

Caso de Estudio de Residencia Unifamiliar de Hormigón Reforzado Afectada por los Vientos del Huracán María

*Abner Fernández Pérez
Maestría en Ingeniería Civil
Héctor J. Cruzado, Ph.D.
Departamento de Ingeniería Civil, Ambiental y Agrimensura
Universidad Politécnica de Puerto Rico*

Abstracto — *Tras el paso del Huracán María por Puerto Rico, se reportó un solo caso de falla estructural para una vivienda unifamiliar (casa) donde su construcción se basa en hormigón y mampostería reforzada presentando daños estructurales en la losa de techo. Debido a la falla reportada en la losa de techo, se verificó si la sección mediante cargas de servicio presentaba señales de fallas. Como resultado, la sección no se ve afectada mediante cargas de servicios, pero sí se demuestra, en el análisis de este estudio, señales de fallas ante las cargas de viento presentadas por el evento atmosférico. Con el cálculo del momento de agrietamiento, se realizó un análisis y se determinó qué presión necesaria para producir la falla debió haber sido producida por una velocidad de ráfaga de viento de 391 mph.*

Términos claves – *Cargas de Viento, Hormigón Reforzado, Ingeniería Estructural.*

INTRODUCCIÓN

El 20 de septiembre de 2017, el Huracán María entró a Puerto Rico por la costa sureste como un huracán de categoría cuatro con vientos sostenidos de aproximadamente 155 mph. Como impacto directo del huracán, todo tipo de infraestructura fue afectada, incluyendo fallas mayores de los sistemas de transmisión y distribución eléctrica.

En Puerto Rico, las residencias unifamiliares están comúnmente construidas con una de las siguientes combinaciones de materiales:

- Hormigón reforzado con algunas paredes de bloques.
- Paredes en madera con techos de armazón de madera recubiertos con planchas de zinc.

- Construcciones mixtas (paredes de hormigón o bloques con techos de madera y zinc).

Tras el paso del Huracán María se pudo observar que la gran mayoría de casas de madera o construcciones mixtas presentaban daños estructurales como:

- Colapso de la estructura debido a la fuerza de los vientos.
- Pérdida del techo (arrancado por los vientos).

En contraste, las estructuras residenciales cuyos materiales principales de construcción es el hormigón y mampostería reforzada presentaron un comportamiento resistente a la fuerza de los vientos con excepción de fallas reportadas en elementos no estructurales como puertas o ventanas.

La excepción a la regla lo es una residencia de hormigón y mampostería reforzada objeto de este estudio y localizada en Yabucoa. La mencionada estructura fue seleccionada como caso de estudio ya que fue la única estructura en la isla que reportó daños en elementos estructurales de hormigón causados por los vientos del huracán. El objetivo de este proyecto es determinar las causas de la falla, incluyendo la velocidad de viento que produjo la misma.

HURACÁN MARÍA

Con una presión de 917 milibares, reportado como categoría cuatro en la Escala Saffir-Simpson, el Huracán María hizo su llegada a Puerto Rico a las 6:15 am del 20 de septiembre de 2017 por el municipio de Yabucoa, localizado en la parte suroeste de la isla, según se muestra en la Figura 1. El paso del fenómeno atmosférico tuvo una duración en la isla de más de 12 horas continuas,

haciendo su salida por el municipio de Camuy, localizado en la parte norte de la Isla [1].

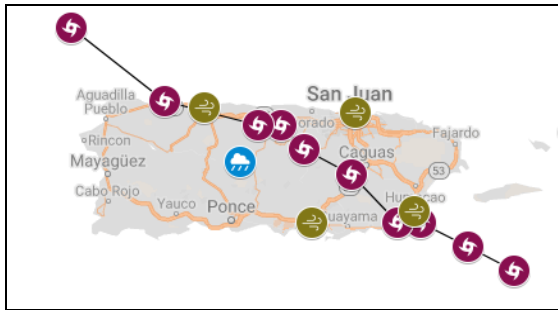


Figure 1
Trayectoria del Huracán María por Puerto Rico

En su paso por Puerto Rico, María tuvo vientos sostenidos de 155 mph, ráfagas que sobrepasaron 200 mph, un ojo con un diámetro aproximado de 25 millas y acumulación de lluvia de 40 pulgadas en 48 horas. El huracán causó severas inundaciones en toda la isla (zonas costeras y no costeras), deslizamientos mayormente en la zona central de la isla y daños severos a la infraestructura eléctrica. Los daños reportados tras el paso del fenómeno atmosférico sobre la isla se estiman entre \$94 billones [2] a \$102 billones de dólares [3].

DESEMPEÑO DE RESIDENCIAS UNIFAMILIARES

La selección de materiales para la construcción de viviendas unifamiliares en Puerto Rico es una consideración que la determina mayormente el factor económico [4]. Esto también afecta de una manera directa si la construcción ha de ser realizada siguiendo los códigos de construcción vigentes. En términos monetarios, una residencia en hormigón suele ser mucho más costosa que una en madera, pero suelen ser mucho más resistentes ante los huracanes.

Después del impacto del Huracán María, los daños asociados a la fuerza y velocidad del viento se vieron reflejados mayormente en estructuras de madera [4]. Estas residencias carecían de soportes estructurales continuos para que la estructura presente un comportamiento adecuado mediante cargas gravitatorias y laterales [4].

Por otra parte, el desempeño mostrado por residencias en hormigón incluyendo sus techos fue uno resistente ante la carga de viento. En términos generales, para estructuras de hormigón y mampostería reforzada, los daños más comunes fueron daños a ventanas, revestimientos y filtración de agua [4].

CASO DE ESTUDIO

Tras el paso del fenómeno atmosférico, se reportó un solo caso de falla de una vivienda unifamiliar la cual presentaba daños estructurales en elementos de hormigón reforzado debido a cargas de viento. La casa que reportó la falla estructural se encuentra localizada en el Municipio de Yabucoa, municipio por donde el ojo del huracán hizo su entrada a Puerto Rico. La vivienda está localizada en las siguientes coordenadas:

- Latitud: 18.0248°
- Longitud: -65.8559°

Según se presenta en la Figura 2, se observa cómo la presión de viento levanta la losa de techo la cual contaba con un espesor de 4.375 pulgadas.



Figura 2
Falla en Losa de Techo

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La estructura se describe como un pórtico de hormigón reforzado donde los elementos estructurales que transmiten cargas gravitatorias, laterales y presión de vientos son vigas y columnas. Como elementos no estructurales, se encuentran

paredes de mampostería reforzadas pero las mismas actúan como paredes de relleno.

La ubicación geográfica de la residencia es una de carácter montañosa con una elevación sobre el nivel del mar de 893 pies y se encuentra aproximadamente a una milla de distancia del mar, según presenta la Figura 3. Además, la estructura ocupa un área aproximada de 45 pies por 38 pies donde el área de falla contaba con seis columnas de hormigón reforzado a una distancia de 8.33 pies y un ancho de 11.5 pies, según se presenta en la Figura 4.



Figura 3
Vista Parcial de la Topografía y Cercanía al Mar

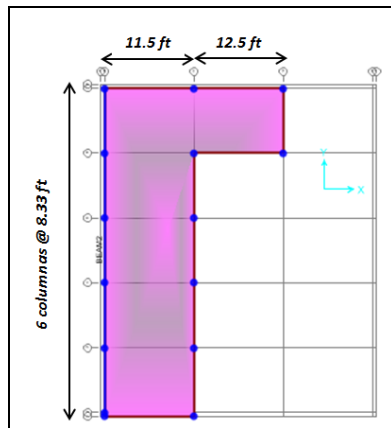


Figura 4
Distribución de Planta Existente

Según el propietario, la casa era originalmente una estructura más pequeña para la cual el techo se expandió para cubrir un balcón en la parte trasera y parte de la marquesina existente en uno de los lados de la casa. La expansión del techo que cubrían estas nuevas áreas se ancló dando continuidad al techo existente (original) de la casa. La expansión del

techo que cubría el balcón y parte de la marquesina fue levantada por el huracán, incluso rompiendo parte del techo original de la estructura, según se puede apreciar en la Figura 5.



Figura 5
Vista Aérea Antes (arriba) y Después (abajo) del Huracán

La losa de techo que falló contaba con un espesor de 4.375 pulgadas. En la dirección principal tenía varillas de refuerzo de acero No. 4 a 8 pulgadas de separación, (ver Figura 6). En la dirección secundaria tenía varillas No. 3 a 11 pulgadas de separación, (ver Figura 7). El refuerzo tenía una protección de 0.75 pulgadas.



Figura 6
Varilla No. 4 a 8 Pulgadas



Figura 7
Varilla No. 3 a 11 Pulgadas

Según el comportamiento que presentó la losa de techo, se puede observar mediante la Figura 8 que esta losa de techo no se encontraba anclada a las vigas del pórtico y que el largo de desarrollo de las varillas de las columnas era muy corto. En otras palabras, la losa sólo respondía a cargas gravitatorias.



Figura 8
Falta de Conexión Entre Losa y Pórtico

Se tomaron muestras de los materiales para identificar algunas de sus propiedades mecánicas. Mediante pruebas de martillo y pruebas de compresión, se determinó que los hormigones de la

losa original y nueva tenían resistencias en compresión mayores a 3000 psi. Mediante pruebas de tensión, se determinó que las varillas de refuerzo de la losa nueva demostraron ser Grado 60. La varilla de refuerzo de la losa original no tiene la rugosidad de las varillas modernas, por lo que no se pudo determinar su capacidad en tensión porque la muestra se deslizaba en la máquina.

PRESIÓN DE VIENTO SEGÚN CÓDIGO

Se estimaron las cargas de viento de acuerdo con el estándar ASCE7-16 [5]. Como la losa que falló, en su mayoría, no tenía paredes, se asumió que la estructura era una abierta, de esta forma descartando el efecto que pudo haber tenido las paredes de la casa original. Se tomaron en cuenta las siguientes variables:

- V – velocidad básica del viento, ráfaga de 3 segundos a 33 pies de altura sobre el terreno
- K_z – coeficiente de presión de velocidad y exposición
- K_{zt} – factor de efecto topográfico
- K_d – factor de direccionalidad de viento
- K_e – Factor de elevación del terreno sobre el nivel del mar
- G – factor de ráfaga
- C_N - Coeficiente de presión neta que se utiliza para determinar cargas de viento en edificios abiertos

La Tabla 1 presenta todas las variables antes mencionadas con sus respectivos valores y secciones en que son discutidas en el estándar. Se debe aclarar lo siguiente:

- Se asumió una Categoría de Riesgo II.
- Para la velocidad V , se utilizó la página del *Applied Technology Council* [6]. Esta página indica V ya considerando los efectos topográficos. Por lo tanto, se toma $K_{zt} = 1.0$.
- Dado que K_d es un factor que mide la probabilidad de que el viento sopla en su mayor velocidad en la dirección más vulnerable de la estructura, se descartó este factor asumiendo un valor de 1.0.

Tabla 1
Parámetros para Cálculo de Cargas de Viento

Parámetro	Valor	Sección
V (mph)	230	26.5
K_d	1	26.6
Exposición	C	26.7
K_{zt}	1.000	26.8
K_e	0.97	26.9
K_z	0.85	26.10
G	0.85	26.11
C_N	1.2	26.13

La presión de dinámica del viento (q_z) se calcula en libras por pies cuadrados (psf) de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$q_z = 0.00256 K_z K_{zt} K_d K_e V^2 \quad (1)$$

Mientras tanto, la presión de diseño para las cargas de viento (P) se calcula de acuerdo a la siguiente formula:

$$P = q_z G C_N \quad (2)$$

Utilizando (1) y (2) se obtuvo una presión de diseño de 114 psf.

ANÁLISIS DE FALLA

Para poder determinar a qué velocidad de viento inicial la losa de techo presenta señales de falla hasta que la misma es levanta por la fuerza del viento, se verificó primero si la sección presentaba alguna falla o grieta mediante cargas de servicios utilizando los cálculos (3) y (4) [7].

$$f_r = 7.5\lambda\sqrt{f'_c} \quad (3)$$

$$f = \frac{MY}{I} \quad (4)$$

Dónde:

- f_r = módulo de ruptura del hormigón
- λ = factor de modificación en caso de usar hormigón liviano, 1.0 para hormigón normal
- f'_c = resistencia en compresión del hormigón. Se asumió un valor de 3000 psi.
- f = fuerza de tensión en la fibra extrema

- M = momento máximo en la sección
- Y = distancia del centroide de la sección a la fibra extrema
- I_g = momento de inercia de la sección, despreciando el refuerzo.

En el caso de que f sea menor que f_r , la sección no debe presentar fisuras. Si f es mayor que f_r , la sección se considera una agrietada.

Para determinar si la losa presenta alguna falla o fisura, se consideraron las cargas de servicios en la estructura, entendiéndose carga muerta y momentos máximo debidos al viento. La carga muerta considerada es el peso propio de la losa de techo y para determinar el momento máximo en la estructura debido al viento se consideraron las siguientes opciones:

- La losa está fija a un extremo y simplemente soportado al otro con un momento máximo de acuerdo con (5).
- La losa de techo actúa como un voladizo con un momento máximo de acuerdo con (6).

$$M_{\max} = \frac{Wl^2}{8} \quad (5)$$

$$M_{\max} = \frac{Wl^2}{2} \quad (6)$$

Se tomaron en cuenta dos posibles momentos máximos en la sección debido a la conexión entre la losa de techo y la viga. La losa nueva está anclada en un extremo a la losa vieja, mientras que en el otro extremo descansa sobre un pórtico. Considerando que hay muy poco amarre entre la losa y el pórtico, la losa actuaría en voladizo en el caso de que la presión de viento hacía arriba sea mayor que la carga gravitatoria.

Para propósitos de análisis, se tomó una franja de la losa de un pie de ancho. Considerando únicamente la carga muerta, se obtuvo un momento máximo de 0.904 k-ft. Considerando la combinación de carga muerta con carga de viento, se obtuvo un momento máximo de 2.79 k-ft. Ambos momentos fueron calculados con (5).

Ya teniendo los momentos máximos, se procedió a comparar el comportamiento de la sección mediante a cargas de servicios y cargas de viento.

- Fuerza en tensión permitida: $f_r = 411$ psi
- Fuerza en tensión actuando en la sección (caso de carga muerta): $f = 283$ psi
- Dado a que $f < f_r$, la sección no presenta ninguna falla para el caso de carga muerta.
- Fuerza en tensión actuando en la sección (caso de carga muerta más carga de viento): $f = 873$ psi
- Dado que $f > f_r$, se puede concluir que la sección falla o se fisura debido a momento máximo de la carga de viento actuando en la sección.

Calculando los momentos máximos con (6), se obtuvo un momento máximo para el caso de carga muerta de 3.6 k-ft. Considerando la combinación de carga muerta con carga de viento, se obtuvo un momento máximo de 11.2 k-ft

- Fuerza en tensión permitida: $f_r = 411$ psi
- Fuerza en tensión actuando en la sección (caso de carga muerta) $f = 1,133$ psi
- Dado a que $f > f_r$ se puede concluir que la sección falla o se fisura debido para el caso de carga muerta.

Para efectos de este caso de estudio, se asumió que la losa de techo mediante cargas de servicio no presenta ninguna señal de falla y que la misma se presentan ante la presión de viento del Huracán María.

Conociendo en base a qué comportamiento la losa de techo falla (fija a un extremo y simplemente soportado al otro), se calculó el momento de agrietamiento en la sección de acuerdo con (7).

$$M_{cr} = \frac{f_r I g}{Y} \quad (7)$$

Considerando el termino de f_r como la fuerza de tensión permitida en la fibra de 411 psi.

En los cálculos anteriores, la losa de techo presenta señales de falla para una sección de un

ancho de 12 pulgadas. Para poder determinar la fuerza necesaria de falla de la losa de techo, se utilizó el ancho total de la losa de 12 pies aproximadamente. Esta consideración del ancho de la base toma lugar para el cálculo de la inercia en la ecuación del momento “cracking”, ya que la inercia se puede definir como la fuerza necesaria para que un objeto en reposo tenga movimiento o rotación. Teniendo en cuenta el ancho total a considerar, se calculó el momento de agrietamiento para el ancho total de la losa, obteniéndose 20.8 k-ft.

Para poder determinar la fuerza inicial o mínima requerida para que la losa de techo presente señales de falla se utilizó (8) y se despeja para la variable W_w la cual representa la carga de viento. En esta ecuación, W_D representa la carga muerta.

$$M_{cr} = -\frac{W_D l^2}{8} + \frac{W_w l^2}{2} \quad (8)$$

El desarrollo de (8) considera que, para las cargas gravitatorias, el pórtico representa un apoyo, pero no es así para el caso de cargas de viento hacia arriba. Resolviendo (8) se obtuvo $W_w = 329$ psf.

De vuelta al ASCE7-16, se utilizó la presión de viento obtenida con (8) para estimar la velocidad de viento que produjo la falla. Combinando (1) y (2) y despejando para la velocidad V , se obtiene (9).

$$V = \sqrt{\frac{P}{G * C_N}} \sqrt{\frac{0.00256 K_z K_{zt} K_e}{z}} \quad (9)$$

Igualando W_w a P , se obtiene una velocidad de $V = 391$ millas por horas. Se debe considerar que esta velocidad ya considera los efectos de la topografía. Esto quiere decir que la velocidad del evento es menor, pero con los efectos topográficos aumentó a 391 mph.

VALIDACIÓN

Como parte del caso de estudio, es de suma importancia poder validar los cálculos presentados. La validación de estos cálculos se realizó mediante

dos tipos de modelos estructurales donde se consideraron las condiciones actuales de la estructura en términos de:

- Espesor actual de losa de techo
- Resistencia en compresión del hormigón (f'_c)
- Acero de refuerzo en losa de techo
- Dimensiones de la losa

Según se presenta en las Figuras 9 y 10, dos diferentes modelos estructurales fueron realizados con el propósito de validar la falla. La Figura 9 presenta un modelo simple de una franja de la losa de techo donde se encuentra fijo en un extremo y simplemente soportado al otro extremo. La Figura 10 presenta un modelo más avanzado donde se consideró la geometría completa de la losa.

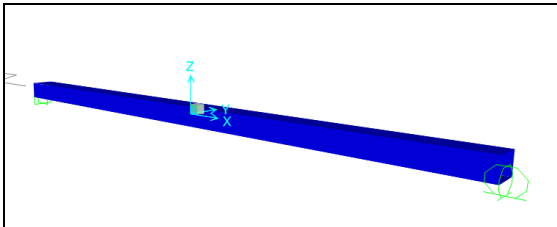


Figura 9
Franja de la Losa de Techo

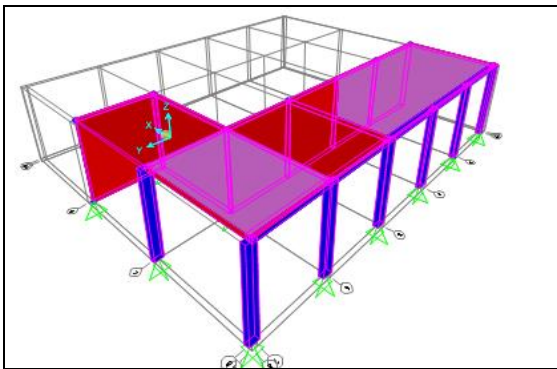


Figura 10
Modelo Global

Como presión base calculada por el ASCE7-16 se tiene 114 psf para una velocidad de 230 millas por hora y, como caso de falla, se tiene 329 psf para una velocidad de 391 millas por hora. Según esperado, la presión base calculada no presenta ninguna señal de falla mientras que la presión del caso de estudio sí presentó señales de falla en ambos modelos.

Utilizando el modelo global presentado en la Figura 10, se realizaron iteraciones para determinar la presión de viento a la que fallaría la losa, obteniendo un resultado de 300 psf. Utilizando (8), se estimó que esta presión equivale a una velocidad de viento de $V = 373$ mph. Otra vez se debe recalcar que esta velocidad ya considera los efectos topográficos.

CONCLUSIÓN

De acuerdo con este estudio, las ráfagas que pudieron ocasionar el daño sufrido por el caso de estudio fueron de sobre 370 mph. Esta velocidad contrasta con la velocidad provista por el *Applied Technology Council* de 230 mph. Es posible que la estructura no hubiese fallado de la losa nueva de haber estado adecuadamente conectada al pórtico que la apoyaba. Aun así, la ráfaga de 370 mph es extremadamente alta, lo que representa un evento poco probable.

REFERENCIAS

- [1] Mi Puerto Rico Verde, "Instituto de Estadísticas crea sección para facilitar datos sobre huracán María," *Mi Puerto Rico Verde*, 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.miprv.com/instituto-de-estadisticas-crea-seccion-para-facilitar-datos-sobre-huracan-maria/>.
- [2] E. Lloréns-Vélez, "Gobierno afirma que daños por Irma y María ascienden a \$94,000 millones," *Caribbean Business en Español*, 13-nov-2017. [En línea]. Disponible: <http://cb.pr/gobierno-afirma-que-danos-por-irma-y-maria-ascienden-a-94000-millones/> [Recuperado 30-ene-2018].
- [3] J. Masters, "Hurricane Maria damage estimate of \$102 billion surpassed only by Katrina," *Weather Underground*, 22-nov-2017. [En línea]. Disponible: <https://www.wunderground.com/cat6/hurricane-maria-damages-102-billion-surpassed-only-katrina> [Recuperado el 30-ene-2018].
- [4] Federal Emergency Management Agency, "Hurricanes Irma and Maria in Puerto Rico: Building performance observations, recommendations and technical guidance," *Federal Emergency Management Agency*, Mitigation Assessment Team Report. FEMA P-2020, Oct. 2018.
- [5] American Society of Civil Engineers, "Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures," ASCE 7-16, 2017.

- [6] Applied Technology Council, "Hazards by locations, wind," *Applied Technology Council*, [En línea]. Disponible: <https://hazards.atcouncil.org/#/>.
- [7] American Concrete Institute, "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11): An ACI standard and commentary," ACI 318-11, Aug. 2011.