga, en general, de producir tanto presiones como succiones en las áreas expuestas de las construcciones; mientras que la componente turbulenta produce, en general, efectos dinámicos como vibraciones. Bajo condiciones específicas de la interacción viento-estructura aparecen fenómenos de inestabilidad aeroelástica. Por el contrario, un tornado tiene una estructura del campo de velocidades diferente al viento turbulento, lo que ocasiona acciones muy distintas sobre las construcciones. En este capítulo se analizan dichas acciones.

3.1. EFECTOS QUE GENERA UN TORNADO EN LAS ESTRUCTURAS

Las mediciones con radar Doppler han mostrado que el campo de flujo de un tornado es no estacionario y turbulento, que genera componentes de velocidad tangencial, radial y vertical de muy alta intensidad, con distribuciones de velocidad distintas al viento turbulento en la capa límite atmosférica. Se ha encontrado que la fuerza que genera un tornado en las estructuras es de gran magnitud y de corta duración, en comparación con la fuerza que genera el viento turbulento que se mantiene a un nivel constante durante un intervalo de tiempo. Además, la cinemática de las partículas de aire que conforman el campo de flujo de un tornado indica que la velocidad del viento cambia en magnitud y en dirección rápidamente, es decir, se aceleran.

Las investigaciones sobre la fuerza que genera un tornado sobre las construcciones y la interacción tornado-estructura han sido escasas y poco han revelado sobre los efectos de los tornados en las estructuras. Los principales efectos sobre las estructuras que se han logrado identificar se condensan en las siguientes líneas:

- La dirección y la magnitud de la velocidad en un tornado cambian rápidamente. El gradiente de presión y la alta aceleración de las masas de aire en el tornado producen una fuerza de inercia muy grande. Por esta razón, la expresión para calcular la fuerza de viento basado en el flujo en régimen estable puede no ser aplicable al cálculo de las fuerzas de presión creadas por el viento de un tornado (Wen, 1975).
- El daño que ocasiona un tornado en una construcción depende del tiempo al que esté sometida a la acción del viento. La duración de la acción del viento intenso sobre una construcción depende directamente de la velocidad de traslación del tornado. Un tornado que sea capaz de generar daño severo tiene una velocidad de traslación que va de 13 a 30 m/s (Alexander y Wurman, 2005; Simmons y Sutter, 2008; Wurman, Robinson, Alexander, y Richardson, 2007), por lo tanto, un tornado con menor velocidad de traslación generará más daño que un tornado que posea una mayor velocidad de traslación.
- Para construcciones de baja altura y herméticas, la fuerza de sustentación debido a la caída de presión repentina en el centro del tornado es considerablemente superior a las componentes de fuerza horizontales (F. Haan Jr, et al, 2009).

- Los coeficientes de presión, medidos en un modelo a escala de un edificio en el laboratorio de simulación de tornados, resultaron ser 1.8 a 3.2 veces más grande que los generados por vientos ordinarios con la misma velocidad, comparable a los generados por los huracanes (F. Haan Jr, et al, 2009). Los resultados también indicaron que los coeficientes de presión dependen de la velocidad de traslación, es decir, a medida que la velocidad de traslación se incrementa, los coeficientes de presión tienden a disminuir.
- El trabajo de Sengupta, et al,(2008) parece indicar que las fuerzas máximas del tornado sobre las construcciones no se deben a la turbulencia, como en el caso del viento turbulento, sino más bien parece existir una analogía con los vientos generados por “microráfagas”, es decir, cuanto mayor sea la tormenta, mayor será la fuerza. En el caso de los tornados, a medida que el vórtice del tornado se aproxime a la construcción, la fuerza que actúa sobre ésta se incrementa monótonamente.

Los principales efectos que genera un tornado en una construcción, se manifiestan en fuerzas y se producen a partir de tres acciones: (1) las fuerzas de presión creadas por el aire que fluye alrededor de la estructura, (2) fuerzas de presión creadas por los cambios rápidos de la presión atmosférica, y (3) fuerzas de impacto creadas a partir de los escombros que arrastra el viento. Estas acciones se discutirán más a fondo en las siguientes secciones.

3.2. FUERZAS DE PRESIÓN INDUCIDAS POR EL VIENTO

En meteorología se han utilizado una serie de modelos para tratar de describir los perfiles de velocidad tangencial del viento de los vórtices atmosféricos como los remolinos de tierra, trombas, tornados, mesociclones y ciclones tropicales. El modelo más simple que se ha empleado es el correspondiente al Vórtice Combinado de Rankine (VCR). El VCR considera únicamente la componente de velocidad tangencial, y al no considerar otras componentes de velocidad diferentes a la tangencial, no existe ningún mecanismo en la atmósfera capaz de reproducir un VCR. No obstante, el VCR proporciona una descripción bastante precisa del flujo de aire en fenómenos atmosféricos de naturaleza ciclónica (Wood y White, 2011).

El VCR está conformado por dos campos de flujo separados por una frontera circular de radio r_{\max} . El campo de flujo dentro de la región r_{\max} , o del núcleo, posee solo velocidad tangencial que aumenta linealmente con el radio desde cero, a lo largo del eje central, a un valor máximo V_{θ} cuando $r = r_{\max}$. Por tanto, esta región gira como un cuerpo sólido a pesar de que es fluido. El flujo externo es puramente tangencial con velocidad máxima V_{θ} cuando $r = r_{\max}$ y disminuye inversamente con el radio hacia el exterior, como se indica en la Figura 3.1. La descripción matemática del vórtice combinado es:

$$v_{\theta}(r) = \begin{cases} V_{\theta} \frac{r}{r_{\max}} & \text{si } \frac{r}{r_{\max}} \leq 1 \\ V_{\theta} \frac{r_{\max}}{r} & \text{si } \frac{r}{r_{\max}} > 1 \end{cases} \quad (3.2.1)$$

El modelo puede determinar la velocidad tangencial del viento en cualquier punto dentro del campo de velocidades, sin embargo, no considera la variación de la velocidad con la altura.

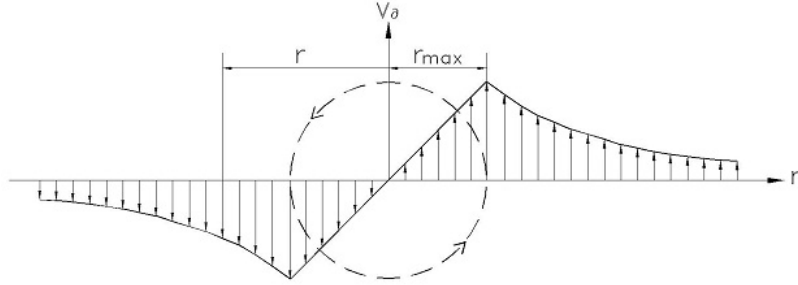


Figura 3. 1. Vórtice combinado de Rankine

El modelo de VCR permite combinar la componente de velocidad tangencial con la componente de velocidad de traslación, tal como se indica en la ecuación 3.2.2. La combinación de las componentes de velocidad produce asimetría en el campo de velocidades.

$$v_{\theta}(r) = \begin{cases} V_{\theta} \frac{r}{r_{\max}} + V_t & \text{si } \frac{r}{r_{\max}} \leq 1 \\ V_{\theta} \frac{r_{\max}}{r} + V_t & \text{si } \frac{r}{r_{\max}} > 1 \end{cases} \quad (3.2.2)$$

En la Figura 3.2 se aprecia la asimetría del vórtice debido a la combinación de la velocidad tangencial con la velocidad de traslación. Como puede observarse, la velocidad en el centro del vórtice corresponde a la velocidad de traslación.

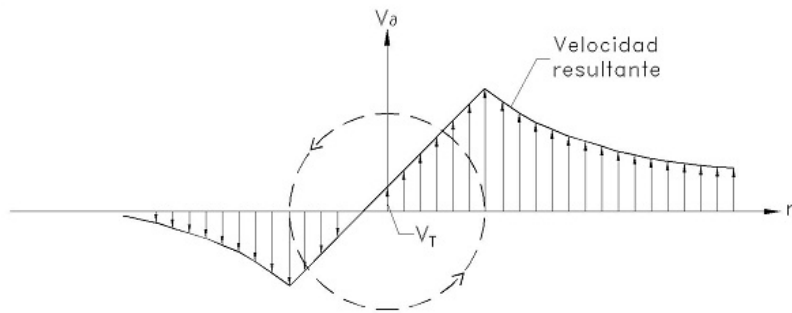


Figura 3. 2. Combinación de la velocidad tangencial con la velocidad de traslación

La fuerza que ejerce el tornado en un área en la dirección de flujo es proporcional al cuadrado de la velocidad, y se calcula como:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot v_{\theta}^2 \quad (3.2.3)$$

donde ρ es la densidad del aire, C_D es el coeficiente de arrastre, A es el área y v_{θ} es la velocidad. Debido a la interacción de la velocidad de rotación y traslación del tornado con una construcción, la velocidad y dirección del viento están siempre cambiando. La magnitud de estas fuerzas depende de la posición relativa de la construcción con respecto a la trayectoria del centro del vórtice.

3.3. FUERZA INDUCIDA POR EL CAMBIO DE PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Otro efecto a considerar es el cambio súbito en la presión atmosférica en las construcciones. Para analizar el cambio de presión, considere el campo de flujo de un tornado representado por el vórtice combinado de Rankine, como el de la Figura 3.1. Puesto que el flujo en la región externa del vórtice es potencial, podemos obtener la distribución de la presión por medio de la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{v_{\theta}^2}{2g} = \frac{P_{\infty}}{\rho g} + \frac{v_{\infty}^2}{\rho g} \quad (3.3.1)$$

donde P y v_{θ} son la presión y la velocidad en el borde del vórtice, P_{∞} y v_{∞} son la presión y la velocidad a gran distancia del vórtice. En tales condiciones, P_{∞} es igual a la presión atmosférica y la velocidad del flujo v_{∞} se anula, tal como indica la ecuación (3.2.1). Reescribiendo la expresión para obtener el cambio de presión con respecto a la presión atmosférica:

$$(P_a - P) \frac{g}{\rho} = \frac{1}{2} v_{\theta}^2 = \frac{1}{2} \cdot V_{\theta}^2 \cdot \frac{r_{\max}^2}{r^2} \quad (3.3.2)$$

donde V_{θ} es la velocidad para $r = r_{\max}$, o sea en el borde del vórtice y es igual a $V_{\theta} = \omega r_{\max}$. Como v_{θ}^2 es siempre positiva, la presión en el exterior del vórtice será siempre menor que la atmosférica. Esta presión negativa es la responsable de generar una presión en el interior de las construcciones e incrementar el daño.

Para evaluar la distribución de presión dentro del vórtice, se recurre a las ecuaciones de Euler, ya que en el interior del vórtice el flujo es rotacional. En estado estacionario, coordenadas cilíndricas y en ausencia de los efectos de gravedad, las ecuaciones de Euler se convierten en:

$$-\frac{g}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_{\theta}}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_{\theta}^2}{r} \quad (3.3.3)$$

$$-\frac{\rho}{g} \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} = v_r \frac{\partial v_{\theta}}{\partial r} + \frac{v_{\theta}}{r} \frac{\partial v_{\theta}}{\partial \theta} + \frac{v_{\theta} v_r}{r}$$

En el caso aquí considerado, estas ecuaciones se simplifican, puesto que $v_r = 0$ y v_{θ} es independiente de la variable θ .

$$-\frac{g}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{v_{\theta}^2}{r} \quad (3.3.4)$$

$$-\frac{g}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} = 0$$

La segunda ecuación de (3.3.4) indica que la presión P es función solamente de la distancia radial r , pudiéndose escribir la primera como una ecuación diferencial ordinaria:

$$\frac{g}{\rho} \frac{dP}{dr} = \frac{v_{\theta}^2}{r} \quad (3.3.5)$$

Al integrar obtenemos:

$$P = \frac{1}{2g} \rho \frac{V_{\theta}^2}{r_{\max}^2} r^2 + \text{constante} \quad (3.3.6)$$

La constante puede ser valorada a partir de la ecuación obtenida previamente para la región potencial del flujo igualando las dos presiones en el borde del vórtice ($r = r_{\max}$). Así

$$P = \frac{1}{2g} \rho \frac{V_{\theta}^2}{r_{\max}^2} r_{\max}^2 + \text{constante} = P_a - \frac{1}{2g} \rho \frac{V_{\theta}^2 r_{\max}^2}{r_{\max}^2} \quad (3.3.7)$$

Por tanto, la constante será:

$$\text{constante} = P_a - \frac{\rho}{g} V_{\theta}^2 \quad (3.3.8)$$

Al sustituir (3.3.8) en (3.3.6) y simplificar, se obtiene:

$$(P_a - P) \frac{g}{\rho} = V_{\theta}^2 \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^2 \right) \quad (3.3.9)$$

Al graficar la variación de la presión dentro de todo el campo de flujo, tal como se observa en la Figura 3.3, se puede apreciar que la presión en todo el campo de flujo del tornado está por debajo de la presión atmosférica y alcanza el valor máximo negativo en el centro del vórtice, donde la velocidad tangencial es nula.

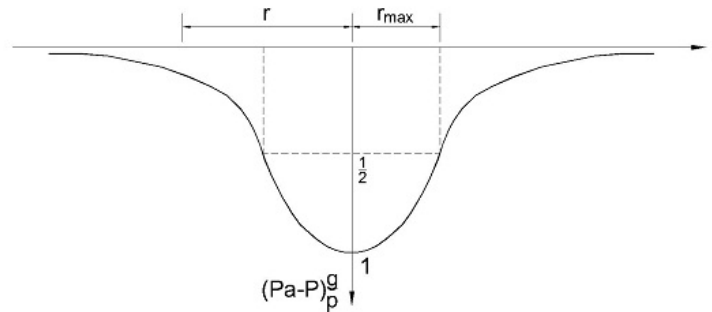


Figura 3. 3. Variación de la presión con la distancia radial en un tornado

Al retomar el problema del efecto del cambio abrupto en la presión atmosférica en una construcción. La presión atmosférica en el centro del vórtice del tornado es inferior a la presión atmosférica ambiente. Cuando el vórtice del tornado pasa por encima de una construcción hermética o parcialmente hermética, la presión exterior es menor que la presión interior en la construcción. Este cambio en la presión atmosférica causa que se genere una presión hacia el exterior en la superficie interna de la construcción, como la mostrada en la Figura 3.4. Sin embargo, los vientos de un tornado transportan escombros que producen daño en la envolvente exterior (fachada), generando aberturas en las construcciones, e invariablemente pérdida de la hermeticidad. Cuando la construcción deja de ser hermética, el aire en el interior de la construcción comenzará a fluir a través de las aberturas e igualará

la presión atmosférica en el interior y en el exterior de la construcción, y las fuerzas inducidas por el cambio de presión atmosférica desaparecerán.

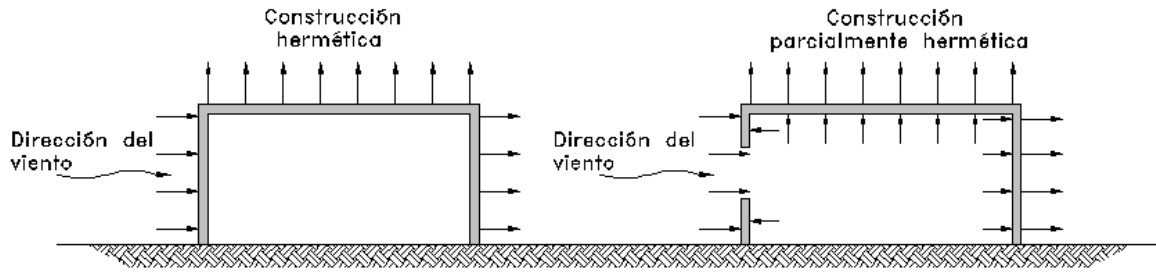


Figura 3. 4. Efectos del viento en una construcción hermética y parcialmente hermética

Sin embargo, las aberturas en la envolvente de la construcción permitirán que el viento generado por el tornado entre en el interior de la construcción y ejerza presiones en las superficies hacia el exterior, tal como se muestra en la Figura 3.4. De acuerdo a las Figuras 3.1 y 3.3, el máximo cambio en la presión atmosférica se produce en el centro del vórtice del tornado, donde la velocidad tangencial es cero. Cuando la velocidad tangencial es máxima, el cambio en la presión atmosférica corresponde a la mitad del valor máximo del cambio de presión, Figura 3.3.

3.4. FUERZAS DE IMPACTO POR ESCOMBROS

Además de los daños causados por la acción directa del viento y el cambio súbito en la presión atmosférica, el mayor daño que causa un tornado de gran intensidad (>F4) en una construcción, es el debido a los escombros arrastrados por el viento. El área de una construcción más vulnerable al impacto de los proyectiles, es la zona de la pared de barlovento, aunque los efectos también pueden ocurrir en los techos y paredes laterales. A medida que el aire se aproxima a la pared de barlovento, su velocidad horizontal se reduce rápidamente. Los objetos más pesados en el flujo con una mayor inercia probablemente continuarán con su velocidad con pocos cambios hasta que impactan en la pared. Los objetos más ligeros y más pequeños pueden perder velocidad en esta región, o incluso ser arrastrado alrededor del edificio con el flujo si no se dirigen al punto de estancamiento.

Para estimar las velocidades alcanzadas por un objeto en movimiento bajo la acción de fuerzas aerodinámicas inducidas por los vientos del tornado, se requiere un conjunto de supuestos sobre: las características aerodinámicas del objeto, las características de las trayectorias de los objetos y la posición inicial del objeto con respecto al suelo y el centro del tornado, así como su velocidad inicial.

Wills, et al, (1999; 2002), llevaron a cabo un estudio para describir el daño que ocasionan los escombros que arrastra el viento de alta intensidad, como los huracanes, a las construcciones. En el estudio se consideraron objetos “sólidos compactos”, “láminas” y “barras”, tal como indica la Figura 3.5, y establecieron una relación entre la dimensión característica de cada objeto y la velocidad del viento, U_f , a la que se produce el vuelo y los objetos se convierten en proyectiles. Para cada una de las tres categorías, estas relaciones se definen como:

$$l = \frac{\frac{1}{2} \rho_a U_f^2 C_F}{I \rho_m g} \quad t = \frac{\frac{1}{2} \rho_a U_f^2 C_F}{I \rho_m g} \quad d = \frac{2}{\pi} \frac{\rho_a U_f^2 C_F}{I \rho_m g} \quad (3.4.1)$$

dónde:

l = es la dimensión característica de los sólidos compactos

t = es el espesor de las láminas

d = es el diámetro efectivo de las barras

ρ_a = es la densidad del aire

ρ_m = es la densidad del material de los objetos

C_F = es el coeficiente de fuerza aerodinámica

U_f = es la velocidad del viento a la cual ocurre el vuelo del objeto

I = es un parámetro de fijación que indica la magnitud de la fuerza que se requiere para arrojar a los objetos, expresada como un múltiplo de su peso. Para los objetos que descansan en el suelo $I = 1$

g = es la constante de gravedad

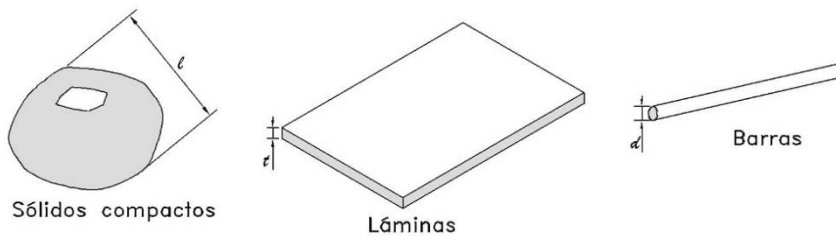


Figura 3. 5. Tipos de objetos considerados

Las ecuaciones anteriores indican que cuando mayor sea el valor de la dimensión característica, l , t o d , se requerirá una velocidad del viento mayor para que los objetos sean lanzados. Las ecuaciones también indican que cuanto mayor sea el valor de la densidad, ρ_m , se requerirá una velocidad del viento mayor para que los objetos se conviertan en proyectiles.

Un proyectil, una vez en el aire, continuará acelerándose hasta que su velocidad de vuelo se aproxime a la velocidad del viento, o hasta que su vuelo sea terminado por el impacto con el suelo o con un obstáculo, como una construcción. La fuerza aerodinámica de un objeto arrastrado por el viento con velocidad, U , se puede expresar como:

$$F_{\text{aceleración}} = \frac{1}{2} \rho_a (U - v_m)^2 C_D A \quad (3.4.2)$$

dónde:

v_m = es la velocidad del proyectil con respecto al suelo

C_D = es el coeficiente de arrastre

A = es el área de referencia para el coeficiente de arrastre C_D

De la segunda ley de Newton se puede obtener la aceleración instantánea, y para el caso específico de un sólido compacto con una dimensión característica, l , la aceleración está dada por:

$$a_m = \frac{\frac{1}{2} \rho_a (U - v_m)^2 C_D A}{\rho_m l^3} = \frac{\frac{1}{2} \rho_a (U - v_m)^2 C_D}{\rho_m l} \quad (3.4.3)$$

En la ecuación (3.4.3) se supuso que A es igual a l^2 . Para los casos restantes, A corresponde al área de la sección transversal, perpendicular a la dirección del viento, la cual depende de la orientación del objeto. La ecuación (3.4.3) también indica que los objetos más grandes y pesados tienen aceleraciones inferiores, y por lo tanto, su velocidad de vuelo debe ser más pequeña que la de los objetos más pequeños y ligeros. La ecuación también muestra que la aceleración inicial desde el reposo ($v_m = 0$) es alta, pero disminuye a medida que la diferencia entre la velocidad del objeto y la velocidad del viento se reduce. Es importante señalar que la velocidad del objeto no puede exceder la velocidad del viento.

Con respecto a las trayectorias de los objetos, [Tachikawa \(1983\)](#) realizó un estudio en placas planas con diferente relación de aspecto, sometidas a un flujo uniforme, en un túnel de viento. Observó que la trayectoria y el movimiento de la placa dependen del ángulo de ataque inicial de ésta. Las trayectorias calculadas predijeron los límites superior e inferior de las trayectorias observadas, con una precisión razonable. En un estudio posterior, [Tachikawa \(1988\)](#) extendió los experimentos a pequeños modelos de objetos prismáticos. También propuso un método para estimar el intervalo de distribución de las trayectorias de los proyectiles transportados por el viento, considerando los efectos del perfil de velocidad del viento. Concluyó que existe un parámetro adimensional que determina las trayectorias de los proyectiles, el cual se define como:

$$K = \frac{\frac{1}{2} \rho_a U^2 A}{mg} \quad (3.4.4)$$

dónde:

A = es el área en planta del objeto

m = es la masa del objeto

Finalmente, [Wills, et al, \(2002\)](#) concluyeron que el potencial de daño de los proyectiles transportados por el viento en una construcción depende de la energía cinética de éstos, es decir, en el caso de sólidos compactos, los sólidos de menor densidad tienen menos potencial de daño; mientras que los objetos como láminas y barras tienen más potencial de daño que los objetos sólidos compactos.

CAPÍTULO 4

REVISIÓN DE LAS NORMAS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS ANTE LA ACCIÓN DE TORNADOS

En México existen las condiciones meteorológicas que dan lugar a la aparición de tornados, los cuales han aparecido en diversas partes del país, especialmente en la zona Centro y Noreste, en los estados de Michoacán y Coahuila, donde es frecuente la aparición de este tipo de fenómenos meteorológicos. En México existe un documento normativo que atiende el problema del viento en términos de amenaza a la seguridad de las construcciones y se denomina “Manual de diseño de obras civiles. Diseño por viento” (CFE, 2008). En esta norma se reconoce la existencia de tornados y microráfagas en el país; sin embargo, no proporciona los criterios de diseño para tomar en cuenta los efectos que causan los tornados en las construcciones. Como un primer paso hacia la elaboración de un documento que sirva de base en el diseño de construcciones en zona de tornados, acorde a las condiciones climatológicas y constructivas de nuestro país, en este capítulo se presenta una revisión de las especificaciones de los principales reglamentos.

4.1. ANTECEDENTES

La mayoría de los tornados que se han registrado, han ocurrido en el centro de los Estados Unidos y su incidencia ha sido investigada y documentada en varias publicaciones. En este sentido, Estados Unidos es el país que más ha desarrollado investigación con el fin de mitigar los efectos adversos de los tornados en la población y en la infraestructura.

El desarrollo de la normatividad de diseño por viento en los Estados Unidos está a cargo de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), que publica el “ASCE 7 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures”. El ASCE 7 contiene procedimientos para estimar las acciones inducidas por el viento y sus efectos sobre las construcciones convencionales como residencias, comercios o instalaciones industriales de bajo riesgo. Los mapas de velocidad de viento que presenta el ASCE 7 están contruidos en base a registros de vientos máximos generados por tormentas locales y huracanes. Actualmente, en el diseño estructural de construcciones convencionales, las fuerzas generadas por tornados no se consideran debido a la muy baja probabilidad de ocurrencia.

Sin embargo, las construcciones que por su uso y ocupación (como refugios comunitarios y edificios multipropósito), o por su función para contener y confinar material peligroso (como plantas nucleares e instalaciones de almacenamiento de gas licuado) que ponen en riesgo a la población y/o la protección del ambiente, se diseñan para resistir los efectos que induce el tornado. En las guías del FEMA (2000), (2003), (2008) y del ICC/NSSA (2008) se encuentran los requisitos para el diseño y la construcción de refugios comunitarios. Los requisitos de diseño, construcción y aseguramiento de la calidad de las instalaciones nucleares pueden consultarse en las recomendaciones hechas por ANS (2011) y por el U.S. DOE (2012).

4.2. NORMAS DE CONSTRUCCIÓN PARA INSTALACIONES NUCLEARES

En Estados Unidos el diseño ante los efectos del tornado en las Estructuras, Sistemas y Componentes (SSC por sus siglas en inglés) de las instalaciones nucleares comenzó en 1967, cuando se publicaron los “criterios generales de diseño para plantas nucleares”, que establecían como base de diseño la

presión del viento, el cambio de presión atmosférica y las fuerzas de impacto generados por proyectiles (U.S. NRC, 1967).

En 1974 la Comisión de Regulación Nuclear (NRC) publicó la Guía de Regulación 1.76 donde especificó un mapa de regionalización eólica para determinar la velocidad del viento, el cambio de presión atmosférica, así como el tipo y tamaño de proyectiles que resultan de los tornados, para el diseño de los reactores nucleares. El mapa de velocidades, mostrado en la Figura 4.1, está asociado a una probabilidad anual de excedencia de 10^{-7} , y en él se definen tres regiones de viento. En la Tabla 4.1 se resumen los parámetros del tornado de diseño definido para cada región (U.S. NRC, 1974).

En 1983 la Sociedad Nuclear Americana (ANS) publicó la norma ANSI/ANS-2.3-1983, donde adoptaba un enfoque diferenciado en el diseño de los SSC. El enfoque diferenciado en el diseño de los SSC consiste en la categorización del riesgo de las instalaciones atendiendo a la importancia para la seguridad, su función y el costo, (ANS, 1983). En la década de los 80, en Estados Unidos había pocos reactores nucleares y muchas instalaciones con una amplia variedad de riesgos. En este sentido, la norma ANSI/ANS-2.3-1983 proponía mapas de velocidades asociados a probabilidades anuales de excedencia de 10^{-5} , 10^{-6} y 10^{-7} para los diferentes niveles de seguridad de los SSC. La Figura 4.2 muestra el mapa de velocidades asociado a la probabilidad anual de excedencia de 10^{-7} y en la Tabla 4.2 se resumen los parámetros del tornado de diseño para cada región, correspondiente a las distintas probabilidades anuales de excedencia. Finalmente, la Tabla 4.3 muestra la categorización del desempeño de las instalaciones ante la amenaza de fenómenos naturales.

En 1994 el Departamento de Energía de los Estados Unidos (U.S. DOE) publicó la norma DOE-STD-1020-94 para el diseño y evaluación de los SSC. La norma DOE adoptó la metodología de diseño basado en el desempeño de los sistemas estructurales (DBD). La metodología de DBD consiste en: 1) la selección de los objetivos de desempeño, sistemas estructurales y configuración apropiada de acuerdo a la categoría de desempeño asignada; 2) el dimensionado y detallado de los componentes estructurales y no estructurales de una estructura; y 3) la garantía del control de la calidad durante la construcción y del mantenimiento a largo plazo, de tal forma que para niveles de demanda durante la amenaza de un fenómeno natural y con niveles predefinidos de confiabilidad, la estructura no se dañe más allá de ciertos estados límite de daño u otros estados de límites de utilidad (U.S. DOE, 1994).

Tabla 4.1. Parámetros del tornado de diseño especificados en la guía de regulación 1.76-1974, correspondiente a una probabilidad de 10^{-7} /año (U.S. NRC, 1974)

Región	Velocidad máxima del viento, mph	Velocidad de rotación, mph	Velocidad de traslación, mph		Radio de la velocidad máxima de rotación, ft	Cambio de presión, psi	Tasa de caída de presión, psi/s	Categoría en la escala Fujita (F)
			Máxima	Mínima				
I	360	290	70	5	150	3	2	>F5
II	300	240	60	5	150	2.25	1.2	F5
III	240	190	50	5	150	1.5	0.6	F4

El objetivo de desempeño se define como la probabilidad anual de excedencia de los límites del comportamiento aceptable de los SSC ante la amenaza de fenómenos naturales. Los valores numéricos de las probabilidades de excedencia usados para definir el objetivo de desempeño dependen de las características de los SSC. Por ejemplo, los límites de comportamiento aceptables para un SSC de uso general (Tabla 4.3 y 4.4) es aceptar daño, pero restringiendo el daño en los SSC de tal manera que los ocupantes no sufran lesiones. Para instalaciones de peligro moderado, los límites de comportamiento aceptable restringen el daño de tal manera que las instalaciones puedan continuar con su función.



Figura 4. 1. Regiones de intensidad de tornado, definidos en la Regulatory Guide 1.76-1974, correspondiente a una probabilidad anual de excedencia de 10^{-7}

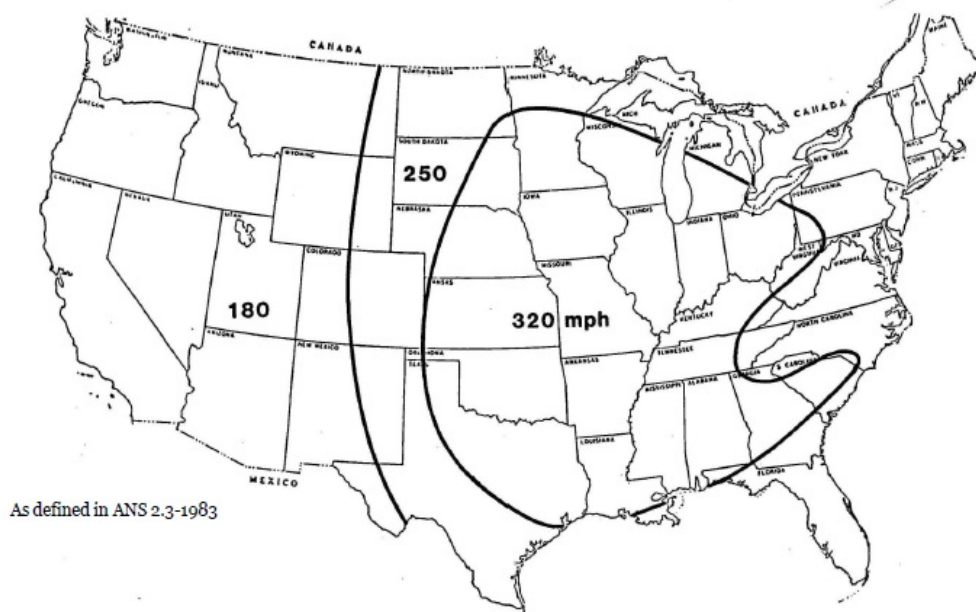


Figura 4.2. Regiones de intensidad de tornado, definidas en el ANSI/ANS 2.3-1983, correspondientes a una probabilidad anual de excedencia de 10^{-7}

La norma DOE-STD-1020-94 estableció 5 categorías de desempeño (0 a 4), las cuales se indican en la Tabla 4.4. Los objetivos de desempeño establecidos para las categorías 0, 1 y 2 se satisfacen para normas convencionales como el ASCE 7-95; para la categoría de desempeño 3, la probabilidad anual de excedencia es de 2×10^{-5} y para la categoría de desempeño 4 la probabilidad anual de excedencia es de 2×10^{-6} .

Tabla 4. 2. Parámetros del tornado de diseño, propuestos por ANSI/ANS-2.3-1983 (ANS, 1983)

Región	Velocidad máxima del viento (V)	Velocidad de traslación	Radio de la velocidad máxima de rotación	Cambio de presión atmosférica	Categoría en la escala de Fujita (F)	Probabilidad de excedencia
	mph	mph	ft	psi		
I	320	70	540	1.96	>F5	10^{-7}
II	250	55	435	1.35	F5	10^{-7}
III	180	40	320	0.7	F4	10^{-7}
I	260	57	453	1.46	F5	10^{-6}
II	200	45	355	0.85	F4	10^{-6}
III	140	32	253	0.41	F3	10^{-6}
I	200	45	355	0.85	F4	10^{-5}
II	150	33	270	0.47	F3	10^{-5}
III	100	25	185	0.2	F2	10^{-5}

Tabla 4. 3. Categorización de peligro de las instalaciones, según la ANSI/ANS-2.3-1983 (ANS, 1983)

Destino de las instalaciones, sistemas y componentes	Descripción
Instalaciones de uso general *.	Instalaciones cuyo funcionamiento no está relacionado con el confinamiento y manejo de sustancias peligrosas, como: edificios administrativos, cafeterías, almacenes e instalaciones de servicio, mantenimiento o reparación.
Instalaciones importantes o de bajo de riesgo (Cat. 3) *.	Instalaciones cuyo funcionamiento está relacionado con el confinamiento y manejo de sustancias peligrosas, como: laboratorios y centros de investigación; o instalaciones cuyo funcionamiento es esencial a raíz de una emergencia, como: hospitales y estaciones de bomberos.
Instalaciones de riesgo moderado (Cat. 2).	Instalaciones destinadas a confinar sustancias peligrosas cuya falla estructural podría constituir un peligro para los trabajadores y la protección al ambiente, como plantas de uranio, depósitos de sustancias tóxicas, explosivas, radioactivas y otras sustancias potencialmente peligrosas para la seguridad de los trabajadores y del ambiente.
Instalaciones de alto riesgo (Cat. 1), así como los sistemas y componentes de la misma que deban contener o confinar los materiales peligrosos.	Instalaciones destinadas al confinamiento y manejo de sustancias peligrosas cuya falla estructural constituye un peligro para la comunidad y la protección al ambiente, como: plantas de procesamiento de combustibles como gas licuado, depósitos de grandes cantidades de materiales nucleares y sus residuos y otros materiales peligrosos. La falla estructural de las instalaciones de esta categoría representa un peligro con posibles efectos a largo plazo.
Instalaciones de alta peligrosidad (Cat. 1S).	Instalaciones destinadas al confinamiento de los contenidos y la protección a la comunidad y al ambiente sean de vital importancia, como en instalaciones de reactores nucleares de 1,000 MW o tanques de almacenamiento de gran capacidad de gas natural licuado de más de 1,000 ft ³ .

* El uso general y las instalaciones importantes de bajo riesgo no requieren el análisis y diseño por vientos extremos (tornados), ya que éstos están cubiertos por los códigos convencionales.

A diferencia de la ANSI/ANS-2.3-1983, el DOE-STD-1020-94 estableció velocidades específicas para cada sitio donde se encuentran los SSC, tal como se indica en la Tabla 4.5. Estos valores se modificaron en la revisión del 2002, tal como se muestra en la Tabla 4.6 (U.S. DOE, 2002).

En el 2011 la Sociedad Nuclear Americana (ANS) amplió la norma ANSI/ANS-2.3, de la versión publicada en 1983, para incluir: 1) vientos máximos, 2) huracanes y 3) parámetros de proyectiles de huracanes, adicionales a los parámetros de proyectiles de tornados. También se adoptó la metodología empleada en la norma DOE-STD-1020-94 para incluir en diseño instalaciones de menor peligro (ANS, 2011).

La Figura 4.3 muestra la regionalización eólica propuesta en el ANSI/ANS 2.3-2011. Las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 muestran las curvas de peligro por viento correspondientes a cada región; mientras que las Tablas 4.7, 4.8 y 4.9 muestran las velocidades y los distintos periodos de retorno definidos en cada región, generados por vientos máximos, huracanes y tornados. Un cambio significativo en la norma ANSI/ANS-2.3-2011 fue la adopción de la escala Fujita mejorada (EF), lo que redujo significativamente la velocidad del viento, la disminución de la presión atmosférica y las velocidades de proyectiles. Por ejemplo, para la Región I y una probabilidad anual de excedencia de 10^{-7} , la velocidad del viento del tornado se redujo de 320 mph (Figura 4.2) a 230 mph (Figura 4.3, 4.4 y Tabla 4.7).

Es importante mencionar que los datos de la velocidad de vientos máximos y huracanes en la norma ANSI/ANS 2.3-2011 se tomaron de una extensión del período de retorno dado en el comentario correspondiente a la norma ASCE 7-95 en la sección de viento. La norma ANSI/ANS 2.3-2011 es consistente con la aplicación y distribución de las fuerzas con la norma ASCE 7-05.

En el 2012 el Departamento de Energía de los Estados Unidos (U.S. DOE) actualizó la norma DOE-STD-1020, siendo el cambio más significativo la modificación del periodo de retorno (probabilidad anual de excedencia) para las categorías de desempeño, Tabla 4.10, (U.S. DOE, 2012). En esta última versión, los criterios de diseño y evaluación de los SSC tienden a homogenizarse con los presentados en la norma ANSI/ANS 2.3-2011.

Tabla 4. 4. Objetivos de desempeño de estructuras, sistemas o componentes para diversas categorías de desempeño, según el DOE-STD-1020-94

Categoría de Desempeño	Descripción del objetivo de desempeño	Probabilidad anual de excedencia de los límites de comportamiento aceptables ante el riesgo de fenómenos naturales (NPH)
0	Sin requerimientos de seguridad	Sin requerimientos
1	Mantener la seguridad de los ocupantes	10^{-3} * Daño en los SSC**. La vida de los ocupantes no está en peligro, aunque es posible que éstos puedan verse afectados
2	Mantener la seguridad de los ocupantes y garantizar el funcionamiento continuo con interrupciones mínimas	5×10^{-4} de los daños en los SSC** en la medida en que el componente no puede realizar su función
3	Mantener la seguridad de los ocupantes, garantizar el funcionamiento continuo mediante el confinamiento del peligro	10^{-4} de los daños en los SSC** en la medida en que el componente no puede realizar su función
4	Mantener la seguridad de los ocupantes y garantizar el funcionamiento continuo	10^{-5} de los daños en los SSC** en la medida en que el componente no puede realizar su función

* Estos objetivos de desempeño son para cada peligro de fenómeno natural (sismo, viento e inundaciones)

** SSC se refiere a la estructura, sistema o componente (equipo)



Figura 4. 3. Regiones de intensidad de tornado, definidas en el ANSI/ANS 2.3-2011

Tabla 4. 5. Recomendaciones para la velocidad básica del viento para los sitios de DOE, en millas por hora, contenidas en DOE-STD-1020-94

Categoría de Desempeño	Velocidades en la milla más rápida a 10 m de altura					
	1	2	3		4	
	Viento	Viento	Viento	Tornado ⁴	Viento	Tornado ⁴
Sitios de las instalaciones DOE	2x10⁻²	2x10⁻²	1x10⁻³	2x10⁻⁵	1x10⁻⁴	2x10⁻⁶
Planta Kansas City, MO	72	72	--	144	--	198
Laboratorio Nacional Los Alamos, NM	77	77	93	--	107	--
Laboratorio Mound, OH	73	73	--	136	--	188
Planta Pantex, TX	78	78	--	132	--	182
Planta de las Planicies Rocosas, CO	109	109	138	(3)	161	(3)
Laboratorio Nacional Sandia, NM	78	78	93	--	107	--
Laboratorios Nacionales de Sandía, CA	72	72	96	--	113	--
Planta Pinellas, FL	93	93	130	--	150	--
Laboratorio Nacional Oriente, Argonne, IL	70 ⁽¹⁾	70 ⁽¹⁾	--	142	--	196
Laboratorio Nacional Occidente, Argonne, ID	70 ⁽¹⁾	70 ⁽¹⁾	83	--	95	--
Laboratorio Nacional Brookhaven, NY	70 ⁽¹⁾	70 ⁽¹⁾	--	95 ⁽²⁾	--	145
Laboratorio de Física de Plasmas, Princeton, NJ	70 ⁽¹⁾	70 ⁽¹⁾	--	103	--	150
Laboratorio Nacional de Ingeniería, Idaho	70 ⁽¹⁾	70 ⁽¹⁾	84	--	95	--
Centro de Producción de Materiales, Feed, OH	70 ⁽¹⁾	70 ⁽¹⁾	--	139	--	192
Oak Ridge, X-10, K-2S, and Y-12, TN	70 ⁽¹⁾	70 ⁽¹⁾	--	113	--	173
Planta de difusión de gases, Paducah, KY	70 ⁽¹⁾	70 ⁽¹⁾	--	144	--	198
Planta de difusión gases Portsmouth, OH	70 ⁽¹⁾	70 ⁽¹⁾	--	110	--	166
Sitios de prueba, Nevada, NV	72	72	87	--	100	--
Sitios de prueba, Hanford, WA	70 ⁽¹⁾	70 ⁽¹⁾	80 ⁽¹⁾	--	90 ⁽¹⁾	--
Laboratorio Lawrence Berkeley, CA	72	72	95	--	111	--
Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, CA	72	72	96	--	113	--
Sitio 300, LLNL, CA	80	80	104	--	125	--
Centro de Ingeniería y tecnología de energía, CA	70 ⁽¹⁾	70 ⁽¹⁾	--	95 ⁽²⁾	--	111
Centro de Stanford Linear Accelerator, CA	72	72	95	--	112	--
Sitio River, Savannah, SC	78	78	--	137	--	192

NOTAS:

(1) Velocidad mínima del viento en la atmósfera neutra

(2) Velocidad mínima de tornado

(3) Aunque los vientos en la atmósfera neutra gobiernan el diseño por viento en las Planicies Rocosas, existe una alta probabilidad de aparición de tornados, por lo que se recomienda que las instalaciones se diseñen ante los efectos de proyectiles de tornados. El efecto del cambio de presión atmosférica en las instalaciones puede no ser considerado en el diseño.

(4) La velocidad del tornado incluye los efectos de traslación y rotación.

(5) Las consideraciones de los efectos de los huracanes se encuentran en la Tabla 3-1 del DOE-STD-1020-94

Tabla 4. 6. Recomendaciones para vientos máximos y tornados¹⁰ para los sitios DOE, en millas por hora, propuestas en el DOE-STD-1020-2002

Categoría de desempeño (PC)	PC1	PC2	PC3	PC3	PC4	PC4
			Viento	Tornado ⁽²⁾	Viento	Tornado ⁽²⁾
Periodo de retorno (años)	50	100	1000	50000	10000	500000
Probabilidad anual de excedencia	2.00E-02	1.00E-02	1.00E-03	2.00E-05	1.00E-04	2.00E-06
Sitios de Instalaciones DOE						
Planta Kansas City, MO	90	96	-	(3)	-	(3)
Laboratorio Nacional Los Alamos, NM	90	96	117	-	135	-
Laboratorio Mound, OH	90	96	-	(3)	-	(3)
Planta Pantex, TX	90	96	-	195	-	248
Planta de las Planicies Rocosas, CO	125	134	163	(1)	188	(1)
Laboratorio Nacional Sandia, NM	90	96	117	-	135	-
Laboratorios Nacionales de Sandía, CA	85	91	111	-	128	-
Laboratorio Nacional Oriente, Argonne, IL	90	96	-	(3)	-	-3
Laboratorio Nacional Occidente, Argonne, ID	90	96	117	-	135	-
Laboratorio Nacional Brookhaven, NY	125	138	178	(1)	219	(1)
Laboratorio de Física de Plasmas, Princeton, NJ	110	122	156	(1)	193	(1)
Laboratorio Nacional de Ingeniería, Idaho	90	96	117	-	135	-
Oak Ridge, X-10, K-2S, and Y-12, TN	90	96	-	200	-	255
Planta de difusión de gases, Paducah, KY	90	96	-	(3)	-	(3)
Planta de difusión gases Portsmouth, OH	90	96	-	(3)	-	(3)
Sitios de prueba, Nevada, NV	90	96	117	-	135	-
Sitios de prueba, Hanford, WA	85	91	111	-	128	-
Laboratorio Lawrence Berkeley, CA	85	91	111	-	128	-
Laboratorio Nacional Lawrence, Livermore, CA	85	91	111	-	128	-
Sitio 300, LLNL, CA	95	102	124	-	143	-
Centro de Ingeniería y tecnología de energía, CA	85	91	-	(3)	-	(3)
Centro de Stanford Linear Accelerator, CA	85	91	111	-	128	-
Sitio River, Savannah, SC	100	107	-	169	-	213

(1) Aunque los vientos en la atmósfera neutra gobiernan el diseño por viento en las Planicies Rocosas, existe una alta probabilidad de aparición de tornados, por lo que se recomienda que las instalaciones se diseñen ante los efectos de proyectiles de tornados. El efecto del cambio de presión atmosférica en las instalaciones puede no ser considerado en el diseño.

(2) La velocidad del tornado incluye los efectos de traslación y rotación.

(3) Para instalaciones cuya ubicación no se encuentre en la Tabla 4.3, las velocidades de diseño deberán obtenerse con la metodología propuesta por el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (Referencia: Auguste Boissonade, et. al., Development of a Probabilistic Tornado Wind Hazard Model for the Continental United States, July 2000UCRL-ID-140922 Volume I.)

¹⁰ Velocidades asociadas con ráfagas de 3 segundos y evaluadas a 10 m de altura en terreno con categoría C de exposición

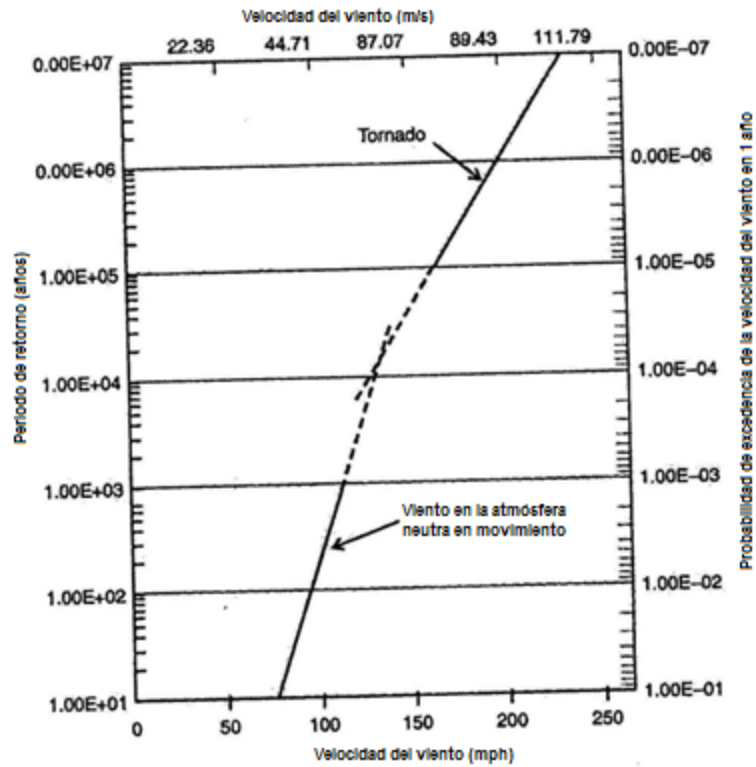


Figura 4. 4. Velocidad del viento en la Región I

Tabla 4. 7. Datos usados para generar el periodo de retorno y la curva de probabilidad de excedencia de la Región I

Datos de la Región I					
Viento en la atmósfera neutra en movimiento			Tornado		
Periodo de retorno (años)	1)	2)	Millas por hora	Periodo de retorno(años) ³⁾	Millas por hora
1.00E+04 ⁴⁾	1.52 x 90 =		137	1.00E+07 =	230
1.00E+03	1.30 x 90 =		118	1.00E+06 =	200
5.00E+02	1.23 x 90 =		111	1.00E+05 =	170
2.00E+02	1.14 x 90 =		103	-	-
1.00E+02	1.07 x 90 =		96	-	-
5.00E+01	1.00 x 90 =		90	-	-
1.00E+01	0.84 x 90 =		76	-	-

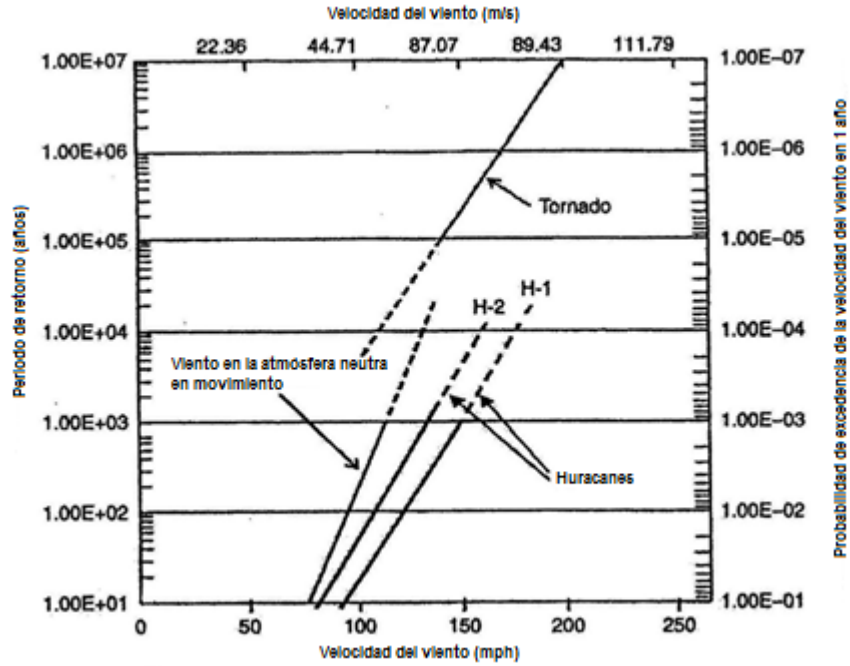


Figura 4. 5. Velocidad del viento en la Región II

Tabla 4. 8. Datos usados para generar el periodo de retorno y la curva de probabilidad de excedencia de la Región II

Datos de la Región II										
Viento en la atmósfera neutra en movimiento			Tornado		Huracanes					
Periodo de retorno (años)	1)	2)	Millas por hora	Periodo de retorno (años) ³⁾	Millas por hora	Periodo de retorno (años)	H-2	Millas por hora	H-1	Millas por hora
1.00E+04	1.52 x 90 =	137		1.00E+07 =	200	1.00E+04	1.15 x 137 =	158	1.3 x 137 =	178
1.00E+03	1.30 x 90 =	118		1.00E+06 =	170	1.00E+03	1.15 x 118 =	136	1.3 x 118 =	153
5.00E+02	1.23 x 90 =	111		1.00E+05 =	140	1.00E+02	1.15X96 =	111	1.3 x 90 =	125
2.00E+02	1.14 x 90 =	103								
1.00E+02	1.07 x 90 =	96								
5.00E+01	1.00 x 90 =	90								
1.00E+01	0.84 x 90 =	76								
(Continuación)										

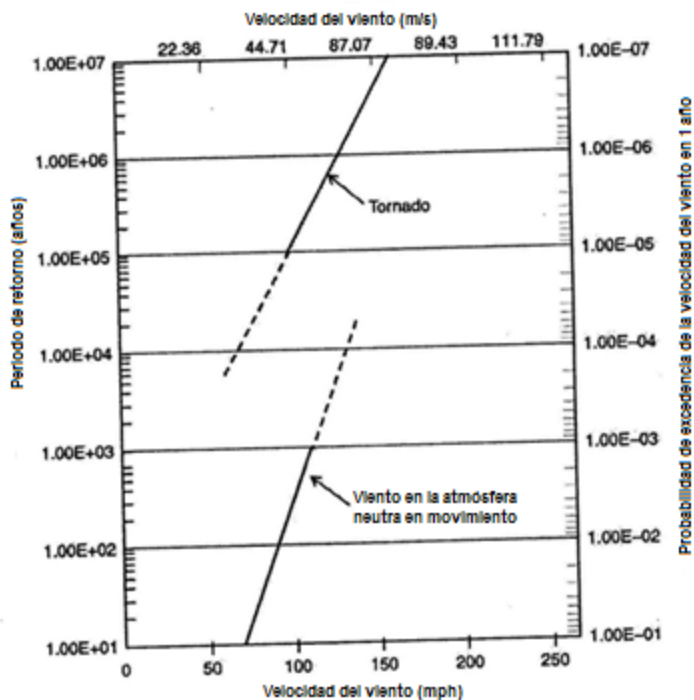


Figura 4. 6. Velocidad del viento en la Región III

Tabla 4. 9. Datos usados para generar el periodo de retorno y la curva de probabilidad de excedencia de la Región III

Datos de la Región III				
Viento en la atmósfera neutra en movimiento			Tornado	
Periodo de retorno (años)	^{1) 5)}	Millas por hora	Periodo de retorno (años) ³⁾	Millas por hora
1.00E+04	1.52 x 85 =	129	1.00E+07 =	160
1.00E+03	1.30 X 85 =	111	1.00E+06 =	130
5.00E+02	1.23 x 85 =	105	1.00E+05 =	100
2.00E+02	1.14 x 85 =	97		
1.00E+02	1.07 x 85 =	91		
5.00E+01	1.00 x 85 =	85		
1.00E+01	0.84 x 85 =	71		

1) La pendiente de la recta de peligro por viento se obtiene como una función del periodo de retorno, el cual se toma de la Tabla C6-7 de los comentarios del ASCE/SEI 7-05.

2) Factor de multiplicación aplicado a velocidades de viento de 90 mph en la atmosfera neutra en movimiento con periodo de retorno de 50 años tomado de la Tabla C6-7 de los comentarios del ASCE/SEI 7-05.

3) Datos de viento de tornado tomado de NUREG/CR-4461, Rev. 2, Tabla 8-1; Resumen de la información utilizada para trazar la velocidad del viento en las Figuras. 4.4, 4.5 y 4.6.

4) Léase como 1.00×10^4 .

5) Factor de multiplicación aplicado a velocidades de viento de 85 mph en la atmosfera neutra en movimiento con periodo de retorno de 80 años tomado de la Tabla C6-7 de los comentarios del ASCE/SEI 7-05.

Tabla 4. 10. Periodos de retorno para las categorías de desempeño WDC-3, WDC-4 y WDC-5 de los SSC, propuesto en la norma DOE-STD-1020-2012

WDC*	Design Basis Mean Return Period in Years		
	Viento en la atmósfera neutra en movimiento	Huracanes **	Tornados *
WDC-3	2500	2500	50000
WDC-4	6250	6250	125000
WDC-5	***	***	***

* No es necesario considerar el peligro por vientos de tornado si las velocidades del viento en la atmósfera neutra en movimiento son mayores que las producidas por el tornado para los periodos de retorno tabuladas en esta tabla. Ver ANSI/ANS-2-3-2011 para obtener información adicional.

** Solo para áreas propensas a huracanes, como el Golfo de México y las costas del Atlántico.

*** En la evaluación no se consideró el viento en la atmósfera neutra en movimiento. Para obtener más información consulte NRC R.G. 1.76 Rev. 1. "Design Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants" para tornados y "Design Basis Hurricane and Hurricane Missiles for Nuclear Power Plants" para huracanes.

4.3. NORMAS DE CONSTRUCCIÓN PARA REFUGIOS COMUNITARIOS

Por otra parte, el diseño de refugios comunitarios ha recibido muy poca atención de los ingenieros a diferencia de las instalaciones nucleares. El desarrollo de los refugios comunitarios comenzó en los últimos 15 años, para responder a las necesidades de construcciones seguras ante los vientos de alta intensidad (huracanes, tormentas severas y tornados).

Muchos estados de la Unión Americana designaron edificios públicos y escuelas existentes como refugios comunitarios. En la mayoría de los casos, estas construcciones nunca fueron diseñadas para ser utilizadas como refugios. La mayoría de los refugios designados fueron diseñados y construidos con los viejos códigos de construcción que no incluían requisitos para presiones extremas de viento e impacto de escombros.

A finales de la década de los 80 y principios de la década de los 90, los huracanes Hugo y Andrew dejaron una gran estela de destrucción, convirtiéndose en dos de los eventos más costosos de la historia de los Estados Unidos, en términos de decesos, damnificados y pérdidas económicas. En enero de 1999, 56 tornados golpearon la ciudad de Arkadelphia, Arkansas, en un periodo de 24 horas matando 8 personas y dejando un gran número de damnificados. En mayo de 1999, 68 tornados golpearon los estados de Oklahoma y Kansas matando 49 personas y dejando ciudades destruidas en ambos estados. Estos eventos pusieron de manifiesto que las edificaciones designadas como refugios comunitarios tenían características inadecuadas para resistir los vientos de alta intensidad y eran susceptibles a los daños causados por los escombros arrastrados por el viento.

Las disposiciones para tomar en cuenta los vientos de alta intensidad, particularmente huracanes, en construcciones ordinarias comenzaron en la edición del ASCE 7-95, cuando se introdujo en los comentarios una metodología para estimar la velocidad del viento mediante la extensión del periodo de retorno. En la revisión ASCE 7-98 se actualizan los mapas de la velocidad de viento, incorporando datos de vientos máximos y huracanes; teniendo como consecuencia inmediata la introducción de una nueva disposición de diseño: fuerzas de impacto generadas por proyectiles.

En 1998 fue publicada la guía "FEMA 320-Taking Shelter from the Storm" que incorporaba el concepto de cuarto seguro (safe room) en construcciones residenciales. En 1999, una semana después de la oleada de tornados del 3 de mayo en Oklahoma y Kansas, se creó "FEMA's Building Performance Team (BPAT)". En octubre de 1999 el BPAT publicó el informe de la oleada de tornados

del 3 de mayo (FEMA 342) e incluyó la segunda edición de los “Criterios nacionales de desempeño para refugios de tornados (National Performance Criteria for Tornado Shelters)”. En julio de 2000 fue publicado el “FEMA 361-Design and Construction Guidance for Community Shelters”, donde se establecieron los criterios de diseño de refugios comunitarios ante los efectos de vientos generados por huracanes y tornados. Es importante mencionar que los criterios establecidos en el FEMA 361 se formaron en un periodo muy corto de tiempo (tan solo 18 meses), a partir de los tornados ocurridos en enero de 1999 en Arkadelphia.

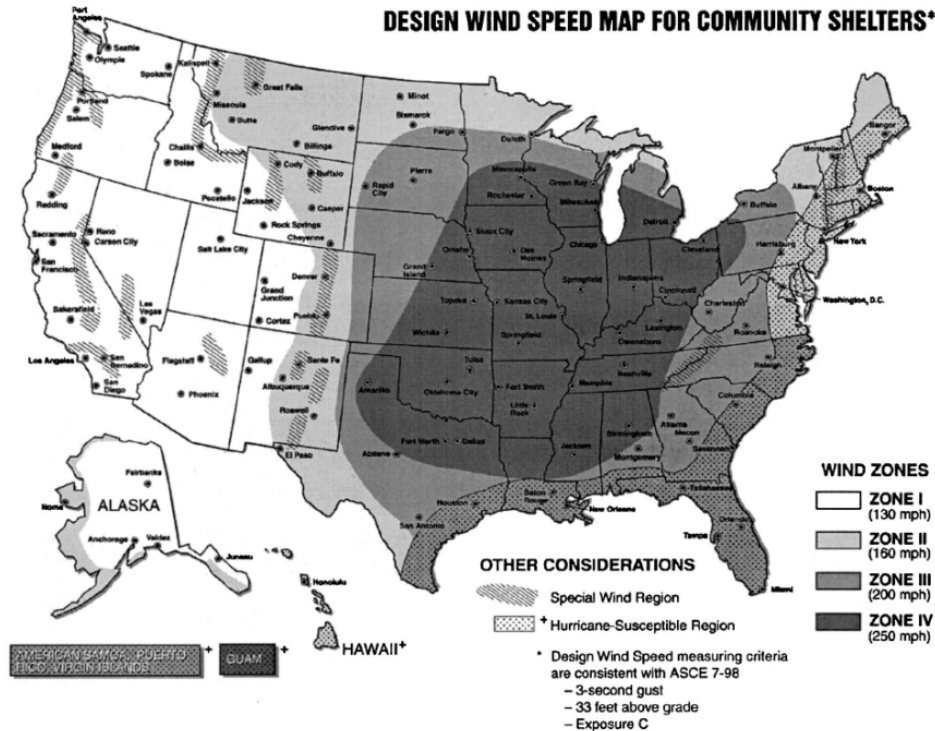


Figura 4. 7. Mapa de velocidades del FEMA-361 (velocidad de ráfaga de 3 seg en mph)

El mapa de velocidades publicado en el FEMA 361, Figura 4.7, incluye datos de eventos históricos y probabilísticos de huracanes y tornados para la determinación de la velocidad de diseño. El mapa proporciona cuatro zonas de viento, desarrollados a partir de un análisis de registros de 50 años de la NOAA de tornados clasificados de F0 a F5 en la escala de Fujita y de registros de 100 años para huracanes clasificados en la escala Saffir-Simpson. El tornado de diseño, definido en el FEMA 361, tiene un periodo de retorno de 2,000 años.

En la revisión del ASCE 7-05 los datos de vientos máximos y huracanes fueron actualizados nuevamente y se asignaron probabilidades de excedencia de 2×10^{-2} /año y 1×10^{-2} /año, correspondientes a periodos de retorno de 50 y 100 años, respectivamente. En la edición del ASCE/SEI 7-10 las probabilidades anuales de excelencia fueron modificadas a 1.4×10^{-3} y 0.58×10^{-3} , correspondientes a periodos de retorno de 700 y 1700 años, debido a la gran catástrofe que causó el huracán Katrina. Cabe aclarar que hasta la edición [ASCE/SEI 7-10](#), para acciones en las estructuras, los tornados no están considerados en las bases de diseño.

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN DE LAS ACCIONES DEL TORNADO EN LAS CONSTRUCCIONES

Los tornados representan un peligro natural único debido a la muy baja probabilidad de ocurrencia, los breves tiempos para alertar a la población (del orden de unos pocos minutos) y las fuerzas intensas y destructivas que imponen en las construcciones. La baja probabilidad de ocurrencia combinada con los altos daños generados por el paso de un tornado hace que el diseño estructural, cuyas premisas son garantizar la seguridad de los ocupantes y el control de daños bajo restricciones financieras, sea un problema complejo y difícil de abordar. En este capítulo se presentan las especificaciones para tomar en cuentas las diferentes acciones que impone el tornado en las construcciones.

5.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Las normas ANSI/ANS 2.3-2011, DOE-STD-1020-2012 y el FEMA 361 clasifican a los vientos de alta intensidad en: vientos máximos, vientos huracanados y vientos de tornado. Estos tres tipos de vientos, aunque de naturaleza meteorológica distinta, se aplican en las estructuras como vientos en una sola dirección, es decir, como viento turbulento en la capa límite atmosférica, que genera presiones y succiones en las áreas expuestas de la estructura. Esta suposición se fundamenta en los siguientes hechos: 1) el tamaño del diámetro de un huracán y de un tornado es mucho mayor que las dimensiones de las construcciones típicas que se analizan, 2) los ingenieros de la práctica están familiarizados con la metodología del viento en una dirección que se utiliza en los códigos convencionales de diseño (ASCE 7), y 3) los vientos de naturaleza ciclónica como los huracanes y tornados no se pueden reproducir en túneles de viento convencionales. En este sentido, las investigaciones de daño de viento sugieren que la magnitud y la distribución de la presión del viento sobre las construcciones producidos por vientos de huracanes y tornados son, esencialmente, idénticas a las producidas por los vientos en una dirección, si la dirección del viento relativa a la construcción se tiene en cuenta (Minor, McDonald, y Mehta, 1977). Una opinión contraria puede encontrarse en Mishra, et al (2008a, 2008b).

También se considera que las velocidades de vientos máximos, huracanes y las velocidades asociadas con la escala de Fujita están referenciadas a un intervalo de observación de 3 segundos, medidos a 10 metros sobre la superficie del suelo en un terreno abierto.

5.2 PRACTICA ACTUAL DE DISEÑO

El proceso de diseño y la evaluación de las construcciones ante las fuerzas que induce un tornado, consiste en procedimientos deterministas que establecen acciones en las estructuras y sus componentes a partir de mapas de velocidades de eventos extremos, especificando métodos aceptables para aplicar y distribuir las acciones sobre las estructuras y sus componentes, y proporcionando criterios de aceptación para determinar si la respuesta calculada de las estructuras y sus componentes es aceptable. La Figura 5.1 resume brevemente el proceso de diseño.

McDonald (1988) proporcionó recomendaciones adicionales para lograr construcciones eficientes ante la acción de vientos extremos:

- La configuración de los elementos estructurales debe permitir un flujo continuo, regular y eficiente de las fuerzas desde el punto en que éstas se generan hasta la cimentación.
- Tomar en consideración todas las posibles combinaciones de carga.
- El sistema estructural debe disponer de redundancia para distribuir las cargas cuando un elemento estructural este sobrecargado.
- El sistema estructural debe disponer de elementos y conexiones dúctiles, que le permita deformarse inelásticamente para disipar la energía introducida por las fuerzas laterales, para evitar el colapso repentino y catastrófico.
- Proporcionar elementos de pared y techo resistentes a proyectiles.
- Reducir al mínimo o eliminar el potencial de proyectiles transportados por el viento.

Los modos de falla que puede ocasionar un tornado sobre las construcciones se dividen en tres categorías:

- Presión del viento, causada por la acción directa del flujo de aire sobre la estructura,
- Cambio de la presión atmosférica, es la caída de presión asociada con la variación del campo de presión atmosférica con el movimiento del tornado sobre la estructura,
- Impacto de proyectiles, causados por los escombros transportados por el viento.

Para tomar en consideración los dos primeros efectos, es importante mencionar que las construcciones están conformadas por muros y techos, dispuestos de tal manera que forman una construcción prismática; dichos techos y muros no necesariamente son impermeables, pueden tener aberturas, tales como ventanas o puertas, por donde el flujo del viento puede penetrar y generar presiones interiores.

5.3 PRESIÓN DEL VIENTO

La fuerza que ejerce el viento de un tornado sobre las construcciones, será la resultante de la presión actuante sobre las superficies exteriores e interiores y se calculará conforme el capítulo 27 del ASCE/SEI 7-10:

$$p = qGC_p - q_i(GC_{pi}) \quad (\text{N/m}^2) \quad (5.3.1)$$

dónde:

q = presión de la velocidad del viento

q_i = presión de la velocidad del viento a la altura del techo h

G = factor de ráfaga

C_p = coeficiente de presión externa

GC_{pi} = coeficiente de presión interna

La presión de velocidad del viento se calcula de la siguiente manera:

Para muros de barlovento, q_z se evaluará a lo largo de toda la altura con la ecuación siguiente:

$$q_z = 0.613K_zK_{zt}K_dV^2 \quad (\text{N/m}^2); \quad V \text{ en m/s} \quad (5.3.2)$$

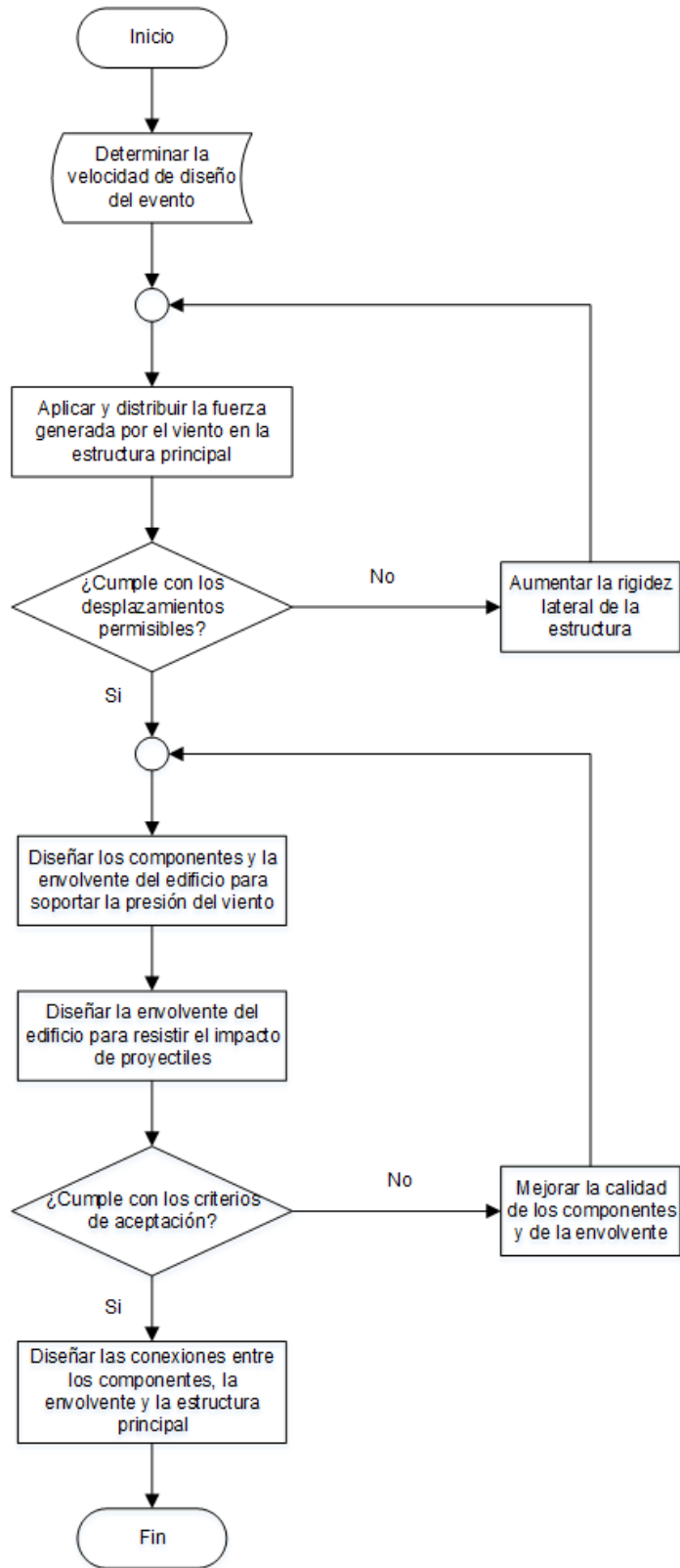


Figura 5. 1. Proceso de diseño de estructuras resistentes a los efectos de tornado

dónde:

K_d = factor de direccionalidad del viento

K_z = coeficiente de exposición de presión de la velocidad

K_{zt} = factor topográfico

V = velocidad básica del viento, tomado de los mapas ANSI/ANS 2.3-2011, DOE-STD-1020-2012 o FEMA 361, que corresponde a la suma de la componente de velocidad tangencial con la componente de velocidad de traslación

Para muros de sotavento, muros laterales y techos, la presión de viento se evaluará a la altura de techo “h”. Los valores de K_z , se indican en la Tabla 5.1.

Para el diseño de tornados, los siguientes parámetros toman los siguientes valores:

Categoría de exposición “C”

Factor de direccionalidad del viento $K_d = 1.0$

Factor topográfico $K_{zt} = 1.0$

Factor de ráfaga $G = 0.9$

Coefficiente de presión interna $GC_{pi} = + / - 0.55$

Los valores de los coeficientes de presión externa se determinan mediante los esquemas a, b y c de la Figura 5.2 y las Tablas 5.2 y 5.3.

5.4 CAMBIO DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA.

El gradiente de presión atmosférica en el interior del vórtice del tornado (Sec. 3.3) es definido por la ecuación del viento ciclostrófico:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} = \frac{v_{\theta}^2(r)}{r} \quad (5.4.1)$$

Donde $v_{\theta}(r)$ es la velocidad tangencial del vórtice y está definida por la ecuación (3.2.1). Al integrar la ecuación (5.4.1) de cero a infinito se define la caída de presión atmosférica. La distribución de presión se indica de manera esquemática en la Figura 3.3.

$$P(r) = \begin{cases} -\rho \cdot V_{\theta}^2 \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^2 \right] & \text{si } \frac{r}{r_{\max}} \leq 1 \\ -\frac{1}{2} \cdot \rho \left[V_{\theta}^2 \cdot \left(\frac{r_{\max}}{r} \right)^2 \right] & \text{si } \frac{r}{r_{\max}} > 1 \end{cases} \quad (5.4.2)$$

En el caso de construcciones cerradas (sin aberturas), la presión interna permanecerá igual a la presión atmosférica antes del paso del tornado. Durante el paso del tornado sobre la construcción, la diferencia entre la presión interna y la presión atmosférica será igual a la ecuación (5.4.2) evaluada en la distancia radial de la posición de la construcción con respecto al centro del vórtice. En este sentido, la máxima diferencia de presión ocurre cuando $r = 0$, esto es:

$$P_{\max} = -\rho \cdot V_{\theta}^2 \quad (5.4.3)$$

Donde V_{θ} es la máxima velocidad tangencial ($r=r_{\max}$). Si, hipotéticamente, la construcción es completamente abierta, la presión interna y externa tenderá a igualarse, para fines prácticos, instantáneamente; así que la fuerza debida al cambio súbito en la presión atmosférica tenderá a cero. Si la construcción posee una gran cantidad de aberturas, la presión interna cambiará durante el paso del tornado y será función del tiempo, es decir, $P_i(r,t)$. Denotando el cambio de presión atmosférica externa por $P_a(t)$, el diferencial de presión que actúa sobre los elementos de la construcción será $P_a(t) - P_i(t)$. Un tratamiento integral del cálculo del cambio de la presión atmosférica con respecto al tiempo en construcciones con aberturas puede encontrarse en [Rotz, et al,\(2002\)](#).

Tabla 5. 1. Coeficientes de exposición Presión de Velocidad, Kh y Kz (ASCE, 2010)

Altura sobre el nivel del suelo, z		Categoría de exposición de terreno		
ft	(m)	B	C	D
0-5	(0-4.6)	0.57	0.85	1.03
20	(6.1)	0.62	0.9	1.08
25	(7.6)	0.66	0.94	1.12
30	(9.2)	0.7	0.98	1.16
40	(12.2)	0.76	1.04	1.22
50	(15.3)	0.81	1.09	1.27
60	(18.3)	0.85	1.13	1.31
70	(21.4)	0.89	1.17	1.34
80	(24.4)	0.93	1.21	1.38
90	(27.5)	0.96	1.24	1.4
100	(30.5)	0.99	1.26	1.43
120	(36.6)	1.04	1.31	1.48
140	(42.7)	1.09	1.36	1.52
160	(48.8)	1.13	1.39	1.55
180	(54.9)	1.17	1.43	1.58
200	(61)	1.2	1.46	1.61
250	(76.3)	1.28	1.53	1.68
300	(91.5)	1.35	1.59	1.73
350	(106.8)	1.41	1.64	1.78
400	(122)	1.47	1.69	1.82
450	(137.3)	1.52	1.73	1.86
500	(152.5)	1.56	1.77	1.89

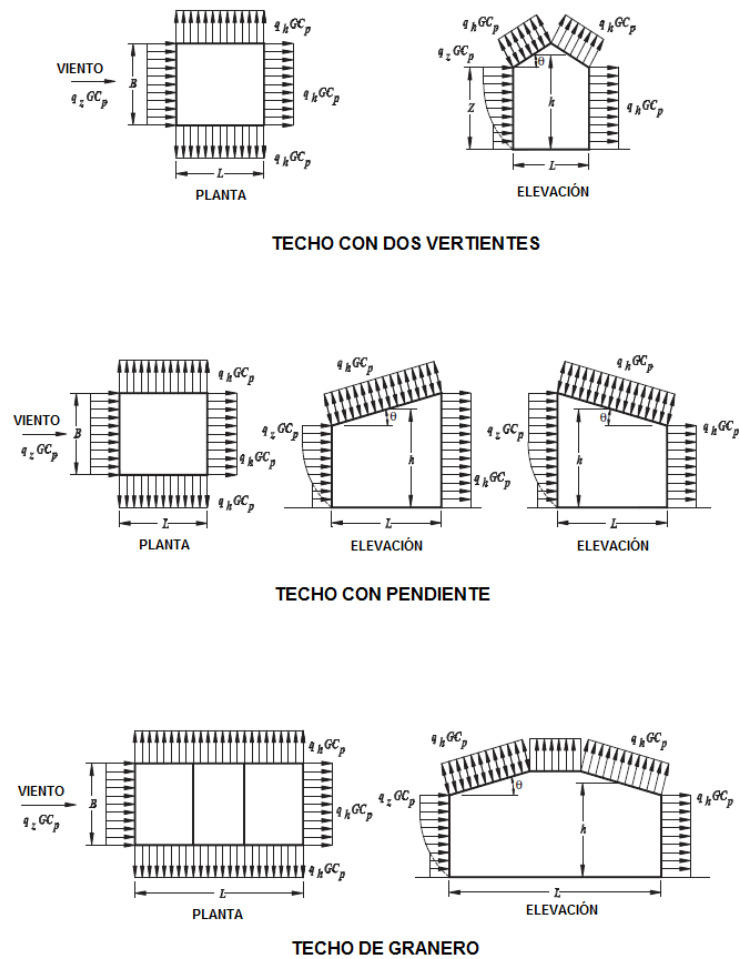


Figura 5. 2. Formas comunes para los coeficientes de presión externa (C_p) (ASCE, 2010)

Tabla 5. 2. Valores de los coeficientes de presión externos (C_p) para muros (ASCE, 2010)

Coeficientes de presión en muros, C_p			
Superficie	L/B	C_p	Usar con
Muros de barlovento	Todos los valores	0.8	q_z
Muros de sotavento	0-1	-0.5	q_h
	2	-0.3	
	≥ 4	-0.2	
Muros laterales	Todos los valores	-0.7	q_h

Tabla 5. 3. Valores de los coeficientes de presión externos (Cp) para techos (ASCE, 2010)

Coeficientes de presión, C _p , para uso con q _h													
Dirección del viento	Barlovento									Sotavento			
	Ángulo, Θ (grados)									Ángulo, Θ (grados)			
	h/L	10	15	20	25	30	35	45	>60#	10	15	>20	
Normal al borde del techo para q>10°	<0.25	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	-0.2	0.0*			-0.3	-0.5	-0.6	
		-0.18	0.0*	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.01Θ				
	0.5	-0.9	-0.7	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	0.0*		-0.5	-0.5	-0.6	
		-0.18	-0.18	0.0*	0.2	0.2	0.2	0.4	0.01Θ				
	≥1.0	-1.3**	-1	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	0.0*		-0.7	-0.6	-0.6	
		-0.18	-0.18	-0.18	0.0*	0.2	0.2	0.3	0.01Θ				
Normal al borde para Θ<10 y paralela al borde para todos los Θ	< 0.5	distancia horizontal desde el borde de barlovento				C _p				* Los valores se proporcionan para los propósitos de interpolación			
		0 a h/2				-0.9, -0.18							
		H/2 a h				-0.9, -0.18				* Los valores se pueden reducir de forma lineal con el área sobre la que se aplica de la siguiente manera			
		h a 2h				-0.5, -0.18							
	> 2h				-0.3, -0.18								
	> 1.0	0 a h/2				-1.3**, -0.18				Área (ft 2)		Fac. de reducción	
										< 100 (9.3 m2)		1	
										200 (23.2 m2)		0.9	
		> h/2				-0.7, -0.18				> 1000 (92.9 m2)		0.8	

5.5. IMPACTO DE PROYECTILES

Las recomendaciones de la Comisión de Regulación Nuclear (NRC) para cargas de proyectiles de tornados se dividen en dos categorías: 1) Penetración y, 2) Fuerza de impacto ocasionada por proyectiles. La Tabla 5.4 especifica el tipo de proyectiles empleados en el diseño de instalaciones nucleares. Las Tablas 5.5 y 5.6 muestran las fuerzas estáticas equivalentes a las fuerzas de impacto, correspondientes a los proyectiles empleados para instalaciones nucleares. La Tabla 5.7 hace referencia a los parámetros de la función de fuerza empleados en la determinación de fuerzas de proyectiles. En la referencia de [Stevenson y Zhao \(1996\)](#) se pueden consultar más detalles al respecto.

5.6. COMBINACIONES DE CARGA

Las combinaciones de carga que involucran los efectos del tornado, W_t , en instalaciones nucleares está dada por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 W_t &= W_{iq} \\
 W_t &= W_{ip} \\
 W_t &= W_{im} \\
 W_t &= W_{iq} + 0.5W_{ip} \\
 W_t &= W_{iq} + W_{im} \\
 W_t &= W_{iq} + 0.5W_{ip} + W_{im}
 \end{aligned} \tag{5.6.1}$$

donde

- W_{iq} = presión del viento
- W_{ip} = efecto del cambio de presión atmosférica
- W_{im} = efecto del impacto de proyectiles

W_i se usará en combinación con las cargas de servicio para obtener las combinaciones de diseño. Para la filosofía de “diseño por factores de carga y resistencia” (LRFD) la combinación de diseño será:

$$\begin{aligned}
 &D + W_i \\
 &D + L + L_r + W_i \\
 &D + L + L_r + W_i + T
 \end{aligned}
 \tag{5.6.2}$$

donde

- D = carga muerta
- L = carga viva
- L_r = carga viva de azotea
- T = carga de temperatura

Tabla 5. 4. Especificaciones de proyectiles de tornado propuesto por la U.S. NRC. (Stevenson y Zhao, 1996)

Proyectil	Masa, kg	Dimensión, m	Velocidad, ^a m/s						
			Región I		Región II		Región III		
Espectro I ^b									
A.	Esfera sólida de acero de 1" de diámetro	0.0254 diámetro		59		52		41	
B.	Proyectil tubular de 8" de diámetro	125	0.203 diámetro	59		52		41	
C.	Automóvil	1800	Longitud = 5.0	59		52		41	
Espectro II ^c									
				V	H	V	H	V	H
D.	Proyectil de madera	52	0.002 x 0.289 x 3.66		83		70		58
E.	Tubo cédula 40 de 6" diámetro	130	0.168 D x 4.58		52		42		10
F.	Varilla de acero de 1" de diámetro	4	0.0254 x 0.915	51		40		8	
G.	Poste de electricidad	510	0.343 D x 10.68		55		48		26
H.	Tubo cédula 40 de 12" diámetro	340	0.32 D x 4.58		47		28		7
I.	Automóvil	1810	2 x 1.3 x 5 ^d		59		52		41

^a Las velocidades de proyectiles que se muestran en la tabla se basan en las velocidades de viento máximo. Estas velocidades se reducirán consistentemente con las nuevas velocidades modificadas mostradas en la Figura 4.2 para reactores avanzados.

^b Todos los proyectiles del Espectro I se asume que impactan normal a la superficie de la estructura con el 35% de la velocidad horizontal máxima del tornado dada en la Tabla 4.1.

^c V es vertical; (H) es horizontal. La velocidad vertical corresponde al 70% de la velocidad horizontal, ambas son aceptables para los dos espectros, excepto para el proyectil (A) del espectro I, y del proyectil (F) del espectro II. Estos proyectiles se utilizan para probar muros con aberturas y se debe considerar que tienen la misma velocidad en todas las direcciones. Los proyectiles (D), (E), (F) y (H) se deben considerar en toda la elevación de las instalaciones y los proyectiles (G) y (I) deben considerarse sobre una altura 10 m de elevación y a una distancia de 0.8 km de las instalaciones.

^d El área de impacto es de 2.6 m²

Tabla 5. 5. Profundidad de la penetración calculada, espesor de la pared recomendada, y función de fuerza dinámica para los proyectiles horizontales de la región I de NRC en muros de concreto con resistencia al impacto de 4000 psi (27,578 kPa) y ductilidad de 1.0 (Stevenson y Zhao, 1996)

Proyectil	Muro de concreto de espesor infinito con una ductilidad de 1.0						Función de fuerza
	Profundidad de penetración para NCR SRP en Zona I, m (pulg)	Espesor de muro, m (pulg)	Fuerza estática equivalente				
			f = 1.0 Hz, kN (kip)	f = 5.0 Hz, kN (kip)	f= 10.0 Hz, kN (kip)	f = 20.0 H, kN (kip)	
Proyectil de madera ^b	0.109 (4.31)	0.305(12.0)	24.9 (5.6)	137.0 (30.8)	193.1 (43.4)	174.4 (39.2)	Tabla 5.7
Tubo cédula 40, 6 pulg ^{c,d}	0.122 (4.82)	0.381 (15.0)	93.4 (21.0)	135.1 (30.4)	186.8 (42.0)	402.1 (90.4)	Tabla 5.7
Varilla de acero ^d , 1 pulg	0.047 (1.84)	0.152 (6.0)	1.02 (0.23)	2.89 (0.65)	9.79 (2.2)	11.1 (2.5)	Tabla 5.7
Poste de electricidad ^b	0.184 (7.26)	0.610 (24.0)	170.8 (38.4)	587.2 (132.0)	800.7 (180.0)	523.1 (117.6)	Tabla 5.7
Tubo cédula 40 de acero ^{c,d} de 12 pulg	0.137 (5.40)	0.457 (18.0)	49.4 (11.1)	279.8 (57.8)	437.7 (98.4)	1094.2 (246.0)	Tabla 5.7
Automóvil ^b	0.190 (7.48)	0.610 (24.0)	278.4 (62.6)	1630.2 (366.5)	2684.3 (603.5)	2982.4 (670.5)	Tabla 5.7

Tabla 5. 6. Profundidad de la penetración calculada, espesor de la pared recomendada, y función de fuerza dinámica para los proyectiles horizontales de la región I de NRC en muros de concreto con resistencia al impacto de 4000 psi (27,578 kPa) y ductilidad de 5 (Stevenson y Zhao, 1996)

Proyectil	Muro de concreto de espesor infinito con una ductilidad de 5.0						Función de fuerza
	Profundidad de penetración para NCR SRP en Zona I, m (pulg)	Espesor de muro, m (pulg)	Fuerza estática equivalente				
			f = 1.0 Hz, kN (kip)	f = 5.0 Hz, kN (kip)	f= 10.0 Hz, kN (kip)	f=20.0 Hz, kN (kip)	
Proyectil de madera ^b	0.109 (4.31)	0.305 (12.0)	11.6 (2.6)	46.3 (10.4)	72.1 (16.2)	90.7(20.4)	Tabla 5.7
Tubo cédula 40, 6 pulg ^{c,d}	0.122 (4.82)	0.381 (15.0)	72.1 (16.2)	113.9 (25.6)	123.7 (27.8)	137.9 (31.0)	Tabla 5.7
Varilla de acero ^d , 1 pulg	0.047 (1.84)	0.152(6.0)	2.2 (0.5)	6.7 (1.5)	8.0(1.8)	9.3(2.1)	Tabla 5.7
Poste de electricidad ^b	0.184 (7.26)	0.610 (24.0)	53.4 (12.0)	250.9(56.4)	363.0 (81.6)	395.0(88.8)	Tabla 5.7
Tubo cédula 40 de acero ^{c,d} de 12 pulg	0.137 (5.40)	0.457 (18.0)	82.3 (18.5)	213.5 (48.0)	251.8 (56.6)	437.7 (98.4)	Tabla 5.7
Automóvil ^b	0.190 (7.48)	0.610(24.0)	173.0 (38.9)	556.9 (125.2)	914.5 (205.6)	1371.8 (308.4)	Tabla 5.7

^a El espesor infinito indica que la pared es al menos tres veces la profundidad de penetración calculada. Esto también está destinado a garantizar que no habrá formación de costras. La fuerza estática equivalente se determina a partir Ref. 16 suponiendo un sistema de un grado de libertad con comportamiento elastoplástico, no amortiguado y sometido a una carga de impulso triangular.

^b Estos son los proyectiles altamente deformables; de ahí que normalmente no penetran las barreras de concreto. Los valores de penetración calculados mostrados son sólo para fines de comparación.

^c El diámetro exterior nominal del tubo se utiliza para definir el diámetro del proyectil con ductilidad de 0.72.

^d Proyectil penetrante.

Tabla 5. 7. Parámetros de carga de la función de fuerza de proyectiles

Proyectil	F_{\max}^b kip	t_d^b s	Tipo de proyectil
Proyectil de madera	28	0.07	Deformable
Tubo de acero de 6" pulg	323	0.0047	Rígido
Varilla de acero de 1" de diámetro	25	0.0018	Rígido
Poste de electricidad	120	0.105	Deformable
Tubo de acero de 12 pulg	615	0.0058	Rígido
Automóvil ^c	447	0.052	Deformable

^a De la tabla 5.4, los proyectiles se definen de acuerdo al espectro II.

^b F_{\max} , máxima fuerza de impacto; t_d , duración de penetración.

^c Gobierna el diseño.

5.7. NECESIDAD DE UNA NUEVA NORMATIVIDAD PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS ANTE LA ACCIÓN DEL TORNADO

Es importante entender las limitaciones que existen en la metodología de diseño de estructuras resistentes a los efectos del tornado descritos en las secciones anteriores. La metodología de diseño consiste, esencialmente, en utilizar las disposiciones del ASCE 7 para fuerzas de viento (capítulo 27), modificar algunos factores para el cálculo de la presión básica de diseño y utilizar velocidades de viento especificadas en las normas ANSI/ANS 2.3-2011, DOE-STD-1020-2012 y el FEMA 361 y que son superiores a las proporcionadas en el ASCE 7. Como puede observarse, la metodología empleada corresponde a la del viento turbulento en la capa límite atmosférica, que produce efectos distintos en las construcciones a los que produce un tornado. Por esta razón, este enfoque de diseño conduce, invariablemente, a factores de seguridad muy elevados para subsanar el desconocimiento de los efectos que causa un tornado en las construcciones, particularmente en la interacción tornado-estructura. Obsérvese que grandes factores de seguridad producen diseños costosos, por esta razón, el diseño ante la acción del tornado solo se ha implementado en construcciones de usos especiales y para eventos extremos, es decir, tornados F4 y F5.

Sin embargo, el 94% de los tornados que ocurren en los Estados Unidos (y en el resto del mundo) corresponden a la clasificación F0, F1 y F2 en la escala de Fujita. Estos tornados a pesar de ser de baja intensidad generan daños importantes en las construcciones de usos generales, y en ocasiones, pérdidas humanas.

Las normas convencionales como el ASCE-7 consideran únicamente la acción de huracanes y vientos máximos en el diseño las estructuras. Es importante señalar que para velocidades inferiores a los 72 m/s el diseño por viento queda regido por velocidades de huracanes y no por tornados, tal como indica la Tabla 5.8. De este punto de vista, la seguridad de las construcciones de usos generales ante la acción de tornados de baja intensidad (F0, F1 y F2), debe estar garantizada por las normas convencionales. Esta situación usualmente no se cumple.

Recientemente, [Haan Jr, et al, \(2009\)](#) utilizaron el simulador de tornados de la Universidad de Iowa para hacer una comparación entre los coeficientes de presión generados por un tornado y los propuestos en el ASCE 7 para construcciones regulares de baja altura. Los resultados mostraron que los coeficientes de presión de un tornado en muros laterales son mayores a los propuestos por el ASCE

7 en un factor de 1.5; mientras que los coeficientes de presión en techos resultaron ser mayores a los propuestos por el ASCE 7 en un factor de 1.8 a 3.2, tal como indica la ecuación 5.7.1.

Tabla 5. 8. Comparación de velocidades de viento en huracanes y tornados

Categoría de la escala Saffir-Simpson	Categoría de la escala Fujita	Velocidad del viento de huracanes*	Velocidad del viento de tornados*
—	F0	—	20-34 m/s (45-77 mph)
C1	F1	42-53 m/s (93-119 mph)	35-52 m/s (78-118 mph)
C2	F2	54-62 m/s (120-138 mph)	53-72 m/s (119-163 mph)
C3	—	63-72 m/s (139-163 mph)	—
C4	F3	73-87 m/s (164-194 mph)	73-94 m/s (164-210 mph)
C5	F4	>87 m/s (>194 mph)	95-117 m/s (211-262 mph)
—	F5	—	>117 m/s (>262 mph)

* Intervalo de medición de 3 s, a 10 m sobre el nivel del suelo, en terreno abierto.

$$\frac{C_{\hat{F}_x}}{C_{\hat{F}_x}^{ASCE}} = 1.0 \quad \frac{C_{\hat{F}_y}}{C_{\hat{F}_y}^{ASCE}} = 1.5 \quad \frac{C_{\hat{F}_z}}{C_{\hat{F}_z}^{ASCE}} = 1.8 \sim 3.2 \quad (5.7.1)$$

dónde:

x = dirección longitudinal o paralela a la trayectoria del tornado

y = dirección transversal

z = dirección vertical

Con base a lo anterior, y considerando construcciones de baja altura, la ecuación (5.3.1) puede reescribirse de la siguiente manera

$$p = q_h [H_i \cdot GC_p - GC_{pi}] \quad (\text{N/m}^2) \quad (5.7.2)$$

dónde:

H_i = aumento del coeficiente de presión para tornados

q_h , q_i , GC_p , GC_{pi} ya han sido definidos previamente

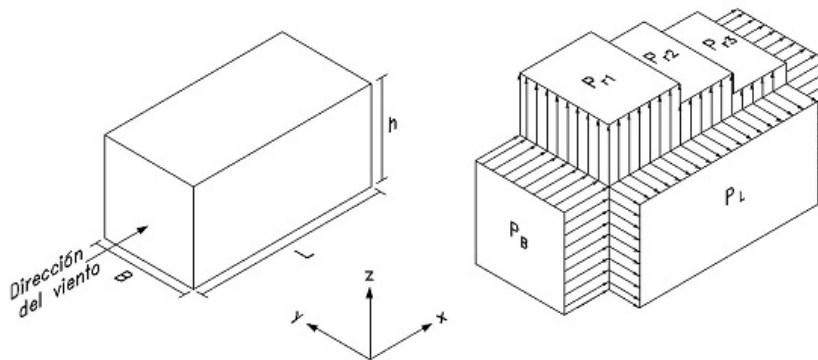


Figura 5. 3. Distribución de las presiones de viento en una construcción regular de baja altura

Con el fin de observar las diferencias en las presiones que se obtienen con los coeficientes de presión de las disposiciones del ASCE 7 y las presiones que se obtienen con los coeficientes de presión equivalentes de tornados en construcciones regulares de baja altura, se realizó una comparación de las presiones generadas por vientos máximos, vientos huracanados y vientos de tornado. Las velocidades de los vientos máximos y de los vientos huracanados se obtienen de los mapas de regionalización eólica que proporciona el ASCE 7-10 para los periodos de retorno de 700 y 1,700 años. Las velocidades de los vientos de tornado corresponden a los límites superiores de las categorías en la Escala de Fujita. La dirección del viento, la configuración geométrica ($L/B=2$, $h/L=0.25$) y la distribución de presiones se muestra en la Figura 5.3. La comparación de las presiones generadas por vientos máximos, vientos huracanados y tornados en una construcción regular de baja altura se presenta en la Tabla 5.9, donde P_b , P_L , P_s es la presión en muros de barlovento, laterales y de sotavento, respectivamente; P_{r1} , P_{r2} , P_{r3} es la distribución de presión en el techo de la construcción.

Tabla 5.9. Comparación de las presiones de viento

Condición	Categoría	Vel. básica (m/s)	q_h (N/m ²)	Presión en muros (N/m ²)			Presión en techos (N/m ²)		
				P_b	P_L	P_s	P_{r1}	P_{r2}	P_{r3}
Vientos Máximos	T=700/año	51	1152	1417	-1319	-927.4	-1514.9	-1123.2	-927.4
Vientos Máximos	T=1700/año	54	1291.5	1588.5	-1478.8	-1039.7	-1698.3	-1259.2	-1039.7
Vientos huracanados	C4 (T=700/año)	80	2834.5	3486.4	-3245.5	-2281.8	-3727.4	-2763.6	-2281.8
Vientos huracanados	C4 (T=1700/año)	85	3199.9	3935.9	-3663.9	-2575.9	-4207.9	-3119.9	-2575.9
Vientos de tornado	F0	34	602.3	764.9	-900.4	-493.9	-1550.9	-1008.9	-737.8
Vientos de tornado	F1	52	1408.9	1789.3	-2106.3	-1155.3	-3627.9	-2359.9	-1725.9
Vientos de tornado	F2	72	2701.1	3430.4	-4038.1	-2214.9	-6955.3	-4524.3	-3308.8
Vientos de tornado	F3	94	4604	5847.1	-6883	-3775.3	-11855.3	-7711.7	-5639.9

La Tabla 5.9 indica que un tornado de categoría F1 en la escala de Fujita, con una velocidad de viento del orden de 52 m/s, genera una distribución de presión en el techo de una construcción regular de baja altura similar a la distribución de presión que genera un huracán de categoría 4 con una velocidad del orden de 80 m/s y un periodo de retorno de 700 años. Esto sugiere que las construcciones regulares de baja altura, diseñados con las disposiciones del ASCE 7 o normas similares (como el Manual de diseño de obras civiles de la CFE en México) no pueden soportar las fuerzas de viento que induce un tornado, aunque estas sean de baja intensidad. También sugiere que el techo de las construcciones es el elemento más vulnerable de falla ante la acción de un tornado. Es importante señalar que en el cálculo de las presiones de la Tabla 5.9 se supuso flujo “estacionario” (la velocidad del viento no varía con el tiempo), esta suposición no es del todo correcta, ya que el campo de flujo que genera un tornado es “no estacionario”; sin embargo, se cree que la comparación es necesaria para mostrar que las disposiciones de los códigos convencionales no garantizan la seguridad de las construcciones de uso general ante la acción del tornado, a pesar de que éste sea de baja intensidad.

El objetivo de cualquier norma de construcción es proteger a la población y sus bienes materiales de posibles fenómenos naturales y asegurar la sanidad ambiental. En el caso del tornado no existe una solución aceptable para el diseño de construcciones de uso general. Recientemente, [van de Lindt, et al., \(2012\)](#) propusieron una filosofía de diseño basada en logro de dos objetivos: 1) disminuir las pérdidas económicas, mediante la disminución del daño y, 2) abatir la pérdida de la vida humana. Para lograr estos objetivos establecieron:

- El daño en las construcciones puede ser controlado para tornados de intensidad EF0 y EF1, garantizando la correcta transmisión de la fuerza del viento, que se genera en los elementos de recubrimiento (fachada), a la estructura portante. Es necesario que los materiales ligeros para techos y muros aparentes, tales como láminas y recubrimientos, queden bien fijos a la estructura con conectores de alta resistencia. El objetivo implícito es evitar fuerzas de impacto por escombros que puedan dañar a los habitantes y a las construcciones aledañas. [van de Lindt, et al, \(2012\)](#) nombraron a este apartado como “criterio de diseño de componentes”.
- Para velocidades de viento que corresponden a tornados de intensidad EF2 y EF3 deben tenerse en cuenta los elementos de recubrimiento (fachada) y el desempeño del sistema estructural. Debe garantizarse que la configuración de los elementos estructurales permitan un flujo continuo, regular y eficiente de las fuerzas de viento desde el punto en que éstas se generan hasta la cimentación. Los objetivos implícitos son evitar las fuerzas de impacto por escombros y dotar a la estructura de rigidez lateral para que sea capaz de soportar las fuerzas de alta intensidad que produce el tornado. [van de Lindt, et al, \(2012\)](#) se refieren a este apartado como “diseño de componentes y de los sistemas estructurales”.
- Para tornados de intensidad EF4 y EF5 la cuestión más importante es garantizar que los elementos de recubrimiento (fachada) y el sistema estructural sean capaces de proporcionar “seguridad para la vida” a los ocupantes del edificio. En el caso que esta solución sea económicamente inviable se deben proporcionar “otras alternativas”. En el caso específico de los Estados Unidos, estas alternativas se refieren a “cuartos seguros”, “sótanos” y “refugios comunitarios”. [van de Lindt, et al, \(2012\)](#) se refieren a este apartado como “diseño del sistema estructural y otras alternativas”.

Tabla 5. 10. Filosofía de diseño para tornados basada en el doble objetivo

Metodología propuesta	Escala de Fujita Mejorada (Intervalo de observación 3-s)					
	EF0	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5
Objetivos de diseño	D	D	D/LS	D/LS	LS	LS
Criterios de diseño	C	C	C/S	S	S/A	A

Nota: D = daño; LS = seguridad para la vida; C = componentes; S = sistema estructural; y A = otras alternativas

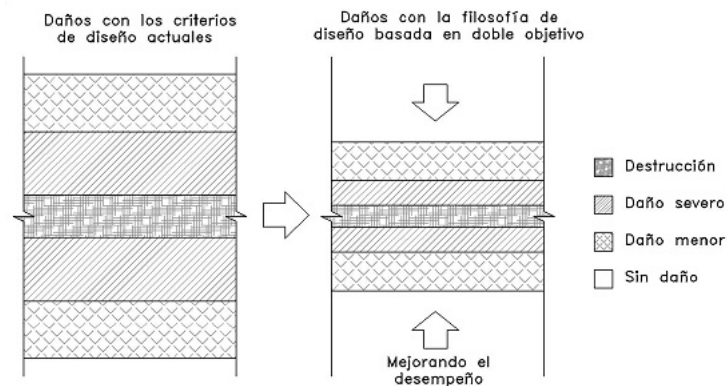


Figura 5. 4. Reducción de la franja de daño del tornado después de aplicar la filosofía de diseño basada en el doble objetivo

La Tabla 5.10 resume la filosofía de diseño ante la acción de tornados propuesta por [van de Lindt, et al, \(2012\)](#). Al aplicar la filosofía de diseño basada en el doble objetivo se busca garantizar la reducción al mínimo de las pérdidas económicas, cuando éstas son posibles, y proporcionar “seguridad para la vida” a los ocupantes del edificio en el peor de los casos. La Figura 5.4 muestra la reducción de la franja de daño que deja un tornado a su paso cuando se aplica la filosofía de diseño basada en el doble objetivo.

CAPÍTULO 6

MODELOS MATEMÁTICOS REPRESENTATIVOS

El modelo que se ha adoptado en las normas de instalaciones nucleares para tomar en cuenta los efectos del tornado en las construcciones, es el correspondiente a la capa límite atmosférica (ABL). Sin embargo, los tornados tienen un origen meteorológico y una estructura del campo de viento distinto al viento turbulento en la capa límite. Por esta razón, han surgido modelos matemáticos simplificados que han tratado de incorporar la estructura del campo de velocidades del tornado en el análisis. Estos modelos están basados en la suposición de que el campo de velocidades que genera un tornado es el correspondiente al vórtice de una celda y en la consideración de que la velocidad tangencial máxima del viento, la ubicación y la orientación de la estructura con respecto al vórtice del tornado son los principales factores que influyen en la capacidad del tornado para ocasionar daño.

6.1. MODELO DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA

La presión que ejerce un fluido sobre un obstáculo está dada por la siguiente ecuación:

$$p = \frac{w \cdot C_p \cdot V^2}{2 \cdot g} \quad (6.1.1)$$

donde C_p es el coeficiente de presión, w es el peso específico del “aire estándar” igual a 12.02 N/m^3 , V es la velocidad del viento expresada en metros sobre segundo y g es la aceleración de la gravedad tomada igual a 9.81 m/s^2 . Si se sustituye estos valores en la ecuación (6.1.1), la siguiente expresión resulta:

$$p = \delta \cdot C_p \cdot V^2 \quad (6.1.2)$$

donde p está expresada en Pascales, δ toma el valor de 0.613 y V es expresada en metros sobre segundo. El valor de la velocidad del viento, V , que es usada para una situación en particular depende de un número de factores incluyendo las características del terreno circundante, la altura de la construcción sobre el nivel del suelo y la interacción dinámica de la estructura con el viento. Las características del terreno circundante y la variación de la velocidad con la altura se toman con un coeficiente de altura C_h . La forma geométrica del elemento estructural se tiene en cuenta mediante el uso de un coeficiente de presión, C_p , cuyo valor depende de la forma geométrica del elemento estructural y del número de Reynolds asociado. La interacción dinámica de la estructura con el viento se tiene en cuenta mediante el uso de un factor de efecto de ráfaga G . De este modo la ecuación (6.1.2) queda como:

$$p_z = \delta \cdot G \cdot C_p \cdot C_h \quad (6.1.3)$$

La ecuación (6.1.3) escrita en terminología consistente con el ASCE/SEI 7 es la siguiente:

$$p_z = \delta \cdot K_z \cdot G \cdot V^2 \cdot C_p \quad (6.1.4)$$

En el caso de vientos de tornado se asume que no existe variación con la altura y que el terreno circundante corresponde a un terreno plano con pocas obstrucciones (categoría de exposición C). El factor de ráfaga se asume igual a $G = 0.9$, (FEMA, 2000). En este trabajo se asume conservadoramente $G = 1.0$. De este modo, la ecuación (6.1.4) queda como:

$$p_z = 0.613 \cdot V^2 \cdot C_p \quad (6.1.5)$$

donde p_z está en Pascales y V en metros sobre segundo.

6.2. MODELO DE DUTTA

El modelo propuesto por Dutta, et al, (2002) está basado en las investigaciones sobre el campo de velocidades de un tornado realizadas por Mehta y sus colaboradores (Ishizaki y Chiu, 1976). El modelo incorpora en el análisis la acción de la velocidad radial y asume conservadoramente que la velocidad tangencial no varía con la altura. Dutta supone que la condición crítica que impone un tornado sobre una construcción es la mostrada en la Figura 6.1.

En la condición crítica es posible combinar vectorialmente la componente radial y tangencial, como se indica en la Figura 6.1, para obtener la velocidad de rotación V_{ro} .

$$V_{ro}^2 = T_c^2 + R_c^2 \quad (6.2.1)$$

Mehta determinó que la magnitud de las componentes de velocidad radial y vertical, para la condición crítica, puede ser aproximadas en términos de la velocidad tangencial máxima, T_c :

$$W_c = \frac{T_c}{3} \text{ a } \frac{2 \cdot T_c}{3} \quad \text{y} \quad R_c = \frac{T_c}{2} \quad (6.2.2)$$

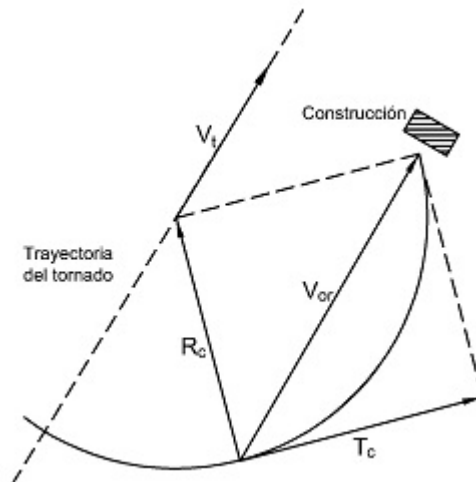


Figura 6. 1. Componentes de velocidad críticas en un tornado

Substituyendo valores

$$V_{ro}^2 = T_c^2 + \left(\frac{T_c}{2}\right)^2 = \frac{5 \cdot T_c^2}{4} \quad (6.2.3)$$

Tabla 6. 1. Valores sugeridos por Dutta, et al, (2002) para las componentes de velocidad

No.	Organización/Consultor	Fundamento	Recomendación para las magnitudes de las componentes de velocidad (km/h)
1	EESA, 1968	Evaluación del daño	$V_s > 480$ en el centro
2	Ishijaki, et al.	Tornado Toyohashi, febrero 7 de 1969	$V_s=360$
3	Comisión de energía atómica, US	Bases de diseño	$V_{ro}= 480$, $V_t=60$
4	Ingenieros estructurales, US	Opinión	$V_s= 360$
5	Fujita	Tornado de Lubbock	$V_t=63$
6	Chang	Tornado de Lubbock	$V_s=320-480$
7	Fujita, et al.	Tornado de Tokyo, 1971	$V_t=50$ $V_s=240$
8	Mehta, et al.	Opinión.	$V_t= 50$ constante, mientras V_s , V_{ro} son variables. $V_t=0 - 104$
9	Ying and Chang	Promedio ponderado	$V_{ro}=480$, $V_v= 160$, $V_t=48$
10	Comisión de trabajo sobre fuerzas del viento, 1961		$V_s=480$
11	Oficina de meteorología, 1964, US		$V_s= 480$ o superior
12	Tepper	Estimación	$V_t=40 - 64$
13	Departamento del Comercio, US	Registro	$V_t=109$
14	Martin	Estimación	$V_t=72$

Por tanto, la velocidad horizontal máxima del viento, V_s , que actúa en una construcción está dada por la suma de la velocidad de rotación, V_{ro} , y la velocidad de translación, V_t , es decir:

$$V_s = \sqrt{V_{ro}^2} + V_t = 1.12 \cdot T_c + V_t \quad (6.2.4)$$

A partir de registros de tornados, Dutta, et al, (2002) observaron que la velocidad de traslación puede variar entre 0 y 104 km/h (0–29 m/s), como se indica en la Tabla 6.1. Concluyeron que una velocidad de traslación promedio, V_t , puede ser tomada como $\frac{1}{8}$ de la velocidad de rotación, V_{ro} , o de manera equivalente como $\frac{1}{6}$ de la velocidad tangencial máxima T_c . De esta manera, la ecuación (6.2.4) se reduce a:

$$V_s = 1.12 \cdot T_c + \frac{T_c}{6} = 1.28 \cdot T_c \quad (6.2.5)$$

Sin embargo, las investigaciones recientes han mostrado que la velocidad de traslación de un tornado es muy variable y actualmente no se ha demostrado si existe alguna relación entre la velocidad de traslación, V_t , y las otras velocidades del tornado. Incluso, se han publicado reportes que indican que por momentos el tornado se mantiene fijo en un solo lugar y luego cambia de dirección súbitamente (Melaragno, 1982). Un caso curioso ocurrió el 2 de junio de 1997 en Nayagarh en el estado de Orissa, en la India, en donde un tornado dio marcha atrás en su trayectoria en una cierta distancia y luego viró

90° con respecto a la trayectoria inicial. Por esta razón, la suposición hecha por Dutta en la ecuación (6.2.5) parece no ser válida.

La presión que ejerce el viento de un tornado sobre una construcción, incorporando la velocidad radial y la velocidad de traslación en la condición crítica que sugiere Dutta, se obtiene de sustituir la ecuación (6.2.4) en la ecuación (6.1.5), es decir:

$$p_z = 0.613 \cdot C_p \cdot (1.12 \cdot T_c + V_t)^2 \quad (6.2.6)$$

donde T_c es la velocidad tangencial máxima que se presenta cuando $r = r_{\max}$ y V_t es la velocidad de traslación. Ambas están dadas en metros sobre segundo.

6.3 MODELO DE YI-KWEI WEN

El modelo propuesto por [Yi-Kwei Wen \(1975\)](#) está basado en resultados obtenidos de investigaciones meteorológicas sobre los campos de velocidades de viento cercanos a la superficie terrestre, así como en los planteamientos teóricos desarrollados por [Kuo \(1971\)](#). El modelo de Wen describe series de tiempo que establecen el campo de velocidades y aceleraciones que se generan a diversas alturas sobre el terreno, debidas al paso de un tornado de un solo vórtice.

El modelo contempla dos etapas: 1) generación del campo de velocidades asociado al vórtice del tornado, y 2) interacción de los vientos sobre la construcción. Para facilitar el análisis, el modelo utiliza dos sistemas de referencia:

- Un sistema cilíndrico móvil con origen en el centro del vórtice del tornado que se desplaza con una velocidad constante V_t cuyas variables espaciales y componentes de velocidad son $(r, \theta, z; T, R, W)$ respectivamente.
- Un sistema cartesiano fijo con origen en el centro de la construcción cuyas variables espaciales y componentes de velocidad asociadas son $(x, y, z; u, v, w)$ respectivamente.

En referencia a la generación del campo de velocidades del tornado, el modelo considera dos regiones de la atmósfera cercana a la superficie del terreno: la capa límite turbulenta cercana a la superficie y la región de flujo potencial que se observa sobre la capa límite. El espesor de la capa límite en la región afectada por el tornado, $\delta(r')$, se define mediante la expresión siguiente:

$$\delta(r) = \delta_0 \cdot [1 - e^{-0.5 \cdot r^2}] \quad (6.3.1)$$

dónde:

$r = \frac{r'}{r_{\max}}$ es una cantidad adimensional

r' distancia radial medida desde el centro del vórtice a centro de la construcción

r_{\max} distancia radial al punto donde se presenta la velocidad tangencial máxima sobre la capa

límite

δ_0 espesor de la capa límite cuando $r \gg 1$

En la parte de la atmósfera sobre la capa límite, se considera que en cada punto cercano al eje del tornado se presentan componentes tangencial al radio, T , y una componente vertical, W , para definir al vector velocidad total en cada punto. La velocidad tangencial se define como:

$$T = f(r) = 1.4 \cdot \frac{T_{\max}}{r} \cdot [1 - e^{-1.256 \cdot r^2}] \quad \text{si } \eta > 1 \quad (6.3.2)$$

donde T_{\max} es la magnitud de la velocidad máxima tangencial del viento sobre la capa límite. Se considera además la existencia de una velocidad vertical ascendente, que aparece en el centro del tornado, y alcanza su valor máximo en una zona comprendida entre $0.6 < r \leq 1$, cuya magnitud queda definida por:

$$W = g(r) = 93 \cdot r^3 \cdot [e^{-5 \cdot r}] \cdot T_{\max} \quad \text{si } \eta > 1 \quad (6.3.3)$$

El modelo considera que en esa parte de la atmósfera, no existe componente radial de la velocidad del viento.

En la región de la atmósfera correspondiente a la capa límite, se considera que existen las tres componentes T , R , W , que son la componente tangencial, la radial y la componente vertical, respectivamente. Se considera que estas tres componentes varían en esa región, al variar la altura sobre la superficie del terreno; el modelo acepta que esa variación queda definida por las siguientes expresiones, del tipo de espirales de Eckman:

$$\begin{aligned} T(\eta, r) &= f(r) \cdot [1 - e^{-\pi \cdot \eta} \cdot \cos(2 \cdot b \cdot \pi \cdot \eta)] \\ R(\eta, r) &= f(r) \cdot [0.672 \cdot e^{-\pi \cdot \eta} \cdot \sin[(b+1) \cdot \pi \cdot \eta]] \quad \text{si } \eta \leq 1 \\ W(\pi, \eta) &= g(r) \cdot [1 - e^{-\pi \cdot \eta} \cdot \cos(2 \cdot b \cdot \pi \cdot \eta)] \end{aligned} \quad (6.3.4)$$

En las expresiones anteriores, el término b es una cantidad adimensional, definida por la siguiente expresión:

$$b(r) = 1.2 \cdot e^{-0.8 \cdot r^4} \quad (6.3.5)$$

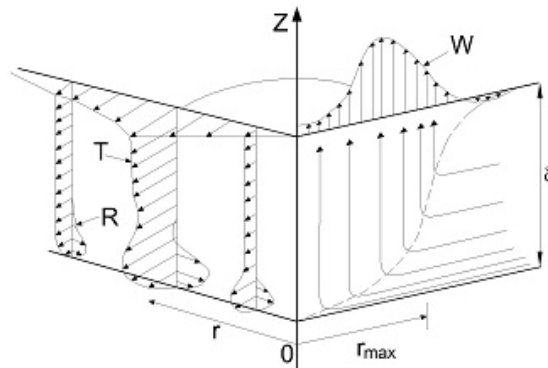


Figura 6. 2. Representación esquemática de la estructura del campo de velocidades de un tornado (Kuo, 1971)

En todas las expresiones anteriores, el parámetro $\eta = z/\delta(r)$, donde z , es la altura de un punto sobre la superficie del terreno, y δ , es el espesor de la capa límite que se calcula de acuerdo a la ecuación (6.3.1). Las expresiones (6.3.1) a (6.3.5) definen al campo de velocidades generadas en la región de la atmósfera donde se genera el tornado, referidas al eje vertical que define al centro del tornado. Se observa que dicho campo queda definido al establecer a tres parámetros básicos: r_{max} , T_{max} y δ_0 ; estos tres parámetros se definen en función del sitio donde aparece el tornado, su radio, y el valor de la velocidad máxima que se genera en la región superior a la frontera de la capa límite; ellos establecen el tamaño, la intensidad y las características de rotación de los vientos provocados por un tornado. La Figura 6.2 muestra la estructura básica del campo de velocidades del tornado descritas por las expresiones mencionadas.

Por otra parte, la física involucrada en la interacción fluido-estructura asociada al paso de un tornado es sumamente compleja. El modelo considera que para una construcción esbelta la relación entre fuerza y velocidad puede ser aproximada por la ecuación semi-empírica que describe la fuerza que ejerce un fluido sobre un obstáculo:

$$F(z) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot D(\alpha) \cdot U \cdot |U| + \frac{\pi}{4} \cdot \rho \cdot C_M \cdot D(\alpha)^2 \cdot \frac{dU}{dt} \quad (6.3.6)$$

donde ρ es la densidad del aire; C_D y C_M son los coeficientes de arrastre y de inercia; D es el ancho del área expuesta por unidad de altura de la construcción; U y dU/dt son la magnitud del vector de velocidad y aceleración respectivamente.

El modelo considera que al interactuar los vientos del tornado sobre la construcción, se genera una fuerza total $F(z, t)$ por unidad de longitud, que es la suma de dos componentes; una de ellas se genera por la fuerza de arrastre inducida por el viento al chocar con la construcción, y la otra es la fuerza de inercia provocada por los cambios repentinos en la magnitud y dirección de la velocidad de las masas de aire que interactúan sobre la construcción.

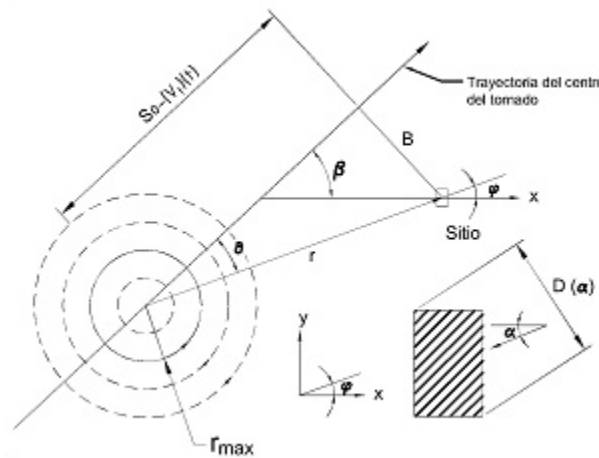


Figura 6.3. Problema geométrico (Wen, 1975)

Para analizar los efectos producidos por el paso de un tornado cerca de una construcción, se consideró que su posición relativa respecto al centro y la trayectoria del tornado fuese la que se muestra en la Figura 6.3, en la cual aparece una construcción situada a una distancia r del centro del tornado. En la

Figura 6.3 se define además, la distancia B que existe entre la construcción y la trayectoria, medida perpendicularmente a esta última; el ángulo β referido al sistema cartesiano de la construcción y la trayectoria del tornado; la distancia S_0 que mide la posición inicial del tornado al inicio del análisis; V_t , es la velocidad de traslación del campo de velocidades del tornado y t es el tiempo que transcurre a medida que el tornado se desplaza respecto a la construcción. De acuerdo a la Figura 6.3, las componentes de la velocidad u, v y w en el sitio de la construcción están relacionadas con las componentes de velocidad T, R y W del sistema de referencia móvil mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} u(z,t) &= -T(z,r) \cdot \sin(\phi) - R(z,r) \cdot \cos(\phi) + U(z) \cdot \cos(\beta) \\ v(z,t) &= T(z,r) \cdot \cos(\phi) - R(z,r) \cdot \sin(\phi) + U(z) \cdot \sin(\beta) \\ w(z,t) &= W(z,r) \end{aligned} \quad (6.3.7)$$

donde $U(z)$ es la velocidad horizontal predominante del viento definida por la siguiente ecuación:

$$U(z) = v_a \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0.15} \quad (6.3.8)$$

Los valores de r , ϕ y θ quedan definidos por:

$$\begin{aligned} r &= \frac{\sqrt{B^2 + (S_0 - V_t \cdot t)^2}}{r_{\max}} \\ \phi &= \beta - \theta \\ \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{B}{S_0 - V_t \cdot t} \right) \end{aligned} \quad (6.3.9)$$

Las ecuaciones (6.3.7) a (6.3.9) permiten expresar la fuerza, definida en la ecuación (6.3.6), en términos de sus componentes cartesianas:

$$\begin{aligned} F_x(z,t) &= \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot D(\alpha) \cdot u^2(z,t) \right] \cdot \cos(\alpha) + \left[\frac{\pi}{4} \cdot \rho \cdot C_M \cdot D^2(\alpha) \cdot \frac{du}{dt} \right] \cdot \cos(\alpha') \\ F_y(z,t) &= \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot D(\alpha) \cdot v^2(z,t) \right] \cdot \sin(\alpha) + \left[\frac{\pi}{4} \cdot \rho \cdot C_M \cdot D^2(\alpha) \cdot \frac{dv}{dt} \right] \cdot \sin(\alpha') \end{aligned} \quad (6.3.10)$$

Las ecuaciones (6.3.7 a 6.3.10) permiten calcular las series de tiempo de velocidades y fuerzas en la dirección de “x” y “y” si se conocen los parámetros que definen el campo de velocidades y las características geométricas de un problema en específico. Los términos du/dt y dv/dt en la ecuación (6.3.10) se refiere a la aceleración total y se remite al lector al Apéndice B para obtener una lista completa de las expresiones necesarias para el cálculo de estos términos. Los valores de los coeficientes de arrastre, C_D , y de inercia, C_M , se obtiene de pruebas de laboratorio. Los valores recomendados por la “Det Norske Veritas” (DNV) para los coeficientes de arrastre y de inercia se indican en la Figura 6.4 y 6.5, respectivamente.

Fue posible comparar los resultados que se obtienen de la aplicación del modelo de Wen, con los que se obtuvieron de mediciones en el tornado que se presentó en Spencer descrito por [Kosiba y Wurman](#)

(2010). La Figura 6.6 muestra la comparación de resultados, en donde se observa que el modelo permite reproducir las velocidades tangenciales máximas dentro del vórtice; fuera del vórtice del tornado, el modelo presenta valores menores a los medidos directamente en el sitio. Las diferencias observadas se deben a la limitación del modelo de Wen (1975) para reproducir la compleja física que involucró el tornado de Spencer, particularmente al fenómeno de “rompimiento de vórtice” que describe la aparición de múltiples celdas en el interior del vórtice.

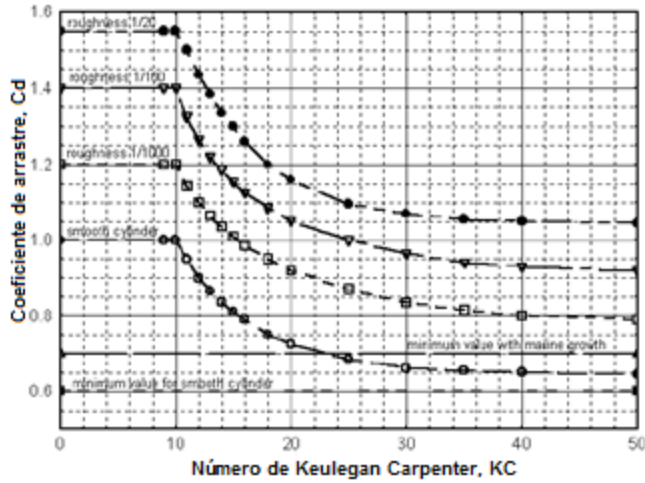


Figura 6. 4. Valores sugeridos del coeficiente de arrastre, C_d , por DNV

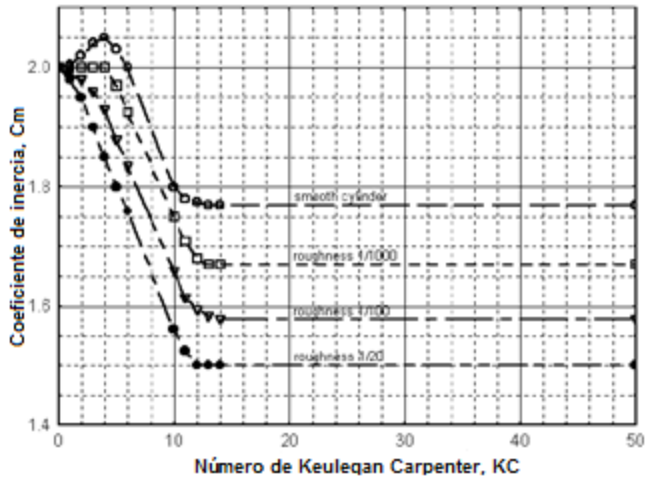


Figura 6. 5. Valores sugeridos del coeficiente de inercia, C_m , por DNV

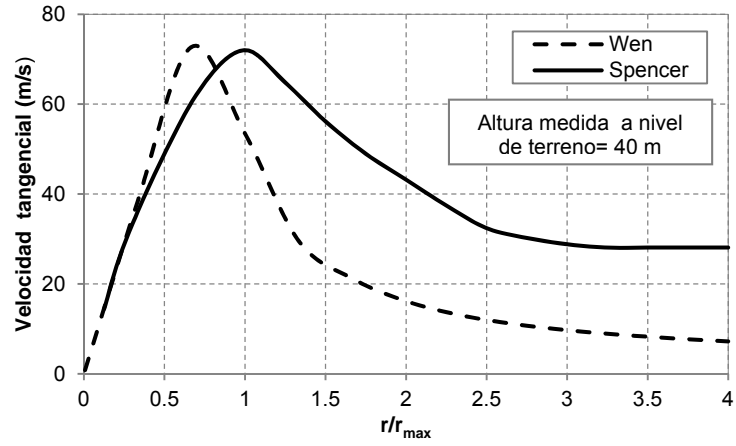


Figura 6. 6. Calibración del modelo propuesto por Wen con las mediciones del tornado del 30 de Mayo de 1998 en Spencer, South Dakota

CAPÍTULO 7

COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE TORNADO PARA EVALUAR LA RESPUESTA ESTRUCTURAL

Se presenta una comparativa de los modelos matemáticos representativos que se han usado para tomar en cuenta las fuerzas de viento del tornado en las construcciones. Los modelos matemáticos considerados son el de la atmosfera turbulenta (ABL), el de Dutta y el propuesto por Wen.

7.1. DETALLES DE LA ESTRUCTURA

Para estimar los efectos que producen los vientos generados por un tornado en una construcción, se seleccionó una chimenea de acero, de 75 m de altura, con diámetro igual a 2.4 m, que fue construida en la población de Odense, en Dinamarca, la cual fue analizada por Hansen (1998); presenta un espesor de la pared de 5 mm en toda la altura, recubierta interiormente con material aislante, tal como se indica en la Figura 7.1. El peso total de la chimenea es de 2226 ton; de los cuales 2219.32 ton corresponden al peso de la cubierta de acero y 6.72 ton corresponden al peso del material aislante.

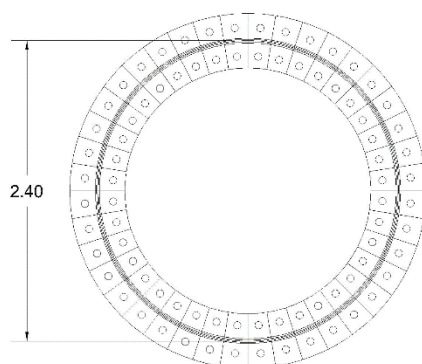
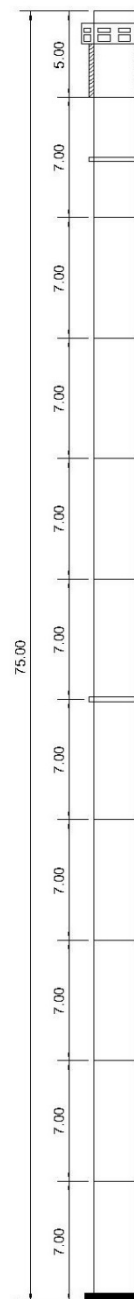


Figura 7. 1. Dimensiones generales de la chimenea Odense

7.2. CONDICIONES DE ANÁLISIS

El viento turbulento en la capa límite atmosférica posee únicamente una componente de velocidad que se encarga, en general, de producir tanto presiones como succiones en las áreas expuestas de las construcciones. También genera empujes dinámicos en la dirección del viento, que consiste en fuerzas paralelas al flujo causadas por la turbulencia del viento, cuya fluctuación en el tiempo influye de manera importante en la respuesta estructural. Bajo condiciones específicas aparecen vibraciones transversales al flujo y fenómenos de inestabilidad aeroelástica. La velocidad del viento turbulento aumenta con la altura a partir del nivel del terreno. La variación con la que se incrementa depende no solo de las condiciones de rugosidad del terreno circundante, sino también de las ráfagas de viento, es decir, las velocidades asociadas a lapsos definidos de tiempo.



A diferencia del viento turbulento en la atmósfera, un tornado posee cuatro componentes de velocidad: tangencial, radial, vertical y de traslación. La cantidad de investigaciones encaminadas a determinar exactamente cómo los tornados afectan a las construcciones ha sido increíblemente escasa en los últimos decenios. Aunque se han realizado numerosos intentos para aumentar este conocimiento por una variedad de diferentes vías (teóricos y experimentales), una solución ampliamente aceptable y definitiva aún no se ha logrado.

Debido a la interacción de la rotación y traslación de un tornado con una construcción, la velocidad y dirección del viento están siempre cambiando. Como resultado de esta interacción, la fuerza que produce un tornado sobre las áreas expuestas de una construcción es de 2 a 3 veces mayor que las generadas por el viento turbulento. La magnitud de estas fuerzas depende de la posición relativa de la construcción con respecto a la trayectoria del centro del vórtice. Los resultados publicados por [Haan Jr, et al, \(2009\)](#) han sugerido que los coeficientes de presión dependen de la velocidad de traslación y de la duración del evento, por lo que la velocidad de traslación es un parámetro significativo a considerar. Hasta el momento no se han realizado investigaciones sobre los efectos dinámicos que produce un tornado en las construcciones.

Las chimeneas metálicas frecuentemente usadas en construcciones industriales, resultan ser estructuras flexibles de gran altura, cuya función principal es dispersar en la atmósfera gases calientes generados en la operación de un complejo industrial. Este tipo de estructuras son sensibles a las vibraciones generadas por la acción dinámica del viento. Oscilan a lo largo y en sentido transversal a la dirección del viento. Las vibraciones longitudinales son causadas por la turbulencia del viento, mientras que las vibraciones transversales son ocasionadas por la formación de vórtices alternantes o vórtices de “Béarnard-von Kármán”.

Tabla 7. 1. Características de la chimenea Odense, (Hansen, 1998)

Geometría		Propiedades dinámicas		Parámetros aerodinámicos	
Altura	75 m	Frecuencia del 1er modo	0.37 Hz	Número de Reynolds	7.10E+05
Diámetro	2.40 m	Factor de amplitud	0.4	Relación de masa	68
Espesor	5 mm	Amortiguamiento	0.75%	Número de Scruton	4.08
Relación de esbeltez	31	Amplitud relativa	0.302	Número de Strouhal	0.2
Factor de forma	0.0075	Factor pico	1.41		
		Decremento logarítmico	0.03		

Para evaluar la respuesta de una chimenea ante la acción de un tornado, se consideró únicamente la fuerza producida por la velocidad media y se despreciaron los efectos debidos a la turbulencia. No se consideraron los efectos dinámicos que producen vibraciones longitudinales y transversales, fundamentalmente por las siguientes razones:

- Las vibraciones longitudinales en chimeneas son producidas por la turbulencia del viento y por la separación del flujo en una región de la estructura. En el caso de un tornado, las fuerzas producidas son de gran intensidad y corta duración, esencialmente fuerzas de impacto, por lo que la vibración que presente la chimenea se deberá a los efectos de impacto y no a la turbulencia. Además, la vibración que produce un tornado es bidimensional y es producida por la componente de velocidad tangencial y radial.
- El desprendimiento de vórtices, que genera vibraciones transversales, comúnmente se desarrolla en presencia de un flujo constante y uniforme. [Kaczinski, et al, \(1998\)](#) encontraron que la

vibración significativa no se produce a menos que la velocidad sea mayor que 5 m/s, y se detiene si la velocidad del viento es mayor que 15 m/s, ya que el viento es demasiado turbulento para que el desprendimiento de vórtices se produzca. La velocidad del viento que produce un tornado es de alta intensidad, y en consecuencia, es muy superior a la velocidad crítica que genera el desprendimiento de vórtices en la chimenea.

La respuesta de la chimenea Odense ante la acción del viento turbulento se muestra en el Apéndice A. Brevemente se comentan los resultados. En referencia a la respuesta longitudinal, se obtuvo el factor de amplificación dinámica, que resultó ser igual a 3.4, por lo que la respuesta longitudinal será igual a la respuesta estática amplificada 3.4 veces. Para el cálculo de la respuesta transversal, los códigos de construcción establecen dos metodologías: el método resonante y el método espectral. La respuesta transversal que se obtuvo con el método resonante resultó ser igual 18 cm; mientras que con el método espectral se obtuvo el valor de 102 cm, que es igual al reportado por Hansen. La Tabla 7.1 enlista los valores de las propiedades dinámicas y aerodinámicas de la chimenea en Odense que se utilizaron para cálculo la respuesta.

7.3. DETALLES DEL MODELO ANALÍTICO

La chimenea Odense se analizó como un voladizo vertical, fijo en la base y con sección transversal constante. El modelo de la chimenea se idealizó como un sistema de múltiples grados de libertad, de masas concentradas. La altura de 75 m se dividió en 11 tramos: 10 tramos de 7 m y un tramo de 5 m de altura. A cada masa se le asignó dos grados de libertad: desplazamientos en “x” y “y”. La idealización de la chimenea se muestra en la Figura 7.2. El porcentaje de amortiguamiento respecto al crítico, del modo en flexión, es de $\xi_1 = 0.75\%$. Las propiedades mecánicas de la cubierta de acero corresponden al material ASTM A-36. La matriz de rigidez, considerando los efectos de flexión y cortante, en una dirección es:

$$K = \begin{bmatrix} 30229973.9 & -19115408.0 & 7702916.3 & -2064067.5 & 553086.0 & -148204.8 & 39714.2 & -10646.7 & 2871.1 & -813.5 & 195.4 \\ -19115408.0 & 23559124.8 & -17327892.5 & 7223935.2 & -1935720.4 & 518695.3 & -138993.8 & 37261.8 & -10048.5 & 2847.2 & -683.9 \\ 7702916.3 & -17327892.5 & 23080143.6 & -17199545.3 & 7189544.5 & -1926509.3 & 516243.0 & -138395.6 & 37321.6 & -10574.9 & 2540.1 \\ -2064067.5 & 7223935.2 & -17199545.3 & 23045752.9 & -17190334.3 & 7187092.1 & -1925911.1 & 516302.8 & -139233.1 & 39451.0 & -9476.3 \\ 553086.0 & -1935720.4 & 7189544.5 & -17190334.3 & 23043300.6 & -17189736.1 & 7187151.9 & -1926748.6 & 519592.6 & -147224.2 & 35363.9 \\ -148204.8 & 518695.3 & -1926509.3 & 7187092.1 & -17189736.1 & 23043360.4 & -17190573.6 & 7190441.7 & -1939069.9 & 549426.5 & -131974.8 \\ 39714.2 & -138993.8 & 516243.0 & -1925911.1 & 7187151.9 & -17190573.6 & 23046650.2 & -17202894.9 & 7236435.7 & -2050410.7 & 492518.0 \\ -10646.7 & 37261.8 & -138395.6 & 516302.8 & -1926748.6 & 7190441.7 & -17202894.9 & 23092644.2 & -17374543.6 & 7651950.6 & -1838033.5 \\ 2871.1 & -10048.5 & 37321.6 & -139233.1 & 519592.6 & -1939069.9 & 7236435.7 & -17374543.6 & 23733222.5 & -18925208.3 & 6859377.6 \\ -813.5 & 2847.2 & -10574.9 & 39451.0 & -147224.2 & 549426.5 & -2050410.7 & 7651950.6 & -18925208.3 & 24273341.1 & -11382988.1 \\ 195.4 & -683.9 & 2540.1 & -9476.3 & 35363.9 & -131974.8 & 492518.0 & -1838033.5 & 6859377.6 & -11382988.1 & 5973210.3 \end{bmatrix} \begin{matrix} Kg \\ m \end{matrix}$$

La matriz de masas, es:

$$M = \begin{bmatrix} 277.757 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 277.757 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 277.757 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 277.757 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 277.757 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 277.757 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 277.757 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 277.757 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 277.757 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 238.077 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 99.199 \end{bmatrix} \begin{matrix} kg \cdot s^2 \\ m \end{matrix}$$

La matriz de formas modales, normalizadas con respecto a la masa, en una dirección es:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.00053 & 0.00295 & 0.00731 & 0.01251 & 0.01785 & 0.02260 & 0.02607 & 0.02750 & 0.02585 & 0.01961 & 0.00798 \\ 0.00204 & 0.00977 & 0.02025 & 0.02683 & 0.02627 & 0.01781 & 0.00354 & -0.01206 & -0.02311 & -0.02356 & -0.01080 \\ 0.00438 & 0.01753 & 0.02748 & 0.02066 & 0.00046 & -0.01969 & -0.02524 & -0.01146 & 0.01171 & 0.02470 & 0.01374 \\ 0.00741 & 0.02366 & 0.02305 & -0.00331 & -0.02478 & -0.01597 & 0.01269 & 0.02541 & 0.00505 & -0.02177 & -0.01636 \\ 0.01100 & 0.02623 & 0.00816 & -0.02353 & -0.01305 & 0.02070 & 0.01738 & -0.01748 & -0.01955 & 0.01534 & 0.01863 \\ 0.01501 & 0.02412 & -0.01006 & -0.02133 & 0.01810 & 0.01488 & -0.02353 & -0.00548 & 0.02536 & -0.00642 & -0.02050 \\ 0.01933 & 0.01712 & -0.02234 & 0.00088 & 0.02263 & -0.02153 & -0.00267 & 0.02372 & -0.01989 & -0.00353 & 0.02192 \\ 0.02385 & 0.00588 & -0.02193 & 0.02148 & -0.00586 & -0.01392 & 0.02528 & -0.02160 & 0.00560 & 0.01291 & -0.02286 \\ 0.02849 & -0.00838 & -0.00777 & 0.01951 & -0.02413 & 0.02133 & -0.01261 & 0.00067 & 0.01129 & -0.02024 & 0.02331 \\ 0.03318 & -0.02422 & 0.01575 & -0.00709 & -0.00099 & 0.00811 & -0.01406 & 0.01875 & -0.02209 & 0.02391 & -0.02321 \\ 0.03654 & -0.03585 & 0.03471 & -0.03311 & 0.03129 & -0.02951 & 0.02797 & -0.02676 & 0.02579 & -0.02488 & 0.02293 \end{bmatrix}$$

Los vectores de periodos y de frecuencias de vibración en una dirección son:

$$T = \begin{bmatrix} 2.703 \\ 0.435 \\ 0.156 \\ 0.08 \\ 0.049 \\ 0.033 \\ 0.024 \\ 0.018 \\ 0.015 \\ 0.013 \\ 0.012 \end{bmatrix} [s] \quad f = \begin{bmatrix} 0.37 \\ 2.3 \\ 6.4 \\ 12.5 \\ 20.6 \\ 30.64 \\ 42.34 \\ 55.04 \\ 67.4 \\ 77.38 \\ 82.93 \end{bmatrix} [Hz]$$

Se realizó el modelo numérico en el programa SAP2000, para ello se utilizó el elemento “Shell-thin” para simular las paredes delgadas de la chimenea. Se colocó un “nudo maestro” en el centroide de cada sección transversal al final de cada tramo y se le asocio dos grados de libertad: desplazamientos en “x” y “y”. La masa asociada a cada tramo se concentró en el correspondiente “nudo maestro”. Para que la respuesta dinámica del modelo numérico coincidiera con la reportada por Hansen, se agregó una pequeña cantidad de masa al nudo maestro. Esta masa corresponde al material aislante y tiene un valor de $9.133 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}/\text{m}$. La Figura 7.3 muestra las tres primeras formas modales de la chimenea obtenidas con el programa SAP2000 y sus correspondientes periodos.

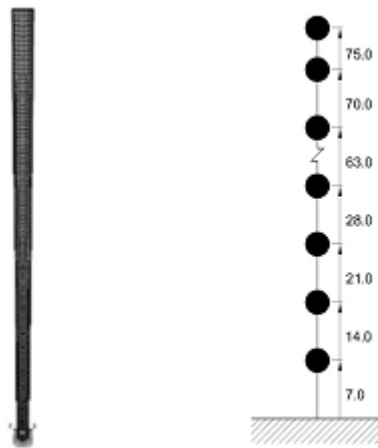


Figura 7. 2. Idealización del modelo matemático de la chimenea Odense



Figura 7. 3. Primeras tres formas modales de la chimenea en una dirección

7.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS EVENTOS DE TORNADO

La evidencia proporcionada por Goliger y Milford (1998) sugiere que gran parte de los tornados que ocurren a escala mundial, y particularmente en México, son tornados de baja intensidad, es decir F0 y F1 en la escala de Fujita. Por esta razón se decidió estudiar seis eventos que corresponden a tornados de baja intensidad: tres correspondientes a F0 y tres correspondientes a F1 en la escala de Fujita, para diferentes velocidades de translación. Las características de los tornados como el tamaño, magnitud en las componentes de velocidad, duración del evento y la frecuencia de ocurrencia difieren considerablemente de un lugar a otro. Sin embargo, para tener alguna referencia básica para comenzar con el estudio de la respuesta estructural de una estructura flexible, se utilizaron los valores de la Tabla 7.2, que están fundamentados en diversas observaciones y opiniones (Doswell III y Burgess, 1998; Dutta, et al, 2002; King, et al, 2003; Stevenson y Zhao, 1996; Wakimoto y Wilson, 1989).

Tabla 7. 2. Características de los tornados

Eventos	Clasificación	Parámetros del tornado				Parámetros geométricos		
		T_{max} m/s	r_{max} m	V_t m/s	V_s m/s	β °	B m	S m
1	F0	12	18	4	16	0	15	120
2	F0	12	18	6	18	0	15	180
3	F0	12	18	8	20	0	15	240
4	F1	34	25	4	38	0	21	120
5	F1	34	25	6	40	0	21	180
6	F1	34	25	8	42	0	21	240

La Tabla 7.2 muestra la velocidad tangencial máxima, T_{max} , el radio máximo del vórtice, r_{max} , la velocidad de translación del tornado, V_t , y la velocidad máxima horizontal, V_s , para los distintos eventos de tornado y los parámetros geométricos, (β, B, S) , necesarios para definir el modelo de Wen. En el caso del modelo de Wen, se utilizó un espesor de la capa límite igual a 390 m y una velocidad horizontal predominante igual a $v_a = V_t$ en todos los eventos.

La Figura 7.4 ilustra la configuración que se adoptó para simular el paso del tornado con el modelo de Wen. La chimenea se colocó a una distancia B del lado derecho de la trayectoria del tornado, con un

ángulo $\beta = 0$, de esta manera el eje “x” del sistema de referencia cartesiano, que define las fuerzas que actúan en la construcción, es paralelo a la trayectoria del tornado.

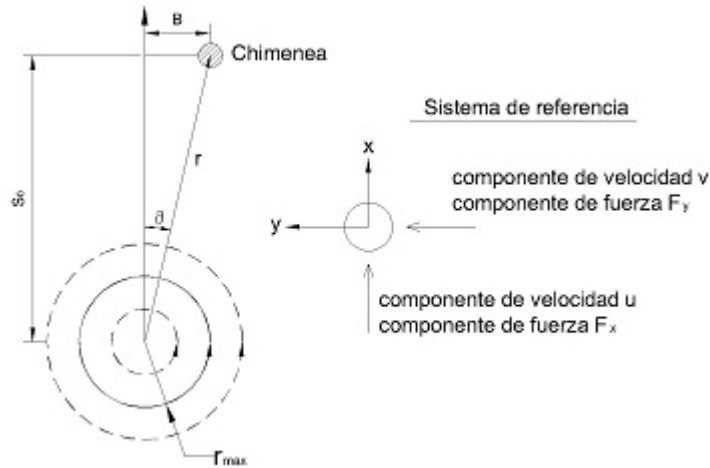


Figura 7. 4. Esquema de las características del modelo de tornado y la trayectoria relativa a la chimenea

7.5. FUERZAS DE VIENTO GENERADAS POR TORNADOS

Las fuerzas de viento del tornado que se obtienen con el modelo de ABL y el modelo de Dutta, suponen que la presión del viento actúa en forma estática y no consideran la aplicación de factores de ráfaga empíricos, que simulen los efectos dinámicos que genera la turbulencia del viento en las estructuras. Conservadoramente se acepta que la velocidad no varía con la altura. Para calcular las fuerzas de viento del tornado con el modelo de Wen es necesario obtener series de tiempo que definan el campo de velocidades y de aceleraciones a diversas alturas sobre el terreno. El modelo de Wen está limitado a un tornado de un solo vórtice y no considera el efecto de la turbulencia del viento sobre las estructuras.

El valor del coeficiente de arrastre, C_D , que se requiere para calcular la fuerza media del tornado con la ecuación de ABL y de Dutta, depende del número de Reynolds y del tipo de la superficie de la chimenea. Dadas estas condiciones, el [CICIND \(1998\)](#), el [BS EN1991-1-4-4 \(2005\)](#) y el [IS 6533 \(2002\)](#) recomiendan usar un valor de $C_D = 0.70$ a 1.2 , que corresponde a una superficie poco rugosa. En el caso de los valores de los coeficientes C_D y C_M para calcular la fuerza del tornado con la ecuación de Wen, éstos dependen del tipo de superficie de la chimenea y de dos cantidades adimensionales: el número de Reynolds y el número de Keulegan Carpenter. Varios códigos de diseño han sugerido valores para los coeficientes C_D y C_M , sin embargo, los más ampliamente usados son los sugeridos por “Det Norske Veritas” (DNV) y “American Petroleum Institute” (API). En este trabajo se utilizaron los valores de $C_D = 0.9$ y $C_M = 1.6$ que corresponde a una superficie con rugosidad $1/100$ sugeridos por la [DNV \(1989\)](#) y que son consistentes con los valores sugeridos por el [CICIND \(1998\)](#).

La Tabla 7.3 resume el procedimiento del cálculo de fuerzas de viento de tornado para el evento 6 indicado en la Tabla 7.2.

La velocidad del viento, $V(z)$, empleada en el modelo de ABL, se obtuvo de sumar la velocidad tangencial máxima, T_{max} , y la velocidad de traslación del vórtice, V_t , es decir, V_s , en la Tabla 7.2. En relación al modelo de Dutta, la velocidad del viento, $V(z)$, se obtuvo de multiplicar por 1.12 la velocidad tangencial máxima, T_{max} , y al resultado sumarle la velocidad de translación, V_t . La fuerza que ejerce el tornado sobre la chimenea, $F(z)$, se obtuvo de multiplicar la presión media del viento, p_z , por su correspondiente área tributaria, A_i . Los resultados se muestran en la Tabla 7.3.

Tabla 7. 3. Fuerzas estáticas equivalentes del viento del tornado calculadas con el modelo de la Capa límite turbulenta y el modelo de Dutta

Sección			Modelo ABL			Modelo de Dutta		
	$h_i(z)$ m	A_i m ²	$V(z)$ m/s	p_z kg/m ²	$F(z)$ kg	$V(z)$ m/s	p_z kg/m ²	$F(z)$ kg
1	7	16.8	42	99.204	1666.64	46.08	119.415	2006.17
2	14	16.8	42	99.204	1666.64	46.08	119.415	2006.17
3	21	16.8	42	99.204	1666.64	46.08	119.415	2006.17
4	28	16.8	42	99.204	1666.64	46.08	119.415	2006.17
5	35	16.8	42	99.204	1666.64	46.08	119.415	2006.17
6	42	16.8	42	99.204	1666.64	46.08	119.415	2006.17
7	49	16.8	42	99.204	1666.64	46.08	119.415	2006.17
8	56	16.8	42	99.204	1666.64	46.08	119.415	2006.17
9	63	16.8	42	99.204	1666.64	46.08	119.415	2006.17
10	70	14.4	42	99.204	1428.55	46.08	119.415	1719.57
11	75	6	42	99.204	595.23	46.08	119.415	716.49

Con respecto al modelo de Wen, se obtuvieron series de tiempo de velocidades y de fuerzas correspondientes a la altura de cada sección para cada uno de los eventos. La duración de las series de tiempo de velocidad y de fuerza se eligió para un lapso de 60 segundos. Debido a que la interacción del tornado con la construcción es muy breve, se determinó que el incremento en la series de tiempo fuera de 0.1 segundos, dando intervalos de paso 40, 60 y 80 cm para las velocidades de traslación 4, 6 y 8 m/s respectivamente. Las Figuras 7.5 y 7.6 muestran las series de tiempo de velocidad y fuerza, calculadas para el evento 6 de la Tabla 7.2, para una altura de 49m.

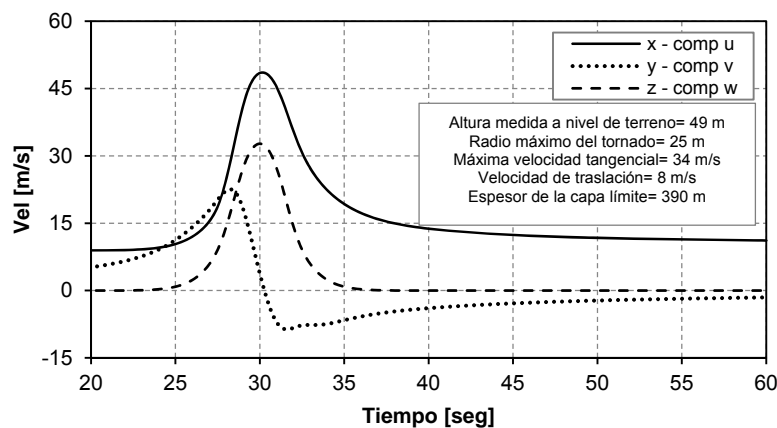


Figura 7. 5. Series de tiempo de las componentes de velocidad de viento del tornado que actúan sobre la sección 7 (49 m) de la chimenea

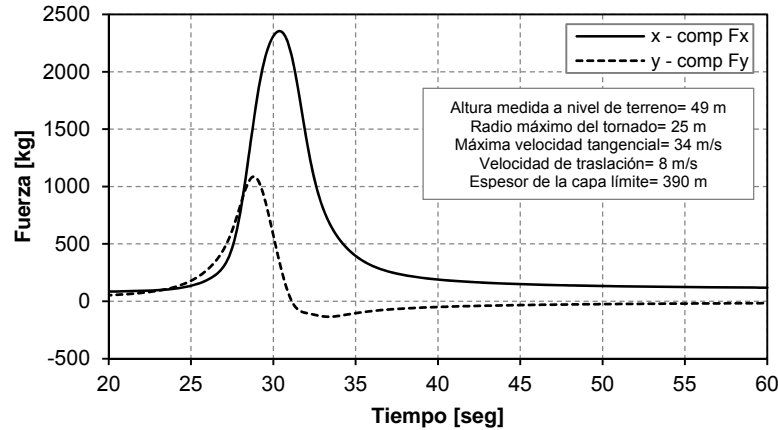


Figura 7. 6. Series de tiempo de las componentes horizontales de la fuerza de viento del tornado que actúan sobre la sección 7 (49 m) de la chimenea

Las componentes horizontales u y v de la serie de tiempo de velocidades que se producen a una altura de 49 m sobre el nivel de terreno se muestran en la Figura 7.5, junto con la componente vertical w . Los cálculos comenzaron con el tornado situado a una distancia de 240 m y después de 25 segundos, la chimenea comienza a ser influenciada por las componentes de velocidad horizontal u y v ; el primer aumento de velocidad corresponde a la componente transversal, v , que alcanza su máximo valor a los 28 segundos y cambia de dirección a los 30 segundos, cuando la componente longitudinal, u , y vertical, w , alcanzan sus valores máximos.

La Figura 7.6 muestra que la componente longitudinal, paralela a la trayectoria del tornado, genera una fuerza máxima de 2,300 kg, mientras que la componente trasversal genera una fuerza máxima de 1,100 kg. La fuerza del viento del tornado calculada con el modelo de Wen, para una altura de 49 m, resultó 27.5% mayor que la fuerza obtenida con el modelo de ABL y 12.78% mayor que la fuerza calculada con el modelo de Dutta, tal como indica la Tabla 7.3.

Las Figuras 7.7 y 7.8 muestran las presiones máximas calculadas a una altura de 28 y 49 m para los distintos eventos de tornado. En la Figura 7.7 se puede apreciar que el modelo de Wen genera presiones menores en la dirección longitudinal que las que se obtienen con los modelos de ABL y de Dutta para una altura igual a 28 m. En el caso presentado en la Figura 7.8, se observa un comportamiento inverso, es decir, las presiones obtenidas en la dirección longitudinal con el modelo de Wen son mayores que las que se obtienen con los modelos de ABL y de Dutta para una altura de 49 m. Las diferencias observadas se deben a que el modelo de Wen considera perfiles de velocidad que varían con la altura, mientras que los modelos de ABL y de Dutta consideran un perfil de velocidad constante con la altura. En el caso del modelo de Wen y el de ABL, la altura en que se produce el cambio de presiones ocurre a los 38 m, mientras que para el modelo de Wen y el de Dutta el cambio se presenta a los 43 m.

Lo anterior sugiere que para alturas cercanas al nivel del suelo, los modelos de ABL y de Dutta sobrestiman las presiones que puede generar un tornado, mientras que para alturas superiores a los 40 m estas presiones son subestimadas. Por tanto, la variación de la velocidad con la altura es una variable importante a considerar y debe investigarse más a fondo. Las Figuras 7.7 y 7.8 indican que la presión generada en la dirección transversal es del orden del 40 al 50 por ciento de la que se genera en la dirección longitudinal, por lo que no puede ignorarse en el problema de la interacción tornado-estructura.

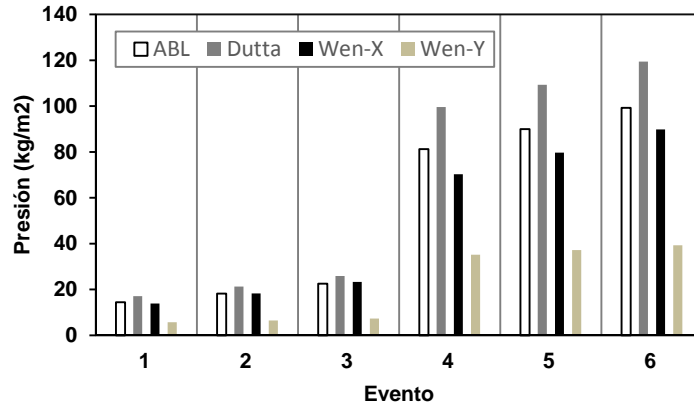


Figura 7. 7. Comparación de la presión calculada con los modelos considerados a una altura de 28 m para los distintos eventos de tornado

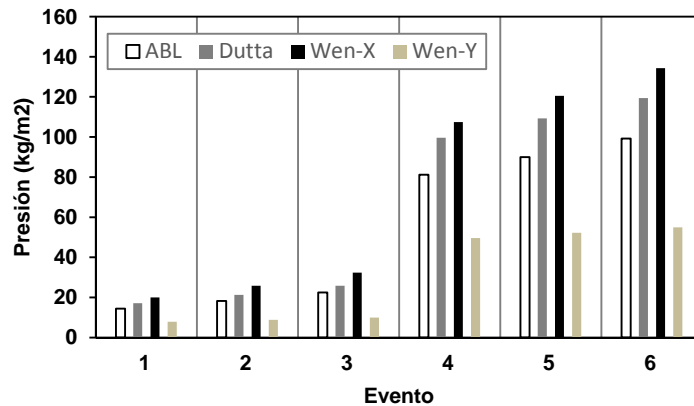


Figura 7. 8. Comparación de la presión calculada con los modelos considerados a una altura de 49 m para los distintos eventos de tornado

7.6. RESPUESTA ESTRUCTURAL

El colapso de las chimeneas de acero obedece a una de las siguientes condiciones de diseño: pandeo local, fatiga y falla de la cimentación. En este trabajo solo se consideró la falla por pandeo local. Para resistir la fuerza generada por el viento, los principales códigos de construcción de chimeneas de acero (ASME, 2006; BS EN 1991-1-4-4, 2005; CICIND, 1998; IS 6533, 2002) establecen que la pared cilíndrica debe tener suficiente módulo de sección, sujeto a un nivel de esfuerzo permisible, a fin de resistir el pandeo local y la fatiga. Para mantener niveles bajos de esfuerzos en la pared cilíndrica, y evitar mecanismos de falla, los desplazamientos en la parte alta de la chimenea no deberán exceder la relación $H/200$, es decir 37 cm.

Los desplazamientos correspondientes a la parte alta de la chimenea, ante la acción de los vientos generados por un tornado de categoría F0 y F1, calculados con los modelos de ABL y de Dutta se muestran en la Tabla 7.4. Se observa que el desplazamiento longitudinal “x”, exceptuando para el evento 1 y 2, sobrepasan el valor límite de 37 cm.

Las Figuras 7.9 y 7.10 muestran la evolución de los desplazamientos de la parte alta de la chimenea en la dirección longitudinal y transversal, correspondiente a un tornado de intensidad F0, para distintas velocidades de traslación calculadas con el modelo de Wen. Se observa que el desplazamiento longitudinal sobrepasa el valor límite, mientras que los desplazamientos transversales permanecen por debajo de este valor. Sin embargo el desplazamiento total resultante, sobrepasa el valor límite de 37 cm. Los desplazamientos máximos se muestran en la Tabla 7.4.

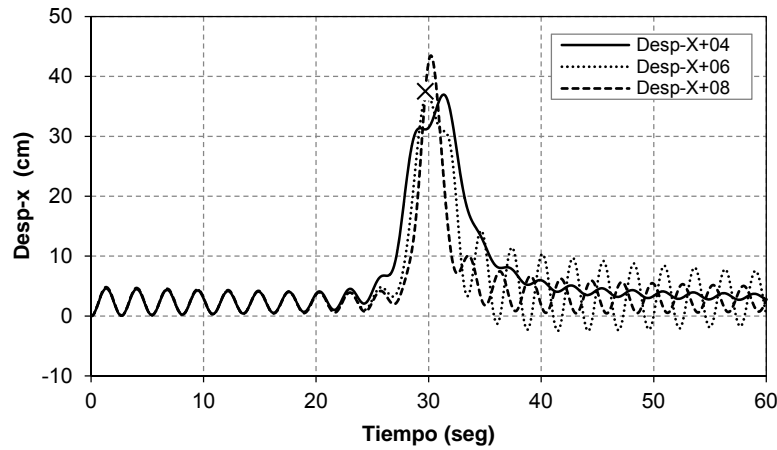


Figura 7. 9. Desplazamientos de la parte alta de la chimenea en dirección “x” debido a un tornado F0

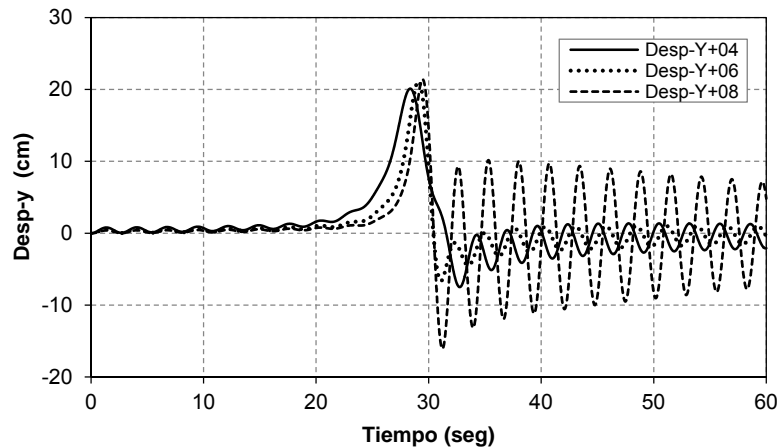


Figura 7. 10. Desplazamientos de la parte alta de la chimenea en dirección “y” debido a un tornado F0

Las Figuras 7.11 y 7.12 muestran las series de tiempo de los desplazamientos de la parte alta de la chimenea en la dirección longitudinal y transversal, correspondiente a un tornado de intensidad F1, para distintas velocidades de traslación. Se observa que los desplazamientos son excesivamente altos y superan el valor límite de 37 cm. Los desplazamientos máximos se muestran en la Tabla 7.4. También se observa que a medida que se incrementa la velocidad de traslación del tornado, la fuerza de viento que se genera se asemeja a una fuerza de impacto, lo que ocasiona mayor amplitud en las vibraciones de la chimenea.

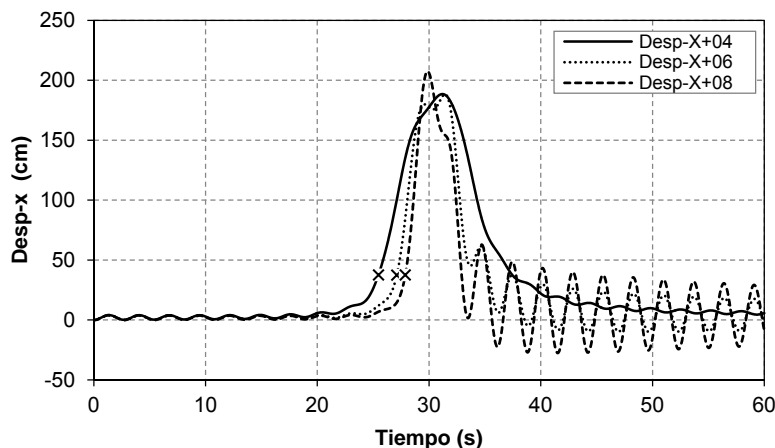


Figura 7. 11. Desplazamiento del punto de control de la chimenea en dirección "x" debido a un tornado F1

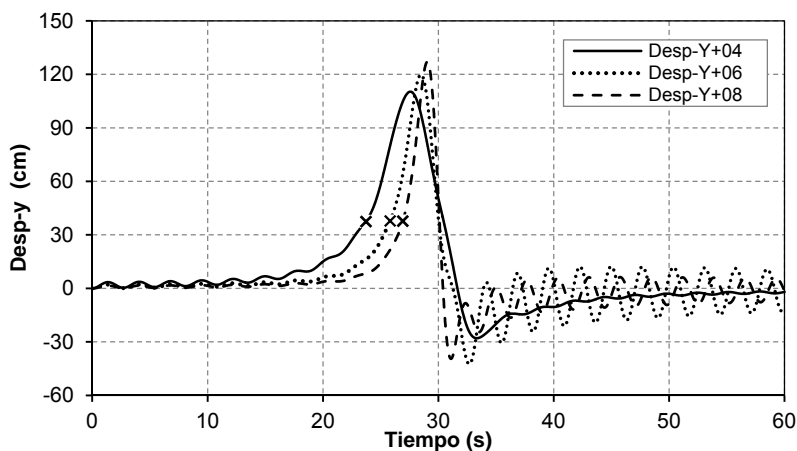


Figura 7. 12. Desplazamiento del punto de control de la chimenea en la dirección "y" debido a un tornado F1

Tabla 7. 4. Resumen de desplazamientos de la parte alta de la chimenea Odense

Evento	Clasificación	ABL	Dutta	Wen	
		Dir - X (cm)	Dir - X (cm)	Dir - X (cm)	Dir - Y (cm)
1	F0	25.3	30.0	36.9	20.1
2	F0	32.0	37.3	37.0	21.2
3	F0	39.5	45.3	43.5	21.4
4	F1	142.4	174.6	188.5	110.8
5	F1	158.0	191.6	192.5	119.9
6	F1	174.0	209.4	207.5	127.1

La Tabla 7.4 muestra que los desplazamientos obtenidos con el modelo de Wen son mayores en un 18% que los que se obtienen con el modelo de ABL y 5.5% mayores que los obtenidos con el modelo de Dutta. Estas diferencias se deben a la variación de la velocidad con la altura y a la consideración de

la componente de inercia, atribuible a la aceleración de las masas de aire. Además, la existencia de componente transversal se manifiesta de manera importante, ya que es del orden del 43% de la respuesta que se origina en la dirección longitudinal, lo que hace necesario considerarla en el análisis de la interacción tornado-estructura.

Las Figuras 7.13 y 7.14 muestran la trayectoria de la parte alta de la chimenea ante los vientos generados por un tornado. Se observa que cuando el vórtice del tornado interactúa con la chimenea, se induce una fuerza de gran intensidad que dura un breve intervalo de tiempo y que genera desplazamientos que pueden alcanzar valores muy altos, que pueden provocar daño o el colapso de la chimenea.

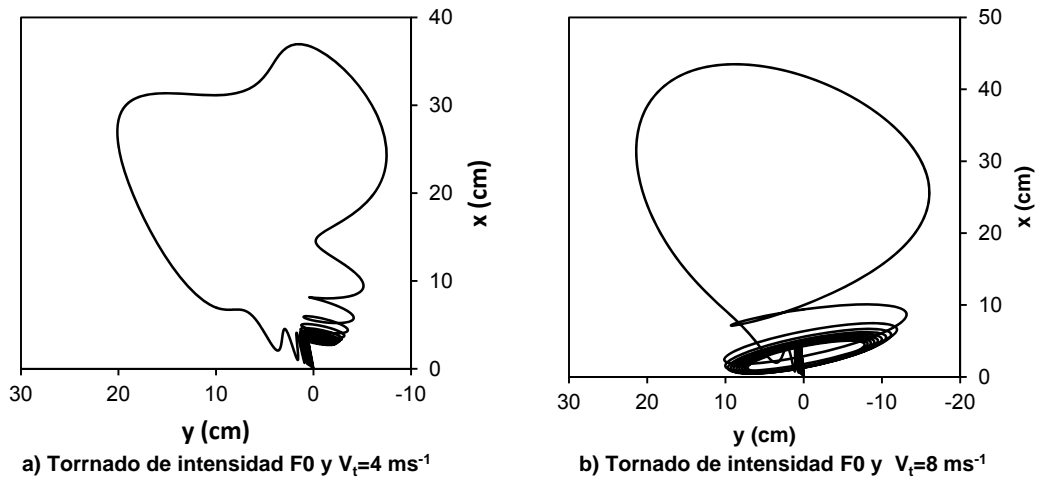


Figura 7. 13. Trayectoria de la parte alta de la chimenea debida al paso de un tornado de intensidad F0

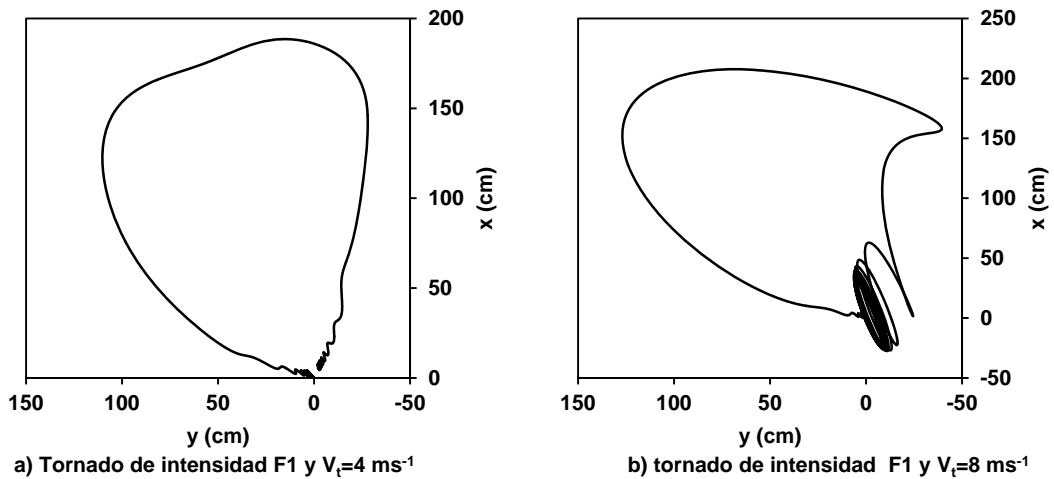


Figura 7. 14. Trayectoria de la parte alta de la chimenea debida al paso de un tornado de intensidad F1

7.7. INFLUENCIA DE LA COMPONENTE DE INERCIA

La cinemática de las partículas de aire que conforman el campo de flujo de un tornado indica que la velocidad del viento cambia en magnitud y en dirección rápidamente, es decir, se aceleran. La alta aceleración de las partículas de aire aunado al elevado gradiente de presión en el interior del vórtice del tornado produce una fuerza de inercia sobre las construcciones que debe examinarse.

Para incluir el efecto de la fuerza de inercia, Wen (1975) utilizó una ecuación empírica denominada ecuación de Morison (ecuación 6.3.6), la cual consta de dos términos: 1) el término $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot D \cdot U \cdot |U|$ denominado componente de arrastre que depende de la velocidad del viento; 2) el término $\frac{\pi}{4} \cdot \rho \cdot D^2 \cdot C_M \cdot \frac{dU}{dt}$ denominado componente de inercia que depende de la aceleración del viento.

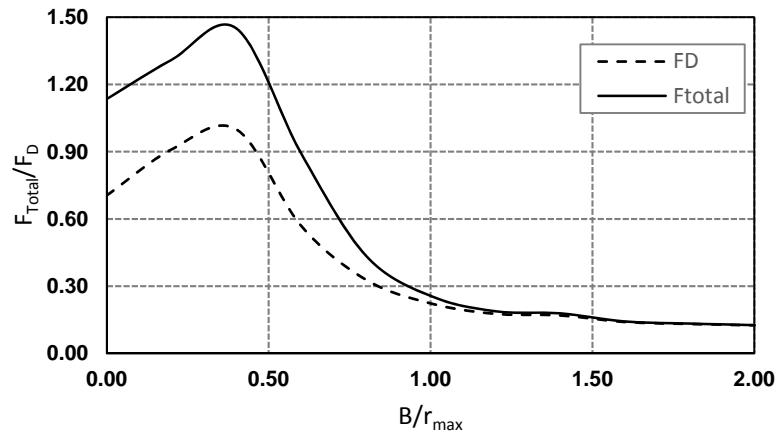


Figura 7. 15. Comparación de la fuerza total con la fuerza de arrastre como función de la distancia al centro del tornado a una altura de 7 m

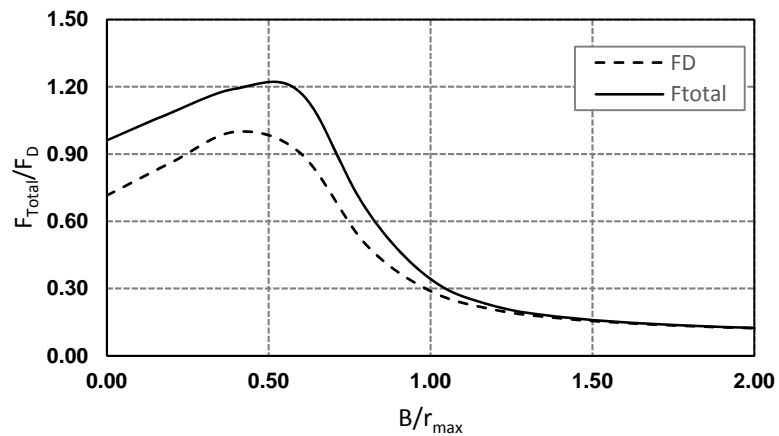


Figura 7. 16. Comparación de la fuerza total con la fuerza de arrastre como función de la distancia al centro del tornado a una altura de 14 m

Las Figuras 7.15, 7.16 y 7.17 muestran la comparación entre la fuerza total (arrastre e inercia) y la fuerza de arrastre en función de la posición de la estructura con respecto al centro del tornado para distintas alturas. Se observa que la contribución de la fuerza de inercia es significativa cuando la estructura está colocada en el interior del vórtice. Tanto la fuerza total como la fuerza de arrastre disminuyen rápidamente a medida que la distancia entre la estructura y el centro del vórtice se incrementa. La Figura 7.18 muestra la relación entre la fuerza de inercia y la fuerza de arrastre en función de la altura y de la posición de la estructura con respecto al centro del tornado. Es evidente que para niveles bajos y distancias cercanas al centro del tornado la fuerza de inercia será dominante.

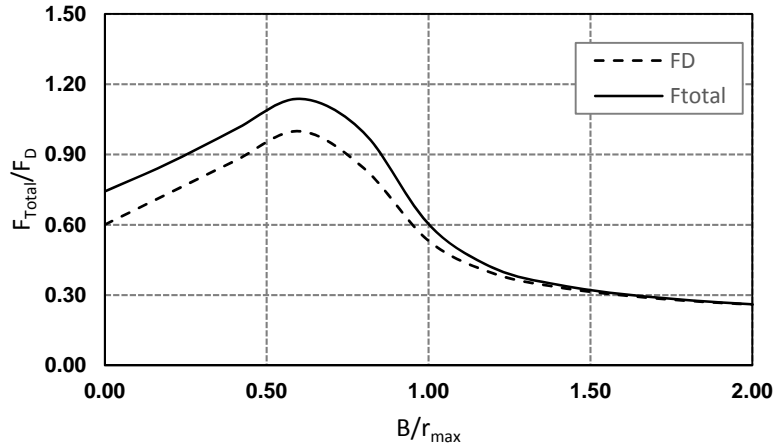


Figura 7. 17. Comparación de la fuerza total con la fuerza de arrastre como función de la distancia al centro del tornado a una altura de 28 m

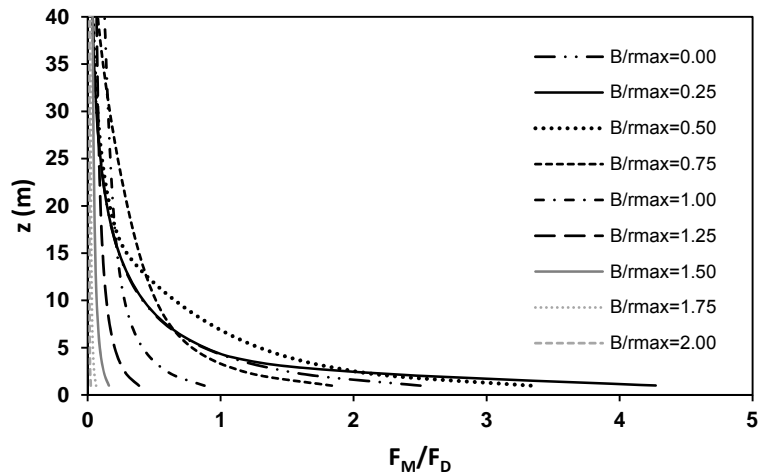


Figura 7. 18. Relación de la Fuerza de inercia y la Fuerza de arrastre con la altura como función de la distancia al centro del tornado

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La revisión de diversas publicaciones mostró que las condiciones meteorológicas que existen en la República Mexicana son propicias para la generación de tornados de diversa intensidad. La mayoría de los tornados que se generan en el país son de baja intensidad (F0-F2). Los estudios realizados por Edwards han mostrado que la Serranía del Burro, en el estado de Coahuila, posee las características fisiográficas para gestar tormentas supercelda, que pueden producir tornados de gran intensidad (F3 o superior).

La mayoría de los eventos de tornado que ocurren en el país surgen en zonas de fuerte vorticalidad vertical, que es producida por el choque de masas de aire frío contra masas de aire cálido, provenientes de áreas con un fuerte diferencial térmico, esto es, los tornados que ocurren en el país tienen un origen meteorológico no supercelda, tal como se discutió en el capítulo 2. Los tornados producidos en estas condiciones no solo generan vientos de alta intensidad, sino que vienen acompañados por fuertes lluvias y granizadas, lo que genera grandes áreas de afectación, sobre todo en zonas agrícolas.

En el estado actual de conocimientos, se han desarrollado métodos de monitoreo de los grandes sistemas de tormenta que han permitido efectuar pronósticos sobre la posible aparición de tornados. También se han desarrollado técnicas asociadas al manejo de estaciones de radar doppler móviles, que han permitido dar seguimiento a los tornados para comprender la génesis, el desarrollo y la disipación de estos fenómenos, así como el complejo campo de flujo. Los datos obtenidos de las estaciones de radar han permitido reconstruir el campo de velocidades y correlacionarlo con un nivel de daño.

Los estudios de vórtices producidos en cámaras especiales de laboratorio han permitido conocer ciertos parámetros de los simuladores que permiten controlar el flujo en el interior de la cámara para obtener las características que reproducen las condiciones del flujo de los tornados reales. Se ha encontrado que el parámetro más importante de los simuladores es el índice de vorticalidad, S , que describe el fenómeno de rompimiento de vórtice, que es producido por un flujo de recirculación que genera la aparición de múltiples celdas en el interior del vórtice principal. Recientemente las imágenes de radar doppler han revelado que este tipo de estructuras en los campos de flujo son características de los tornados de gran intensidad (F4 o superior). Las observaciones con radar doppler de tornados reales y las mediciones del campo de flujo de vórtices producidos en cámaras de laboratorio han permitido establecer que el modelo más simple que se ajusta al campo de velocidades es el vórtice combinado de Rankine.

Las investigaciones de la interacción fluido-estructura realizadas en modelos a escala, colocados en el interior de las cámaras de laboratorio de tornados, han mostrado que los coeficientes de presión varían con el tiempo y se ha encontrado una relación con la velocidad de traslación del tornado. Un estudio comparativo entre los coeficientes de presión generados por un tornado y los obtenidos para el viento en la atmósfera neutra en movimiento sugirió que los primeros son mayores de 1.8 a 3.2 veces en referencia a los segundos. Estos resultados permitieron hacer un estudio comparativo entre las presiones generadas por el viento en la atmósfera neutra en movimiento, por huracanes, y por tornados de baja intensidad (F0-F3) en construcciones regulares de baja altura. Se encontró que las presiones producidas por un tornado sobre las áreas expuestas de la construcción son de 2 a 3 veces mayores que las producidas por el viento en la atmósfera neutra en movimiento; las presiones producidas por un tornado de intensidad F1 sobre las áreas expuestas de la construcción es comparable con las presiones producidas por un huracán categoría C4 en la escala de Saffir-Simpson; el elemento más vulnerable a la falla en construcciones regulares de baja altura ante la acción del tornado es el techo. Estos resultados no son definitivos, pero sirven para dar una idea de la naturaleza distinta del campo de flujo

de estos fenómenos atmosféricos. Por lo que se planteó la necesidad de buscar modelos que incorporen el campo de flujo del tornado.

Los modelos matemáticos que se han usado para tratar de reproducir el complejo campo de flujo del tornado y las acciones que estos producen sobre las construcciones han tenido menos desarrollo. El modelo de la capa límite atmosférica (ABL), usado en los reglamentos de construcción, se adaptó para incorporar la estructura del campo de flujo del tornado: considera la componente de velocidad tangencial máxima y la componente de velocidad de traslación del tornado para el cálculo de las presiones; no considera la variación de las velocidades con la altura y asume que el campo de velocidades es estacionario. El modelo de Dutta asume que las componentes de velocidad pueden ser expresadas en términos de la velocidad tangencial máxima. Esta suposición está basada en los resultados utilizados para construcciones nucleares. Tanto el modelo de Dutta como el modelo de la capa límite atmosférica no consideran la variación de las componentes de velocidad con la altura y asumen que el campo de flujo es estacionario. El modelo propuesto por Yi-Kwei Wen, es capaz de reproducir todos los aspectos de las velocidades que se generan al paso de un tornado de una celda por un sitio y considera que las componentes de velocidad varían con la altura, así como la naturaleza no estacionaria del campo de velocidades del tornado. Los modelos descritos anteriormente tienen una limitación en común: utilizan los coeficientes de presión obtenidos para el viento en la atmosfera neutra en movimiento para el cálculo de las fuerzas de viento de tornados.

La comparación de la respuesta estructural de una chimenea metálica de 75 m de altura, producida por las fuerzas de viento obtenidas con los modelos matemáticos considerados, mostró que la variación de la velocidad con la altura es determinante en el cálculo de las presiones de viento. Las componentes de velocidad en los modelos de la capa límite atmosférica y de Dutta no varían con la altura, lo que produce que para alturas cercanas al nivel de suelo los modelos sobrestimen las presiones en referencia a las que se obtienen con el modelo de Wen. Para una altura del orden de 40 m los modelos de la capa límite atmosférica y el de Dutta subestiman las presiones en referencia a las obtenidas con el modelo de Wen.

Por lo que respecta a los desplazamientos, se observó que los desplazamientos en la dirección longitudinal “x” (paralela a la trayectoria del tornado) sobrepasa el nivel comúnmente aceptado para que el material permanezca elástico lineal; asimismo, se observó que los desplazamientos obtenidos con el modelo de Wen son mayores en un 18% que los que se obtienen con el modelo de la capa límite atmosférica (ABL) y 5.5% mayores que los obtenidos con el modelo de Dutta. De igual forma, los desplazamientos en la dirección “y” (transversal a la trayectoria del tornado), que se obtienen únicamente con el modelo de Wen, sobrepasa el nivel de esfuerzos para que el material permanezca elástico lineal y se hace notar que la magnitud de estos desplazamientos son del orden del 50% de los desplazamientos longitudinales, por lo que resultan ser muy superiores al límite normalmente aceptado. Esto indica que el efecto de un tornado sobre la chimenea diseñada para soportar la acción del viento en la atmosfera neutra en movimiento, es insuficiente para soportar los vientos generados por un tornado con velocidades mínimas.

Así mismo, el modelo de Wen mostró que la existencia de la componente de “fuerza de inercia”, atribuible a los cambios en la magnitud y en la dirección de las velocidades, no se debe ignorar en la evaluación de las fuerzas que originan la respuesta de estructuras afectadas por tornados, ya que la evaluación indicó que para alturas cercanas al nivel del suelo la magnitud de la fuerza generada por el viento puede incrementarse hasta un cincuenta por ciento, en referencia a las fuerzas de viento que se obtienen considerando únicamente la componente de fuerza de arrastre.

A partir de los resultados obtenidos, así como de los estudios anteriores que se han realizado se puede establecer que el campo de flujo de un tornado impone fuerzas de gran intensidad que varían en el

tiempo y en el espacio sobre las áreas expuestas de las construcciones. La variación espacial y temporal del campo de velocidades del tornado produce aceleraciones de las masas de aire que se ven reflejadas en fuerzas de inercia sobre las construcciones y que actualmente no son consideradas por los reglamentos de construcción. Por lo que se concluye que el planteamiento de los reglamentos, basados en el modelo de “la capa límite atmosférica” (ABL), no es el adecuado para diseñar estructuras que soporten el paso de un tornado ya que no es capaz de reproducir los efectos ciclónicos y transitorios del tornado sobre las construcciones.

Se considera necesario que para estimar el riesgo de daño inducido en construcciones por tornados, se cuente con información confiable sobre la probabilidad de aparición de tornados en diversos sitios de la República Mexicana, para estimar el riesgo de falla estructural, que es de interés durante los estudios de estabilidad de estructuras, ante la perturbación de su configuración inducida por el paso de tornados intensos.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- ACI 307. (1998). Design and construction of reinforced concrete chimneys. EE.UU.
- Alexander, C. R., y Wurman, J. (2005). The 30 May 1998 Spencer, South Dakota, storm. Part I: The structural evolution and environment of the tornadoes. *Monthly Weather Review*, 133(1), 72-97.
- ANS. (1983). Standard for estimating tornado and extreme wind characteristics at nuclear power sites *ANSI/ANS-2.3-1983*. La Grange Park, Illinois: American Nuclear Society.
- ANS. (2011). Estimating tornado, hurricane, and extreme straight line wind characteristics at nuclear facility sites *ANSI/ANS-2.3-2011*. La Grange Park, Illinois: American Nuclear Society.
- ASCE. (2010). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures *ASCE/SEI 7-10*: American Society of Civil Engineers.
- ASME. (2006). Steel Stack Standard, ASME STS-1.
- Avendaño, A. (2007). *Reflexión sobre una Zona de Riesgo. El caso del corredor de los tornados Landspouts en México, denominado "Corredor de las Víboras"*. Paper presented at the 2do Seminario Internacional: Involucrando a la comunidad en los programas de reducción de riesgos, Coro, Falcón, Venezuela.
- Avendaño, A. (2012). *Etnometeorología de los tornados en México. El caso de la ranchería Xaltitla, municipio de Atltzayanca, Tlaxcala*. Tesis de maestría en Antropología, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Baker, G. L. (1981). *Boundary Layers in Laminar Vortex Flows*. Ph.D. thesis, Purdue University.
- Bienkiewicz, B., y Dudhia, P. (1993). *Physical modeling of tornado-like flow and tornado effects on building loading*. Paper presented at the Proceeding 7th US National Conference on Wind Engineering.
- Bluestein, H. B. (1985). *The formation of a "landspout" in a "broken-line" squall line in Oklahoma*. Paper presented at the Preprints, 14th Conf. on Severe Local Storms, Indianapolis, IN, Amer. Meteor. Soc.
- Browning, K. A. (1964). Airflow and Precipitation Trajectories Within Severe Local Storms Which Travel to the Right of the Winds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 21(6), 634-639. doi: 10.1175/1520-0469(1964)021<0634:aaptws>2.0.co;2
- Browning, K. A., y Donaldson, R. J. (1963). Airflow and Structure of a Tornadoic Storm. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20(6), 533-545. doi: 10.1175/1520-0469(1963)020<0533:aasoat>2.0.co;2
- BS EN 1991-1-4-4. (2005). Euro Code 1: Actions on structures, Part 1-4 *General actions-Wind actions, British Standard*.
- Caruso, J. M., y Davies, J. M. (2005). Tornadoes in nonmesocyclone environments with pre-existing vertical vorticity along convergence boundaries. *NWA Electronic J. Operational Meteorology*.

- CENAPRED. (2009). Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2007 *Impacto socioeconómico de los desastres en México* (Secretaría de Gobernación ed., pp. 619). México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CFE. (2008). Manual de Obras Civiles. Diseño por Viento *Sección C. Estructuras* (pp. 360). México: Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- CICIND. (1998). Model Code for Steel Chimneys: Comité International Des Cheminees Industrielles
- Church, C. R., Snow, J. T., y Agee, E. M. (1977). Tornado Vortex Simulation at Purdue University. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 58(9), 900-908. doi: 10.1175/1520-0477(1977)058<0900:tvsapu>2.0.co;2
- Davies-Jones, R. P. (1973). The Dependence of Core Radius on Swirl Ratio in a Tornado Simulator. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 30(7), 1427-1430. doi: 10.1175/1520-0469(1973)030<1427:tdocro>2.0.co;2
- Davies-Jones, R. P. (1976). *Laboratory simulations of tornadoes*. Paper presented at the Proceedings of the symposium on tornadoes, assessment of knowledge and implications for man, Texas Tech University.
- Davies, J. (Producer). (2004). Ingredients supporting non-mesocyclone "landspout" tornado events. Retrieved from http://www.jondavies.net/tornado_fcsting/nonsprell_tors.htm
- Diamond, C. J., y Wilkins, E. M. (1984). Translation Effects on Simulated Tornadoes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41(17), 2574-2580. doi: 10.1175/1520-0469(1984)041<2574:teost>2.0.co;2
- Doswell III, C. A. (2001). Severe Convective Storms---An Overview. *Meteorological Monographs*, 28, 1-26.
- Doswell III, C. A., Brooks, H. E., y Dotzek, N. (2009). On the implementation of the enhanced Fujita scale in the USA. *Atmospheric Research*, 93(1-3), 554-563.
- Doswell III, C. A., y Burgess, D. W. (1993). Tornadoes and toranadic storms: A review of conceptual models. *Geophysical Monograph Series*, 79, 161-172.
- Doswell III, C. A., y Burgess, D. W. (1998). On Some Issues of United States Tornado Climatology. *Monthly Weather Review*, 116(2), 495-501.
- Dutta, P. K., Ghosh, A. K., y Agarwal, B. L. (2002). Dynamic response of structures subjected to tornado loads by FEM. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, 90, 55-69.
- Dyrbye, C., y Hansen, S. O. (1996). *Wind loads on structures*: John Wiley y Sons.
- Edwards, R. (2006). *Supercells of the serranias del burro (Mexico)*. Paper presented at the Preprints, 23rd Conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO, Amer. Meteor. Soc. P.
- FEMA. (1999). Midwest tornadoes of May 3, 1999. Observations, recommendations and technical guidance *FEMA 342*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency.

- FEMA. (2000). Design and Construction Guidelines for Community Shelters *FEMA 361*. Washington D. C.: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2003). Tornado protection: selecting refuge areas in buildings. *Technical Fact Sheet Series* (Vol. 431). Washington, DC.: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2008). Taking Shelter From the Storm: Building a Safe Room For Your Home or Small Business *FEMA P-320*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- Fiedler, B. H. (1997). Compressibility and windspeed limits in tornadoes. *Atmosphere-Ocean*, 35(1), 93-107. doi: 10.1080/07055900.1997.9649586
- Finley, J. P. (1884). Character of Six Hundred Tornadoes: Prof. Papers of the Signal Service.
- Fouts, J. L. (2003). *Flow visualization and fluid-structure interaction of tornado-like vortices*. Master's Thesis, Texas Tech University.
- Fujarra, A., Pesce, C., Flemming, F., y Williamson, C. (2001). Vortex-induced vibration of a flexible cantilever. *Journal of Fluids and Structures*, 15(3), 651-658.
- Funk, T. (2002). Tornadogenesis in supercells: the three main ingredients, from <http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/presentations/tornadogenesis.pdf>
- Goliger, A., y Milford, R. (1998). A review of worldwide occurrence of tornadoes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74, 111-121.
- Haan Jr, F., Balaramudu, V. K., y Sarkar, P. (2009). Tornado-induced wind loads on a low-rise building. *Journal of Structural Engineering*, 136(1), 106-116.
- Haan Jr, F. L., Sarkar, P. P., y Gallus, W. A. (2008). Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications. *Engineering Structures*, 30(4), 1146-1159. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.010>
- Hangan, H., y Kim, J. (2008). Swirl ratio effects on tornado vortices in relation to the Fujita scale. *Wind and Structures*, 11(4), 291-302.
- Hansen, S. O. (1998). Vortex-induced vibrations of line-like structures. *CICIND report*, 15(1), 15-23.
- Harlow, F. H., y Stein, L. R. (1974). Structural Analysis of Tornado-Like Vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(8), 2081-2098. doi: 10.1175/1520-0469(1974)031<2081:saotlv>2.0.co;2
- Hoecker, W. H. (1960). Wind Speed and Air Flow Patterns in the Dallas Tornado of April 2,1957. *Monthly Weather Review*, 88(5), 167-180.
- Huschke, R. E., y Brooks, C. E. (1959). *Glossary of meteorology* (Vol. 216): American Meteorological Society Boston.
- ICC/NSSA. (2008). Standard for the Design and Construction of Storm Shelters *ICC 500-2008*: International Code Council.

- IS 6533. (2002). Code of practice for design and construction of steel chimney *Part 2. Structural aspect*. New Delhi.
- Ishizaki, H., y Chiu, A. N. (1976). *Wind effects on structures: proceedings of the Second USA-Japan Research Seminar on Wind Effects on Structures*: University of Tokyo Press.
- Jischke, M. C., y Light, B. D. (1983). Laboratory simulation of tornadic wind loads on a rectangular model structure. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 13(1-3), 371-382.
- Jischke, M. C., y Parang, M. (1974). Properties of Simulated Tornado-Like Vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(2), 506-512. doi: 10.1175/1520-0469(1974)031<0506:postlv>2.0.co;2
- Kaczinski, M. R., Dexter, R. J., y Van Dien, J. P. (1998). *Fatigue-resistant design of cantilevered signal, sign and light supports*: Transportation Research Board.
- King, P. W., Leduc, M. J., Sills, D. M., Donaldson, N. R., Hudak, D. R., Joe, P., y Murphy, B. P. (2003). Lake breezes in southern Ontario and their relation to tornado climatology. *Weather and Forecasting*, 18(5), 795-807.
- Kosiba, K., y Wurman, J. (2010). The Three-Dimensional Axisymmetric Wind Field Structure of the Spencer, South Dakota, 1998 Tornado. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(9), 3074-3083.
- Kuai, L., Haan Jr, F. L., Gallus Jr, W. A., y Sarkar, P. P. (2008). CFD simulations of the flow field of a laboratory-simulated tornado for parameter sensitivity studies and comparison with field measurements. *Wind and Structures*, 11(2), 75-96.
- Kuo, H. L. (1966). On the Dynamics of Convective Atmospheric Vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 23(1), 25-42. doi: 10.1175/1520-0469(1966)023<0025:otdoca>2.0.co;2
- Kuo, H. L. (1969). Motions of Vortices and Circulating Cylinder in Shear Flow with Friction. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26(3), 390-398. doi: 10.1175/1520-0469(1969)026<0390:movacc>2.0.co;2
- Kuo, H. L. (1971). Axisymmetric Flows in the Boundary Layer of a Maintained Vortex. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28(1), 20-41.
- Lee, B. D., y Wilhelmson, R. B. (1997a). The Numerical Simulation of Non-Supercell Tornadogenesis. Part I: Initiation and Evolution of Pretornadic Misocyclone Circulations along a Dry Outflow Boundary. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54(1), 32-60. doi: 10.1175/1520-0469(1997)054<0032:tnsons>2.0.co;2
- Lee, B. D., y Wilhelmson, R. B. (1997b). The Numerical Simulation of Nonsupercell Tornadogenesis. Part II: Evolution of a Family of Tornadoes along a Weak Outflow Boundary. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54(19), 2387-2415. doi: 10.1175/1520-0469(1997)054<0032:tnsons>2.0.co;2
- Lee, B. D., y Wilhelmson, R. B. (2000). The Numerical Simulation of Nonsupercell Tornadogenesis. Part III: Parameter Tests Investigating the Role of CAPE, Vortex Sheet Strength, and Boundary Layer Vertical Shear. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 57(14), 2246-2261. doi: 10.1175/1520-0469(2000)057<2246:tnsont>2.0.co;2

- Lee, J. J., Samaras, T., y Young, C. (2004). *Pressure measurements at the ground in an F-4 tornado*. Paper presented at the Preprints of the 22nd Conference on Severe Local Storms, Hyannis, Massachusetts. American Meteorological Society. http://ams.confex.com/ams/11aram22sls/techprogram/paper_81700.htm.
- Leslie, F. W. (1977). Surface Roughness Effects on Suction Vortex Formation: A Laboratory Simulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 34(7), 1022-1027. doi: 10.1175/1520-0469(1977)034<1022:sreosv>2.0.co;2
- Lewellen, D. C., Lewellen, W. S., y Xia, J. (2000). The Influence of a Local Swirl Ratio on Tornado Intensification near the Surface. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 57(4), 527-544. doi: 10.1175/1520-0469(2000)057<0527:tioals>2.0.co;2
- Lewellen, W. S., Lewellen, D. C., y Sykes, R. I. (1997). Large-Eddy Simulation of a Tornado's Interaction with the Surface. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54(5), 581-605. doi: 10.1175/1520-0469(1997)054<0581:lesoat>2.0.co;2
- Lund, D. E., y Snow, J. T. (1993). Laser Doppler velocimeter measurements in tornadolike vortices *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards* (Vol. 79, pp. 297-306). Washington, DC: AGU.
- Macías, J. M. (2001). *Descubriendo tornados en México: el caso del tornado de Tzintzuntzan*. México: CIESAS.
- Macías, J. M. (2012). *El tornado del Zócalo de la Ciudad de México*. México: CIESAS.
- Macías, J. M., y Avendaño, A. (2013). Climatología de tornados en México. *Boletín del Instituto de Geografía. UNAM*.
- Markowski, P. M., y Richardson, Y. P. (2009). Tornadogenesis: Our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research. *Atmospheric Research*, 93(1-3), 3-10. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.09.015>
- Marshall, T. P., y Eblen, L. P3. 2 The Rosita Valley, TX Tornado: 24 April 2007.
- McDonald, J. R. (1988). Structural details for wind design: Lawrence Livermore National Lab., CA (USA); McDonald, Mehta and Minor, Consulting Engineers, Lubbock, TX (USA).
- McDonald, J. R., y Mehta, K. C. (2004). A Recommendation for an enhanced Fujita scale. Lubbock, Texas: Wind Science and Engineering Center and Texas Tech University.
- Melaragno, M. (1982). *Wind in architectural and environmental design*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Minor, J. E., McDonald, J. R., y Mehta, K. C. (1977). The tornado: An engineering-oriented perspective. *NASA STI/Recon Technical Report N, 78, 31277*.
- Mishra, A. R., James, D. L., y Letchford, C. W. (2008a). Physical simulation of a single-celled tornado-like vortex, part A: flow field characterization. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(8), 1243-1257.

- Mishra, A. R., James, D. L., y Letchford, C. W. (2008b). Physical simulation of a single-celled tornado-like vortex, Part B: Wind loading on a cubical model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(8), 1258-1273.
- Natarajan, D., y Hangan, H. (2012). Large eddy simulations of translation and surface roughness effects on tornado-like vortices. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104, 577-584.
- Nolan, D. S., y Farrell, B. F. (1999). The Structure and Dynamics of Tornado-Like Vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(16), 2908-2936. doi: 10.1175/1520-0469(1999)056<2908:tsadot>2.0.co;2
- NRCC 48192. (2005). National Research Council Canada *User's Guide-NBC 2005 Structural Commentaries (Part 4 of Division B)*, ISBN 0-660-19506-2, 1993.
- Pesce, C., y Fajarra, A. (2000). Vortex-induced vibrations and jump phenomenon: experiments with a clamped flexible cylinder in water. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 10(01).
- Rodríguez Cuevas, N. (2012). *Notas del curso de diseño eólico*. Programa de maestría y doctorado en ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rotunno, R. (1977). Numerical Simulation of a Laboratory Vortex. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 34(12), 1942-1956. doi: 10.1175/1520-0469(1977)034<1942:nsoalv>2.0.co;2
- Rotunno, R. (1979). A Study in Tornado-Like Vortex Dynamics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 36(1), 140-155. doi: 10.1175/1520-0469(1979)036<0140:asitlv>2.0.co;2
- Rotunno, R. (1984). An Investigation of a Three-Dimensional Asymmetric Vortex. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41(2), 283-298. doi: 10.1175/1520-0469(1984)041<0283:aioatd>2.0.co;2
- Rotz, J., Yeh, G., y Bertwell, W. (1974). Tornado and extreme wind design criteria for nuclear power plants: Bechtel Power Corp., San Francisco, Calif.(USA).
- Sarkar, P. P., Haan, F. L., Balaramudu, V., y Sengupta, A. (2006). *Laboratory simulation of tornado and microburst to assess wind loads on buildings*. Paper presented at the Structures Congress 2006, St. Louis, MO.
- Sengupta, A., Haan, F. L., Sarkar, P. P., y Balaramudu, V. (2008). Transient loads on buildings in microburst and tornado winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10-11), 2173-2187. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.050>
- Siméon, R. (2002). *Diccionario de la lengua Nahuatl o Mexicana/Dictionary of Nahuatl or Mexican language* (Vol. 1): Siglo XXI.
- Simiu, E., y Scanlan, R. H. (1978). *Wind Effects on Structures: An Introduction to Wind Engineering*. New York: John Wiley and Sons.
- Simmons, K. M., y Sutter, D. (2008). Tornado Warnings, Lead Times, and Tornado Casualties: An Empirical Investigation. *Weather and Forecasting*, 23(2), 246-258. doi: 10.1175/2007waf2006027.1

- Sinclair, P. C. (1964). Some Preliminary Dust Devil MEASUREMENTS*. *Monthly Weather Review*, 92(8), 363-367.
- Sinclair, P. C. (1969). General Characteristics of Dust Devils. *Journal of Applied Meteorology*, 8(1), 32-45. doi: 10.1175/1520-0450(1969)008<0032:gcodd>2.0.co;2
- Sinclair, P. C. (1973). The Lower Structure of Dust Devils. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 30(8), 1599-1619. doi: 10.1175/1520-0469(1973)030<1599:tlsodd>2.0.co;2
- Snow, J. T. (1982). A Review of Recent Advances in Tornado Vortex Dynamic. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 20(4), 953-964.
- Stevenson, B. J., y Zhao, Y. (1996). Modern Tornado Design of Nuclear and Other Potentially Hazardous Facilities. *Nuclear Safety*, 37(1), 49-72.
- Tachikawa, M. (1983). Trajectories of flat plates in uniform flow with application to wind-generated missiles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 14(1-3), 443-453. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(83\)90045-4](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(83)90045-4)
- Tachikawa, M. (1988). A method for estimating the distribution range of trajectories of wind-borne missiles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 29(1-3), 175-184. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(88\)90156-0](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(88)90156-0)
- Turner, J. (1966). The constraints imposed on tornado-like vortices by the top and bottom boundary conditions. *J. Fluid Mech*, 25(pt 2), 377-400.
- U.S. DOE. (1994). Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department Of Energy Facilities *DOE-STD-1020-94*. Washington, D.C.: Department of Energy.
- U.S. DOE. (2002). Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department Of Energy Facilities *DOE-STD-1020-2002*. Washington, D.C.: Department of Energy.
- U.S. DOE. (2012). Natural Phenomena Hazards Analysis and Design Criteria for DOE Facilities *DOE-STD-1020-2012*. Washington, D.C.: Department of Energy.
- U.S. NRC. (1967). Title 10 CFR Part 50 - Licensing of Production and Utilization Facilities. General Design Criteria for Nuclear Power Plants. Washington, D.C.: Atomic Energy Commission.
- U.S. NRC. (1974). Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants *Regulatory Guide 1.76*. Washington, D.C.: Atomic Energy Commission.
- van de Lindt, J. W., Pei, S., Dao, T., Graettinger, A., Prevatt, D. O., Gupta, R., y Coulbourne, W. (2012). Dual-Objective-Based Tornado Design Philosophy. *Journal of Structural Engineering*, 139(2), 251-263.
- Velasco Fuentes, O. (2010). The Earliest Documented Tornado in the Americas. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(11), 1515-1523. doi: 10.1175/2010bams2874.1
- Venegas, D. (2013, 20 de junio de 2013). México, un país susceptible a la ocurrencia de tornados, from <http://gaceta.cicese.mx/ver.php?topico=breviario&ejemplar=148&id=2022>

- Vickery, B. J., & Basu, R. I. (1983). Across-wind vibrations of structures of circular cross-section. Part I. Development of a mathematical model for two-dimensional conditions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 12(1), 49-73. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(83\)90080-6](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(83)90080-6)
- Wakimoto, R. M. (1982). The Life Cycle of Thunderstorm Gust Fronts as Viewed with Doppler Radar and Rawinsonde Data. *Monthly Weather Review*, 110(8), 1060-1082. doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<1060:tlcotg>2.0.co;2
- Wakimoto, R. M., y Wilson, J. W. (1989). Non-supercell Tornadoes. *Monthly Weather Review*, 117(6), 1113-1140.
- Wang, H. (2002). *Fluid-structure interaction of a tornado-like vortex with low-rise structures*. Master's Thesis, Texas Tech University.
- Ward, N. B. (1972). The exploration of certain features of tornado dynamics using a laboratory model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 29(6), 1194-1204.
- Wen, Y. K. (1975). Dynamic Tornadic Wind Loads on Tall Buildings. *Journal of the Structural Division*, 101(1), 169-185.
- Wilson, T., y Rotunno, R. (1986). Numerical simulation of a laminar end-wall vortex and boundary layer. *Physics of Fluids*, 29, 3993-4005.
- Wills, J., Wyatt, T., y Lee, B. (1999). *Warnings of high winds in densely populated areas*: United Kingdom. National Coordination Committee for the International Decade for Natural Disaster Reduction.
- Wills, J. A. B., Lee, B. E., y Wyatt, T. A. (2002). A model of wind-borne debris damage. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(4-5), 555-565. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6105\(01\)00197-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6105(01)00197-0)
- Wood, V. T., y White, L. W. (2011). A New Parametric Model of Vortex Tangential-Wind Profiles: Development, Testing, and Verification. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68(5), 990-1006. doi: 10.1175/2011jas3588.1
- Wurman, J., y Alexander, C. R. (2005). The 30 May 1998 Spencer, South Dakota, Storm. Part II: Comparison of Observed Damage and Radar-Derived Winds in the Tornadoes. *Monthly Weather Review*, 133(1), 97-119.
- Wurman, J., Robinson, P., Alexander, C., y Richardson, Y. (2007). Low-Level Winds in Tornadoes and Potential Catastrophic Tornado Impacts in Urban Areas. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(1), 31-46. doi: 10.1175/bams-88-1-31
- Xia, J., Lewellen, W. S., y Lewellen, D. C. (2003). Influence of Mach Number on Tornado Corner Flow Dynamics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60(22), 2820-2825. doi: 10.1175/1520-0469(2003)060<2820:iomnot>2.0.co;2

APÉNDICE A

RESPUESTA DE UNA CHIMENEA ANTE LA ACCIÓN DEL VIENTO TURBULENTO

A.1. COMPORTAMIENTO DE UNA CHIMENEA ANTE LA ACCIÓN DEL VIENTO TURBULENTO

La acción del viento turbulento en estructuras altas y flexibles, como una chimenea, produce vibraciones longitudinales y transversales a la dirección del viento. Las vibraciones longitudinales son causadas por ráfagas de corta duración, mientras que las vibraciones transversales son ocasionadas por la formación de vórtices alternantes.

El efecto en la dirección del viento consiste en empujes medios que representan la acción media del viento sobre una estructura y en empujes dinámicos en la dirección del viento, que consiste en fuerzas paralelas al flujo causadas por la turbulencia del viento, cuya fluctuación en el tiempo influye de manera importante en la respuesta estructural.

La fuerza que ejerce el viento en la dirección del flujo es proporcional al cuadrado de su velocidad (acción media o estática), por lo que pequeños cambios de ésta causan variaciones mayores en la presión, produciéndose una excitación dinámica sobre la estructura. Por la naturaleza del viento, esta excitación es completamente aleatoria, por lo que la respuesta estructural se debe analizar empleando un procedimiento estadístico que tome en cuenta las propiedades dinámicas de la estructura y el aspecto aleatorio de la misma excitación (Rodríguez Cuevas, 2012). Con base en esto, la respuesta máxima puede ser expresada como:

$$y_{\max} = \bar{y} \left(1 + g_p \frac{\sigma_R}{\bar{y}} \right) \quad (\text{A.1.1})$$

En donde \bar{y} es la respuesta media, que puede obtenerse estáticamente, σ_R es la desviación estándar de la respuesta variable, que puede calcularse como la raíz cuadrada del producto del espectro de presiones del viento por la admitancia mecánica y g_p es un factor que controla el número de desviaciones estándar que el valor pico excede al valor medio. En la expresión (A.1.1) el término entre paréntesis corresponde al factor de amplificación dinámica (FAD). Para estructuras comunes, se han desarrollado expresiones del factor de amplificación dinámica; (BS EN 1991-1-4-4, 2005; CICIND, 1998; IS 6533, 2002). Es importante mencionar que la fuerza que ejerce el viento en la dirección del flujo puede provocar el colapso de la estructura.

Por otro lado, el efecto en la dirección transversal a la dirección del viento consiste en fuerzas periódicas generadas por la aparición de vórtices alternantes, también conocidos como vórtices de “Von-Kármán”, que generan vibraciones importantes en el plano normal a la dirección del flujo, tal como se indica en la Figura A.1.

Cuando el viento fluye alrededor de un obstáculo, sigue su contorno, existiendo un punto en que se desprende, formándose remolinos o vórtices, que son arrastrados por el viento medio. Las condiciones de formación de los vórtices varían en función de la velocidad del viento y de la sección transversal, existiendo un valor de la velocidad a partir del cual los vórtices se forman alternadamente a cada lado

del cuerpo. La separación de vórtices genera circulación alrededor del cuerpo, que provoca un cambio en la distribución de presiones, lo que origina una “fuerza transversal al flujo”.



Figura A. 1. Vórtices de Von-Kármán

Strouhal (Simiu y Scanlan, 1978) encontró que la frecuencia con que se desprenden los vórtices viene dada por la siguiente expresión:

$$f_s = \frac{S_t \cdot V}{D} \tag{A.1.2}$$

donde S_t es el número de Strouhal, D es la dimensión perpendicular a la dirección del flujo y V es la velocidad del viento a la cual se desprenden los vórtices. El número de Strouhal depende de la forma de la sección transversal del cuerpo, de la rugosidad de la superficie y del número de Reynolds. La Figura A.2 muestra la dependencia del desprendimiento de vórtices respecto del número de Reynolds y la Figura A.3 muestra la dependencia del número de Strouhal respecto al número de Reynolds y a la rugosidad de la superficie.

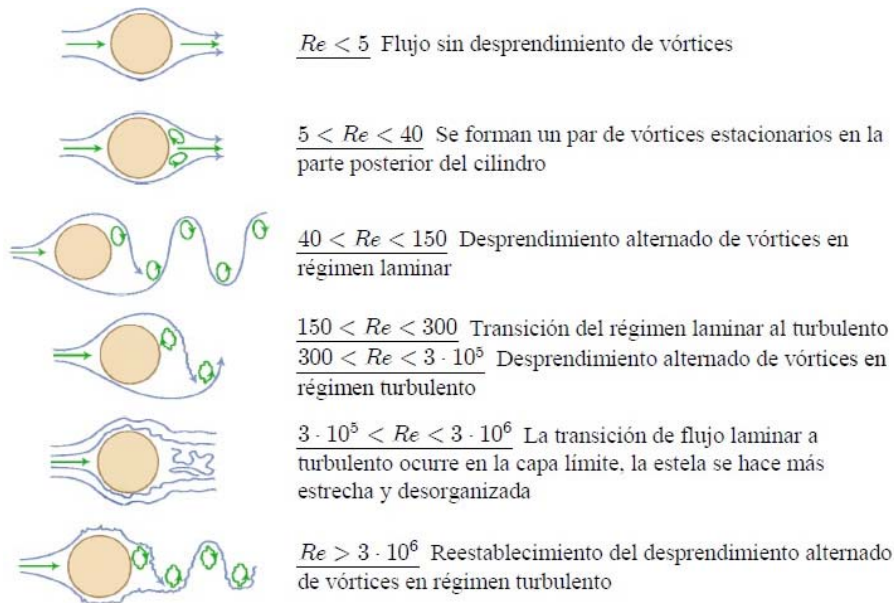


Figura A. 2. Regímenes de flujo alrededor de un cilindro

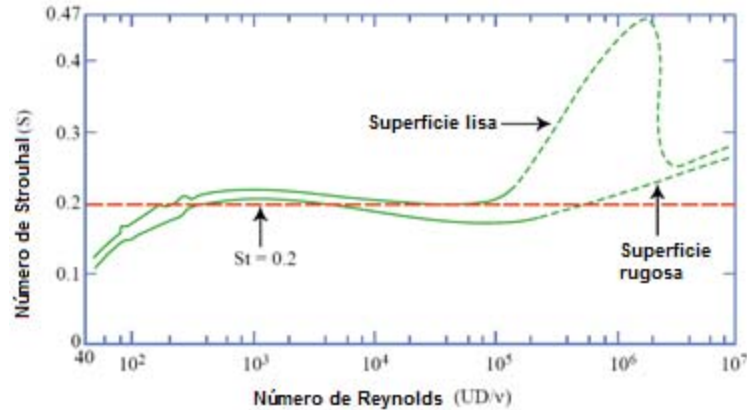


Figura A. 3. Número de Strouhal en función del número de Reynolds para cilindros circulares

Cuando el cuerpo es flexible y se encuentra apoyado elásticamente en la base (se permite el movimiento transversal a la dirección del fluido), se modifica el proceso de separación de vórtices y aparecen distribuciones diferentes a las de un cuerpo rígido, tal como se indica en la Figura A.4. [Pesce y Fujarra \(2000\)](#) y [Fujarra et al., \(2001\)](#) encontraron que los parámetros obtenidos para cuerpos apoyados elásticamente se pueden trasladar a estructuras más complejas como estructuras flexibles en voladizo, tal como una chimenea.

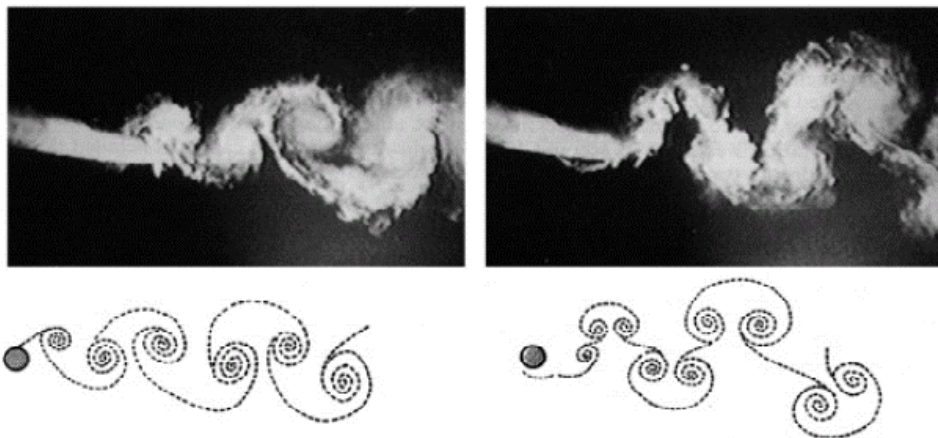


Figura A. 4. Separación de vórtices en un cuerpo rígido (izquierda) y en cuerpo flexible (derecha), apoyado elásticamente

La amplitud de la vibración transversal en una chimenea ocasionada por el desprendimiento de vórtices depende de muchos factores, como el nivel de amortiguamiento total, la masa relativa del cuerpo a la masa del fluido desplazado (conocido como relación de masas), la velocidad y la turbulencia del viento y la proximidad de la frecuencia de desprendimiento de vórtices a la frecuencia natural de vibración de uno de los modos de la chimenea. Este último factor es conocido como “bloqueo aerolástico” (Lock-in) y es una particularidad del fenómeno de “desprendimiento de vórtices”, el cual se describe a continuación.

Cuando la frecuencia de desprendimiento de vórtices, como la predicha por la relación de Strouhal, está poco correlacionada con la frecuencia de vibración de uno de los modos de la chimenea, el desprendimiento de vórtices en la estela de la chimenea provocará solo una respuesta nominal

periódica. Sin embargo, cuando la frecuencia de desprendimiento de vórtices está fuertemente correlacionada con una de las frecuencias naturales de vibración de uno de los modos de la chimenea, entonces, la amplitud de vibración transversal puede ser significativa. La amplitud de vibración en el plano normal a la dirección del viento tiene un fuerte efecto sobre el patrón de organización con el cual se desprenden los vórtices. El resultado es una condición de vibración resonante que persiste sobre un intervalo de velocidades. En este caso, los vórtices se desprenden con la frecuencia natural de vibración de uno de los modos de la estructura en lugar de la frecuencia de Strouhal. En otras palabras, es el movimiento de la estructura la que controla la frecuencia de desprendimiento de los vórtices. A este fenómeno se le conoce como “bloqueo aeroelástico”. El fenómeno de bloqueo aeroelástico se representa en la Figura A.5, en la cual se aprecia que en la región de bloqueo aeroelástico la frecuencia de desprendimiento de vórtices es constante e igual a la frecuencia natural de la estructura y no sigue una función lineal de la velocidad, tal como establece la ley de Strouhal en la ecuación (A.1.2).

La velocidad crítica del viento, V_{cr} , en que se produce el bloqueo aeroelástico en una chimenea está dada por la relación de Strouhal:

$$V_{cr} = \frac{f_n \cdot D}{S_t} \tag{A.1.3}$$

donde f_n es la frecuencia natural de vibración de uno de los modos de la chimenea; D y S_t ya han sido definidos previamente.

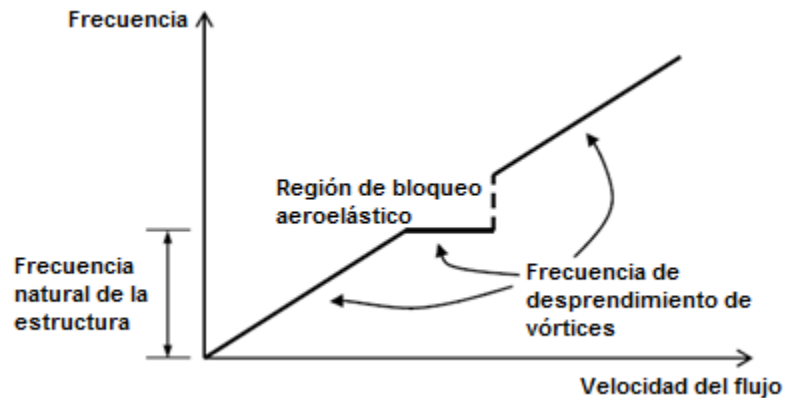


Figura A. 5. Evolución de la frecuencia de desprendimiento de vórtices con la velocidad del viento

El bloqueo aeroelástico está limitado por la amplitud de vibración de la estructura, es decir, por la capacidad de los vórtices a desprenderse de la estructura simétricamente. Largas amplitudes de vibración tienden a interferir con el patrón simétrico de la formación de vórtices. Las investigaciones realizadas por [Kaczinski, et al, \(1998\)](#) indican que la máxima amplitud de desplazamiento asociado con el bloqueo aeroelástico raramente exceden, aproximadamente, 1 a 1.5 veces la dimensión transversal de la estructura.

Por otra parte, la amplitud de vibración de la chimenea es muy sensible al amortiguamiento total de la estructura, formada por la suma del amortiguamiento estructural y el aerodinámico que se produce al aparecer la estela vorticosa. El amortiguamiento estructural se genera por la existencia de procesos disipativos de energía, tanto en los elementos resistentes de la estructura, como en los materiales de recubrimiento que se usan en ella. El amortiguamiento aerodinámico se produce por la disipación de

energía en el proceso de interacción entre las masas de aire y la estructura. Existe evidencia experimental que muestra que en estructuras de baja relación de masa con grandes amplitudes de vibración el amortiguamiento aerodinámico resulta de signo negativo. El amortiguamiento aerodinámico negativo conduce a una inestabilidad aerodinámica.

Scruton (Dyrbye y Hansen, 1996) encontró que la susceptibilidad de vibración de una estructura flexible depende del amortiguamiento estructural y de la relación de la masa de la estructura a la masa del fluido. Estos parámetros están relacionados en la expresión que se conoce como “numero de Scruton” y se define como:

$$S_c = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot D^2} \quad (\text{A.1.4})$$

donde δ_s es el amortiguamiento estructural expresado en forma de decremento logarítmico, $m_{i,e} / \rho \cdot D^2$ es la relación de masas, donde $m_{i,e}$ se define como:

$$m_{i,e} = \frac{\int_0^H m(z) \cdot \varphi_i(z)^2 \cdot dz}{\int_0^H \varphi_i(z)^2 \cdot dz} \quad (\text{A.1.5})$$

donde $m(z)$ es la masa distribuida, $\varphi(z)$ es la amplitud de la forma modal en cuestión. Vickery y Basu (1983) observaron que los desplazamientos transversales máximos de la parte alta de la chimenea son función del inverso del número de Scruton, S_c ; mientras más pequeño sea este número, los desplazamientos transversales tienden a incrementarse. Por ello, para valores pequeños de S_c , los desplazamientos de la parte alta de la chimenea en sentido transversal a la dirección del viento tienden a incrementar su valor.

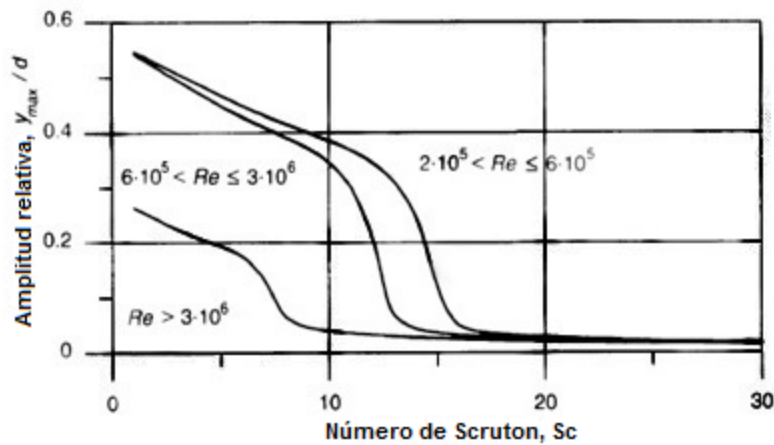


Figura A. 6. Amplitud relativa como función del número de Scruton (CICIND, 1998)

La Figura A.6 muestra los desplazamientos transversales normalizados con el diámetro de la parte alta de la chimenea en función del número de Scruton de acuerdo con las expresiones empleadas en código CICIND (1998), para diferentes números de Reynolds. De la figura se concluye que las chimeneas que son sensibles a vibraciones inducidas por vórtices alternantes presentaran mayores amplitudes de

vibración cuando la velocidad crítica del viento se encuentra en régimen crítico, es decir $3 \times 10^5 \leq Re \leq 3 \times 10^6$.

En conclusión, la acción del viento turbulento en chimeneas metálicas puede producir vibraciones tanto en la dirección del viento como en el sentido transversal, y son originadas por la variación de la velocidad del viento debida a la turbulencia del flujo y por la formación de vórtices alternantes.

El efecto del viento turbulento en la dirección del flujo es el más severo, ya que puede causar el colapso de la chimenea. Las vibraciones causadas por la turbulencia del viento se deben manejar estadísticamente, debido a la incertidumbre de las variaciones del viento, por medio del factor de amplificación dinámica (FAD).

Las vibraciones inducidas por el desprendimiento de vórtices alternantes en chimeneas metálicas, raramente pueden llegar a provocar el colapso inmediato de la estructura, con el tiempo pueden reducir su vida útil por fatiga. Cuando las vibraciones producidas por vórtices son excesivas, no es conveniente diseñar la chimenea para que resista los efectos de tales vibraciones; una opción más viable es alterar en lo posible sus características físicas o dinámicas, con el fin de evitar el fenómeno.

A.2. RESPUESTA TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL DE LA CHIMENEA ODENSE

Las chimeneas metálicas frecuentemente usadas en construcciones industriales, resultan ser estructuras flexibles de gran altura, cuya función principal es dispersar en la atmosfera, gases calientes generados en la operación de un complejo industrial. Este tipo de estructuras son sensibles a las vibraciones generadas por la acción dinámica del viento. Oscilan a lo largo y en sentido transversal a la dirección del viento. Las vibraciones longitudinales son causadas por la turbulencia del viento, mientras que las vibraciones transversales son ocasionadas por la formación de vórtices alternantes.

Los principales códigos de construcción (ACI 307, 1998; BS EN 1991-1-4-4, 2005; CICIND, 1998; IS 6533, 2002; NRCC 48192, 2005) especifican que la respuesta estructural de una chimenea ha de ser obtenida por la combinación de la respuesta en la dirección longitudinal con la coexistencia de la respuesta a la dirección transversal a la dirección del viento.

En la expresión (A.1.1) el término entre paréntesis corresponde al factor de amplificación dinámica (FAD), G . Para estructuras comunes, se han desarrollado expresiones del factor de amplificación dinámica; (BS EN 1991-1-4-4, 2005; CICIND, 1998; IS 6533, 2002; NRCC 48192, 2005).

Por otro lado, existen dos metodologías básicas para el cálculo de los desplazamientos totales en la dirección transversal a la dirección del viento en chimeneas debidos al desprendimiento de vórtices: el método espectral y el método resonante por desprendimiento de vórtices (Rodríguez Cuevas, 2012). La mayoría de los reglamentos de construcción (CICIND, 1998; IS 6533, 2002; NRCC 48192, 2005) utilizan el método espectral y solo el Eurocódigo (BS EN 1991-1-4-4, 2005) presenta las dos alternativas para calcular la respuesta máxima transversal por vórtices alternantes, las cuales se presentan a continuación. La máxima deflexión calculada con el método espectral está dada por:

$$y_{\max} = K_p \cdot b \cdot \sqrt{c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}} \quad (\text{A.2.1})$$

donde K_p es un factor que depende de $\sqrt{c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}}$ y las constantes c_1 y c_2 son calculadas con las siguientes expresiones:

$$c_1 = \frac{a_L^2}{2} \left(1 - \frac{S_c}{4 \cdot \pi \cdot K_a} \right) \quad c_2 = \frac{\rho \cdot b^2}{m_e} \frac{a_L^2}{K_a} \frac{C_c^2}{S_t^4} \frac{B}{h} \quad (\text{A.2.2})$$

donde C_c es una constante aerodinámica que depende de la forma de la sección transversal, K_a es el parámetro de amortiguamiento aerodinámico, que disminuye cuando se incrementa la intensidad de la turbulencia, a_L es la amplitud normalizada dada la limitación de la deformación de la chimenea con bajo amortiguamiento, S_t es el número de Strouhal y S_c es el número de Scruton.

La máxima deflexión calculada con el método resonante por desprendimiento de vórtices está dada por la ecuación:

$$y_{\max} = b \left(\frac{1}{S_t^2} \cdot \frac{1}{S_c} \cdot K_{\text{mod}} \cdot K_{\text{lat}} \cdot K_w \right) \quad (\text{A.2.3})$$

donde K_{mod} es el factor de forma del modo, K_{lat} es el coeficiente de fuerza lateral y K_w es el factor de longitud de correlación efectiva. Se remite al lector a la referencia (BS EN 1991-1-4-4, 2005) para obtener la lista completa de los parámetros y sus correspondientes valores. En la ecuación (A.2.3) se observa que los desplazamientos transversales máximos en chimeneas, son función del inverso del número de Scruton, S_c ; mientras más pequeño sea este número, los desplazamientos transversales tienden a incrementarse.

En referencia a la chimenea Odense, Hansen (1998) reportó la frecuencia natural del primer modo, la cual resultó igual a 0.37 Hz, y un periodo del primer modo igual a 2.7 s. Experimentalmente se obtuvo una medida del decremento logarítmico que define al amortiguamiento estructural de la chimenea, el cual resultó igual a 0.03. A partir de este valor se obtuvo el por ciento de amortiguamiento crítico que resultó ser 0.75 %. Se encontró que la relación de masa total de la chimenea, a la masa de aire que ocupa el mismo volumen, resultó ser igual a 68. Con estos valores se calculó el número de Scruton, que resulto ser igual a 4.08, valor suficientemente pequeño que garantiza la oscilación resonante por la separación de vórtices. Con esta información fue posible calcular la respuesta longitudinal y transversal. En referencia a la respuesta longitudinal, se calculó el factor de amplificación dinámica, que resultó ser igual a 3.4, por lo que la respuesta longitudinal será igual a la respuesta estática amplificada 3.4 veces. La respuesta transversal que se obtuvo con el método resonante resulto ser igual 18 cm; mientras que con el método espectral se obtuvo el valor de 102 cm, que es igual al reportado por Hansen. La Tabla 5.1 enlista los valores de las propiedades dinámicas y aerodinámicas de la chimenea en Odense.

APÉNDICE B

CÁLCULO DE LA ACELERACIÓN

El campo de flujo de un tornado queda definido por un vector de posición r de la partícula, como una función vectorial del tiempo t , en coordenadas cartesianas se define como:

$$\bar{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k} \quad (\text{B.1})$$

La velocidad, en términos de las componentes cartesianas, se puede escribir:

$$\bar{v} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k} \quad (\text{B.2})$$

El campo vectorial de aceleraciones es derivado del de velocidades pues el vector de aceleración de una partícula en un punto se define como la variación temporal de la velocidad en ese punto; esto es:

$$\bar{a} = \frac{d\bar{v}}{dt} = \frac{d^2\bar{r}}{dt^2} = \frac{du}{dt}\hat{i} + \frac{dv}{dt}\hat{j} + \frac{dw}{dt}\hat{k} = a_x\hat{i} + a_y\hat{j} + a_z\hat{k} \quad (\text{B.3})$$

Donde las componentes de aceleración se definen como:

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{du}{dt} + \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ a_y &= \frac{dv}{dt} + \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ a_z &= \frac{dw}{dt} + \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

Los términos fuera del paréntesis de la ecuación (B.4) se denominan aceleración temporal y miden el cambio de rapidez, mientras que los términos entre paréntesis se denominan aceleración convectiva y miden los cambios de dirección. Las ecuaciones (B.4) se pueden reescribir de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} a_x &= u_t + u \cdot u_x + v \cdot u_y + w \cdot u_z \\ a_y &= v_t + u \cdot v_x + v \cdot v_y + w \cdot v_z \\ a_z &= w_t + u \cdot w_x + v \cdot w_y + w \cdot w_z \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

Al obtener los términos de la aceleración temporal u_t y v_t . Recordando que las componentes de velocidad se definen como:

$$\begin{aligned} u(z, t) &= -T(z, r) \cdot \sin \phi - R(z, r) \cdot \cos \phi + U(z) \cdot \cos \beta \\ v(z, t) &= T(z, r) \cdot \cos \phi - R(z, r) \cdot \sin \phi + U(z) \cdot \sin \beta \\ w(z, t) &= W(z, r) \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

Al calcular la derivada temporal para la componente u :

$$u_t = (-T) \cdot (\sin \phi)' + (-T)' \cdot (\sin \phi) + (-R) \cdot (\cos \phi)' + (-R)' \cdot (\cos \phi) \quad (\text{B.7})$$

Al desarrollar cada uno de los términos:

$$u_t = (-T) \cdot (\cos \phi \cdot \phi_t) + (-T_r \cdot r_t) \cdot (\sin \phi) + (-R) \cdot (-\sin \phi \cdot \phi_t) + (-R_r \cdot r_t) \cdot (\cos \phi)$$

Los términos T_r y R_r son las derivadas de la componente tangencial y radial con respecto al radio, respectivamente. Agrupando y procediendo de manera análoga con la componente v_t se obtiene:

$$\begin{aligned} u_t &= -r_t (T_r \cdot \sin \phi + R_r \cdot \cos \phi) - \phi_t (T \cdot \cos \phi - R \cdot \sin \phi) \\ v_t &= r_t (T_r \cdot \cos \phi - R_r \cdot \sin \phi) - \phi_t (T \cdot \sin \phi + R \cdot \cos \phi) \end{aligned} \quad (\text{B.8})$$

Las derivadas direccionales (u_x , u_y y u_z) para la componente de velocidad u se calculan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{\partial u}{\partial r} \cdot \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ u_y &= \frac{\partial u}{\partial r} \cdot \frac{\partial r}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \\ u_z &= -T_z \cdot \sin \phi - R_z \cdot \cos \phi + U_z \cdot \cos \beta \end{aligned}$$

Los términos T_z y R_z son las derivadas de la componente tangencial y radial con respecto a la dirección z . Al reescribir en notación indicial las derivadas direccionales de la componente de velocidad u :

$$\begin{aligned} u_x &= u_r \cdot r_x + u_\phi \cdot \phi_x \\ u_y &= u_r \cdot r_y + u_\phi \cdot \phi_y \\ u_z &= -T_z \cdot \sin \phi - R_z \cdot \cos \phi + \phi_z \cdot \cos \beta \end{aligned} \quad (\text{B.9})$$

De manera análoga se procede con las derivadas direccionales de la componente de velocidad v :

$$\begin{aligned} v_x &= v_r \cdot r_x + v_\phi \cdot \phi_x \\ v_y &= v_r \cdot r_y + v_\phi \cdot \phi_y \\ v_z &= T_z \cdot \cos \phi - R_z \cdot \sin \phi + U_z \cdot \sin \beta \end{aligned} \quad (\text{B.10})$$

Al derivar la componente de velocidad u de la ecuación (B.6) con respecto al radio, r , y al ángulo ϕ :

$$\begin{aligned} u_r &= -T_r \cdot \sin \phi - R_r \cdot \cos \phi \\ u_\phi &= -T \cdot \cos \phi + R \cdot \sin \phi \end{aligned} \quad (\text{B.11})$$

De manera análoga, para la componente de velocidad v :

$$\begin{aligned}v_r &= T_r \cdot \cos \phi - R_r \cdot \sin \phi \\v_\phi &= -T_r \cdot \sin \phi - R_r \cdot \cos \phi\end{aligned}\quad (\text{B.12})$$

El radio se define como:

$$r = \sqrt{D^2 + (S_0 - V \cdot t)^2} \quad (\text{B.13})$$

Al derivar con respecto al tiempo se obtiene:

$$r_t = \frac{-V(S_0 - V \cdot t)}{\sqrt{D^2 + (S_0 - V \cdot t)^2}} = -V \frac{(S_0 - V \cdot t)}{r} \quad (\text{B.14})$$

Para calcular las derivadas direccionales del radio, se recurre a la definición de transformación de coordenadas polares a coordenadas cartesianas, es decir:

$$\begin{aligned}x &= r \cdot \cos \phi \\y &= r \cdot \sin \phi\end{aligned}$$

Al considerar que $\phi = \beta - \theta$, las ecuaciones anteriores quedan como

$$\begin{aligned}x &= r \cdot \cos(\beta - \theta) \\y &= r \cdot \sin(\beta - \theta)\end{aligned}$$

Al despejar x y y de la ecuación anterior y al desarrollar el argumento de las funciones trigonométricas:

$$\begin{aligned}r &= \frac{x}{\cos \beta \cdot \cos \theta + \sin \beta \cdot \sin \theta} \\r &= \frac{y}{\sin \beta \cdot \cos \theta - \cos \beta \cdot \sin \theta}\end{aligned}\quad (\text{B.15})$$

Al derivar la ecuación (B.15) con respecto a x y y se obtiene:

$$\begin{aligned}r_x &= \frac{1}{\cos \beta \cdot \cos \theta + \sin \beta \cdot \sin \theta} \\r_y &= \frac{1}{\sin \beta \cdot \cos \theta - \cos \beta \cdot \sin \theta}\end{aligned}\quad (\text{B.16})$$

Al considerar que $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{D}{S_0 - V \cdot t}\right)$, la ecuación (B.16) queda como:

$$\begin{aligned}r_x &= \frac{r}{(S_0 - V \cdot t) \cdot \cos \beta + D \cdot \sin \beta} \\r_y &= \frac{r}{(S_0 - V \cdot t) \sin \beta - D \cdot \cos \beta}\end{aligned}\quad (\text{B.17})$$

La derivada del ángulo θ con respecto al tiempo es:

$$\theta_t = \frac{V \cdot D}{r^2} \quad (\text{B.18})$$

Las funciones trigonométricas pueden obtenerse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \sin \phi &= \sin(\beta - \theta) = \sin \beta \cdot \cos \theta - \cos \beta \cdot \sin \theta \\ \cos \phi &= \cos(\beta - \theta) = \cos \beta \cdot \cos \theta + \sin \beta \cdot \sin \theta \end{aligned}$$

Al considerar que $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{D}{S_0 - V \cdot t}\right)$ las ecuaciones anteriores resultan ser igual a:

$$\begin{aligned} \sin \phi &= \frac{(S_0 - V \cdot t) \sin \beta - D \cdot \cos \beta}{r} \\ \cos \phi &= \frac{(S_0 - V \cdot t) \sin \beta + D \cdot \sin \beta}{r} \end{aligned} \quad (\text{B.19})$$

La ecuación (B.19) se puede reescribir en términos de la ecuación (B.17), es decir:

$$\begin{aligned} \sin \phi &= \frac{1}{r_y} \\ \cos \phi &= \frac{1}{r_x} \end{aligned} \quad (\text{B.20})$$

Finalmente, al calcular ϕ_x y ϕ_y . De las ecuaciones de transformación de coordenadas se deduce:

$$\frac{y}{x} = \frac{r \cdot \sin \phi}{r \cdot \cos \phi} = \frac{\sin \phi}{\cos \phi} = \tan \phi$$

Al despejar el ángulo ϕ :

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (\text{B.21})$$

Al derivar la ecuación (B.21) con respecto a x y y se obtiene:

$$\begin{aligned} \phi_x &= \frac{-y}{x^2 \left(1 + \frac{y^2}{x^2}\right)} = \frac{-y}{r^2} = \frac{-r \cdot \sin \phi}{r^2} = \frac{-\sin \phi}{r} \\ \phi_y &= \frac{1}{x \left(\frac{x^2 + y^2}{x^2}\right)} = \frac{1}{r^2} = \frac{x}{r^2} = \frac{r \cdot \cos \phi}{r^2} = \frac{\cos \phi}{r} \end{aligned}$$

Por lo tanto

$$\begin{aligned}\phi_x &= \frac{-\sin\phi}{r} \\ \phi_y &= \frac{\cos\phi}{r}\end{aligned}\tag{B.22}$$

en donde T , R y W son las componentes de velocidad dadas en las ecuaciones (6.3.2), (6.3.3) y (6.3.4); T_r , R_r , T_z , R_z y W_z son las derivadas espaciales de estas componentes.