

ANÁLISIS DE FALLAS ESTRUCTURALES EN INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTACIÓN PARA ESTIMAR LAS VELOCIDADES DE VIENTO DURANTE EL HURACÁN MARÍA EN PUERTO RICO¹

Gustavo E. Pacheco-Crosetti², Héctor J. Cruzado³

RESUMEN: El huracán María tocó tierra en Puerto Rico el 20 de septiembre de 2017. Sus fuertes vientos y la intensidad de las precipitaciones fueron responsables de daños significativos a la infraestructura y a todo tipo de construcción en Puerto Rico. El huracán y sus efectos han sido intensamente estudiados durante los pasados tres años. Estos estudios incluyen estimados de las velocidades de ráfaga que produjo el huracán. Estos estimados parecen ser más bajos que los esperados para un huracán de la categoría de María. El presente estudio propuso contribuir a estos estimados mediante el análisis de fallas de elementos de la infraestructura de transportación, obteniendo como resultado que las velocidades de ráfagas requeridas para producir las fallas analizadas resultaron significativamente mayores a la de estudios previos. Estos hallazgos sugieren que una revisión de las velocidades de ráfagas estimadas para el huracán María es pertinente, lo cual posibilitaría interpretar mejor sus efectos. Esto, a su vez, podría tener un impacto en la definición de velocidades de diseño para Puerto Rico para diseñar sistemas resilientes bajo una futura actualización de los códigos de edificación de la isla.

Palabras clave: cargas de viento, colapso estructural, fallas estructurales, huracanes

THE ANALYSIS OF STRUCTURAL FAILURES IN TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE USED TO ESTIMATE WIND SPEEDS OF HURRICANE MARIA IN PUERTO RICO

ABSTRACT: Hurricane Maria made landfall in Puerto Rico on September 20, 2017. Its strong winds and rainfall intensity were responsible for significant damages to the infrastructure and to all types of construction in Puerto Rico. The hurricane and its effects have been intensively studied over the past three years. These studies include estimates of the gust speeds that the hurricane produced. These estimates appear to be lower than those expected for a hurricane of Maria's category. The present study sets out to contribute to these estimates by analyzing the failures of elements of the transportation infrastructure, obtaining as a result that the gust speeds required to produce the analyzed failures were significantly higher than those of previous studies. This findings suggests that a review of the estimated gust speeds for Hurricane María is pertinent, which would make it possible to better interpret its effects. In turn, this could have an impact on the definition of relevant design speeds for Puerto Rico to design resilient systems under a future update of the building codes of the island.

Keywords: wind loads, structural collapse, structural failures, hurricanes

INTRODUCCIÓN

El archipiélago de Puerto Rico, por su ubicación en el mar Caribe, es propenso a recibir el embate de tormentas tropicales y huracanes todos los años. La mayoría de estas tormentas se generan en el Océano Atlántico, al oeste de África, y viajan de Este a Oeste, y luego hacia el norte, impactando las islas del mar Caribe, parte de América Central y América del Norte, según se puede apreciar en la Figura 1. Puerto Rico ha sido afectado por diversas tormentas significativas en el pasado siglo y medio, cuyas trayectorias, con algunos nombres y año de ocurrencia se presentan en la Figura 2, distinguiendo con colores la categoría del evento. Estas tormentas y huracanes han producido pérdidas de vidas y daños substanciales en Puerto Rico. Como muestra de esto, en la Tabla 1 se presentan solamente los huracanes de categoría 3 a 5 cuyos ojos han tocado tierra en Puerto Rico durante los pasados 40 años (no ajustados por inflación).

¹ Artículo recibido el 1 de diciembre de 2020 y aceptado para publicación el 18 de diciembre de 2020.

² Profesor, Departamento de Ingeniería Civil, Ingeniería Ambiental y Agrimensura, Universidad Politécnica de Puerto Rico, San Juan, PR 00918. Director, "Transportation Infrastructure Research Center". Email: gpacheco@upr.edu

³ Profesor y Director, Departamento de Ingeniería Civil, Ingeniería Ambiental y Agrimensura, Universidad Politécnica de Puerto Rico, San Juan, PR 00918. Email: hcruzado@upr.edu

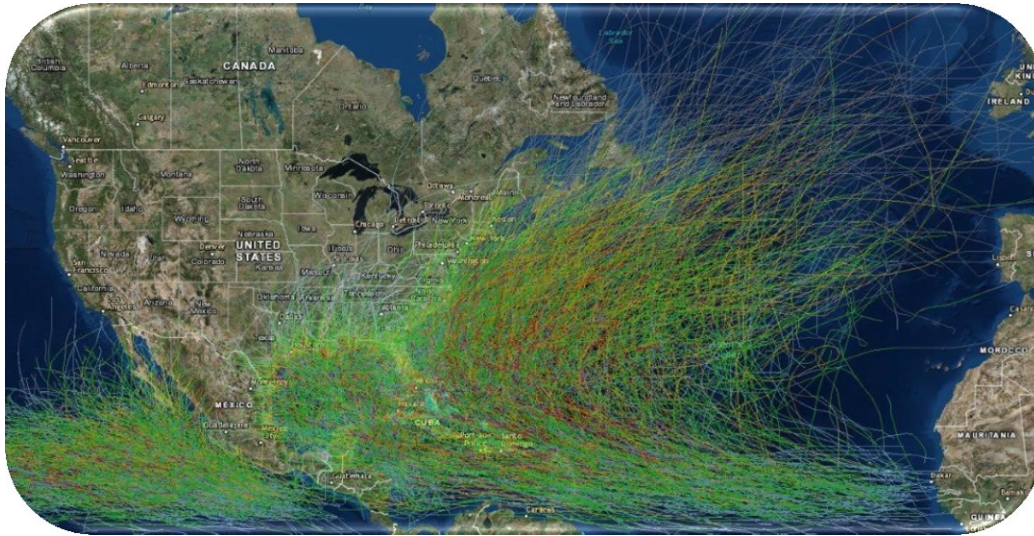


Figura 1: Trayectoria de huracanes y tormentas tropicales en el pasado siglo en la zona del Atlántico y el Caribe (NOAA, s.f.).

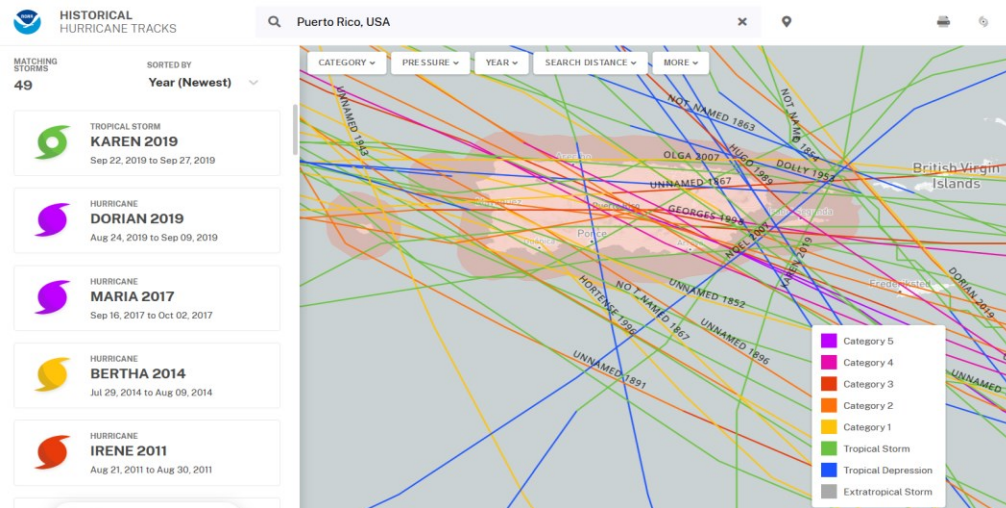


Figura 2: Trayectoria de tormentas tropicales y huracanes que afectaron a Puerto Rico el pasado siglo y medio (NOAA, s.f.).

Tabla 1: Daños estimados de huracanes impactando Puerto Rico las pasadas décadas (Cruzado & Pacheco-Crosetti, 2018)

Huracanes	Años	Daños Estimados en 10 ⁹ dólares de EEUU
Hugo	1989	\$1.5
Georges	1998	\$2.0 - 8.0
María	2017	\$100

El huracán María tocó tierra en Puerto Rico el 20 de septiembre de 2017 como un huracán categoría 4 intenso, con vientos sostenidos de 155 mph. El huracán atravesó la isla desde su extremo sureste hacia el extremo noroeste, manteniéndose como huracán categoría 4, y dejando la isla como huracán categoría 3 (con vientos sostenidos de 110 mph), como se puede ver en la Figura 3. Además de los fuertes vientos, la tormenta tuvo una gran intensidad de lluvias que alcanzó casi 40 pulgadas en 48 horas (USDC-NOAANWS, 2017). Las lluvias provocaron graves inundaciones en muchas áreas de la isla que se agravaron aún más cerca de la costa debido a la marejada ciclónica. La tormenta también provocó una gran cantidad de deslizamientos de tierra, con una mayor concentración en la parte central de la isla donde la topografía presenta las mayores elevaciones (USDC-NOAA-NWS, 2017). La Figura 4 presenta un collage de daños provocados por María en diferentes instalaciones, para dar una idea de los efectos de la tormenta que afectó todo tipo de construcciones, taludes de terreno, riveras de ríos, entre otros aspectos.



Figura 3: Trayectoria del huracán María atravesando la Isla de Puerto Rico (NOAA).



Figura 4: Ejemplos de daños producidos por el huracán María en Puerto Rico (Cruzado & Pacheco-Crosetti, 2018).

La tormenta y sus efectos fueron extensamente estudiados. Entre los estudios desarrollados se encuentran los que estiman las velocidades de las ráfagas de viento que el evento produjo. Este tipo de estudios es muy relevante ya que, con los períodos de recurrencia de eventos de esta magnitud, se puede verificar si las velocidades de diseño estipuladas son adecuadas para obtener estructuras resilientes ante este tipo de fenómenos naturales. La Figura 5 presenta uno de estos estimados; se debe tener en cuenta que los estimados son para unas ráfagas de tres segundos, a 33 ft (10 m) de altura y en una exposición C. Se puede observar en la gráfica que la velocidad de ráfaga máxima estimada fue de 140 mph. Otros estudios consultados estimaron ráfagas máximas en un rango que van desde 130 mph (PDC, 2017) hasta 155 mph (Hubbard, 2017). Ninguno estimó ráfagas por encima de 155 mph, la velocidad de vientos sostenidos de María al tocar tierra.

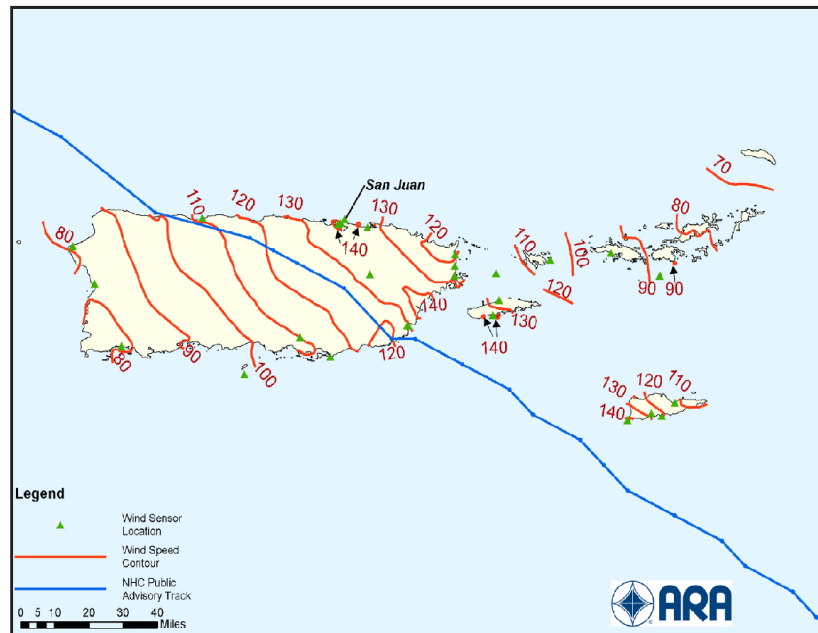


Figura 5: Velocidades estimadas de ráfagas de viento producidas por el Huracán María (“Mitigation Assessment Team” – FEMA, 2018).

Si se buscan las velocidades de ráfaga esperadas e intensidad de vientos sostenidos para un huracán de esta categoría, se puede observar que, de acuerdo con el estándar ASCE 7, se esperan ráfagas de viento sobre el mar de 195 mph hasta 191 mph sobre la tierra, según puede verse en la Figura 6. Llama la atención que las ráfagas reportadas por los estudios previos sean significativamente menores que las que indica el ASCE 7 para un huracán de la misma categoría.

TABLE C6-2 APPROXIMATE RELATIONSHIP BETWEEN WIND SPEEDS IN ASCE 7 AND SAFFIR/SIMPSON HURRICANE SCALE

Saffir/Simpson Hurricane Category	Sustained Wind Speed Over Water ^a		Gust Wind Speed Over Water ^b		Gust Wind Speed Over Land ^c	
	mph	(m/s)	mph	(m/s)	mph	(m/s)
1	74–95	33.1–42.5	91–116	40.7–51.9	82–108	36.7–48.3
2	96–110	42.6–49.2	117–140	52.0–62.6	109–130	48.4–58.1
3	111–130	49.3–58.1	141–165	62.7–73.8	131–156	58.2–69.7
4	131–155	58.2–69.3	166–195	73.9–87.2	157–191	69.8–85.4
5	> 155	> 69.3	> 195	> 87.2	> 191	> 85.4

Figura 6: Relación aproximada entre velocidades de vientos sostenidos y ráfagas de diseño para diferentes categorías de huracanes (ASCE-7, 2005).

El propósito de la presente investigación fue identificar fallas estructurales relativamente simples, para poder realizar estudios que permitieran estimar las velocidades de ráfaga que producirían dichas fallas, y verificar si son del mismo orden que las reportadas en estudios previos, o más altas. De esta manera se espera contribuir positivamente a cuantificar el huracán María y poder utilizar esta cuantificación en futuros estudios de velocidades de diseño en la Isla.

METODOLOGÍA

En esta sección se presentan los pasos seguidos para llevar a cabo la investigación, la cual consistió básicamente en cinco etapas: (a) identificar casos de estudio con potencial de ser usados para el objetivo, (b) realizar visitas de campo para levantar datos, (c) tomar muestras y hacer pruebas de laboratorio para caracterizar el material, (d) analizar la falla para determinar la velocidad de vientos, y (e) comparar los resultados con las velocidades reportadas en otros estudios (presentada en la sección de análisis de resultados).

Identificación de casos potenciales de estudio

Luego del paso del huracán María, se procedió a realizar visitas de campo a diferentes partes de la isla, identificando y documentando diversidad de daños estructurales y de suelos. Entre la enorme cantidad de fallos encontrados, se identificaron cuatro elementos de la infraestructura de transportación con potencial de ser estudiados profundamente y asociar la falla con las velocidades de viento requeridas para producirlas. Estos son:

- a) Fallas de fractura de placas de conexión en carteles de información apoyados en postes de acero de sección W (Figura 7);
- b) Fallas en postes de carteles pequeños de información. Para estos casos, el tipo de falla dependía del tipo de poste. Las fallas fueron causadas por flexión en el rango plástico para postes tubulares de sección cuadrada y por pandeo lateral flexo-torsional en el rango plástico para postes de sección canal (Figura 8);
- c) Fallas por torsión en la base de carteles de información sobre cerchas en voladizo (Figura 9);
- d) Fallas por flexión lateral en el rango plástico de puentes peatonales conformado por cerchas de acero (Figura 10).

Todos estos casos han estado siendo estudiados por los pasados dos años. A continuación, se presentan los resultados correspondientes al primer caso (a).



Figura 7: Falla por fractura en pacas de carteles sobre postes de acero de sección W.



Figura 8: Falla por flexión y pandeo lateral flexo-torsional en carteles apoyados en postes de tubulares cuadrados y de sección canal.



Figura 9: Falla por torsión en la base de carteles tipo cercha sobre postes en voladizo.

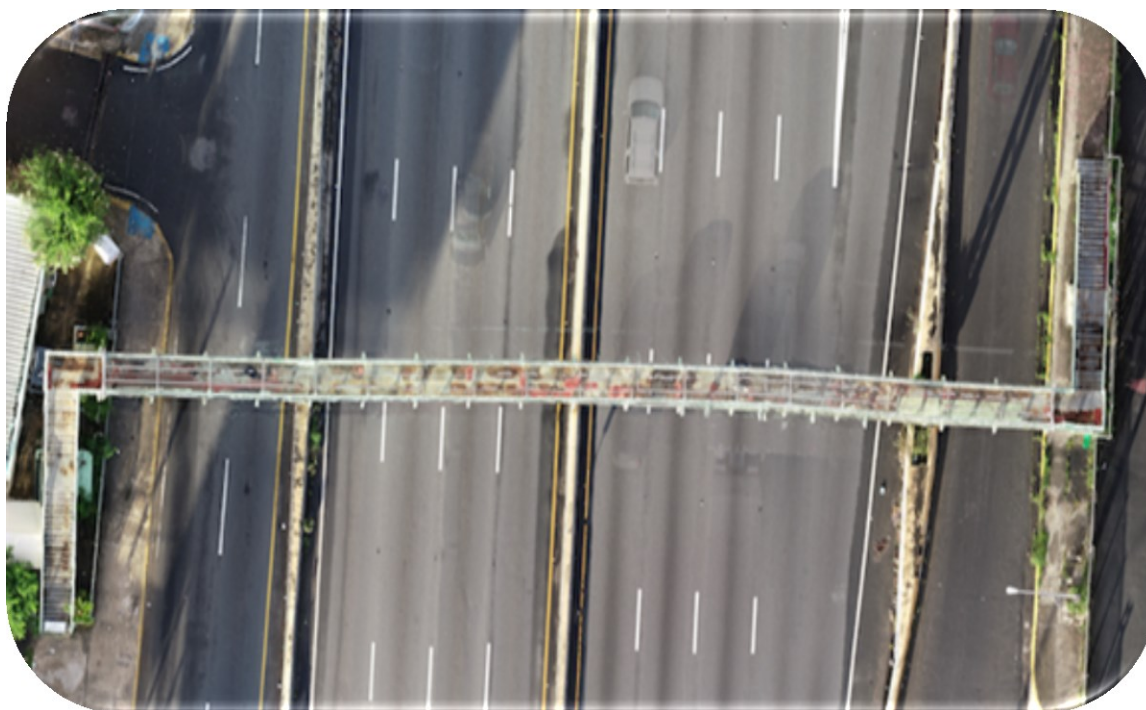


Figura 10: Falla en puente de acero por flexión lateral inelástica.

Descripción general del caso de estudio y obtención de datos de campo

El caso de estudio corresponde al de fallas de carteles sobre postes de acero de sección W por fractura de la placa de conexión perforada. Esta placa es utilizada como parte del sistema de seguridad del letrero ante impactos vehiculares. Luego de diversos ejemplos identificados del caso bajo estudio, se procedió a seleccionar tres casos y a tomar todas las medidas pertinentes de los carteles, como dimensiones de la superficie expuesta al viento, altura y área seccional de los postes, localización de la falla, medidas de las placas que fallaron, condición del terreno, condición circundante, entre otras. La Figura 11 presenta el primero de los ejemplos analizados, localizado en la carretera PR 30, en el Km 28.3, con coordenadas $18^{\circ} 8' 10.75''$ N y $65^{\circ} 49' 40.27''$ O, a una elevación de 38m sobre el nivel del mar. La Figura 12 presenta un esquemático con una síntesis de las dimensiones relevadas para este primer ejemplo. La Figura 13 presenta el segundo de los ejemplos analizados, localizado en la carretera PR 30, en el Km 7.8, con coordenadas $18^{\circ}14'57.83''$ N y $65^{\circ}58'5.58''$ O, a una elevación de 74m sobre el nivel del mar. El tercer ejemplo fue presentado en la Figura 7, y está localizado sobre la carretera 1, Km 31.4, en las coordenadas $18^{\circ}15'56.69''$ N y $66^{\circ} 2'21.23''$ O, a una elevación de 72m sobre el nivel del mar. Se puede observar en la Figura 7 que este ejemplo consistía en varios carteles de distintos tamaños apoyados a un único poste.



Figura 11: Ejemplo 1 – Cartel sobre carretera Puerto Rico 30, Km 28.3.

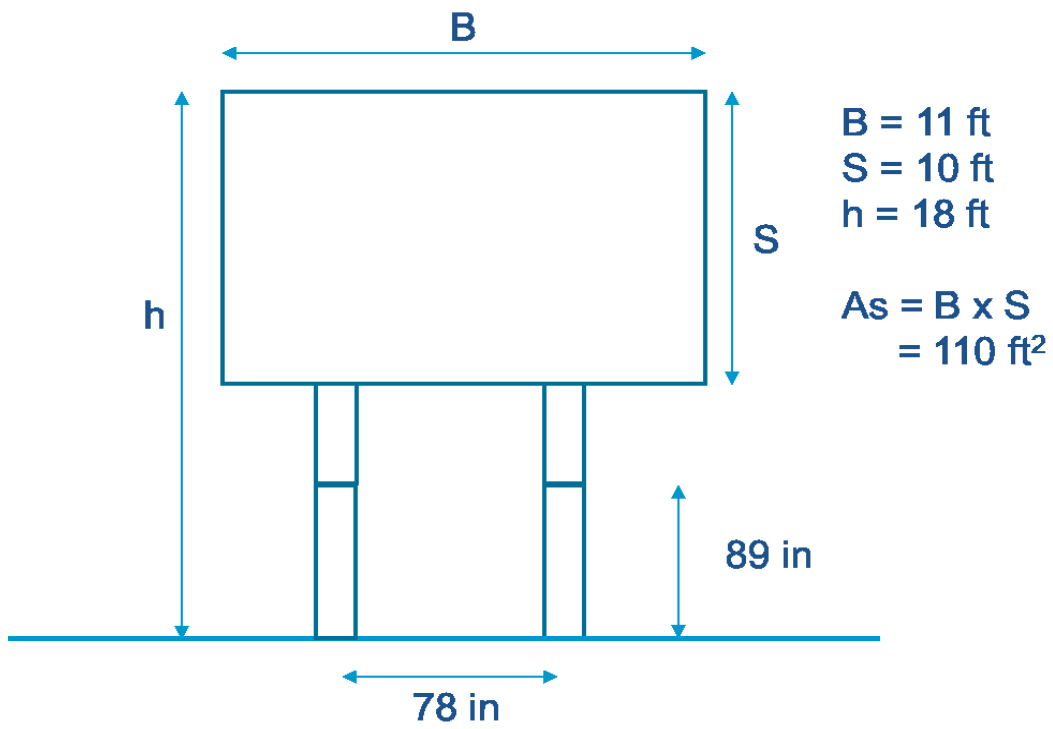


Figura 12: Medidas de campo del ejemplo 1.



Figura 13: Ejemplo 2 – Cartel sobre carretera Puerto Rico 30, Km 7.8.

Obtención de placas fracturadas y pruebas de laboratorio

Para los ejemplos 1 y 3 se coordinó con la Autoridad de Carreteras y Transportación (ACT) de Puerto Rico la extracción de las placas fracturadas (Figura 14). Se analizó el modo de falla, encontrando ninguna evidencia de fatiga; la falla fue por fractura brusca en tensión. De cada placa fracturada se sacaron cuatro probetas (dos de cada mitad) mediante corte en frío con jet de agua a presión, para no afectar las propiedades mecánicas del acero. Estas probetas fueron sometidas a ensayos de tensión, utilizando una máquina Instron 300DX, para determinar la curva esfuerzo deformación, y el esfuerzo último (de fractura) del acero. La Figura 15 muestra el proceso de ensayo y la Figura 16 presenta las probetas del Ejemplo 1 luego de ensayadas. Las Tablas 2 y 3 resumen los resultados de estos experimentos. Para el primer ejemplo, se eliminó uno de los resultados de laboratorio, ya que hubo problemas de deslizamiento durante el ensayo y los resultados se consideraron no válidos.



Figura 14: Obtención de placas.



Figura 15: Prueba de tensión.



Figura 16: Probetas del ejemplo 1 luego de ensayadas.

Tabla 2: Resultados de la prueba de tensión – ejemplo 1.

Probeta	Carga Pico [lb]	Esfuerzo Último, F_u [psi]
LTT	17387	68604
LTB	15727	62051
LBB	17104	67488
LBT	16862	66530
RTB	14478	59012
RBB	15290	62322
RBT	15146	61734

Tabla 3: Resultados de la prueba de tensión – ejemplo 3

Probeta	Carga Pico [lb]	Esfuerzo Último, F_u [psi]
TB	18,822	71,667
BB	18,822	71,640
BT	18,785	71,148
TT	18,021	70,392

Análisis de fallas y velocidad de viento

La Figura 17 presenta el modelo utilizado para determinar las presiones de viento requeridas para producir la falla. En el modelo se despreció la capacidad flexional de la placa posterior que permaneció conectada y el peso de los elementos, y se asumió una presión de viento constante en el cartel (de manera consistente con el modelo usado en la estándar ASCE 7 para cargas de vientos sobre letreros). La nomenclatura aplicable es la siguiente:

A_S = área del cartel

S = altura del cartel

B = ancho del cartel

h = altura desde el nivel del terreno al tope del letrero

d_t = brazo de palanca de la fuerza en tensión, desde el borde del perfil W al centro de la placa fracturada; equivale a la suma de la profundidad del perfil, d , más medio espesor de placa, $t/2$

d_w = brazo de palanca de la fuerza de presión de viento, desde el plano de fractura al centro del cartel

A_t = área total de la placa en tensión en el plano de fractura; equivale a la sumatoria del espesor de la placa t por los anchos netos de la placa en el plano de fractura b_n

F_w = fuerza total del viento sobre el letrero

P_w = presión del viento sobre el letrero

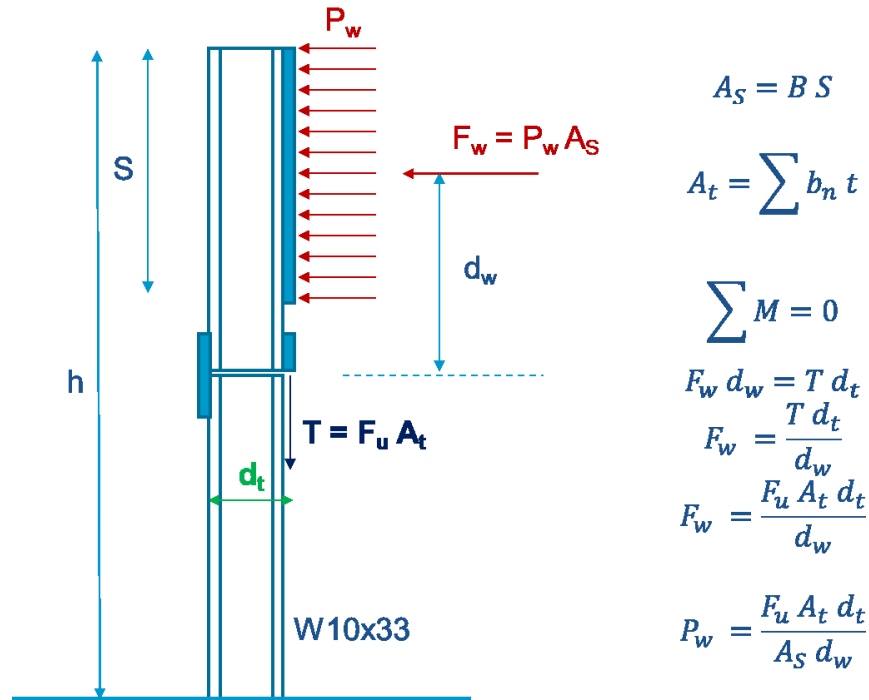


Figura 17: Modelo de falla para obtener la presión de viento.

Seguendo el estándar ASCE 7-05 (con una metodología similar al ASCE 7-10 y ASCE 7-16), en su sección 6.5.14, cargas de viento en letreros sólidos y asumiendo una Exposición C, se puede encontrar la presión dinámica del viento en el tope del cartel, según se deduce en las siguientes ecuaciones:

$$F_w = q_h G C_f A_s \quad (1)$$

$$P_w = \frac{F_w}{A_s} = q_h G C_f \rightarrow q_h = \frac{P_w}{G C_f} = \frac{P_w}{A_s G C_f} \quad (2)$$

Donde:

F_w = fuerza de viento F sobre el cartel, según la ecuación 6-27 del estándar ASCE 7/05

q_h = presión dinámica del viento en el tope del letrero en psf

C_f = coeficiente de presión (o de fuerza), que se obtiene por doble interpolación de la Figura 6-20 del ASCE 7-05, de acuerdo a las razones de aspecto del cartel S/h y B/S . Para el Ejemplo 1 resultó 1.7172

G = factor de ráfaga, obtenido del procedimiento en la sección 6.5.8.1 del ASCE 7/05, para estructuras rígidas. El período natural del Ejemplo 1 resultó alrededor de 0.2 segundos (menor que 1 segundo, por lo cual se considera rígida la estructura), y G resultó 0.897

Una vez obtenida q_h , se puede obtener la velocidad del viento a la altura h (tope del cartel), y luego llevarla a la altura estandarizada de 33 pies, considerando el ajuste del perfil de velocidades con la altura, según las siguientes expresiones:

$$K_z = 2.01 \left(\frac{z}{900} \right)^{2/9.5} \quad (3)$$

$$V = \sqrt{\frac{q_h}{0.00256 K_z}} \quad (4)$$

Donde:

K_z = coeficiente de ajuste del perfil de velocidades con la altura, según la tabla 6-2 del estándar ASCE 7/05

V = velocidad de la ráfaga de viento a 33 pies de altura, de acuerdo a la ecuación 6-16 del estándar ASCE 7/05

La Tabla 4 resume los resultados obtenidos para la velocidad de viento en los tres ejemplos analizados. Para los Ejemplos 1 y 2 se hicieron dos análisis: el caso (a) despreciando el efecto del cartel de salida ubicado sobre el letrero (la Figura 18 muestra el Ejemplo 1 con cartel de “SALIDA 28”); el caso (b) considerando el cartel de salida como un añadido a la altura S del cartel, y obviando las pequeñas excentricidades generadas. Se considera que, debido a la flexibilidad de las conexiones de estos carteles de salida con el rótulo original, la velocidad que produjo la falla está entre los dos valores obtenidos. Cabe aclarar que para el Ejemplo 2 no se hicieron pruebas de laboratorio, se usó el esfuerzo último del caso uno, y todas las medidas fueron tomadas en el campo. Para el Ejemplo 3, el cual consistía en un poste apoyando varios carteles de distintos tamaños, se asumió que todos los carteles formaban un solo cartel con un ancho de 4.39 pies y altura de 18.5 pies, según se muestra en la Figura 19.

Tabla 4: Datos y resultados de los tres ejemplos.

		Ejemplo 1 Caso a	Ejemplo 1 Caso b	Ejemplo 2 Caso a	Ejemplo 2 Caso b	Ejemplo 3
Datos (campo y laboratorio)	A_t [in²] =	1.6763	1.6763	1.414	1.414	0.6819
	d [in] =	9.75	9.75	9.75	9.75	9.75
	d_t [in] =	9.9785	9.9785	9.9935	9.9935	10
	d_w [in] =	67	75.7273	58	67.1429	118
	B [ft] =	11	11	10.5	10.5	4.39
	S [ft] =	10	11.4545	8.5	10.0238	18.5
	h [ft] =	18	19.4545	13.6	15.1238	25
Cómputos	F_u [psi] =	62,634	62,634	62,634	62,634	71,212
	F_w [lb] =	15,636.70	13,834.70	15,259.81	13,181.88	4,115.21
	P_w [psf] =	142.152	109.7989	170.9783	125.2435	50.6705
	C_f =	1.7172	1.7074	1.6757	1.6662	1.7325
	G =	0.897	0.8962	0.8998	0.8989	0.8968
	K_z =	0.8821	0.8967	0.8316	0.8504	0.9453
	V_(h) [mph] =	183.83	167.43	210.46	180.73	112.87
V_(33 ft) [mph] =	202.16	176.81	230.79	195.99	116.09	



Figura 18: Vista del ejemplo 1 con el cartel de salida.

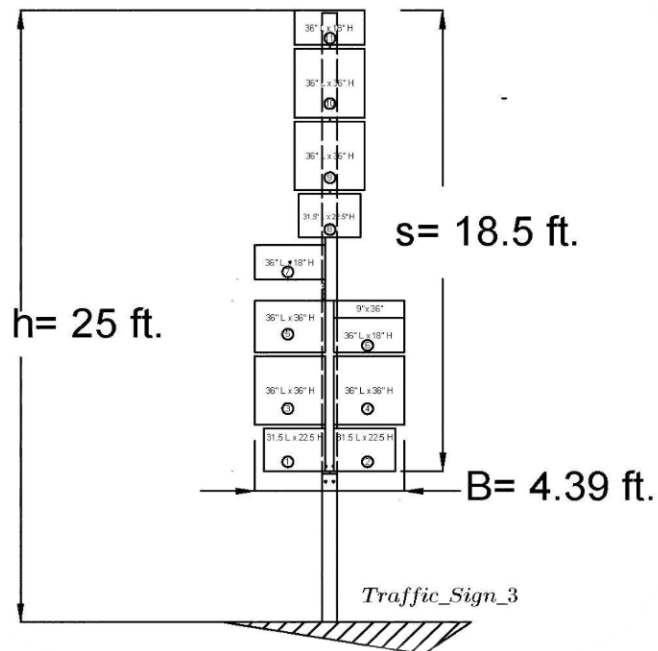


Figura 19: Dimensiones asumidas para el ejemplo 3.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

De los Ejemplos 1 y 2, para el caso b de análisis, se obtuvieron velocidades de ráfaga necesarias para producir la falla en el rango de 177 a 196 mph, cónsonas con las velocidades máximas esperadas para un huracán de la categoría de María (157-191 mph, Figura 6). Esto permite inferir que los carteles de los Ejemplos 1 y 2 fallaron ante ráfagas máximas de María, mientras que el cartel del Ejemplo 3 falló para ráfagas menores que las máximas.

La Figura 20 presenta el mapa de velocidades de ráfagas de viento del informe del “Mitigation Assessment Team” (2018) y la localización aproximada de los tres ejemplos desarrollados (indicados por un círculo azul, con el número del ejemplo). Se puede observar que las velocidades presentadas por el informe para las tres localizaciones están en un rango entre 130 y 140 mph, y son significativamente menores a las obtenidas por este análisis de fallas en letreros de los Ejemplos 1 y 2.

En el caso del Ejemplo 3, asumir que el conjunto de carteles de comportaría como un solo cartel con un ancho y altura que encapsule los carteles pequeños debe haber provocado que la velocidad estimada sea significativamente más baja que la que realmente debe haber ocasionado la falla. Una investigación más profunda de este caso debe arrojar un estimado de velocidad de viento más alta.

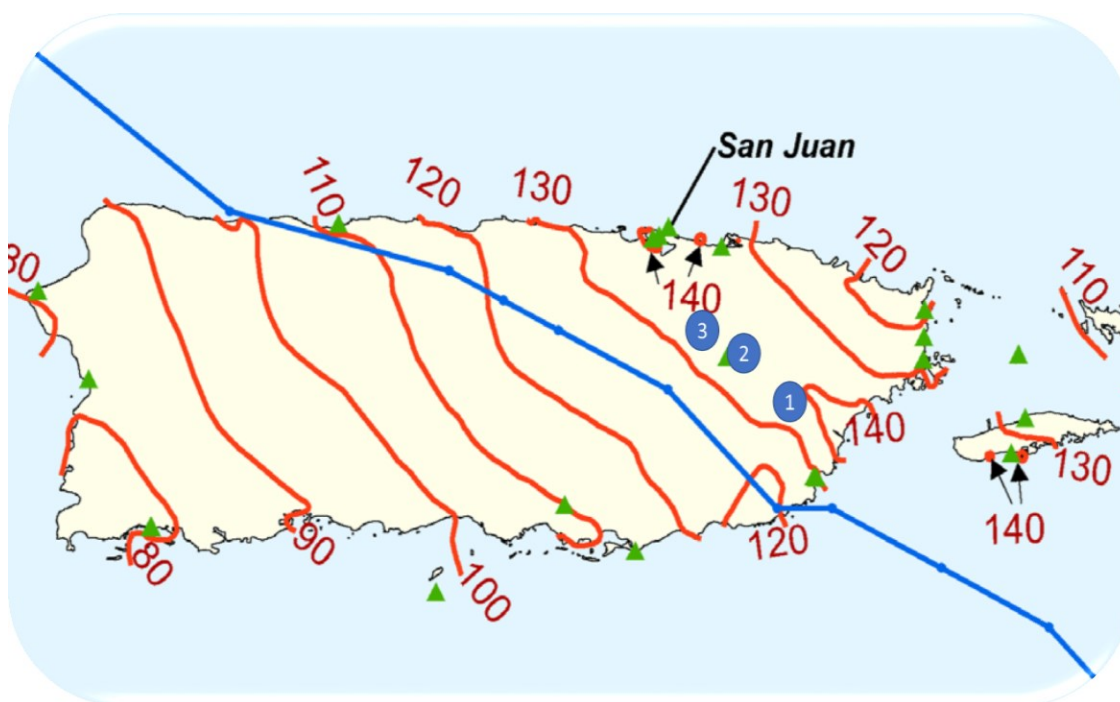


Figura 20: Localización aproximada de los ejemplos 1, 2 y 3 en el mapa de velocidades de ráfaga estimado por el MAT (2018).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio pudo hacer un análisis detallado de fallas de estructuras de letreros de información en carreteras, y usarlas para determinar las velocidades de ráfaga que produjeron esas fallas. La metodología que se usó para estimar las velocidades de ráfaga que produjeron la falla fue siguiendo las recomendaciones del ASCE-7 05/10/16, de manera que es consistente con los pasados y actuales códigos de diseño en PR.

Los resultados obtenidos de velocidades de ráfaga que produjeron la falla resultaron mayores que las velocidades de ráfaga reportadas por el “Mitigation Assessment Team” – FEMA (2018). Esto sugiere que dicho estudio podría estar subestimando las velocidades de ráfaga que produjo María. Esto a su vez puede afectar la interpretación de su impacto, y el uso de los datos que María para establecer velocidades de diseño en Puerto Rico.

Se están desarrollando otros estudios (como se presentó en la metodología) que se espera puedan contribuir con análisis adicionales. Se recomienda el uso de estos resultados para ajustar los estimados de ráfagas por María, y reevaluar los modelos que se usan a tal fin.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue realizado con la colaboración de los estudiantes graduados Antonio J Roig (caso de estudio 1), Guillermo López (caso de estudio 2), Geoffrey Vega (caso de estudio 3) y Nelson Sotelo (caso de estudio 4), y el técnico de laboratorios Salvado Montilla (pruebas de tensión en las probetas, y visitas de campo).

Agradecemos a la Autoridad de Carreteras y Transportación (ACT) de Puerto Rico por su apoyo, autorización y colaboración en la obtención de muestras para poder hacer las pruebas de laboratorio. Agradecemos además a la Universidad de Rutgers, y su “Center for Advanced Infrastructure & Transportation (CAIT)”, quien lidera el consorcio que forma el “University Transportation Center” de la Región dos (2) de la “Federal Highway Administration” (FHWA), quien financió la participación de los estudiantes graduados y la facultad en los proyectos. Finalmente, agradecemos a la Universidad Politécnica de Puerto Rico (UPPR) por el uso de las instalaciones y el apoyo.

REFERENCIAS

- ASCE 7 (2005). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
- Cruzado, H. J.; Pacheco-Crosetti, G. E. (2018). Structural Damages due to Hurricane María, Mega Viernes Civil 2018. Retrieved from <http://megaviernes.com/presentaciones-2018/>
- Hubbard, S. (2017). Maria Advisory 18 - Estimated Peak Wind Gust by Census Tract, Space Science and Engineering Center, Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, University of Wisconsin – Madison.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), (s.f.). Historical Hurricane Tracks - GIS Map Viewer. Retrieved from <https://www.climate.gov/maps-data/dataset/historical-hurricane-tracks-gis-map-viewer>
- Mitigation Assessment Team (United States. Federal Emergency Management Agency). (2018). Hurricanes Irma and Maria in Puerto Rico: Building performance observations, recommendations, and technical guidance.
- Pacific Disaster Center – PDC (2017). Hurricane Maria – Exposure Based on Observed Wind Impacts.
- US Department of Commerce (USDC), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Weather Service (NWS). (2017, November 29). Major Hurricane Maria -September 20, 2017. Retrieved January 30, 2018, from <http://www.weather.gov/sju/maria2017>.