

DAÑOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE DEBIDOS AL HURACÁN KATRINA¹

Luis A. Godoy², Genock Portela³ y Ali Saffar⁴

Resumen: Este trabajo describe daños estructurales observados en tanques de almacenamiento de combustible localizados en el estado de Louisiana, que fueron visitados por investigadores de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez (UPRM) luego del paso del huracán Katrina en el año 2005. Aunque existen varios componentes en una refinería, este artículo se limita al comportamiento de tanques de acero sobre el terreno, ya que ha sido un tema estudiado en detalle en la UPRM. La evidencia de los daños fue recopilada por medio de fotografías tomadas durante la misión de reconocimiento entre los meses de octubre y noviembre de 2005 y por fotografías tomadas por las agencias Environmental Protection Agency (EPA), US Coast Guard y el US Army. Tanques localizados en dirección del paso del huracán Katrina sufrieron daños estructurales debido a las presiones de viento (por ejemplo en Port Sulphur, Louisiana), aunque el mayor daño y las mayores consecuencias ocurrieron debido a inundaciones producidas días después del paso del huracán (Chalmette, Louisiana). Las inundaciones provocaron que algunos tanques quedaran desconectados de sus fundaciones y se trasladaran de su posición original. Nuevas necesidades de investigación fueron identificadas basadas en los modos de falla observados.

Palabras Claves: daños estructurales, huracanes, huracán Katrina, inundaciones, marejada, tanques.

DAMAGE OF OIL STORAGE TANKS DUE TO HURRICANE KATRINA

Abstract: This paper presents a short description of structural damage of oil storage tanks that were observed during the reconnaissance missions of UPRM researchers to the states of Texas and Louisiana following hurricane Katrina in 2005. Although there are several components in an oil refinery, this paper is limited to the behavior of aboveground oil storage steel tanks because this is a topic for which extensive research has been done at UPRM. Evidence of damage is shown using photographs taken during the reconnaissance mission in October/November 2005 and from photographs taken by the Environmental Protection Agency (EPA), the US Coast Guard and the US Army. Damage of tanks by hurricane Katrina occurred due to wind pressures in facilities that were along the path of the hurricane (such as in Port Sulphur, Louisiana), but most of the damage (and the most significant consequences) occurred due to flooding during the days after the hurricane (such as in Chalmette, Louisiana). Flood damage occurred because the tanks dislodged from the foundation and moved away from their original location. Research needs are identified based on the failure modes observed.

Keywords: flood, hurricanes, hurricane Katrina, storm surge, structural damage, tanks.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta una breve descripción de los daños en tanques de refinerías de petróleo y plantas de almacenamiento de combustible, observados por los autores durante las misiones de reconocimiento que se llevaron a cabo en las zonas afectadas por el huracán Katrina en 2005. Las visitas se llevaron a cabo entre los meses de octubre y en noviembre de 2005. En un trabajo complementario (Godoy, 2006) se informa sobre daños observados a consecuencia del huracán Rita.

¹ Artículo recibido el 23 de diciembre de 2005 y en forma revisada el 15 de abril de 2006.

² Director, Centro de Investigación en Infraestructura Civil, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, PR, 00681-9041. E-mail: lgodoy@uprm.edu

³ Catedrático Auxiliar, Departamento de Ingeniería General, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, PR. E-mail: gportela@uprm.edu

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

Para comprender la importancia de la zona afectada por los huracanes del 2005 en la Costa del Golfo de México (*US Gulf Coast*) hay que considerar la importancia de esa región para la industria del petróleo. La Costa del Golfo refina 8.1 millones b/d (barriles por día, donde 1 barril = 42 galones = 159 litros), que es el 47% de la capacidad de Estados Unidos. Otras instalaciones en la zona también son claves, como las terminales que importan 6.5 millones b/d de petróleo crudo (el 60% del total de Estados Unidos). La producción de petróleo de la Costa del Golfo es de 1.5 millones b/d (el 28% del total de Estados Unidos), mientras que la producción de gas es de 10.4 millones b/d (el 19% del total de Estados Unidos). Las refinerías del Golfo no sólo tratan petróleo producido en el golfo mismo, sino que refinan petróleo de otras zonas, como petróleo de Venezuela en la planta Citgo de Chalmette, Louisiana.

La vulnerabilidad de las plantas petroleras del Golfo es muy alta, como quedó demostrado después de los huracanes de 2005 (véanse, por ejemplo, los reportes de prensa de Hamman, 2005; Llanos, 2005; Stempeck, 2005; McKay, 2006; Anónimo, 2006). Algunos de los aspectos más salientes fueron los siguientes:

- De acuerdo con el presidente de *National Petrochemical and Refiners Association* (NPRA), cerca del 50% de la producción diaria de petróleo y 20-25% de la producción de gas de Estados Unidos se perdieron debido al huracán Katrina.
- Cerca del 20% de la capacidad de refinado se afectó debido a Katrina.
- Seis refinerías salieron de producción, de las cuales tres en Louisiana y una en Mississippi tenían daños severos, principalmente causados por inundación.
- Las tuberías principales que transportan productos refinados (como gasolina y diésel) hacia el sur y el este de Estados Unidos se perdieron o sufrieron daños graves.
- Se perdieron tuberías de transporte de petróleo crudo en muchos lugares.

Hacia finales de octubre del 2005, la recuperación fue de la siguiente manera:

- Todas las tuberías entre estados se encontraban operando al 100% de su capacidad regular.
- Como consecuencia del huracán Katrina, dos refinerías aún estaban produciendo a ritmo reducido: Chevron (Pascagoula, Mississippi) y Murphy Oil (Meraux, Louisiana).

Las consecuencias más importantes debidas al huracán Katrina han sido los derrames de petróleo en grandes volúmenes y en muchos lugares:

- La Guardia Costera de Estados Unidos (US Coast Guard, USCG) estima que más de 7 millones de galones de petróleo se derramaron en plantas industriales, depósitos de almacenamiento y otras plantas en el sur del estado de Louisiana.
- Ocurrieron cerca de 44 derrames de petróleo, que van desde algunos cientos hasta cerca de 4 millones de galones.
- Más de 1.3 millones de galones se evaporaron o dispersaron.
- Se han recobrado cerca de dos millones de galones y se lograron contener otros 2.3 millones mediante barreras.

REFINERÍAS DE PETRÓLEO Y TANQUES

Durante las misiones de reconocimiento llevadas a cabo por investigadores de UPRM a las áreas afectadas por el huracán Katrina en los estados de Louisiana y Mississippi, se visitaron plantas químicas e instalaciones de procesamiento y almacenamiento de combustible, con el fin de identificar niveles de daños en los principales componentes estructurales de estas instalaciones.

Uno de los principales problemas encontrados para obtener información de daños en las refinerías, es que gran cantidad del daño se ha producido por derrames de petróleo, que han provocado reclamaciones contra las refinerías por parte de los individuos afectados. En algunos casos, como en Plaquemines Parish, Louisiana, la mayoría de las instalaciones de almacenamiento no están localizadas cerca de zonas residenciales, de tal manera que el petróleo derramado se ha dispersado por el suelo o por el agua. Este es el caso de Venice, Point a la Hache, Cox Bay y Port Sulphur. Sin embargo, el caso de Chalmette, Louisiana, es único ya que las instalaciones de almacenamiento están rodeadas por un área densamente poblada. Las compañías de petróleo (especialmente Murphy Meraux Refinery en Chalmette) pasarán por un largo y costoso proceso de litigación con sus vecinos y por el momento se encuentran sumamente cuidadosos en no permitir inspecciones de daño en sus instalaciones.

Los reportes de la prensa indican cuán difícil es que las compañías brinden información: Por ejemplo un comunicado de prensa establece lo siguiente, “Murphy Oil se ha negado a entregar una copia de sus planes de mitigación y se niega a comentar sobre el nivel de combustible en el tanque en el momento de la inundación, o si el tanque estaba lleno o no de agua” (Anónimo, 2006).

Se ha dado especial atención a los tanques de almacenamiento usados tanto para materiales sin procesar como para productos refinados. En las instalaciones de combustible, usualmente los tanques se construyen utilizando una cáscara cilíndrica con espesores variables en altura y un techo (ya sea cónico, domo o plano flotante). Estas son estructuras de pared delgada (con razones de radio a espesor mayores a 1,000), comúnmente clasificada como estructuras de baja altura (razones de altura a diámetro menores de 0.5) (Myers, 1997). Igual que el resto de las estructuras que consisten de cáscaras delgadas, los tanques tienden a fallar por pandeo, ya sea de naturaleza elástica o elasto-plástica. En tanques sin techos, el pandeo ocurre con largas deflexiones hacia dentro de la cáscara, conduciendo a la estructura a lo que se conoce en la literatura como un punto límite de pandeo (Godoy, 2000). Por otra parte, tanques que poseen techo desarrollan modos de pandeo localizados, que son identificados por bifurcación de la curva de equilibrio. Otros modos de daños debido a cargas de viento fueron identificados por pérdidas del material aislante y desprendimiento de techos.

Las investigaciones llevadas a cabo en la UPRM por los últimos 10 años en el área de pandeo de tanques incluyen tanto simulaciones computacionales como experimentales conducidas en túnel de viento. Un resumen de estos trabajos se presenta en Godoy et al. (2005) y en sus referencias citadas.

El diseño de tanques almacenamiento de combustible está regulado por la “American Petroleum Institute Provisions”, API 650 (1988) y las cargas de viento se especifican usando los estándares adoptados por la región (ASCE/SEI, 2006). Las cargas de viento mínimas requeridas en casi toda la costa del Golfo son de 145 mph (233 Km/h), aunque se debe considerar 150 mph (241 Km/h) para el sur de la región de Plaquemine Parish en Louisiana. Los mismos valores fueron previamente especificados para la edición del estándar ASCE 7-95.

Contrario a lo comúnmente esperado, la práctica de diseño en las plantas de almacenamiento es construir tanques sin anclaje. Esto significa que si un tanque está vacío o con un nivel de líquido bajo y su dique de retención está inundado, entonces el tanque va a flotar. De esta manera es posible trasladar el tanque con un mínimo esfuerzo. Un tanque vacío posee dos problemas: Primero, el tanque posee su menor capacidad de resistencia frente a pandeo. Por el contrario, si un tanque se encuentra lleno de aceite o agua, la presión interna ejerce un efecto estabilizador y se precisa una presión mayor de viento para que ocurra pandeo (Flores y Godoy, 1997). Segundo, el tanque podría separarse de su fundación en caso de inundación o marejada. Por tales razones resulta conveniente llenar el tanque con agua previo al paso de un huracán, con el fin de estabilizar tanto la cáscara (para evitar pandeo) como la base del propio tanque (para evitar cambios en posición). Esta práctica ha sido adoptada en Hawaii así como en otras plantas de Estados Unidos, aunque evidentemente no se ha implementado en la mayoría de las plantas existentes.

DAÑOS EN TANQUES DEBIDOS AL HURACAN KATRINA

En agosto 29, el huracán Katrina azotó la parte baja al sur de New Orleans (Plaquemines Parish) en la península dirigida al delta del río Mississippi (Figura 1). Se estima que las ráfagas de viento en esa zona alcanzaron las 145 mph. En esta área se encuentra una cantidad considerable de granjas de tanques y algunas refinerías, las cuales fueron fuertemente golpeadas por el huracán. La parte más baja en el sur es Venice. En su trayectoria hacia el norte se encuentran otras instalaciones en Buras, Port Sulphur, Cox Bay y en otras pequeñas localidades a ambos lados del río, dirigiéndose a Belle Chase (planta Conoco-Phillips) en el margen oeste y Stolthaven (planta Stolthaven New Orleans LCC) en la margen este del río. A partir de esa zona, la trayectoria seguida por el huracán fue hacia Chalmette, donde se encuentran tres granjas de tanques muy importantes.

Port Sulphur, Louisiana, se encuentra a lo largo del Río Mississippi, donde ocurrió el mayor derrame de combustible. La planta Freeport contiene diez tanques grandes de techo cónico, con diámetro de 30m, un tanque pequeño (techo con geometría en domo, diámetro 21m) y otros cinco tanques aún más pequeños. Fotografías aéreas (Figura 2) muestran la instalación: La imagen aérea de la Figura 2.b fue tomada desde un helicóptero pocos días después del paso del huracán Katrina y todavía muestra el área bajo agua y petróleo. En dos de nuestras misiones se visitó este lugar: La mayoría de las fotografías fueron tomadas durante la primera visita (Octubre 16-21), pero el paso estaba restringido por personal de seguridad durante la segunda visita (Noviembre 16-19), por lo que no se tuvo acceso a los tanques.



Figura 1: El Río Mississippi entre New Orleans y el Delta.



Figura 2a: Vista aérea de la planta Freeport, Port Sulphur, Louisiana. (Fotografía de NOAA).



Figura 2b: Vista aérea de la planta Freeport, Port Sulphur, Louisiana. (Fotografía de Alan Dooley, US Army Corps of Engineers).

Se observaron dos modos de falla en esta planta: Los tanques grandes no se movieron de su posición original y pandearon bajo cargas de viento (Figuras 3 y 4). Además, el aislamiento de todos los tanques se desprendió tanto en el cilindro como en el techo (Figura 5). Esta fue una de las localidades con mayores derrames de combustible y esto pudo haber ocurrido por dos situaciones: En el tanque desplazado, debido al rompimiento del sistema de tuberías cuando se movió el tanque y en los tanques grandes debido a una falla estructural.

Los tanques pandeados mostraban grandes deflexiones en la parte cilíndrica y en la placa de base, con deflexiones en el orden de 1m y afectando un área con un ángulo central de 15-30° (Figura 3). La forma final indica que las presiones debido a viento fueron considerablemente mayores a las cargas de diseño de los tanques. Aunque todavía se deben llevar a cabo estudios computacionales, se estima que el pandeo de estos tanques debió ocurrir para velocidades de viento por debajo de las 120 mph (193 Km/h). Las configuraciones de pandeo observadas en esta localidad eran únicas y no se observaron en otros tanques expuestos a los huracanes Katrina o Rita y tampoco fueron observados durante los huracanes Marylin en St. Thomas (1995) ni Georges en Puerto Rico (1998). Al parecer, en este modo de falla se ha combinado la fractura en el nivel de soldadura entre el cilindro y la base, con el pandeo de la cáscara (Portela, Virella y Godoy, 2006).



Figura 3: Tanque pandeado en Port Sulphur, Louisiana (Fotografía de los autores, octubre 17).



Figura 4: Techo cónico del tanque en Port Sulphur, Louisiana. (Fotografía de los autores, octubre 17).



Figura 5: Pérdida del recubrimiento aislante en Port Sulphur, Louisiana. Estos tanques estaban en muy buenas condiciones antes del huracán Katrina. (Fotografía de los autores, octubre 17).

El otro modo de falla observado refleja un movimiento de cuerpo rígido, en el cual el tanque fue desplazado por unos 33m (Figura 6). Este debió haber sido causado por una combinación entre la tormenta y la inundación que hizo flotar el tanque y desplazarlo. El tanque no pudo viajar muy lejos ya que una tubería obstruyó su paso. Este tanque no mostró señales de daños por pandeo.

En la planta Fish Oil localizada en Port Sulphur, un tanque con diámetro de 15m, pandeó hasta colapsar estructuralmente (Figura 7). Este tanque golpeó a otro tanque con techo cónico que se encontraba cercano y produjo daño en la parte alta de la cáscara cilíndrica.

Otra instalación pequeña localizada en la parte norte de Port Sulphur tenía tanques pequeños que mostraban grandes distorsiones debido al viento, según se muestra en la Figura 8. Un tanque con techo en geometría de domo rebajado sufrió pandeo en la base del cilindro.



Figura 6: Tanque desplazado por la inundación en la planta de Freeport, Port Sulphur, Louisiana. (Fotografía de los autores, noviembre 17).



Figura 7: Tanques pandeados en Fish Oil, Port Sulphur, Louisiana. (Fotografía de los autores, octubre 17).



Figura 8: Varios tanques dañados en una planta al norte de Port Sulphur, Louisiana. (Fotografía de los autores, noviembre 17).

Un número pequeño de tanques colapsó en la orilla oeste del Río Mississippi en Port Sulphur, según muestran las Figuras 9 a y b. Los tanques fueron movilizados por el impacto de la tormenta perdiendo éstos el producto contenido.

La planta Dynergy, localizada en Venice, Louisiana, quedó completamente inundada por la marejada que produjo el huracán Katrina. Las Figuras 10 a y b muestran vistas aéreas de la instalación con ocho tanques principales. No hay otras edificaciones en el área aparte de las existentes en la planta. El US Coast Guard identificó derrames de petróleo mezclados con el agua arrastrada por la tormenta (Figura 11). Restos de caña fueron arrastrados por la tormenta traídos de los pantanos que cubren la mayor parte de la región, mientras material arcilloso era depositado por la inundación.



Figura 9a: Pequeños tanques arrastrados por la inundación debida a Katrina. (Fotografía de los autores, octubre 17).



Figura 9b: Pequeños tanques arrastrados por la inundación debida a Katrina. Se trata de un lugar diferente del de la Figura 12.a. (Fotografía de los autores, noviembre 17).



Figura 10a: Vista aérea de la planta Dynergy, Venice, Louisiana. (Fotografía de USCG).



Figura 10b: Vista aérea de la planta Dynergy, Venice, Louisiana. (Fotografía de USCG).



Figura 11a: Planta Dynergy, Venice, Louisiana. Vista de uno de los tanques y del dique de retención lleno de agua de inundación y petróleo de derrame. (Fotografía de USCG).



Figura 11b: Planta Dynergy, Venice, Louisiana. Vista de la zona inundada, con tres tanques sobre la derecha de la imagen. (Fotografía de USCG).

Otra planta al sur de Venice sufrió problemas similares. La Figura 12 muestra cómo algunos de los tanques fueron afectados y las fotografías muestran el material utilizado para remover el derrame. No fue posible visitar Venice durante las misiones de UPRM, ya que la Federal Emergency Management Agency (FEMA) se encontraba reparando las principales vías de acceso.



Figura 12: Planta al sur de Venice, Louisiana. (Fotografía de USCG).

Los mayores daños debido a derrames producidos por Katrina ocurrieron en la planta Bass Enterprises localizada en Cox Bay, Louisiana. Esta planta se encuentra en un lugar aislado, pero debe haber causado gran contaminación al suelo. La vista aérea (Figura 13a) muestra los dos tanques que quedaron separados de su fundación debido a la fuerza del agua asociada al huracán Katrina. Vistas laterales de los mismos tanques se muestran en la Figura 13b. Se perdieron alrededor de 3.3 millones de galones de combustible en ese lugar.



Figura 13a: Bass Enterprises, Cox Bay, Louisiana. Dos grandes tanques fueron arrastrados por la inundación. (Fotografía de USCG).



Figura 13b: Bass Enterprises, Cox Bay, Louisiana. Detalle de daños en los dos tanques grandes que fueron arrastrados. (Fotografía de USCG).

Bass Enterprises tiene una segunda planta al norte de esta localidad en Pointe a la Hache, Louisiana. Alrededor de 461,000 galones de combustible fueron descargados allí. Los tanques que sufrieron traslación de su base se muestran en las vistas aéreas y laterales de la Figura 14. Ocurrieron grandes distorsiones en la forma de los tanques debido al desplazamiento sufrido por éstos (Figura 14b).

La Figura 15 muestra otra de las plantas inundadas en Nairn, Louisiana y en la Figura 16 se muestra la planta de Sundown Energy, en Potash, Louisiana, donde se derramaron unos 13,000 galones de aceite.

Chalmette es otro pequeño pueblo de St. Bernard Parish por donde pasó el ojo del huracán Katrina. Existen tres refinерías en este pueblo, incluyendo a Murphy Meraux Refinery y Chalmette Refinery. Las Figuras 17 a y b muestran la refinерía Murphy Meraux, una de las más grandes de los Estados Unidos, con una producción de 120,000 barriles por día. Esta refinерía fue particularmente afectada en el sector norte (Figura 17b), donde se encuentran localizados cinco tanques de gran tamaño. El diámetro de los tanques mas grandes es de 95m (según se aprecia en la Figura 18), mientras el diámetro del menor (pero aún sustancialmente grande) es de 72m, todos con techos flotantes. Las cáscaras cilíndricas contienen un anillo rigidizador intermedio para prevenir pandeo y las estructuras no parecen haber sufrido pandeo o fractura debido a las cargas de viento. La falla de estos tanques se debió a la inundación producida posterior al evento.



Figura 14a: Bass Enterprises North, Ponte a la Hache, Louisiana. Los tanques fueron arrastrados por el agua. Se descargaron cerca de 461,000 galones de combustible. (Fotografía de USCG).



Figura 14b: Bass Enterprises North. Ponte a la Hache, Louisiana. Detalle de los tanques arrastrados por el agua. (Fotografía de USCG).



Figura 15: Nairn, Louisiana. Tanque con techo flotante en una planta inundada. (Fotografía de USCG).



Figura 16: Sundown Energy, Potash, Louisiana. Se derramaron cerca de 13,000 galones de combustible. (Fotografía de USCG).



Figura 17a: Vista aérea de Murphy Meraux Refinery, Chalmette, Louisiana. (Fotografía de NOAA).



Figura 17b: Vista aérea del sector norte de la Murphy Meraux Refinery, Chalmette, Louisiana, inundada después de Katrina. Todos los tanques tienen techo flotante. (Fotografía de EPA).



Figura 18a: Uno de los tanques mayores en el sector norte de Murphy Meraux Refinery. El tanque tiene un rigidizador horizontal para prevenir pandeo. (Fotografía de los autores, noviembre 16).



Figura 18b: Detalle de la parte dañada en uno de los tanques mayores en el sector norte de Murphy Meraux Refinery. (Fotografía de EPA).

El problema comenzó el 30 de agosto, cuando fallaron los diques a lo largo del Río Mississippi produciéndose una inundación masiva en St. Bernard Parish, llegando el nivel de agua a unos cinco metros de altura. La refinería Murphy Oil quedó bajo unos 4m de agua. Según EPA (2005a), el tanque 250-2 sufrió un derrame; este tanque tiene una capacidad de 250,000 barriles pero estaba operando con 65,000 barriles de crudo al momento del derrame (un 25% de su capacidad). Estos tanques poseen un dique de retención que provee almacenamiento para fluido en caso de derrames, pero no estaban diseñados para almacenar los 3 a 5m de agua recibida debido a la inundación. Esto ocasionó que el tanque flotara y perdiera contacto con su fundación. Se estima que se derramaron 25,110 barriles del producto (alrededor del 40% del fluido almacenado). Una mezcla de combustible flotando sobre agua se dirigió hacia áreas urbanas que rodean la planta, afectando cientos de viviendas.

La refinería Chalmette, propiedad de la compañía Exxon Mobil y Petróleos de Venezuela (Figura 19a) procesa crudo proveniente de Venezuela, la quinta nación con el mayor margen de exportación de crudo. La producción en esta planta era de 183,00 barriles por día. La planta fue inundada como todas las otras en St. Bernard Parish y quedó afectada en forma crítica (Figura 19b). Muchos de los tanques poseen techos flotantes, mientras otros tienen techos cónicos o planos. Los tanques no poseen anillos rigidizadores intermedios; sin embargo no se identificó pandeo producido por el viento. El material aislante sufrió daño en algunos de los tanques.

Existe una cantidad de plantas que no sufrieron daños durante el huracán Katrina en la región sur de New Orleans. Visitamos la planta Conoco-Phillips Alliance en Belle Chase, Louisiana, donde no se reportaron derrames. La mayoría de los tanques poseían anillos rigidizadores intermedios para prevenir pandeo. Los tanques en la planta Stolthaven, Louisiana, soportaron presiones altas de viento pero no experimentaron daños.



Figura 19a: Vista aérea de Chalmette Refinery, Chalmette, Louisiana. (Fotografía de NOAA).



Figura 19b: Planta inundada de Exxon Mobil y Petróleos de Venezuela, en Chalmette, Louisiana.

RESUMEN DE OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

La presión del viento causado por el huracán Katrina ocasionó daños en tanques metálicos de almacenamiento de petróleo en las instalaciones que estaban a lo largo de la trayectoria del huracán. Sin embargo, la mayoría de los daños (y los de consecuencias más significativas) ocurrieron debido a las inundaciones durante los días posteriores al huracán.

Las observaciones principales pueden resumirse como sigue:

- Muchos tanques al sur de New Orleans cedieron al viento y no flotaron, mostrando que no fueron diseñados para soportar las 135-145 mph (217-233 Km/h) que se piensa que hubo cuando el huracán Katrina llegó a tierra en Louisiana (como en el caso de Port Sulphur, Louisiana).
- La razón por la que no muchos tanques cedieron por pandeo de la cáscara, fue debido a que la velocidad del viento estaba en el orden de 115 mph (185 Km/h) a medida que el huracán Katrina se adentraba en tierra. Esta situación fue similar a la ocurrida con el huracán Rita.
- La mayoría de los daños ocasionados por el viento en los tanques, ocurrieron en localidades periféricas a plantas que no estaban expuestas y no fueron escudadas por otros tanques o construcciones. Esto es consistente con las predicciones de Portela y Godoy (2005c), quienes ensayaron configuraciones en grupo en túneles de viento.
- Daños al material aislante en las partes cilíndricas de la cáscara, ya fuese en el centro o en la parte superior del cilindro, era esperado debido a las altas presiones de viento desarrolladas en esas zonas, según reportado en experimentos de túneles de viento (Portela y Godoy, 2005a; 2005b).
- Se identificó pandeo localizado en la cáscara de muchos tanques, con amplitudes de pandeo en el orden de tres veces el espesor de la cáscara. Los tanques de petróleo son mayormente diseñados para soportar la presión hidrostática siguiendo los estándares del American Petroleum Institute (API 650, 1988), y las paredes del cilindro se diseñan con espesor variable. Por tanto, es claro que la parte más vulnerable es la parte superior del cilindro donde el espesor es menor.

La posibilidad de flotación del tanque no parece ser una preocupación de diseño actualmente, y debería serlo, de acuerdo con las numerosas observaciones posteriores al huracán Katrina. Anclar un tanque por la base aumenta mucho su estabilidad, reduciendo de esta forma la posibilidad de daños y derrames.

Existe la necesidad de investigar el comportamiento de tanques sin anclar bajo cargas de viento. El componente vertical de los desplazamientos en la base debilita la capacidad de la cáscara por pandeo y puede producir colapso, como ocurrió en el caso de Port Sulphur, Louisiana. Estudios previos han cubierto solamente la influencia de desplazamientos verticales en tanques bajo construcción (Jaca y Godoy, 2003).

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por la U.S. National Science Foundation (“SGER: Identification of structural damage in tanks and industrial facilities due to hurricane Katrina”, Award number 0553986, 2005-2006), por el National Institute of Standards and Technologies (NIST) y por Mid-America Earthquake Center (NSF-MAE). Los autores agradecen el apoyo de todas esas organizaciones.

REFERENCIAS

- Anónimo (2006), Environmental effects of Hurricane Katrina, Wikipedia.
http://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_effects_of_Hurricane_Katrina
- ASCE/SEI 7-05 (2006), *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE, Reston, Virginia, 424 pp.
- API 650 (1988), *Welded Steel Tanks for Oil Storage*, American Petroleum Institute, Washington, DC.
<http://www.citgo.com/CommunityInvolvement/Classroom/VirtualTours.jsp>
- EPA (2005a), “Murphy Oil Spill”, US Environmental Protection Agency.
<http://www.epa.gov/katrina/testresults/murphy/index.html>
- EPA (2005b), “Environmental Assessment Summary for Areas of Jefferson, Orleans, St. Bernard, and Plaquemines Parishes Flooded as a Result of Hurricane Katrina”, US Environmental Protection Agency, December 6, 2005.
http://www.epa.gov/katrina/testresults/katrina_env_assessment_summary.htm
- Flores, F. G. y Godoy, L. A. (1997), “Buckling of short tanks due to hurricanes”, *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 8, pp. 752-760.
- Godoy, L. A. (2000), *Theory of Elastic Stability*, Taylor and Francis, Pennsylvania.
- Godoy, L. A. (2006), “Daños en tanques de combustible debidos al Huracán Rita”, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 6, No. 1, pp. 27-36.
- Godoy, L. A., Jaca, R., Portela, G., Sosa, E. M. y Virella, J. C. (2005) “Damage of oil storage tanks due to wind and earthquake”, *Proceedings of Damstruc 2005: 4th International Conference on the Behavior of Damaged Structures*, August 14 – 18, João Pessoa, Pb, Brasil, pp. 17-31.
- Hamman, H. (2005), “Oil spillages threaten Gulf of Mexico”. *Financial Times*, September 8.
- Jaca R. y Godoy L. A. (2003), “Colapso de un tanque metálico en construcción bajo la acción del viento”, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 3, No. 1, pp. 73-83.
- Llanos, M. (2005), MSNBC, Sept. 19, 2005. <http://www.msnbc.msn.com/id/9365607/>
- McKay, B. (2006), “Katrina Oil Spill Clouds Future Of Battered Suburb: Health Concerns Loom Large For Waiting Homeowners”, *Wall Street Journal*, January 3rd. <http://www.corpwatch.org/article.php?id=13016>
- Myers, P. (1997), *Aboveground Storage Tanks*, McGraw-Hill, New York.
- Portela, G. y Godoy, L. A. (2005a), “Wind pressures and buckling of aboveground steel tanks with a conical roof”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 61, No. 6, pp. 786-807.
- Portela, G. y Godoy, L. A. (2005b), “Wind pressures and buckling of cylindrical steel tanks with a dome roof”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 61, No. 6, pp. 808-824.
- Portela, G. y Godoy, L. A. (2005c), “Shielding effects and buckling of steel tanks in tandem arrays under wind pressures”, *Wind and Structures: An International Journal*, Vol. 8, No. 5, pp. 325-342.
- Portela, G., Virella, J. C. y Godoy, L. A. (2006), “Computational modeling of wind damage in unanchored tanks”, *Proceedings of the XXIII Southeastern Conference on Theoretical and Applied Mechanics (SECTAM)*, Mayagüez, Puerto Rico.
- Stempeck, B. (2005), “Oil and Gas: Energy groups explain how hurricane affected Gulf Coast oil production”, On Point, E&E TV, September 12, 2005.