

RESISTENCIA A FATIGA DE TECHOS DE MADERA Y ZINC BAJO VIENTOS DE HURACANES ¹

Daniel Avilés ², Ali Saffar ³, Ricardo Ramos ⁴ y Rolando García ⁵

Resumen: Este artículo resume los resultados de un estudio sobre el comportamiento de sistemas de techos de madera y zinc ante cargas cíclicas causadas por los huracanes. Desde el Huracán Hugo hasta el Huracán Georges, la mayoría de las pérdidas estructurales relacionadas a tormentas en Puerto Rico ocurrieron en casas de madera con techos de planchuelas de acero galvanizado y zinc. Debido al pobre desempeño de estas estructuras de madera, se realizaron un total de 26 pruebas experimentales a escala real para probar la eficacia de las guías existentes con varias configuraciones de campo y establecer mejoras costo-efectivas para estos sistemas de techos. La mayoría de las pruebas experimentales consistieron de ciclos de carga con amplitudes constantes para evaluar el rendimiento contra la fatiga de las muestras. Además, con los resultados experimentales, se obtuvo una ecuación de fatiga S-N para este tipo de construcción.

Palabras clave: planchuelas de acero galvanizado y zinc, techos de madera y zinc, vientos huracanados, vida de fatiga, requisitos de conexiones de madera.

FATIGUE STRENGTH OF WOOD-ZINC ROOF SYSTEMS UNDER HURRICANES WINDS

Abstract: This paper summarizes the results of a study on the behavior of wood-zinc roof systems under hurricane cyclical loads. From Hurricane Hugo to Hurricane Georges, the majority of storm related structural losses in Puerto Rico have been attributed to wood-zinc houses. Due to the poor performance of these wood structures, a total of 26 specimens were tested at full scale to examine the adequacy of the existing guidelines for various field configurations, and to establish cost effective retrofitting measures. Most of the loading schedule tests consisted of constant amplitude fatigue tests to evaluate the performance of the design prototypes. In addition, a fatigue S-N equation was obtained with the experimental results for this type of construction.

Keywords: connection requirements, hurricane winds, fatigue life, wood-zinc roof systems, zinc-coated galvanized steel.

INTRODUCCIÓN

Desde el Huracán Hugo hasta el Huracán Georges, la mayoría de las pérdidas relacionadas a tormentas en Puerto Rico ocurrieron en casas de madera y zinc y estructuras auxiliares. Por tal razón es sumamente importante mejorar el rendimiento de tales sistemas. Basado en la experiencia del pasado, hay suficiente evidencia que indica que las pruebas estáticas no predicen adecuadamente el comportamiento de los sistemas de techos construidos de madera y zinc. Para medir la resistencia, no solamente es adecuado conocer la carga de falla, sino también el mecanismo de falla de la estructura. La naturaleza dinámica de un huracán y la fuerza de levantamiento que produce deben ser investigadas para poder lograr esta meta.

Hay varios estudios llevados a cabo sobre este tipo de sistemas estructurales, o semejantes. Mahendran (1990) reportó un estudio con planchuelas de techo tipo arco tangente, donde condujo varias pruebas a escala real, cambiando

¹ Artículo recibido el 2 de abril de 2006 y en forma revisada el 10 de junio de 2006.

² Ph.D., CSA Group, Edificio Mercantil Plaza, Av. Ponce de León 2, San Juan, Puerto Rico 00918, Ex- estudiante graduado de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez. E-mail: daviles@csagroup.com.

³ Catedrático, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico 00681-9041. E-mail: asaffar@uprm.edu.

⁴ Catedrático Asociado, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico 00681-9041. E-mail: rramos@uprm.edu.

⁵ Candidato Doctoral, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico.

los largos de alma y el tipo de conexión. Xu (1995) investigó el desempeño frente a la fatiga de tres tipos diferentes de planchuelas usadas en la construcción de techos, bajo la repetición de cargas con amplitud constante y simulando a la vez cargas de viento. Localmente, en la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, se han realizado investigaciones sobre fatiga causada por el viento en pisos (en inglés “decks”) de acero (Figuroa, 1996) y de los paneles de metal corrugado usado como tormenteras (Borges, 1998).

Esquemas de pruebas a escala real fueron desarrollados en el laboratorio para estudiar los efectos de las cargas de viento en los sistemas de techos construidos de madera y zinc. Se tuvieron en cuenta los métodos existentes de construcción para estos techos, como también diferentes maneras de conectarlos a vigas de soporte y paredes de la estructura. Un objetivo principal de este trabajo es mejorar y hacer efectivos los requisitos de diseño de estos sistemas de techos de madera y zinc. Esto puede lograrse con la introducción de tiras de zinc como plan de mejoras, las cuales demostraron gran potencial para prevenir fallas de fatiga en las planchuelas de zinc. La hipótesis central de la investigación es que el uso de las tiras de zinc, en combinación con los refuerzos de metal en las conexiones de los elementos de madera, debería evitar los problemas asociados a este tipo de construcción. Para evaluar en que medida ocurren mejoras, durante esta investigación se examinaron tres variantes del plan de mejoras con las tiras de zinc.

CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

El equipamiento usado para las pruebas experimentales es un sistema flexible de pórticos de soporte y de carga, diseñado y construido para realizar pruebas cíclicas de viento por investigadores del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez. Los especímenes de techos de madera y zinc se levantan y se colocan en el pórtico de soporte mediante el uso de angulares de acero. El pórtico de carga es soportado en el aire en sus dos extremos mediante pórticos adicionales fijos a ambos lados, tal como se muestra en la Figura 1. Cada uno de estos pórticos fijos consiste de un pórtico resistente a momento de un solo piso, construido con secciones A36 W6x12.

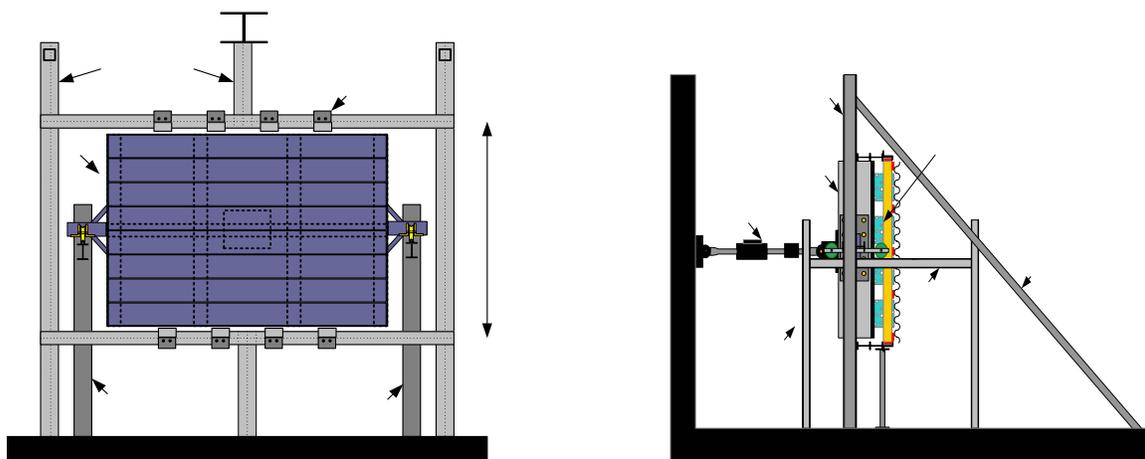


Figura 1: Configuración Experimental: a) vista frontal, b) vista de lado.

Para proveer estabilidad adicional, los pórticos fijos están conectados al pórtico de soporte. En el tope de los pórticos fijos hay un sistema de rieles de los cuales las ruedas colocadas en ambos extremos del pórtico de carga se mueven libremente en ambas direcciones (Figura 1).

Para distribuir uniformemente la carga a los especímenes de techos de madera y zinc, se usaron bolsas cilíndricas de aire colocadas entre el pórtico de carga y las planchuelas de zinc. Las bolsas cilíndricas de aire miden aproximadamente 20 pulgadas de alto y 18 pulgadas de diámetro. La carga es transferida desde el gato hidráulico al pórtico de carga, a las bolsas cilíndricas de aire y finalmente a los especímenes de los techos de madera y zinc. El gato hidráulico de la compañía MTS es capaz de aplicar una carga máxima de 36 kip, con un desplazamiento máximo de 10 pulgadas.

DISEÑO DE ESPECIMENES

Los especímenes de techos de madera y zinc fueron diseñados en base a las recomendaciones de las guías provistas por FEMA/CIAPR (1989). Estos son construidos mediante la colocación consecutiva de viguetas tratadas No. 1 de 2x6 a

un espaciado de 2 pies medidos de centro a centro entre ellas. Para el marco exterior donde se colocaron las viguetas, también se utilizan el mismo tamaño de 2x6 en sus elementos. Adicionalmente se colocan alfajías tratadas No. 1 de 1 x4 en la dirección perpendicular a las viguetas, usando el mismo espaciado de 2 pies centro a centro. Al estar las viguetas y alfajías juntas, se crea un sistema de cuadrícula donde se colocaron las planchuelas de zinc y las bolsas de aire. Para todas las conexiones de miembros de madera se emplearon (y se recomiendan) clavos torneados galvanizados y refuerzos de metal.

Las planchuelas de zinc son del tipo comercial, conforme al estándar del ASTM A653/A653M. A diferencia de las planchuelas tipo estructurales, en estas planchuelas no hay límites impuestos en la composición química, pueden ser compradas en varios largos y su grosor puede variar entre los 26 a 30 de “gauge”. El grosor más común en el mercado es el de 26 y no implica un costo mayor en comparación con los otros grosores. Todos nuestros especímenes utilizan planchuelas de zinc con grosor de 26 “gauge”. A pesar de su baja resistencia a los elementos ambientales y pequeño grosor en comparación con las planchuelas estructurales, las planchuelas de zinc y acero galvanizado son las favoritas para la mayoría de los dueños de casas de madera debido a que son livianas, de bajo costo y fáciles de instalar.

Las recomendaciones de construcción para las planchuelas de zinc son las siguientes. Primero, planchuelas consecutivas deben entrelazarse por no menos de 6 pulgadas. Esto es equivalente a dos ondulaciones o valles de las planchuelas, como se muestra en la Figura 2. Segundo, para conectar las planchuelas a las alfajías, se debe usar clavos torneados galvanizados de 2.5 pulgadas de largo a un espaciado máximo entre ellos de 6 pulgadas. Esto es equivalente a un clavo por cada dos ondulaciones o valles. Tercero, los clavos deben ser doblados en la parte posterior de las alfajías, en dirección perpendicular a las fibras de la madera. La razón de doblarlos es para aumentar su capacidad frente a cargas de levantamiento. Cuarto, se requiere un clavo adicional en las zonas de entrelace de planchuelas, ya que estas zonas son las más vulnerables frente a los embates del viento. Finalmente, todos los clavos deben colocarse en la parte superior de las ondulaciones o valles de las planchuelas para evitar problemas de drenaje.

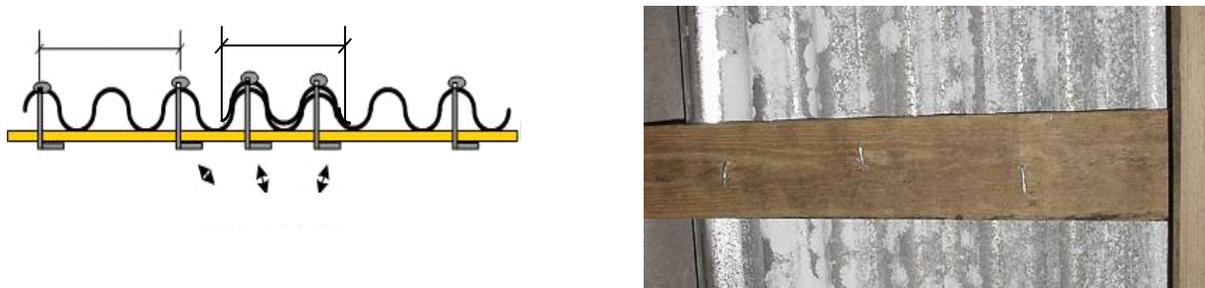


Figura 2: Conexiones entre alfajías y planchuelas de zinc.

Dos generaciones de prototipos fueron examinados durante el transcurso de esta investigación. La primera generación de prototipos usó simplemente dos clavos torneados y galvanizados de 3.5 pulgadas para conectar las alfajías con las viguetas, sin utilizar tiras de metal adicionales para reforzar esa conexión. Esto es contrario a las recomendaciones de FEMA, pero es consistente a las observaciones en el campo, donde se encontraron muchos casos similares. Todos los prototipos de la primera generación, identificados como 1, 1a, 2 y 3 fallaron en las conexiones de las alfajías y viguetas debido a la separación de los clavos y se discuten en más detalles por Avilés (2006). La segunda generación de prototipos, identificados como 4 y 5, cumple con todas las recomendaciones dadas por FEMA. De los Prototipos 4 y 5, los Prototipos 5 probaron ser una mejor representación de las conexiones entre el techo con las paredes. Los resultados de estos especímenes se discuten en este artículo.

La Figura 3 muestra un dibujo a escala de los especímenes de Prototipo 5. Para cada conexión entre vigueta y viga madre se usaron dos clavos torneados y galvanizados de 3 pulgadas, como además un refuerzo de metal tipo Simpson LU26. Los clavos usados para los refuerzos de metal son galvanizados de 1.5 pulgadas, 10d. El espécimen es colocado en el pórtico de soporte usando 8 conectores tipo Z, espaciados a intervalos de 1.5 pies, los cuales proveen soporte lateral y vertical a éste. Las viguetas se colocan en dirección vertical con respecto al marco exterior. Este tipo de conexión se aproxima más a las condiciones reales, donde las viguetas de madera son conectadas a paredes con suficiente tamaño y rigidez para restringir movimientos en la dirección vertical.

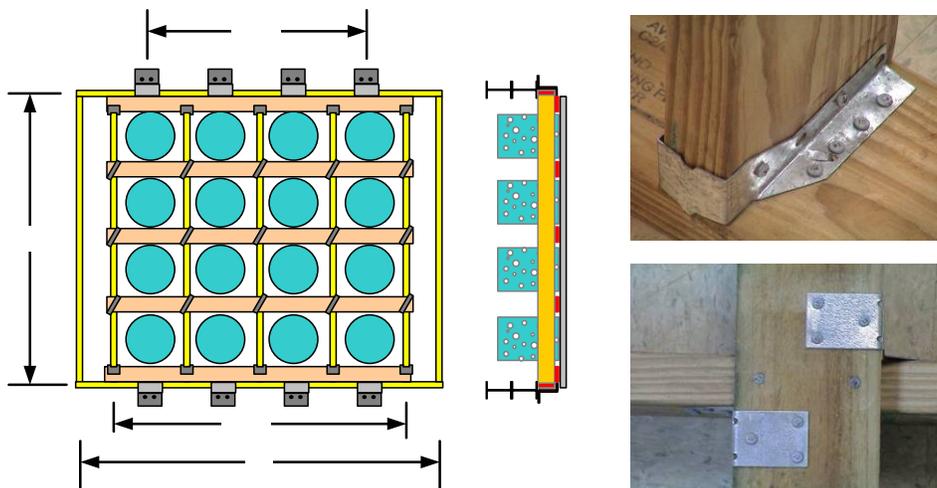


Figura 3: Espécimen de Prototipo 5.

DESEMPEÑO ANTE FATIGA

Un total de siete especímenes de Prototipo 5 fueron probados bajo cargas cíclicas usando una amplitud máxima constante. Los objetivos de estas pruebas eran crear una relación de carga-ciclos para los sistemas de techos de madera y zinc, e identificar los puntos débiles del sistema para considerarlos en el momento de hacer mejoras. En nuestras pruebas se considera falla total cuando el espécimen no es capaz de resistir o mantener la carga máxima asignada previamente en el esquema de carga, o cuando el régimen de carga se detiene para evitar daños permanentes al sistema donde se prueban los techos, debido a excentricidades o limitaciones causadas por algunas fallas locales en los especímenes. A menos de que el sistema de pruebas esté en riesgo, una falla total es generalmente causada por la acumulación de daños durante la prueba.

El primer espécimen de los Prototipos 5 probados fue el espécimen 11 a cargas cíclicas de 0 a 6.5 kip y con una frecuencia de 1 Hz. Distribuyendo esa carga de 6.5 kip sobre el área de prueba del espécimen, la carga de 6.5 kip sería equivalente a una velocidad de viento de 145 mph bajo el escenario discutido por Avilés (2006). El espécimen tuvo falla total a los 5,924 ciclos, que es un número bajo de ciclos. El modo de falla equivalente fue uno de fatiga entre las conexiones de las planchuelas de zinc con las alfajías.

Los especímenes 12 y 13 fueron probados bajo la misma amplitud constante, pero con frecuencias de 1.5 Hz y 0.5 Hz, respectivamente. El espécimen 13 falló a los 3,352 ciclos, lo que representa un número de ciclos que es un 43% menor en comparación con el espécimen 11. Esto era de esperar debido a que para la frecuencia usada cada ciclo de carga le toma el doble del tiempo en completarse. En el espécimen 12 hubo un error durante la prueba que hizo que se detuviera a los 4,805 ciclos. Se decidió hacer otra prueba, identificada como la prueba 25a, para reemplazar los resultados perdidos en la prueba 12. El espécimen 25a falló a los 6,161 ciclos, como se muestra en la Figura 4.



Figura 4: Fallas de fatiga en las conexiones de las planchuelas de zinc y alfajías.

El espécimen 14 fue probado a cargas cíclicas de 0 a 5.5 kip y a una frecuencia de 1.5 Hz. Esta carga de 5.5 kip representa una velocidad de viento de 135 mph. En esta prueba hubo un error en la colocación de las bolsas de aire en el lado izquierdo del espécimen. Esto se pudo comprobar luego con las lecturas de los potenciómetros, que indicaron que

el lado inferior derecho estaba recibiendo la mitad de la carga en comparación con los otros potenciómetros en las otras esquinas. Además, visualmente se puede confirmar que la mayoría de los daños se encuentran en el lado izquierdo del espécimen. La prueba 25 fue creada para reemplazar la prueba 14. El espécimen falló a los 7,150 ciclos. El modo principal de falla fue la fatiga de las planchuelas de zinc (Figure 5).

El espécimen 15 se ensayó a cargas cíclicas de 0 a 4.5 kip y con una frecuencia de 1.5 Hz. Basado en la presión equivalente, 4.5 kip equivale a una velocidad de viento de 125 mph. La falla total del espécimen ocurrió a los 12,812 ciclos. De manera similar a los especímenes anteriores, el modo de falla fue de fatiga en las planchuelas de zinc (Figura 6).



Figura 5: Fatiga en las conexiones de planchuelas de zinc a alfajías del espécimen 25.

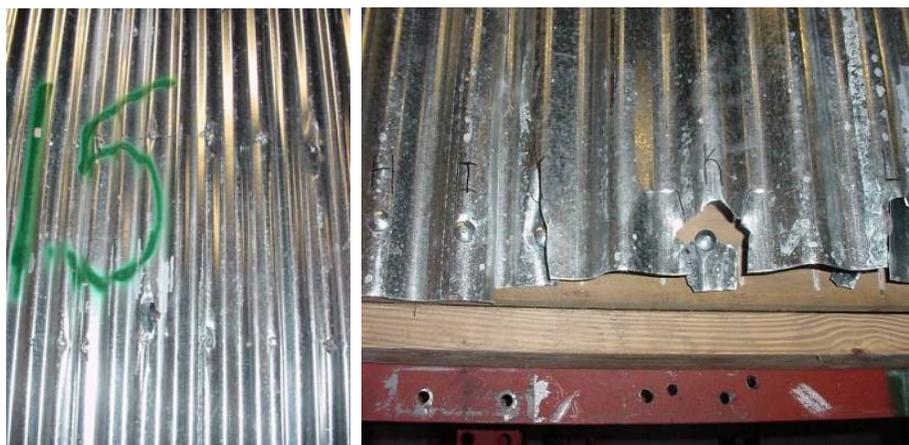


Figura 6: Fatiga en las conexiones de planchuelas de zinc a alfajías del espécimen 15.

Desde hace tiempo se ha reconocido que la relación entre carga (S) y el número de ciclos para falla (N) es lineal cuando cada variable se expresa en forma logarítmica (Weibull, 1961). La vida de fatiga de los sistemas de techos construidos con madera y zinc es evaluada usando los resultados de los especímenes 10, 11, 15, 25, y 25a, como se presenta en la Tabla 1. El espécimen 10 fue un espécimen Prototipo 4 probado a una carga cíclica de 0 a 6.5 kip y a una frecuencia de 1 Hz. Tanto el espécimen 10 como el 11 se tomaron en cuenta debido a la similitud de resultados entre ellos.

La Figura 7 presenta los diferentes puntos graficados y su regresión lineal. El valor de R al cuadrado es 0.9479, lo que indica una buena aproximación. Una regresión lineal es más confiable cuando este valor es cercano a 1. La ecuación de fatiga de esta regresión lineal es la siguiente:

$$\text{Log } S = -0.4704 \text{ Log } N + 2.58 \quad (1)$$

Esta ecuación puede expresarse de la forma:

$$S = 380 N^{-0.4704} \quad (2)$$

Tabla 1: Valores de ciclos usados para derivar la ecuación de fatiga.

Número de Prueba	Número de ciclos para falla total
10	5,643
11	5,924
15	12,812
25	7,150
25a	6,161

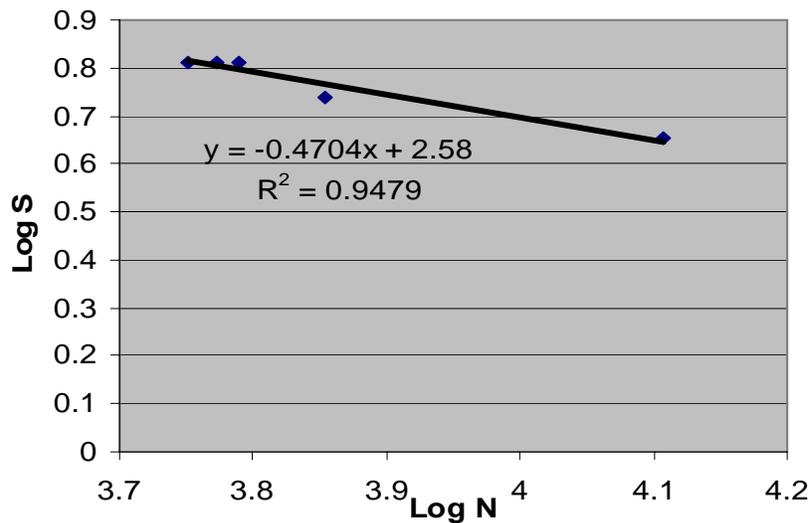


Figura 7: Curva S-N.

En la Tabla 2 se presentan los valores proyectados usando la ecuación (2). Además, se dan diferentes valores de N a un 5% de percentila. Para estos valores, se supuso que por cada valor de S, N va a tener una distribución log-normal, lo cual resulta razonable para un factor de resistencia. Segundo, para cualquier valor de S, los valores de N calculados de la ecuación (2) son considerados como valores promedios para usarse en la función de la distribución se consideraron. Tres coeficientes de variación (VN), 0.25, 0.33, y 0.50. Dado el grado comercial de las planchuelas de zinc, valores VN menores de 0.25 no fueron considerados.

Tabla 2: Valores proyectados de carga-ciclos correspondientes a la ecuación de fatiga.

S (kip)		3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
N (Ecuación)		29540	21286	16025	12476	9972	8143	6768	5709	4877
N (5%)	V _N =0.25	27264	19646	14791	11514	9204	7516	6247	5269	4501
	V _N =0.33	25766	18566	13978	10882	8698	7103	5903	4980	4254
	V _N =0.50	21991	15846	11930	9288	7424	6062	5039	4250	3631

DISEÑO DE MEJORAS

En nuestras pruebas de los especímenes de segunda generación, el modo de falla que dominó fue el de fatiga entre la conexión de las planchuelas de zinc con las alfajías. Para aumentar los números de ciclos necesarios para una falla total, se decidió usar varias capas de tiras de planchuelas de zinc colocadas en las líneas formadas por los clavos.

Las tiras de zinc tienen un ancho similar a las alfajías o sea de 4 pulgadas. Estas se colocan encima de las planchuelas de zinc, para luego unirse con clavos a las planchuelas y a las alfajías. El uso de tiras de zinc hace que las reacciones de las cabezas de los clavos se distribuyan en un área mayor, por lo que se reduce el esfuerzo en las planchuelas de zinc. La construcción de los prototipos que tienen tiras de zinc se puede apreciar en la Figura 8.

Un total de seis especímenes Prototipo 5 fueron mejorados con estas tiras y probados durante el curso de este estudio. El primer espécimen fue de tipo exploratorio, con el fin de probar los límites del sistema. Otros cuatro fueron probados con cargas cíclicas de 0 a 6.5 kip. Finalmente, uno fue probado con cargas cíclicas de 0 a 5.5 kip. Se examinaron tres configuraciones diferentes, dos de ellas basadas en el grosor de las tiras y una en una conexión modificada de las viguetas con la viga madre o pared. La frecuencia usada fue 1.5 Hz para todas las pruebas. La Tabla 2 da los valores proyectados usando la ecuación (2). Además se dan diferentes valores de N a un 5% de percentila. Para estos valores se supuso que por cada valor de S , N va a tener una distribución log-normal, lo cual resulta razonable para un factor de resistencia. Segundo, para cualquier valor de S , los valores de N calculados de la Ecuación (2) son considerados como valores promedios para usarse en la función de la distribución. Tres coeficientes de variación (VN) son considerados: 0.25, 0.33, y 0.50.

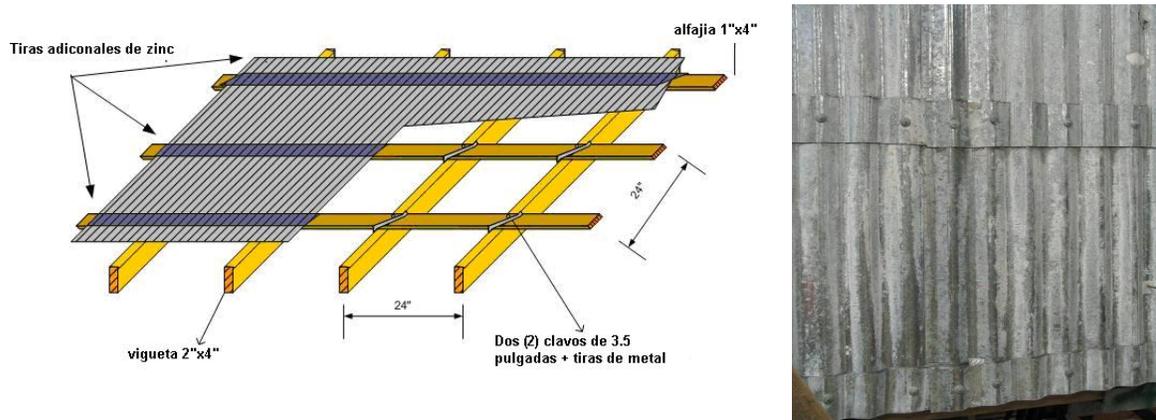


Figura 8: Prototipo 5 con tiras de zinc.

El procedimiento para hacer las tiras de zinc es sencillo. Por conveniencia, se decidió que el ancho de las tiras es igual al ancho de las alfajías, o sea 4 pulgadas. De esta manera las tiras se pueden alinear con las alfajías, simplificando la construcción de los especímenes. Antes de cortar las tiras de las planchuelas, se utiliza un marcador para primero trazar donde se van a cortar las tiras, como se demuestra en Figura 9a. Usando una sierra circular, se hacen cortes en esas líneas trazadas. De una plancha de zinc de 8 pies de largo se pueden obtener un total de 24 tiras de zinc. Se requieren entre 40 a 60 tiras por cada espécimen dependiendo del grosor que se escoja, si es de dos tiras o de tres tiras.



Figura 9: Preparando las tiras de zinc.

En la Figura 9b se aprecian varias tiras agrupadas una encima de otra. Las tiras se tienen que entrecruzar para poder cubrir los 8 pies de los especímenes. Para las tiras se siguen las mismas guías desarrolladas por FEMA usadas para las

planchuelas de zinc, como por ejemplo el mínimo de dos ondulaciones o valles para las planchuelas de zinc que se entrelazan como se muestra en Figura 9c. La Figura 9c presenta la configuración para unas tiras de un grosor de tres capas. Para cubrir las filas de clavos usados en los especímenes, se requiere un total de cuatro grupos de tres tiras de zinc por fila de clavos. En un espécimen de Prototipo 5 hay un total de cinco filas horizontales de clavos: multiplicando 5 filas por 4 grupos por 3 tiras de zinc nos da un total de 60 tiras de zinc que se necesitan por cada espécimen usando esta configuración de un grosor de tres tiras. Las tiras de zinc se unen temporalmente usando cinta adhesiva, como se muestra en la Figura 9d. Luego las tiras ya unidas se perforan con un taladro, usando una barrena de diámetro menor que los clavos, tal como lo recomienda NDS. Finalmente, las tiras de zinc se conectan a las planchuelas de zinc y alfajías usando el mismo procedimiento anteriormente explicado en base a las recomendaciones dadas por FEMA.

El espécimen 16 fue el primero en usar las tiras de zinc. Se usó una configuración de tres tiras de zinc y se probó a una carga cíclica de 0 a 4.5 kip y a una frecuencia de 1.5 Hz. Pasados los 200,000 ciclos y al no observar signos de falla, se decidió aumentar la amplitud a 5.5 kip. Después de 55,596 ciclos adicionales, el espécimen falló debido a fatiga en los refuerzos de metal de las conexiones entre las alfajías con las viguetas, como se muestra en la Figura 10.



Figura 10: Falla por fatiga en espécimen 16.

Los resultados positivos obtenidos de la prueba 16 indicaron la importancia de examinar una configuración de dos tiras. Los especímenes 17 y 18 son Prototipos 5 a los cuales se les aplicó esta mejora y fueron probados a amplitudes constantes, a 6.5 kip para el espécimen 17 y 5.5 kip para el espécimen 18. A ambos le tomó casi la misma cantidad de ciclos para llegar a falla total. Al espécimen 17 le tomó 35,126 ciclos, mientras que para el espécimen 18, fueron 35,065 ciclos. El espécimen 18 falló principalmente por la fatiga en las conexiones de las planchuelas con las alfajías. Sin embargo, a cargas mayores, el espécimen 17 falló por el desprendimiento de los clavos de anclaje en las conexiones de las viguetas con la viga madre, que causó agrietamiento en la madera de las viguetas (Figura 11).



Figura 11: Fallas por fatiga en especímenes 17 y 18.

A pesar de que los modos de falla fueron diferentes, los resultados finales de ambos especímenes con respecto a los números de ciclos fueron bastante cercanos entre sí como para inferir la posibilidad de un límite en el desempeño de las tiras de zinc. El espécimen 19 fue construido usando la configuración de tres tiras de zinc y se probó a una amplitud constante de 6.5 kip con una frecuencia de 1.5 Hz. El espécimen falló a los 40,631 ciclos, resultando en un incremento promedio de 10% en el número de ciclos en comparación con la configuración de dos tiras pero no fue lo suficientemente alto como para justificar el costo adicional. El modo de falla dominante fue la falla mecánica de las conexiones entre las viguetas y la viga madre, causando que las viguetas de madera se agrietasen. Este modo de falla es similar al observado en el espécimen 17, que fue probado bajo la misma carga y frecuencia. Se concluyó que para poder

mejorar el desempeño de los sistemas de techos era necesario hacer un cambio en las conexiones de las viguetas con la viga madre.

Los especímenes 20 y 21 fueron mejorados usando la configuración de tres tiras de zinc y la colocación de dos refuerzos de metal en las conexiones de las viguetas con la viga madre (Figura 12). Adicionalmente, en vez de usar un clavo por cada dos ondulaciones o valles como ha recomendado FEMA, se decidió usar dos clavos por cada tres ondulaciones o valles para reducir la posibilidad de fallas relacionadas a la conexión entre las planchuelas de zinc y las alfajías. Ambos especímenes fueron probados a una frecuencia de 1.5 Hz y una amplitud constante de 6.5 kip. Las pruebas son duplicadas para hacer un cotejo doble sobre los resultados, ya que estas mejoras son consideradas como la última etapa en mejorar este tipo de sistema. El número de ciclos requerido para obtener fallas totales en ambos especímenes fue bastante similar entre ambos, resultando en 62,000 y 64,547 ciclos respectivamente.



Figura 12: Uso de doble refuerzo en las conexiones de las viguetas en los especímenes 20 y 21.

Tanto la configuración de dos tiras de zinc como la de tres tiras se desempeñaron sumamente bien cuando se usan en un sistema de techo construido usando las recomendaciones de FEMA-CIAPR. Para velocidades de viento de 120 mph o menores, las mejoras parecen resistir sin ningún tipo de falla. A velocidades de 135 mph o mayores, el sistema mejorado en los techos demuestra una resistencia notable de ciclos requeridos para falla, en los 35,000 ciclos o más. Esto a lo mínimo representa un factor de cinco en la resistencia de los techos a cargas cíclicas, en comparación a los techos sin tiras. La manufactura de las tiras de metal como una sola unidad debe hacer el proceso de instalación más económico y permitir mejor sellado para el drenaje del agua.



Figura 13: Fallas por fatiga en los especímenes 20 y 21.

CONCLUSIONES

Los datos experimentales demuestran claramente la necesidad de reforzar las conexiones de madera en los techos de planchuelas de zinc. El uso de tiras de metal en las conexiones de las alfajías con las viguetas es especialmente crítico. Es altamente recomendado eliminar la práctica común de simplemente clavar las viguetas.

Para las conexiones entre las planchuelas con las alfajías, generalmente se pensaría que las recomendaciones de FEMA de doblar los clavos en la parte posterior de las alfajías son obvias. Sin embargo, este detalle es comúnmente ignorado en la práctica. La situación resulta peor para techos que requieren reparación luego del paso de un huracán, en los cuales las planchuelas en su lugar se clavan al azar.

La importancia de las tiras de zinc en mejorar el desempeño de los sistemas de techos de madera con planchuelas de zinc no puede pasar inadvertida. Bajo condiciones de laboratorio, el uso de las tiras de zinc aumentó el número de ciclos para falla en un 1,000% cuando se usó en combinación con el doble refuerzo de las conexiones de las viguetas con la viga madre. Si se decide no usar el doble refuerzo de metal, uno debe esperar un aumento de por lo menos un factor de 5 en el desempeño de los techos con tiras sobre los techos comunes.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fue financiado en parte por la “Agencia Federal para el Manejo de Emergencias” (FEMA) y el “Mid-America Earthquake Center” de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. El apoyo de ambos es sumamente apreciado.

REFERENCIAS

- Avilés, D. (2006). “On Improving The Performance of Wood-Zinc Roof Systems,” Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico.
- Borges, A. (1998). “Behavior of Corrugated Metal Panels for Use as Storm Shutters.” Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico.
- FEMA (1989). “Protegiendo su casa: Mitigación de riesgos en Puerto Rico después del Huracán Hugo, Las conexiones son lo más importante”, Federal Emergency Management Agency, Reporte de Octubre 5, 1989, Puerto Rico.
- Figueroa, V. (1996). “Performance of Steel Roof Decks Subjected to Repeated Wind Loading.” Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico.
- Mahendran, M. (1990). “Fatigue behavior of corrugated roofing under cyclic wind loading”, *Civil Engineering Transactions*, Institution of Engineers, Australia, Vol. 32, No. 4, pp. 219-226.
- Weibull, W. (1961). “Fatigue Testing and Analysis of Results”, Pergamon Press, Oxford, Reino Unido.
- Xu, Y. L. (1995). “Fatigue Performance of Screw-Fastened-Light-Gauge-Steel Roofing Sheets”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 3, pp.389-398.