

DAÑOS CAUSADOS POR EL HURACÁN KATRINA EN BILOXI, MISSISSIPPI¹

Dante Fratta² y J. Carlos Santamarina³

Resumen: El Huracán Katrina causó gran destrucción en la ciudad costera de Biloxi del Estado de Mississippi. La destrucción afectó viviendas, la infraestructura, y edificaciones comerciales, tanto en la costa como a cientos de metros tierra adentro. La evidencia de fallas causadas por erosión es escasa y los sistemas geotécnicos se comportaron satisfactoriamente en general. Las fallas estructurales afectaron tanto a viviendas familiares como a grandes estructuras, tales como puentes, barcasas de casinos y parques de tanques. La información compilada en este estudio documenta estos casos y permite evaluar los mecanismos de falla. La mayoría de las fallas fueron el resultado del efecto combinado de la inundación y el oleaje.

Palabras Claves: Huracán Katrina, Mississippi, Biloxi, fallas estructurales, pilotes, puentes, erosión, tanques, barcasas.

DAMAGE CAUSED BY HURRICANE KATRINA IN BILOXI, MISSISSIPPI

Abstract: Hurricane Katrina caused great destruction on the city of Biloxi, Mississippi, destroying homes, the civil infrastructure, and commercial buildings often hundreds of meters onshore. Geotechnical components fared relatively well and the evidence of erosion-induced failures is scarce. Structural failures affected both small dwellings and large systems such as bridges, casino barges, and storage tanks. The data collected as part of this study documents these cases and permit the evaluation of failure mechanisms. Most failures were produced by the combined effects of the storm surge and wave action.

Keywords: Hurricane Katrina, Mississippi, Biloxi, structural failures, piles, bridges, erosion, storage tanks, barges.

INTRODUCCIÓN

Las fallas en estructuras civiles y geotécnicas durante huracanes ocurren típicamente por el efecto combinado de grandes cargas de viento, fuertes oleajes e inundación, por la reducción de la resistencia al corte en taludes, por la erosión de sedimentos alrededor de estructuras de retención y la socavación de fundaciones (Wieczorek 1996; FEMA 2000; Bucknam 2001; Keen et al. 2004; FL Department of Environmental Protection 2005; Nicholson, 2005).

El Huracán Katrina tocó dos veces tierra en los Estados Unidos. La primera vez cruzó la península de Florida el 24 de agosto del 2005, con categoría 1. La segunda vez, el Huracán Katrina llegó a tierra el 29 de agosto entrando por el Golfo de México a lo largo del límite entre los estados de Louisiana y Mississippi. En este caso, el huracán tenía categoría 4 cuando llegó a la costa del delta del río Mississippi en Louisiana y categoría 3 cuando llegó al límite entre los estados de Louisiana y Mississippi (RMS 2005). El ojo del huracán pasó por Bay St. Louis, aproximadamente 73 km al oeste de la ciudad turística de Biloxi en el estado de Mississippi. En Biloxi, las ráfagas de viento alcanzaron una velocidad de 250 km/hr. La Figura 1 muestra la trayectoria del Huracán Katrina desde el Océano Atlántico hasta que se disipó en el valle del río Mississippi.

El daño causado por la combinación de la acción del viento, el oleaje constante, la creciente y el transporte de escombros que causó el Huracán Katrina fue catastrófico en la mayoría de las viviendas ubicadas en la costa, hasta cientos de metros tierra adentro, afectando primordialmente a las poblaciones costeras de Pascaguola, Gautier, Belle Fontaine, Ocean Springs, Biloxi, Gulfport, Long Beach, Pass Christian, y Bay St. Louis (USGS 2005).

¹ Artículo recibido el 27 diciembre 2005 y en forma revisada el 21 de abril de 2006.

² Profesor Asistente. Programa de Ingeniería Geológica. University of Wisconsin-Madison. Madison, WI 55706. USA. E-mail: fratta@wisc.edu

³ Profesor. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Georgia Institute of Technology. Atlanta, GA 30332. USA. E-mail: carlos@ce.gatech.edu

La ciudad de Biloxi ya había soportado el impacto del Huracán Camile, de categoría 5, cuando el ojo de ese huracán pasó sobre Biloxi en el año 1969 (NOAA 2006). Sin embargo, el Huracán Katrina fue mucho más destructivo: la devastación y el estado de las ruinas son registro fiel de la magnitud de este huracán.



Figura 1: Trayectoria y categoría del Huracán Katrina desde el 24 hasta el 30 de agosto del 2005 (USGS 2005; mapa: Google 2005).

Nuestro estudio de campo se centró en la respuesta de estructuras civiles a lo largo de la costa, desde Biloxi hasta Gulfport. Las mediciones de campo se realizaron durante los días 11 y 15 de noviembre de 2005 (cuarenta y cinco días después del huracán). Utilizamos observaciones visuales, fotografía digital, y un sonar para los estudios de sedimentos y fundaciones sumergidas (*Tritech Parametric Subbottom Profiler*). En este reporte documentamos los casos más importantes de fallas estructurales y de fundaciones en la ciudad de Biloxi. Los recientes artículos por Mosqueda y Porter (2006) y Robertson et al. (2006) documentan estudios independientes y presentan información complementaria.

INUNDACIÓN - BILOXI

El arribo del huracán provocó el aumento del nivel del agua en el golfo de México por la fuerza continuada de los vientos huracanados. Los instrumentos excedieron su rango y fallaron antes de la llegada del pico de la inundación (NOAA 2005). Por lo tanto, la evolución del nivel del mar y el nivel máximo alcanzado se han compaginado en base a evidencia en estructuras y árboles, relatos de sobrevivientes y modelaciones numéricas. La Figura 2 resume nuestra interpretación de la información disponible y la velocidad de la creciente.

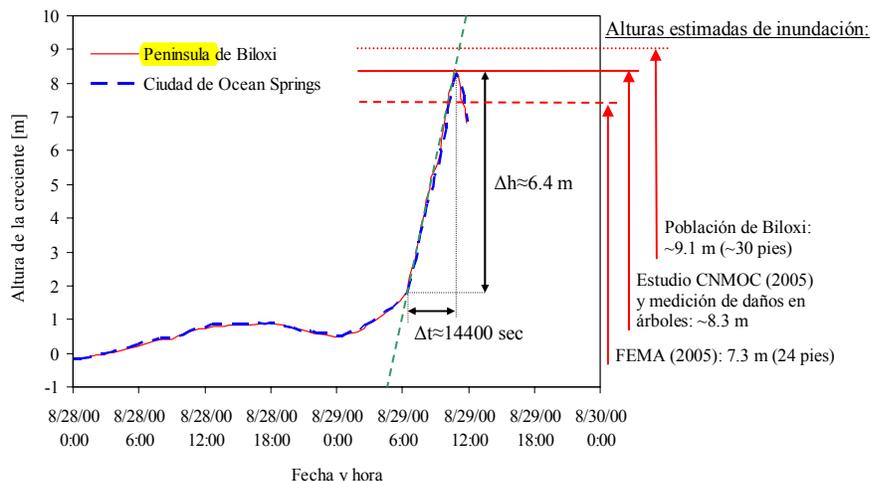
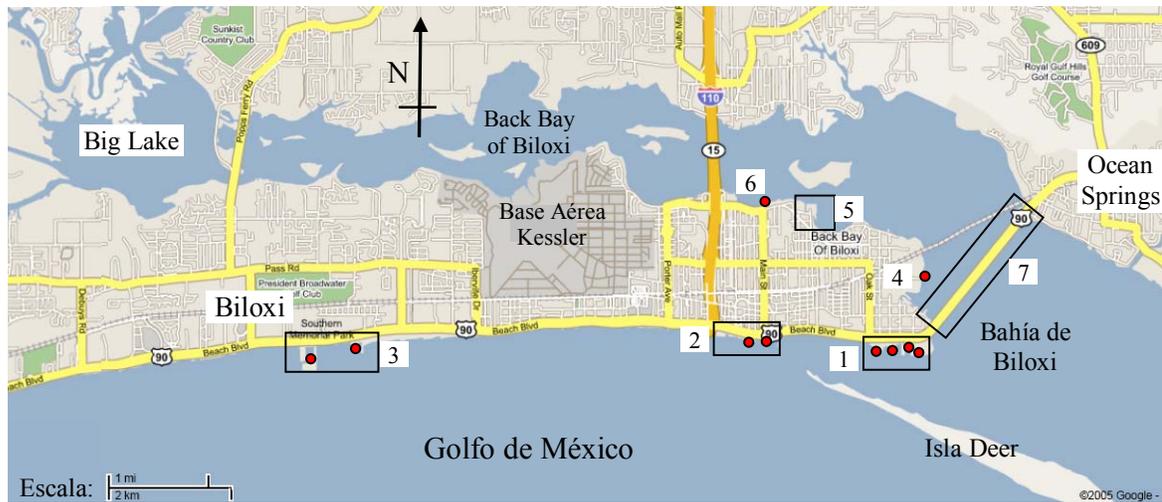


Figura 2: Estimación de la altura y de la evolución del nivel del mar en la cercanía de Biloxi. Velocidad de la creciente $\Delta h/\Delta t \approx 4.4 \cdot 10^{-4}$ m/s en la Península de Biloxi y Ocean Springs, MS (Fuentes: CNMOC 2005; FEMA 2005; Este estudio).

DAÑOS ESTRUCTURALES

Las fallas estructurales involucran desde viviendas de familias, hasta grandes estructuras incluyendo los casinos flotantes y el puente sobre la Carretera Nacional 90 (Figura 3).



Ejemplos of Estructuras Dañadas

- | | | |
|---|------------------------------------|--|
| 1. Casinos: Isle of Capri, Magic, y Grand | 2. Casinos Beau Rivage y Hard Rock | 3. Casinos: Treasure Bay and President |
| 4. Casino Palace | 5. Tanques de la Terminal Munro | 6. Casino: Imperial Palace |
| 7. Puente sobre carretera Nacional 90 | | |

Figura 3: Ubicación geográfica de las zonas relevadas (mapa: Google 2005).

Viviendas de Familia

La mayoría de los daños en las viviendas se concentraron en las áreas previamente demarcadas por FEMA como zonas inundadas. Las zonas con mayor profundidad de inundación se correlacionan con las áreas de mayor daño en las viviendas (FEMA 2005).

Las construcciones de madera (viviendas de familia, hoteles menores y condominios) sufrieron el mayor daño. El huracán arrasó estas construcciones en la franja costera sobre el Golfo de México y solo quedaron las plateas de fundación en la zona que se extiende desde la playa hasta unos 300 m tierra adentro (Figura 4a – distancias varían con la topografía y se mencionan solamente como guía). Las construcciones en la franja siguiente tierra adentro (entre 300 m y 600 m) colapsaron y/o fueron desplazadas hasta decenas de metros de sus fundaciones por la acción de la crecida y el viento (Figura 4b).

Las nuevas construcciones de madera sobre la Bahía de Biloxi, sufrieron daños relacionados con la inundación, pero las estructuras han permanecido en pie, ancladas a sus fundaciones (Figura 4c).

La mayor parte de las estructuras de hormigón armado, aún sobre la costa del Golfo de México, resistieron la acción de las olas, la inundación y el viento. Sin embargo, la mampostería quedó destruida hasta el segundo o tercer piso, es decir hasta el nivel de acción de la crecida y el oleaje (Figura 4d).

Casinos Flotantes

Por ley, las salas de juego en el Estado de Mississippi solo se podían construir sobre el agua como estructuras flotantes (Estado de Mississippi 2006). Las barcasas flotantes en Biloxi, sobre el Golfo de México y en la Bahía de Biloxi, son grandes estructuras con dimensiones típicas de 200 m de largo, 40 m de ancho y 5 pisos de altura. Estas estructuras sufrieron extensos daños; la Tabla 1 resume la ubicación geográfica, la respuesta, el estado y desplazamiento durante el Huracán Katrina de cada uno de los casinos flotantes en la ciudad de Biloxi.

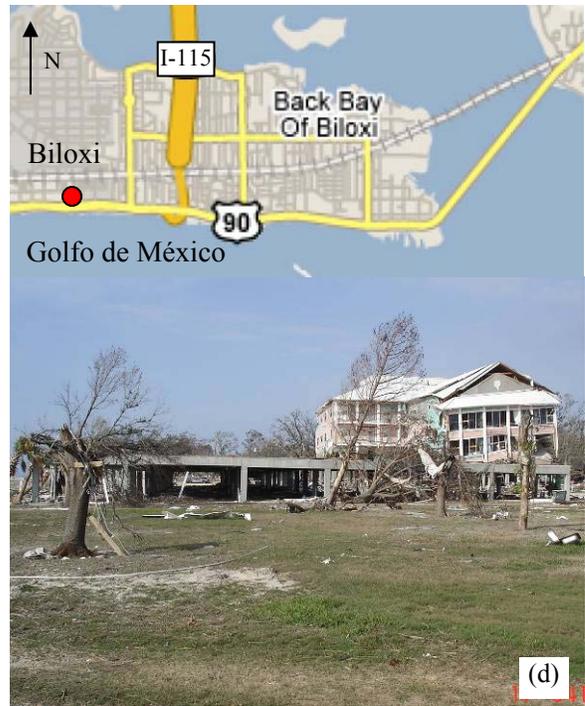
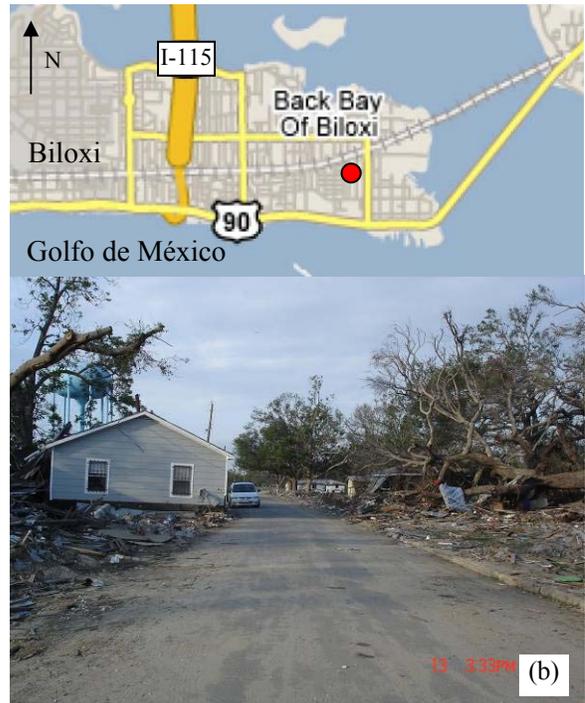


Figura 4: Destrucción y daños en viviendas en la Península de Biloxi: (a) Residencias sobre la costa del Golfo de México fueron devastadas (en la franja a ≤ 300 m). (b) Viviendas tierra adentro (300m a 600 m) fueron destruidas o desplazadas de sus fundaciones por la creciente y el viento. (c) Nuevas viviendas sobre la Bahía de Biloxi sufrieron daño por inundación pero permanecieron ancladas en su fundación y erectas. (d) Fundaciones palafito de hormigón armado resistieron la fuerza del huracán, pero la superestructura de madera fue completamente destruida (mapas: Google 2005).

Tabla 1: Niveles de daño propuestos por Ghoarah et al. (1997).

Casino	Ubicación Geográfica	Observaciones de Daños
President	Golfo de México (dentro de la Marina Broadwater Beach): 11,0 km del puente sobre Carretera 90	La barcaza de este casino se liberó de los anclajes y pasó sobre los muros de sostenimiento de la marina y se desplazó 1 km en la dirección ONO hasta chocar con la estructura de hormigón armado del hotel Holiday Inn.
Treasure Bay	Golfo de México: 9,8 km del puente sobre Carretera 90	Este casino flotante no se desplazó durante el huracán pero sufrió grandes daños estructurales y de mampostería.
Beau Rivage	Golfo de México: 2,5 km del puente sobre Carretera 90	Este casino estaba fundado sobre un nuevo sistema que consistía de una barcaza sumergida. La fuerza del huracán solo produjo daños de mampostería.
Hard Rock	Golfo de México: 2,0 km del puente sobre Carretera 90	Este casino, a punto de ser inaugurado, estaba fundado sobre el sistema de barcaza sumergida. La fuerza del huracán destruyó la estructural totalmente.
Grand	Golfo de México: 0,5 km del puente sobre Carretera 90	Las dos barcazas del casino se desplazaron 500 y 950 m en la dirección ONO y cruzaron la Carretera Nacional 90.
Magic	Golfo de México: 0,4 km del puente sobre Carretera 90	La barcaza del casino se liberó de los anclajes y fue empujada por el huracán en la dirección NNO por una distancia de 300 m.
Isle of Capri	Golfo de México: 0,2 km del puente sobre Carretera 90	La barcaza se liberó del anclaje y chocó contra un edificio de estacionamiento destruyendo parte de la estructura de hormigón armado. Este casino fue el primero en abrir usando la nueva ley del Estado que permitió operar salas de juego sobre tierra firme.
Palace	Bahía de Biloxi: 0,5 km del puente sobre Carretera 90	La barcaza quedó inclinada 20 grados cuando el Huracán la empujó sobre la costa y quedó encallada.
Imperial Palace	Bahía de Biloxi: 5,0 km del puente sobre Carretera 90	Daños estructurales mínimos. Algunos daños en la mampostería. Fue el primer casino en reabrir en Diciembre 22, 2005.

Fuentes: Este estudio; Thompson Engineering (2006); Roy Anderson Corporation (2006); City of Biloxi (2006)

La mayoría de los casinos estaban contruidos sobre barcazas sujetas a postes de acero a través de anillos deslizantes; a su vez, los postes de acero estaban anclados en cajones de hormigón. Los anillos les permitían a las barcazas acompañar los movimientos de la marea (Figura 5a). Durante el huracán, los anillos deslizantes alcanzaron el máximo desplazamiento –alrededor de 4 m por arriba del nivel medio- y se rompieron las conexiones entre los anillos y las barcazas (Figuras 5b y 6). Los postes de anclaje y los cajones de fundación sufrieron relativamente poco daño; sin embargo algunos muestran rotación compatible con el desplazamiento de la barcaza, y no necesariamente en la dirección de los vientos y el oleaje (Figura 6). Una vez liberadas, las barcazas se desplazaron con las aguas por cientos de metros, hacia el noroeste. La barcaza del casino President se desplazó 1 km hasta que se detuvo contra la estructura del Hotel Holiday Inn (Figura 7). Esta dirección de desplazamiento y la altura de la creciete en la Figura 2 sugieren que las barcazas quedaron libres de sus anclajes antes de que el ojo del huracán llegara a la ciudad de Bay St. Louis.

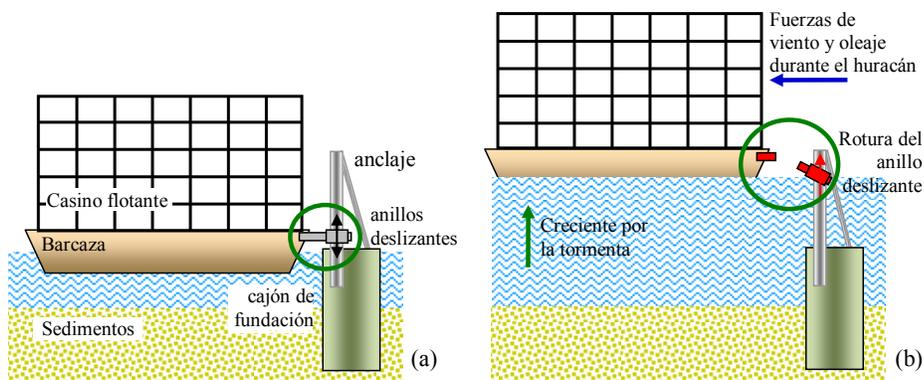


Figura 5: Mecanismo de falla de los anclajes tradicionales de los casinos flotantes durante el Huracán Katrina: (a) los anillos deslizantes permitían del movimiento de las barcazas durante las mareas. (b) Durante el Huracán Katrina, la creciete excedió la corrida de los anillos deslizantes, estos rompieron y las barcazas sin anclaje se desplazaron por cientos de metros de su posición original.



Figura 6: Anillos deslizantes y cabezal de los cajones de fundación del Casino *Grand*. (a) Detalle de un anillo que falló. Las marcas en la pintura muestran la violenta acción de la barcaza sobre el anclaje durante el huracán. (b) Varias fundaciones de hormigón tipo caja rotaron durante el huracán.



Figura 7: Desplazamiento de la barcaza de Casino President durante el Huracán Katrina. El huracán rompió el anclaje de la barcaza y el viento y el oleaje la empujaron hacia el noroeste, hasta chocar contra la estructura del Hotel Holiday Inn (Fotografías tomadas el Agosto 29, 2005 por NOAA 2005).

Los casinos Beau Rivage y Hard Rock se construyeron con un diseño alternativo. Como en el sistema anterior, la estructura del casino apoya sobre un grupo de flotadores (25 m × 130 m × 3 m cada uno), y la fuerza de flotación compensa el peso de la estructura. Pero en este caso, un extenso grupo de pilotes trabajando en tensión mantienen a los flotadores sumergidos (pilotes de 20 a 30 m de largo - Figura 8). Por ende, la elevación de estos casinos no fluctúa con las mareas sino que se mantiene a un nivel constante. Pero las estructuras de estos dos casinos se comportaron en forma muy diferente, pese a estar solo a 150 m de distancia: la fundación y la estructura del casino Hard Rock fueron destruidas (el mecanismo aún no está claro), mientras que la estructura del casino Beau Rivage se mantuvo prácticamente intacta (los primeros dos pisos del casino y la recepción del hotel Beau Rivage fue lavada por las aguas). La Figura 9 muestra las dos estructuras después de la tormenta.

Puente sobre la Carretera Nacional 90

Este puente de cuatro carriles y 2.7 km de longitud unía las ciudades de Biloxi y Ocean Springs a través de la Bahía de Biloxi. El puente tenía 148 pares de tableros independientes y simplemente apoyados sobre grupos de pilotes. Una leve pendiente elevaba la altura del puente desde 3 m en los estribos hasta alcanzar los 20 m sobre el nivel medio del agua en la zona del canal de navegación; dos segmentos levadizos de acero permitían el paso de barcos de mayor tamaño (Figura 10). Durante el huracán, 120 pares de tableros de hormigón armado fueron desplazados y cayeron a la bahía, hacia el noroeste del puente. Aparentemente, la creciente creada por el huracán hizo que los tableros flotaran parcialmente, facilitando la acción del empuje del viento y el oleaje (Figura 11. Nota: la flotación puede haber sido

magnificada por aire atrapado bajo las losas, según Mosqueda y Porter 2006 y Robertson et al. 2006). Solamente los 28 pares de tableros más altos, por encima del nivel de la inundación, permanecieron intactos. La altura que separa las zonas de tableros caídos y los que se mantuvieron en su lugar es de 5.6 m (Figura 12). Esta altura sumada a la altura del tablero de aproximadamente 1 m se correlaciona con las alturas de inundación esperadas (Figura 2) y da apoyo al mecanismo de falla postulado en la Figura 11.

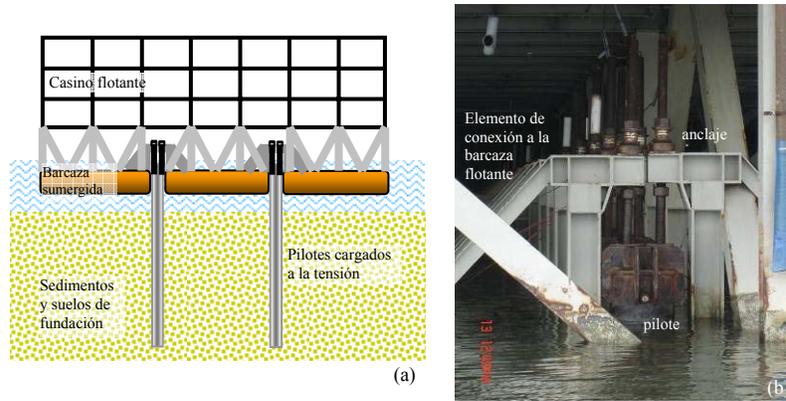


Figura 8: Casinos flotantes anclados con pilotes - (a) Detalle de la fundación - Los pilotes son hincados hasta una profundidad de 20-30 m (Thompson Engineering 2006). (b) Detalle del anclaje de los pilotes a las barcasas de fundación en la estructura del Casino Beau Rivage.

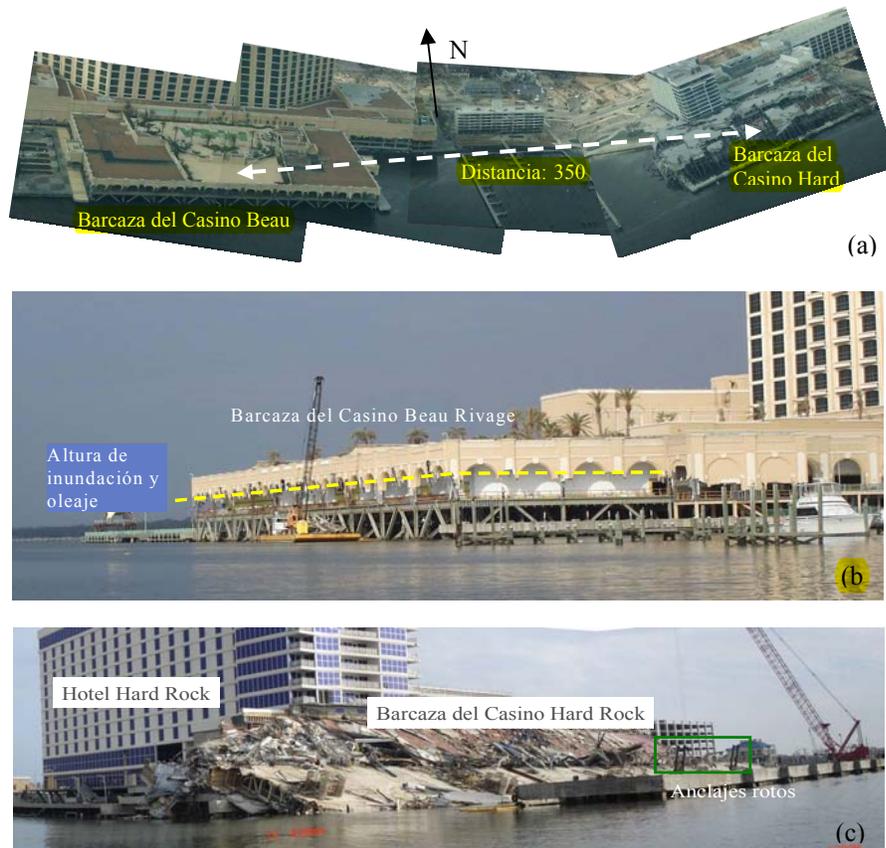


Figura 9: Casinos flotantes anclados con pilotes - (a) Posición relativa de los casinos Beau Rivage and Hard Rock - Imagen compuesta con fotografías del USGS tomadas en Agosto 29, 2005. (b) Panorámica de la barcaza del casino Beau Rivage. Este casino no sufrió daños estructurales (Fotografías tomadas en Noviembre 13, 2005). (c) Panorámica del hotel Hard Rock y de la barcaza del casino completamente destruida (Fotografías tomadas en Noviembre 13, 2005).



Figura 10: Puente de la Carretera Nacional 90. Los tableros de 120 segmentos (de un total de 148 segmentos) fueron desplazados de su posición por la tormenta.

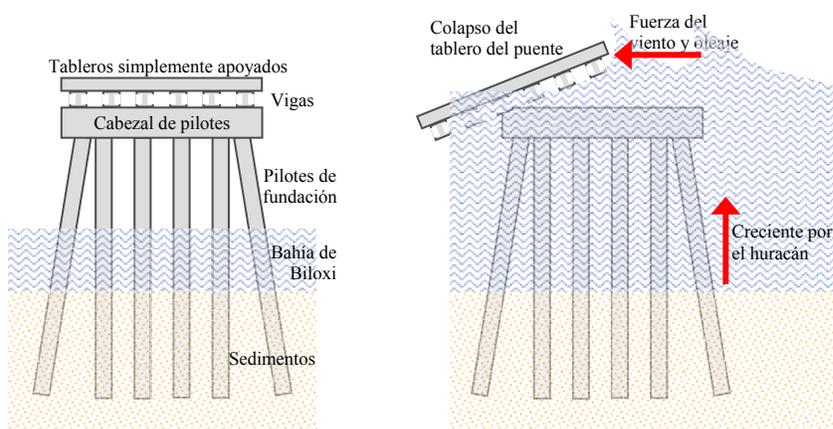


Figura 11: Mecanismo de falla por flotación-y-empuje: Puente sobre la carretera Nacional 90 en la Bahía de Biloxi. La creciete del huracán favorece la flotación de los tableros que luego son desplazados por la acción del viento, la corriente y el oleaje.



Figura 12: Falla en el puente sobre la Carretera Nacional 90 en la Bahía de Biloxi. (a) Todos los tableros hacia Biloxi se cayeron durante el huracán. (b) La altura que separa los tableros desplazados de los que mantuvieron su posición es de 5,6 m. El mismo fenómeno se registró hacia el este del canal de navegación.

El mecanismo de falla flotación-y-empuje afectó a muchas estructuras de hormigón prefabricadas, incluyendo edificios de estacionamiento, hoteles y condominios (fotografías en la Figura 13). Aunque estas estructuras permanecieron en pie, las lozas de los pisos inferiores fueron desprendidas y cayeron durante el huracán. La falla del puente y de estas estructuras resalta la importancia de la fuerza del agua en la destrucción causada por el Huracán Katrina y la necesidad de anclajes adecuados para aumentar la resistencia a este tipo de tormenta.



Figura 13: Pérdida de piso en estructuras de hormigón prefabricadas por efecto combinado de flotación-y-empuje. (a) Condominio Windjammer y (b) Edificio de estacionamiento del Casino Beau Rivage.

Las fuerzas involucradas en estas fallas incluyen el peso sumergido del elemento estructural $W_{\text{sumergido}}$, la resistencia al corte R en los apoyos, el empuje del agua por la corriente asociada a la corriente de inundación I , y el empuje del agua por el oleaje E . Las ecuaciones son:

$$W_{\text{sumergido}} = Vg\rho_{\text{hormigon}} - (V + V_{\text{aire}})g\rho_{\text{aire}} \quad (1)$$

$$R = \mu W_{\text{sumergido}} \quad \text{tableros simplemente apoyados} \quad (2)$$

$$I = \alpha \rho_{\text{agua}} v^2 L t \quad (3)$$

$$E = \beta g \rho_{\text{agua}} L h_{\text{inundacion}}^2 \quad (4)$$

donde V y V_{aire} es el volumen del tablero de hormigón y del aire atrapado es el volumen del tablero, g es la aceleración de la gravedad, ρ_{hormigon} y ρ_{agua} son la densidad del hormigón armado y agua respectivamente, μ es el coeficiente de fricción, v es la velocidad de la corriente, L y t son el largo y espesor del tablero, $h_{\text{inundacion}}$ es la altura de la ola durante el huracán, y los parámetros α y β ($1 \leq \alpha \wedge \beta \leq 2$) son determinados experimentalmente en función de la profundidad y geometría de la estructuras (FEMA 2000). Para las alturas de inundación del huracán y la dimensiones de los tableros del puente, la fuerza del oleaje resulta mucho más importante que la fuerza de la corriente, $E \gg I$, y causa la falla.

FUNDACIONES

La mayoría de las fundaciones tierra adentro y sobre el agua se comportaron satisfactoriamente. Los casos de erosión alrededor de estructuras de fundación fueron escasos en la zona de Biloxi y generalmente limitados a los taludes de tierra de la carretera Nacional 90. Solo observamos un número limitado de fallas geotécnicas que discutimos a continuación.

Puente sobre la Carretera Nacional 90

Los típicos cabezales de pilotes en este puente tienen seis pilotes verticales y dos pilotes inclinados a ambos lados del puente para darle rigidez transversal a la fundación. Tras cuatro cabezales típicos, el quinto grupo de pilotes tiene pilotes inclinados en la dirección del puente para proporcionar rigidez longitudinal al sistema. Aunque la superestructura sufrió extenso daño, las fallas en estos grupos de pilotes fueron mínimas: (1) solo un grupo de pilotes -de un total de 149- colapsó durante el huracán; y (2) un cabezal de pilote muestra una falla de corte en la sección noroeste que sugiere asentamiento excesivo del pilote extremo.

El grupo de pilotes que falló, rotó hacia el oeste, probablemente bajo el empuje que causaron los tableros al este de la pila al caer. La Figura 14 muestra la posición del cabezal tras la falla. El punto de rotación se puede estimar en función de la geometría del sistema. La profundidad de los sedimentos obtenida con el sonar se muestra superpuesta en la Figura 14. Se puede inferir que los pilotes se rompieron y rotaron a una profundidad de aproximadamente 6 m, que corresponde a unos 4 m por debajo del lecho de la bahía.

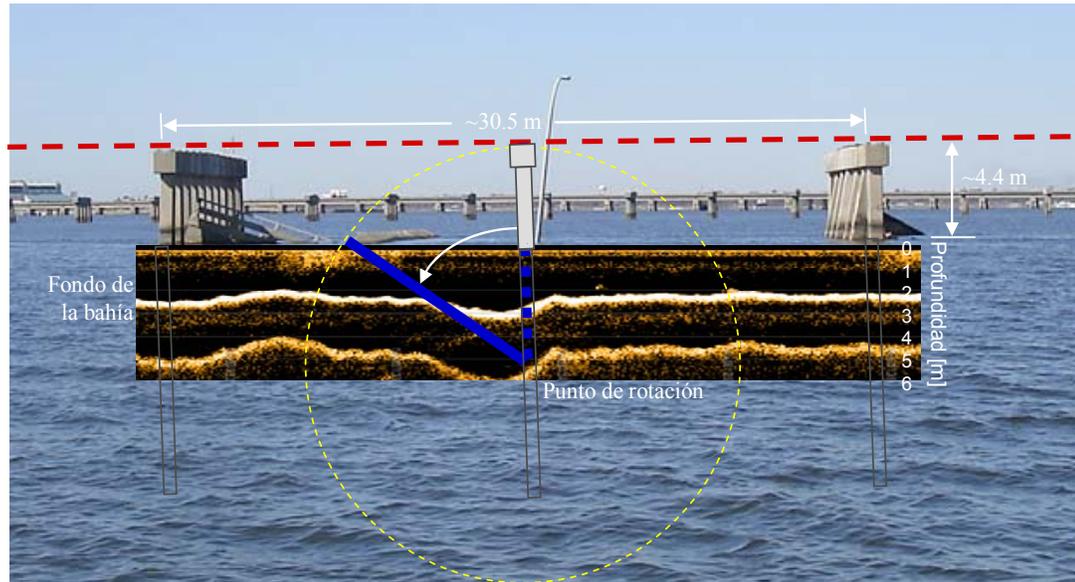


Figura 14: Colapso de grupo de pilotes en el puente de la Carretera Nacional 90 en la Bahía de Biloxi. La imagen de sonar esta superpuesta a la fotografía para definir la profundidad de los sedimentos. La profundidad de fundación de los pilotes es desconocida.

Fallas de fundaciones de viviendas

No se observó daño ni erosión en las fundaciones de los grandes edificios sobre la costa, ni en las fundaciones de carteles de propaganda aunque generan una alta resistencia al viento y altos momentos de vuelco. Muchas de las viejas viviendas familiares estaban asentadas sobre ladrillos o bloques de hormigón sin anclaje; éstas flotaron en la creciente y fueron desplazadas decenas de metros, dejando atrás la fundación, a veces intacta y sin evidencias de erosión (Figura 4b).

Un diseño común sobre la costa es la construcción sobre un piso vacío, usado frecuentemente como estacionamiento, construido de hormigón armado o acero. El sistema se asemeja a palafitos en zonas anegadizas. Mientras que este piso inferior tiene frecuentemente 2 m a 3.5 m de altura, la creciente excedió los 6.7 m y ejerció cargas laterales que produjeron la falla. El mecanismo de falla más común de estas estructuras elevadas es el corte de los anclajes entre el

piso base y la construcción superior (Figura 4d). Aún en el caso de destrucción total de la superestructura, la fundación tipo palafito sobrevivió sin daño en la mayoría de los casos observados.

Fallas de los tanques de combustible

La terminal de combustible de MP Munro provee depósitos de hidrocarburos livianos a las estaciones de servicio en Biloxi y poblaciones cercanas. La terminal tiene ocho tanques con una capacidad total de 25×10^6 litros (MP Munro 2006). Esta playa de tanques está ubicada al norte de la ciudad de Biloxi sobre la bahía (Figura 3). La Figura 15 muestra los anillos de fundación, los anclajes y los tanques que se desplazaron hasta 40 m cruzando las barreras ambientales que contienen el derrame de combustibles. Los anclajes no están diseñados para contrarrestar las fuerzas de flotación si los tanques están vacíos; por lo tanto se estima que medidas de emergencia no fueron implementadas (como el llenado de los tanques con agua previendo la llegada del huracán).



Figura 15: Fallas del patio de tanques - Terminal MP Munro.

CONCLUSIONES

El Huracán Katrina fue devastador en Biloxi, Mississippi. La destrucción en esta zona es el resultado directo de la creciente, el oleaje y el viento, a diferencia de la ciudad de Nueva Orleans donde los daños fueron causados por inundación tras la falla de los diques de protección, mayormente después de la tormenta.

Las siguientes conclusiones permiten establecer lineamientos para la reconstrucción de esta zona:

- Las viviendas de madera fueron avasalladas en la franja costera (hasta unos 300 m de la costa) y sufrieron daños extensos aún aquellas a más de 500 m tierra adentro. No es adecuado reconstruir con este tipo de estructuras en esta zona.
- Los palafitos de hormigón o acero resistieron adecuadamente. Los anclajes de la superestructura a los palafitos deben ser diseñados para resistir el corte que ejerce el viento y posiblemente el agua. La altura de los pisos vacíos debe exceder la inundación de diseño.
- Las estructuras de hormigón armado y la mayoría de las estructuras de acero resistieron adecuadamente el embate del huracán; aún en estos casos, la mampostería sufrió grandes daños hasta la altura de la inundación.
- Las estructuras de hormigón prefabricado sufrieron daño hasta el nivel de inundación por el efecto combinado de flotación-y-empuje. El sistema de anclaje de los distintos elementos prefabricados debe ser analizado nuevamente.
- Los tableros simplemente apoyados del puente sobre la Carretera Nacional 90 fueron desplazados por la creciente y por la acción del viento y oleaje. Futuros diseños deben considerar mayores alturas de puentes y anclajes de los tableros.

- La fundación del puente respondió aparentemente bien y solamente un grupo de pilotes falló de un total de 149 grupos.
- Los cascos flotantes fallaron cuando los anillos deslizantes **legaron** hasta el final del recorrido permitido. Este sistema de anclaje debe rediseñarse para acomodar la creciente de diseño.
- Los operadores de playas tanques en zonas anegables deben desarrollar procedimientos de emergencia para evitar roturas asociadas a la flotación de tanques con un nivel de fluidos por debajo del nivel de inundación.

La colección de datos y fotografías digitales obtenidas durante este proyecto pueden ser ubicadas en la página de Internet de los autores en URL: <http://www.uwgeoengineering.org>

AGRADECIMIENTOS

La Fundación Nacional de Ciencias y la Fundación Gouzieta proveyeron los fondos para este estudio. Los autores están agradecidos al capitán Steve West, a los oficiales de policía y seguridad quienes proveyeron acceso a lugares restringidos durante el desarrollo del estudio y especialmente a la población de Biloxi por su amabilidad y hospitalidad.

REFERENCIAS

- Bucknam, R. C., Coe, J. A., Mota Chavarria, M., Godt, J. W., Tarr, A. C., Bradley, L.-A., Rafferty, S., Hancock, D., Dart, R. L. y Jonson, M. L. (2001). *Landslides Triggered by Hurricane Mitch in Guatemala—Inventory and Discussion*. Open-File Report 01-443. US Geological Survey.
- City of Biloxi (2006). Sitio Oficial de la Ciudad de Biloxi, Mississippi. URL: <http://www.biloxi.ms.us/>.
- CNMOC (2005). *Preliminary Model Hindcast of Hurricane Katrina Storm Surge*. NASA Stennis Space Center, MS. URL: <http://www.kernn.org/pdf/NRL-Stennis-Katrina.pdf>.
- Estado de Mississippi (2006). *The Mississippi Gaming Commission*. URL: <http://www.mississippi.gov>.
- FEMA (2005). *Hurricane Katrina Surge Inundation and Advisory Base Flood Elevation Maps*. Sitio de Internet: http://www.fema.gov/hazard/flood/recoverydata/katrina/katrina_ms_harrison.shtm.
- FEMA (2000). *Coastal Construction Manual*. Publication 55 – Tercera Edición. Mitigation Directorate. Federal Emergency Management. Washington, DC.
- FL Department of Environmental Protection (2005). *Hurricane Dennis: Beach and Dune Erosion and Structural Damage Assessment and Post-Storm Recovery Recommendations for the Panhandle Coast of Florida*. Florida Department of Environmental Protection. Division of Water Resource Management. Bureau of Beaches and Coastal Systems. Julio 2005.
- Google (2005). *Google Maps*. Sitio de Internet: URL: <http://maps.google.com/>
- Keen, T. R., Bentley, S. J., Vaughan, W. C., y Blain, C. A. (2004). “The generation and preservation of multiple hurricane beds in the northern Gulf of Mexico”. *Marine Geology*, Vol. 210, pp. 79–105.
- Mosqueda, G. and Porter, Keith A. (2006). “Assessing Damage to Engineered Buildings in the Wake of Hurricane Katrina – Preliminary Conclusions”. *Structural Engineer*. 3 pages.
- MP Munro (2006). *Munro Petroleum and Terminal Corporation*. Sitio de Internet: URL: <http://www.munropetro.com/>
- Nicholson, P. (2005). *Hurricane Katrina: Why Did the Levees Fail?*. Testimony of Before the Committee on Homeland Security and Governmental Affairs U.S. Senate On behalf of the American Society of Civil Engineer. URL: <http://www.ewrinstitute.org/files/pdf/katrinalevees.pdf>.
- NOAA (2005). *Hurricane Katrina: Storm tide summary - Preliminary Report*. Sitio de Internet: <http://140.90.121.76/>.
- NOAA (2006). *NOAA Hurricane Preparedness – Hurricane History*. Sitio de Internet URL: <http://www.nhc.noaa.gov/HAW2/english/history.shtml>.
- RMS (2005). *Hurricane Katrina: Profile of a Super Cat - Lessons and Implications for Catastrophe Risk Management*. Risk Management Solutions, Inc. Newark, CA, USA. 31 páginas.
- Robertson, I. N., Riggs, H. R., Yim, S., and Young, Y. L. (2006). “Lessons from Katrina”. *Civil Engineering*. April. pp. 56-63.
- Roy Anderson Corporation (2006). Comunicación Personal. Roy Anderson Co. Contractors Company Web Site – URL: <http://www.rac.com/>.
- Thompson Engineering (2006). Comunicación Personal. Web Site del Proyecto – URL: <http://www.thompsonengineering.com/Default.asp?PN='ProjectProfiles'&PP='BeauRivage'>
- US Geological Survey (2005). *Hurricane Katrina Disaster Response*. Sitio de Internet: URL: <http://eros.usgs.gov/katrina/>.
- Wieczorek, G. F. (1996). *Landslide Triggering Mechanisms in Landslides – Investigations and Mitigation*. Special Report 247. A. K. Turner y R. L. Schuster, Editores. Transportation Research Board. National Research Council. National Academic Press. Washington, DC. USA. pp.76-90.