

DAÑOS ESTRUCTURALES CAUSADOS POR EL HURACÁN KATRINA EN MISSISSIPPI¹

Ricardo R. López², Jack Hayes³ y Habib Rahman⁴

Resumen: Este artículo resume algunos de los daños estructurales observados en una visita realizada siete semanas después del paso del huracán Katrina por el sur del estado de Mississippi. Se enfatizan los daños a las estructuras diseñadas por ingenieros. Pudo apreciarse que la marejada ciclónica fue la causante de la mayoría de los daños en esa zona. Las estructuras de estacionamiento construidas con elementos prefabricados y las estructuras de vigas y losas postensadas experimentaron daños importantes. Se ilustran además casos de estructuras impactadas por barcas y de estructuras de construcción mixta, y se resalta la diferencia entre el daño causado por el agua versus el daño causado por el viento.

Palabras Claves: hormigón postensado, hormigón prefabricado, huracán Katrina, marejada ciclónica.

STRUCTURAL DAMAGE CAUSED BY HURRICANE KATRINA IN MISSISSIPPI

Abstract: This article summarizes some of the structural damage observed seven weeks after hurricane Katrina passed through the south of the state of Mississippi. Damage to engineered structures is emphasized. The storm surge caused most of the damage in the zone. Precast concrete parking structures and structures built with postensioned slabs and beams suffered important damage. Other cases shown include buildings impacted by casino barges, mixed concrete and timber construction and differences in damage caused by water as opposed to wind is highlighted.

Keywords: hurricane Katrina, postensioned concrete, precast concrete, storm surge.

INTRODUCCIÓN

El huracán Katrina produjo daños en Cuba y en varios estados del sur de los Estados Unidos en el mes de agosto de 2005. Los autores visitamos la zona de Mississippi desde Biloxi a Gulfport los días 16 al 21 de octubre de 2005 como parte de un equipo del National Institute of Standards and Technology (NIST). Este artículo recoge muchas de las observaciones hechas con relación a la resistencia de estructuras con diseño ingenieril en la zona.

SOBRE EL HURACÁN KATRINA

Katrina es el huracán más dañino que ha afectado a los Estados Unidos. Al momento se estima que causó 1604 muertes y daños por 675,000 millones de dólares. La Figura 1 muestra el paso del ojo del huracán según reportado por el Centro Nacional de Huracanes. Puede observarse que pasó por la zona estudiada el 29 de septiembre de 2005. A esta fecha Katrina era un huracán categoría 3 con vientos máximos de 130 millas por hora (220 Km/h). La Figura 2 muestra los vientos máximos por día de Katrina. La Figura 3, tomada del periódico Herald Sun de Biloxi, muestra un estimado de las alturas máximas del agua, marejada ciclónica más el oleaje asociado al viento, registradas en la zona afectada. En general la altura del agua en la zona del Golfo de México varió de 24 pies (7.3 m) en Biloxi a 30 pies (9.1 m) en Gulfport. Los daños causados por la marejada ciclónica excedieron por mucho los daños causados por el viento en esta zona. No era la primera vez que se registraban marejadas ciclónicas altas ya que el huracán Camille en 1969 registró

¹ Artículo recibido el 10 de abril de 2006 y en forma revisada el 11 de mayo de 2006.

² Catedrático y Director Asociado, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, PR, 00681-9041, Email: rilopez@uprm.edu

³ Department Director, National Earthquake Hazards Reduction Program, National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Drive, MS 8610, Gaithersburg, MD 20899-8610, Email: jack.hayes@nist.gov

⁴ Research Officer, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Building M-20, 1200 Montreal Road, Ottawa, ON, Canada K1A 0R6, Email: habib.rahman@nrc-cnrc.gc.ca

marejadas de sobre 15 pies (4.6 m). Sin embargo, Katrina superó la altura de marejada esperada. La Figura 4 muestra la extensión en tierra de la inundación.

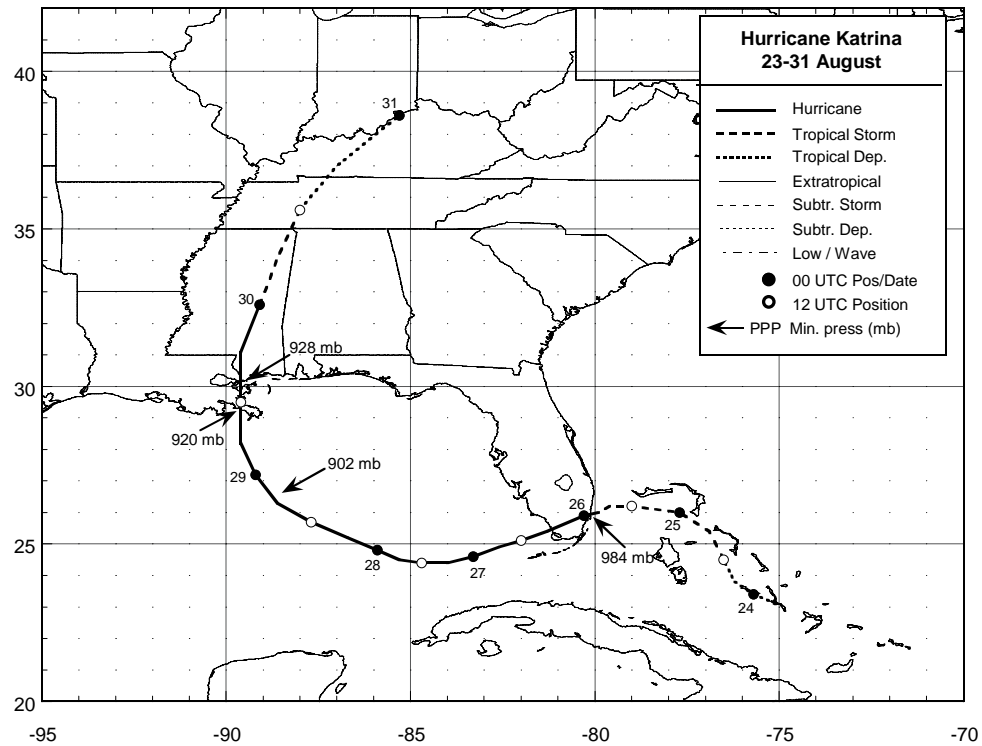


Figura 1: Trayectoria del ojo del huracán Katrina (Fuente: NHC 2005).

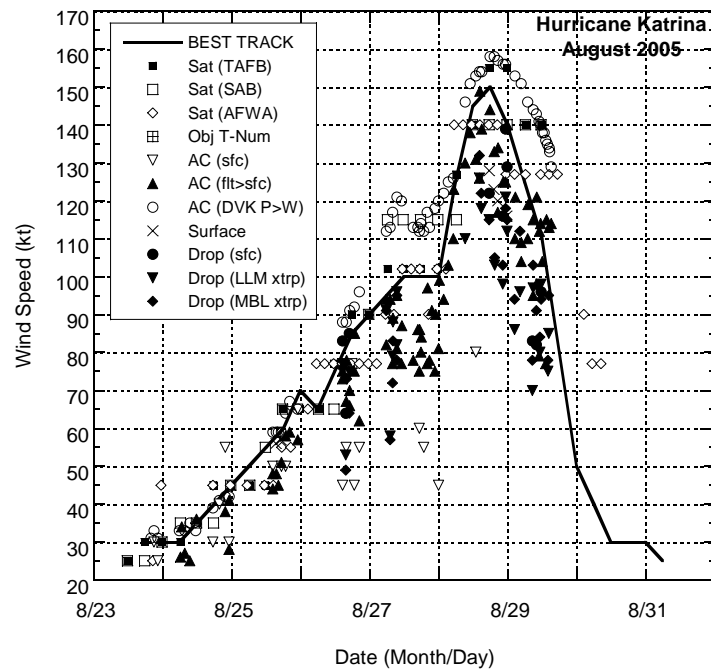


Figura 2: Vientos máximos medidos (Fuente: NHC 2005).

Plotting Katrina's surge

Surveyors have begun documenting and refining the data from Hurricane Katrina's storm surge. Here are some of their preliminary findings.

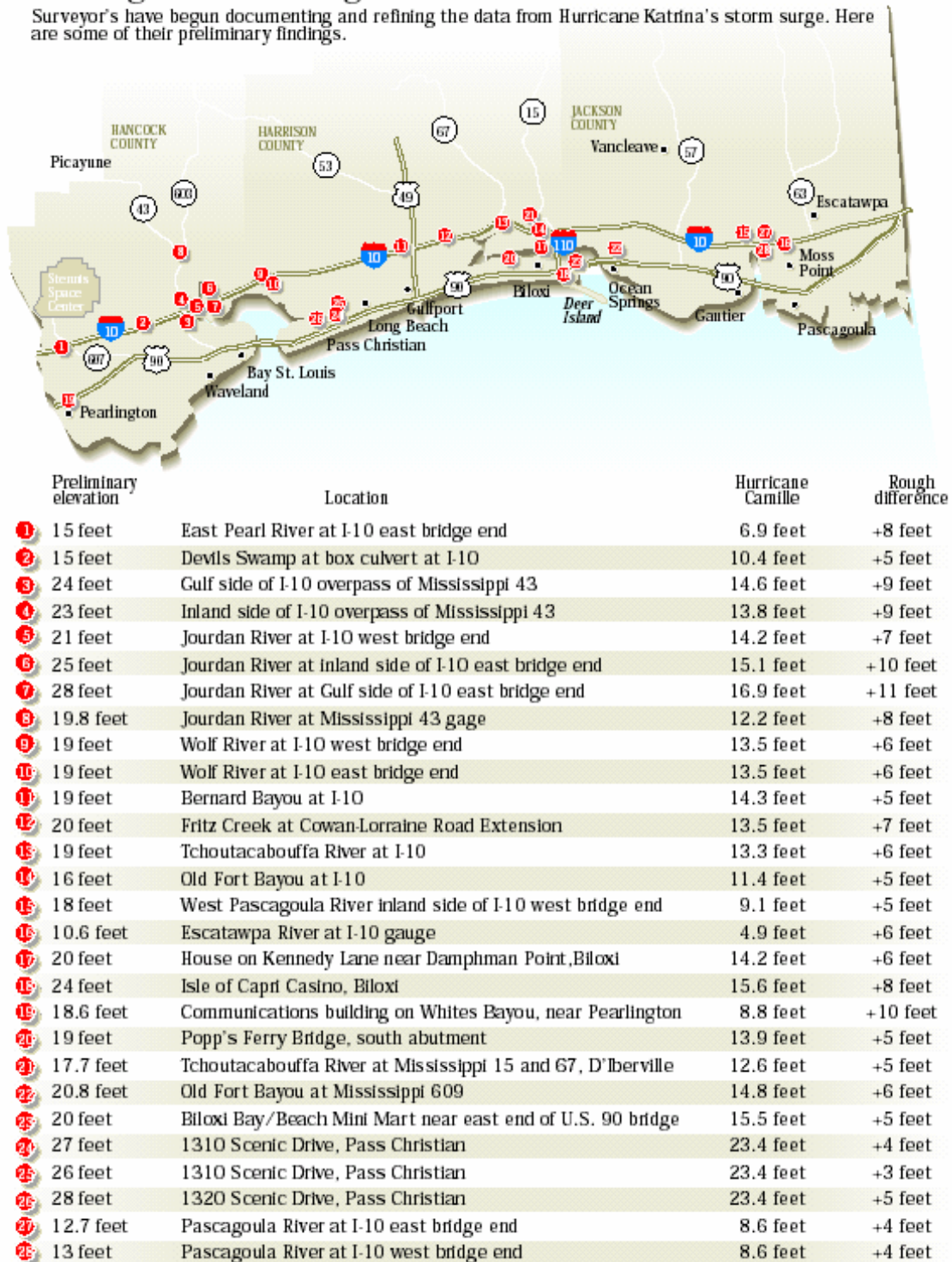


Figura 3: Altura de marejada ciclónica estimada en varias localizaciones (Fuente: The Sun Herald 2005).
(1 foot = 0.3048 m).

Katrina's surge

The storm surge from Hurricane Katrina inundated South Mississippi's coastline.

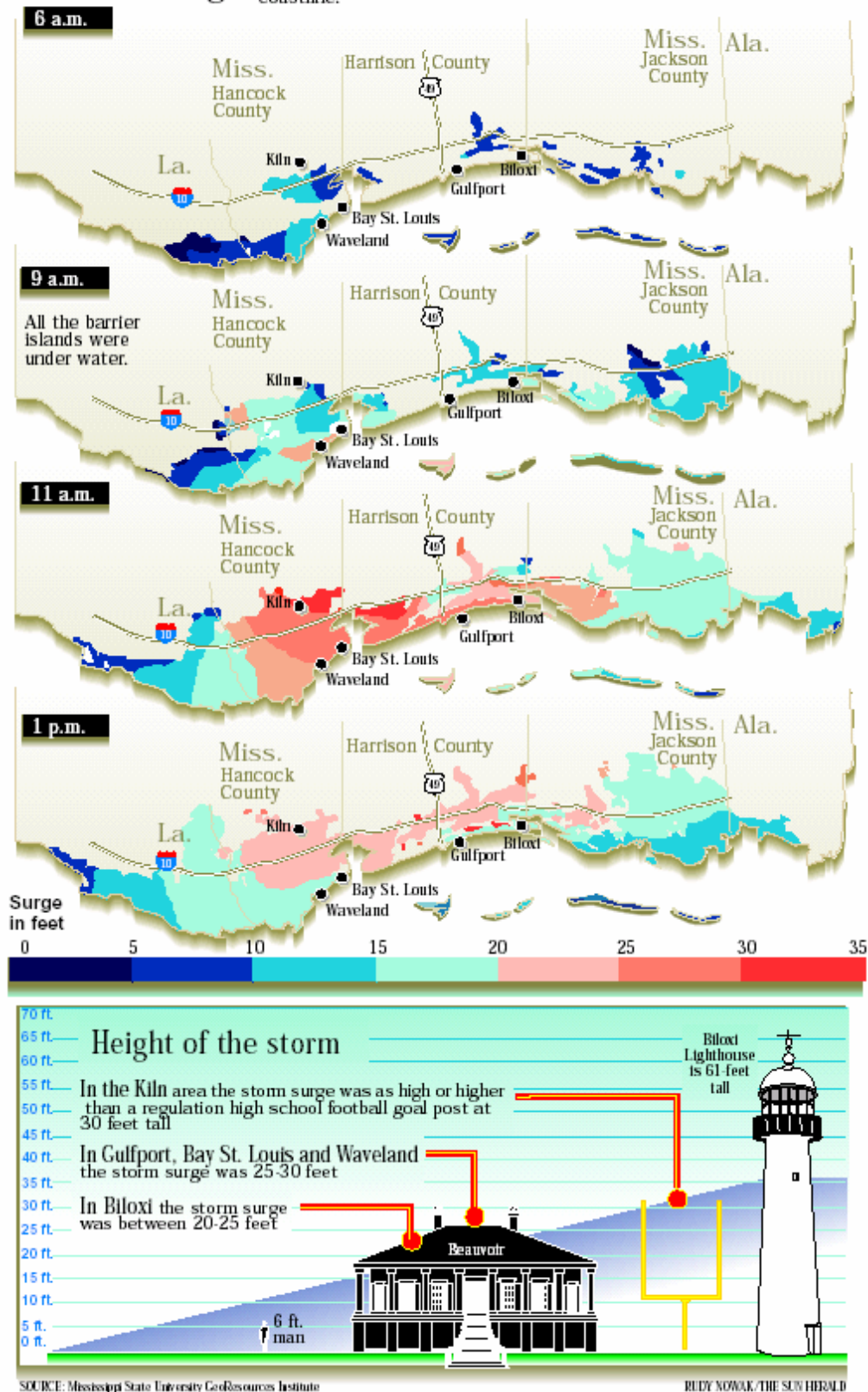


Figura 4: Penetración de la marejada ciclónica (Fuente: The Sun Herald 2005).

ESTRUCTURAS DAÑADAS

Nuestras observaciones se limitarán a estructuras grandes que fueron o debieron haber sido diseñadas por ingenieros. No se considerarán estructuras de vivienda de madera, excepto para indicar que estas experimentaron daño total causado por la marejada ciclónica en la zona cercana al Golfo. A los lados de la carretera nacional US 90 se observaban las plataformas de hormigón armado que anteriormente fueron el piso de residencias de todos los niveles sociales. La Figura 5 se acompaña como un recordatorio del impacto en dichas residencias de madera.



Figura 5a: Daño observado en zona residencial en Gulfport frente a US 90.



Figura 5b: Daño observado en zona residencial en Gulfport frente a US 90.

Los edificios de la zona son similares a los que se encontrarían en muchas partes de los Estados Unidos. La mayoría de las estructuras importantes más recientes son construidas en hormigón armado o en acero estructural. En general las estructuras de hormigón y de acero resistieron las cargas de viento y del agua, excepto por los edificios de estacionamiento y algunos edificios de apartamentos que se mostrarán con más detalle.

Una estructura particular de la zona son las barcasas que sirven de casino a los hoteles. Una ley que prohíbe establecer casinos en tierra pero que los permite en el agua propició la construcción de estas estructuras flotantes de acero de 3 o 4 pisos de altura con todas las conveniencias de un edificio en tierra. La experiencia con las barcasas fue muy mala pues la mayoría se salió de sus anclajes y no sólo sufrieron daños severos sino que causaron daños en otras estructuras a las que impactaron.

Al menos tres puentes principales de la zona sufrieron daños importantes pero no se discuten en este artículo.

En las secciones siguientes se describen en más detalle los daños observados en edificios de hormigón armado prefabricado, en edificios de hormigón postensado y en construcción mixta de hormigón armado y madera. Además se presentan algunos ejemplos de estructuras impactadas por las barcasas-casinos, y se presentan ejemplos de estructuras con daños causados por la inundación y daños causados por el viento para demostrar que en este desastre la marejada ciclónica fue la mayor causante de daños para las estructuras cercanas a la costa del Golfo. Por último se presentan algunas recomendaciones para estudios o acción futura.

Estructuras de hormigón armado prefabricado

Todos los casinos principales desde Biloxi a Gulfport poseen un estacionamiento multipisos de hormigón armado. Cuatro de los estacionamientos observados eran estructuras de hormigón prefabricado con pisos formados por secciones preforzadas tipo doble T cubiertas por una losa fina de hormigón fundida en sitio. Las doble Ts forman vigas simplemente apoyadas cuyos soportes eran vigas T invertidas o ménsulas saliendo de las columnas. A su vez estas vigas están apoyadas en columnas prefabricadas o en apoyos tipo escuadra fundidos integralmente a columnas prefabricadas tipo H. Todos los edificios de estacionamiento estudiados sufrieron colapso parcial o total de la losa del segundo nivel y de las rampas asociadas al segundo nivel. En varios casos aparentaba que las vigas doble T habían fallado y se habían caído de sus apoyos. En otros casos la propia viga de apoyo se había salido de sus soportes.

Estas fallas parecen haber sido causadas por la marejada ciclónica. La debilidad principal del sistema está en las conexiones para los elementos prefabricados. La conexión de las vigas de apoyo a las columnas se lograba con angulares de acero soldadas a la columna, o con varillas de acero ancladas en huecos horizontales en las columnas. Estas conexiones fallaron en muchas de las vigas, probablemente porque no estaban diseñadas para resistir las cargas laterales y el empuje vertical hacia arriba causado por la marejada ciclónica. En un caso las vigas de apoyo no fallaron pero las doble T aparentan haber fallado por falta de resistencia al empuje vertical hacia arriba, el cual causa esfuerzos flectores en la dirección contraria a la esperada debido a las cargas gravitacionales. Luego de la falla en el centro de la doble T ésta probablemente se salió de su apoyo, trayéndose consigo la losa de rodaje.

La Figura 6 muestra el segundo nivel colapsado de uno de los edificios de estacionamiento del Hotel Grand Casino en Biloxi. La parte cercana muestra una de las vigas de apoyo que estaba colocada en el perímetro de la estructura. Detrás de la viga se aprecia la doble T colapsada. Se nota el agrietamiento en la viga de piso. El apoyo de la losa, a la izquierda de la foto, era provisto por una ranura en la viga madrina sobre la que descansaba el alma de la doble T. Sobre la ranura había una conexión soldada entre la doble T y la viga de apoyo. No fue posible entrar a ninguna de estas estructuras de estacionamiento por medidas de seguridad de los dueños.



Figura 6: Colapso del segundo nivel de uno de los estacionamientos del Hotel Grand Casino.

La Figura 7 muestra el colapso del primer nivel elevado de otro estacionamiento del Hotel Grand Casino. En este caso toda la losa colapsó. Las secciones doble T mostraban grietas muy grandes, indicando posible falla en flexión causada por cargas verticales hacia arriba. Los apoyos a ambos lados de las columnas parecen relativamente pequeños, con poca posibilidad de resistir movimientos laterales causados por la marejada ciclónica.



Figura 7: Colapso total del primer nivel elevado de estacionamiento causado por la marejada ciclónica.

El edificio residencial Pelican Cay de 6 plantas fue construido con paredes de hormigón prefabricado y losas prefabricadas con núcleos huecos. Las Figuras 8 a y b muestran una vista general de este edificio y las losas del primer piso falladas, probablemente por la marejada ciclónica. Las losas fallaron en cortante. Sólo fallaron las losas del extremo del edificio, y del lado más cercano al agua.



Figura 8a: Vista general del edificio Pelican Cay de paredes y losas prefabricadas.



Figura 8b: Losas caídas del primer piso.

Estructuras de hormigón postensado

Fallas en este tipo de estructura se observaron en dos edificios de estacionamiento y en un complejo de edificios residencial que estaba aún en construcción cuando pasó el huracán Katrina. Las Figuras 9 a y b muestran dos vistas del estacionamiento del Hard Rock Casino en Biloxi. Este estacionamiento acababa de abrirse al público dos días antes del paso del huracán. Casi todos los tramos del extremo sur del edificio, el cual era el más expuesto a la marejada ciclónica, se dañaron según se observa en las Figuras 9 a y b. En los tramos centrales la losa colgaba de los cables como una catenaria. En varios casos en que la losa no colapsó se observa el refuerzo inferior desprendido de la losa. Este refuerzo inferior, cubierto con epoxy, tiene recubrimiento de hormigón muy pobre. Aparentemente el efecto de flotación causado por la marejada ciclónica produjo flexión negativa en el centro del tramo.



Figura 9a: Estacionamiento postensado en una dirección. Daños en tramos centrales que no colapsaron.



Figura 9b: Estacionamiento postensado en una dirección. Notar que la losa contiene cables y refuerzo normal.

Los apartamentos gemelos que se muestran en la Figura 10 estaban en construcción cerca de Pass Christian. Las losas y vigas tienen cables de postensado. La altura de la marejada en esta zona debe haber sido alrededor de 30 pies

(9.1 m), y el edificio estaba muy cercano a la orilla del Golfo. La altura del nivel de piso probablemente era alrededor de 5 pies (1.5 m) sobre el nivel del mar, de forma que ambos pisos inferiores fueron cubiertos por la marejada.



Figura 10: Edificios de vigas y losa postensadas cerca de Pass Christian.

Construcción mixta

En la zona cercana al Golfo existían una serie de edificios de apartamentos construidos con la primera planta en hormigón armado y las otras (2 a 4) plantas en madera. En varios casos como el que se muestra en la Figura 11 la marejada ciclónica pasó por encima de la plataforma de hormigón y empujó la estructura de madera hasta dejarla fuera de su base o colapsarla.



Figura 11a: Ejemplos de construcción en madera con un piso en hormigón armado.



Figura 11b: Otro ejemplo de construcción en madera con un piso en hormigón armado.

Estructuras impactadas por barcas

Un caso especial en este desastre fueron las estructuras impactadas por barcas-casinos que se salieron de sus anclajes y chocaron con estructuras que encontraron a su paso. Un ejemplo es el edificio de estacionamiento del Hotel y Casino Isle of Capri, el cual se muestra en las Figuras 12 a y b. El piso y vigas de esta estructura eran postensados. El impacto de la barcaza en las columnas más cercanas produjo colapso de todos los pisos del tramo exterior del estacionamiento.

Las Figuras 13 a y b muestran otro edificio de apartamentos impactado por una barcaza cerca de la carretera US 90. Este edificio de paredes y losa prefabricada perdió el tramo que recibió el impacto. Quizás la sorpresa es que no colapsó todo el edificio, ya que en la dirección del impacto no aparenta tener mucha resistencia a carga lateral.

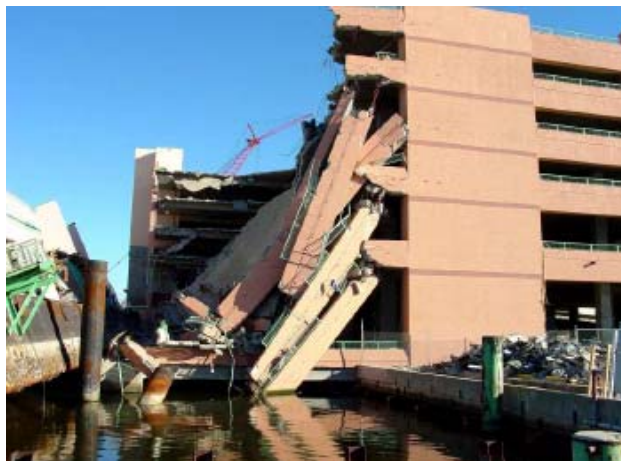


Figura 12a: Isle of Capri. Vista posterior del estacionamiento dañado por impacto.



Figura 12b: Isle of Capri. Vista frontal de barcaza atrapada entre estacionamiento y hotel.



Figura 13a: Edificio de paredes y losa prefabricados afectado por la marejada ciclónica e impactado por una barcaza.



Figura 13b: Vista cercana edificio de paredes y losa prefabricados afectado por la marejada ciclónica e impactado por una barcaza.

Contrastes entre daños causados por viento y por agua

La Figura 14 muestra un ejemplo claro de un edificio con los dos pisos interiores destruidos por el agua, mientras que el piso superior no muestra daños severos. Otro ejemplo se observa en el Beau Rivage Hotel, en la Figura 15, el único en el que la barcaza-casino no se salió de sus anclajes, aunque tuvo daños extensos en su interior causados por el agua.

La iglesia que aparece en la Figura 16 se encuentra cercana a la intersección entre las carreteras US 90 y US 49. La inundación no llegó a la punta del campanario por lo que los daños en esa zona superior de la estructura fueron causados por el viento. Sin embargo, la marejada ciclónica inundó todos los pisos inferiores y sólo quedaron en pie las columnas de acero. La altura de la inundación pudo verificarse en las columnas del edificio anexo ubicado en la parte posterior de la iglesia, según se aprecia en la Figura 17a. Este edificio anexo está a una elevación superior a la de la iglesia, según se aprecia en la Figura 17b. La Figura 18 presenta la estructura de acero de una iglesia, la cual resistió los efectos de la inundación aunque sus paredes colapsaron.



Figura 14: Edificio Harbor Master en Biloxi con daños en los dos pisos inferiores y pocos daños en el piso superior.

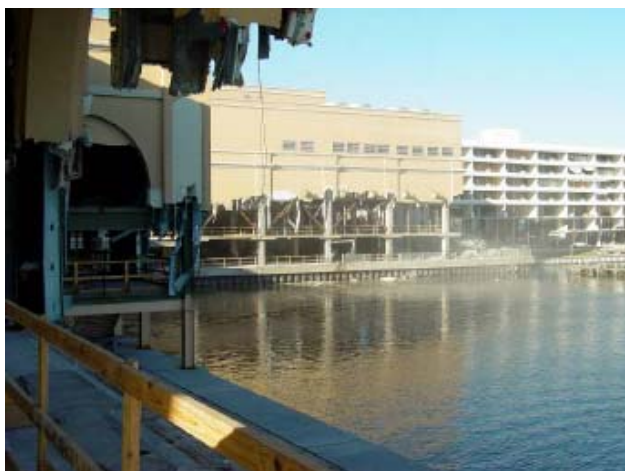


Figura 15: Beau Rivage Hotel visto desde la barcaza-casino.



Figura 16: Iglesia First Baptist en Gulfport. La parte inferior tiene daño casi total mientras que el campanario y la torre tiene daños mucho menores.



Figura 17a:– Evidencia de la altura de la inundación en el edificio posterior a la iglesia de la Figura 16.



Figura 17b: Otra vista de la Iglesia First Baptist y el anexo posterior, ubicado a una elevación mucho mayor.



Figura 18. Estructura de acero que resistió la inundación pero no pudo proteger el contenido.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta visita a las zonas del estado de Mississippi cercanas al Golfo de México pudo apreciarse la gran destrucción causada primordialmente por la marejada ciclónica y en menor grado por el viento y la inundación tierra adentro. Es posible que pueda diseñarse para resistir el impacto de la marejada en estos casos, como lo demuestran muchas edificaciones de hormigón y de acero que sobrevivieron sin daños estructurales. Aún así estas estructuras sufrieron daños no estructurales considerables ya que fue casi imposible mantener el agua fuera de la estructura. La iglesia de la Figura 18 es un ejemplo claro de una estructura que no colapsó pero que no impidió el paso del agua. Por lo tanto, éste es un asunto que concierne al uso de terrenos y zonificación. En caso de huracán pueden salvarse las vidas con avisos oportunos y desalojos. Los dueños de estructuras construidas en esta zona propensa a la marejada deben estar concientes de que tendrán pérdidas considerables en ese caso, y deben estar dispuestos a absorber dichas pérdidas. No parece razonable pretender que en el futuro, con el conocimiento que ya se tiene, el gobierno o las compañías de seguros tengan que cubrir las pérdidas por inundaciones en una zona claramente inundable.

Con relación al diseño de estructuras prefabricadas, se amerita un estudio del comportamiento de estas estructuras sometidas a las cargas laterales y verticales inducidas por la marejada ciclónica. Muchas de estas estructuras aparentan haber fallado por las conexiones. Igualmente es meritorio un estudio del comportamiento de estructuras postensadas sometidas a cargas de flotación, según parece que ocurrieron en las zonas visitadas por los autores.

Al presente los códigos de edificación no especifican cargas de diseño relacionadas a la marejada ciclónica. Si se continúa construyendo en estas zonas, es razonable desarrollar provisiones que atiendan estas cargas.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece la ayuda económica y logística brindada por National Institute of Standards and Technology por medio de Applied Technology Council para lograr realizar este viaje. También se agradece la ayuda de la National Science Foundation de Estados Unidos por su apoyo económico mediante la dádiva número 0553986.

REFERENCIAS

NHC (2006). *National Hurricane Center*. Sitio de Internet: <http://www.nhc.noaa.gov/2005atlan.shtml>
The Sun Herald (2005). *The Sun Herald, South Mississippi's newspaper*.
Sitio de Internet: <http://www.sunherald.com/mld/sunherald/>