

EL PORQUÉ DE  
LOS ENTRAMADOS  
LIGEROS DE  
MADERA FRENTE  
A TORNADOS Y  
HURACANES

J. ENRIQUE PERAZA  
ARQUITECTO



Impresionante el fenómeno del tornado y cómo esta vieja construcción de entramado ligero de madera -sin arriostramiento- se adapta a la presión del viento

Cuando periódicamente aparecen en los medios de comunicación los destrozos producidos en las casas de madera por huracanes y tornados, muchos en Europa se preguntan cómo es posible que los norteamericanos, que son tan avanzados y -sobre todo- tan prácticos, sigan construyendo esas casas ligeras viendo cómo salen volando y se destrozan con tanta facilidad, en lugar de construir viviendas “como Dios manda” a base de ladrillo y hormigón.

Se repite de alguna manera el cuento de los tres cerditos: la casa de ladrillo no vuela por mucho que sople el lobo.

De esto y de otros aspectos trataremos en este artículo en el que se recordarán aspectos del funcionamiento de las casas de entramado ligero de madera que sirven para su diseño, sea cual sea el entorno donde se encuentren.

Se estima que en 2011, hubo 1.560 tornados en EE.UU. causando cerca de 500 muertos e indescribibles daños materiales.

Tornados de la mayor peligrosidad en la escala Fujita (EF 5 y EF 4) causaron el 75% de las muertes. Dada la extensión de las pérdidas en vidas humanas y destrucción, que suponen el 60% de las pérdidas de las compañías aseguradoras, la cuestión que se ha planteado muchas veces es el diseño estructural para cargas extremas de viento.

## 1. Introducción

Los destrozos causados por tornados se presenta como una cuestión inquietante sobre las normas de construcción, principalmente sobre las de estructuras de entramado ligero de madera.

La solución no pasa, sin embargo, por diseñar casas resistentes a ellos porque no es una solución práctica y económica y los norteamericanos son pragmáticos.

En efecto, para ser considerada resistente a los tornados, una casa debería disponer de elementos -tejado, muros, puertas, ventanas-

resistentes a proyectiles lanzados a 320 km/h. Algo parecido ocurre con casas a prueba de bala en determinadas zonas de alto riesgo de EEUU. Alcanzar este nivel de resistencia incrementaría de forma prohibitiva cualquier tipo de construcción.

La otra alternativa sería construir el edificio completamente bajo tierra -no muy práctico- para resistir vientos de esta naturaleza.

Pero hay más, incluso en zonas sensibles a los tornados al 50%, las posibilidades de que una casa sea golpeada por un tornado son solo del 1%.

Por otra parte es obvio que la solución de diseñar estructuras de entramado ligero de madera en zonas sensibles a los tornados se basa en el diseño resistente al viento de esas estructuras que deben mejorar, de esta manera, para que puedan proteger las vidas de sus habitantes.

En este sentido ha habido en los últimos años un importante aumento de la investigación en el campo de la resistencia a vientos extremos de los entramados ligeros de madera. Se han realizado y publicado numerosos artículos técnicos y ensayos por parte de instituciones oficiales, industria de la madera y centros de investigación con el objetivo de preparar guías para mejorar estas estructuras frente al viento. Algunos estados como Florida y Carolina del Norte han aplicado estrictas normas en sus códigos de construcción para asegurar una resistencia al viento mínima y los datos acumulados sobre la experiencia de estas códigos ha mostrado claramente la significativa reducción, e incluso la ausencia de daños por viento en nuevos edificios. Basándose en una extensa revisión del estado del arte en este campo se ha visto la notable mejora de la seguridad de las personas con la incorporación de refugios dentro de la estructura, con muy pocos incrementos de coste.

2. Algunos datos sobre los tornados en EE.UU.

La media anual de tornados en EEUU

es de 1.200 y la media de fallecimientos de 62, un número no excesivo. Estas cifras se incrementaron notablemente en el año 2011, con cerca de 500 siniestros, nueve veces la media anual.

La media anual de pérdidas debidas a tornados, excede los 1.000 millones de dólares pero supone en torno al 57% de las pérdidas de las compañías de seguros.

Aunque la temporada de tornados se supone que es de marzo a julio, no es infrecuente sufrir severos fenómenos fuera de este periodo. Además, el final de la temporada de tornados, señala el comienzo de la de huracanes, en ocasiones, más perniciosos que éstos.

## 2.1 Frecuencia de tornados y huracanes en EE.UU.

Un tornado es una masa de aire con alta velocidad que asciende en espiral; su extremo inferior está en contacto con la superficie de la Tierra y el superior con una nube. Es el fenómeno atmosférico ciclónico de mayor densidad energética concentrada en una extensión pequeña de terreno y de corta duración (considerando ésta desde segundos hasta más de una hora).

El huracán o ciclón tropical<sup>1</sup> es, en cambio, un área de baja presión de aire tropical (húmedo y caliente) que actúa como fuerza motriz que produce fuertes vientos y abundante lluvia también en régimen espiral ascendente<sup>2</sup>. Tiene un radio de giro mucho mayor que el tornado, que es mucho más concentrada y su sentido de acción ante un edificio puede considerarse recto. Se clasifican con la escala Saffir/Simpson<sup>3</sup>.

1 El ciclón tropical no alcanzan la intensidad de los huracanes

2 Contrariamente a lo que se piensa, el ojo del huracán se encuentra en calma total.

3 Se clasifican en:

Categoría 1: vientos de 120-150 km/h.

Los daños se limitan a arbustos, plantas y casas pobremente construidas

Categoría 2: vientos de 150-175 km/h.

Sus daños se limitan a casas pobremente construidas y rodantes

Ambos fenómenos producen vientos extremos pero los ciclones tienden a producirse sobre vastas extensiones de terreno sin excesivos accidentes geográficos, de manera que avanzan sin dificultad y a gran velocidad mientras que los huracanes se producen en el mar y en las costas, de zonas tropicales.

Los tornados se presentan en diferentes tamaños y formas pero generalmente tienen la forma de una nube embudo, cuyo extremo más angosto toca el suelo y suele estar rodeado por una nube de desechos y polvo, al menos, en sus primeros instantes

El interés por este tipo de fenómenos en nuestro país ha aumentado gracias a la televisión, tanto por la enorme extensión que se da al parte meteorológico en los telediarios, como por el desembarco de los canales temáticos americanos con sus programas sobre catástrofes, donde descubrimos figuras como las de los *cazadores de tornados*.

En EE.UU. en torno al 69% de los tornados tienen velocidades de viento inferiores a 170 km/h (se consideran de intensidad EF-0 o EF-1) y son clasificados como débiles. Tienen una duración de 1 a 10 minutos y producen menos del 5% de las muertes. Los tornados fuertes, con velocidades entre 165 y 330 km/h -EF-2 a EF-4 suponen otro 29% del total. Éstos típicamente duran 20 minutos o más y producen el 30% de las muertes. Solamente el 2% de los tornados son superiores a 330 km/h. Su duración puede exceder de 1 h, son extremadamente violentos y producen el 70% de las muertes.

### 3. Observaciones en torno a los tornados

Categoría 3: vientos de 175-210 km/h. Sus daños se limitan a estructuras pequeñas cerca de la costa por efecto del oleaje

Categoría 4: vientos de 210-250 km/h. Grandes daños en estructuras cerca de la costa además de los daños anteriores

Categoría 5: vientos de 250 km/h. Sus daños son importantes en estructuras de todo tipo.



Esta vivienda de entramado ligero de madera, queda, después de un huracán, anegada por las aguas del mar

La investigación sobre los daños causados a los entramados ligeros de madera ha producido interesantes, aunque no sorprendentes, conclusiones.

- Un edificio diseñado para vientos de 150 Km/h puede resistir el 90% de los tornados que se producen en EE.UU. y el sobre coste para alcanzar este nivel de resistencia no llega al 6% en la mayoría de los casos.
- Los daños más significativos en edificios con entramado ligero de madera, se producen por un inadecuado anclaje del entramado (del merco) a la cimentación y una deficiente conexión entre muros, forjados y cubiertas.
- Los entramados ligeros bien diseñados responden significativamente mejor que los tradicionales, por otra parte, son los más extendidos en Norteamérica.
- El fallo en resistencia de los muros conduce al colapso catastrófico de la cubierta.
- El fallo de la cubierta conduce a la pérdida de integridad del edificio.
- Cubiertas complejas con grandes pendientes producen fuerzas de succión menores.

#### 3.1 Desafíos en el diseño de casas resistentes a tornados

En un tornado, los edificios son impactados por proyectiles lanzados al aire a velocidades superiores a 330 km/h. Hacer los muros, tejados, ventanas y puertas resistentes a ellos es el mayor desafío. Sin esta resistencia, la envolvente es rasgada por el misil, lo que provoca un gran daño estructural debido al significativo aumento de la presión interior. Si se quiere alcanzar esta resistencia, entonces los costes de construcción se incrementarían significativamente superando, al menos, en un 20% en la mayoría de los casos, los costes de edificación hasta hacerlos inviables en la práctica. Además los diseños verdaderamente resistentes a tornados no son aceptables desde otros puntos de vista (ventilación, soleamiento, etc. así como valores estéticos).

#### 3.2 En qué aspectos de diseño conviene incidir para resistir vientos extremos?

La construcción debe contener detalles para resistir cargas en la estructura y asegurar la distribución adecuada de éstas hasta el terreno. Esto es generalmente lo más práctico en la mayoría de las construcciones residenciales de EE.UU.

Dado que la mayoría de ellas no los cumplen y los constructores raramente tienen conocimientos sobre

cómo influyen los esfuerzos de viento sobre la estructura, existen grandes debilidades en el parque de viviendas de EE.UU.

Esto explica la extensión de los daños producidos por vientos extremos. Los constructores necesitan estar mejor formados en cuanto al comportamiento de la estructura de madera ante el viento y especialmente en las uniones.

#### 4. Observaciones en torno a los huracanes

Algunos conceptos clave en torno a los vientos huracanados son los siguientes:

- A medida que el terreno es más escabroso, disminuye la velocidad del viento. Cuanto más alto sopla el viento, mayor velocidad alcanza porque tiene menos obstáculos.
- El huracán tiende a debilitarse rápidamente en cuanto toca tierra.
- A veces más que el viento, son más peligrosas las ráfagas que son picos de mucha mayor velocidad y de corta duración (entre 25 y 50% más fuertes que la media).
- La velocidad del viento varía mucho entre huracanes y dentro del propio huracán. Los estándares han de calcularse para los picos de mayor fuerza, no para las medias de viento.
- Los efectos del viento huracanado sobre las casas dependen de muchos factores.
- El viento crea succión en el tejado empujándolo hacia arriba.
- Cuando la inclinación del viento es mayor: el viento empuja hacia abajo una cara, y hacia arriba la opuesta, lo que tiene a evitar que se levante.
- Si el edificio tiene forma cerrada en sí misma (cuadrada o similar) el empuje es menor que si existen entrantes y salientes porque en las primeras el viento tiende a “resbalar” mientras en las segundas tiende a “enganchar” (es decir: hay que buscar formas

lo más aerodinámicas que sea posible). De alguna manera los huecos, balcones y terrazas también constituyen puntos de “agarre” del viento y por tal motivo (además de los impactos) se tienden a cerrar con tableros enrasados a muros ante una eventual alerta.

- Los aleros, que son beneficiosos para proteger las fachadas de sol y lluvia, si son largos, son perjudiciales frente a viento huracanado porque “halan” de la casa hacia arriba (máxima longitud recomendable, 18 pulgadas).
- Si la casa tiene un forjado sanitario elevado (lo que es necesario y recomendable en viviendas de madera para que la estructura esté ventilada y separada del terreno y del agua de salpicadura de lluvia) se convierte, si es excesiva (lo que en climas tropicales es corriente para evitar que suban roedores, etc.) se convierte en un peligro porque el viento pasa por debajo y forma un volumen de aire que tiende a levantar la casa. La influencia del viento puede variar en función de la topografía del terreno. Para este caso y para olas que penetran en tierra firme (marejadas ciclónicas<sup>4</sup>) se recomienda que no haya parapetos o que éstos sean ligeros y fácilmente destruibles. Si esto no es posible se deben reforzar las uniones entre los pilotes de elevación y la cimentación. También es útil que haya vegetación alrededor de la casa que realice una función similar.
- Para evitar las grandes diferencias de presión del aire entre el exterior y el interior conviene: a) que las ventanas y huecos no sean excesivamente herméticos (lo que podría hacerlas estallar) b) que haya rejillas de ventilación que igualen -relativamente- las presiones y c) abrir totalmente las ventanas que se encuentran a sotavento (en el

4 Las marejadas ciclónicas son exclusivas de los huracanes

lado opuesto a donde sopla el viento, que por otra parte puede variar en el curso de un huracán) y un poco las de barlovento.

#### 5. Detalles críticos que han de mejorarse de cara a la resistencia al viento

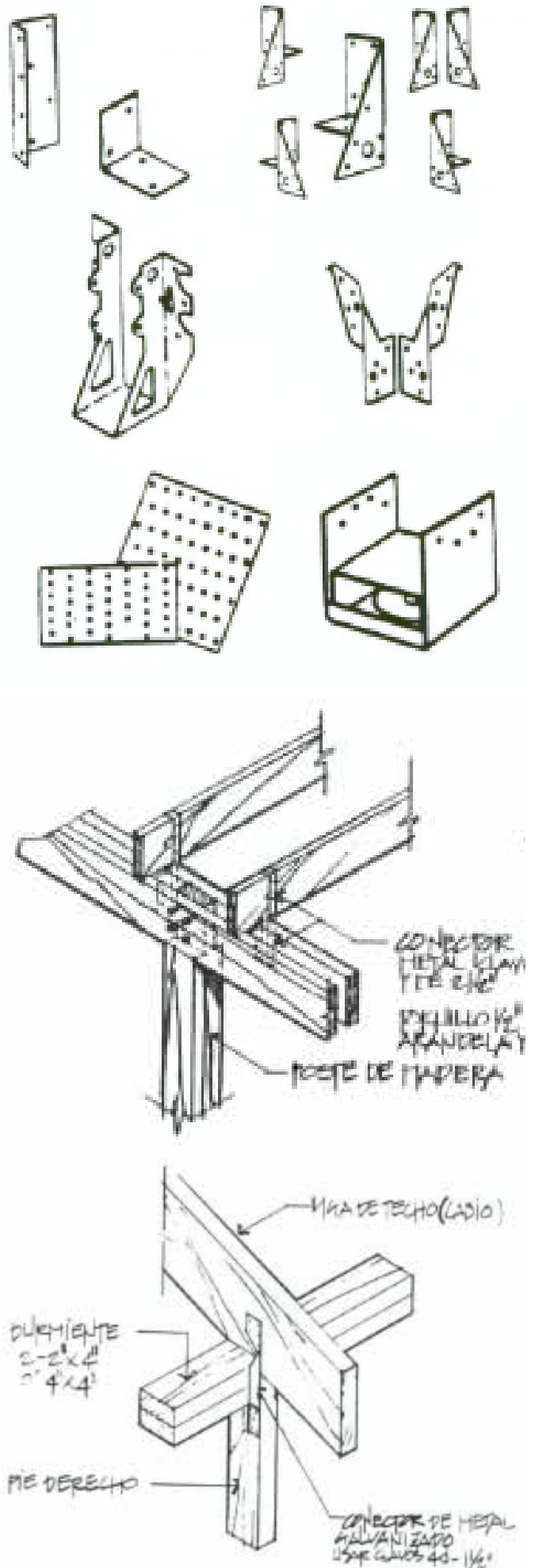
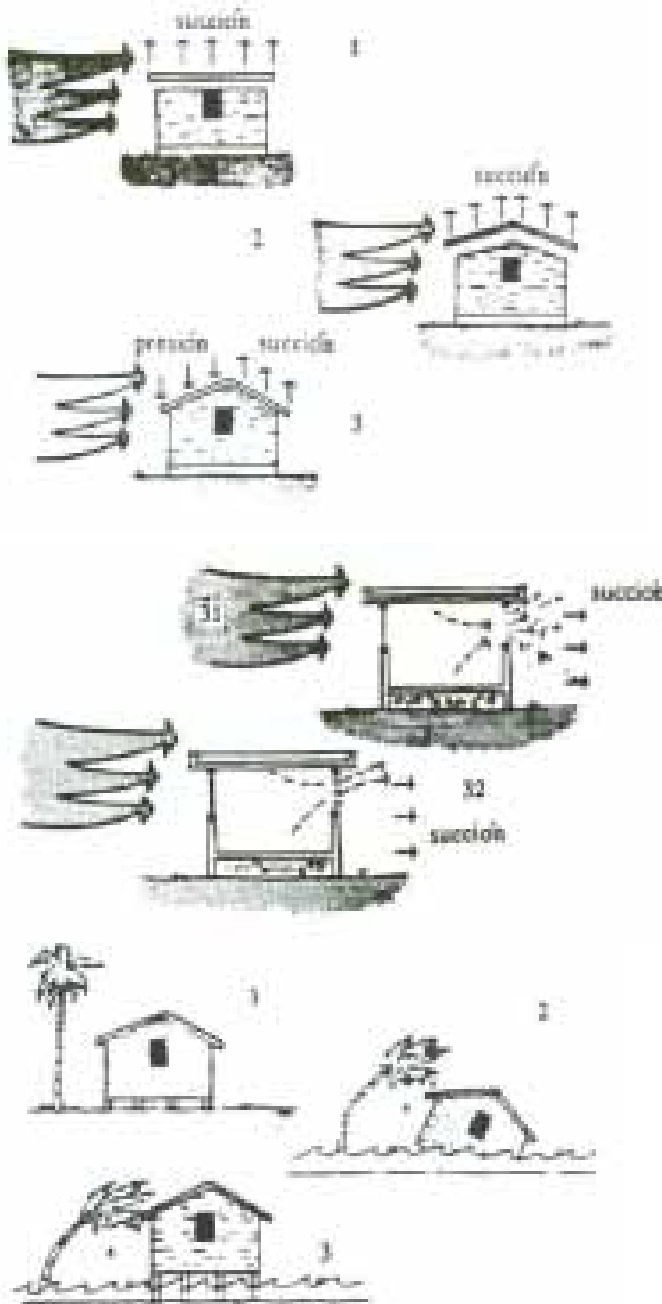
La resistencia de los materiales empleados en un edificio es tan importante como la forma en que están ensamblados, conectados y reforzados. Lograr casas de madera resistentes a huracanes depende de la forma y ubicación de la casa y de las tres buenas prácticas siguientes: continuidad, conexión y refuerzo. Para la continuidad deben estar alineados los elementos de paredes forjados y cubierta para que se transfieran adecuadamente los esfuerzos. La continuidad facilita y viene determinada por la conexión entre los elementos: una estructura es tan fuerte como lo es su conexión más débil. La unión mediante fijaciones o ‘de oído’, no es suficiente. Se ha de acudir a conectores metálicos tridimensionales. Las fijaciones (clavos o tirafondos) de éstos, deben orientarse perpendicularmente a la dirección de arranque del conector). Finalmente el refuerzo: en las esquinas deben estar reforzadas así como los laterales de los huecos (puertas y ventanas) con mayores grueso de jambas y dinteles. El tamaño y colocación de los huecos no debe debilitar la pared y éstos deben poder recubrirse con facilidad en caso de huracanes<sup>5</sup>. Además la estructura interna del muro entramado se puede reforzar con barras inclinadas y zoquetes entre montantes)

La disfuncionalidad de estas estructuras ligeras ante vientos extremos requiere que su diseño se focalice en determinados detalles constructivos.

5 Las jambas y dinteles pueden reforzarse con facilidad simplemente doblando o triplicando (acoplado) perfiles simples de 2 x 4". Por otro lado las esquinas se regruesan fácilmente buscando solapes lo más “tortuosos” posible.



El Georges fue el primer huracán de una categoría superior a 3. Que la casa sea desplazada en bloque indica la continuidad estructural del entramado. Una casa tradicional se rompería en trozos



### 5.1 Fijación del cerramiento de la cubierta

La rotura de la envolvente del edificio ante fuertes vientos se produce casi siempre en la cubierta<sup>6</sup>, y en la mayoría de los casos<sup>7</sup>, por una inadecuada fijación del cerramiento a los pares o correas.

La American Plywood Association (APA) proporciona recomendaciones sobre el grosor del cerramiento (generalmente de tableros de madera, pudiendo ser entablado en construcciones antiguas) y el tamaño y espaciado de las fijaciones empleadas.

La inspección frecuente de efectos producidos por tornados y huracanes ha mostrado repetidamente que la pérdida de la cubierta se debe al clavado, que no cumple con unas recomendaciones como las que propone el APA, incluso para vientos sustancialmente inferiores. Sin estas prácticas constructivas y un mejor control de la instalación de la cubierta estos edificios continuarán sufriendo daños.

### 5.2 Anclaje de los diafragmas de cubierta y forjados a los muros-diafragma y de los muros-diafragma a la cimentación

Una adecuada fijación del cerramiento a los pares de cubierta o a las barras superiores de las cerchas no asegura por ella misma un mejor comportamiento a las cargas extremas de viento si no se ancla adecuadamente el diafragma de cubierta al

<sup>6</sup> Por ser la parte más afectada por huracán o tornado y por su carácter crítico: si desaparece la cubierta, la ruina del edificio es segura ya que además es el elemento que ata los muros entre sí. Y no sólo en su estructura, sino también su recubrimiento (planchas, tejas, etc.): cuando éstas salen despedidas se produce una discontinuidad por donde el viento actúa más fácilmente.

<sup>7</sup> A veces el arriostamiento que produce el tablero no es suficiente y deben ponerse correas entre los pares o cerchas ligeras.

Otras veces la cubierta no está ventilada con lo que se hace imposible una cierta igualación de presiones interior-exterior.

diafragma de muro, para transmitir la carga lateral y de succión a las que está sometido.

Los diafragmas de forjado deben estar igualmente vinculados o atados a los diafragmas de muros para asegurar que las cargas laterales son adecuadamente transmitidas.

El uso de presillas o herrajes tridimensionales fuertes para anclar los pares a los testeros y carreras que rematan superiormente los montantes es un medio efectivo de asegurar suficiente resistencia del diafragma de cubierta a la succión del viento.

El espaciado y número de esas presillas a los montantes de los diafragmas de los muros, permite transferir las cargas laterales del diafragma de cubierta al diafragma de muro. Como se ha dicho, la ausencia de estas

carreras y presillas -esenciales para la transferencia de la carga lateral del diafragma de cubierta al diafragma de muro- es extremadamente común en la construcción de entramado ligero de madera, lo que explica su pobre comportamiento estructural.

La ausencia de estos conectores produce una pérdida de recorrido en la transmisión de las cargas laterales y hace a la estructura susceptible de fallo.

Otra área de preocupación es la ausencia, muy extendida, de un anclaje adecuado de los muros-diafragma a la cimentación. Sin un anclaje que permita a los muros-diafragma transferir las cargas laterales a la cimentación y resistir los esfuerzos de succión transmitidos por la cubierta, es imposible mantener la integridad estructural del edificio en una tormenta de viento.

Más del 95% de los edificios comunes (en Norteamérica) de entramado ligero no aseguran una transferencia efectiva de los esfuerzos de succión y laterales a la cimentación.

### 5.3 Fijación de los muros-diafragma transversales

La contribución de los muros transversales en la resistencia de las cargas laterales depende del clavado del cerramiento en los montantes.

Como en el caso de los diafragmas de cubierta, la APA recomienda unos patrones de tamaño y separación de las fijaciones determinados para alcanzar un nivel adecuado de resistencia a las cargas laterales.

### 5.4 Anclaje de los hastiales

Los muros piñones o hastiales son muy comunes en los edificios de entramado ligero y no siempre se les da la importancia que merecen en cuanto a resistencia al viento.

Estos paños necesitan ser diseñados para una efectiva transferencia de las cargas laterales de viento a los muros-diafragma transversales (y paralelos a la carga lateral) por medio de adecuados elementos de arriostamiento y ser también capaces de actuar como apoyos resistentes para transferir las cargas laterales del diafragma de cubierta.

La pérdida de los hastiales en las tormentas de viento (huracanes) es también uno de los fallos más comunes.

### 5.5 Vidrios resistentes a los impactos

Es frecuente ver en las noticias cómo se preparan los edificios ante la llegada de un huracán o ciclón tropical. La gente protege los huecos de puertas y ventanas clavando tableros de madera por el exterior. Esta es una medida que protege hasta cierto punto, dependiendo de la velocidad del viento.

Para reducir el riesgo de rotura de la envolvente del edificio es uso de vidrios resistentes a la efracción es vital ya que, una vez que la envolvente es perforada por el impacto de misil (entendiendo por éste cualquier cuerpo lanzado al aire a gran velocidad: del latín *missio*, enviar) en una ventana o una puerta, las presiones internas en el edificio aumentan de forma tal, que se produciría el colapso del edificio.

Después del Huracán Andrew, el estado de Florida obligó al uso de vidrios resistentes a impactos para reducir el riesgo de rotura física de la envolvente. Los beneficios de este nuevo Código han sido evidentes ya

que los edificios construidos después han sufrido menos daños -o nulos- tras los vendavales posteriores, mientras que los edificios antiguos han seguido siendo destruidos.

## 6. Elementos-clave para una mejora significativa de la resistencia al viento

Una lista de buenas prácticas dirigida a ingenieros estructurales y arquitectos podría ser la siguiente.

- Uso de estribos, placas o tirantes en vez de tirafondos como conectores en la unión par/carrera y en cada junta par/montante. Usar conectores 3D siempre que sea posible.
- Colocar conectores fuertes en las esquinas de las cubiertas
- Usar anclajes para conectar los muros- diafragma a la cimentación. Utilizar preferiblemente pernos o varillas roscadas para este anclaje siguiendo líneas continuas.
- Situar los pares cerca de las viguetas del techo y conectarlas entre sí.
- Usar clavos de anillado (cónico) para fijar el cerramiento a los montantes y pares. Este anillado produce un hincado más firme que produce una resistencia al arranque también mayor.
- Toda la madera al exterior debe ser tratada y los herrajes, con protección frente a la corrosión.
- Usar ventanas y puertas resistentes a la efracción.
- Las puertas de los garajes adosados a la vivienda constituyen un punto débil en la hermeticidad de la envolvente. Deben protegerse en caso de alerta.

## 7. Refugios anti-tornado

Como se mencionó al principio, la imposibilidad real de construcciones anti-tornado requiere la incorporación de refugios para asegurar la supervivencia de los ocupantes. Aunque es conocida su necesidad ante tornados, a veces no se encuentran integrados en la estructura del edificio.

La rotura de la envolvente a causa de un misil o la pérdida de algún componente clave del edificio, produce un aumento de la presión interior, que unida a la succión externa se traduce en la pérdida inmediata de la estructura. En ese caso la supervivencia de los habitantes solo puede asegurarse con la presencia de reugios anti-tornado interiores (los refugios exteriores no son recomendables por la exposición a misiles, tanto del edificio, como de las personas que tratan de llegar a él).

Existen diferentes tipos pero los principales son los interiores subterráneos y los sobre rasante. Los subterráneos pueden ser de hormigón armado y con entrada a nivel del terreno, con capacidad entre 2 y 12 personas. Su coste es relativamente mayor debido a la excavación. En muchas casas americanas se dispone de sótano. Siempre que éste no sea a la vez garaje, puede aprovecharse para tal fin.

Los refugios sobre rasante (como se ha dicho preferiblemente dentro del edificio) se construyen normalmente a la vez que el resto de la estructura. Esta "habitación de las tormentas" que acaba usándose para otros fines (de castigo, pequeño almacén, etc.) suele ser metálica y situarse en el garaje, debido a su escasa capacidad de camuflaje dentro de una vivienda tradicional. Existen guías para su construcción, planos y folletos que se venden en ferreterías y centros comerciales.

El mayor problema reside en el tiempo al que se accede al refugio, que está relacionado con la capacidad de alerta de los servicios meteorológicos.

## 8. Nuevas tecnologías para la protección frente a tornados

La construcción anti-tornado es uno de los mayores desafíos para la construcción de entramado ligero de madera en EE.UU. La integración de nuevos materiales como fibra de carbono, mezcla de metales o kevlar, en la envolvente del edificio, podría en el futuro proporcionar una adecuada

protección de las fachadas frente a los misiles. Estas nuevas tecnologías requerirán nuevos conceptos constructivos, todavía por desarrollar.

## 9. Conclusiones

Podrían mencionarse las siguientes.

- Mientras la construcción a prueba de tornados sea posible, los usuarios no aceptarán sobrecostes superiores al 20% ni estéticas desagradables en sus casas.
- Una alternativa viable es -con pequeños incrementos de coste- casas que puedan resistir vientos de hasta 250 km/h que cubre el 97% de los tornados.
- Usar fijaciones y anclajes adecuados es esencial para que la estructura resista adecuadamente las cargas de viento laterales y de succión.
- Utilizar puertas y ventanas resistentes a la efracción para lograr resistir, al menos, a los tornados de baja intensidad.
- Utilizar cubiertas empinadas y de diseño tortuoso preferentemente a las de poca pendiente o planas.
- Ante la posible presencia de tornados de gran intensidad es esencial incorporar un local seguro, preferiblemente dentro de la estructura del edificio.
- La industria del seguro debe incentivar las mejores prácticas constructivas, por ejemplo con premios a los mejores diseños, etc.

## Bibliografía

- Best design practices for wood frame construction in tornado prone areas. Vijaya Gopu. World Conference on Timber Engineering. Auckland 2012 (16-19 July)
- Guía para la construcción de viviendas resistentes a huracanes en Puerto Rico.
- Wind Resistance of Conventional Light-Frame Buildings
- Ronald W. Wolfe, Ramon M. Riba and Mike Triche, Member-Guide for wood construction in high wind areas. APA (2001) 