

Caso de estudio de residencia unifamiliar de hormigón reforzado afectada por los vientos del Huracán María

Abner Fernandez Perez

Consejero: Hector Cruzado

Departamento de Ingeniería Civil, Ingeniería Ambiental y Agrimensura



Resumen

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 ante cargas de servicio para saber si 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 presentada por el evento atmosférico. Con el cálculo del momento de agrietamiento, se realizó un análisis y se determinó que presión necesaria para producir la falla debió haber sido producida por una velocidad de ráfaga de viento de 391 mph.

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 (industrial y doméstica), 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).

Estructuras de hormigón y mampostería reforzadas presentaron un comportamiento resistente ante la fuerza de los vientos del huracán, con excepción a una residencia de hormigón y mampostería reforzada objeto de este estudio y localizada en el Municipio de Yabucoa, municipio por donde el ojo del huracán hizo su entrada a Puerto Rico. Según se presenta en la siguiente figura 1, se observa cómo la presión de viento levanta la losa de techo la cual contaba con un espesor de 4.375 pulgadas.



Figura 1: Falla de losa

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 (1) milla de distancia del mar. 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, una viga en hormigón reforzado continua y un ancho de 11.5 pies, según se presenta en la figura 2.

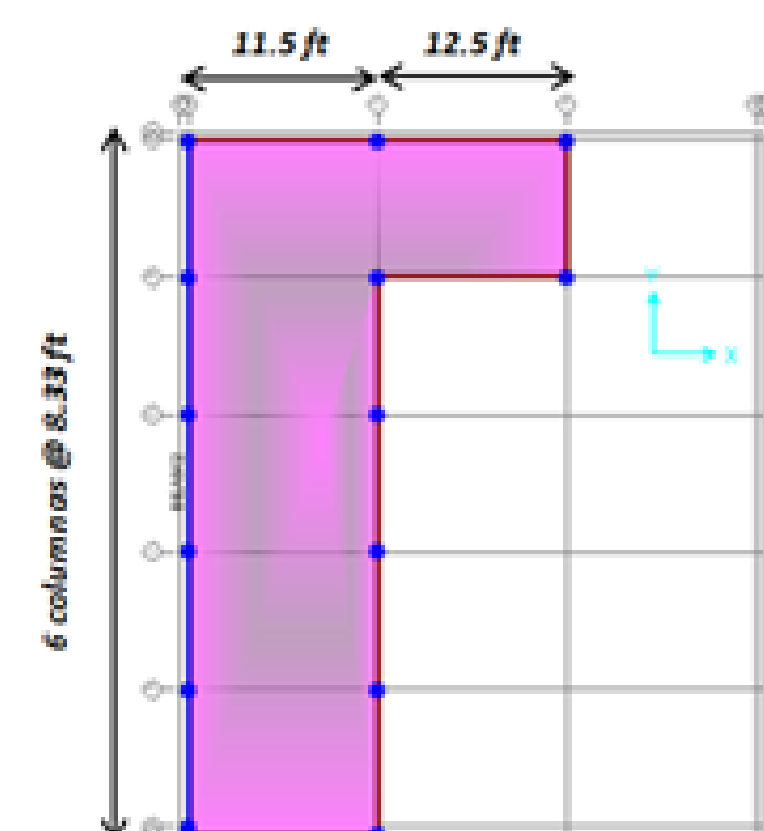


Figura 2: Distribución de Planta

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 cubrirían 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 3.



Figura 3: Antes y después del Huracán

Propiedades Mecánicas de los Materiales

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. En la dirección secundaria tenía varillas No. 3 a 11 pulgadas de separación y el refuerzo tenía una protección de 0.75 pulgadas. Según el comportamiento de falla que presentó la losa de techo, se puede observar mediante la figura 4 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 4: Anclaje viga y Columna

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.

PRESIÓN DE VIENTO SEGÚN CÓDIGO

Se estimaron las cargas de viento de acuerdo con el estándar ASCE7-16 [1]. 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

Donde se asumió una Categoría de Riesgo II y para la velocidad V , se utilizó la página del *Applied Technology Council* [2]. Esta página indica V (230 mph) 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 sople en su mayor velocidad en la dirección más vulnerable de la estructura, se descartó este factor asumiendo un valor de 1.0.

- La presión de dinámica del viento (q_z) se calcula en libras por pies cuadrados (psf) de acuerdo a la siguiente fórmula:
 - $q_z = 0.00256 K_z K_{zt} K_d K_e V^2$ (1)
- Mientras tanto, la presión de diseño para las cargas de viento (P) se calcula de acuerdo a la siguiente formula:
 - $P = q_z G C_N$ (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 las siguientes ecuaciones [3]:

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

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

Dónde:

- f_r = módulo de ruptura del hormigón
- 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 $f < f_r$, la sección no debe presentar fisuras. Si, $f > f_r$, 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 carga muerta y momentos máximo debidos al viento. 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. 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).

comportamiento de la sección mediante cargas de servicios y cargas de viento:

- Fuerza en tensión permitida: $f_t = 411$ psi
 - Fuerza en tensión actuando en la sección (caso de carga muerta): $f = 283$ psi
 - Dado a que $f < f_t$, 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 $f > f_t$, 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 actuando en la sección (caso de carga muerta) $f = 1,133$ psi
 - Dado a que $f > f_t$, 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.

Para poder determinar la fuerza inicial o mínima requerida para que la losa de techo presente señales de falla se utilizó la formulando del momento de agrietamiento de la sección (M_{cr}) donde en combinación con lo las formulas de momentos máximos se despeja para la variable WW la cual representa la carga de viento. En esta ecuación, W_D representa la carga muerta.

$$M_{cr} = \frac{f_r I g}{Y}$$

$$M_{cr} = -\frac{W_D l^2}{8} + \frac{W_W l^2}{2}$$

Resolviendo para W_W se obtuvo $W_W = 329$ psf. De vuelta al ASCE7-16, se utilizó la presión de viento obtenida para estimar la velocidad de viento que produjo la falla. Combinando (1) y (2) y despejando para la velocidad V , se obtiene:

$$V = \sqrt{\frac{P}{G * C_N * 0.00256 K_z K_{zt} K_e}}$$

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.

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.

Agradecimientos

- Hector Cruzado, PhD

Referencias

- [1] American Society of Civil Engineers, "Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures," ASCE 7-16, 2017.
- [2] Applied Technology Council, "Hazards by locations, wind," *Applied Technology Council*, [En línea]. Disponible: <https://hazards.atcouncil.org/#/>.
- [3] American Concrete Institute, "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11): An ACI standard and commentary," ACI 318-11, Aug. 2011.