



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

ESTIMACIÓN DEL DAÑO DEBIDO AL VIENTO EN FACHADAS, MEDIANTE
CURVAS DE FRAGILIDAD

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

PRESENTA:
ISAAC FELIPE LIMA CASTILLO

TUTORES PRINCIPALES
Dr. Roberto Gómez Martínez, Instituto de Ingeniería
Dr. Adrián Pozos Estrada, Instituto de Ingeniería
COMITÉ TUTOR
Dr. José Alberto Escobar Sánchez, Instituto de Ingeniería
Dr. Alberto López López, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias
Dr. Eduardo Reinoso Angulo, Instituto de Ingeniería

Jurado asignado

Presidente: Dr. Escobar Sánchez José Alberto

Secretario: Dr. Reinoso Angulo Eduardo

Vocal: Dr. Gómez Martínez Roberto

1^{er}. Suplente: Dr. Pozos Estrada Adrián

2^{do}. Suplente: Dr. López López Alberto

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería UNAM. Ciudad Universitaria. Ciudad de México

Tutores de la tesis

Dr. Roberto Gómez Martínez

Dr. Adrián Pozos Estrada

Agradecimientos

A mi padre Manuel Humberto Lima Martínez. †

Quien siempre ha sido una gran inspiración en cada momento, ni el tiempo ni la distancia me hacen olvidarte. Siempre te extraño.

A mi mamá, María del Carmen Castillo Morales.

Quien me ha enseñado lo que es el cariño, fuente de inspiración en los momentos difíciles. Mamá tengo la fortuna de tenerte, y poder agradecerte todo el apoyo que me brindas.

A mis hermanos, Manuel, Flor, Yuri e Iliana.

Quienes son personas extraordinarias, un ejemplo de superación, trabajo, honestidad, e incondicionalidad, quienes me han brindado su afecto, así como un gran apoyo.

A mis sobrinos Mario, Adrián, Alonso, Yuri y Emiliano, por la gran valentía que tienen para enfrentar las adversidades que se les presentan, así como a sus papas **Carlos, Malena y Ana** gracias por el regalo de disfrutar a mis sobrinos.

Al Dr. Gómez

Por el apoyo incondicional durante los estudios de posgrado.

Al Dr. Pozos

Por la gran amistad, así como el apoyo técnico en la elaboración del presente trabajo.

A la UNAM

De quien aprendí que: “Por mi raza hablará el espíritu”.

A mis profesores

Quienes me brindaron los conocimientos necesarios para cumplir mi compromiso profesional con la sociedad.

Al CONACyT

Por el apoyo económico durante los trabajos de investigación.

A los compañeros del grupo de Ingeniería de viento

Quienes siempre se mantienen en busca de adquirir nuevos conocimientos.

A GAP55

Por todas las vivencias y gratos momentos que hemos compartido.

A la fraternidad de la secundaria 78, grupo 132

Gracias por su amistad incondicional.

Resumen

Los daños no estructurales debido a los efectos del viento sobre los sistemas de fachadas provienen tanto de las presiones debidas al viento, así como de los escombros que eventualmente impactan sobre los elementos de fachada. Además de contar con la incertidumbre en la incidencia del viento, así como el tipo de escombros que se presentan, existe otro elemento importante que es la incertidumbre en la resistencia del material de la fachada. El presente trabajo tiene como objetivo el de estudiar el daño de vidrios en fachadas de edificios ante eventos extremos ocasionados por vientos fuertes, además de proponer una metodología para la elaboración de las curvas de fragilidad, lo cual permitirá estimar el daño de estos elementos de fachada para diferentes tipos de construcciones. Para la estimación de los daños se propone una metodología que involucra tanto la simulación aleatoria del viento, así como la incertidumbre de la resistencia, mediante la aplicación de modelos probabilísticos, de la siguiente forma: se compara la presión del viento y la resistencia aleatoria del material para estimar el número de ventanas rotas, para diferentes velocidades de viento y espesores del vidrio de la fachada. La simulación de las velocidades del viento se estima mediante un modelo de Autorregresión y Media Móvil (ARMA), y para la consideración de la incertidumbre en la resistencia, se emplean técnicas de Monte-Carlo. Con base en lo anterior se evalúan curvas de fragilidad las cuales se comparan para diferentes coeficientes de variación (COV) del material, se observan cambios en el trazo de las curvas de fragilidad, por lo que se altera la estimación del índice de pérdida e índice del costo de los daños, que son indicadores típicos de pérdidas en elementos no estructurales. La metodología propuesta en el presente trabajo permite realizar la estimación del costo de las pérdidas debidas a los efectos del viento para cualquier tipo de cubiertas, mediante un índice de daño.

ABSTRACT

Damages in nonstructural elements due to the wind effects on systems of facades come from the wind-induced pressure, as well as of the debris that eventually cause impact on the components of facades. Besides considering the uncertainty of the incident of the wind, as well as the type of debris, there is a third element to consider, which is the resistance uncertainty of the material. The goal of the present work is the analysis of damages of glass on facades due to strong winds; in addition, is to propose a methodology to develop fragility curves. For the estimation of damage, a methodology that involves random simulation of the wind speed, as well as uncertainty resistance, through the application of probabilistic models is proposed, as follows: the wind pressure and the random resistance of the material to value the number of windows broken, for different wind speeds and thicknesses of the material are compared. The simulation of wind speeds is carried out by using an Autorregresive and Moving Average (ARMA) model, and for the consideration of the uncertainty of resistance, Monte Carlo's techniques are used. When comparing the fragility curves for different coefficients of variation (COV) of the material, changes on the form of the fragility curves are observed, causing an alteration of the losses index and cost of damages, which are typical indices of losses in nonstructural elements. The methodology proposed in this work evaluates by means of an index of damage, the estimation of the cost of the losses due to effects of wind speed for any type of facades of buildings.

Contenido

Introducción	xv
Objetivos.....	xv
Capítulo 1	1
Evaluación de los daños en edificios de gran altura	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Acción del viento sobre las estructuras.....	2
1.3 Descripción de los daños en edificios.....	3
1.3.1 Huracán Wilma (2005)	3
1.3.2 Huracán Odile (2014)	6
1.3.3 Huracán Katrina (2005)	6
1.3.4 Huracán Ike (2008).....	8
1.4 Efectos del viento en estructuras prismáticas	9
1.4.1 Evaluación de los daños	9
1.4.2 Modelos para la estimación de daños	10
1.5 Conclusiones.....	11
Referencias	12
Capítulo 2	14
Simulación de la velocidad turbulenta del viento.....	14
2.1 Series en el tiempo.....	14
2.2 Simulación del campo del viento turbulento	16
2.3 Velocidad media	16
2.4 Velocidad del viento turbulento.....	17
2.5 Conclusiones.....	21
Referencias	23
Capítulo 3	24

Evaluación probabilística del daño.....	24
3.1 Introducción.....	24
3.2 Descripción del modelo analizado.....	24
3.3 Estimación del límite de falla.....	26
3.4 Incertidumbre en la resistencia del material.....	27
3.4.1 Comportamiento aleatorio del material.....	28
3.5 Estimación del daño.....	28
3.6 Papel de probabilidad.....	31
3.7 Conclusiones.....	35
Referencias.....	37
Capítulo 4.....	40
Curvas de fragilidad.....	40
4.1 Introducción.....	40
4.2 Metodología propuesta para obtener curvas de fragilidad en fachadas de cristal.....	42
4.3 Estados de daño.....	43
4.4 Curvas de vulnerabilidad.....	44
4.5 Curvas de fragilidad.....	48
4.6 Índice de pérdida.....	51
4.7 Costos de reparación.....	54
4.8 Conclusiones.....	55
Referencias.....	58
Apéndice A.....	60
A.1 Polinomios normales.....	60
Apéndice B.....	61
Apéndice C.....	66

Lista de figuras

Capítulo 1

Figura	Descripción
Figura 1.1	Distribución de presiones y succiones (Bungale, 2005)
Figura 1.2	Foto satelital del huracán Wilma (NOAA, 2005)
Figura 1.3	Daños debidos al huracán Wilma (2005) en la ciudad de Cancún
Figura 1.4	Daños en fachadas debido a los efectos del huracán Wilma (2005), Miami Florida
Figura 1.5	Desprendimiento de la fachada en un hotel durante el huracán Odile (2014)
Figura 1.6	Daños en la fachada de cristal durante el huracán Katrina (2005)
Figura 1.7	Edificio dañado por el huracán Katrina (Hancock Bank)
Figura 1.8	a) daño en edificios, b) dirección del viento y c) velocidad del viento, durante el huracán Ike (2005) (FEMA P-757, 2009)
Figura 1.9	Daños en elementos de fachada durante el huracán Katrina (2005)

Capítulo 2

Figura 2.1	Análisis de las velocidades del viento, (a) velocidades en cada ventana, (b) señal típica del viento, (c) Comparación de FDPE
------------	---

Capítulo 3

Figura 3.1	Modelos en estudio, a) fachada y b) modelo de ventana
Figura 3.2	Ejemplo del cálculo de la presión de diseño (New York City Building Code, 2008)
Figura 3.3	Simulación de las velocidades del viento
Figura 3.4	Comparación entre las presiones y el límite de falla, (a) y (b) vel. 180 km/h, (c) y (d) vel. 230 km/h
Figura 3.5	Matriz de daños en ventanas, (a), (b), (c) y (d) distribución de los daños para diferentes velocidades
Figura 3.6	Papel de probabilidad vel. 185 km/h, $e=1/4''$, 2.29 m x 4.94 m,

(a y b) COV=0, (c y d) COV=10%, (e y f) COV=15% y (g y h) COV=20%

Figura 3.7 Papel de probabilidad vel. 240 km/h, $e=3/8$ ", 2.29 m x 1.77 m, (a y b) COV=0, (c y d) COV=10%, (e y f) COV=15% y (g y h) COV=20%

Figura 3.8 Comparación del daño para diferentes condiciones, vel. 216 km/h, 218 km/h, 220km/h, 222 km/h y 224 km/h, (a) COV=0, (b) COV=20%

Capítulo 4

Figura 4.1 Diagrama de flujo para la elaboración de curvas de fragilidad

Figura 4.2 Curvas de vulnerabilidad ($e=1/4$ ", distribución de Weibull), (a) COV=0%, (b) COV=10% (c) COV=15% y (d) COV=20%

Figura 4.3 Curvas de vulnerabilidad ($e=1/4$ ", distribución de Weibull y lognormal), (a) COV=0%, (b) COV=10% (c) COV=15% y (d) COV=20%

Figura 4.4 Elaboración de curvas de fragilidad

Figura 4.5 Curvas de fragilidad $e=1/4$ " (2.29 m x 2.16 m) (distribución de Weibull), (a) COV=0%, (b) COV=10%, (c) COV=15%, (d) COV=20%

Figura 4.6 Curvas de fragilidad $e=1/4$ " (2.29 m x 2.16 m) (distribución de Weibull y lognormal), (a) COV=0%, (b) COV=10%, (c) COV=15%, (d) COV=20%

Figura 4.7 Comparación del Índice de pérdida ($e=1/4$ "), distribución de Weibull (a), (c) y (e), Weibull-lognormal (b), (d) y (f)

Apéndice B

Figura B.1 Curvas de fragilidad $e=1/4$ " (2.29 m x 2.16 m) (a) COV=0%, (b) COV=10%, (c) COV=15%, (d) COV=20%

Figura B.2 Curvas de fragilidad $e=1/4$ ", (2.29 m x 2.03 m)

a) COV=0%, (b) COV=10%, (b) COV=15%, (c) COV=20%

Figura B.3 Curvas de fragilidad $e=1/4''$, (2.29 m x 1.91 m)

a) COV=0%, (b) COV=10%, (b) COV=15%, (c) COV=20%

Figura B.4 Curvas de fragilidad $e=1/4''$, (2.29 m x 1.77 m)

a) COV=0%, (b) COV=10%, (b) COV=15%, (c) COV=20%

Figura B.5 Curvas de fragilidad $e=1/4''$, (2.29 m x 1.65 m)

a) COV=0%, (b) COV=10%, (b) COV=15%, (c) COV=20%

Apéndice C

Figura C.1 Curvas de fragilidad $e=1/4''$ (2.29 m x 2.16 m)

(a) COV=0%, (b) COV=10%, (c) COV=15%, (d) COV=20%

Figura C.2 Curvas de fragilidad $e=1/4''$, (2.29 m x 2.03 m)

a) COV=0%, (b) COV=10%, (b) COV=15%, (c) COV=20%

Figura C.3 Curvas de fragilidad $e=1/4''$, (2.29 m x 1.91 m)

a) COV=0%, (b) COV=10%, (b) COV=15%, (c) COV=20%

Figura C.4 Curvas de fragilidad $e=1/4''$, (2.29 m x 1.77 m)

a) COV=0%, (b) COV=10%, (b) COV=15%, (c) COV=20%

Figura C.5 Curvas de fragilidad $e=1/4''$, (2.29 m x 1.65 m)

a) COV=0%, (b) COV=10%, (b) COV=15%, (c) COV=20%

Lista de tablas

Capítulo 4

Tabla 4.1	Estados de daño
Tabla 4.2	Índice de pérdida para diferentes velocidades (Weibull)
Tabla 4.3	Índice de pérdida para diferentes velocidades (Weibull-lognormal)
Tabla 4.4	Comparación del costo de reparación (Weibull)
Tabla 4.5	Comparación del costo de reparación (Weibull-lognormal)

Simbología

\tilde{A}_i	Matriz ($i \dots p$)
AR	modelo autorregresivo
B_0	matriz triangular inferior
C	matriz de correlación cruzada
c	constante
C_y^2, C_z^2	efectos de separación relativos entre y y z
$coh(y_i, z_i, y_j, z_j, n)$	función de coherencia espectral entre los puntos y y z
$C_{K(t)}$	Matriz de correlación cruzada para la K -ésima posición
ECM	error cuadrático medio
$f(n, z)$	frecuencia reducida
F_i	factor de pérdida
$F_n(x)$	la distribución empírica
$F_o(x)$	es la distribución teórica
F_T	factor de topografía
F_{rz}	factor de exposición con la altura
$f_X(x)$	función de densidad de probabilidad conocida
I_P	índice de pérdida
J_s	número de restricciones
k	factor de forma
$K(t)$	proceso para cada punto

K	parámetro de forma
$L(\theta)$	función de verosimilitud
m	número de elementos en el espacio
MA	modelo de media móvil
\tilde{m}	media del logaritmo natural de Y
m_R	valor medio de la distribución de Weibull
N	número de parámetros
n	frecuencia tamaño de la muestra número de datos
p	coeficientes de la expresión general orden del modelo atorregresivo número de puntos en el tiempo
P_e	probabilidad de excedencia
P_f	probabilidad de falla
P_{ij}	correlación cruzada entre la i -ésima y j -ésima
q	orden del modelo de media móvil
r_f	valor de la relación de daños normalizada
$S_i(n)$	densidad de potencia espectral
s	posición
t	tiempo
$U(z_i)$	velocidad media
u	valor medio de la serie parámetro de escala
u_*^2	velocidad de fricción
\bar{V}	velocidad media
V_R	velocidad regional
v_n	vector de velocidades normalizado
V_Y^2	coeficiente de variación.
\hat{x}	respuesta total del viento
x_i	muestra aleatoria i -ésima posición x
y	punto en el espacio dirección del viento en el sentido y variable aleatoria
z	altura de la velocidad media

y_i	i -ésima posición y
y_t	valor actual
z_i	i -ésima posición z
α	coeficiente del modelo autorregresivo
β	coeficiente del modelo media móvil
Γ	función Gama
ΔP_i	probabilidad de falla
Δt	incremento en el tiempo
δ_R	desviación estándar de la distribución de Weibull
ε_t	vector de ruido blanco
ζ	variables aleatorias independientes
θ	parámetros del modelo coeficientes de media móvil parámetros de la población parámetros que se requieren estimar
ϕ^{-1}	distribución normal inversa
μ_t	modelo autorregresivo modelo media móvil
φ	coeficientes autorregresivos
σ_x	desviación estándar
μ_*^2	velocidad de cortante
$Z(x_i)$	valor medido de la variable
$Z^*(x_i)$	valor estimado

Introducción

Los diferentes eventos meteorológicos del tipo huracán, que se presentan en las costas de la República Mexicana, demandan a las estructuras civiles, estar diseñadas para resistir los efectos del viento. Sin embargo a través de los años se registran daños en los elementos no estructurales. Las causas de que fallen los elementos no estructurales son debido a los efectos de la presión del viento y al impacto de proyectiles. Para evaluar los daños y conocer los costos para eventualmente estimar el valor de la reparación de los mismos, se requiere utilizar las herramientas de la probabilidad y la estadística. Una de las herramientas para realizar la evaluación económica de los daños, son; las curvas de fragilidad.

El presente trabajo se propone una metodología para desarrollar curvas de fragilidad, con base tanto en el fenómeno aleatorio del viento, así como en la incertidumbre en la resistencia de los elementos no estructurales.

Objetivos

Proponer una metodología para elaborar curvas de fragilidad que permitan conocer la probabilidad de falla considerando cierto valor de la amenaza, con base en las velocidades de viento que se presentan durante un huracán.

- La metodología propuesta debe poder ser utilizada para cualquier tipo de elemento no estructural, con base en diferentes geometrías de la estructura principal.

Organización de la tesis

En el primer capítulo se realiza una descripción de los efectos del viento sobre las estructuras, para diferentes tipos de elementos no estructurales, y se describen los daños debidos a las presiones de viento así como la descripción de la forma en que los escombros se convierten en potenciales proyectiles, los cuales impactan en las fachadas. Se menciona también la importancia en que los coeficientes de presión se utilizan para el diseño de elementos no estructurales en fachadas.

En el segundo capítulo se describe el modelo matemático para el cálculo de la velocidad turbulenta del viento.

En el tercer capítulo se indica la forma en que se estudiaron los resultados de comparar las presiones de viento contra la resistencia de los elementos no estructurales.

En el cuarto capítulo se desarrolla la metodología para obtener las curvas de fragilidad, así como la forma en que se pueden utilizar para el cálculo de las pérdidas.

En el anexo A.1, se muestra el procedimiento para ajustar las curvas mediante el método expuesto en el trabajo de Hong y Lind (1996).

En el anexo A.2, se muestran diferentes curvas de fragilidad para distintas dimensiones y espesores.

Formato de tesis

El formato de la tesis se desarrolla con base en separar los capítulos con sus respectivas conclusiones y recomendaciones.

Capítulo 1

Evaluación de los daños en edificios de gran altura

1.1 Antecedentes

Una gran cantidad de estructuras que se encuentran en México, así como en diferentes partes del mundo, están expuestas a los efectos del viento, ya sea por la presencia de vientos de mesoescala o sinópticos, tormentas tropicales, o la eventual llegada de huracanes y presencia de tornados. Las estructuras que presentan fallas debido a los eventos meteorológicos antes mencionados son: hoteles, naves industriales, casas habitación, comercios, tenso estructuras, entre otras. Los daños que se generan son semejantes a los que se encuentran descritos en el reporte del huracán Odile (Murià et al., 2015 y 2018) así como en el reporte del huracán Ike (2008). Las fallas más comunes que se presentan son en los elementos no estructurales, las cuales provocan pérdidas económicas y en algunas ocasiones pérdidas humanas. Uno de los huracanes que más han causado daños es el Katrina, que afectó a la ciudad de New Orleans en los Estados Unidos de América, (Mosqueda y Porter, 2005). Entre los eventos más destructivos se pueden mencionar los huracanes Janet (1955), Gilberto (1988), Paulina (1997), Stan (2005), Manuel (2013) y Wilma (2005) (CENAPRED, 2005).

El huracán Wilma (2005), generó daños en una de las actividades económicas más importantes en la ciudad de Cancún, como lo es la actividad hotelera, la cual representa el ingreso económico más importante de la ciudad; de forma semejante afectó el sur de la Florida en los Estados Unidos. Los daños más comunes fueron los concernientes a los elementos no estructurales de las fachadas, entre los más frecuentes se identifican: la ruptura de vidrios, desprendimiento de tejas, levantamiento de pintura en la fachada, daño en los contenidos, desprendimiento de toldos, daños en cubiertas de naves industriales, desprendimiento del impermeabilizante y pérdida en los accesorios de aire acondicionado localizado en las cubiertas de los edificios. El hecho de que las estructuras presenten daños como los que se han mencionado, repercute en el buen funcionamiento de la actividad comercial o de emergencia para la cual esté destinado el inmueble. Además de las regiones

con asentamientos densamente poblados, en las zonas rurales existen cuantiosos daños económicos debido a las pérdidas de cultivos, graneros, casas, ganado, como por ejemplo los que generó el huracán Isaac (FEMA P-938, 2013). Así, en las zonas agrícolas y urbanas, la interrupción de las actividades comerciales y de emergencia provoca que las actividades económicas queden inhabilitadas, ya sea porque es imposible proveer el servicio al que regularmente se dedican, así como por las vialidades que han quedado obstruidas, o la falta de energía eléctrica, la cual les impide continuar con sus labores. En la presente investigación únicamente se evalúan los daños en elementos no estructurales, en particular los que se refieren las ventanas de fachada, una descripción más detallada se comenta en el apartado 1.3.

1.2 Acción del viento sobre las estructuras

Debido a la aleatoriedad tanto de la incertidumbre del viento, como de la dirección en la que se presenta, la distribución de presiones varía a partir del tipo de geometría de la estructura sobre la que incide el viento. La asimetría en planta y/o en elevación se presenta en la mayoría de las estructuras de gran altura, por lo que se utilizan pruebas experimentales en túnel de viento, para conocer las presiones sobre la estructura, y eventualmente el diseño de la fachada (Flaga et al., 2011). En la práctica profesional se han estandarizado las áreas en donde se encuentran las presiones máximas en estructuras de edificios (Figura 1.1), en función de los coeficientes de presión, los cuales se han obtenido a partir de pruebas experimentales. Diversas investigaciones indican que las presiones máximas se encuentran en la zona de barlovento, mientras que debido a que en las esquinas se desprende el fluido y se genera una zona de baja presión, se presentan succiones importantes, tanto en la zona de las paredes laterales, el techo, y en la zona de sotavento (Figura 1.1). El hecho de establecer un criterio que permita a los diseñadores seguir el mismo estándar, deriva en que algunas estructuras asimétricas queden fuera de requerimientos de diferentes códigos (Flaga et al., 2011).

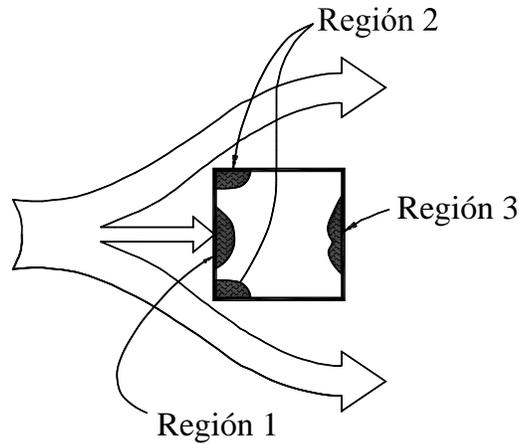


Figura 1.1 Distribución de presiones y succiones (Bungale, 2005)

En las ciudades, los edificios presentan una gran cantidad de configuraciones geométricas por lo que resulta complicado que en los códigos de construcción se tengan contempladas todas las variaciones en geometría para el diseño adecuado de cada estructura.

1.3 Descripción de los daños en edificios

En los siguientes incisos se realiza una revisión de los daños, debido a diferentes eventos meteorológicos que se han presentado en distintas ciudades, los cuales han afectado estructuras similares a las que son de interés en esta investigación.

1.3.1 Huracán Wilma (2005)

En la Figura 1.2 se muestra, en la esquina inferior derecha, la trayectoria del huracán Wilma (2005), se puede observar que la dirección del huracán afectó a la península de Yucatán, así como el sur del estado de Florida en los Estados Unidos de América.

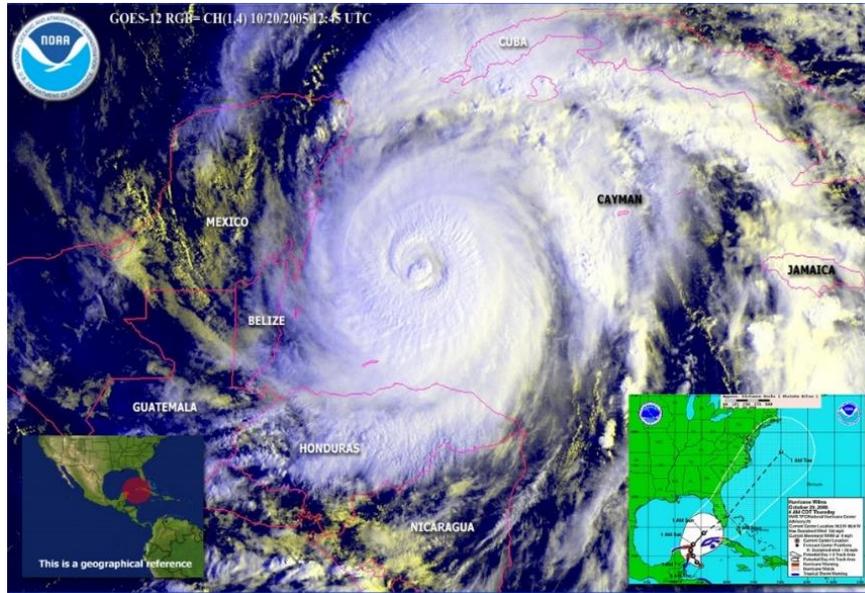


Figura 1.2 Foto satelital del huracán Wilma (NOAA, 2005)

En la Figura 1.3 se muestra un edificio de departamentos afectado por las presiones que se generaron durante el año 2005 debido al arribo del huracán Wilma en la ciudad de Cancún. El daño está distribuido en forma aleatoria en la fachada de cristal, tanto en sentido longitudinal como vertical. En la práctica profesional se acostumbra utilizar, para diseño, el valor máximo de las presiones que se presenta en la parte superior de la estructura, con el que se obtiene el espesor del vidrio para toda la fachada. Se observa un daño severo en los niveles inferiores, aún y cuando se considera que está sobrediseñado, debido a que la velocidad aumenta en función de la altura.



Figura 1.3 Daños debidos al huracán Wilma (2005) en la ciudad de Cancún



**Figura 1.4 Daños en los cristales debido a los efectos del huracán Wilma (2005),
Miami Florida**

Al comparar las Figura 1.3 y 1.4, se observan daños en sentido transversal en ventanas que deberían estar diseñadas con las mismas características para resistir idéntica presión de viento; sin embargo, se presenta la falla. Los códigos que se utilizan en ambas ciudades son relativamente similares, por lo que resalta que existan daños muy semejantes.

1.3.2 Huracán Odile (2014)

Otro tipo de fachada que es sensible a los efectos del viento se muestra en la Figura 1.5, la cual está compuesta de una cancelería adherida a la estructura principal, mediante tornillos que sujetan los paneles. La dirección del viento, así como la incertidumbre en la resistencia de los anclajes, conduce al desprendimiento de uno o varios de los paneles, lo que podría generar un efecto en cadena.



Figura 1.5 Desprendimiento de la fachada en un hotel durante el huracán Odile (2014)

1.3.3 Huracán Katrina (2005)

Otro evento importante que muestra la vulnerabilidad de los elementos no estructurales, es el que se registra en el reporte elaborado por Mosqueda y Porter (2005), en donde se muestra la falla de los elementos no estructurales que se registraron en los edificios localizados en el centro de la ciudad de New Orleans. En la Figura 1.6 se muestra un edificio de 24 pisos, el cual tiene una geometría regular y su fachada está prácticamente cubierta de ventanas (muro cortina). De igual forma que en los casos anteriores, el daño se distribuye en forma aleatoria a lo largo y ancho de la fachada.



Figura 1.6 Daños en la fachada de cristal durante el huracán Katrina (2005)

En la Figura 1.7, se muestra la aleatoriedad de los daños en toda la fachada, semejantes a las Figuras 1.3-1.6. En los primeros seis niveles se concentran los daños, probablemente debido al impacto de proyectiles generado a base de la madera que se utilizó para construir la estructura que se muestra al frente del edificio principal (Mosqueda y Porter, 2005). En los primeros seis niveles algunas de las ventanas no tuvieron daños aparentes, lo que refleja la inconsistencia de utilizar la misma velocidad de viento en todos los niveles. Adicional a la estructura de madera, existen otros edificios contiguos, que eventualmente realizan funciones de bloqueo (efecto escudo), así como de incremento en la velocidad del viento debido a la reducción del área (efecto Venturi).



Figura 1.7 Edificio dañado por el huracán Katrina (Hancock Bank)

1.3.4 Huracán Ike (2008)

Durante el huracán Ike (2008), en el estado de Texas en los Estados Unidos de América, se generó una gran cantidad de pérdidas económicas. Los daños más importantes fueron los que se presentaron en ventanas de varios edificios de la ciudad de Houston, entre los que podemos mencionar la Torre J.P. Morgan Chase (75 pisos) y el Cetro J.P. Morgan Chase (20 pisos). En la Figura 1.8a se muestran las dos estructuras con los correspondientes daños sobre la fachada de cristal; en las Figuras 1.8b y 1.8c, se indican la dirección y velocidad del viento que se registraron en el momento de evento meteorológico. Se puede observar que tanto el daño, así como la incidencia del viento se presentan en forma aleatoria (FEMA P-757, 2009).

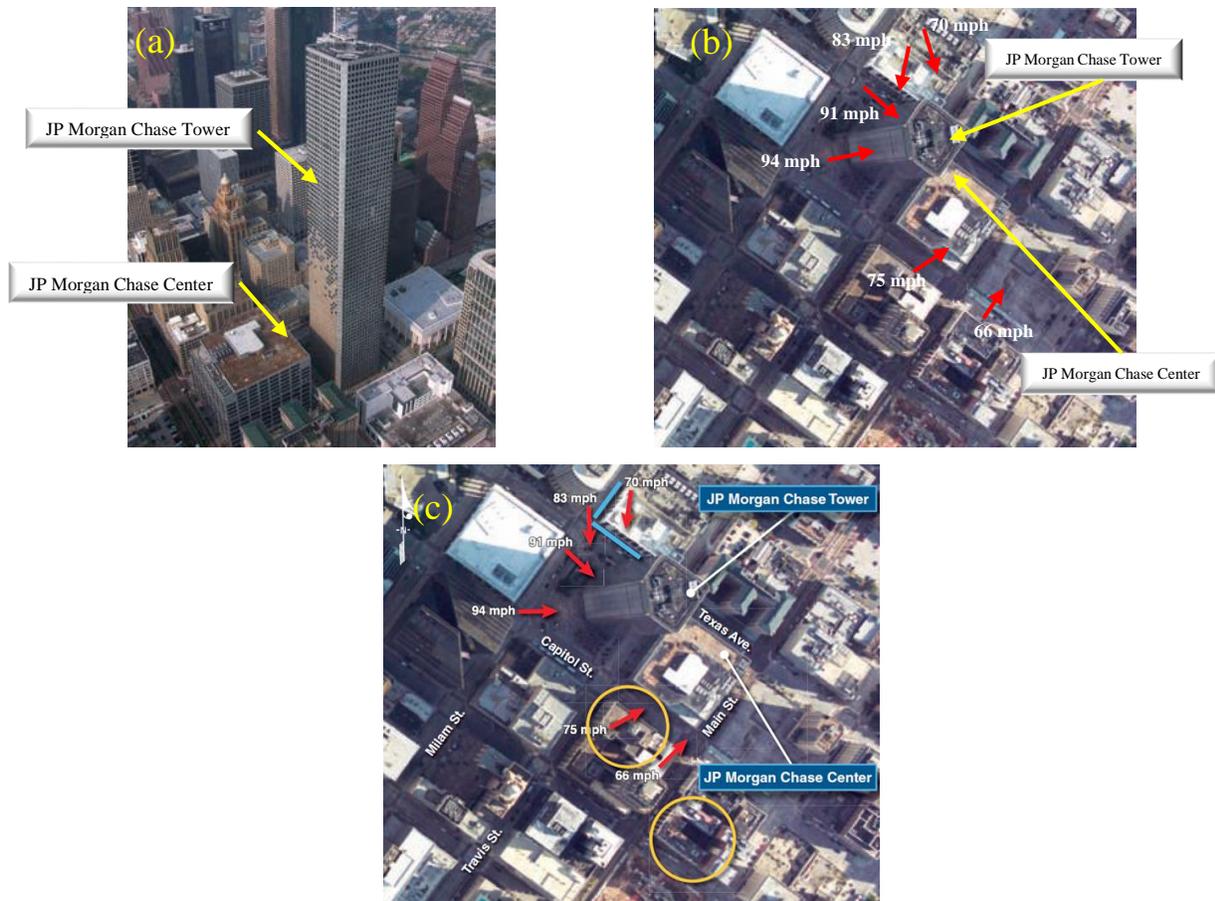


Figura 1.8, a) daño en edificios, b) dirección del viento y c) velocidad del viento, durante el huracán Ike (2005) (FEMA P-757, 2009)

1.4 Efectos del viento en estructuras prismáticas

A continuación se describen los trabajos de diferentes investigadores que anteceden a la presente investigación, en donde desarrollan metodologías mediante implementación de la probabilidad y la estadística.

1.4.1 Evaluación de los daños

En los edificios se pueden presentar una gran variedad de daños generados por las fuerzas del viento. Las dos principales causas de daños en los edificios según el orden de importancia, son la presión debida al viento y el impacto de proyectiles, o la combinación de los mismos. El registro y análisis de los daños durante los huracanes Katrina (Mosqueda y Porter, 2005) e

Ike (FEMA P-757, 2009) mostró que la mayoría se debieron a la presencia de proyectiles. El tipo de proyectiles que se generan son aquellos por la ruptura de ventanas, así como por el desprendimiento de partes de impermeabilizante localizado en los techos, que en combinación con las fuerzas de viento provocan grandes daños sobre estructuras aledañas. En la Figura 1.9 se muestra un ejemplo de la distribución de edificios durante el huracán Katrina, en donde se puede observar que en el instante en que las presiones originadas por el viento en las paredes laterales de los edificios 1 y 2, generan desprendimientos de trozos de ventanas que impactan en los edificios localizados en la parte posterior. La velocidad se incrementa debido a la disminución en el área entre los edificios 1 y 2, provocando que se tenga la suficiente energía para llevar los escombros hasta la fachada del edificio tres.

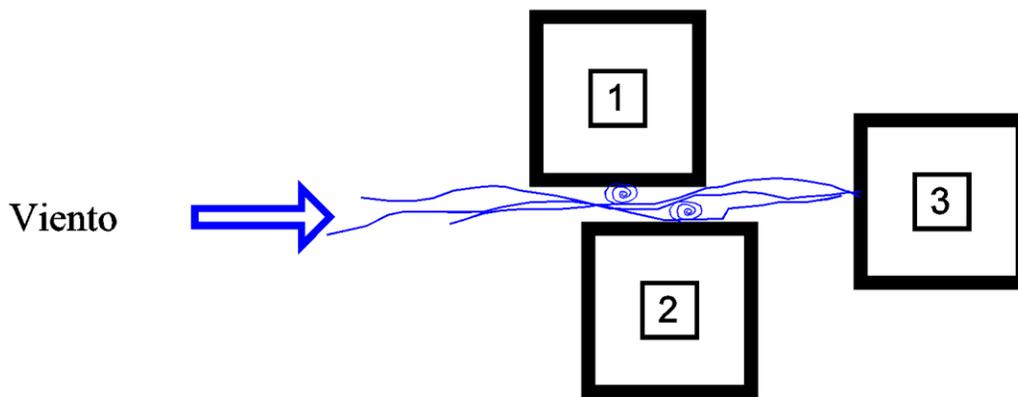


Figura 1.9 Daños de elementos de fachada durante el huracán Katrina (2005)

1.4.2 Modelos para la estimación de daños

La predicción probabilística de los daños ha cobrado gran interés, con el fin de desarrollar metodologías y/o expresiones y con la intención de predecir pérdidas materiales, económicas y humanas. Los daños en los elementos no estructurales han sido investigados por Unanwa y MacDonal (2000a), quienes desarrollan las llamadas bandas de daño, con las que estiman la falla (ventanas, puertas, acabados etc.), de acuerdo con un intervalo superior e inferior. Por otra parte, Vickery (2006) propone un modelo de daño desarrollado para HAZUS-MH (Hurricane Model MH), en el que describe el procedimiento para estimar las fallas en los elementos no estructurales, así como para la evaluación de las pérdidas. Lee y Rosowsky (2005), utilizan curvas de fragilidad para estimar daño en cubiertas de construcciones de baja altura. Vanmarcke (2014) evaluó un grupo de estructuras y observó que la presencia de

proyectiles incrementa el número de daños. Una investigación sobre estimación de pérdidas económicas, debido a los daños causados por el viento, ha sido elaborada por Filliben et al. (2002), quienes evalúan las pérdidas económicas mediante matrices de daño. Pinelli (1999), estima en forma probabilística el daño en estructuras residenciales, con base en la simulación de las velocidades del viento y la aplicación de técnicas de Monte Carlo. Eventualmente es necesario tomar en cuenta el costo de los daños con base en las pérdidas esperadas debido a los efectos del viento; Stewart (2003), concluye que las estructuras reforzadas atenúan la vulnerabilidad. La mayoría de las investigaciones mencionadas se han desarrollado para los requerimientos de los respectivos países de origen. En México no existe una metodología para estimar los daños probables en fachadas sometidas a los efectos turbulentos del viento, por lo que uno de los objetivos de este trabajo es establecer una metodología que permita realizar una predicción de los mismos.

1.5 Conclusiones

Se realizó una revisión de los efectos del viento sobre las estructuras, así como la eventual evaluación de los daños más comunes que se presentan, ya sea en edificios o en estructuras de mediana y baja altura. En la revisión se puntualizaron las causas más comunes que generan los daños, principalmente en edificios con cubiertas de cristal. Se encontró que:

- El efecto aleatorio del viento sobre las estructuras, provoca una distribución incierta de los daños en los elementos no estructurales de las fachadas, sin importar el tipo de recubrimientos que se esté analizando.
- Es necesario estudiar en forma particular los diferentes elementos no estructurales, considerando el tipo de material, así como las conexiones con las que se sujeta sobre la estructura principal, en combinación con los efectos del viento y la presencia de los proyectiles con respecto a las velocidades del viento.

Referencias

- Bungale ST, (2005), Wind and Earthquake Resistant Buildings Structural Analysis and Design, *John A. Martin and Associates, Inc.*, Los Angeles, California.
- CENAPRED, (2005), Características e impacto socioeconómico de los huracanes “Stan” y “Wilma” en la República Mexicana en el 2005, *Centro Nacional de Prevención de Desastres, Comisión económica para américa latina y el caribe de las naciones unidas, (CEPAL)*.
- Flaga A, Bosak G, Flaga L, Kłaput R, Matys P, (2011), Wind tunnel tests of wind action on facade facings of Sky Tower in Wrocław.
- Federal Emergency Management Agency, FEMA P-938, (2013) Hurricane Isaac in Louisiana: Mitigation Assessment Team Report, *Building Performance Observations, Recommendations, and Technical Guidance*, <https://www.fema.gov/media-library/assets/documents/31386>.
- Federal Emergency Management Agency, FEMA P-757, (2009) Hurricane Ike in Texas and Louisiana: Mitigation Assessment Team Report, *Building Performance Observations, Recommendations, and Technical Guidance*, <https://www.fema.gov/media-library/assets/documents/15498?id=3577>. 2009.
- Filliben JJ, Gurley K, Pinelli J-P, Simiu E, (2002), Fragility curves, damage matrices, and wind induced loss estimation, *Third International Conference on Computer Simulation in Risk Analysis and Hazard Mitigation*, June 19-21, Sintra, Portugal, 119-126.
- Huracán Wilma (2005) en la ciudad de Cancún, fotografía recuperada de <https://i.pinimg.com/736x/57/a1/b0/57a1b0a5adbdfd7382240ef4e8801b7d.jpg>.
- Huracán Wilma (2005) en la ciudad de Florida, fotografía recuperada de <http://icons.wunderground.com/data/wximagenew/m/MikeTheiss/276.jpg>.
- Lee KH, Rosowsky DV, (2005), Fragility assessment for roof sheathing failure in high wind regions. *Engineering Structures* 27(6): 857-868.
- Murià-Vila D et al. (2015), El huracán Odile y sus efectos en la infraestructura del sur de la península de Baja California, *Serie Investigación y desarrollo* 696:303 (México, D. F), ISBN 978-607-02-7411-4.
- Murià-Vila D, Jaimes MA, Pozos-Estrada A, López A, Rei-noso E, Chávez MM, Peña F, Sánchez-Sesma J, López O (2018) Effects of hurricane Odile on the infrastructure of Baja California Sur, Mexico. *Nat Hazards* 91(3): 963–981.

- Mosqueda G y Porter KA, (2005), Engineering and Organizational Issues Before, During and After Hurricane Katrina: Damage to Engineered Buildings and Lifelines from Wind, Storm Surge and Debris in the Wake of Hurricane Katrina, Volume 4: Buildings, 8/13/07 (PB2008-111194, A-05, CD-A00).
- Pinelli J-P, Simiu E, Gurley K, Subramanian C, Zhang L, Cope A, James J; Filliben J-J, Hamid S, (2004), Hurricane Damage Prediction Model for Residential Structures, *Journal of Structural Engineering*, 130(11): 12-19.
- Stewart MG, Rosowsky DV, Huang Z, (2003), Hurricane risks and economic viability of strengthened construction, *Natural Hazards Review*, 4(1): 464-475.
- Vanmarcke E, Lin N, Yau S, (2014), Quantitative risk analysis of damage to structures during windstorms: some multi-scale and system-reliability effects, *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(10): 1311–1319.
- Vickery PJ, Skerlj PF, Lin J, Twisdale LA, Young MA, Lavelle FM, (2006), HAZUS Hurricane model methodology. II: Damage and loss estimation, *NHR* 7(2): 94–103.
- Unanwa C, McDonald J, Mehta K, Smith D (2000a), The development of wind damage bands for buildings, *Journal Wind Engineering*, Ind Arod 84: 119–149.

Capítulo 2

Simulación de la velocidad turbulenta del viento

2.1 Series en el tiempo

La implementación de las series en el tiempo para la simulación de eventos estacionarios y no estacionarios, se encuentra bien fundamentada por diferentes autores, entre los que podemos mencionar Pourahmadi (2001) y Derryberry (2014). Los modelos de simulación permiten reconstruir y/o predecir los eventos conocidos, con base en la programación de algoritmos representativos de los eventos, de los cuales se desea estimar las características del fenómeno en estudio. Para reproducir el fenómeno del viento turbulento, es recomendable la implementación de series temporales multivariadas, mediante el uso del modelo ARMA. Una de las características del modelo ARMA es que está compuesto de un proceso autorregresivo AR (p), que permite en un instante dado conocer los valores de la variable por medio de los valores anteriores. El valor de una variable en el tiempo depende de su valor en el periodo anterior más un componente aleatorio. Además de considerar un proceso aleatorio AR (1), el valor puede variar según la dependencia de los valores de p , que son los coeficientes de la expresión general (Arranz y Zamora, 2015).

$$y_t = c + \sum_{i=1}^p \varphi_i y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (2.1)$$

donde, y_t es el valor actual, ε_t , es un proceso de ruido blanco en el periodo t , φ_i ($i=1,2, \dots, p$) son los parámetros del modelo y c es una constante (Adhikari R y Agrawal R, 2013). Así para $p=1,2, \dots, n$, el proceso AR se muestra de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} AR(1) \quad y_t &= \varphi y_{t-1} + \varepsilon_t \\ AR(2) \quad y_t &= \varphi_1 y_{t-1} + \varphi_2 y_{t-2} + \varepsilon_t \end{aligned} \quad (2.2)$$

El segundo componente del modelo ARMA es un proceso de media móvil (MA), el cual está estructurado mediante la relación de la variable aleatoria que se está prediciendo y un conjunto de valores de ruido blanco. En caso de un único retardo, el proceso será MA (1), al considerar una combinación lineal el proceso será MA (q) (Arranz y Zamora, 2015).

$$y_t = u + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t \quad (2.3)$$

donde, u es el valor medio de la serie, θ_j ($j=1,2, \dots, q$) son los parámetros del modelo. Así, para $q=1, 2, \dots, n$, MA se representa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} MA(1) \quad y_t &= \varepsilon_t + \theta \varepsilon_{t-1} \\ MA(2) \quad y_t &= \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Una de las ventajas al implementar el modelo ARMA, es contar con un algoritmo que permite tener pocas variables, lo cual conlleva a utilizar un menor tiempo de procesamiento de los datos. El modelo ARMA (p, q) es un proceso que combina las propiedades de una memoria larga de los AR (p), con las propiedades de ruido débilmente autocorrelacionado como es MA (q), y que tiene suficiente flexibilidad y parsimonia, es decir, que se utiliza el menor número de parámetros en la solución de la ecuación (Adhikari y Agrawal, 2013). La expresión general se puede escribir de la manera siguiente:

$$y_t = c + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^p \varphi_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad (2.5)$$

Las funciones evaluadas son polinomios de grado p y q , respectivamente. Cuando $q=0$ se tiene un proceso autorregresivo puro, y cuando $p=0$, se tiene únicamente un proceso de media móvil. En resumen, una vez que son procesados los datos de inicio, se requiere calcular los primeros coeficientes (p y q) y una señal de ruido blanco.

2.2 Simulación del campo del viento turbulento

El viento turbulento se describe como un proceso estocástico estacionario, lo que indica que se tienen una sucesión de datos aleatorios ordenados en el tiempo, además de que sus parámetros estadísticos no varían en el tiempo. Para la representación de un fluido como lo es el viento turbulento, es posible utilizar diferentes metodologías, como por ejemplo la simulación de las velocidades en el túnel de viento, así como una simulación numérica del fluido. Samaras et al. (1985) propone una metodología para caracterizar y simular un proceso aleatorio estacionario Gaussiano multivariable con media cero, y desviación estándar unitaria. Li (1990), Kareem (2008) y Rossi (2004) realizan con base en el modelo ARMA, una comparación con diferentes herramientas de análisis, para conocer cuáles son los mejores parámetros, con los que se modela la señal del viento turbulento.

La aplicación de ARMA en la ingeniería civil ha sido llevada a la práctica por trabajos de investigación desarrollados por Li (1990) y Kareem (2008), en los que han aplicado la metodología para estudiar diversas estructuras civiles. Los trabajos elaborados por Lojowska (2009) utilizan la simulación numérica considerando diferentes tipos de terreno. Con el fin de tener una mejor representación de las velocidades de viento, Ling et al. (2011) realizan simulaciones numéricas del viento para evaluar el comportamiento estructural de aerogeneradores.

2.3 Velocidad media

La velocidad media del viento ($\bar{V}(z)$) se evalúa a 10 m de altura, en un tipo de terreno dado y considerado los obstáculos topográficos. En la práctica profesional en México, es común adoptar la expresión del MDOC-DV (2008) para caracterizar la velocidad media del viento de acuerdo con:

$$\bar{V}(z) = F_T F_{rz} V_R \quad (2.6)$$

donde, F_T es el factor de topografía, F_{rz} es el factor de exposición con la altura y V_R es la velocidad regional. Estos parámetros son utilizados para el análisis y diseño de los elementos estructurales, así como de los no estructurales. Para el desarrollo de este trabajo se combina un modelo numérico (ARMA), y la metodología que se aplica en las empresas que diseñan estructuras civiles en México (i.e., MDOC-DV, 2008).

2.4 Velocidad del viento turbulento

Uno de los requisitos para implementar el algoritmo ARMA es utilizar una función de densidad espectral; el algoritmo toma en cuenta la correlación de las velocidades a lo largo y ancho de la estructura.

La ecuación (2.7) representa un modelo de Autoregresión y Media Móvil, tal como lo propone Samaras et al. (1985), y se utiliza para la simulación del viento turbulento:

$$\{v_n(y,t)\} = \sum_{i=1}^p [\alpha_i] \{v_n(y,t-i\Delta t)\} + \sum_{i=0}^q [\beta_i] \{\varepsilon_i\} \quad (2.7)$$

donde $\{v_n(y,t)\}$ es un vector normalizado de velocidades de viento turbulento para cualquier instante en el tiempo t . Cada valor de y corresponde a un punto en el espacio cartesiano en donde se requiere simular el proceso estocástico estacionario. El orden del proceso AR está definido por p , mientras que el orden del proceso MA se define por el parámetro q ; α_i y β_i , son $m \times m$ (m número de elementos en el espacio) coeficientes matriciales de autorregresión y media móvil, respectivamente, para el tiempo i y pasos anteriores a t ; Δt , es el tamaño del intervalo de tiempo discreto en el que se genera la historia en el tiempo, ε_i , es el vector de ruido blanco. Para nuestro estudio se consideró el mismo valor de p y q para los procesos autorregresivo y de media móvil.

En el caso de que el vector de velocidades normalizadas tenga l componentes, la matriz de correlación cruzada estará compuesta por:

$$C_{K(t)} = \begin{bmatrix} P_{11}(t) & P_{12}(t) & \cdots & P_{1l}(t) \\ P_{21}(t) & P_{22}(t) & \cdots & P_{2l}(t) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{l1}(t) & P_{l2}(t) & \cdots & P_{ll}(t) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

donde $P_{ij}(t)$ es la correlación cruzada entre la i -ésima y j -ésima posición en el espacio en el tiempo respectivamente, para $i, j=1,2,3,\dots,l$.

Si (x_i, y_i, z_i) indica la i -ésima posición en el espacio, luego se asume que $P_{ij}(t)$ se calcula con:

$$P_{ij}(t) = \int_0^\infty \sqrt{S_i(n)S_j(n)} * coh(y_i, z_i, y_j, z_j, n) * \cos(2\pi nt) dn \quad (2.9)$$

donde $S_i(n)$ es la función de densidad de potencia espectral (FDPE), en la posición i y $coh(y_i, x_i, y_i, z_i, n)$ es la coherencia en la frecuencia n . Las correlaciones $P_{ij}(t)$ se obtienen por integración numérica, con la aplicación de la regla de Simpson.

El espectro de Kaimal et al., (1972) se utiliza para caracterizar el comportamiento de las fluctuaciones del viento y está dado por:

$$\frac{nS_i(n)}{u_*^2} = \frac{105f}{(1+33f)^{5/3}} \quad (2.10)$$

donde u_*^2 es la velocidad de fricción y la frecuencia reducida, f , se calcula de la siguiente forma:

$$f(n, z_i) = \frac{nz_i}{U(z_i)} \quad (2.11)$$

Debido a que la estructura es de grandes dimensiones, es necesario emplear la función de coherencia (Davenport, 1967), la cual cuantifica la correlación cruzada de componentes análogas de la turbulencia en diferentes puntos de la estructura. La correlación varía en

función de la distancia: a mayor distancia menor valor de la autocorrelación de las velocidades del viento en función de la altura. Entonces, se tiene:

$$coh(y_i, z_i, y_j, z_j, n) = \exp\left[-\hat{f}(y_i, z_i, y_j, z_j, n)\right] \quad (2.12)$$

$$\hat{f}(y_i, z_i, y_j, z_j, n) = \frac{n\left[C_z^2(z_i - z_j)^2 + C_y^2(y_i - y_j)\right]^{\frac{1}{2}}}{\frac{1}{2}\left[U(z_i) + U(z_j)\right]} \quad (2.13)$$

donde las constantes C_y y C_z describen los efectos de separación relativos en las direcciones y (lateral) y z (altura) respectivamente. La simulación del viento turbulento puede ser empleada para cualquier tipo de fachada.

La matriz de correlación cruzada para cada tiempo, se combina para formar la matriz de correlación C y se escribe como:

$$C = \begin{bmatrix} C_K^T(0) & C_K^T(\Delta t) & C_K^T(2\Delta t) & \cdots & C_K^T((P-1)\Delta t) \\ C_K(\Delta t) & C_K(0) & C_K(\Delta t) & \cdots & C_K((P-2)\Delta t) \\ C_K(2\Delta t) & C_K(2\Delta t) & C_K(0) & \cdots & C_K((P-3)\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_K((P-1)\Delta t) & C_K((P-2)\Delta t) & C_K((P-3)\Delta t) & \cdots & C_K(0) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

donde t toma valores de $\{\Delta t, 2\Delta t, \dots, p\Delta t\}$ y p es número de puntos en el tiempo.

El próximo paso es utilizar la matriz C para calcular los coeficientes matriciales (ecuación 2.7). Un conjunto de matrices, \tilde{A}_i se calculan primero para $i=1, \dots, p$, resolviendo la siguiente expresión:

$$\left[\tilde{A}_1 \quad \tilde{A}_2 \quad \cdots \quad \tilde{A}_p\right] = -\left[C_{YY}^T(\Delta t) \quad C_{YY}^T(2\Delta t) \quad \cdots \quad C_{YY}^T(p\Delta t)\right]C^{-1} \quad (2.15)$$

Para obtener la matriz triangular inferior, es necesario utilizar la descomposición de Cholesky, mediante la siguiente expresión.

$$B_0 B_0^T = \sum_{i=0}^{\infty} \tilde{A}_i C_K(i\Delta t) \quad (2.16)$$

donde B_0 es una matriz triangular inferior, con la que se construye la matriz D :

$$D = \begin{bmatrix} I & \cdots & 0 & -C_{\Psi_K}^T(0) & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & I & -C_{\Psi_K}^T((1-q)\Delta t) & \cdots & -C_{\Psi_K}^T(0) \\ -C_{\Psi_K}(0) & \cdots & -C_{\Psi_K}((1-q)\Delta t) & C_K(0) & \cdots & C_K^T((q-1)\Delta t) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & -C_{\Psi_K}(0) & -C_K((q-1)\Delta t) & \cdots & C_K(0) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

donde C_{Ψ_K} son matrices calculadas con la siguiente relación:

$$C_{\Psi_K}(0) = B_0 \quad (2.18)$$

$$C_{\Psi_K}(-k\Delta t) + \sum_{i=1}^k \left(\tilde{A}_i C_{\Psi_K}((i-k)\Delta t) \right) = 0$$

(2.18)

para $k=1,2,\dots,q$, para ningún valor de $C_{\Psi_K}=0$ para un intervalo positivo en el tiempo

$$\begin{bmatrix} B_1 & B_3 & \cdots & B_q & A_1 & A_2 & \cdots & A_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\Psi_K}(-\Delta t) & \cdots & C_{\Psi_K}(-q\Delta t) & C_K^T(\Delta t) & \cdots & -C_K^T(q\Delta t) \end{bmatrix} D^{-1} \quad (2.19)$$

se puede observar que del lado derecho de la ecuación (2.19) son conocidos. Una vez que los coeficientes AR y MA, son conocidos, las series en el tiempo pueden ser generadas con la ecuación (2.7).

La Figura 2.1a muestra esquemáticamente la distribución de las velocidades en cada ventana de una fachada, la Figura 2.1b representa una muestra típica de viento turbulento, y en la Figura 2.1c se muestra una comparación de la FDPE del registro simulado y la expresión propuesta por Kaimal et al., (1972), en donde se observa que el ajuste es adecuado.

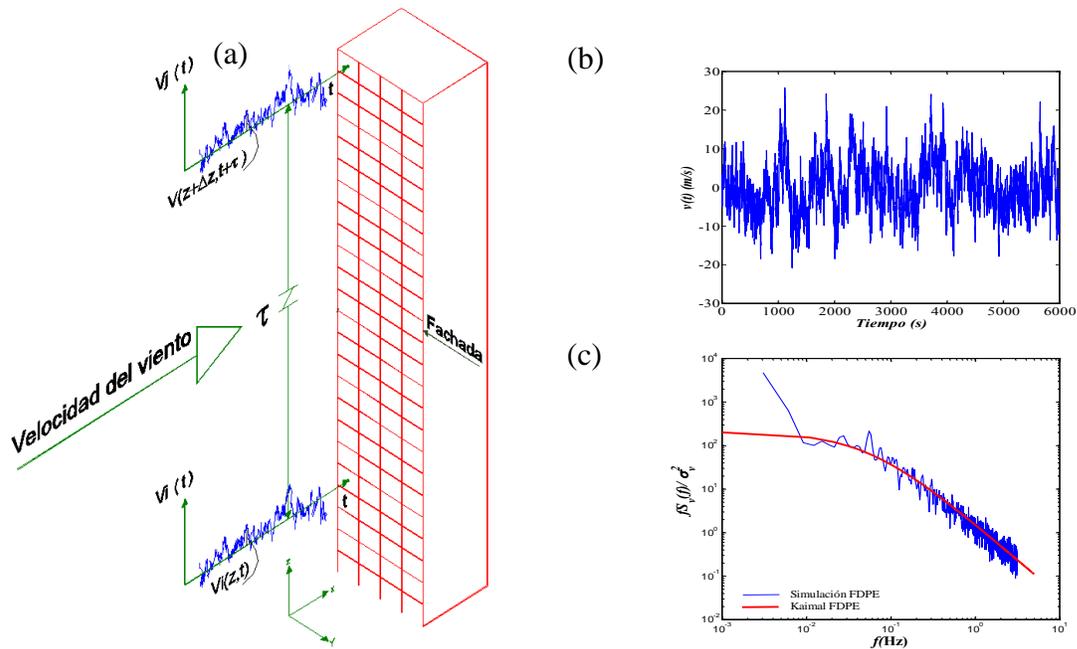


Figura 2.1 Análisis de las velocidades del viento, (a) velocidades en cada ventana, (b) señal típica del viento, (c) Comparación de FDPE

2.5 Conclusiones

La simulación del viento turbulento se programó en el lenguaje MATLAB, con lo cual se desarrolló un algoritmo autorregresivo y de media móvil (ARMA), utilizando series en el tiempo. Este se combina con la FDPE de Kaimal et al., (1972) y la función de coherencia de Davenport (1967). Adicionalmente, se utiliza la velocidad media descrita en el MDOC-DV (2008) para calcular la velocidad del viento en cada una de las ventanas, y así para obtener finalmente convertir las velocidades del viento en presiones.

- La simulación numérica del viento es una herramienta práctica y con suficiente precisión, y se puede utilizar para suplir la falta de datos experimentales obtenidos en pruebas en túnel de viento o de registros de campo. Se debe considerar además que no existe información suficiente de anemómetros localizados en estructuras como la que se estudia en este trabajo.

- Si se considera la cantidad de simulaciones para cada elemento no estructural, la demanda computacional en el proceso de los datos es relativamente baja, por lo que se comprueba la aplicabilidad de la metodología propuesta.
- Con el uso de la función de coherencia se toma en cuenta la distancia entre cada punto de análisis, mientras sea mayor la distancia, menor será la correlación de las velocidades.

Referencias

- Adhikari R, Agrawal RK, (2013), An Introductory Study on Time Series Modeling and Forecasting, retrieved from <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1302/1302.6613.pdf>
- Arranz JM, Zamora MM, Análisis de autocorrelación, (s.f) Recuperado el 04/03/2015 <http://ciberconta.unizar.es>
- MDOC-DV (2008), Manual de diseño de obras civiles: Diseño por viento, México. Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Davenport AG, (1967), Gust Loading Factors. *Journal Structure Engineering*, 93(3), 11–34.
- Derryberry DR, (2014), Basic data analysis for time series with R, *Hoboken New Jersey: Wiley*, ch. 14.
- Kaimal JC, Wyngaard JC, Izumi Y, Coté OR (1972) Spectral characteristics of Surface-layer turbulence. *J Roy Met Soc* 98: 563-589.
- Kareem A, (2008), Numerical simulation of wind effects: a probabilistic perspective, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10-11): 1472–1497, 2008.
- Li Y, Kareem A, (1990), ARMA systems in wind engineering, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 5(2): 50-59.
- Ling LL, Hao JL, Ju PH, Shang CW, (2001), The use of wavelet theory an ARMA model in wind speed prediction” *1st International Conferece on Electric Power Equipment*
- Lojowska A, (2009), Wind speed modeling, PhD Thesis, *Delft University of Technology at Netherlands*.
- Pourahmadi M, (2001), “Foundations of time series analysis and prediction theory”, New York : J. Wiley, ch. 4.
- Rossi R, Lazzari M, Vitaliani R, (2004), Wind field simulation for structural engineering purposes, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 61: 738–763.
- Samaras E, Shinozuka M, Tsurui A, (1983), ARMA, representation of random process, *Journal of Engineering Mechanics*, 111(3): 449-461.

Capítulo 3

Evaluación probabilística del daño

3.1 Introducción

En la actualidad se han propuesto diversos procedimientos con el fin de estimar el daño debido a los efectos del sismo y viento. Entre los más comunes que podemos mencionar se encuentran los métodos basados en observaciones de campo, trabajos experimentales, opiniones de expertos y métodos analíticos. Las investigaciones para la estimación del daño han sido desarrolladas con la ayuda de programas especializados, ya sea comerciales o académicos, con los que ha sido posible inferir las fallas. Entre estas investigaciones destaca el trabajo elaborado por Abad et al. (2013), quienes estimaron el daño, comparando las respuestas de edificios de concreto reforzado, sujetos a una excitación sísmica mediante la distorsión de entrepiso. La estimación de los daños no estructurales debido al viento se realiza mediante un análisis probabilista desarrollado por Filliben (2002). Unanwa et al. (2000a y 2000b) utilizó el método Delphi, el cual se basa en la opinión de expertos empleando el método de media aritmética ponderada. Vickery et al. (2006) recabó información para validar el modelo de daño con los registros de empresas aseguradoras, así como las evaluaciones de las fallas debidas a los efectos de los huracanes. Las investigaciones antes mencionadas, requieren de datos suficientes para realizar una evaluación probabilística acertada.

3.2 Descripción del modelo analizado

La elaboración del modelo en estudio se realizó con base en las siguientes publicaciones: Mosqueda y Porter (2005), Pasch et al. (2006) y FEMA P-757 (2009), en donde se describen edificios de gran altura que en general muestran estructuras con elevados valores de relaciones de esbeltez, en donde las fachadas de cristal cubren de dos, a cuatro caras de la estructura principal. En ocasiones en la zona de barlovento, sotavento así como en las caras laterales se presenta una distribución simétrica de ventanas. La estructura que se analiza en el presente trabajo es similar a estas estructuras, en donde los elementos no estructurales

fueron dañados debido a la incidencia de diferentes eventos meteorológicos. Una descripción detallada tanto de los fallas, como de las diferentes geometrías se presenta en las Figuras 1.3, 1.4, 1.6, y 1.7. El modelo en estudio (Figura 3.1a) tiene una altura total de 96 m por 20 m de ancho. Representa una fachada con una altura de entrepiso de 4 m; la distancia entre los ejes A, B, C, y D es de 5 m. En cuanto a las dimensiones de la ventana (Figura 3.1b), se considera la misma longitud $b=2.28$ m (90") y el ancho (h) es variable (1.65 m, 1.77 m, 1.91 m, 2.03 m, 2.16 m). Los análisis son realizados para espesores de 1/4" y 3/8"; el material del vidrio es del tipo laminado, el cual es comúnmente empleado para resistir las presiones generadas por la velocidad del viento.

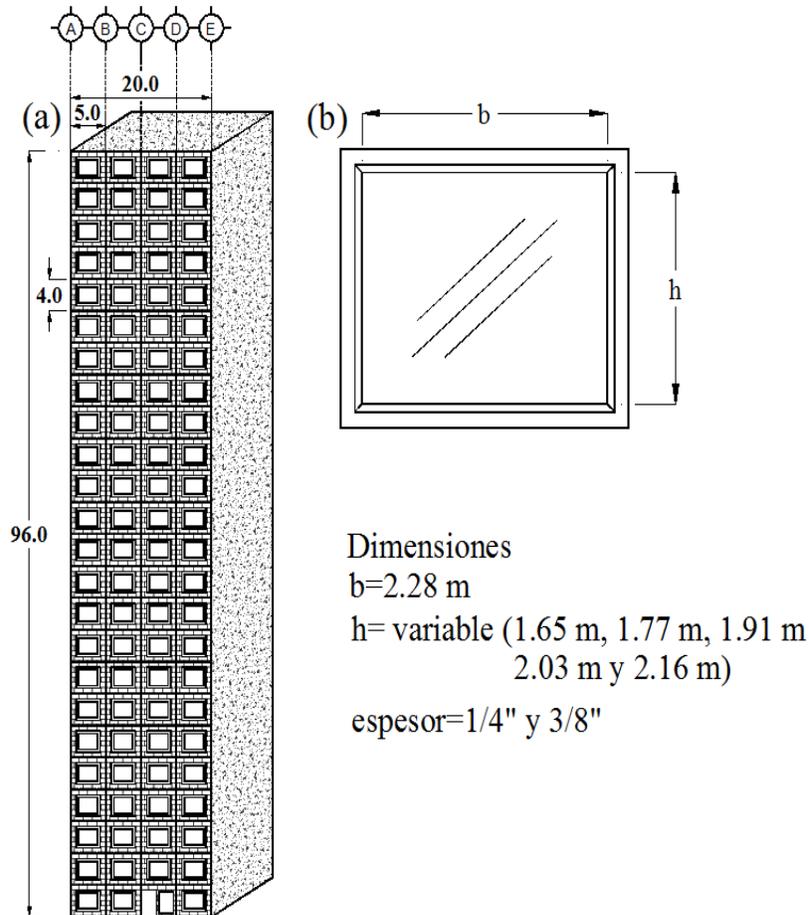


Figura 3.1 Modelos en estudio, a) fachada y b) modelo de ventana

3.3 Estimación del límite de falla

La estimación de las propiedades mecánicas de los elementos no estructurales se obtiene mediante pruebas de laboratorio. Tal como se mencionó, en el presente trabajo se utilizó una ventana de vidrio laminado (dos cristales adheridos mediante una película). Las ventanas pueden ser afectadas ya sea por las presiones que genera el viento, o por el eventual impacto de proyectiles. Masters et al., (2009) mostró la gran diversidad de proyectiles que se pueden generar durante un huracán (piedras, pedazos de madera, trozos de otros elementos no estructurales, etc.). Xihong et al. (2013) realizaron pruebas experimentales de impacto de proyectiles (polines de madera), en donde demostraron que el grueso de la película adherida a los cristales es fundamental para la resistencia y la penetración; Norville et al. (1993) realizó estudios para diferentes configuraciones de vidrios laminados (largo, ancho y espesor), con el fin de conocer las cargas máximas que producen la falla de cristales de diferentes dimensiones.

Para los fines de nuestra investigación, y debido a la escasa información disponible, se utilizaron las gráficas del New York City Building Code (2008) (Figura 3.2) para estimar la resistencia de los vidrios seleccionados. Las gráficas están clasificadas de acuerdo con los diferentes espesores, en función de la gran variedad de dimensiones que los diferentes proyectos requieren. Esta es una de las formas más comunes de obtener los espesores de los vidrios en la práctica profesional. Para el cálculo de la presión de diseño se utilizan las dimensiones de la ventana (largo-ancho). Se revisa que el valor en las gráficas sea mayor que la del análisis de los elementos no estructurales para comprobar que la ventana representa un diseño adecuado. En la elaboración de este trabajo se considera que el valor medio de la resistencia es igual a la presión que se obtiene de las tablas. Un ejemplo del cálculo de la presión media se muestra en la Figura 3.2a y 3.2b, para los espesores de 1/4" y 3/8", respectivamente. Como se puede observar, mientras las dimensiones del elemento no estructural se incrementan (longitud y el ancho), el de la presión presenta un decremento en su valor (la presión de diseño disminuye mientras se incrementa las dimensiones de la ventana).

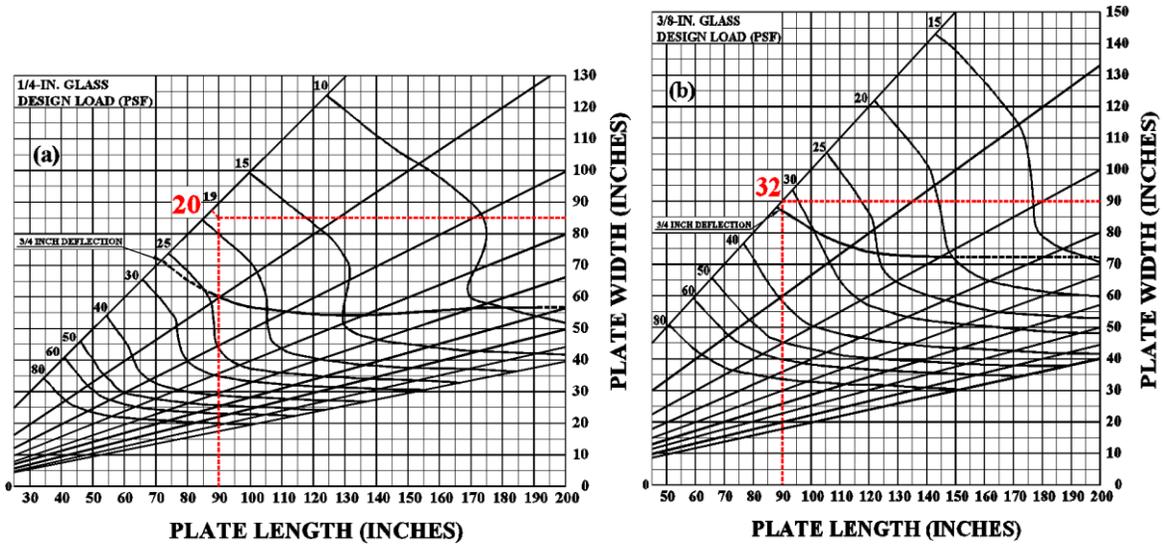


Figura 3.2 Ejemplo del cálculo de la presión de diseño (New York City Building Code, 2008)

3.4 Incertidumbre en la resistencia del material

Las pruebas de laboratorio han sido de gran apoyo para encontrar los valores de las propiedades mecánicas de los materiales (resistencia, módulo de elasticidad, etc.). La información obtenida mediante pruebas experimentales y el comportamiento real de los elementos no estructurales, no siempre es la misma, debido a que existe incertidumbre desde la fabricación de las ventans, hasta la forma en que se coloca. Norville y Minor (1985) realizaron pruebas destructivas de vidrios desgastados y nuevos, utilizando diferentes configuraciones (espesor, dimensiones y el tipo de vidrio). Entre los resultados se muestra que los valores del coeficiente de variación (COV) varían entre 0.16 y 0.30, con lo que se demuestra una incertidumbre en la resistencia del vidrio. Los trabajos elaborados por Norville et al., (1993) evidenciaron que existe una diferencia significativa entre las pruebas de laboratorio y los valores que se indican en normas internacionales, como la American Society for Testing and Materials (ASTM, 2009).

3.4.1 Comportamiento aleatorio del material

Una vez que conocemos el límite de falla de los cristales (Figura 3.2a y 3.2b) también es necesario tomar en cuenta otras incertidumbres del material. Existe una gran cantidad de incertidumbres que pueden hacer variar las propiedades mecánicas del material. Para evaluar estas incertidumbres, se utilizan técnicas de Monte-Carlo, que permiten simular la incertidumbre del material. Existen diferentes investigaciones que utilizan dicha técnica, entre las que podemos mencionar Tolentino y Ruiz (2013), quienes utilizaron técnicas de Monte-Carlo para simular el tamaño medio de grietas en plataformas marinas en diferentes puntos de la estructura.

3.5 Estimación del daño

A continuación se indican los pasos a seguir para la evaluación del daño, con base en la simulación de las presiones debidas al viento (Figura 3.3), considerando la incertidumbre de la resistencia del material. El tipo de daño que se considera, es todo aquel que genere una reparación, y como consecuencia represente un costo económico. La secuencia es la siguiente:

- a) Selección del tipo de vidrio (laminado, templado, recocido, etc.) que se desea utilizar.
- b) Estimación del estado límite de falla, de acuerdo con la presión de diseño y con base en las dimensiones del elemento no estructural (Figura 3.2).
- c) Simulación de la incertidumbre en la resistencia mediante técnicas de Monte-Carlo, a partir del límite de falla.
- d) Comparación de la resistencia aleatoria y los valores máximos de la simulación de las presiones de viento.
- e) Cuantificación del número de fallas para diferentes velocidades (MDOC-DV, 2008).
- f) Cálculo del daño normalizado r_f , (se define como la relación del número de ventanas rotas entre el número total de ventanas).

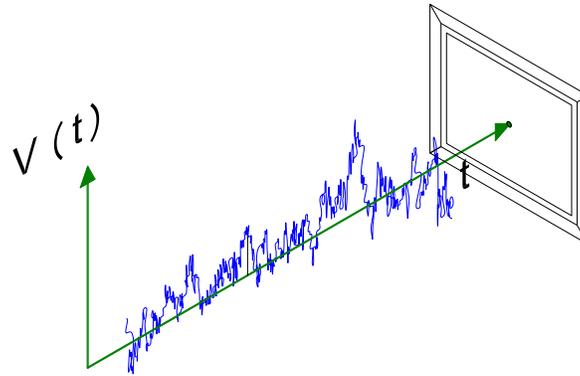
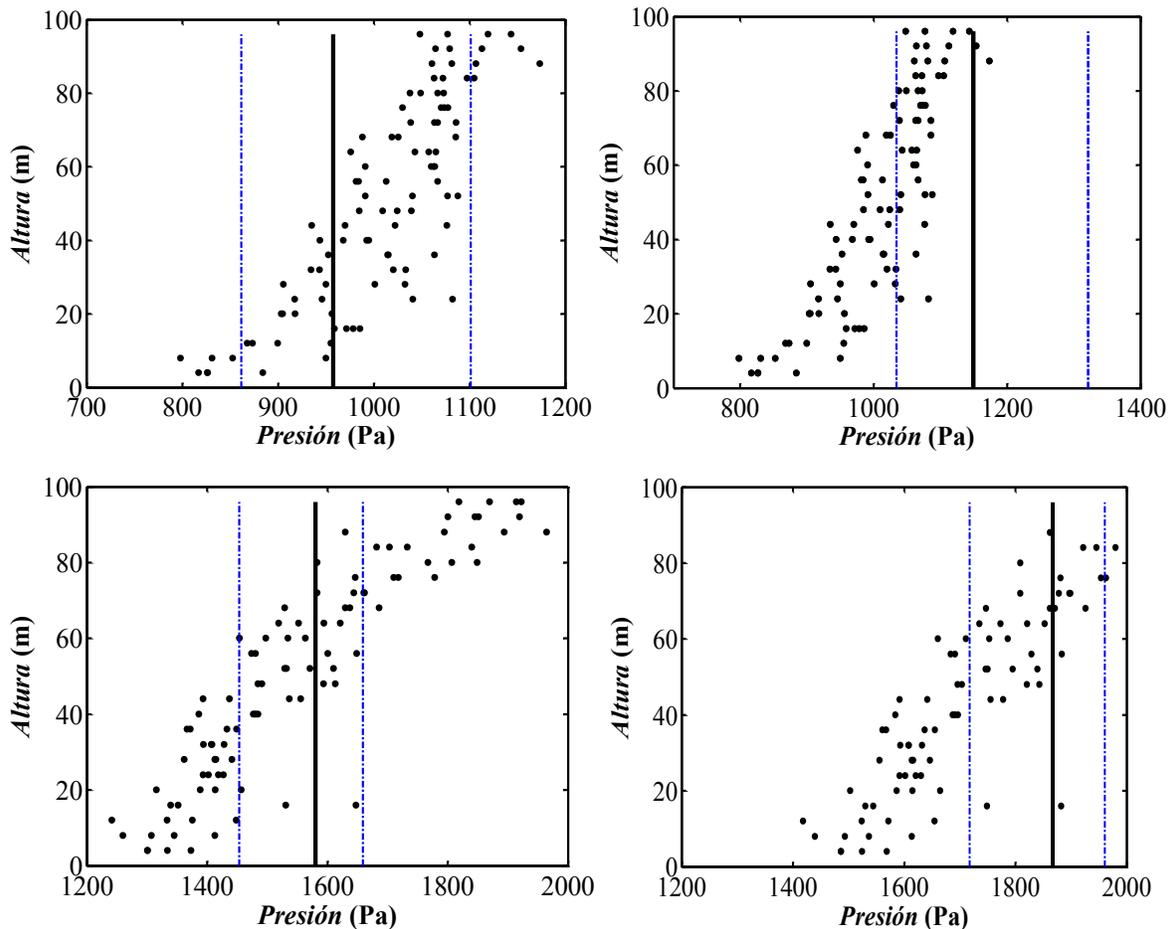


Figura 3.3 Simulación de las velocidades del viento

En la Figura 3.4 se muestra en el eje x las presiones, en el eje y la altura de la estructura. Para la simulación de la velocidad considerando diferentes dimensiones de las ventanas, en las Figuras 3.4a (2.28 m x 2.16 m, $e=1/4''$) y 3.4b (2.28m x 1.77 m, $e=3/8''$) se utiliza una velocidad de 180 km/h, y en las Figuras 3.4c (2.28 m x 2.16 m, $e=1/4''$) y 3.4d (2.28m x 1.77 m, $e=3/8''$) una velocidad de 230 km/h. La Figura 3.4a representa el análisis para una sola simulación de las velocidades, considerando que las ventanas tienen las siguientes dimensiones 2.28 m x 2.16 m. Se realiza la simulación de las velocidades del viento, para cada elemento no estructural como se muestra en la Figura 3.3. Se compara el límite de falla correspondiente de los espesores de vidrio $1/4''$ (Figura 3.4a y 3.4b) y $3/8''$ (Figura 3.4c y 3.4d). La presión de cada ventana se representa con los puntos para diferentes alturas. En la parte inferior se registran los valores mínimos de la presión, los cuales se incrementan con la altura. Se comparan la presión debida a las velocidades del viento simuladas, para cada ventana, como se muestra en la Figura 3.4. El parámetro que representa la incertidumbre del material con base en la simulación de Monte-Carlo, se muestra con línea discontinua azul. La línea negra continua representa la resistencia promedio de las ventanas sin considerar la incertidumbre del material (Figura 3.2a y 3.2b). La simulación del límite de falla puede presentarse en un intervalo de presiones, ya sea a la derecha o a la izquierda de la presión media. Por lo que en ocasiones la resistencia puede ser menor o mayor que el promedio. El criterio para considerar la falla de elemento se establece en función de que se exceda el valor del límite de falla. El criterio es válido cuando se evalúa el caso en el que no se presente incertidumbre en el material o cuando exista la simulación de la resistencia. Se puede observar la forma aleatoria en que se presentan las presiones, aún y cuando la distancia para

niveles contiguos sea relativamente mínima. Al tratar de comparar las presiones entre los niveles superiores (piso 24), con respecto a los niveles inferiores (piso 1 y 2), tampoco existe semejanza. Para los análisis se realizan 100 simulaciones para diferentes velocidades, en las que la distribución de los elementos que fallan se distribuye en forma aleatoria.



**Figura 3.4 Comparación entre las presiones y el límite de falla,
(a) y (b) vel. 180 km/h, (c) y (d) vel. 230 km/h**

Otra forma de observar el daño aleatorio de la simulación numérica y la incertidumbre en el material se muestra en la Figura 3.5. Se muestran los eventuales daños para cada franja vertical de ventanas (las marcas representan una ventana rota), de acuerdo con el criterio del límite de falla. El patrón de daños no sigue una tendencia, por lo que se pueden presentar tantas configuraciones como simulaciones numéricas se realicen. La distribución de los

daños en la Figura 3.5 es similar a los que se observan debido a los eventos meteorológicos que se muestra en las Figuras 1.3-1.7.

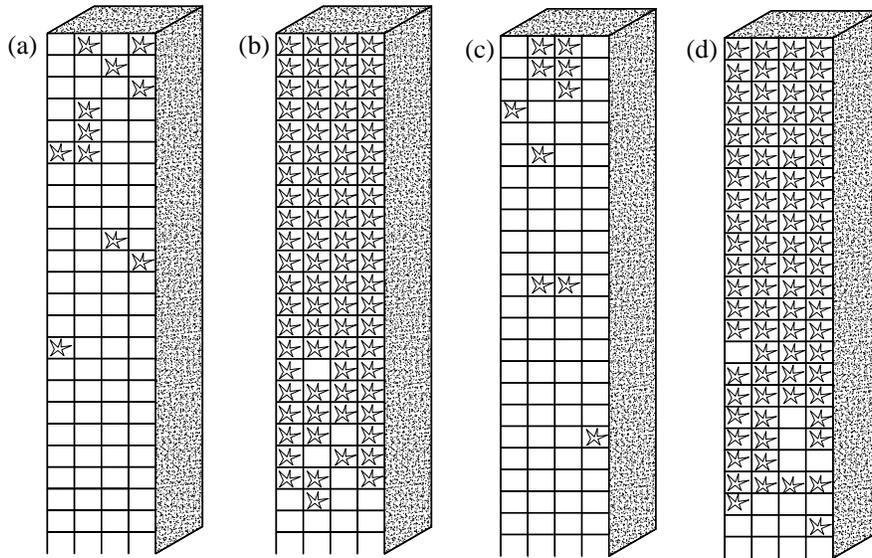


Figura 3.5 Matriz de daños en ventanas, (a), (b), (c) y (d) distribución de los daños para diferentes velocidades

3.6 Papel de probabilidad

Una vez que se conoce la relación del daño (r_f), el siguiente paso es conocer la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los datos. Maio y Tsionis (2015), Nateghi-A y Shahsavari (2004) elaboraron curvas de fragilidad para edificios y puentes, respectivamente, con la distribución lognormal. Gavanski y Kopp (2011) desarrollaron pruebas en túnel de viento con vidrios a escala natural. Los resultados de las pruebas fueron comparados en papel de probabilidad, encontrándose que las distribuciones que mejor ajustaron fueron la lognormal y la de Weibull.

En el presente trabajo también se busca encontrar la distribución de probabilidad que mejor ajusta a los resultados del número de daños para cada simulación. Con base en los resultados de diferentes publicaciones (Lamela et al. 2014, Pisano y Royer 2015, Badalassi et al. 2014 y Gavansky Kopp 2015) las cuales abordan temas semejantes a los que aquí se presentan, se

comparan las distribuciones lognormal y Weibull. Los papeles de probabilidad se trazan para diferentes velocidades, evaluados de acuerdo a las dimensiones del vidrio que se está estudiando. También se realiza la comparación de las distribuciones con diferentes coeficientes de variación (COV, 0%, 10%, 15%, 20%).

En la Figura 3.6 se presentan los resultados del papel de probabilidad, en el eje de las x se muestra el daño normalizado (r_f) y en el eje de las y la probabilidad. Las gráficas (Figura 3.6) caracterizan el daño para una velocidad de 185 km/h, espesor de $e=1/4''$ y con dimensiones de ventana de 2.29 m x 4.94 m. Se utilizan cuatro coeficientes de variación COV 0%, 10%, 15% y 20%. Se observa que para las condiciones en que no existe incertidumbre (Figura 3.6a y 3.6b) la distribución que mejor ajusta a los resultados es la distribución de Weibull. A la misma conclusión se llega si comparamos las Figuras 3.6c y 3.6d con COV=10%. Un criterio diferente se puede presentar al revisar los datos en las Figura 3.6e y 3.6f, donde es la distribución lognormal la que mejor se ajusta. Para el COV=20%, que se muestra en la Figura 3.6g y 3.6h no existe una diferencia notable para seleccionar una u otra distribución.

En cuanto a las gráficas de las Figura 3.7a y 3.7b, a diferencia de las gráficas de la Figura 3.6a y 3.6b, la distribución que mejor se ajusta a los datos es la distribución lognormal. En el resto de las gráficas se presenta la disyuntiva, entre seleccionar cualquiera de las dos. El hecho de no tener la certeza de conocer la mejor opción entre las distribuciones, implica utilizar otro método de selección. Existen diferentes métodos para determinar la mejor distribución que ajusta a los datos. En el presente trabajo se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov (Benjamin y Cornell, 1981), así como el error cuadrático medio.

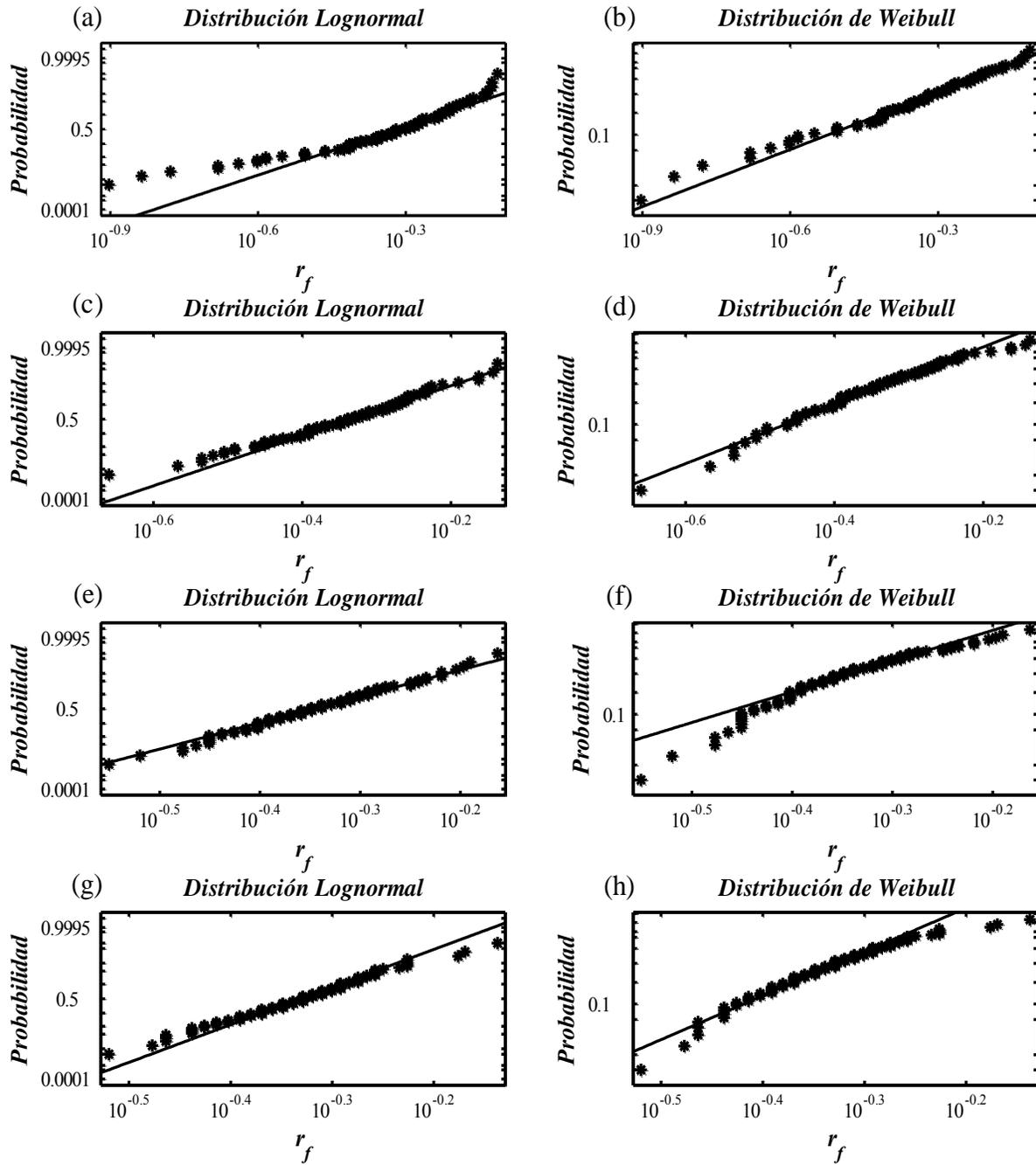


Figura 3.6 Papel de probabilidad vel. 185 km/h, $e=1/4''$, 2.29 m x 2.15 m, (a y b) COV=0, (c y d) COV=10%, (e y f) COV=15% y (g y h) COV=20%

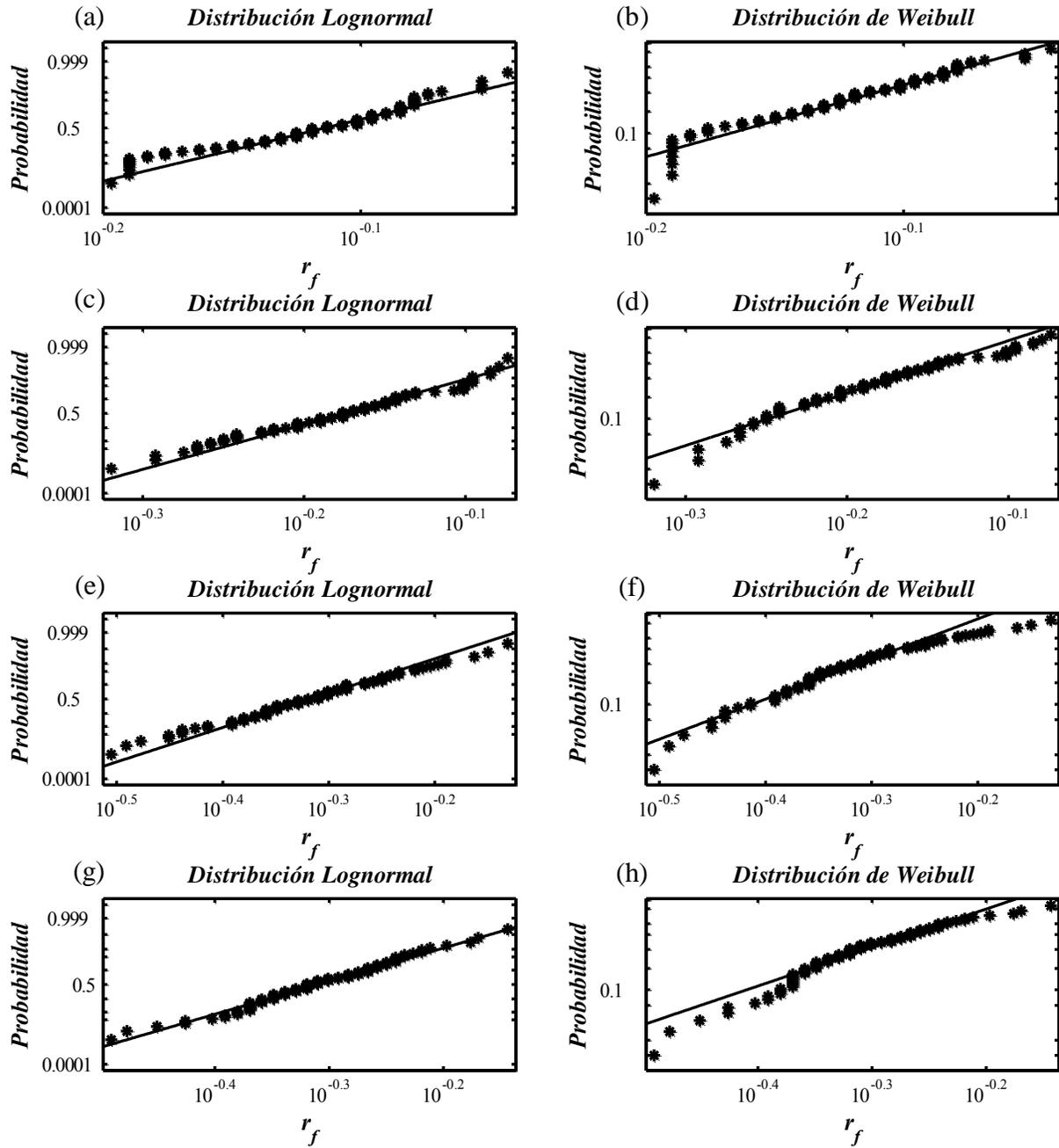


Figura 3.7 Papel de probabilidad vel. 240 km/h, $e=3/8''$, 2.29 m x 1.77 m, (a y b) COV=0, (c y d) COV=10%, (e y f) COV=15% y (g y h) COV=20%

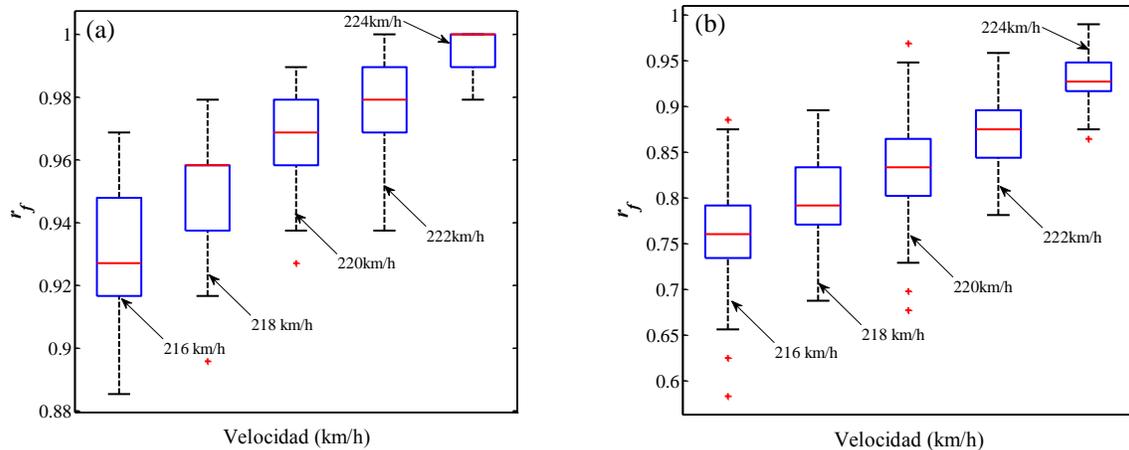


Figura 3.8 Comparación del daño para diferentes condiciones vel. 216 km/h, 218 km/h, 220km/h, 222 km/h y 224 km/h, (a) COV=0, (b) COV=20%

En la Figura 3.8 se muestran los diagramas de caja para diferentes valores de la simulación de los daños (espesor $3/8''$). En el eje de las x se muestran las velocidades, y en el eje y el porcentaje de daños (r_f). Debido a que la longitud de la caja indica el grado de concentración del 50% central de las observaciones, se observa en la Figura 3.8a una mayor concentración, que disminuye conforme el COV se incrementa. Los valores atípicos, definidos como valores que se encuentra distante del resto de los datos (+) están distribuidos en forma aleatoria. El tamaño de todas las cajas es diferente para los diferentes COV; la posición de la mediana (línea roja en cada diagrama de caja), se encuentra en la mayoría de los casos con sesgo negativo o positivo (arriba y abajo).

3.7 Conclusiones

Para conocer la distribución de probabilidad que mejor ajusta al número de daños, se realizó un estudio probabilístico de las presiones que genera el viento, y la incertidumbre en la resistencia del material.

- Debido a que no existen registros de los daños que se presentan en el tipo de fachadas de interés para este trabajo, no es posible comparar con datos reales; sin embargo, el tipo de daños que se presentan debido a la simulación (Figura 3.5) es muy parecido a

los que se muestran en estructuras reales (Figuras 1.3-1.8), por lo que se considera que se tiene una aproximación aceptable.

- No es suficiente la comparación entre los papeles de probabilidad de las distribuciones lognormal y Weibull para seleccionar la que mejor se ajusta a los datos. Es necesario utilizar otros métodos de contraste, como son la prueba de Kolmogorov-Smirnov o el error cuadrático medio.

Referencias

- Abad J, Ulrich T, Réveillère A, Gehl P, (2013), Development of damage state-dependent fragility functions for a MDOF structure through dynamic analyses with successive un-scaled time histories, Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics, (VEESD 2013), 28-30 August 2013, Vienna, Austria Paper No. 155.
- ASTM E1886 (2009), Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, Doors, and Storm Shutters Impacted by Missile(s) and Exposed to Cyclic Pressure Differentials.
- Badalassi M, Biolsi L, Royer G, Salvatore W (2014) Safety factors for the structural design of glass. *Constr Build Mater* 55: 114–127.
- Benjamin J, Cornell C, (1981), Probabilidad y Estadística en Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia: *McGraw-Hill Latinoamericana*, S.A.
- Federal Emergency Management Agency, FEMA P-757, (2009) Hurricane Ike in Texas and Louisiana: Mitigation Assessment Team Report, Building Performance Observations, Recommendations, and Technical Guidance, <https://www.fema.gov/media-library/assets/documents/15498oid=3577>. 2009
- Filliben J, Gurley K, Pinelli JP, Simiu E, (2002) Fragility curves, damage matrices, and wind induced loss estimation, in Proceedings of the third *International Conference on Computer Simulation in Risk Analysis and Hazard Mitigation*, 119-126.
- Masters, F J, Gurley K R, Shah N, Fernandez G, The vulnerability of residential window glass to lightweight windborne debris, *Engineering Structures*, 32: 911-921
- MDOC-DV (2008), Manual de diseño de obras civiles: Diseño por viento, México. Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Gavanski E, Kopp GA (2011), Glass breakage tests under fluctuating wind loads, *Journal Architectural Engineering*, 17(1): 34–41.
- Lamela MJ, Ramos A, Fernández P, Fernández-Canteli A, Przybilla C, Huerta C, Pacios A (2014) Probabilistic characterization of glass under different type of testing. *Proc Mater Sci* 3:2111–2116
- Maio R, Tsionis G, (2015), Seismic fragility curves for the European building stock, JRC technical reports, European Commission, EUR 27635 EN, <https://ec.europa.eu/jrc>

- Mosqueda G, Porter K.A. (2005) Engineering and Organizational Issues Before, During and After Hurricane Katrina: Damage to Engineered Buildings and Lifelines from Wind, Storm Surge and Debris in the Wake of Hurricane Katrina, vol 4: Buildings, 8/13/07 (PB2008-111194, A-05, CD-A00).
- Nateghi FA, Shahsavari VL, (2004), Development of fragility and reliability curves for seismic evaluation of a major prestressed concrete bridge 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B., C. Canada, August 1-6, paper No. 1351.
- New York City Codes, Glass and Glazing (2008), chapter 24, pp. 541- 554, <http://www2.iccsafe.org/states/newyorkcity/Building/Building-Frameset.html>. [Accessed 10 January 2017].
- Norville HS, Minor JE, (1985), "Strength of weathered window glass" *Bul. Am. Ceramic Soc.*, 119(3): 891-901.
- Norville HS, Bove PM, Sheridan DL, Lawrence SL, (1993), "Strength of new heat treated window glass lites and laminated glass unit", *Journal of Structural Engineering*, 119(3): 891-901
- Vickery PJ, Skerlj PF, Lin J, Twisdale LA, Young MA, Lavelle FM, (2006), HAZUS Hurricane model methodology. II: Damage and loss estimation, *Natural Hazards Review*, 7(2): 94-103.
- Pasch RJ, Blake ES, Cobb III HD, Roberts DP, (2006), Tropical Cyclone Report, Hurricane Wilma, *NOAA/NWS/Tropical Prediction Center/National Hurricane Center, Miami, FL*, http://www.nhc.noaa.gov/pdf/TCR-AL252005_Wilma.pdf.
- Pisano G, Royer G (2015) The statistical interpretation of the strength of float glass for structural applications. *Constr Build Mater* 98: 741–756
- Tolentino D, Ruiz S, (2013), Time Intervals for Maintenance of Offshore Structures Based on Multiobjective Optimization, *Mathematical Problems in Engineering*, vol 2013, Article ID 125856, 15 pages.
- Unanwa C, McDonald J, Mehta K, Smith D, (2000a), "The development of wind damage bands for buildings", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 84: 119-149.
- Unanwa C, McDonald J, (2000b), Building wind damage prediction and mitigation using damage bands, *Natural Hazards Review*, 1(4) 197-203.

Xihong Z, Hong H, Guowei M, (2013), Laboratory test and numerical simulation of laminated glass window vulnerability to debris impact, *International Journal of Impact Engineering*, (55): 49-62.

Capítulo 4

Curvas de fragilidad

4.1 Introducción

Las curvas de fragilidad proveen al ingeniero información probabilística necesaria para conocer la probabilidad de excedencia de un cierto nivel de daño, previamente establecido, ante una excitación. La aplicación de las curvas de fragilidad se ha realizado en diferentes campos de la ingeniería civil. Hedayat y Yalaciner (2010) utilizaron curvas de fragilidad para evaluar la respuesta estructural de edificios de concreto reforzado, mediante dos métodos; el primero con base en un análisis elástico y el segundo con base en un análisis estático no lineal (pushover). Además emplean las normas y procedimientos indicados por la Federal Emergency Management Agency (FEMA). Benerjee y Shinozuka (2011) realizaron un estudio para elaborar curvas de fragilidad para puentes, a los cuales se les realizan análisis sísmicos considerando los efectos que se pueden presentar debido a la incidencia del sismo en diferentes direcciones de análisis. Mansouri et al. (2017) desarrollaron curvas de fragilidad para edificios con base aislada, utilizando un análisis dinámico incremental; con base en las curvas de fragilidad demuestran que se reduce la probabilidad de falla para los estados de daño ocupación inmediata y seguridad lateral. Las curvas de fragilidad se pueden aplicar prácticamente a cualquier tipo de estructura. Un ejemplo común es en la evaluación de la vulnerabilidad en puentes de una región, como la descrita por Tavares et al. (2012), quien realizó una serie de estudios en puentes de la provincia de Quebec, Canadá. En donde concluyen que los puentes de concreto son más vulnerables que los puentes de acero, y mediante el uso de las curvas de fragilidad, priorizan el eventual refuerzo en caso de ser necesario, o la eventual inspección después de los eventos sísmicos. También se pueden elaborar curvas para un solo tipo de estructuración como lo pueden ser las vigas tipo cajón para puentes de uno o varios claros. Ramanathan et al. (2015) presentan un análisis de fragilidad para puentes en California, considerando tres diferentes épocas de construcción. Los puentes son evaluados mediante análisis no lineales y análisis no lineales tiempo historia; las curvas de fragilidad se utilizan para mejorar el comportamiento de puentes construidos

en la época actual. En cuanto a la aplicación de las curvas de fragilidad en fachadas se han obtenido funciones de fragilidad para estructuras prefabricadas, considerando la aceleración pico del terreno, en donde la vulnerabilidad de los elementos no estructurales es mayor en estructuras industriales prefabricadas, (Babic[˘] et al., 2016). Otro tipo de evaluación que realizaron con base en los efectos del viento, los cuales pueden ser generados por tornados, huracanes, o vientos estacionales son: Masoomi et al., (2015) evaluaron el daño provocado por un tornado en una escuela construida a base de mampostería, y obtienen parámetros estándar de las mismas características de la edificación, para ser aplicadas para otras estructuras en los Estados Unidos. Existen tres documentos fundamentales en los que se evalúan la falla en los elementos no estructurales; Unanwa et al. (2000a y 2000b), con las llamadas bandas de daño, en donde evalúan el daño probable de acuerdo con un intervalo superior e inferior; Vickery et al. (2006) genera un modelo de daño utilizado en HAZUS-MH (Hurricane Model MH) y describe el procedimiento utilizado para estimar el daño, así como la evaluación de las pérdidas.

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de flujo para obtener de manera general las curvas de fragilidad. El esquema es desarrollado con base en la metodología que aplican diferentes autores para la elaboración de las curvas de fragilidad, para diferentes estructuras, (Mansouri et al., 2017, y Ramanathan et al. 2015). La secuencia descrita se puede aplicar a diferentes tipos de geometrías, incluyendo la diversidad de elementos de recubrimiento que se pueden presentar. Únicamente es necesario identificar en forma adecuada el tipo de falla que se desea estudiar, así como el límite que permita estimar la relación de daños.

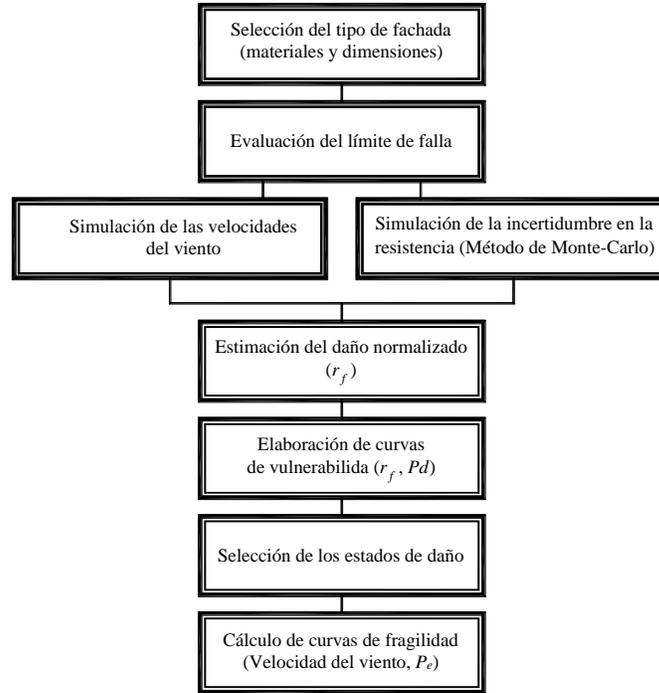


Figura 4.1 Diagrama de flujo para la elaboración de curvas de fragilidad

4.2 Metodología propuesta para obtener curvas de fragilidad en fachadas de cristal

A continuación se presenta la metodología para elaborar las curvas de fragilidad para ventanas. Se debe señalar que los pasos del 1-5 están descritos en los capítulos 2 y 3, por lo que la explicación se continuará a partir del paso 6.

1. Selección del modelo para el estudio y definición de las condiciones generales (localización, tipo de terreno, tipo de fachada, espesor y dimensiones de fachada).
2. Simulación de la velocidad del viento y presión con el modelo ARMA.
3. Estimación del límite de falla e incertidumbre en la resistencia.
4. Simulación de la incertidumbre en la resistencia mediante Técnicas de Monte Carlo.
5. Comparación de las presiones debidas a la simulación del viento contra la simulación de la resistencia de las ventanas.
6. Definición de los estados de daño.
7. Elaboración de las curvas de vulnerabilidad.
8. Selección de la distribución de probabilidad que mejor ajusta a los datos.
9. Elaboración de curvas de fragilidad.
10. Ajuste por medio del método de Hong y Lind (1996).

4.3 Estados de daño

Para definir las curvas de fragilidad es necesario utilizar diferentes estados de daño, los cuales representan niveles de diseño o servicio que han sido excedidos. Estos estados son definidos a partir de un parámetro previamente establecido, tal como la aceleración del terreno, velocidad del viento, etc. Benerjee y Shinozuka (2011) define tres estados de daño (menor, moderado y mayor), en función de la aceleración máxima del terreno, los cuales utiliza para evaluar el grado de afectación en puentes de concreto. En el presente trabajo, fue necesario implementar una descripción de los estados de daño de acuerdo al elemento no estructural en estudio (ventanas). El criterio que se utilizó es semejante al propuesto por Vann and McDonal (1978) publicado en Multi-hazard Loss Estimation Methodology (HAZUS MH-MR3, 2003), en donde describe ciertos porcentajes del total de ventanas rotas, para casas de madera. Los límites de daño se ajustan al tipo de modelo que se está evaluando. La descripción de los estados de daño se presenta en la Tabla 4.1, en la que se definen cuatro estados de daño con diferentes porcentajes, así como la descripción para los cuatro niveles de daño. Los porcentajes indicados en la tabla mencionada se utilizan para obtener las curvas de fragilidad, a partir de las curvas de vulnerabilidad. El porcentaje de los estados de daños que se muestran en la Tabla 4.1, se incrementa con base en el número de elementos que fallan o que dejan de operar en forma eficiente. En el caso particular de las ventanas, cabe señalar que al generarse un gasto de reparación, se puede considerar que ocurrió una falla en el elemento no estructural.

Tabla 4.1 Estados de daño

Estados de daño	%	Descripción del daño
I	1	Daño menor - Sin daño, daños menores en ventanas.
II	25	Daño moderado – Algunas ventanas rotas, pocos daños en cancelería, sin pérdida de contenidos.
III	50	Daño severo – Varias ventanas rotas, cancelería afectada, pérdida de contenidos.
IV	75	Pérdida total- En todos los lugares en que se presenta el daño existe pérdida de contenidos.

4.4 Curvas de vulnerabilidad

Para la elaboración de las curvas de vulnerabilidad es necesario conocer la distribución que mejor ajusta a los datos. En la sección 3.6 se realizó la comparación entre dos distribuciones de probabilidad (lognormal y Weibull), mediante el papel de probabilidad para diferentes tipos de ventanas. El resultado de dicha comparación indica que existe incertidumbre en la selección de distribución a la que mejor ajustan los datos. Se aplica la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov- Smirnov (K-S) con la siguiente expresión (Benjamin y Cornell, 1981).

$$\left| F_n(x) - F_0(x) \right| \quad (4.1)$$

donde $F_n(x)$ es la distribución empírica y $F_0(x)$ es la distribución teórica. La diferencia debe ser menor que el estadígrafo K-S para justificar que no existen motivos para rechazar la distribución propuesta (lognormal o Weibull) con nivel de significancia $\alpha = 5\%$. A pesar de que se realizaron dos pruebas de contraste, no se logró definir la mejor distribución. En la solución de la discrepancia entre las pruebas anteriores, se emplea el error cuadrático medio (ECM), mediante la ecuación:

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[Z(x_i) - Z^*(x_i) \right]^2 \quad (4.2)$$

donde $Z(x_i)$ es el valor medido de la variable y $Z^*(x_i)$ es el valor estimado, n es el número de datos.

Finalmente, el criterio para elaborar las curvas de vulnerabilidad, es el error cuadrático medio. En el trazo de las curvas de vulnerabilidad se utiliza la distribución que mejor ajustó a los datos, para las curvas que ajustan a la distribución de Weibull, se utilizan las siguientes expresiones:

$$F_R(r) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{r_f}{u}\right)^k\right) \quad (4.3)$$

$$m_R = u\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4.4)$$

$$\delta_R = u\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4.5)$$

donde r_f , es el valor de la relación de daños normalizada, u , es el parámetro de escala, k , es el parámetro de forma, Γ , es la función gamma, m_R , media, δ_R , es el coeficiente de variación. En el caso de que las curvas de vulnerabilidad se ajusten a la distribución lognormal, se utilizan las siguientes expresiones:

$$\phi = \left(\frac{\ln(y / \tilde{m}_y)}{\sigma_x}\right) \quad (4.6)$$

$$\tilde{m}_y = m_y \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma_{\ln Y}^2\right) \quad (4.7)$$

$$\sigma_{\ln Y}^2 = \ln(V_Y^2 + 1) \quad (4.8)$$

donde y es la variable aleatoria, \tilde{m} la media del logaritmo natural de Y , σ_x la desviación estándar, V_Y^2 , coeficiente de variación.

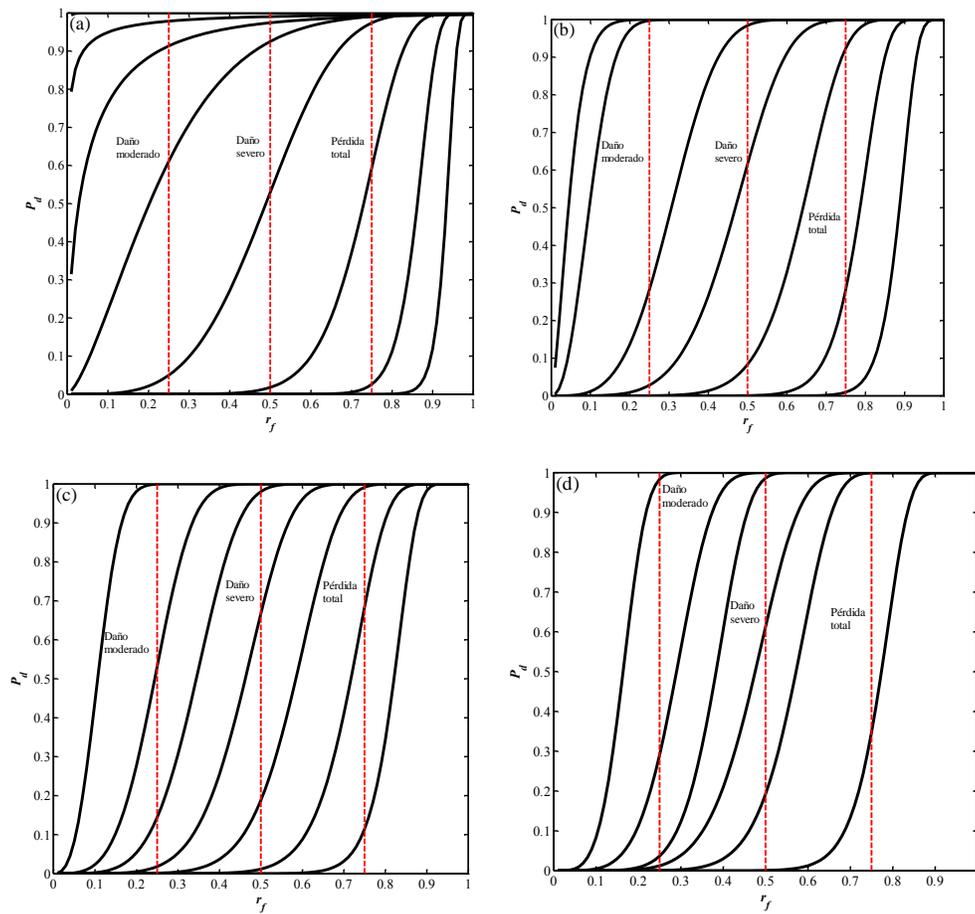
Existen diferentes metodologías para obtener los parámetros de la distribuciones de Weibull y lognormal. Entre las investigaciones más destacadas es el desarrollado por Benerjee y Shinozuka (2011), en el que calcula los parámetros de la distribución lognormal para elaborar curvas de fragilidad para puentes.

En el presente trabajo, para la elaboración de las curvas de vulnerabilidad, se utiliza el método de máxima verosimilitud (Benjamin y Cornell, 1981), en el cálculo de los parámetros. El método de máxima verosimilitud hace que la función de verosimilitud $L(\theta)$ sea máxima, la expresión tiene la siguiente forma:

$$L(\theta | x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n f_X(x_i / \theta) \quad (4.9)$$

donde θ identifica los parámetros que se requieren estimar, x es la variable aleatoria con una función de densidad de probabilidad conocida, $F_X(x)$, x_1, x_2, \dots, x_n , es una muestra aleatoria de tamaño n .

Las gráficas de la Figura 4.2 son el resultado de la simulación que involucra la incertidumbre de la velocidad del viento y la resistencia del material mediante la aplicación de la distribución de Weibull.



**Figura 4.2 Curvas de vulnerabilidad ($e=1/4''$, distribución de Weibull),
(a) COV=0%, (b) COV=10% (c) COV=15% y (d) COV=20%**

En las Figuras 4.2a-4.2d se presentan cuatro gráficas para diferentes coeficientes de variación (COV), en el eje x se mide el número de fallas normalizado (r_f), mientras que el eje y corresponde a la probabilidad de que se presente el estado límite de servicio o resistencia. Este último se delimita en las figuras por medio de los estados de daño (daño moderado, daño severo y pérdida total), que indican que el nivel de servicio o resistencia ha sido excedido. En la Tabla 4.1 se describen las características de los estados de daño. Como se puede observar en las Figuras 4.2a-4.2d, la influencia del coeficiente de variación (0%, 10%, 15% y 20%) muestra una separación entre las curvas de vulnerabilidad con respecto al incremento del COV.

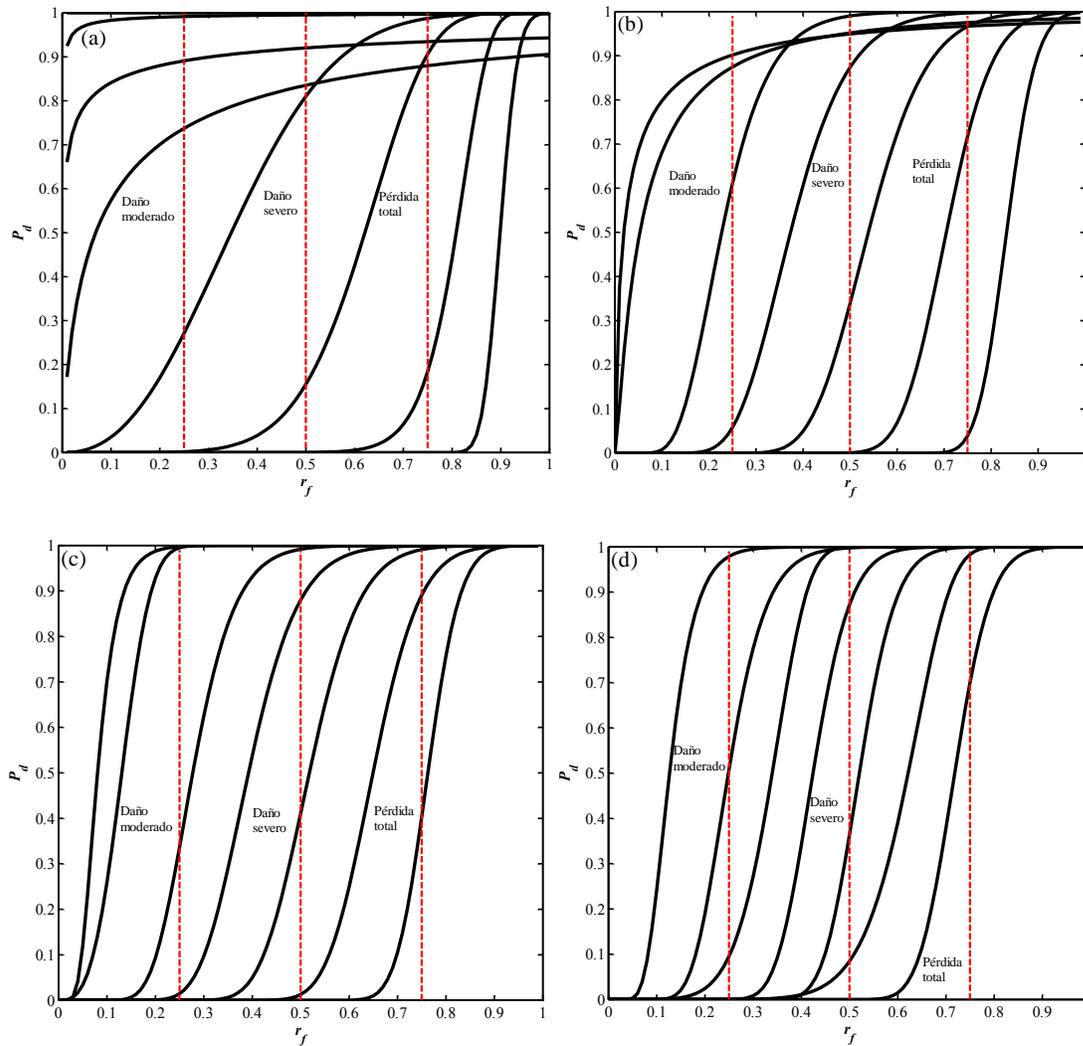


Figura 4.3 Curvas de vulnerabilidad ($e=1/4''$, distribución de Weibull y lognormal),
(a) COV=0%, (b) COV=10% (c) COV=15% y (d) COV=20%

En las Figura 4.3a-4.3d se observa que la forma y la posición de las curvas de vulnerabilidad es muy diferente para los diferentes COV. Al comparar las curvas con COV=0%, se observa que la dispersión de ventanas rotas (r_f) es mayor con respecto a las curvas con COV=10% y COV=20%. Mientras que en las Figuras 4.2a y 4.3a, las ocho curvas abarcan desde $r_f=0$ hasta $r_f=1$, el incremento en el COV reduce el intervalo, en el caso de las Figuras 4.2b y 4.3b de $r_f=0$ hasta $r_f=0.99$, y en el caso de las figuras 4.2c y 4.3c de $r_f=0.5$ hasta $r_f=0.95$. El incremento en la incertidumbre en la resistencia reduce el intervalo en que oscilan las curvas de vulnerabilidad.

4.5 Curvas de fragilidad

El trazo de las curvas de fragilidad se realiza con base en la estimación de dos elementos: los estados de daño (II, III y IV) y las curvas de vulnerabilidad. El cálculo de la probabilidad de excedencia se obtiene con la siguiente expresión:

$$P_e = 1 - P_f \quad (4.10)$$

donde P_e es la probabilidad de excedencia y P_f es la probabilidad de falla. En la Figura 4.4 se muestra la forma en que se obtienen los valores de la probabilidad de excedencia para la elaboración de las curvas de fragilidad, a este valor de la probabilidad de la curva de vulnerabilidad se asocia una probabilidad de excedencia. Los valores de la curva de fragilidad se ajustan a una curva mediante el método de Hong y Lind (1996).

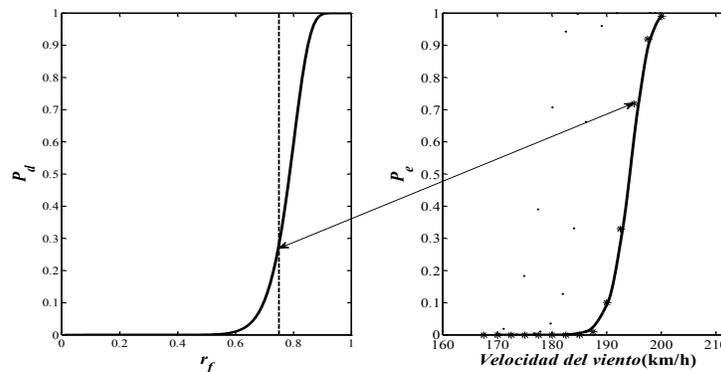


Figura 4.4 Elaboración de curvas de fragilidad

En las Figuras 4.5 y 4.6 se muestran las curvas de fragilidad, el eje x indica la velocidad del viento (km/h), el eje y indica la probabilidad de excedencia asociada con las velocidades de viento.

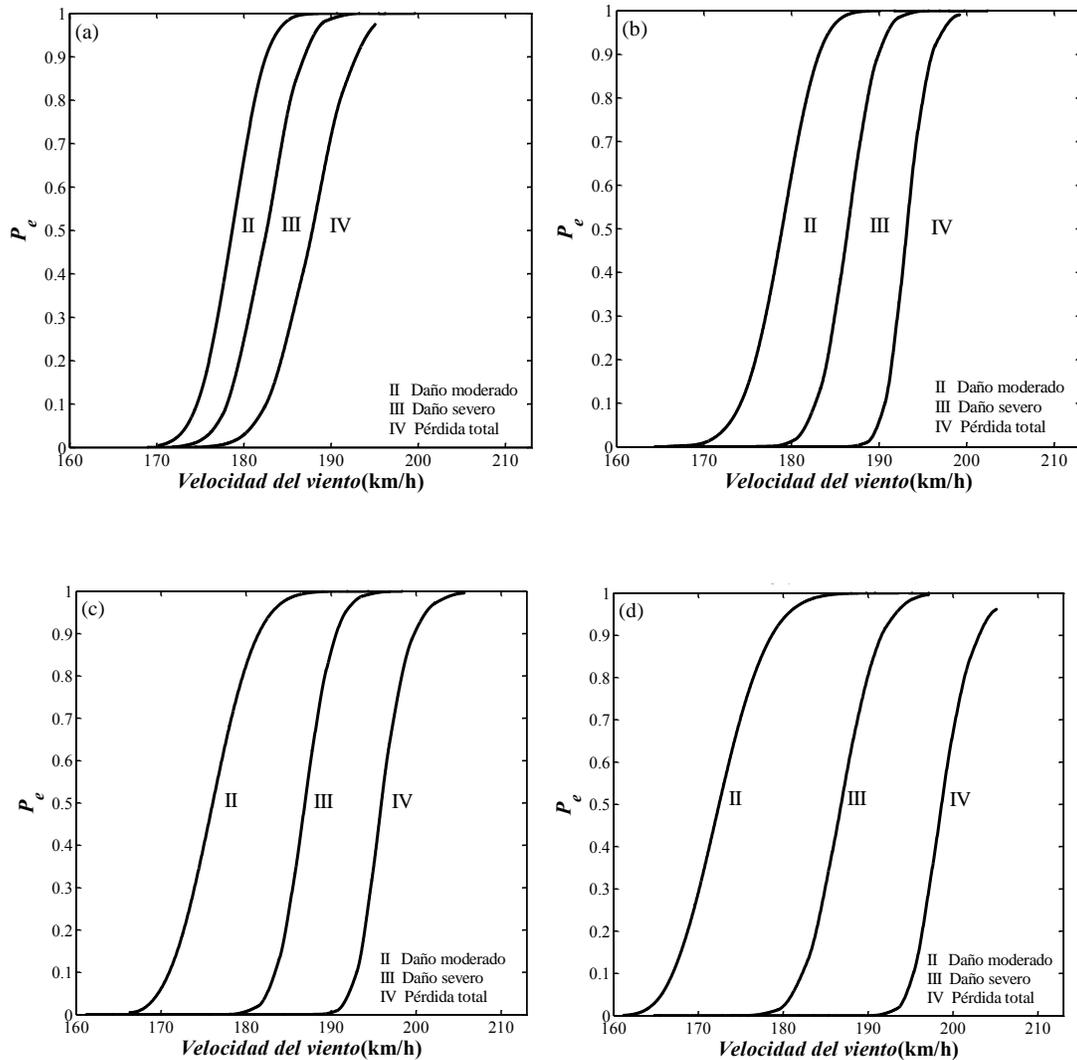


Figura 4.5 Curvas de fragilidad $e=1/4$ (2.29 m x 2.16 m) (distribución de Weibull),
 (a) COV=0%, (b) COV=10%, (c) COV=15%, (d) COV=20%

En la Figura 4.5 se puede observar que para una velocidad de 180 km/h, la probabilidad de exceder el estado de daño moderado, se incrementa con respecto al valor del COV (Figuras 4.5a-4.5d). Al evaluar el estado de daño severo, no se observa un incremento significativo. Esto es debido a que al aumentar el COV, la separación entre los estados de daño es mayor por lo que repercute en el valor de la probabilidad de excedencia.

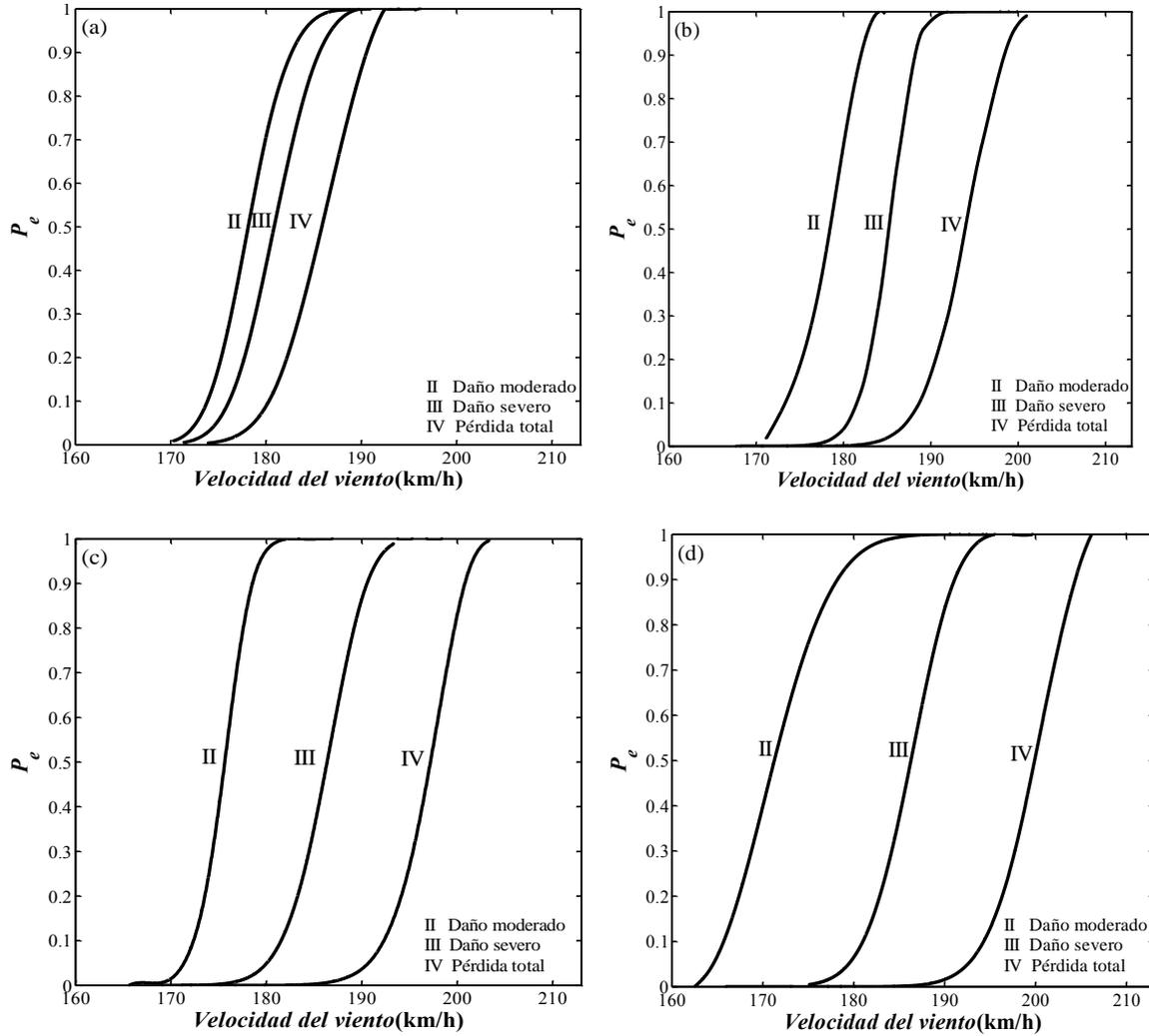


Figura 4.6 Curvas de fragilidad $e=1/4''$ (2.29 m x 2.16 m)

(distribución de Weibull y lognormal),

(a) COV=0%, (b) COV=10%, (c) COV=15%, (d) COV=20%

Al comparar las Figuras 4.5 y 4.6 se observa una diferencia en el valor de la probabilidad de excedencia para todo el intervalo de velocidades en que se trazan las curvas de fragilidad. La Figura 4.6 con respecto a la Figura 4.5 tiene valores mayores de probabilidad de falla. Esto es debido a que las curvas de fragilidad con base en las dos distribuciones (Weibull y lognormal) se localizan sesgadas hacia valores menores de 180 km/h. En general, la pendiente de las curvas de fragilidad son similares entre las Figuras 4.5 y 4.6.

4.6 Índice de pérdida

Una de las aplicaciones de las curvas de fragilidad es la evaluación de las pérdidas esperadas, las cuales se calculan con expresiones que permiten conocer el porcentaje del deterioro asociado a los diferentes estados de daño (Tabla 1). Coronel y López, (2013) realizan una comparación de la probabilidad de falla y el índice de pérdida en escuelas, diseñadas con normativas que precedieron a la que fue elaborada en el 2001, con la combinación de curvas de capacidad y curvas de fragilidad. Uno de los comentarios finales se refiere a que tienen una mayor probabilidad de falla las estructuras que no fueron diseñadas con normativas vigentes.

El índice de pérdida (I_P) representa el valor medio esperado y adopta valores comprendidos entre 0% y 100% (Coronel y López, 2013). Este índice se utiliza para conocer el porcentaje del daño debido a los efectos del viento de la fachada en estudio, el cual se expresa como:

$$I_P = \sum_{i=0}^4 \Delta P_i \times F_i \quad (4.11)$$

donde ΔP_i es la probabilidad de falla, y F_i es el factor de pérdida que se obtiene de la Tabla 4.1 para los estados I, II, III y IV. En las Tablas 4.2 y 4.3 se muestran diferentes porcentajes del índice de pérdida, asociado a tres velocidades de viento, para el espesor de 1/4", considerando los dos casos en estudio: sin incertidumbre en la resistencia (SIR, COV=0%) y el caso contrario en el que sí se considera la incertidumbre en la resistencia del material (CIR, COV=20%) con base en los coeficientes de variación correspondientes (COV=10%, 15% y 20%).

Tabla 4.2 Índice de pérdida para diferentes velocidades (Weibull)

COV (%)	Vel (km/h)	I _p (%)	Vel (km/h)	I _p (%)	Vel (km/h)	I _p (%)
0	175	4.1	180	22.6	185	51.3
10	175	4.1	180	15.7	185	32.5
15	175	11.1	180	20.7	185	30.5
20	175	18.0	180	23.8	185	29.3

Tabla 4.3 Índice de pérdida para diferentes velocidades (Weibull-lognormal)

COV (%)	Vel (km/h)	I _p (%)	Vel (km/h)	I _p (%)	Vel (km/h)	I _p (%)
0	175	4.6	180	29.3	185	49.8
10	175	5.1	180	18.6	185	37.0
15	175	11.1	180	25.8	185	35.0
20	175	19.7	180	25.3	185	33.5

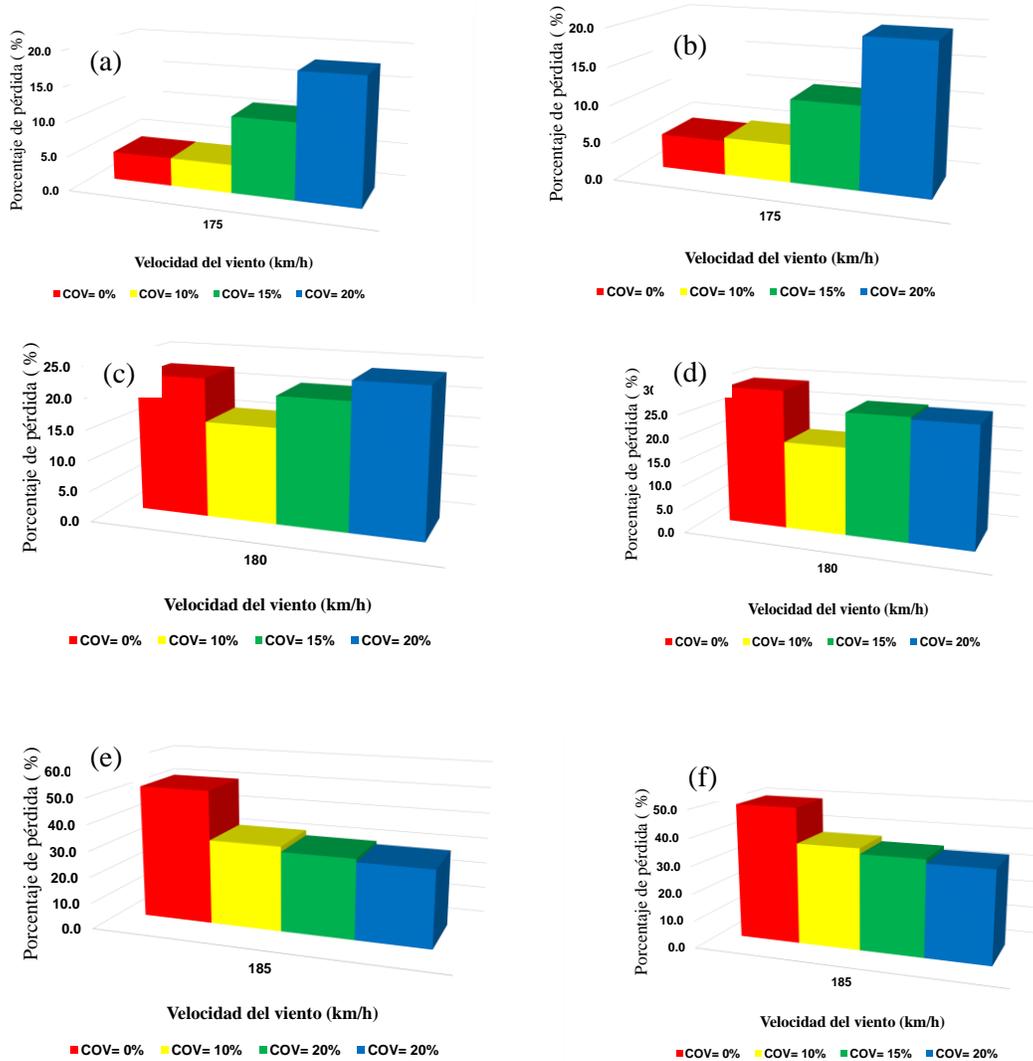


Figura 4.7 Comparación del Índice de pérdida ($e=1/4''$), distribución de Weibull (a), (c) y (e), Weibull-lognormal (b), (d) y (f)

Los resultados en la Tabla 4.2 y 4.3 se representan mediante las Figuras 4.7, en donde se comparan los diferentes valores del I_P . Las Figura 4.7a 4.7c y 4.7e se obtienen mediante las curvas de fragilidad con base en las curvas de vulnerabilidad elaboradas únicamente con la distribución de Weibull. Las Figura 4.7b 4.7d y 4.7f se obtienen mediante las curvas de fragilidad con base en las curvas de vulnerabilidad elaboradas con la distribuciones de Weibull y lognormal. Los resultados del I_P muestran que éste aumenta para valores de

velocidad del viento igual a 175 km/h, y disminuye para valores de velocidad del viento igual a 185 km/h. Para valores intermedios, los valores de I_P son muy parecidos.

4.7 Costos de reparación

Finalmente, es posible obtener el costo de las pérdidas mediante la aplicación el factor de daño medio (FDM). Se considera un costo unitario, con el fin de comparar el porcentaje en el que se incrementa el valor de reparación, como se muestra en la Tabla 4.4 y 4.5 (Bonett, 2005). Los valores de las Tablas 4.4 y 4.5 son el resultado de utilizar las curvas de fragilidad, con base en la distribución de Weibull y Weibull-lognormal, respectivamente.

Tabla 4.4 Comparación del costo de reparación (Weibull)

Espesor	Vel. (km/h)	FDM (COV= 0%)	FDM (COV=10%)	FDM (COV=15%)	FDM (COV=20%)
1/4"	175	4.1	4.1	11.1	18
1/4"	180	22.6	15.7	20.7	23.8
1/4"	185	51.3	32.0	30.5	29.3

Los resultados de la Tabla 4.4 muestran el incremento del FDM con respecto al aumento del COV, para la velocidad de 175 km/h, mientras que para la velocidad de 185 km/h se muestra el caso contrario. Esto es debido a que existe la incertidumbre en el material. Al revisar en sentido vertical para cada COV, se aprecia un incremento en el FDM con respecto al aumento en la velocidad.

Tabla 4.5 Comparación del costo de reparación (Weibull-lognomal)

Espesor	Vel. (km/h)	FDM (COV= 0%)	FDM (COV=10%)	FDM (COV=15%)	FDM (COV=20%)
1/4"	175	4.6	5.1	11.1	19.7
1/4"	180	29.3	18.6	25.3	25.3
1/4"	185	49.8	37.0	35.0	33.5

Como se esperaba, los valores de la Tabla 4.4 (Weibull) son menores que los de la Tabla 4.5, debido a la posición de las curvas de fragilidad. La diferencia de valores se debe a que las curvas de fragilidad que se utilizaron para obtener la Tabla 5.5 tienen un desplazamiento

hacia valores por debajo de 180 km/h. Por otra parte, como se esperaba, los valores son muy parecidos entre la Tabla 4.4 y 4.5, aún y cuando se utilizó en forma combinada la distribución lognormal y de Weibull en la Tabla 4.5.

4.8 Conclusiones

Se muestra el procedimiento para desarrollar curvas de fragilidad para elementos no estructurales sometidos a la fuerza que genera el viento, considerando la incertidumbre en la resistencia del material. El procedimiento toma en cuenta la simulación de las velocidades de viento, la definición del tipo de daño, así como el límite de falla para los elementos no estructurales. Con base en las simulaciones realizadas, se calcula el número de veces en que se presenta la falla.

Para definir la mejor distribución que ajusta a los datos, se utilizó el papel de probabilidad y la prueba Kolmogorv-Smirnov (K-S). Al no ser suficiente las pruebas de contraste, se utiliza el error cuadrático medio para definir el mejor ajuste de los datos. Se estiman los parámetros estadísticos de los daños. Para el trazo de las curvas de vulnerabilidad se utiliza la distribución acumulada de Weibull o lognormal, según sea el caso. A partir de la intersección entre los estados de daño y las curvas de vulnerabilidad se trazan las curvas de fragilidad.

- La metodología propuesta puede aplicarse para calcular curvas de fragilidad, para diferentes tipos de elementos no estructurales, sin importar las dimensiones de las estructuras. Además de edificios, también se puede aplicar en naves industriales de cualquier forma y tipo.
- La variación del parámetro del coeficiente de variación dificulta la selección de la distribución más adecuada para trazar las curvas de vulnerabilidad, mientras más se incrementa, más existirá dispersión de los resultados.
- En lo que respecta a las curvas de vulnerabilidad (Figuras 4.2 y 4.3), existe una dispersión mayor para el caso $COV=0\%$, (en el intervalo $r_f=0.25-0.7$) y disminuye cuando se incrementa el COV (10%, 15% y 20%).

- Al comparar los intervalos extremos ($r_f=0.0-0.25$ y $r_f=0.7-1$) en la Figura 4.2 y 4.3 para $COV=0\%$, se observa que la dispersión de los datos es menor que para el caso de $COV=10\%$, 15% y 20% .
- Como se puede observar, los costos de reparación se incrementan con la velocidad, desde el 5% hasta 77.1%, por lo que es importante tomar en cuenta el valor de la incertidumbre en la resistencia.
- Se aprecia una marcada similitud en las curvas de fragilidad, al comparar la probabilidad de excedencia para diferentes velocidades de viento.

Futuras líneas de investigación

Propuesta para integrar a la normativa los resultados mediante la metodología elaborada en el presente trabajo.

- Proponer un tipo de fachada estándar para la que se desee estimar el daño, mediante un análisis probabilístico.
- Seleccionar los parámetros que representen en forma general las características de los cristales de la fachada seleccionada.
 - Tipo de vidrio (recosido, templado, laminado)
 - Espesor
 - Dimensiones características de acuerdo al tipo de fachada seleccionada
- Simulación de las velocidades del viento para el modelo de fachada estándar
- Elaboración curvas de fragilidad para el tipo estándar de fachada, considerando la aleatoriedad del viento, el impacto de proyectiles y la incertidumbre del material
- Cálculo del índice de daño

Los resultados del índice de daño se pueden emplear para proponer un daño aceptable (con base en el costo de la fachada), de acuerdo a los diferentes tipos de fachadas, en función de la importancia de la estructura (tipo A, B y C) como se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Índices de daño para una fachada estándar con base en la importancia de la estructura

Espesor (pulgadas)	Estructura Tipo A	Estructura Tipo B	Estructura Tipo B
3/16"			
5/16"			
1/8"			
1/4"			

Nota: se tendrá que estimar un COV para considerar la incertidumbre del material, con base en pruebas de laboratorio

En la Tabla 4.5, se estima el daño aceptable, en función del costo total de la fachada. El costo total se obtiene del producto del índice de daño por el costo de la fachada. El daño aceptable deberá ser menor que un valor estándar propuesto de acuerdo a la importancia de la estructura.

Recomendaciones para la elaboración de curvas de fragilidad

- Realizar pruebas destructivas de laboratorio para diferentes tipos de vidrio, con el fin de conocer la incertidumbre de la resistencia COV (coeficiente de variación).
- Elaborar pruebas de laboratorio con los tipos de proyectiles más comunes que se pueden presentar, con el fin de conocer la velocidad que se presenta en el instante de la falla.
- Desarrollar pruebas de laboratorio para diferentes elementos no estructurales como pueden ser los muros de yeso o cemento arena, los cuales son de uso común como parte de la fachada principal.
- Tomar en cuenta los parámetros que se estudian en laboratorios especializados de fachadas, en donde se revisa tanto la resistencia así como la estanqueidad en fachadas de tamaño real.

Referencias

- Babič A, Dolšek M, (2016), Seismic fragility functions of industrial precast building classes, *Engineering Structures*, 118: 357-370
- Benerjee SB, Shinozuka M, (2011), Effect of ground motion directionality on fragility characteristics of a highway bridge, *Advances in Civil Engineering*, vol. 2011, Article ID 536171, 12 pages, doi:10.1155/2011/536171
- Bonett, R, (2003). Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Coronel DG, López OA, (2013), Metodología para la estimación de daños por sismo en edificios escolares de Venezuela mediante curvas de fragilidad, *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 28(2): 65-86.
- Benjamin J, Cornell C, (1981), Probabilidad y Estadística en Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia: *McGraw-Hill Latinoamericana*, S.A.
- FEMA (Federal Emergency Management Agency) (2003), HAZUS-MH MR3 *technical manual*, *Mitigation Division*.
- Hedayat AA, Yalciner H, (2010), Assessment of an Existing RC Building before and after Strengthening Using Nonlinear Static Procedure and Incremental Dynamic Analysis, *Shock and Vibration*, 17(4-5): 619-629. doi:10.3233/SAV-2010-0553.
- Hong HP, Lind NC, (1996), Approximate reliability analysis using normal polynomial and simulation results, *Struc. Saf.* 18(4): 329–33.
- Mansouri I, Ghodrati AG, Wan HJ, Khoshkalam M, Soori S, Shahbazi S, (2017), Seismic fragility estimates of LRB base isolated frames using performance based design, *Shock and Vibrations*, Volume 2017, Article ID 5184790, 20 pages, doi.org/10.1155/2017/5184790.
- Masoomi H, Van de lindr J W, (2015), Tornado fragility and risk assessment of an archetype masonry school building, *Engineering Structures*, 128: 26-43.
- Ramanathan K, Padgett JE, DesRoches R, (2015), Temporal evolution of seismic fragility curves for concrete box-girder bridges in California, *Engineering Structures*, 97: 29-46.

- Shinozuka M, Feng MQ, Lee J, Naganuma T, (2000), Statistical analysis of fragility curves, *Journal of Engineering Mechanics*, 126(12): 1224-1231.
- Tavares DH, Padgett J E, Paultre P, (2012), Fragility curves of typical as-built highway bridges in eastern Canada, *Engineering Structures*, 40: 107-118.
- Unanwa C, McDonald J, Mehta K, Smith D, (2000a), The development of wind damage bands for buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 84: 119-149.
- Unanwa C, McDonald J, (2000b), Building wind damage prediction and mitigation using damage bands, *Natural Hazards Review*, 1(4): 197-203.
- Vann WP, McDonald JR, (1978), An Engineering Analysis: Mobile Homes in Windstorms, *National Oceanic and Atmospheric Administration*, pp. 145.
- Vickery PJ, Skerlj PF, Lin J, Twisdale LA, Young MA, Lavelle FM (2006), HAZUS Hurricane model methodology. II: Damage and loss estimation”, *NHR* 7(2): 94–103.

Apéndice A

A.1 Polinomios normales

Para ajustar las curvas de fragilidad, en el presente trabajo se utilizó la metodología propuesta por Hong y Lind (1996) con la que se ajusta una serie de datos a una curva, con suficiente precisión para conocer la probabilidad de falla.

$$(\zeta_i, F(\zeta_i)) = \left(\zeta_i, \frac{i}{N+1} \right), i = 1, \dots, N, \quad (\text{A-1})$$

donde $\{\zeta_i\}, i = 1, 2, \dots, N$, son parámetros para desarrollar en la expresión, ζ , son variables aleatorias independientes, los cuales pertenecen a las curvas de vulnerabilidad, Φ^{-1} , es la función inversa de la distribución normal, se obtiene con la siguiente expresión.

$$\eta = \Phi^{-1}(F(\zeta)) \quad (\text{A-2})$$

Para calcular el polinomio normal se utiliza la siguiente ecuación:

$$\zeta = \sum_{j=0}^{r-1} a_j \eta^j, \quad (\text{A-3})$$

en la que $r < R$, para el modelo de distribución ζ . Los coeficientes del polinomio, $a_j, j=0, \dots, r-1$, se pueden obtener con un procedimiento de mínimos cuadrados, minimizando el error ε , el cual que se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \sum_{j \in J_s} \left(\zeta_j - \sum_{i=0}^{r-1} a_i (\eta_j)^i \right)^2 \quad (\text{A-4})$$

donde $\eta_j = \Phi^{-1}(F(\zeta_j))$ y J_s es un índice que establece el número de restricciones. La probabilidad de $\zeta \leq \zeta_o$, $F(\zeta_o)$, se obtiene con la siguiente expresión.

$$F(\zeta_o) = \Phi(\eta_o) \quad (\text{A-5})$$

donde η_o se obtiene mediante la solución de la ecuación (A-5) con el remplazo de ζ por ζ_o

Apéndice B

A continuación se muestran una serie de curvas de fragilidad para diferentes dimensiones de ventanas y espesores de cristal, así como para distintos valores del COV. Las curvas fueron elaboradas con base en las curvas de vulnerabilidad mediante la distribución de Weibull.

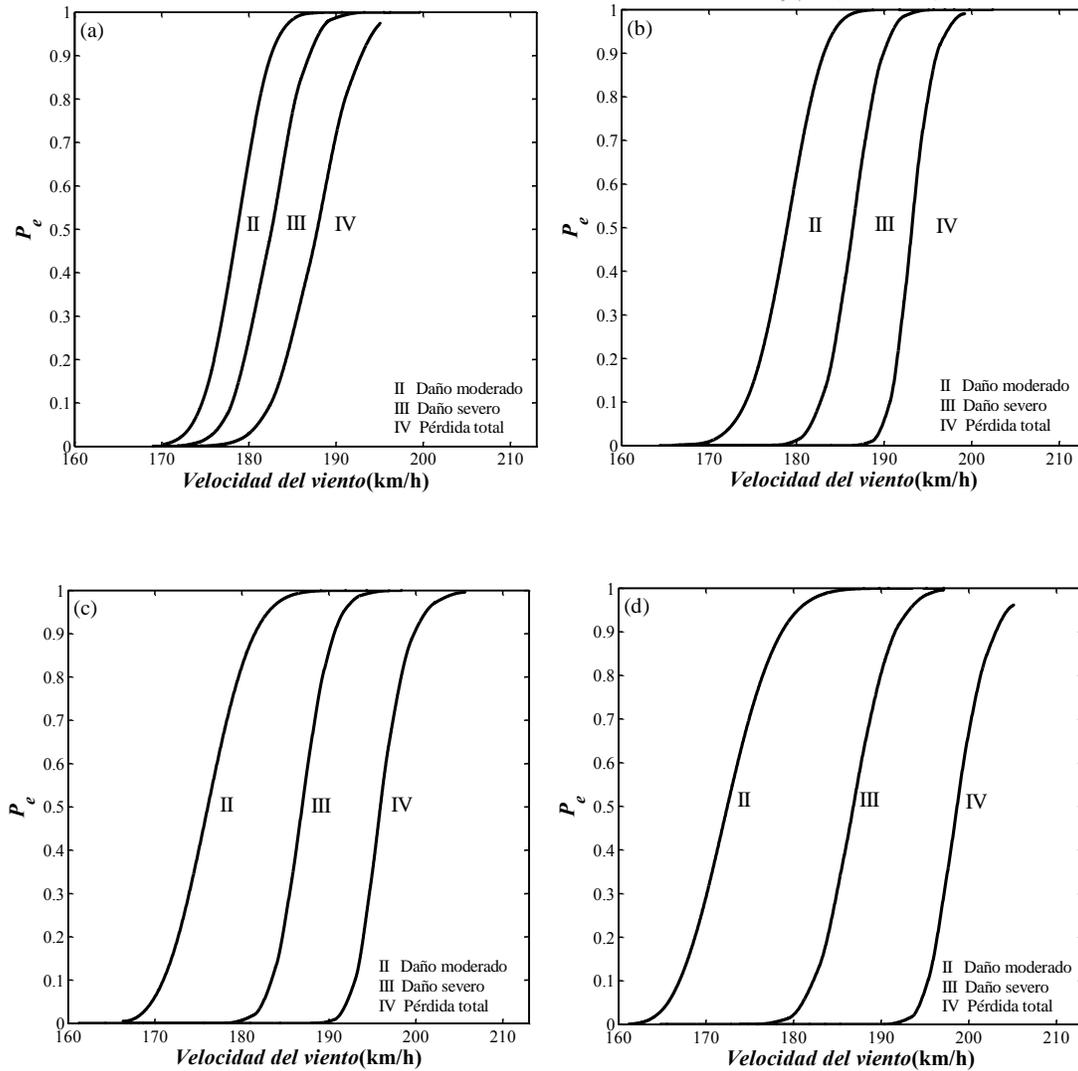


Figura B.1 Curvas de fragilidad $e=1/4''$ (2.29 m x 2.16 m)
 (a) COV=0%, (b) COV=10%, (c) COV=15%, (d) COV=20%

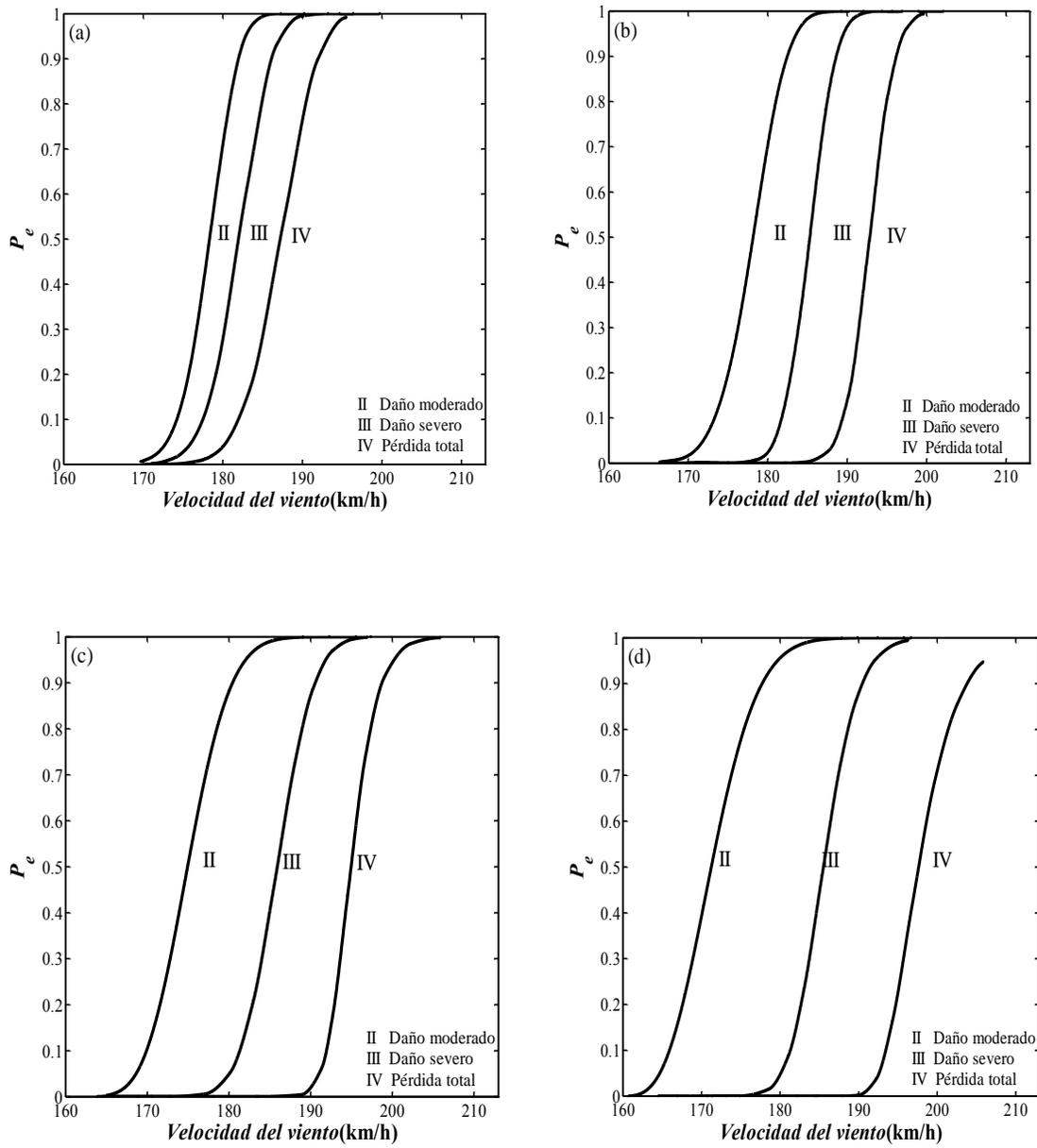


Figura B.2 Curvas de fragilidad $e=1/4''$, (2.29 m x 2.03 m),
a) COV=0%, (b) COV=10%, (b) COV=15%, (c) COV=20%

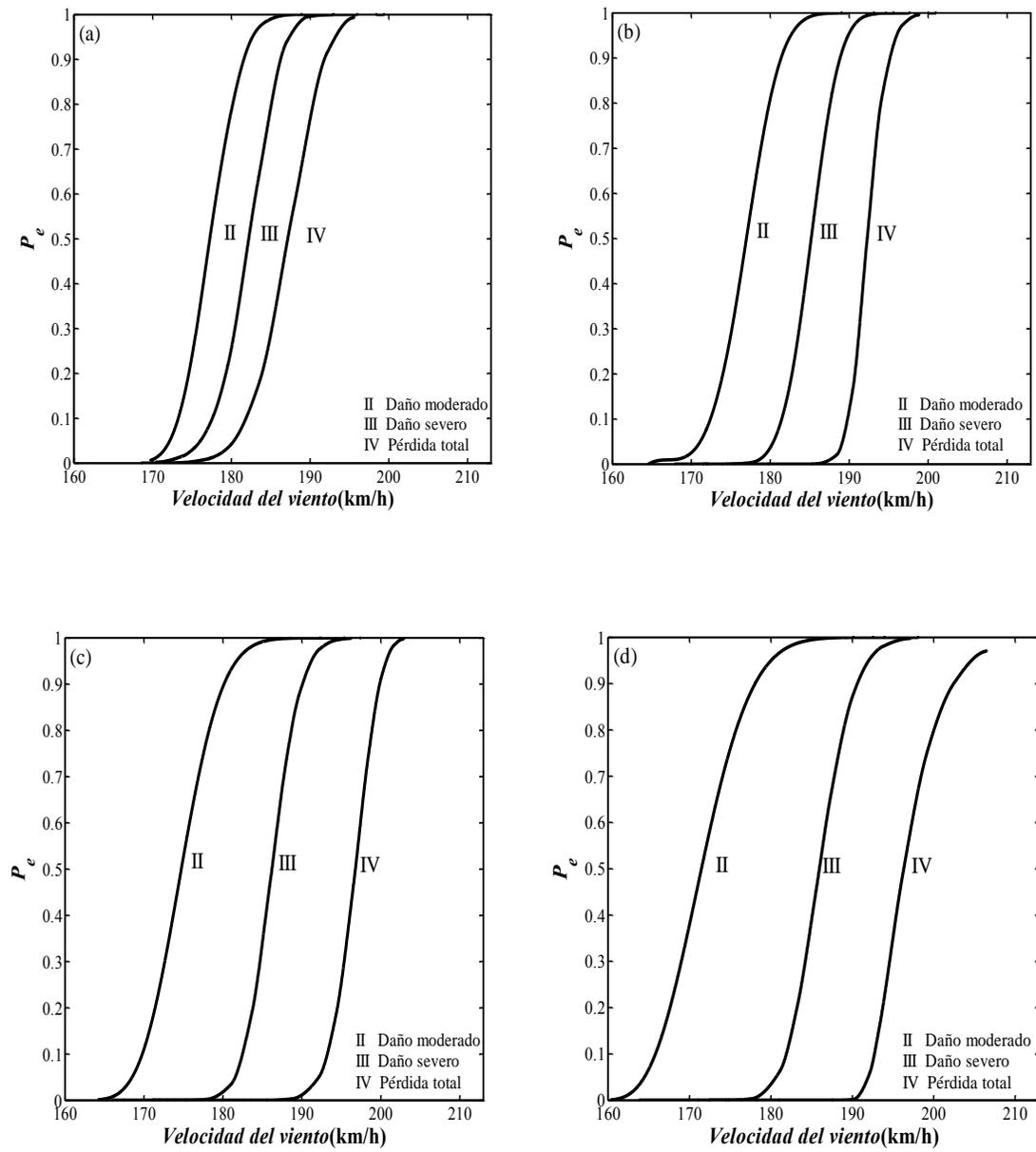
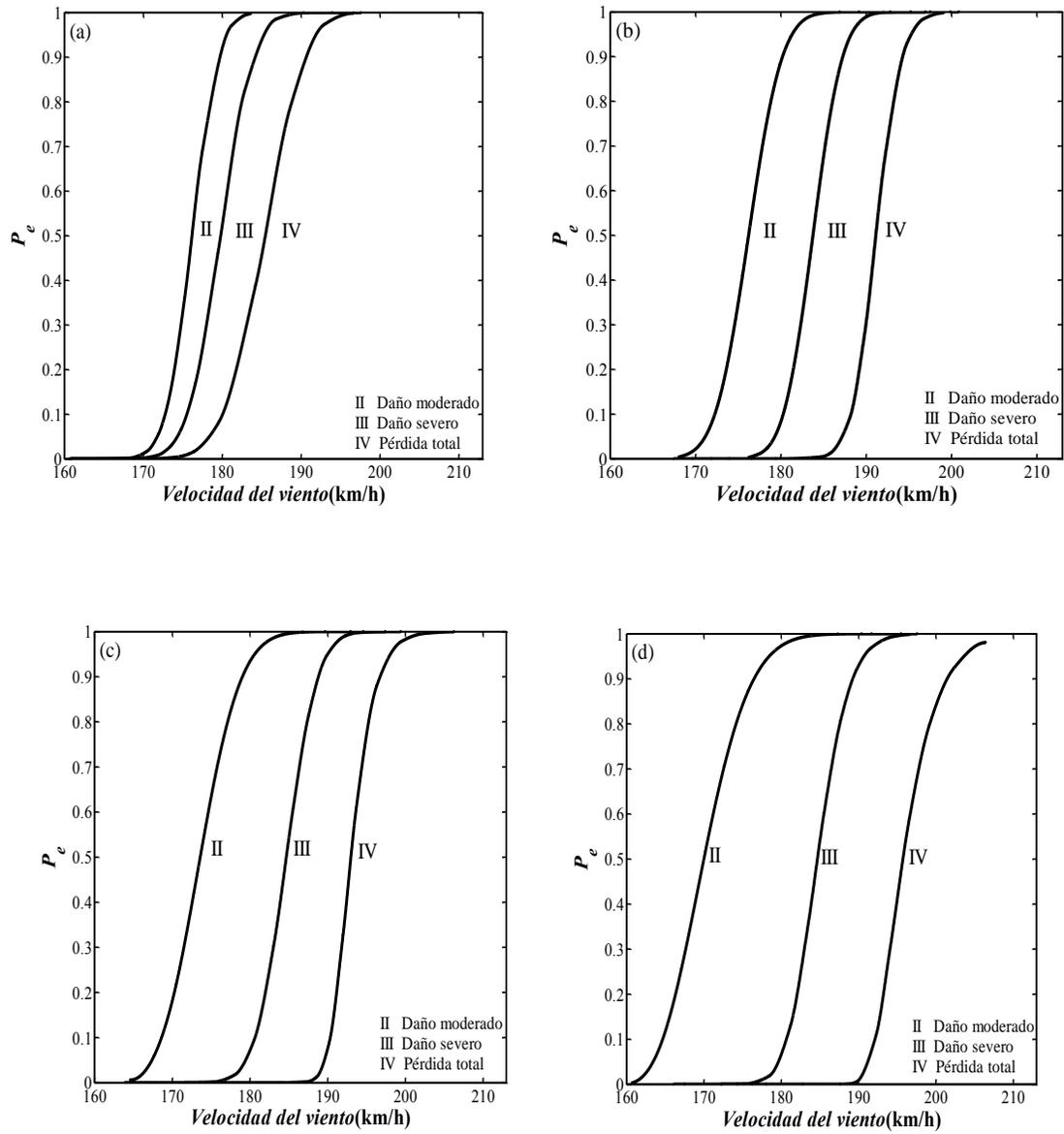


Figura B.3 Curvas de fragilidad $e=1/4''$, (2.29 m x 1.91 m),
a) COV=0%, (b) COV=10%, (b) COV=15%, (c) COV=20%



**Figura B.4 Curvas de fragilidad $e=1/4''$, (2.29 m x 1.77 m),
a) COV=0%, (b) COV=10%, (b) COV=15%, (c) COV=20%**

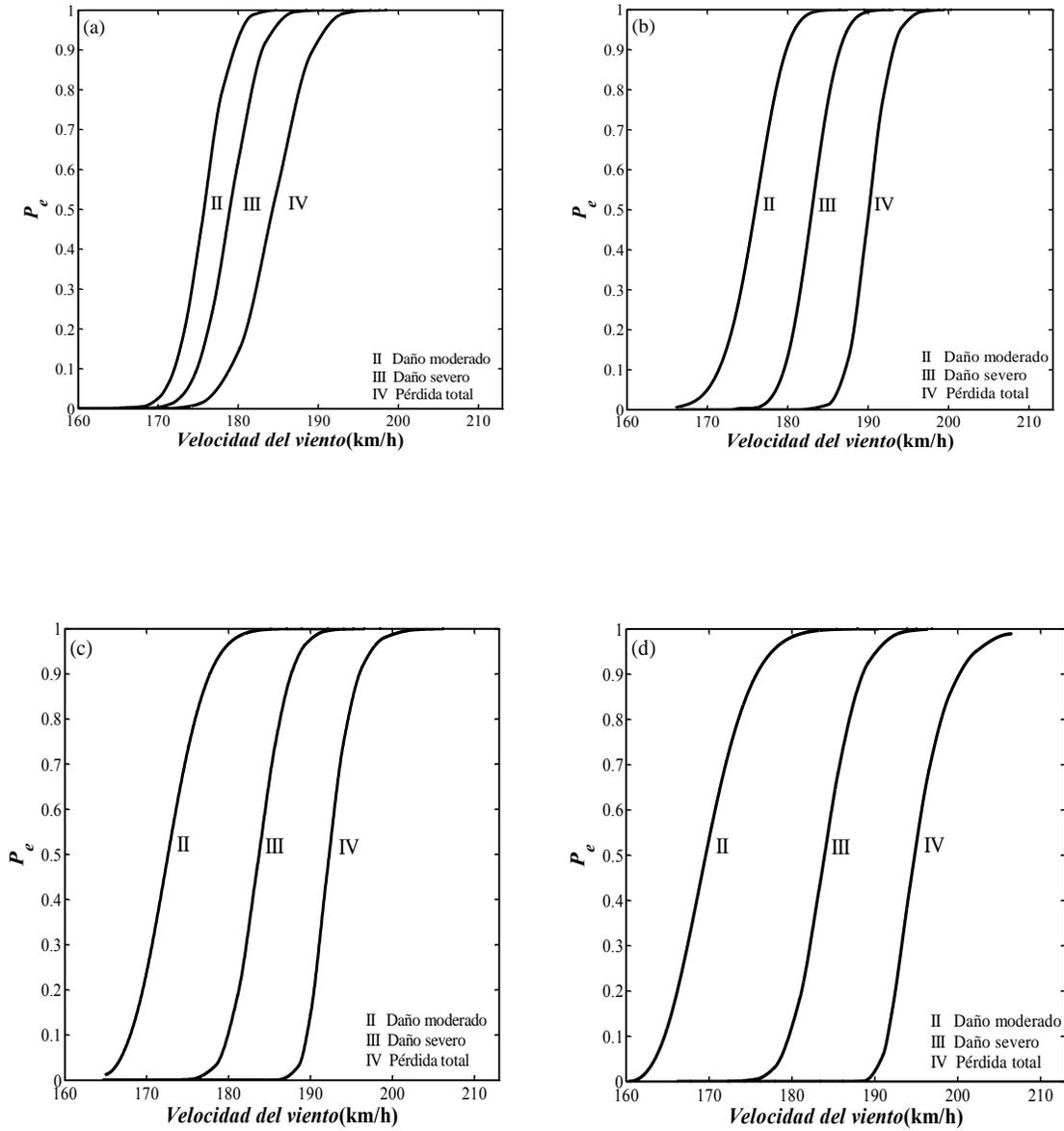


Figura B.5 Curvas de fragilidad $e=1/4''$, (2.29 m x 1.65 m),
a) COV=0%, (b) COV=10%, (b) COV=15%, (c) COV=20%

Apéndice C

A continuación se muestran una serie de curvas de fragilidad para diferentes dimensiones de ventanas y espesores de cristal, así como para distintos valores del COV. Las curvas fueron elaboradas con base en las curvas de vulnerabilidad mediante las distribuciones de Weibull-lognormal.

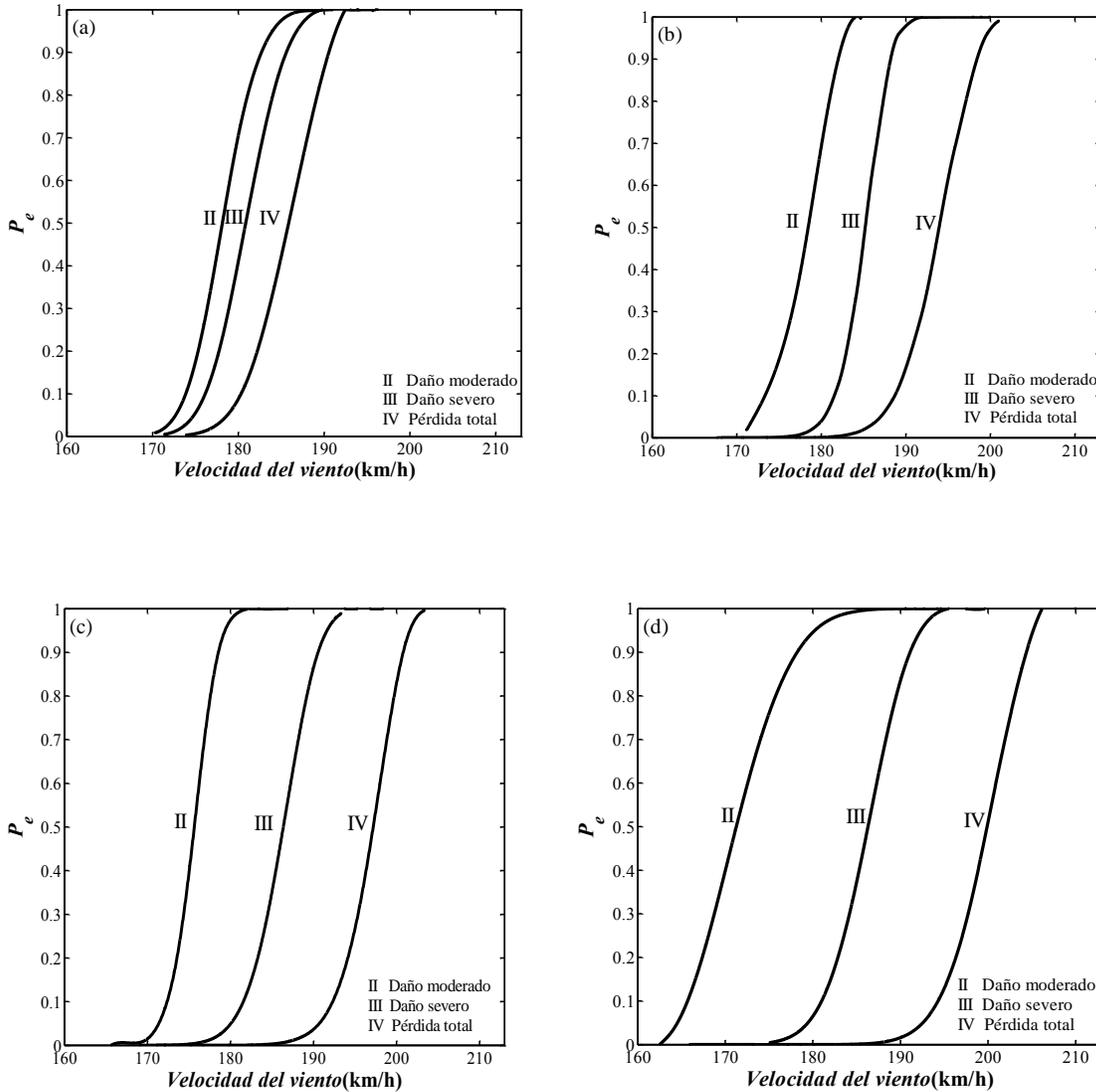
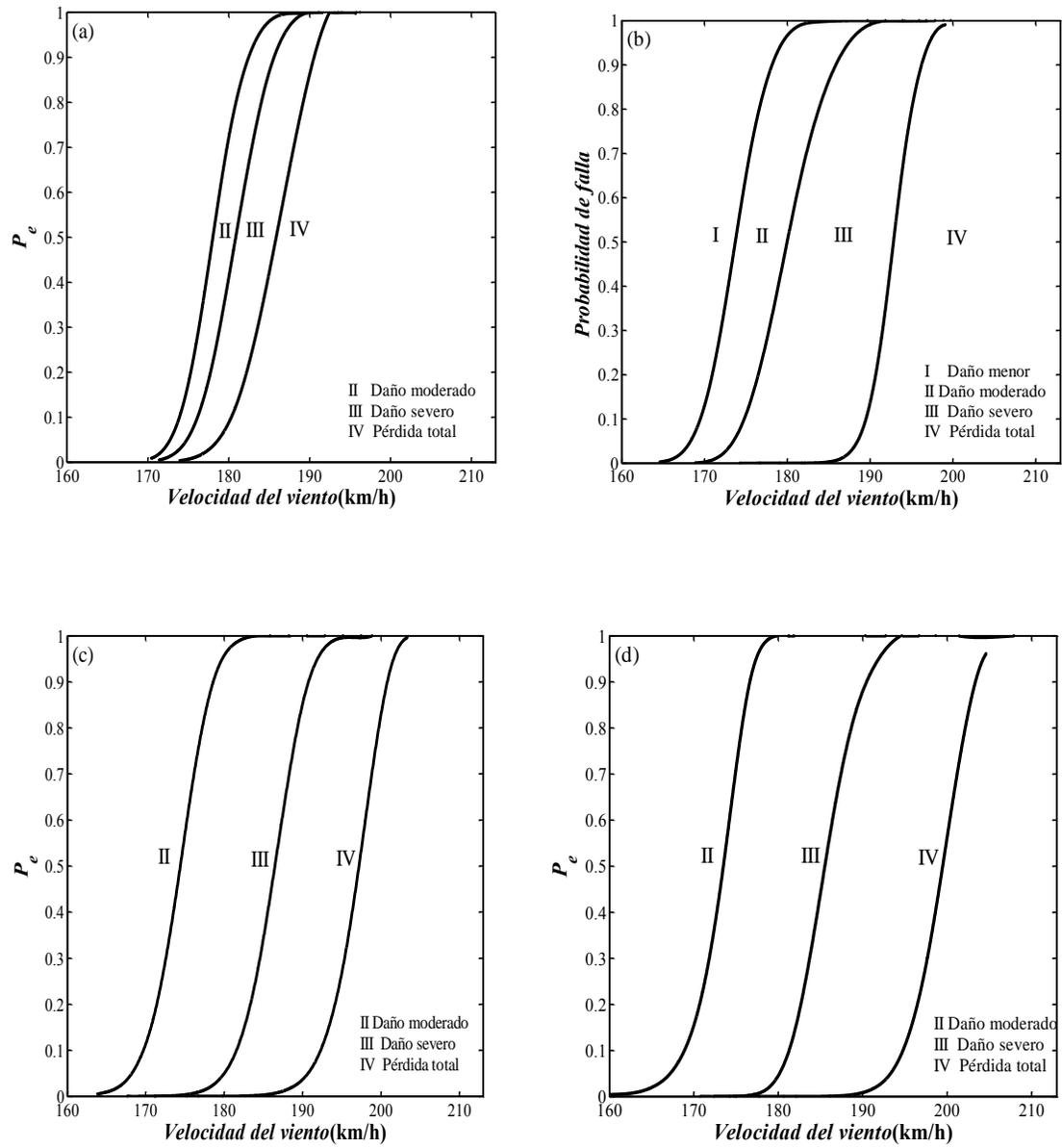


Figura C.1 Curvas de fragilidad $e=1/4''$ (2.29 m x 2.16 m)
 (a) COV=0%, (b) COV=10%, (c) COV=15%, (d) COV=20%



**Figura C.2 Curvas de fragilidad $e=1/4''$, (2.29 m x 2.03 m),
 a) COV=0%, (b) COV=10%, (b) COV=15%, (c) COV=20%**

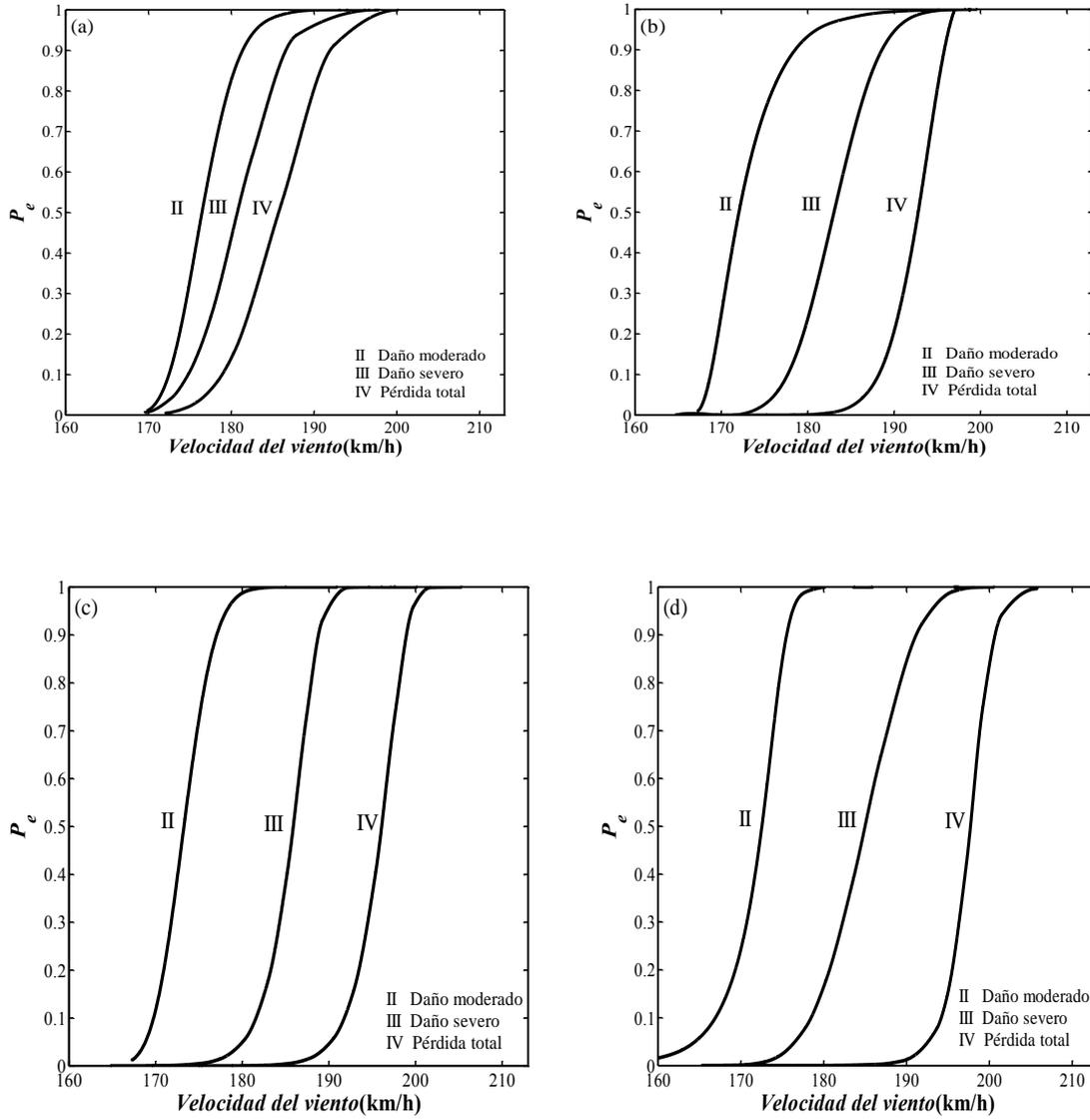
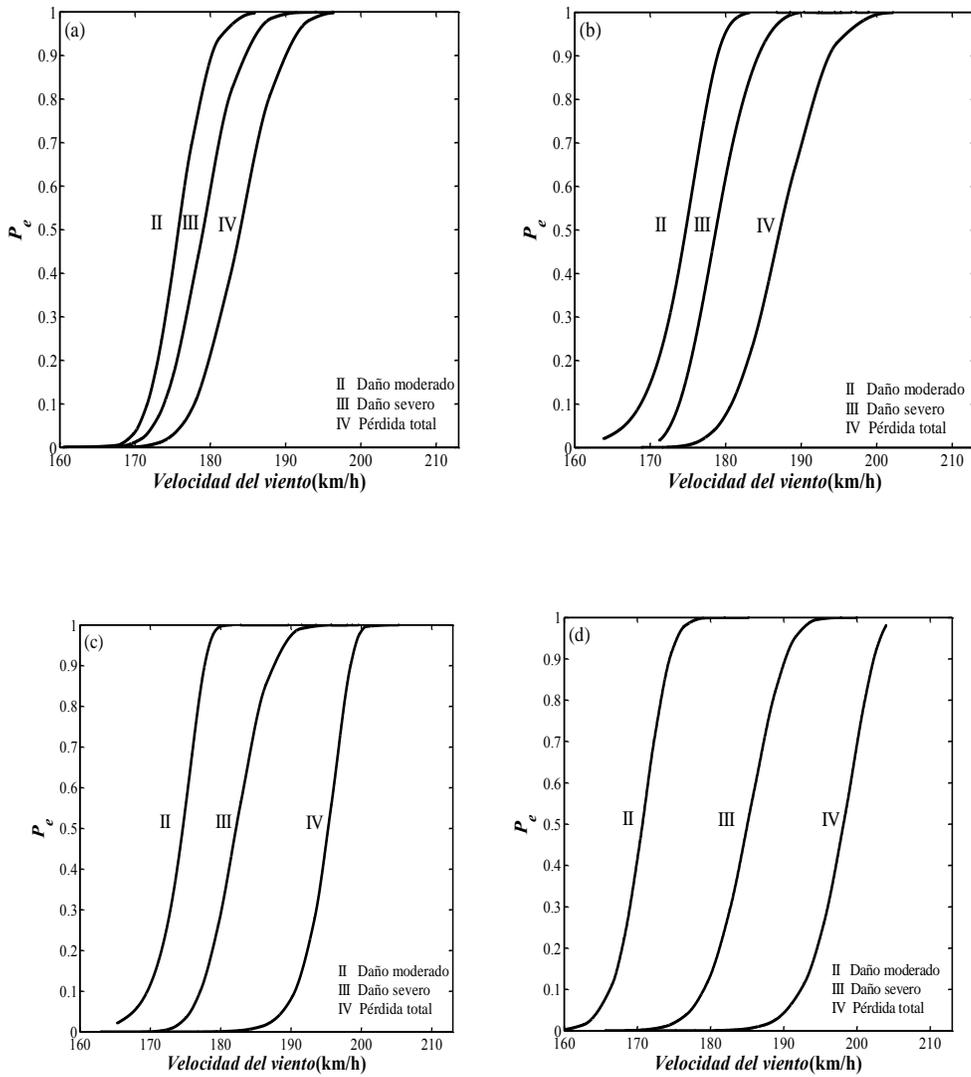


Figura C.3 Curvas de fragilidad $e=1/4''$, (2.29 m x 1.91 m),
 a) COV=0%, (b) COV=10%, (b) COV=15%, (c) COV=20%



**Figura C.4 Curvas de fragilidad $e=1/4''$, (2.29 m x 1.77 m),
a) COV=0%, (b) COV=10%, (b) COV=15%, (c) COV=20%**

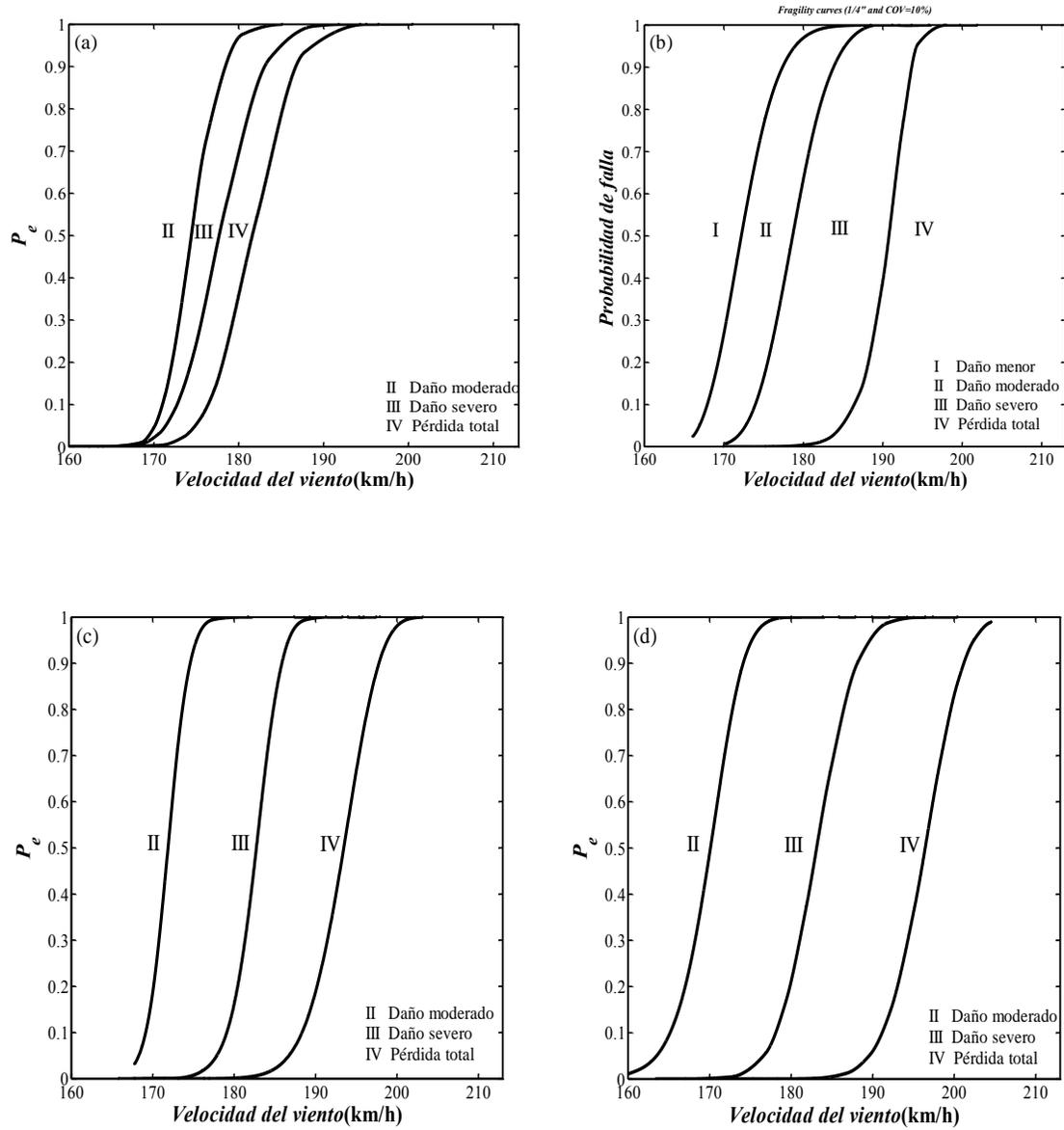


Figura C.5 Curvas de fragilidad $e=1/4''$, (2.29 m x 1.65 m),
 a) COV=0%, (b) COV=10%, (b) COV=15%, (c) COV=20%