

EVALUACIÓN FORENSE Y LECCIONES APRENDIDAS DE FALLAS DE POSTE DE HORMIGÓN PRETENSADO EN PUERTO RICO DURANTE EL HURACÁN MARÍA¹

Felipe J. Acosta Costa², Omar Esquilín-Mangual³, Didier Valdés²
C. Kennan Crane³, Stephanie G. Wood³, Wendy R. Long³

RESUMEN: Este artículo resume las lecciones aprendidas de la evaluación de postes de servicios públicos de concreto en Puerto Rico que fallaron como consecuencia del huracán María. Los equipos se desplegaron del 3 al 11 de octubre de 2017 para cubrir las partes oeste, noroeste, sur, y este de la isla. La evaluación se condujo para presentar casos de muestra alrededor de la isla sin realizar un inventario de los postes fallidos. El código de construcción de Puerto Rico se estaba actualizando con base en los cambios en el Código Internacional de Construcción y los efectos del Huracán Georges. Sin embargo, muchos postes hechos con base en diseños previos todavía están en servicio, y muchos de ellos fallaron como consecuencia de deficiencias de diseño y prácticas de construcción inadecuadas. Los postes fabricados bajo los códigos actualizados fallaron principalmente por problemas de cimentación o sobrecarga estructural debido al impacto de la vegetación cercana y al fallo de los postes en línea, especialmente postes de madera y postes de hormigón pre-Georges.

Palabras clave: fallas en postes de hormigón pretensados, huracán María, Puerto Rico

FORENSIC EVALUATION AND LESSONS LEARNED OF PRESTRESSED CONCRETE POLE FAILURES IN PUERTO RICO DURING HURRICANE MARIA

ABSTRACT: This article summarizes the lessons learned from the evaluation of failed concrete utility poles in Puerto Rico as a consequence of Hurricane Maria. Teams were deployed between October 3rd to 11th 2017, to cover the west, northwest, south, and east of the island. The evaluation presents sample cases of the failed poles around the island but does not attempt to conduct an inventory. The Puerto Rico building code was being updated based on changes in the International Building Code and the effects of Hurricane Georges. However, many poles made from previous designs are still in service, and many of them failed as a consequence of design deficiencies and improper construction practices. Poles manufactured under the updated codes failed mostly due to foundation issues or structural overload from nearby vegetation impact and the failure of in-line poles, especially wood poles and pre-Georges concrete poles.

Keywords: failure of prestressed concrete poles, hurricane Maria, Puerto Rico

INTRODUCCIÓN

Este artículo resume las lecciones aprendidas de la evaluación de fallas de postes de servicios públicos de concreto en Puerto Rico después del huracán María. Los equipos de trabajo se movilizaron entre el 3 de octubre y el 11 de octubre de 2017 para evaluar los postes que fallaron como consecuencia del paso del huracán. El propósito de la evaluación fue informar sobre los modos típicos de falla y sus posibles causas. La evaluación se centró en los postes de sub-transmisión (38 KV) y distribución (13.2 KV y menor), y se basó principalmente en la inspección visual. El artículo también proporciona antecedentes sobre el huracán María, la evolución de los requisitos de diseño de la velocidad del viento, un resumen de análisis previos de postes de servicios públicos de concreto después del huracán Georges, pruebas de resistencia del concreto, un resumen de los hallazgos y las conclusiones más relevantes de la evaluación.

La información presentada en este artículo es un fragmento de una publicación pública de un documento de distribución limitada producido por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos en colaboración con la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez (UPRM) y financiado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. "South Atlantic Mobile" para las misiones de respuesta/recuperación del huracán María.

¹ Artículo recibido el 30 de noviembre de 2020 y aceptado para publicación el 21 de diciembre de 2020.

² Catedrático, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, Mayagüez, PR 00681-9000, felipe.acosta1@upr.edu; didier.valdes@upr.edu

³ Ingeniero, "Geotechnical and Structural Laboratory", U.S. Army Engineer Research and Development Center, 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, MS 39180-6199, Omar.Esquilin-Mangual@usace.army.mil; Charles.K.Crane@usace.army.mil; Stephanie.G.Wood@usace.army.mil; Wendy.Long@us.af.mil

HURACÁN MARÍA

El 20 de septiembre de 2017, el huracán María tocó tierra en la costa sureste de Puerto Rico como un sistema de categoría 4 de alta intensidad con vientos máximos sostenidos de 155 mph. Cruzó la isla y salió de la costa noroeste como un sistema de Categoría 3 (NOAA, 2017). La tormenta causó daños a múltiples sistemas de infraestructura en la isla y en especial causó daños significativos al sistema de transmisión y distribución de energía en Puerto Rico y dejó a la mayor parte de la isla sin energía. La Figura 1 muestra la trayectoria del huracán María en toda la isla, así como los lugares estudiados (estrellas rojas) en la evaluación. Los daños se extendieron en toda la isla e incluyeron inundaciones, deslizamientos de suelos y marejadas costeras.

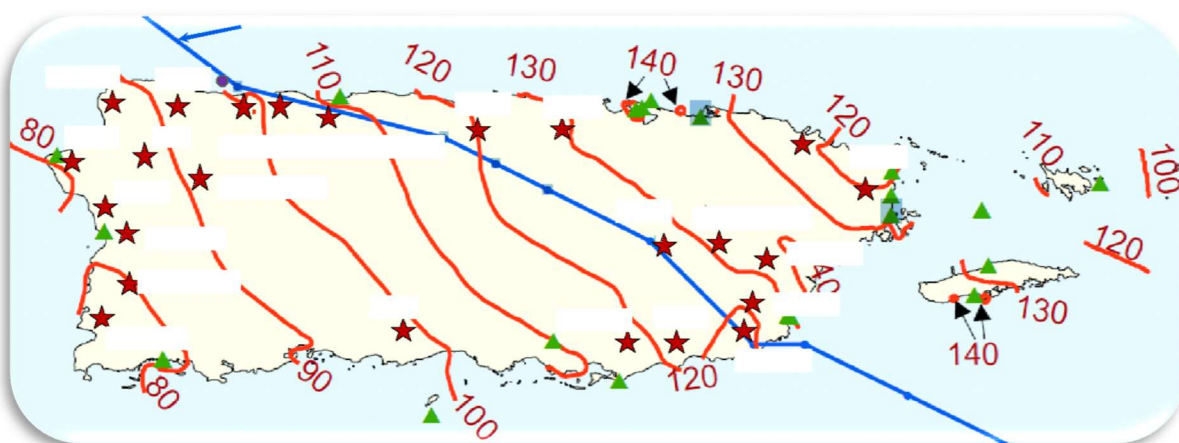


Figura 1: Ubicaciones visitadas a lo largo de la costa de Puerto Rico y valores del pronóstico de las velocidades de ráfaga de viento para Puerto Rico durante el paso del huracán María. (Mapa desarrollado por “Applied Research Associates, Inc.”).

VELOCIDADES DE VIENTO DE DISEÑO

Puerto Rico y las Islas Vírgenes de los Estados Unidos están equipados con boyas y sensores meteorológicos en lugares clave. Algunos de estos sensores en el camino del huracán María fallaron durante la tormenta y afectaron la recolección de registros confiables de velocidad del viento. Se puede acceder a las lecturas anteriores y actuales de estos sensores a través de servicios como el proporcionado por “WeatherFlow Inc.” (2017). “Applied Research Associates, Inc.” (ARA) hizo un cálculo de las velocidades máximas de ráfagas de viento en función de 3 segundos de duración a una elevación de 10 m (33 pies). La Figura 1 muestra un mapa de la isla con curvas de nivel de las magnitudes de velocidad del viento estimadas. También muestra la ruta oficial de la tormenta y las ubicaciones del sensor de viento. Estas estimaciones no tienen en cuenta los efectos topográficos, pero se ajustan a las observaciones a nivel de superficie de la trayectoria de la tormenta del Centro Nacional de Huracanes.

Desde 1954, Puerto Rico ha desarrollado un reglamento local que regula el diseño llamado "Reglamento de Planificación No. 7" que incorpora adaptaciones de los códigos de construcción oficiales (Rivera Cruz 2015). Se realizaron modificaciones sustanciales en 1987 para garantizar la seguridad de las estructuras. Las presiones de diseño fueron consistentes con velocidades sostenidas del viento de 110 mph. El daño causado por los huracanes Hugo en 1989 y Georges en 1998 promovió la modificación del reglamento en 1999 (Commonwealth of Puerto Rico 1999).

Esta actualización del código siguió la metodología y los requisitos del Código Uniforme de Construcción de 1997 (UBC-97) (ICBO 1997) para cargas sísmicas y el estándar de diseño ASCE 7-95 que es parte integral de los Códigos de construcción de los Estados Unidos (ASCE 1995, Commonwealth of Puerto Rico 1999) para cargas de viento. El diseño de las velocidades del viento se estableció en 125 mph. No fue sino hasta 2011 que Puerto Rico adoptó un nuevo código (Estado Libre Asociado de Puerto Rico 2011) basado en el Código Internacional 2009 (ICC 2009) que utilizó el código ASCE 7-05 (ASCE 2005) para cargas de viento y definió una velocidad de diseño del viento de 145 mph.

La edición 2010 de la ASCE 7 (ASCE 2010) modificó aún más las velocidades del viento de diseño para Puerto Rico, donde se eliminó el factor de importancia en el cálculo de la velocidad de diseño, pero se generaron mapas con curvas de nivel que representan variaciones de las velocidades del viento. Las velocidades de viento representadas en los mapas se basan en la categoría de la estructura, donde por ejemplo, para Categorías III y IV varían desde 160 mph en la costa noroeste hasta 180 mph en la costa sureste. Finalmente, la edición 2016 mantuvo la misma metodología (ASCE 2016). A pesar de que las velocidades del viento de diseño han aumentado en las versiones de código recientes, es posible que no alteren necesariamente el diseño final de los postes de servicios públicos porque los cálculos y los coeficientes utilizados en la nueva metodología también han cambiado. Los efectos específicos de los códigos cambiantes en los diseños de los postes de utilidad están fuera del alcance de este artículo, y no se establecerán conclusiones en este tema.

SISTEMA ENERGÉTICO DE PUERTO RICO

La red eléctrica de Puerto Rico, administrada por la Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico (PREPA por sus siglas en inglés), tiene estaciones de generación alrededor de la isla, como se muestra en la Figura 2. Cada estación está configurada para estar en fase, y todas están interconectadas a través del sistema de transmisión. Las generadoras de energía privadas que utilizan energía eólica, carbón y gas natural también están interconectadas a la red. Las líneas de transmisión transportan 230 kV o 115 kV, y las líneas de subtransmisión llevan 38 kV. Las líneas de distribución son 13.2 kV, 8.32 kV, 4.16 kV y 2.4 kV.

En la mayoría de los casos, las líneas de subtransmisión y distribución se conducen a lo largo del mismo conjunto de postes, con líneas de voltaje más altas soportadas en elevaciones más altas en los postes. Además, se encontró que la mayoría de las líneas de subtransmisión y distribución de PREPA comparten postes con líneas de comunicación (es decir, internet, televisión, y teléfono).

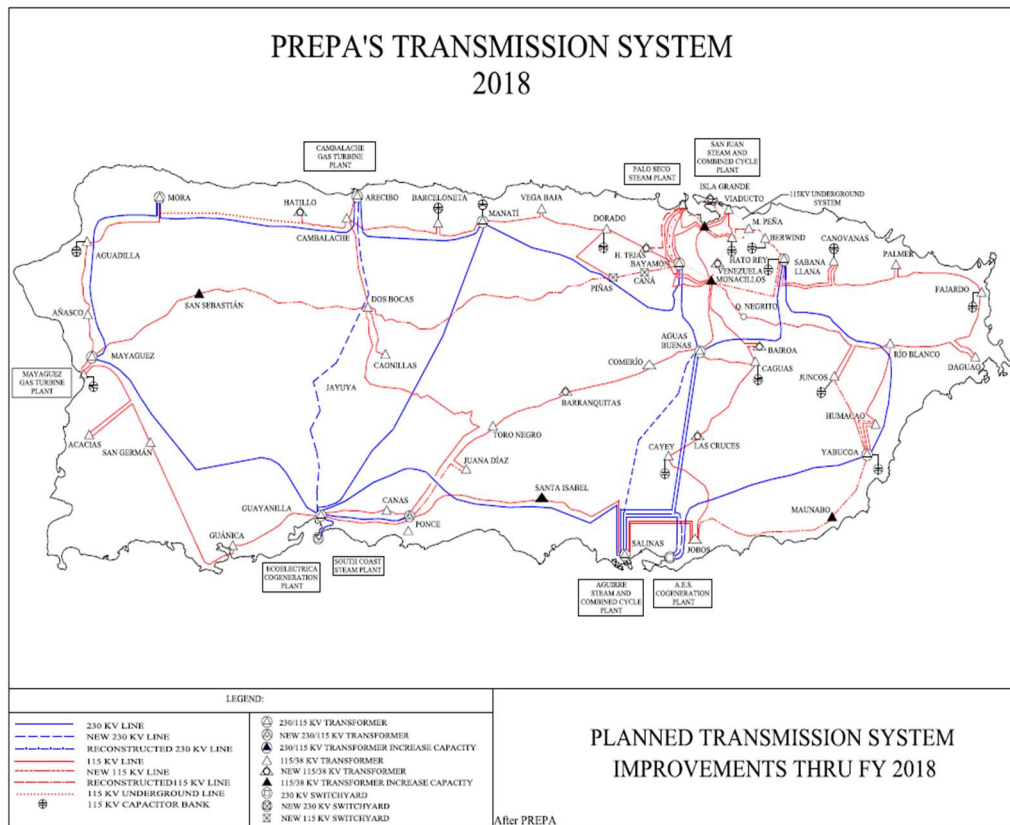


Figura 2: Plan de mejoras del sistema de transmisión de Puerto Rico (Fuente: Romano 2013).

Fabricantes locales de postes de hormigón

PREPA usa postes de madera, de hormigón pretensado y de acero galvanizado para sus líneas de sub-transmisión y distribución. Gran parte de los postes de madera observados estaban en condiciones muy deterioradas. Se observó que muchos de los postes de madera, así como muchos postes antiguos de hormigón sin marcado visible (fabricante desconocido, tipo, año de fabricación) han sido reemplazados por postes de hormigón o de acero. Sin embargo, muchos de los antiguos postes permanecen en servicio o simplemente no se remueven quedándose al lado del nuevo reemplazo. Los postes de acero se obtienen de proveedores externos en los EE. UU. Sin embargo, la mayoría de los postes de hormigón pretensados que existen actualmente se obtuvieron de los tres fabricantes en la isla. De éstos, solo dos siguen operando. Las compañías son: “Moca Concrete Poles, Inc.” (Antigua Pepino Concrete Poles, Inc.), “Power Precast Products, Corp.”, y “Caribbean Poles, Inc.”, que no está en operación. Ejemplos de sus placas de identificación se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Manufactureros locales en Puerto Rico y muestras de las placas de identificación.

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Moca Concrete Poles, Inc. | Power Precast Products, Corp. | Caribbean Poles, Inc. |

PRUEBA DE RESISTENCIA DE HORMIGÓN

Las especificaciones estándar de la “American Society of Civil Engineers” (ASCE 2012), y las normas de la “American Society for Testing and Materials” (ASTM 2013a, ASTM 2013b) establecen que el hormigón utilizado para la construcción de postes pretensados debe tener una resistencia promedio a los 28 días de fundido de 5,000 psi, pero valores comunes están entre 6,000 y 12,000 psi. Las normas de la ASTM especifican una resistencia del hormigón de 8,000 psi para postes de pretensados centrifugados (“spun cast”) (ASTM 2013b), pero ninguno de los postes evaluados es de esta categoría. Como parte de la evaluación forense, se aplicó la prueba de martillo “Schmidt” (ASTM 2013c) para estimar la resistencia a compresión del hormigón de varios postes fallidos e intactos. Debido a que los postes tienen un núcleo hueco, las pruebas se realizaron en las zonas gruesas como las esquinas, y buscando evitar zonas dañadas o con agregados expuestos. Se realizaron algunas lecturas en el centro de la cara sobre el núcleo hueco para determinar si había diferencias en las lecturas.

La Tabla 2 muestra la resistencia promedio de las lecturas de los instrumentos para cada poste ensayado. Para la mayoría de los casos, se realizaron 10 lecturas. La tabla también muestra la localización, tipo de poste, longitud, año de construcción y condición (con falla o no daño). Los resultados muestran que la resistencia a compresión del hormigón de estos postes cumple con los valores recomendados en las especificaciones.

Tabla 2: Datos de las pruebas del martillo “Schmidt”.

| Poste | Capacidad Promedio (lbs/pulg. ²) | Localización, Tipo, Longitud, Año y Condición |
|-------|--|--|
| A | 7200 | Patillas, Carr. PR3, km 112.8, H4, 40 pies, 2010, no daño |
| B | 8500 | Patillas, Carr. PR3, km 112.8, H4, 40 pies, 2010, no daño |
| C | 8000 | Maunabo, Ave. Kennedy, km. 0.3, H6, 45 pies, 2006, no daño |
| D | 8500 | Maunabo, Ave. Kennedy, km. 0.5, H4, 45 pies, 2008, no daño |
| E | 7200 | Maunabo, Ave. Kennedy, km. 0.5, tipo y año desconocido, falla cerca de base |
| F | 7750 | Caguas, calle sin nombre intersección con Ave. Borinquen, H6, 45 pies, no daño |
| G | 5900 | Caguas, Ave. Borinquen, H6, 45 pies, 1987, falla cerca de base |
| H | 7750 | Caguas, Ave. Borinquen, H6, 45 pies, año desconocido, falla a mitad de largo |

| | | |
|---|------|---|
| I | 8250 | Caguas, Muñoz Marín, Villa Blanca, tipo desconocido, falla cerca de base |
| J | 7750 | Caguas, Muñoz Marín, Hospital HIMA, H6, 50 pies, 2005, no daño |
| K | 6400 | Moca, Carr. PR 111, km. 4.2, H6, 65 pies, 2006, no daño |
| L | 6000 | Quebradilla, Carr. PR 485, km. 1.0, tipo y año desconocido, falla cerca de base |
| M | 6500 | Caguas, Ave. Muñoz Marín, tipo y año desconocido, falla cerca de base |

EVALUACIÓN FORENSE DE POSTES FALLIDOS

Evaluación Forense y Recomendaciones al Diseño luego del Huracán Georges

El 21 de septiembre de 1998, el huracán Georges tocó tierra en Puerto Rico como un sistema atmosférico de categoría 3 con vientos sostenidos de 104 mph (NOAA). Muchos postes de hormigón sufrieron daños, generando preocupación sobre las prácticas actuales de diseño. El fallecido Dr. Daniel Wendichansky, profesor del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez (UPRM), tuvo la tarea de supervisar las pruebas de resistencia de postes de hormigón pretensados típicos como parte de una evaluación forense exhaustiva. Estas pruebas fueron solicitadas por PREPA con la ayuda de los dos fabricantes de postes locales. En una entrevista con el Dr. Wendichansky en enero del 2018, indicó que las modificaciones al diseño de los postes y las nuevas prácticas de instalación se desarrollaron luego de obtener los resultados de un estudio realizado por el Dr. Walter Ruiz, profesor retirado de la UPRM y presidente de “Walter M. Ruiz & Associates”. El Dr. Ruiz realizó una evaluación forense de los postes de hormigón fallidos después del extenso daño causado por el huracán Georges (Ruiz 1999). Su trabajo incluyó evaluaciones de campo de postes fallidos, evaluación del procedimiento de diseño de PREPA, análisis estructurales de postes existentes bajo condiciones similares a las de huracán Georges, desarrollo de una técnica de reforzamiento para postes existentes y guías de diseño actualizadas, evaluaciones del suelo y pruebas a escala real en el Laboratorio de Estructuras de la UPRM de postes manufacturados según el código existente. Como resultado de sus evaluaciones, hicieron las observaciones y recomendaciones que se presentan a continuación:

1. Hubo sobrecarga de los postes al instalarles equipos de comunicación que no se habían considerado en el diseño original. Sugirió que debían establecer controles para evitar la sobrecarga de las instalaciones de energía.
2. Las reconstrucciones realizadas después de eventos previos (como el huracán Hugo, 1989) no eliminaron las deficiencias previas, manteniendo un potencial para fallas en eventos futuros.
3. Los criterios de diseño para la fundación no estaban bien definidos. Aunque existía una disposición para una base de hormigón para postes pretensados, éstos se instalaron directamente en el suelo.
4. Las guías de diseño de PREPA estaban desactualizadas, subestimando las fuerzas de diseño por viento e incumpliendo con las prácticas actuales.
5. PREPA debía implementar un programa de control de calidad en las plantas de fabricación para asegurar el cumplimiento de las especificaciones de diseño.
6. La causa primordial del pobre rendimiento de los postes fue la deficiente capacidad de corte en la zona soterrada. Se recomendó la revisión del diseño del poste para proporcionar mayor confinamiento del hormigón en la base y para aumentar el desarrollo de los tendones a fin de evitar fallas por cortante y trituración.

Consideraciones luego del paso del Huracán María

Los postes de hormigón pretensado se clasifican en función de la magnitud de la fuerza concentrada aplicada a 2 pies por debajo de su parte superior (AEEPR 1986). Esta fuerza equivalente es la que genera el momento flector de diseño en la sección más baja de la parte expuesta. La fuerza nominal de diseño para cada clase de poste H es: H3 – 3,700 lb, H4 – 4,350 lb, H6 – 5,700 lb, H8 – 8,000 lb, y H10 – 10,000 lb. La Figura 3 muestra un diagrama de cuerpo libre simplificado de las fuerzas que actúan en un poste de hormigón según mostrado en el reporte del Dr. Ruiz (Ruiz 1999), asumiendo que la presión del suelo se concentra en dos puntos. R_t y R_b son simplificaciones de las reacciones acopladas que se desarrollan bajo tierra y P_u es la fuerza última concentrada al tope. En la porción expuesta, la fuerza máxima de cortante es P_u y el momento flector máximo es esta fuerza multiplicada por H . Sin embargo, en la parte soterrada, la fuerza de corte es R_b o $7P_u (H/L)$. Si la capacidad de cortante en esta zona es menor a la capacidad por flexión en la zona expuesta, entonces la capacidad del poste será menor a P_u . El Dr. Ruiz enfatizó en su informe que se debe aumentar la capacidad en cortante de los postes desde su extremo inferior hasta una distancia de 4 pies sobre el nivel del suelo. También recomendó el uso de una base auto sostenida a menos que los cálculos demuestren que el suelo tienen la suficiente capacidad para prevenir fallas.

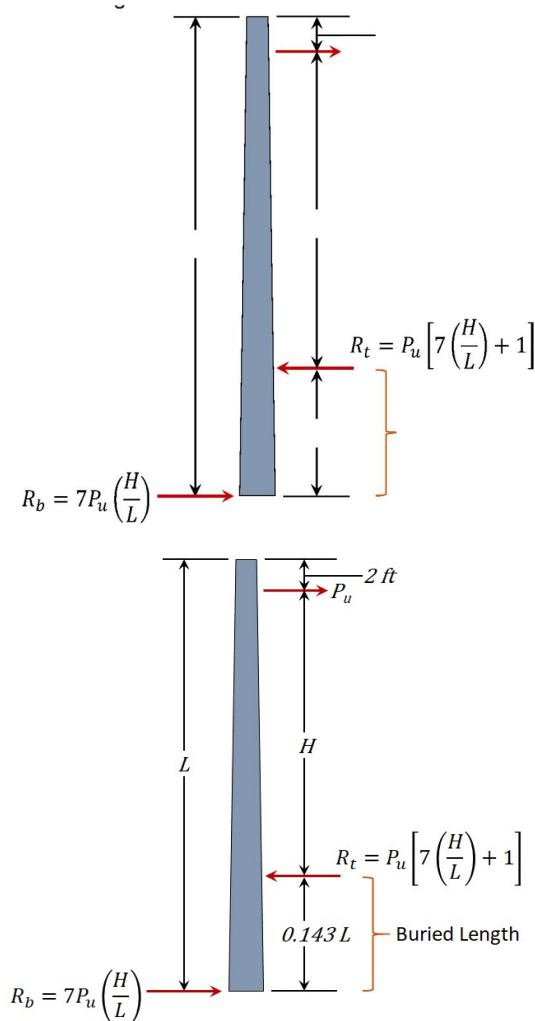


Figura 3: Diagrama de cuerpo libre simplificado de las fuerzas en un poste hormigón (Adaptado de PREPA 1986).

Evaluaciones de Campo

Del 3 al 11 de octubre de 2017, se llevó a cabo una evaluación rápida en la isla de Puerto Rico para determinar los mecanismos de falla de la infraestructura de energía existente. La evaluación abarcó las áreas de la costa este, norte, oeste y sur, y el centro-este de la isla. El enfoque de la evaluación estuvo en los postes de sub-transmisión (38 KV) y distribución (13.2 KV e inferiores).

Región Oeste

En la región oeste, se evaluaron postes en los municipios de Cabo Rojo, Hormigueros, Mayagüez, Añasco, Rincón, y Aguadilla. En la PR-102, km. 14.1 (Joyuda) Cabo Rojo un poste frente a la línea de costa falló aparentemente por la fuerza del viento y la caída de los postes de madera aledaños al mismo. Este poste estaba en una curva, sin tensor al lado opuesto. La base fracturada tenía un color diferente, lo que posiblemente representa signos de deterioro previo al evento. Además, el poste tenía varias grietas posiblemente preexistentes. El poste no tenía marcas de identificación visibles y su sección transversal es rectangular, lo que sugiere que es de tipo H6 fabricado antes de 1999.

En la carretera PR-100, km. 3.1 en Cabo Rojo se presentó el caso de rotación del poste debido al empuje del viento y la posible saturación del suelo que rodeaba la base del poste. Se produjeron fallas similares en otras áreas y otros ejemplos se muestran en la discusión del tema en otras regiones de estudio.

En el municipio de Hormigueros, se encontró un grupo de postes fallidos en la carretera PR-2, a lo largo de la rampa de salida hacia la carretera PR-100. En el momento de la inspección, la mayoría de los árboles fueron removidos. Sin embargo, luego del paso de la tormenta se observó una gran cantidad material vegetativo sobre los postes y la rampa de salida. Se puede inferir que la caída de estos árboles tuvo un efecto directo la caída estos postes. Se observaron fallas alrededor de 2 pies desde el punto más bajo al nivel del suelo y en elevaciones más altas. Se observó hormigón triturado en uno o ambos lados junto con cables rotos pretensados en un lado. La falta de aros (estribos) en la zona de falla fue evidente en todos los postes.

En Mayagüez se observaron varias fallas de postes, principalmente cerca del centro de la ciudad. La causa principal de la falla fue la carga adicional impuesta por los árboles caídos. Fallaron tres postes en la zona llamada Manantiales, en la carretera Manantiales y el callejón sin salida de la calle Antonio Cruz Núñez. El árbol caído quedó cubriendo los cables eléctricos. La fuerza adicional en los alambres que creó este árbol hizo que el poste fallara, transfiriendo la carga al siguiente poste y haciendo que también fallara. Estas líneas son perpendiculares a las líneas que corren paralelas a la carretera Manantiales. Se observó que el Poste siguiente en la intersección de las dos líneas no tenía un tensor. Un tercer poste fue derribado por la carga adicional en sus cables y falló a una altura de aproximadamente 10 pies desde la parte inferior. Este poste cayó en una entrada residencial. Estos postes son del tipo H6, de 45 pies de largo y fabricados en 1990. Se observó una falla en el nivel del suelo para los dos de los postes observados, y en una mayor elevación para el Poste 3. El hormigón aplastado en uno o ambos lados se observó junto con fallas de cables pretensados en un lado. La falta de estribos en la zona de falla fue evidente en todos los postes.

Otros casos relacionados con árboles que se cayeron creando tensión en los cables y causando la falla de los postes se encontró en un poste en la avenida Sonsire cerca de la urbanización Los Versalles. Un árbol muy grande cayó sobre el poste y los cables, derribando el poste. Ningún otro poste de hormigón falló. Un poste de madera que estaba cerca del poste de hormigón también fue derribado por el árbol. Otra falla causada por la caída de árboles fue en la intersección de PR-108 con PR-65. Un árbol muy grande y viejo de la colección de árboles de la Estación Experimental Agrícola UPRM fue derribado sobre la carretera 108, derribando el poste de hormigón. El tipo de poste es H4, de 45 pies de largo, fabricado en el año 2000.

Además de los árboles caídos por la fuerza de los vientos, en las zonas costeras también se observaron los efectos de fallas en el suelo donde estaban instalados los postes. Se encontraron dos postes parcialmente inclinados en la carretera PR-102 en el km. 3.9. Los postes son de tipo H6, 50 pies de largo, fabricados en 2010. Se observó falla geotécnica, no estructural. Esta ubicación se encuentra en la zona costera de la Bahía de Mayagüez, donde el tipo de suelo es arenoso. Se observaron árboles inclinados alrededor de los postes y las líneas eléctricas. También en el municipio de Rincón se presentaron estas fallas geotécnicas. Se observaron tres casos de este tipo en Rincón durante la evaluación. En la carretera 115, km 14.4, un poste estaba ligeramente inclinado. La observación de la base mostraba

que el suelo proporcionó poco soporte en un lado debido a la proximidad a una pendiente. En la carretera PR-115, km. 12.5, un poste octagonal de iluminación fue inclinado por un árbol caído, pero nuevamente la falla fue en el suelo.

Otra situación que afectó los postes en el área oeste fue la inundación de áreas aledañas a los ríos que se salieron de su cauce y recorrieron los valles aledaños llevando un gran caudal que afectó toda la infraestructura a su paso. Este fue el caso para los postes de hormigón dañados sobre la carretera PR-2 en Añasco alrededor del km. 145. En el momento de la evaluación, la Autoridad de Energía Eléctrica (PREPA) ya había levantado los postes a excepción de uno que estaba dañado. El examen del sitio reveló que los postes se podrían haber caído después de que el río Añasco inundó su valle, recorriendo las bases de los postes. El tipo de postes en esta área era H4, de 45 pies, fabricados en 1995.

Otra condición de falla en los postes que se observó en el municipio de Rincón, corresponde a un poste de soporte de esquina. La falla más notable fue de un poste tipo H6, de 60 pies de largo fabricado en 2001. Ninguno de los postes que lo rodeaban sufrió daños y los árboles cayeron en una dirección casi paralela a la carretera y los cables. Sin embargo, este poste era un soporte de esquina independiente (sin cables tensores). Las líneas de servicios públicos cambian de dirección en un ángulo de 90 grados para alimentar a un hotel cercano. Los árboles golpearon las líneas perpendiculares a la carretera y derribaron el poste. Similar a otros casos observados, el poste falló a aproximadamente 10 pies sobre el nivel del suelo.

Una condición adicional de falla de los postes de hormigón que se observó en la evaluación fue en el municipio de Aguadilla. Se encontró un poste de hormigón dañado en la PR-110, km. 27.7, frente a la fábrica de Hewlett Packard. Este poste estaba frente a un negocio, no rodeado de árboles o cualquier otro objeto que podría haber caído sobre las líneas. Este poste tenía un transformador, líneas de distribución y líneas de comunicación. También servía de apoyo mediante un tensor para un poste de madera que se encontraba del otro lado de la carretera. Sin embargo, el poste evaluado tenía tensor de equilibrio hacia el suelo. Este poste aparentó haber caído atravesando la carretera. Dado que no hay árboles rodeando el poste, su falla puede haber sido causada por el viento combinado con la sobre tensión producida por el poste de madera que se inclinó del otro lado de la carretera. El poste es del tipo H3, de 40 pies de largo y fabricado en el año 1996. La falla ocurrió a nivel del suelo y se notó el hormigón triturado en el lado donde descansa el transformador, mirando hacia la carretera, y de donde hala el poste de madera. Se cortaron todos los cables pretensados y no se encontraron aros (estribos) en la zona de falla en el momento de la evaluación. No se pudo confirmar si el daño en los cables ocurrió en el momento de la caída o por el equipo de limpieza. En la Figura 6 se muestran ejemplos de fallas de la región oeste.



Figura 4: Ejemplos de fallas de postes en la región oeste – (a) falla en la fundación, (b) efecto en cadena por caída de vegetación, (c) poste de esquina tirado por vegetación sobre cables, (d) erosión en la base por inundación de río.

Región Noroeste

En la región noroeste de Puerto Rico, se evaluaron postes en los municipios de Isabela, Moca y Quebradillas. Isabela se encuentra en la costa, cerca de donde el ojo del huracán María salió de la isla. Al igual que en otras zonas estudiadas, la cantidad de postes de hormigón dañados fue pequeña. En la carretera PR-4466 en la intersección con la PR-466 se encontró un poste inclinado, mientras que luego de este poste se observó una línea de postes de hormigón intactos. Más adelante en esta carretera se encontraron dos postes dañados. La observación de la falla sugiere que estos postes fallaron en la base. El poste 1 estaba estructuralmente intacto pero inclinado sobre la carretera. El poste 2 también se inclinó, pero parecía que había fallado cerca de su parte superior durante la caída. La observación de la parte inferior muestra que el poste también se inclinó debido a la saturación de la base y la proximidad de la pendiente a la zona lateral de presión pasiva del suelo. Sin embargo, se pudo ver que la sección estaba intacta en la base. Estos postes son del tipo H4, de 45 pies, fabricados en 2008.

En la carretera PR-459, entre los kilómetros 14.9 y 15.3, se observaron cuatro postes fallidos tipo H4, de 45 pies de largo fabricados en 1992. Tres de ellos mostraron fractura en el nivel del suelo, y el último tenía falla en el suelo (intacta en la base). En este lugar, no se observaron árboles cerca de los postes. Un testigo entrevistado afirmó que el viento derribó los postes y muchos árboles en el lado opuesto de la carretera. El movimiento de tierra en la base indica una oscilación excesiva del poste durante el evento de viento.

Se observaron las fallas en varios postes típicos de tipo H3 octogonales de 40 pies de longitud en un área residencial cerca del centro de Isabela a lo largo de la carretera PR-459. Nos llamó la atención que la mayoría de los postes estaban severamente deteriorados, mostrando grietas longitudinales del refuerzo oxidado. Las grietas podrían haberse abierto como consecuencia del desplazamiento ocurrido durante la tormenta. Ninguno de los postes falló, pero constituyen un peligro por las condiciones deterioradas en las que quedaron. Sin embargo, justo en la entrada del centro de Isabela se encontró un poste octagonal H3 que muestra un deterioro severo del óxido de refuerzo y grietas longitudinales. Un vecino del área que estaba patrocinando un negocio cercano indicó que informaron la condición del poste a la PREPA antes de la llegada del huracán. También indicó que la pértiga falló durante el paso de María.

En la intersección de PR-2, km. 108.5 con PR-446 un poste que soporta el semáforo de la intersección fue derribado por el viento de la tormenta, ya que el área está limpia de árboles. La observación del refuerzo expuesto sugiere que este poste se dañó previamente. Un grupo de tendones muestra una mayor cantidad de herrumbre en comparación con otros, lo que sugiere una exposición exterior más prolongada.

Siguiendo la carretera PR-446, en el km. 18.1, un poste en una curva fue derribado por una cantidad severa de árboles caídos. No se pudieron observar detalles en la falla del poste porque todo el escombros estaba en la parte superior del poste. Los postes cercanos no sufrieron daños. El poste es del tipo H4, de 45 pies de largo, fabricado en 2004. Como caso interesante del efecto de postes de varios materiales combinados en una línea de distribución, en la carretera 112 de Moca a Isabela, un poste de esquina de acero clase 3 fabricado en 2017 falló en la parte superior de la conexión de alambre tensor de guía después de ser empujado por alambres de postes de madera con fallas.

En el municipio de Quebradillas, carretera 485, km. 1.0, tres postes de hormigón sin marcar fallaron después de que un gran árbol cayó sobre uno de ellos durante el huracán. En el lugar se podía ver el árbol que causó la falla. Esto fue corroborado por un empleado de PREPA que estaba trabajando en el sitio. Indicó que los postes fallidos eran viejos (no había información precisa) pero que eran de buena calidad. El empleado también indicó que un cuarto poste sufrió una falla en la base y que fueron capaces de reutilizarlo en el mismo lugar. Uno de estos postes se probó usando el martillo “Schmidt” (ver sección 2). En el momento de la visita, se estaban instalando postes nuevos y los empleados de PREPA estaban levantando las líneas eléctricas. Ejemplos de fallas observadas en la región se presentan en la Figura 7.



Figura 5: Ejemplos de fallas de postes en la región Noroeste – (a) falla en fundación, (b) separación del suelo en la cimentación debido a la oscilación por viento, (c) falla causada por vegetación (árbol), y (d) deterioración por oxidación en el refuerzo.

Región Sur

En la región sur, se evaluaron postes en el municipio de Guayama y Maunabo. En el km. 89.7 de la carretera PR-53 donde se ubica el paso elevado sobre la PR-713 antes de llegar a la ciudad de Guayama, se encontraron dos postes muy cerca uno del otro, uno de los cuales presentaba falla de la cimentación. Varios postes de madera ubicados al lado fallaron. La escena sugería que los postes de madera fallaron por el efecto del viento, y halaron e hicieron caer el poste de hormigón. El poste de hormigón estaba ubicado en un pequeño talud de tierra que reduce el confinamiento en la base, perdiendo la presión del suelo pasivo. El poste es de clase H6, de 45 pies de largo, fabricado en 2004.

Ingresando a la ciudad de Guayama, en la carretera PR-54, km. 1.6, dos postes H6 fabricados en 1990 y de sección rectangular fueron derribados por el viento. Los postes habían sido reemplazados en el momento de la visita, pero los postes que colapsaron aún estaban en el lugar junto a los nuevos. Un testigo entrevistado indicó que los postes cayeron en dirección perpendicular a la carretera, bloqueando el paso. La inclinación del poste de iluminación hacia la carretera sugiere que esa fue la dirección del viento. El testigo también indicó que en el sector llamado Valles de Guayama, junto a la zona de los postes caídos, la mayoría de los postes de madera habían fallado. La falla de los postes de madera se pudo observar durante la evaluación. Es notable la saturación de equipo y cables de sistemas de comunicación en estos postes. Un poste de hormigón usado para comunicaciones fue derribado, pero no falló. La causa del colapso podría haber sido una consecuencia de la falla de los postes de madera que arrasaron toda la línea.

En la avenida Kennedy (PR-760) en Maunabo, km. 0.5, dos postes de hormigón del sistema de distribución de energía fallaron aparentemente debido al viento. Sin embargo, evaluando vistas producidas por “Google Maps” previos al huracán muestran un gran árbol pegado a las líneas eléctricas que no existía luego de la tormenta. Esto sugiere que este árbol podría haber contribuido a la falla de los postes, pero se habían limpiado todos los desechos en el momento de la visita. La mayoría de los postes estaban dentro de las propiedades de las viviendas y destruyeron las vallas de perímetro de estas propiedades. Los postes que fallaron eran de tipo H4 de 45 pies de largo fabricados en 2008. Los postes también están saturados por cables de comunicación y fibra óptica. También se pudo observar que había muy poco espacio entre la base del poste y el anclaje de la guía del tensor. Los postes fallidos no tenían ninguna marca, y su sección era rectangular. La observación de la sección de fractura reveló que las paredes del poste son más delgadas que los postes fabricados más recientemente. En esta misma área se observó un segundo poste fallido. Este no tenía guía. También se notó que estaba ubicado dentro de una propiedad de residencia. Algunos ejemplos de los daños observados se presentan en la Figura 8.

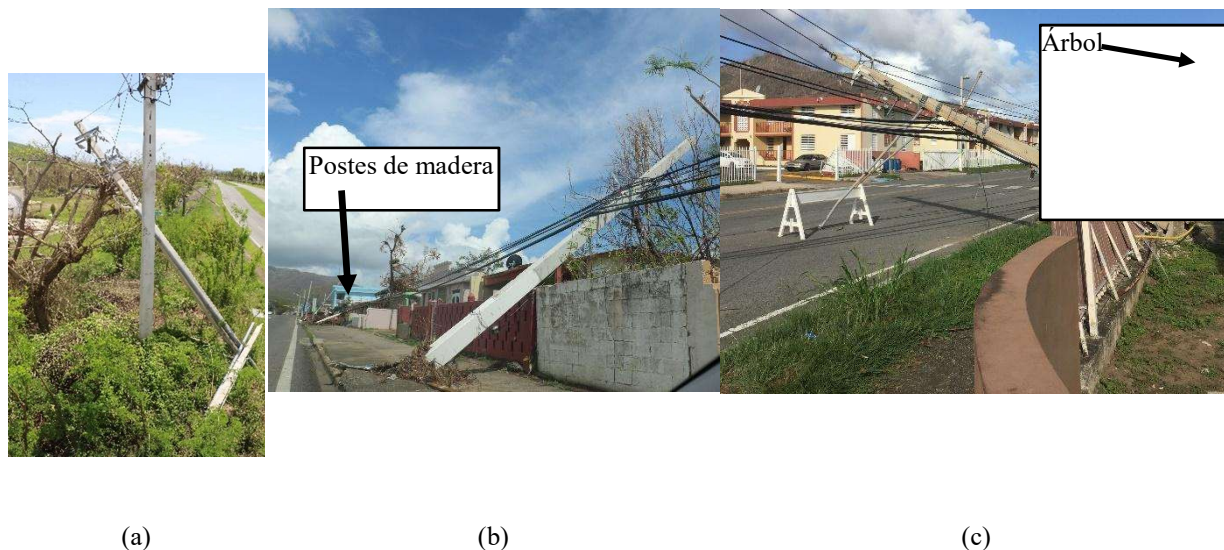


Figura 6: Ejemplos de fallas en postes en la región Sur – (a) falla por perdida de presión de suelo en la base, (b) falla por exceso de cableado de servicios que causó falla en cadena (en la misma línea se observan postes de madera), y (c) falla por vegetación (postes sin marca, que se encuentran dentro de las propiedades. Se observó árbol en foto de “Google Maps”).

Región Centro-Este

En la región centro-este, se evaluaron postes en el municipio de Caguas. A lo largo de la carretera PR-32 (Avenida Luis Muñoz Marín) y del Boulevard Cristóbal Colón de Caguas, se encuentran varios postes de hormigón cerca de las instalaciones comerciales. La mayoría de estos postes son H6, de 65 pies de largo, con líneas secundarias de transmisión, distribución y comunicación. También hay postes de 45 pies tipo H4 que se usan para distribución y comunicación. En la visita de inspección se observó una colección de postes que fallaron a lo largo de la carretera PR-32. Debido a la congestión en los postes, como uno falla, hay una reacción en cadena o efecto dominó donde si un poste es derribado por impacto de vegetación o carga de viento, tira de los otros. Los postes dañados estaban marcados con un sello “INTERSTRUCT CORP” de 45 pies de largo, pero la fecha de fabricación no era legible y no se encontró una marca de fecha en la cara de hormigón, sugiriendo que los postes fueron fabricados antes de 1998. Los postes dañados eran tipo H6 de 45 pies de largo, fabricados en 2000. La zona de falla típica estaba entre 2 pies y 7 pies desde el nivel del suelo, mostrando hormigón triturado en un lado y grietas en la flexión en el lado opuesto.

Alrededor de 10 postes de tipo rectangular H8, 55 pies de largo fabricados entre 1985 y 1987 fallaron en Urb. Parque del Monte en el sector de Cañabón. Se produjo una falla en el eje débil en el nivel del suelo. No se observaron señales de cable guía en ninguno de los postes evaluados en ninguna dirección. Se observó hormigón aplastado en el lado de inclinación y ruptura de cables de acero pretensados en el lado opuesto. También se observó desprendimiento en el lado de la tensión junto con grietas de flexión. La falta de estribos en la zona de falla fue evidente y las grietas sugieren que el espaciado de los estribos fue de alrededor de 12 pulgadas.

Se encontró además que falló un poste tipo H8, de 65 pies de largo de año desconocido. El espaciamiento de los estribos y los postes cercanos sugieren que es posterior al huracán Georges (1998). Estos postes estaban ubicados al final de la línea de subtransmisión en Urb. Parque del Monte con una serie de 6 postes tipo H8 rectangulares fallidos fabricados en 1985. Se observó hormigón triturado en la zona de falla ubicada a unos 5 pies del nivel del suelo, pero no se observó falla de tensión en los cables de acero expuestos.

Ejemplos de algunas de las fallas observadas se presentan en la Figura 7. Estos casos muestran fallas en postes que aparentan tener refuerzo adecuado, en postes antiguos, sin refuerzo adecuado, pero con sobrecarga, y separación en la base por la oscilación del poste debido al viento. También está el caso de una serie de postes rectangulares que cayeron sobre las residencias bajo el efecto dominó.

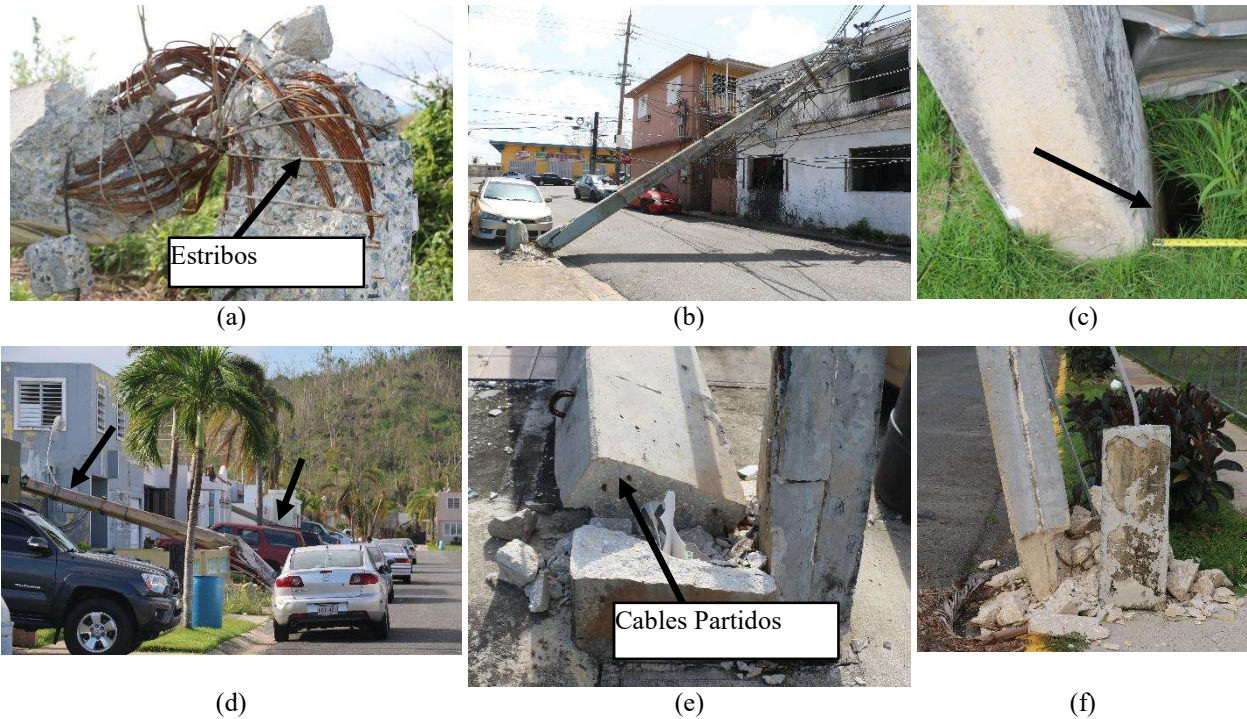


Figura 7: Ejemplos de fallas en postes del área Centro-Este – (a) falla en poste que evidencia suficiente cuantía de estribos, (b) poste antiguo sobrecargado que rompió por cortante en la base, (c) separación del suelo en la cimentación debido a la oscilación por viento, (d) falla en cadena de postes de sección rectangular. La falla fue en su eje débil, (e) detalle de falla en poste donde se ve rotura limpia en los cables, y (f) falla en poste por cortante. No se observan los estribos.

Región Este

En la región este, se evaluaron postes en el municipio de Humacao. La falla típica en los postes rectangulares antiguos se observó en la carretera PR-3 km 79 en Humacao. Este es un ejemplo típico de la infraestructura de los postes antiguos conectada a la infraestructura de postes más nuevos utilizada para las líneas de subtransmisión y distribución. Ejemplos similares a este se observaron a lo largo de PR-3 en la región este y noreste de la isla. Ejemplos de algunos de estos casos se presentan en la Figura 8.



Figura 8: Ejemplos de fallas en región Este – (a) zona con mezclas de tipos de postes, madera, hormigón y acero, (b) postes de acero intactos, y (c) falla en suelo, con subsiguiente rotura al caer sobre palma.

RESUMEN DE HALLAZGOS

Las fallas en los postes de hormigón pretensado ocurrieron alrededor de toda la isla, pero la mayoría de los postes de este tipo tuvieron un comportamiento adecuado, comparado con la contraparte de madera. En la Figura 9 se muestran ejemplos de postes de madera que fallaron que se encontraban compartiendo la línea con postes de hormigón.



Figura 9: Fallas en postes de madera cercanos o en las mismas líneas que postes de hormigón que sobrevivieron el impacto del huracán.

Los modos de fallas discutidos en este artículo se observaron a través de toda la isla. Estos modos de falla incluyen flexión, corte, suelo/fundación, y en algunos casos, una combinación de modos. Las causas de fallas observadas fueron variadas, y se enumeran aquí:

1. Aumento en la tensión de los cables debido al impacto de árboles y pedazos de vegetación y la falla de postes de madera en la misma línea.
2. Sobrecarga de los postes debido a la adicción descontrolada de servicios de telecomunicaciones.
3. Sobrecarga inducida por el viento, principalmente cuando el efecto de estas fuerzas es incrementado por equipo instalado, como transformadores.
4. El deterioro de los postes con el tiempo.
5. Diseño del refuerzo no eficiente que pudiese o no estar en cumplimiento con el código vigente, en particular, los postes construidos previos al 1998.
6. Inundación y sobresaturación del suelo que rodea la fundación.

Postes que se manufacturaron previo al Huracán Georges (1998) sufrieron los seis tipos de fallas descritas, pero se observó que solo dos predominaron en los postes manufacturados después de las modificaciones del diseño. Con esto de base es que se clasificaron los postes como pre-Georges y post-Georges. En los postes pre-Georges se

encontraron muchas deficiencias en el diseño, pero predominantemente la falta de confinamiento en el hormigón por aros y cantidad limitada de refuerzo para cortante y flexión.

Para los postes post-Georges, la falla típica que predominó fue fundación inapropiada e impacto por vegetación. En la Figura 10(a) se muestra un poste que cayó porque su fundación se saturó y se redujo su capacidad lateral. Esta situación se observó primordialmente donde los postes fueron hincados en suelos con pendiente. En otros casos, como en la Figura 10(b), los postes fallaron al caer vegetación sobre las líneas eléctricas, sobrecargando el poste.

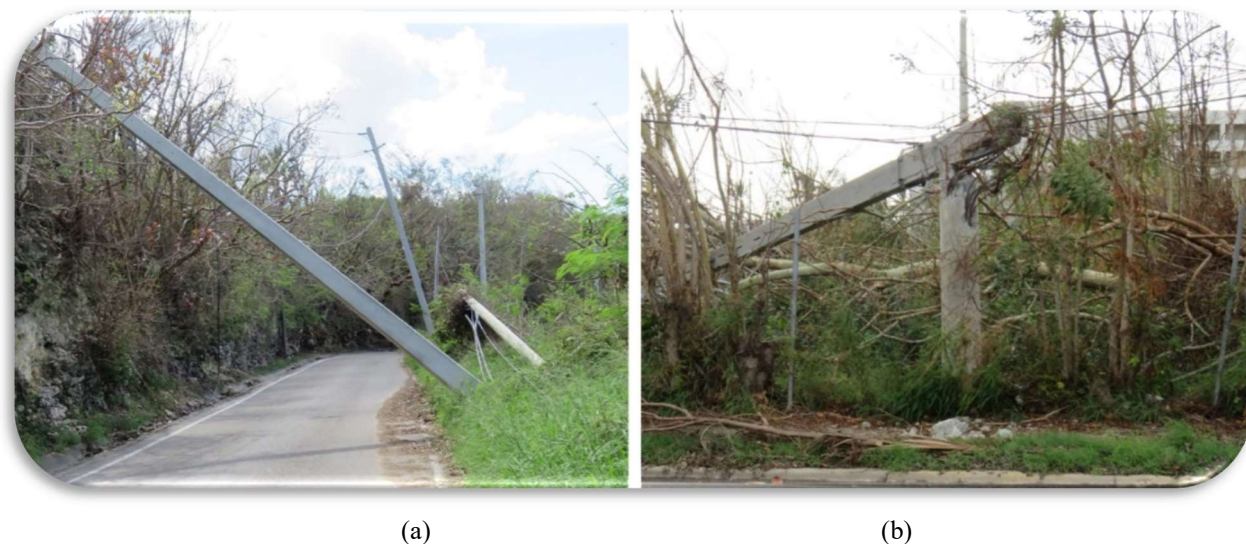


Figura 10: Ejemplos de modos de falla de postes de hormigón post-Georges.

CONCLUSIONES

Este artículo incluye las observaciones y la evaluación preliminar de muestras de postes de hormigón en Puerto Rico que fueron dañados por el paso del huracán María entrando como tormenta de alta intensidad de categoría 4. El trabajo se realizó entre el 3 de octubre y el 11 de octubre de 2017 y se evaluaron solo postes de hormigón para uso de distribución, no de transmisión. Los tipos de postes eran de concreto pretensado de fundido estático, de categorías H4, H6 y H8, y, que de acuerdo con las placas de identificación o estampados en muchos de ellos, fueron fabricados en Puerto Rico.

Los postes fabricados antes del huracán Georges (1998) exhibieron seis causas de falla según se discutieron, mientras que solo se observaron dos predominantemente para postes fabricados después del huracán Georges. Con base en esto, los postes se clasificaron como pre-Georges y post-Georges. En general, los postes carecían de suficiente refuerzo transversal. Muchos también parecían estar sobrecargados con líneas de comunicación que probablemente se agregaron con el tiempo después de su instalación. En algunos casos, en la sección dañada se pudo observar que carecían por completo del refuerzo transversal. En la mayoría de los casos, el hormigón de los postes examinados parecía sólido, y se pudo comprobar realizando la prueba del “Schmidt Hammer” tanto en postes sanos como fallidos. Muchos de los postes fueron sobrecargados por trozos de vegetación que impactaron las líneas adjuntas o por la falla de postes de madera que se encontraban en la misma línea. Parecía que la sobrecarga resultante del huracán María se vio agravada por las sobrecargas mencionadas sobre las adiciones en líneas de comunicación. Esto y las malas condiciones del suelo fueron las principales causas de falla observadas en los postes posteriores a Georges. Se recomienda una mayor investigación sobre el tema del refuerzo transversal y la capacidad de los postes de concreto para servicios públicos, tal como están diseñados actualmente, para resistir vientos con fuerza de huracán.

REFERENCIAS

- AEEPR (Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico) (1986). *Patrones de Construcción de Distribución Aérea*. Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico, Directorio de Transmisión y Distribución.
- ASCE (American Society of Civil Engineers) (1995). “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures”, (ASCE 7-95), ASCE, Reston, VA.
- ASCE (American Society of Civil Engineers) (2005). “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures”, (ASCE 7-05), ASCE, Reston, VA.
- ASCE (American Society of Civil Engineers) (2010). “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures”, (ASCE 7-10), ASCE, Reston, VA.
- ASCE (American Society of Civil Engineers) (2012). *Prestressed Concrete Transmission Pole Structures: Recommended Practice for Design and Installation*, Wesley J. Oliphant, Douglas C. Sherman, Eds., ASCE, Reston, VA.
- ASCE (American Society of Civil Engineers) (2016). “Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures”, ASCE 7-16, Reston, VA.
- ASTM (ASTM International) (2013a). Standard C 935, “Standard Specification for General Requirements for Prestressed Concrete Poles Statically Cast”, Standard C 935. West Conshohocken, PA: ASTM International. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- ASTM (ASTM International) (2013b). Standard C 1089, “Standard Specification for Spun Cast Prestressed Concrete Poles”, Standard C 1089, West Conshohocken, PA: ASTM International, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- ASTM (ASTM International) (2013c). Standard C 805, “Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete”. Standard C 805. West Conshohocken, PA: ASTM International, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- Commonwealth of Puerto Rico (1999). *Puerto Rico Building Code 1999*, Puerto Rico Permits and Regulations Administration, San Juan, PR.
- Commonwealth of Puerto Rico (2011). *2011 Puerto Rico Building Code*, Puerto Rico Permits and Regulations Administration, San Juan, PR.
- Commonwealth of Puerto Rico (2016). *2016 Puerto Rico Building Code*, Puerto Rico Permits Management Office, San Juan, PR.
- ICBO (International Conference of Building Officials) (1997). *Uniform Building Code 1997*, ICBO, Whittier, CA.
- ICC (International Code Council) (2009). *2009 International Building Code*, ICC, Country Club Hills, IL.
- NOAA, Historical Hurricane Tracks <<https://coast.noaa.gov/hurricanes/>> (Accedido el 11/9/2017).
- Rivera Cruz, J.A. (2015). “Comportamiento Estructural de Edificios Industriales Típicos Propiedad de PRIDCO Sujeto a Cargas de Viento y Terremoto”, Tesis para Requisitos del Grado de Maestro en Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez.
- Romano, G.W. (2013). *Fortieth Annual Report on the Electric Property of the Puerto Rico Electric Power Authority*, URS Corporation, San Juan, PR.
- Ruiz, W. M. (1999). “Inspection, Structural Evaluation and Design Recommendations for PREPA Prestress Concrete Distribution Line Facilities after Hurricane Georges”, Walter M. Ruiz & Associates, Final Report.
- WeahterFlow, www.windalert.com. (Accedido el 10/23/2017).