

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE DAÑOS ESTRUCTURALES OCASIONADOS POR VIENTOS HURACANADOS EN EDIFICACIONES INDUSTRIALES

Héctor D. López¹ y Luis A. Godoy²

Resumen: El incremento en las pérdidas económicas por daños en edificaciones debido al paso de tormentas y huracanes sobre la región del Caribe en los últimos años, motivó a la industria aseguradora de Puerto Rico a auspiciar una investigación tendiente a generar herramientas para realizar evaluaciones más detalladas de sus portafolios de estructuras aseguradas, acordes con las prácticas constructivas y los escenarios de exposición existentes en la isla. Esta investigación abarca la amenaza que constituyen los huracanes para Puerto Rico, y se concentra en la estimación de sus efectos sobre los componentes más vulnerables en edificaciones industriales. La metodología de estimación de daño utilizada en este trabajo se fundamenta en la obtención de una secuencia de falla para los componentes de la edificación, a partir de la comparación directa de sus capacidades resistentes expresadas en términos de velocidades de viento. La recopilación de información, la identificación de sistemas constructivos y la selección de criterios de resistencia, junto con la elaboración de una herramienta computacional que integra los resultados de las tareas anteriores, constituyen el principal aporte de este trabajo a la metodología de estimación de daño desarrollada.

Palabras Claves: compañías aseguradoras, construcciones industriales, huracanes, vientos.

A METHODOLOGY TO ESTIMATE STRUCTURAL DAMAGE IN INDUSTRIAL BUILDINGS DUE TO HURRICANES

Abstract: In recent years, extreme wind events have caused enormous economic losses due to building damages in the Caribbean region. This situation have prompted the Puerto Rico's Insurance Industry to sponsor the development of tools to get more detailed assessments of their portfolios of buildings, based in both constructive practices and exposure conditions present in the Island. This investigation deals with the hurricane threat for Puerto Rico and focuses on the estimation of their effects on the most wind-vulnerable components of industrial buildings. The methodology is based on obtaining a sequence of damage for the building components by comparing their capacities expressed in terms of wind velocities. The main contribution of this study to the damage estimation methodology are the compilation of information, the identification of local constructive practices, the selection of resistance models for the wind-vulnerable components, and the development of an application which incorporate all tasks mentioned.

Keywords: Industrial buildings, insurance industry, hurricanes, winds.

INTRODUCCIÓN

Por su localización geográfica en la zona del Caribe, Puerto Rico es un escenario propenso a ser afectado por el paso de las tormentas y huracanes que anualmente se forman en esta región del planeta entre los meses de junio y noviembre.

¹ Estudiante Graduado, Centro de Investigaciones en Infraestructura Civil, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico 00681-9041. E-mail: heduloro@hotmail.com.

² Catedrático, Centro de Investigaciones en Infraestructura Civil, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico 00681-9041. E-mail: lgodoy@uprm.edu.

El último evento de gran magnitud que afectó la isla, el huracán Georges en 1978, dejó a su paso pérdidas a la economía estimadas en US \$4,287 millones, de las cuales casi el 20% (US \$900 millones) fueron atribuidos a pérdidas por daños en edificios comerciales y de vivienda.

Uno de los sectores directamente afectados por esta problemática es el de la industria aseguradora local. De acuerdo con la Junta de Planificación de Puerto Rico, después del paso de huracán Georges en 1998 se produjo un aumento considerable en las reclamaciones realizadas a las compañías de seguros por efecto de daños a bienes tanto públicos como privados, las cuales representaron pérdidas reclamadas por cerca de US \$1,365 millones. Este panorama motivó a la industria aseguradora de Puerto Rico a auspiciar un programa de investigación (López et al., 2005), buscando generar criterios de evaluación y estimación adecuados para enfrentar futuros eventos sobre la isla, acordes con las prácticas constructivas y los escenarios de exposición existentes.

En este trabajo se desarrolla una metodología para generar el escenario de daño probable sobre edificaciones de uso industrial bajo los efectos de un huracán. En términos generales, se sigue el procedimiento propuesto por McDonald et al. (1981) aplicado al entorno de Puerto Rico. Para esto se realizan actividades como búsqueda de información para identificar prácticas de diseño y construcción local; creación de una base de datos con la información recopilada; identificación de los parámetros representativos de los sistemas constructivos encontrados; implementación de criterios disponibles en la literatura para determinar las capacidades resistentes de los componentes vulnerables considerados; aplicación de la metodología establecida en ASCE 7-02 (ASCE, 2002) para la evaluación de las cargas de viento sobre los componentes de la estructura, y generación de una aplicación computacional en un entorno de Visual Basic para aplicaciones que integre los resultados de las tareas anteriores y simplifique el proceso de estimación.

RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN

La recopilación de la información se llevó a cabo mediante la revisión de planos de construcción correspondientes a varios proyectos de uso industrial localizados en diversas regiones de Puerto Rico.

Con el fin de agilizar y ordenar el proceso de toma de información y facilitar su posterior interpretación, en primer lugar se definió el tipo de información que debería ser recopilada y se clasificó en los siguientes cuatro grupos: (1) Parámetros de identificación de la estructura; (2) Diseño a viento; (3) Parámetros para estimar cargas de viento y (4) Descripción de sistemas constructivos. La Figura 1 presenta un esquema de la forma como se agrupó la información recopilada.

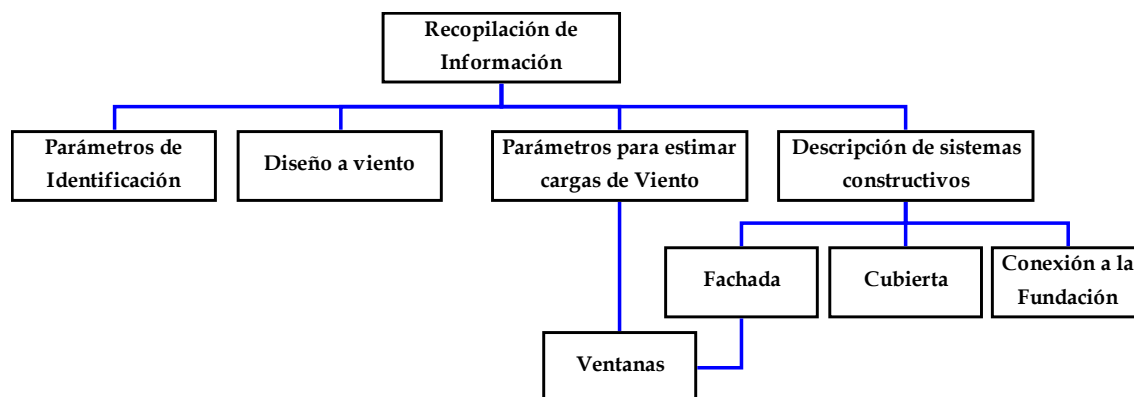


Figura 1: Clasificación de la información recopilada.

La información contenida en el grupo “Parámetros de identificación”, incluye: Nombre del proyecto; Localización de la estructura por pueblo; Año de construcción; y Código de identificación dentro de la base para su manejo interno. Con la información contenida en este grupo se pretende principalmente ordenar la información recopilada y suministrar datos sobre su origen, de manera que pueda ser consultada en etapas posteriores de este proyecto o por nuevos proyectos en el futuro.

El grupo “Diseño a viento” contiene información relacionada con la especificación utilizada para la estimación de las cargas de diseño por viento en el proyecto y la velocidad de viento estipulada en el plano de construcción o en su defecto

la establecida en la especificación. La información definida en este grupo permite establecer prácticas de diseño a viento que predominan y han predominado históricamente en el ámbito local.

En el grupo “Parámetros para estimar cargas de viento” se incluye: Información relacionada con las dimensiones generales de la estructura (en planta y altura); Número de pisos; Forma de cubierta; Pendiente; Altura de parapetos; Área de fachadas y descripción y porcentaje de ventanas y puertas por fachada. La información contenida en este grupo permitió fundamentalmente establecer tendencias arquitectónicas en este tipo de edificaciones que influyen en el desempeño de la estructura bajo la acción sostenida de vientos intensos.

Por último, el grupo “Descripción de sistemas constructivos” contiene la información sobre los sistemas de fachada, cubierta y conexión a la fundación. La descripción de los sistemas de fachada y cubierta incluye básicamente el mismo tipo de información, el cual está compuesto por: Tipo de sistema; Nombre del distribuidor cuando éste corresponde a algún tipo de producto comercial; Detalles geométricos (secciones transversales, dimensiones), Detalles de los materiales (espesores, resistencias, barras de refuerzo); Detalles de conexión (elementos de conexión, zona de conexión, espaciamientos, elementos secundarios de apoyo, anclajes). La descripción del sistema de conexión a la fundación establece tres tipos de columnas: (1) Esquineras; (2) Laterales y, (3) Interiores. Para cada tipo de columna se identifica si se encuentra ubicada o no sobre un pedestal, las dimensiones del pedestal, la configuración de las barras de anclaje, los diámetros de las barras de anclaje, el tipo de barra, la resistencia del concreto de la fundación, el refuerzo de confinamiento (diámetro y espaciamiento) y especifica si la columna recibe o no carga de pisos intermedios localizados entre la cubierta y la fundación. Este grupo contiene la información necesaria para aplicar los criterios de falla con los que se constituye el escenario de daño para la estructura.

CARACTERIZACIÓN DE EDIFICACIONES

Se definieron tipos de edificaciones mediante la identificación de las prácticas comunes existentes entre cada uno de los casos estudiados. De esta manera se clasificaron las edificaciones en siete grupos distintos que resumen las tendencias constructivas encontradas para los sistemas de cubierta, fachada, conexión a la fundación, así como algunas características generales de su geometría. En la Tabla 1 se presentan los parámetros que identifican a los siete grupos de edificaciones establecidos.

El tipo I reúne a las estructuras que utilizan concreto en sus sistemas de fachada y cubierta. Los tipos II y III utilizan sistemas livianos de fachada y cubierta de lámina metálica y se diferencian entre sí por el tipo de elemento secundario de apoyo utilizado en cubierta y por la altura media y la forma de la cubierta. El tipo IV combina materiales livianos y pesados en su sistema de fachada. Las estructuras pertenecientes al tipo IV comúnmente poseen más de un piso y utilizan materiales pesados como el concreto o la mampostería en las fachadas del primer nivel y láminas metálicas en el piso o pisos superiores. Los tipos V, VI y VII poseen sistemas de cubierta livianos de lámina metálica y materiales pesados en sus fachadas, entre los que se encuentran los paneles de concreto prefabricados (Tipo V), los bloques de concreto estructural reforzados (Tipo VI) y el concreto reforzado (Tipo VII).

Después de observar la información obtenida para los sistemas constructivos evaluados, algunos comentarios generales para los resultados en conjunto son:

- Los sistemas de cubierta muestran una preferencia por el uso de sistemas ligeros, como las láminas metálicas. En los sistemas de fachada, por el contrario, no se aprecia una práctica predominante en cuanto a los materiales empleados para conformar el cerramiento lateral de la estructura.
- Las edificaciones encontradas en la muestra corroboran la práctica generalizada de construir estructuras de baja altura (la altura media de cubierta promedio no supera los 10m). Generalmente no presentan más de dos niveles, aunque también se pudo identificar que no existe una relación directa entre la cantidad de niveles y la altura de la edificación.
- Los resultados mostraron el bajo porcentaje de puertas y ventanas que caracterizan a estas edificaciones (el porcentaje de aberturas promedio por fachada no supera el 10%). Ante una eventual falla de estos componentes, la condición de cerramiento de la estructura permanece cerrada o como máximo presenta una fachada parcialmente cerrada. Desde el punto de vista teórico, esta condición favorece el desempeño bajo cargas de viento de la estructura al no incrementarse las presiones netas sobre los componentes de la edificación como resultado del cambio en las presiones internas.

Tabla 1: Clasificación de las estructuras encontradas.

	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V	Tipo VI	Tipo VII
Cubierta							
Sistema	Losa en concreto	Lámina metálica	Lámina metálica	Lámina metálica	Lámina metálica	Lámina metálica	Lámina metálica
Tipo lámina	NA	B / NC	B	A / NC	B	B	B
Elemento secundario apoyo	NA	Perfiles Z/C	VMAA	Perfiles Z/C	VMAA	VMAA / Perfiles Z/C	VMAA
Espaciamiento (m)	NA	1.219 (4')	1.524 (5')	1.219(4') - 1.524(5')	1.219(4') - 1.524(5')	1.219(4') - 1.524(5')	0.914(3') - 1.524(5')
Zona conexión	NA	Valle	Valle	Valle	Valle	Valle	Valle
Elemento de conexión	NA	N10-N12 / NE/ND	N10-N12 / NE/ND	N12-N14 / NE/ND	N10-N12 / NE/ND	N10-N12	N12-N14
Patrón de conexión L/F/I	NA	12-6-12 / NE/ND	12-6-12 / NE/ND	12-4-12 / NE/ND	12-6-12 / NE/ND	12-6-12	12-6-12
Fachada							
Sistema	Concreto Reforzado	Lámina metálica	Lámina metálica	Bloque conc. + lámina	Paneles prefabricados	Bloque concreto	Concreto reforzado
Tipo lámina	NA	NC	NE/ND	NE/ND	NA	NA	NA
Elemento secundario apoyo	NA	Perfiles Z/C	Perfiles Z/C	Perfiles Z/C	NA	NA	NA
Espaciamiento (m)	NA	0.914(3') - 1.524(5')	1.219 (4')	0.914(3') - 1.524(5')	NA	NA	NA
Zona conexión	NA	Valle	Valle	Valle	NA	NA	NA
Elemento de conexión	NA	NE/ND	NE/ND	N12-N14 / NE/ND	NA	NA	NA
Patrón de conexión L/F/I	NA	NE/ND	NE/ND	12-4-12 / NE/ND	NA	NA	NA
Fundación							
Columna Sobre	Pedestal / Losa	Pedestal	Pedestal / Losa	NE/ND	NE/ND	Pedestal	NE/ND
Barra de anclaje	Gancho / Tuerca	Gancho	Gancho / Tuerca	NE/ND	NE/ND	Gancho	NE/ND
General							
Altura media cubierta (m)	7.6(25') - 9.1(30')	4.6(15') - 9.1(30')	10.7(35') - 12.2(40')	9.1(30') - 10.7(35')	7.6(25') - 9.1(30')	4.6(15') - 6.1(20')	7.6(25') - 9.1(30')
Número de pisos	1	1	2	2	1 / 2	1	2
Forma cubierta	2	2	1	2	1	2	2
Inclinación (gra)	<7	<7	<7	<7	<7	<7	<7
Clasificación cerramiento*	PC	PC	C	C	C	C / PC	C

NE/ND: No especificado/No disponible. NA: No aplica. C/PC: Cerrada / Parcialmente cerrada. VMAA: Vigüeta metálica de alma abierta. NC: No convencional. Patrón de conexión L/F/I: Lateral/Frontal/Interior.

* Clasificación considerando ventanas y puertas no resistentes a impactos y de acuerdo con los criterios de ASCE 7-02, Sección 6-2.

DESCRIPCIÓN DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Los sistemas de ventanas de vidrio encontrados se componen esencialmente de tres elementos: (1) placa de vidrio; (2) marco metálico de soporte y (3) elementos de fijación del marco. En la Figura 2 se indica de manera esquemática el ensamblaje de estos tres componentes.

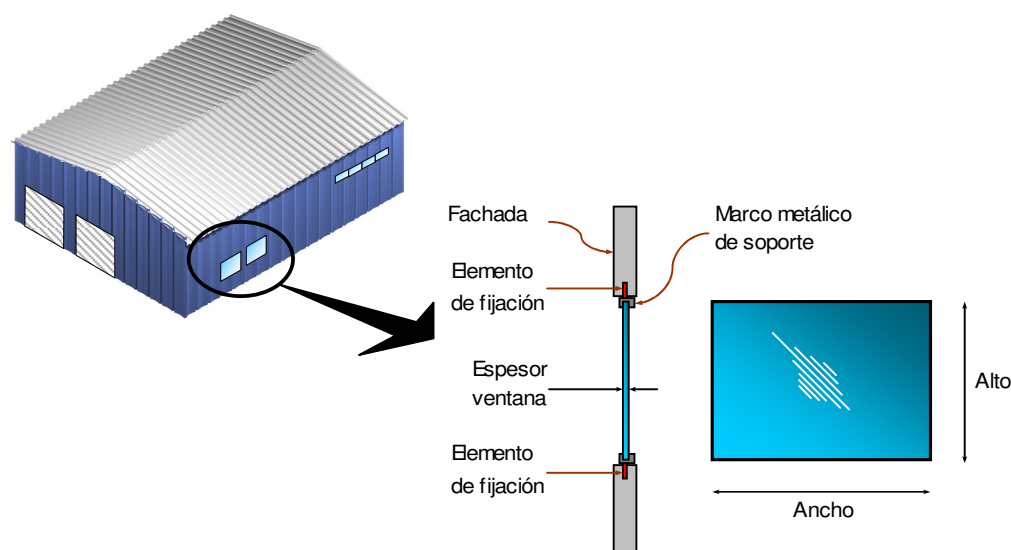


Figura 2: Componentes del sistema de ventanas en vidrio.

Las placas de vidrio se identifican principalmente por sus dimensiones, espesor y el tipo de vidrio empleado. No fue posible determinar una medida predominante debido a la gran variedad de dimensiones encontradas para las láminas de vidrio, pero se encontró que el espesor característico para este elemento es de 6.35 mm (1/4 in). El tipo de vidrio se define por el nombre del proceso químico mediante el cual se obtiene el cristal. Los vidrios templados fueron los más comúnmente especificados en las ventanas de vidrio encontradas en el relevamiento.

El marco metálico de soporte es el dispositivo encargado de sujetar la placa de vidrio en sus bordes y de mantenerla en su posición bajo las condiciones de uso normal o bajo condiciones externas como las causadas por la acción del viento. Dependiendo del tipo de ventana o de su mantenimiento, la lámina de vidrio puede pasar de tener desde un solo borde soportado hasta sus cuatro bordes completamente soportados, lo que define en gran parte su desempeño ante las presiones generadas por el viento. Como elementos de fijación del marco metálico de soporte se emplean tornillos espaciados a lo largo del perímetro de la ventana y que se encuentran embebidos en las fachadas de concreto o bloque o atornillados a otros elementos en el caso de fachadas metálicas.

Sistemas de fachada y cubierta en lámina metálica

Básicamente el sistema está conformado por tres componentes: (1) la lámina o panel metálico usado como fachada o cubierta; (2) los elementos secundarios de apoyo y (3) los elementos de fijación. Las láminas metálicas se apoyan directamente sobre los elementos secundarios de apoyo y se sujetan a éstos mediante los elementos de fijación, tal como se muestra en la Figura 3.

La Tabla 2 muestra tres de las configuraciones más especificadas como sistema de cubierta con sus dimensiones características, rango de espesores disponibles comunmente y denominaciones alternas. Como se puede apreciar, las secciones transversales de estas láminas siguen patrones trapezoidales definidos por la sucesión de crestas y valles de diferentes longitudes, manteniendo la altura de la sección constante. La Tabla 3 presenta información similar para otros tipos de geometrías que también pudieron ser apreciadas y que se diferencian de las anteriores en la cantidad de pliegues y en la inclinación de los elementos que conforman la sección. Existe actualmente una amplia gama de configuraciones disponibles en el mercado que buscan ofrecer principalmente alternativas estéticas para los sistemas de fachada y cubierta de este tipo de estructuras. Dos de las configuraciones no convencionales presentadas en la Tabla 3 se emplean como sistema de fachada (Tipo KRP y KW) y una como sistema de cubierta (Tipo KR).

El acabado más común para el acero de las láminas usado en este tipo de aplicaciones es el galvanizado Grado 90 (recubrimiento de 0.9 onzas/ft²). El límite de fluencia del material de acuerdo con el fabricante oscila entre 230 y 550 MPa.

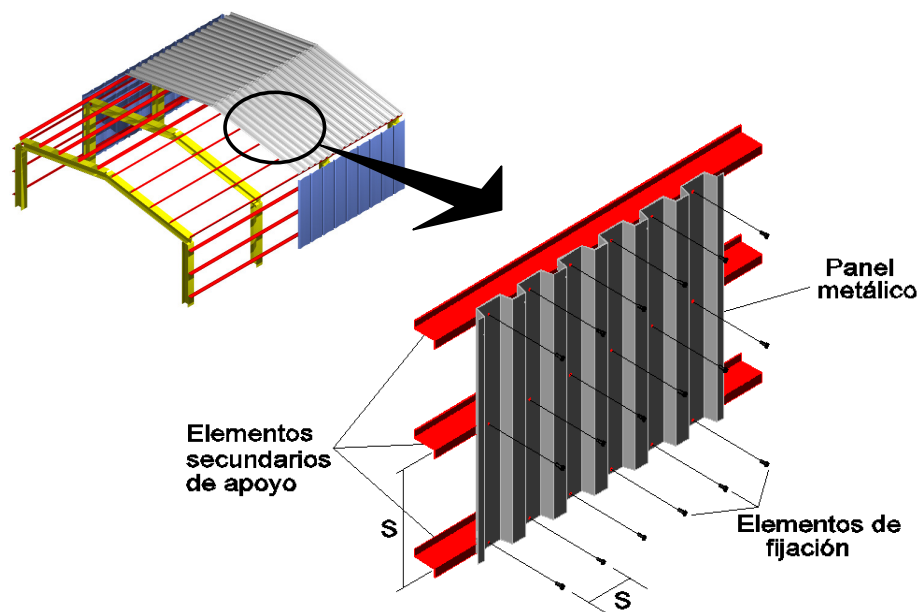


Figura 3: Componentes del sistema de fachada y cubierta en lámina metálica.

Tabla 2: Geometrías convencionales de las láminas metálicas (Fuente: Especificaciones del SDI).

Configuración geométrica	Denominación	Rango de espesores nominales (mm)
TIPO B	1 1/2" x 6" Wide Rib (WR) Tipo B	0.254 - 1.524 (0.01 - 0.06 in)
TIPO F	1 1/2" x 6" Intermediate Rib (IR) Tipo F	0.254 - 1.524 (0.01 - 0.06 in)
TIPO A	1 1/2" x 6" Narrow Rib (NR) Tipo A	0.254 - 1.524 (0.01 - 0.06 in)

Los elementos secundarios de apoyo para las láminas metálicas corresponden en su mayoría a perfiles de acero de lámina delgada doblados en frío, separados entre sí por distancias aproximadamente iguales entre los 0.90 y 1.50 m y apoyados a su vez sobre los miembros estructurales que conforman el sistema principal resistente de la estructura. Estos elementos trabajan típicamente como vigas simplemente apoyadas con luces que se encuentran entre los 6 y 9 m. Las secciones más utilizadas son las C y Z, con espesores de material que oscilan entre 0.9 y 3.0 mm, de acuerdo con especificaciones de algunos fabricantes locales (Matcor, 2005). En el sistema de cubierta también fue bastante común encontrar el uso de viguetas metálicas de alma abierta (*open web steel joist*).

Tabla 3: Geometrías no convencionales de las láminas metálicas (KBS 2005).

Configuración geométrica	Denominación	Rango de espesores nominales (mm)
TIPO KR	Tipo KR	0.348 - 0.762 (0.0137 - 0.03 in)
TIPO KRP	Tipo KRP	0.348 - 0.762 (0.0137 - 0.03 in)
TIPO KW	Tipo KW	0.348 - 0.762 (0.0137 - 0.03 in)

La fijación de las láminas a los elementos de apoyo se realiza esencialmente en los valles de las configuraciones trapezoidales mostradas en las Tablas 2 y 3, mediante tornillos con espaciamentos que oscilan entre 0.102 y 0.305 m dependiendo de la configuración de la lámina y de su localización. La Tabla 4 contiene las denominaciones y propiedades geométricas como diámetros y distancias entre cuerdas de los tornillos típicamente especificados para esta aplicación.

Tabla 4: Propiedades geométricas de los tornillos auto-perforantes.

Denominación	Diámetro nominal (mm)	Distancia entre cuerdas p (mm)				
			D (mm)		d (mm)	
			min	max	min	Max
N10	4.83	1.69	4.80	4.65	3.58	3.43
N12	5.49	1.95	5.46	5.31	4.17	3.99
N14	6.35	1.95	6.25	6.10	4.88	4.70

Conexión columna-fundación

La fundación de las columnas metálicas del sistema principal resistente se realiza sobre zapatas aisladas de concreto reforzado. En la mayoría de los casos, estas zapatas poseen un pedestal de unos 1.5 m de altura en promedio y que forma parte integrante de la misma zapata. La conexión entre la columna y la zapata se logra uniendo la parte inferior de la columna a una platina de acero (típicamente por medio de soldadura) con el fin de distribuir la carga aplicada, y fijando esta platina mediante barras de anclaje embebidas en el concreto del pedestal, buscando suministrar una conexión resistente a los esfuerzos de tensión y corte inducidos por la columna. La Figura 4 presenta el detalle de los componentes del sistema de conexión columna-fundación descritos.

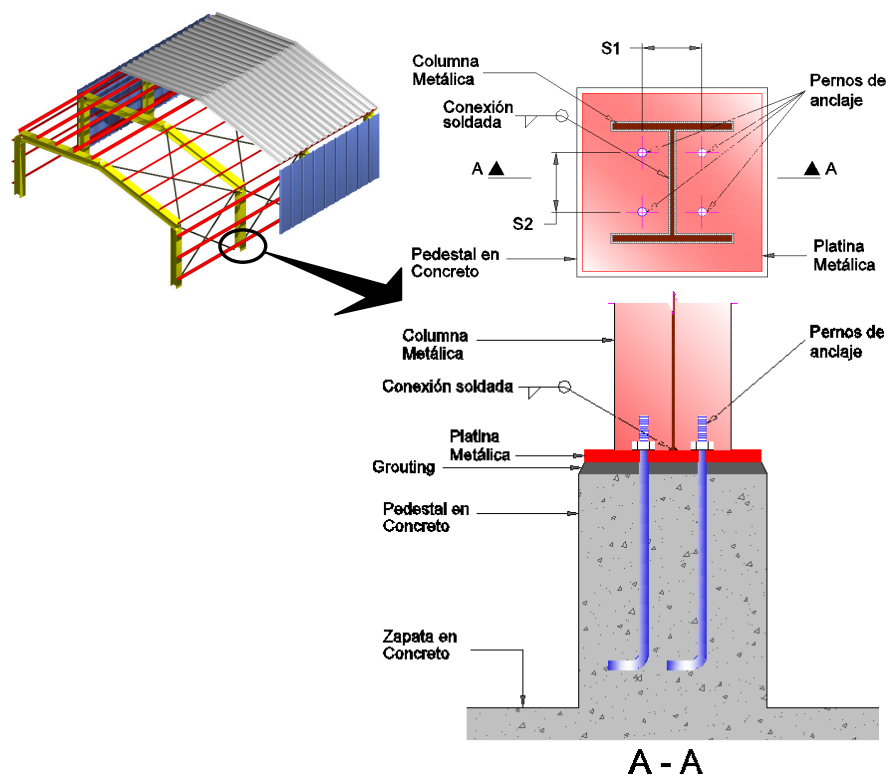


Figura 4: Componentes del sistema de conexión columna-fundación.

La capacidad de la conexión está definida por tres grupos de parámetros: (1) La localización de las barras de anclaje (distancias entre barras y distancias al borde de la zapata o pedestal); (2) Las propiedades de las barras de anclaje (diámetro, resistencia última, forma y longitud embebida); y (3) Las propiedades del concreto de la zapata (resistencia a compresión y presencia de refuerzo de confinamiento). Algunos de estos parámetros se ilustran en la Figura 5. En la Tabla 5 se consignan valores numéricos de las variables descritas para cuatro conexiones encontradas en los planos.

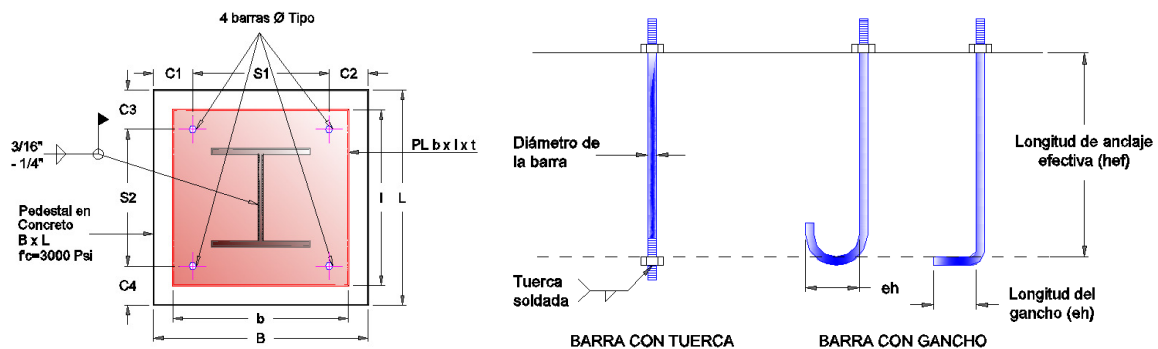


Figura 5: Dimensiones características del sistema de conexión columna-fundación mostradas en la Tabla 5.

En todos los casos se encontró una resistencia especificada del concreto a compresión entre 21 y 28 MPa y la presencia de refuerzo de confinamiento conformado por estribos en barras de 1/2 pulgada de diámetro.

Tabla 5: Parámetros de diseño de la conexión columna-fundación para las cuatro configuraciones encontradas.

Conexión Tipo	Pedestal		Platina			Configuración barras de anclaje						Barras de anclaje			
	B	L	b	l	t	S1	S2	C1	C2	C3	C4	Φ Barra	h _{efec}	e _h	Tipo
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
1	406.4	406.4	381	381	19.05	127	127	139.7	139.7	139.7	139.7	19.05	431.8	76.2	Gr. 36
2	558.8	558.8	457.2	457.2	25.4	355.6	355.6	101.6	101.6	101.6	101.6	25.40	457.2	0	-
3	558.8	558.8	457.2	457.2	31.75	355.6	355.6	101.6	101.6	101.6	101.6	25.40	533.4	0	-
4	355.6	406.4	304.8	355.6	19.05	203.2	152.4	76.2	76.2	127	127	28.575	508	101.6	Gr. 36

MODELOS DE RESISTENCIA

Se establecieron los modos de falla críticos para los componentes considerados, y se definieron criterios para estimar la capacidad resistente de los mismos bajo la acción de vientos huracanados. Para los sistemas de láminas metálicas de fachada y cubierta se tienen en cuenta criterios de falla relacionados con la capacidad de sus conexiones a otros elementos. Para los sistemas de ventanas de vidrio localizadas sobre las fachadas de la estructura, se evalúa la capacidad de la placa de vidrio por presión. En las conexiones columna-fundación en edificios metálicos livianos, se verifica la capacidad de los anclajes al concreto bajo esfuerzos de tracción o corte (Newman, 2003, Rodríguez *et al.*, 1990). Estos criterios se utilizan para predecir la velocidad de viento de falla de cada componente, una vez que ha sido estimada su capacidad resistente. La Figura 6 muestra escenarios de daño asociados a los mecanismos de falla considerados para los sistemas de fachada y cubierta en lámina metálica (a) y para la fundación (b).

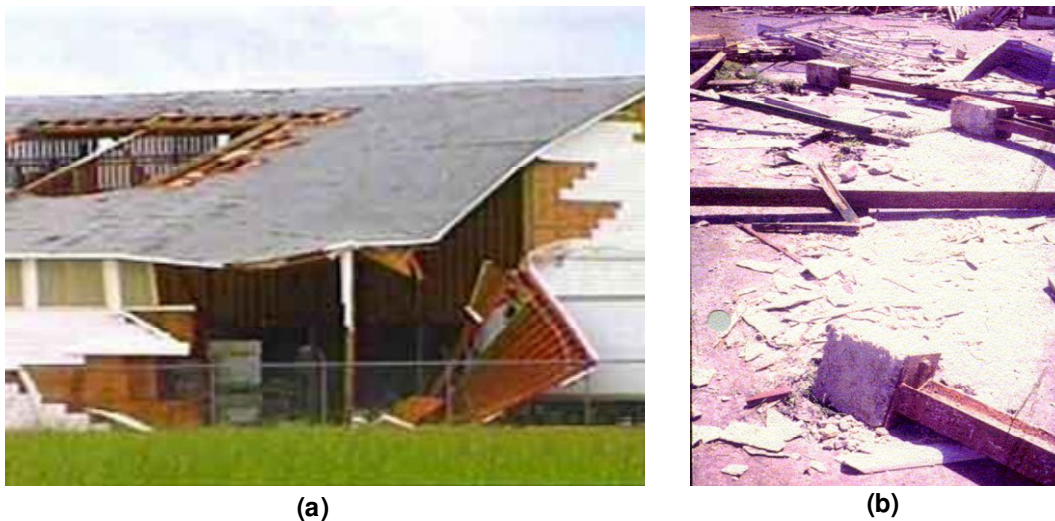


Figura 6: Fallas en los sistemas de fachada y cubierta en lámina metálica (a) y en la fundación (b).

Todos los modelos de resistencia fueron seleccionados de manera que permitieran considerar las propiedades de los materiales y las configuraciones encontradas en la información recopilada (por ejemplo, tipo de vidrio empleado en ventanas, configuraciones de las láminas metálicas utilizadas en los sistemas de fachada y cubierta, etc.). Los criterios fueron obtenidos en su totalidad de especificaciones de diseño de uso local y de documentos técnicos elaborados por expertos. La Tabla 6 muestra el listado completo de los criterios de falla trabajados para los componentes estructurales considerados, así como las limitaciones de aplicación y su documento o especificación de referencia.

EVALUACIÓN DE CARGAS DE VIENTO

Para la estimación de los efectos del viento sobre la estructura y sus componentes, se empleó el método analítico establecido en el Capítulo 6 de las provisiones para cargas de viento del ASCE 7-02 (ASCE, 2002). A pesar de que esta especificación no se encuentra incluida dentro de las normativas para el diseño frente a viento actualmente exigidas en Puerto Rico, se decidió utilizar esta especificación debido a que ofrece una metodología detallada y reconocida en la comunidad técnica para la estimación de cargas producidas por viento sobre la estructura principal (*Main Wind Force Resisting System*) y sus componentes no estructurales (*Components and Cladding*). Su principal ventaja, comparada con

otras especificaciones de uso local (como el código UBC-97), radica en su alto grado de detalle en la evaluación de las cargas de viento, debido a su capacidad para considerar aspectos particulares de la estructura como características geométricas, localización, condición de cerramiento y exposición, así como también la localización específica de sus componentes no estructurales sobre sus zonas de fachada y cubierta.

En base a las características de la estructura y al lugar donde se encuentra localizada, se determinan los parámetros para estimar cargas de viento definidos en ASCE 7-02, como clasificación de cerramiento, categoría de exposición, influencia de efectos topográficos, factores de direccionalidad, de ráfaga y de importancia, coeficientes de presión interna y externa, y coeficientes de presión por velocidad.

El factor de direccionalidad se consideró igual a uno, con el propósito de considerar al viento proveniente desde la dirección más crítica para la estructura. El coeficiente de importancia también se consideró como unitario, con lo cual no se tuvo en cuenta el ajuste en la probabilidad de ocurrencia del evento debido al uso de la edificación.

Se debe recalcar que los resultados obtenidos por la presente metodología representan una condición crítica para la estructura y sus componentes, debido a que en la determinación de los efectos producidos por el viento se utilizan los coeficientes de presión más desfavorables, los cuales no necesariamente ocurren para una misma dirección de viento incidente.

Tabla 6: Listado de criterios de falla para los componentes considerados en el proceso de estimación de daño.

Componente	Criterio de falla	Limitaciones	Referencia
Lámina metálica de cubierta	Arrancamiento estático	Espesor del material del elemento de apoyo secundario $\leq 3\text{mm}$.	Mahendran y Tang (1998)
	Arrancamiento por fatiga	Espesor del material del elemento de apoyo secundario $\leq 1\text{mm}$.	Mahendran y Mahaarachchi (2002)
	Desgarramiento estático	Conexión crestas: Ninguna.	Mahendran y Mahaarachchi (2004)
		Conexión en valles: Ninguna.	AISI 2002
	Desgarramiento por fatiga	Conexión crestas: No considerado	-
		Conexión en valles: Solo para láminas tipo B en valles intercalados.	Figuroa (1996)
Lámina metálica de fachada	Arrancamiento estático	Espesor del material del elemento de apoyo secundario $\leq 3\text{mm}$.	Mahendran y Tang (1998)
	Arrancamiento por fatiga	Espesor del material del elemento de apoyo secundario $\leq 1\text{mm}$.	Mahendran y Mahaarachchi (2002)
	Desgarramiento estático	Conexión crestas: Ninguna.	Mahendran y Mahaarachchi (2004)
		Conexión en valles: Ninguna.	AISI 2002
	Desgarramiento por fatiga	Conexión crestas: No considerado.	-
		Conexión en valles: No considerado.	-
Ventanas en vidrio	Presión	Ninguna.	ASTM E1300-02
Conexión Columna-Fundación	Tensión y Corte	Sistemas livianos (metálicos) de cubierta y fachada.	ACI 318-02 APENDICE D
		Columnas de fachada sin pisos intermedios (Tensión).	
		Estructuras cerradas.	
		No hay influencia de efectos topográficos.	
		Conexión no resistente a momentos.	

ESTIMACIÓN DE DAÑO

La metodología de estimación de daño seguida en este trabajo se define por la obtención de una secuencia de falla para los componentes de la edificación considerados, a partir de la comparación directa de sus capacidades resistentes expresadas en términos de velocidades de viento. Para convertir la capacidad resistente de cada componente a velocidades de viento de falla (ráfaga de 3 segundos), se utilizan las formulaciones cuasi-estáticas para el cálculo de

presiones establecidas en el Capítulo 6 de la especificación ASCE 7-02, las cuales han sido modificadas apropiadamente con este propósito.

IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL

Los cálculos necesarios para aplicar la metodología de estimación de daño desarrollada en este trabajo pueden resultar bastante extensos, y exigen que el usuario maneje relativamente grandes volúmenes de información, dependiendo de la cantidad y el tipo de componentes que vayan a ser considerados. Por esta razón, y con el propósito de ayudar a los posibles usuarios de la presente metodología, se ha desarrollado una aplicación computacional con la que se pretende:

- Simplificar el manejo de la información requerida para el análisis.
- Reunir la documentación técnica utilizada en la aplicación de la metodología.
- Orientar al usuario por medio de ayudas visuales y escritas.
- Evitar que el usuario deba realizar cálculos y estimaciones complejas.
- Lograr mayor rapidez y reducir la probabilidad de errores en los resultados.

La aplicación ha sido desarrollada en el ambiente VBA de Microsoft Excel y puede ser ejecutada por usuarios con sistemas operativos basados en Microsoft Windows. Está conformada por un total de 7,430 líneas de programación y 23 formularios de interfase gráfica. La ejecución del programa se realiza de manera secuencial a través de tres etapas: (1) ingreso de la información general de la estructura; (2) revisión de componentes vulnerables; y (3) generación del escenario de daño para la edificación. La información solicitada en las dos primeras etapas puede ser fácilmente asimilada por personas con algún tipo de conocimiento en el diseño de estructuras. Sin embargo, para aquellos usuarios que no están directamente involucrados con este campo, se proveen ayudas visuales y escritas que pretenden clarificar el tipo de información solicitada. Todas las limitaciones de aplicabilidad de los criterios utilizados en este trabajo para definir la metodología de estimación de daño son verificados internamente por el programa y un mensaje de alerta avisará al usuario cuando alguno de los criterios no cumpla con los requerimientos para su aplicación.

Toda la información requerida debe ser suministrada previamente al programa para que el análisis pueda ser ejecutado. Las Figuras 7 a 10 muestran algunos formularios de entrada de datos. La Figura 10 contiene el formulario de salida del programa.

Revisión de componentes...

Menú de opciones...

Por favor confirme los componentes que desea revisar:

☐	Sistemas de Cubierta en Lámina Metálica	Ingresar datos
☐	Sistemas de Fachada en Lámina Metálica	Ingresar datos
☐	Sistemas de Ventanas en Vidrio sobre Fachadas	Ingresar datos
☐	Conexión entre la Columnas y la Fundación	Ingresar datos

Regresar Generar Escenario de Daño Salir del Programa

Figura 7: Formulario para seleccionar los componentes a incluir en el análisis.

Información General

Parámetros Geométricos

Menor dimensión en planta de la estructura (B) : 48.8 m

Mayor dimensión en planta de la estructura (L) : 43.9 m ?

Altura de la estructura (h) : 8.2 m

Forma de la Cubierta : Plana

Inclinación : menor que 7 grados

Parapeto continuo en alrededor de toda la cubierta ? ☐ Si ☒ No

Altura del parapeto : m

Parámetros de Viento

Velocidad de viento básica (V) : mph

Factor de Ráfaga (G) : 0.85

Factor de Direccionalidad (Kd) : 1

Coefficiente de Importancia (I) : 1

Clasificación del Cerramiento de la Estructura : Cerrada ?

Categoría de Exposición : B ?

Efectos Topográficos : ☐ Si ☒ No ?

Tipo de Efecto : Escarpment ?

H : m

X : m

Lh : m

Revisar Componentes

Salir del Programa

Figura 8: Formulario de ingreso de las características geométricas de la edificación y de los parámetros de generales para estimar cargas de viento.

Revisión sistema de cubierta en lámina metálica...

Parámetros Geométricos de la Lámina

Tipo de lámina : TYPE KR

Wc : 24 mm

Wt : 78 mm

P : 102 mm

hc : 32 mm

Zona de conexión : Valle ?

Propiedades del Material de la Lámina

Acero grado : 550

Espesor lámina : 0.57 mm

Parámetros Geométricos Tornillos

	Esquina	Lateral	Interior	
Tipo de tornillo :	N12	N12	N14	
Díametro tornillo (dt) :	5.49	5.49	6.35	mm
Dist. entre cuerdas (Pt) :	1.95	1.95	1.95	mm ?
Díametro arandela (da) :	10	10	10	mm
Espaciamiento típico :	102	102	305	mm ?

Propiedades Elementos de Apoyo

Tipo de elemento : Perfiles C/Z

Acero grado : 250

Espesor elemento : 1.55 mm

Espaciamiento típico : Lateral 914 mm Interior 1220 mm ?

Guardar datos

Cancelar

Figura 9: Formulario para el ingreso de la información requerida en la revisión de los sistemas de cubierta en lámina metálica.

Escenario de Daño...

Categoría de Exposición :

Clasificación del Cerramiento :

	COMPONENTE	CRITERIO DE FALLA	VELOCIDAD DE FALLA - 3 seg. (mph)	VELOCIDAD DE FALLA - 1 min. (mph)	CATEGORIA DEL EVENTO
1	Lámina de fachada interior	Arrancamiento por fatiga	86.47	70.88	Tormenta Tropical
2	Lámina de fachada lateral	Arrancamiento por fatiga	128.25	105.12	Huracán Cat. 2
3	Lámina de cubierta interior	Arrancamiento estático	168.06	137.75	Huracán Cat. 4
4	Lámina de cubierta esquina	Arrancamiento estático	212.35	174.06	Huracán Cat. 5
5	Ventana Tipo 1	Presión	244.13	200.11	Huracán Cat. 5
6	Lámina de cubierta lateral	Arrancamiento estático	253.54	207.82	Huracán Cat. 5
7	Ventana Tipo 2	Presión	263.9	216.31	Huracán Cat. 5

Regresar Generar Reporte Escrito Salir del Programa

Figura 10: Escenario de daño para la edificación en base a los componentes considerados.

CONCLUSIONES

En esta investigación se ha desarrollado una metodología para la estimación de daños ocasionados por viento, orientada hacia edificaciones industriales construidas en Puerto Rico, y que se basa en la obtención de las capacidades resistentes de tres componentes vulnerables: (1) Sistemas de cubierta y fachada en lámina metálica, (2) Sistemas de ventanas en vidrio sobre fachadas, y (3) La conexión columna-fundación en edificaciones livianas.

La generación del escenario de daño probable para la estructura permite identificar la vulnerabilidad de sus componentes bajo los efectos locales producidos por las cargas de viento, indicando la posible secuencia de falla de los mismos, y las implicaciones para la estructura y su contenido.

La realización de tres tareas básicas, como lo fueron la recopilación de información, la identificación de sistemas constructivos y la selección de criterios de resistencia para el caso de los tres componentes vulnerables a viento considerados, junto con la elaboración de una herramienta computacional que integra los resultados de las tareas anteriores, constituyen el principal aporte de este trabajo a la metodología de estimación de daño desarrollada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo dado por la Oficina del Comisionado de Seguros de Puerto Rico a través del proyecto titulado "Daños en construcciones producidos por vientos huracanados". También agradecen los comentarios de los Dres. Raúl Zapata, Arsenio Caceres y Ali Saffar durante la investigación.

REFERENCIAS

- AISI (2002). *Specification for the Design of Cold-formed Steel Structural Members*, American Iron and Steel Institute, Washington, DC.
- ASCE (2002). *Minimum design loads for buildings and other structures - ANSI/ASCE 7-02*, American Society of Civil Engineers, New York, NY.
- ASTM E1300 (2002). *Standard practice for determining load resistance of glass in buildings*, American Society for Testing and Materials, Vol. 04.11, Philadelphia, PA.
- Figueroa Díaz, V. (1996). *Performance of Steel Roof Decks Subjected to Repeated Wind Loads*, Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, PR.
- KBS (2005). *Kirby's Specification Sheets*, Kirby Building Systems, Portland, TN.

- López, H. D. y Godoy, L. A. (2005). "Buckling of metal folded plates under wind pressure", *Proceedings of the III International Conference on Structural Stability and Dynamics*, Kissimmee, Florida.
- López, R. R., Godoy L. A., Acosta F. J., Guevara J. O., Lluch J. F., Martínez-Cruzado J. A., Pagán-Trinidad I., Pando M., Saffar A. y Wendichansky D. (2005). "Estimating damage caused by natural hazards for the insurance industry in Puerto Rico", *Dimensión*, Vol. 19, No. 3, pp. 17-26.
- Mahendran, M. y Tang, R. B. (1998). "Pull-out strength of steel roof and wall cladding systems", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No 10, pp. 1192-1201.
- Mahendran, M. y Mahaarachchi, D. (2002). "Cyclic pull-out strength of screwed connections in steel roof and wall cladding systems using thin steel battens", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 6, pp. 771-778.
- Mahendran, M. y Mahaarachchi, D. (2004). "Finite element analysis and design of crest-fixed trapezoidal steel claddings with wide pans subject to pull-trough failures", *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 11, pp. 1547-1559.
- Matcor (2005). *Rolled Formed Metal Building Components*, Matcor Inc., Guaynabo, Puerto Rico.
- McDonald, J., Mehta, K. y Smith, D. (1981). "Procedure for predicting wind damage to buildings", *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 107, No. 11, pp. 2089-2096.
- Newman, A. (2003). *Metal Building System: Design and Specifications*, segunda edición, Mc Graw Hill, New York, NY.
- Rodríguez, L., Pesquera, C. y López, R., (1990). "Hugo's structural damage in Puerto Rico", en: *Hurricane Hugo One Year Later*, B. L. Sill and P.R Sparks, eds., ASCE, New York, pp. 93-102.