

Efectos de desastres naturales y accidentes sobre infraestructura y medio físico en sistemas de almacenamiento y transporte de petróleo

Luis A. Godoy¹, Sergio A. Elaskar^{1,2}, Franco M. Francisca^{1,3}, Marcos A. Montoro^{1,3}, Rossana C. Jaca⁴, Susana N. Espinosa⁴, Mariano P. Ameijeiras⁵

¹Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología, IDIT UNC/CONICET, Córdoba, Argentina

²Departamento de Ingeniería Aeronáutica, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

³Departamento de Construcciones Civiles, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

⁴Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina

⁵Departamento de Estructuras, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 15/05/2019

Fecha de aceptación del manuscrito: dd/mm/aaaa

Fecha de publicación: dd/mm/aaaa

Resumen—Este trabajo refleja investigaciones desde varias disciplinas de la ingeniería, llevadas a cabo para identificar y evaluar efectos sobre la infraestructura y sobre el medio físico que son causados por desastres naturales y accidentes, en el contexto de la industria del petróleo. Como amenazas se discuten acciones debidas a viento, fuego y explosiones actuando sobre tanques de almacenamiento de combustibles, modelándose las acciones y las respuestas estructurales. El artículo no contiene resultados nuevos sino que reseña de manera integrada los resultados obtenidos por los autores y tomados de sus publicaciones previas. Para determinación de presiones debidas a viento y a explosiones se han empleado estudios experimentales, mientras que la modelación de la respuesta estructural que se reporta se llevó a cabo mediante elementos finitos, enfatizando estudios de estabilidad de la estructura. Se reporta sobre las consecuencias de derrames de líquidos contaminantes sobre el suelo y que potencialmente pueden afectar acuíferos. Se proponen formas de controlar la vulnerabilidad del medio físico a través de interponer barreras que contengan derrames y transporte de contaminantes, como adición de bentonita y de escoria siderúrgica para retención y contención de hidrocarburos.

Palabras clave— industria del petróleo, fuego, viento, explosiones, contaminación de suelo y acuíferos, remediación de suelos, tanques, vulnerabilidad.

Abstract— This work reports research results aimed to identify and quantify effects caused by natural disasters and accidents on infrastructure and physical media within the context of the oil industry. Loadings due to wind, fire, and explosions are considered, focusing on their effects on oil storage tanks. Both, the loading source and the structural response, are considered. The paper does not include new results but summarizes in an integrated way the results obtained by the authors in previous publications. Testing has been employed in the evaluation of pressures due to wind and due to explosions, whereas the structural response has been carried out by finite element analysis. The consequences of oil spills affecting soil are explored together with the potential contamination of aquifers. The study proposes ways to control vulnerability of the physical media by means of barriers for the contention of spills and transport of contaminants, such as the addition of bentonite and steel scum for the retention of hydrocarbon products.

Keywords— oil industry, fire, wind, explosions, soil and aquifers contamination, soil remediation, tanks, vulnerability

INTRODUCCIÓN

Este artículo surge como resultado parcial de un proyecto multidisciplinario de investigación cuyo objetivo principal es evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura en la industria del petróleo (focalizándose en tanques y tuberías) y del medio físico (focalizándose en suelos y aguas

subterráneas) frente a amenazas provenientes de accidentes y desastres naturales.

En la actualidad, las industrias del petróleo e hidrocarburos son centrales en la mayoría de los países, con la expectativa de que esta situación continúe así por algunas décadas. Aunque las condiciones de seguridad han mejorado recientemente, es conocido que la producción de combustibles conlleva una serie de riesgos debido a que se trata de productos altamente contaminantes. Hay evidencia contundente de que en esta industria ocurren accidentes de manera muy frecuente, incluyendo incendios y explosiones (Chang y Lin 2006).

Dirección de contacto:

Luis A. Godoy, Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria, X5016 CGA. Tel: 351-5353800 interno 29719, luis.godoy@unc.edu.ar

Accidentes de este tipo pueden causar daños directos a la infraestructura y ocasionar derrames con fuerte impacto sobre el aire, suelos y acuíferos. Estos accidentes tienen consecuencias económicas (como la reparación o sustitución de la infraestructura), operacionales de la propia industria (como la incapacidad de operar sectores de una planta), ambientales (como la contaminación de suelo y acuíferos causados por derrames), sociales (como pérdida de vidas y de propiedades de poblaciones vulnerables), entre otras.

Como infraestructura de interés, el artículo considera problemas asociados al almacenamiento de petróleo y productos derivados mediante tanques metálicos, lo que se realiza en refinerías y en plantas de almacenamiento, y al transporte de fluidos combustibles (líquidos o gases) mediante tuberías de corta longitud o de líneas pertenecientes a una red. Aunque no son las únicas componentes vulnerables en la industria de hidrocarburos, tanques y tuberías son componentes vitales de la cadena de almacenamiento y distribución de combustibles.

Los tanques tienen diámetros entre 15 y 80m, con alturas no superiores a 20m; sus espesores son extremadamente delgados, con relaciones entre radio y espesor entre 1500 y 2000 (Myers, 1997). Son estructuras más esbeltas que las estructuras aeronáuticas; esto las hace muy vulnerables tanto por pérdida de su resistencia como por pérdida de su estabilidad (Godoy, 2016).

En general, los códigos de diseño se limitan a cargas debidas a viento y sismo, pero las amenazas más frecuentes en la industria del petróleo son fuego y explosiones (Atkinson, 2011). Adicionalmente ocurren accidentes asociados a inundaciones y descenso de la fundación. Este artículo considera acciones debidas a viento, fuego, y explosiones.

De manera resumida, las consecuencias inmediatas de un accidente en una planta de petróleo pueden incluir:

(1) Daño o pérdida (total o parcial) de la infraestructura. Las consecuencias pueden ser la necesidad de reparación o de sustitución de la infraestructura afectada. El artículo considera en detalle la ocurrencia de daños.

(2) Pérdida de la capacidad de operación de la infraestructura. Este es un costo muy elevado en la industria del petróleo, dado que se disminuye la capacidad operativa de toda una planta. Por ejemplo, la Agencia Federal de Manejo de Emergencias de Estados Unidos analiza los niveles de daño en tanques en base a la pérdida de operatividad de infraestructura.

(3) Derrame de combustible. Podría haber un derrame de combustible y aun así ocurrir que el mismo quede contenido, sin llegar a causar contaminación al medio físico. Sin embargo, es muy frecuente que un derrame cause un incendio/explosión o que el combustible contamine el suelo.

(4) Contaminación del medio físico. La investigación considera en detalle las consecuencias de derrames sobre suelos y acuíferos.

Para ilustrar la magnitud de algunos de estos accidentes, la Figura 1 muestra el estado de una planta en la localidad de Bayamón, Puerto Rico, durante el incendio del 23 de Octubre de 2009 (Batista-Abreu y Godoy, 2011). Como consecuencia del incendio se destruyó un 70% de la planta,

incluyendo 22 tanques. El suelo del lugar quedó altamente contaminado, además de la severa contaminación por aire que se observa en la fotografía.



Figura 1: Incendio en una planta de almacenamiento de combustible en Bayamón, Puerto Rico, el 23 de Octubre de 2009 (Batista-Abreu y Godoy, 2011).

Los efectos de viento sobre tanques metálicos pueden apreciarse en la fotografía de la Figura 2, que corresponde a un tanque en Port Sulphur (Luisiana), bajo vientos del Huracán Katrina en 2005. Debido a estas deformaciones se liberó al medio físico el combustible almacenado.



Figura 2: Falla de un tanque en una planta en Port Sulphur, Luisiana, Estados Unidos, debido a acción directa de viento durante el Huracán Katrina en 2005 (Godoy, 2007).

Para ilustrar consecuencias de explosiones la Figura 3 muestra un tanque afectado durante el accidente en Buncefield, Inglaterra, que causó un incendio en 2005. El accidente incluyó tanto incendio como explosiones de combustible.



Figura 3: Falla de un tanque bajo presiones debidas a la explosión del 11 de Diciembre de 2005, Buncefield, Inglaterra. (Buncefield, 2008)

En la Figura 4 se muestran tanques que sufrieron efectos de inundación con posterioridad al Huracán Katrina en 2005 y que derramaron combustible en cantidades no especificadas por las agencias ambientales.



Figura 4: Derrame de petróleo en una planta de Chalmette, Luisiana, Estados Unidos, asociada a inundación causada por el Huracán Katrina, 2005 (fotografía del US Coast Guard).

En casos de accidentes en la industria petrolera, podemos identificar quienes son las partes interesadas, que incluyen a:

(1) La compañía petrolera que opera la planta en cuestión. Las compañías petroleras, tanto estatales como privadas, se caracterizan por su pragmatismo para resolver problemas y su secretismo para dar a conocer información sensible que pueda afectarlas de alguna manera, previendo casos de demandas judiciales. En el caso del incendio de la Figura 1, la compañía privada Caribbean Petroleum Corp. que operaba la planta se declaró en quiebra y abandonó el sitio de la planta sin llevar a cabo la necesaria remediación al suelo.

(2) Compañías aseguradoras. Aunque las compañías de seguros deben respaldar a sus clientes mediante el cumplimiento de pólizas, sus intereses son encontrados e intentan buscar motivos para evitar hacer pagos. Las compañías aseguradoras en general reaseguran sus carteras para evitar que un desastre natural en una zona determinada supere sus capacidades financieras.

(3) Poblaciones vulnerables cercanas a la zona de accidente. Por ejemplo, debido al Huracán Katrina en Estados Unidos en 2005, las viviendas de poblaciones vecinas a plantas de almacenamiento en Chalmette, LA (cercano a New Orleans) se perdieron totalmente debido a la contaminación. Surgen así numerosas demandas patrocinadas por abogados, como se muestra en la Figura 5. Es crucial comprender de qué manera una planta de petróleo y derivados afecta la población cercana mediante estudios desde la perspectiva de las ciencias sociales. Esta faceta no se abarca en el artículo, que se limita a componentes de ingeniería.

(4) Agentes de protección ambiental, tanto del estado como independientes. En algunos casos existen conflictos entre el gobierno y las empresas petroleras estatales, como en el caso de PEMEX en México, que tuvo que remediar daños al suelo producidos durante décadas de ocupación de una planta cercana a México DF.



Figura 5: Con posterioridad a un desastre natural surgen letreros de abogados que esperan iniciar demandas a las compañías petroleras. Letreros como este se refieren al derrame de petróleo en la planta de Murphy Meraux cercano a Chalmette, Luisiana, Estados Unidos, con posterioridad al paso del Huracán Katrina en 2005.

(5) Instituciones de ciencia y tecnología. En Estados Unidos, el Instituto Nacional de Estándares y Tecnologías (NIST) envía misiones de investigadores después de cada desastre natural con el fin de reconocer daños e investigar modos de falla que no se conocían hasta ese momento, orientados a mejorar las condiciones de diseño. Institutos de investigación como el Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT) intentan proteger el bien común y/o mejorar la ingeniería involucrada a través de identificar/caracterizar las causas de accidentes, mejorar diseños nuevos y estimar la vulnerabilidad de plantas existentes. El secretismo de las compañías petroleras (tanto en Argentina como en países altamente desarrollados) dificulta la labor de investigadores con perspectiva académica, quienes muy pocas veces logran los permisos para entrar a una planta con posterioridad a un evento y relevar las consecuencias del desastre.

Este artículo se enfoca en las consecuencias de desastres naturales y accidentes sobre la infraestructura (tanques y tuberías) y el medio físico en el contexto de la industria del petróleo, para evaluar el riesgo asociado a estos accidentes.

CARACTERIZACIÓN DE AMENAZAS DEBIDAS A VIENTO, FUEGO Y EXPLOSIONES

En un estudio de vulnerabilidad interesa relacionar acciones externas (que son amenazas sobre el sistema considerado) con los daños ocasionados por las mismas sobre elementos estructurales o medio físico de interés. Para el caso de infraestructura se caracterizan las acciones externas por medio de su intensidad, y para ello puede recurrirse a: (1) observaciones de daños posteriores a desastres naturales, (2) ensayos experimentales sobre modelos físicos, o (3) simulaciones computacionales. Interesa especialmente representar la fuente de la acción que se considera, y de qué manera se transfiere esa acción a la infraestructura considerada. En el marco de este proyecto se llevan a cabo principalmente estudios de modelación basados en la mecánica computacional, pero los estudios se apoyan también en resultados de experimentos propios o de grupos relacionados.

Amenazas debidas a viento

En esta investigación se caracterizan y modelan las acciones de viento mediante ensayos en túnel de viento y mediante modelación computacional conocida como CFD (Dinámica Computacional de Fluidos). En definitiva, interesa conocer de qué manera un flujo de viento causa presiones sobre una estructura.

En primer lugar, se han realizado estudios en túnel de viento sobre modelos de tanques en escala reducida. Las presiones sobre tanques medidas en túnel de viento se han estudiado desde la década de 1980 (ver, por ejemplo, MacDonald et al., 1988), existiendo en la actualidad un acuerdo generalizado sobre los niveles de presiones que llegan a la estructura de un tanque aislado, tanto vertical como horizontal.

Surgen dificultades cuando el flujo primero afecta un objeto, se produce un desprendimiento de vórtices y este flujo modificado impacta sobre la estructura de interés. Esto ocurre en casos de grupos de tanques, en los que primeramente el flujo afecta un tanque, pero el interés se concentra en un tanque ubicado detrás del primero; esto se denomina efecto de grupo. También ocurre cuando el tanque se encuentra dentro de lo que se conoce como un dique de contención, que está formado por taludes cuya finalidad es contener el líquido en caso de un derrame: el viento primero impacta sobre las paredes del dique y se genera un movimiento turbulento que llega a la estructura de interés.

Nuestros estudios se llevaron a cabo en túnel de viento de capa límite de la Universidad Nacional de La Plata, de la Universidad Nacional del Nordeste en Resistencia, y de la Universidad del Comahue. Se utilizaron modelos rígidos de PVC a escala reducida obteniendo cuantitativamente la distribución de los coeficientes de presión externos en las paredes y techo del tanque apantallado y en las paredes del tanque dentro del dique de contención. Las Figuras 6 y 7 muestran los modelos ensayados en el túnel de viento.

Para el análisis del efecto de grupo se consideraron dos tanques de iguales dimensiones con techo cónico separados a distancia variable entre $1.0D$ y $1.8D$, siendo D el diámetro de los tanques, con direcciones de incidencia variables $D1$ a $D5$ que ubica el tanque obstáculo en una posición alineado en la dirección del viento ($D1$) variando hasta ubicarse a 90° ($D5$), como se observa en la Figura 6 (Burgos et al., 2014).

Las presiones obtenidas sobre el tanque con apantallamiento varían en valores y patrón de distribución con respecto al tanque aislado, tanto en el cilindro como en el techo, sobre todo para bloqueo en la dirección de incidencia del viento y tanques separados un diámetro, que resulta ser la configuración con mayor demanda en cuanto a valores de presión. En el sector a barlovento las mayores presiones se presentan en la zona próxima a la unión cilindro-techo afectando a ambas cáscaras. A sotavento, la succión sobre el cilindro es casi constante en altura y de menor valor que en el tanque aislado. Las succiones en el techo presentan un incremento con respecto al tanque aislado.

Al aumentar la separación entre los tanques, el patrón de distribución se mantiene, pero los valores máximos tienden

a acercarse a los de tanque aislado, siendo la configuración de los dos tanques alineados en la dirección del viento la que presenta mayor diferencia respecto al tanque aislado.

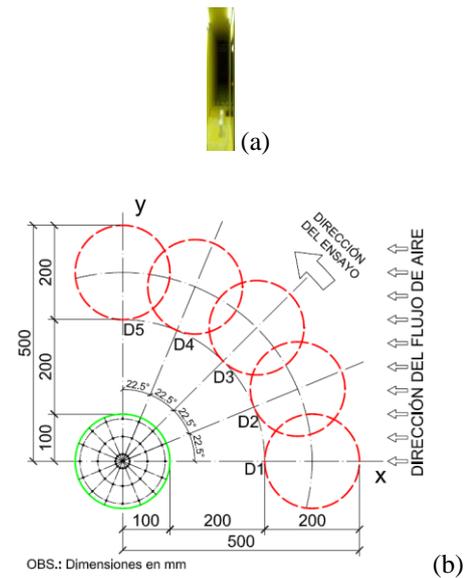


Figura 6: Ensayos de apantallamiento entre dos tanques, realizados en el túnel de viento de la UNLP (Burgos et al., 2014).

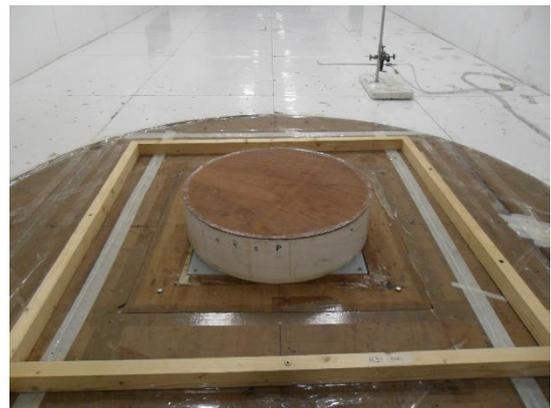


Figura 7: Ensayos de un tanque en su dique de contención, realizado en el túnel de viento de la UNNE. (Hernández et al., 2016)

Los ensayos del modelo de tanque con el dique de contención (Hernández et al., 2016) muestran una reducción de los coeficientes de presión exteriores a lo largo de todo el perímetro del tanque, tanto de succión como de presión respecto a los que corresponden a tanque aislado. Este efecto se produce debido a que el flujo se eleva por el obstáculo del muro generando menos presiones en el tanque a barlovento. A medida que la altura del muro es menor, el flujo presenta una menor modificación con respecto al caso sin obstáculo.

En segundo lugar, se han realizado estudios de simulación computacional usando metodologías de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) para describir el flujo alrededor de tanques y la distribución de presiones sobre los mismos. En los primeros análisis se usó el método de elementos finitos mediante el código NASTRAN CFDdesign (2000) (Falcinelli et al. 2002, 2011), suponiendo que el flujo de viento es turbulento, estacionario,

incompresible e isotérmico. Para la descripción de los flujos turbulentos se utilizó un modelo RANS (Reynolds-Average Navier-Stokes) de dos ecuaciones (k - ϵ). Para modelar la interacción entre la capa límite y el cuerpo sólido se ha impuesto en los elementos finitos adyacentes al cuerpo la función ley de pared, por medio de la misma la velocidad con respecto a la distancia al contorno sólido se impone de antemano. Por lo tanto, la función de pared impone restricciones al tamaño de los elementos finitos en contacto con bordes sólidos. En etapa de validación, se desarrollaron simulaciones del flujo alrededor de una esfera y alrededor de un tanque con techo cónico estudiado mediante ensayos en túnel de viento por MacDonald et al. (1988).

Un aporte novedoso ha sido el estudio de la influencia de la topografía sobre el flujo de viento alrededor de tanques y específicamente sobre la distribución de presiones alrededor de los mismos (Falcinelli et al. 2011). La evaluación de las presiones en tanques ubicados en colinas no había sido abordada en la literatura previamente. Los resultados obtenidos han mostrado que la ubicación real del tanque con respecto a una colina tiene una influencia significativa en las presiones, por lo que los tanques ubicados en la cima de una colina experimentan aumentos severos en los coeficientes de presión y también cambios en las distribuciones de presión alrededor del tanque.

Entre 2012 y 2016 se trabajó en la simulación de viento alrededor de tanques usando el código de acceso libre openFOAM (2014), que implementa el método de volúmenes finitos (Soria-Castro et al. 2013, 2016). El esquema de solución empleado es el algoritmo SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations) acoplado a un modelo de turbulencia tipo RANS, aplicado sobre mallas tanto estructuradas como no estructuradas. En etapa de validación frente a resultados experimentales, se modeló el flujo de viento sobre un tanque cilíndrico de techo plano inmerso en la capa límite atmosférica.

Como parte de esta investigación, se puso atención a la generación, evolución y estabilidad de la capa límite atmosférica. Para tal fin se implementó el esquema establecido en Hargreaves y Wright (2007), en el cual se debe imponer una adecuada condición de borde para la velocidad de entrada y además, en función del modelo de turbulencia implementado, deben imponerse los valores adecuados de k y ϵ (donde k es la energía cinética de turbulencia y ϵ es la disipación turbulenta). La metodología descrita basada en CFD se usó para estudiar la distribución de presiones generadas por viento sobre tanques localizados dentro de piletas de contención. Estas piletas se emplean en plantas de almacenamiento de combustibles para evitar contaminación del medio físico en caso de derrames. Los resultados obtenidos mostraron cambios no despreciables en los patrones de presión con respecto a tanques aislados bajo la acción de vientos similares (Soria-Castro et al. 2013).

También se estudió la distribución de cargas por presión debida a viento en tanques de almacenamiento de petróleo alineados en tándem (Soria-Castro et al. 2016), en los que aparece el fenómeno de apantallamiento. Se analizó el efecto de la interferencia en el flujo de viento de un tanque

ubicado por delante de otro a una distancia relativamente corta (un diámetro), para una escala aproximada de 1:85. Para el primer tanque en sentido del flujo se consideraron techo plano, domo y cónico; mientras que el segundo tanque, sobre el que interesa determinar presiones, se consideró techo cónico. Las presiones sobre la parte cilíndrica del primer tanque tuvieron escasa influencia de la configuración que adopte el techo del mismo. Sin embargo, la distribución de presión sobre el segundo tanque sufrió efectos significativos con respecto a un tanque aislado, tanto en valores máximos como en la distribución de la misma en función del tipo de techo del tanque de adelante.

Actualmente se emplea para la modelación el código FLUENT (ANSYS 2014), que implementa el método de volúmenes finitos con el esquema conocido como “bounded second-order implicit” y el modelo de turbulencia SAS (“Scale-Adaptive Simulation”). De interés para el proyecto, se ha modelado el flujo en tanques horizontales y su influencia en función de la distancia al suelo (Grioni et al. 2016, 2017, 2018), y la interacción entre tanques ubicados en tandem (Grioni et al. 2020). Se han evaluado los coeficientes de sustentación y de arrastre y el comportamiento de desprendimiento de vórtices (número de Strouhal, St) en función de la separación (G) entre el cilindro (de diámetro D) y el suelo, para diferentes números de Reynolds y distintos espesores de capa límite del suelo. Para validar el modelo, los resultados numéricos se compararon con valores disponibles en la literatura de ensayos en túnel de viento, mostrando que tanto el coeficiente de arrastre como de sustentación dependen fuertemente de la relación de separación (G/D), y además están afectados por la capa límite del suelo. También se trabaja modelando el flujo en cilindros horizontales por medio del código FLUENT y el esquema SAS para la turbulencia. Adicionalmente se emplea el software openFOAM y el esquema k - ϵ para turbulencia; en este caso enfatizando la generación y estabilización de la capa límite atmosférica como condición indispensable para obtener resultados numéricos confiables en la descripción del viento alrededor de tanques.

Amenazas debidas a fuego

La cuantificación de efectos de fuego se lleva a cabo modelando la llama que lo origina y la transferencia de calor entre la llama y la estructura que se estudia. La llama depende de varios factores, incluyendo su localización (sea a nivel de suelo o a una cierta altura) como se muestra en la Figura 8.

Generalmente la llama se inicia en la parte superior del tanque, sobre la superficie del combustible en contacto con el aire, pero las altas temperaturas generadas en la superficie del tanque pueden colapsar su estructura ocasionando frentes de llama a diferentes alturas y modificando la radiación incidente sobre los tanques adyacentes. Este aspecto fue analizado cualitativamente en un estudio paramétrico (Liu, 2011) y corroborado en nuestra investigación por medio de modelos rigurosos de transferencia de calor implementados dentro de un código de elementos finitos (Espinosa et al., 2017). Para el estudio se modelaron los parámetros geométricos y la radiación emitida por la llama resultante de la combustión de gasolina

y el consiguiente efecto térmico provocado por la radiación incidente sobre un tanque vecino. Nuestros cálculos indican que las temperaturas máximas registradas sobre los tanques adyacentes a la llama se duplican cuando la llama se extiende desde el tope del tanque en el inicio del incendio hasta incendiar el tanque completo ascendiendo desde su base.

En una batería de tanques el nivel de combustible puede ser variable, habiendo incluso tanques que temporalmente no contienen combustible. Para determinar la respuesta termo-estructural de los tanques, consideramos en nuestro estudio tanques con diferentes niveles de combustible. Se comenzó realizando un análisis CFD (Espinosa et al., 2017) para determinar simultáneamente los perfiles de temperatura en el fluido y en la cáscara de acero de los tanques. Los resultados fueron utilizados posteriormente para ajustar parámetros en los modelos de coeficientes de película requeridos para simular por elementos finitos la transferencia de calor por convección natural entre las paredes del tanque y el combustible líquido. Se determinó que las temperaturas encontradas en la superficie del tanque irradiado se reducen considerablemente en la zona de contacto con el combustible, con una magnitud aproximadamente constante de 100°C, aumentando abruptamente hasta temperaturas del orden de 500 a 600°C sobre la superficie superior del tanque en contacto con el aire interno.

La distancia de separación entre los tanques es también un factor relevante a tener en cuenta en el diseño de una batería de tanques. Ante un potencial riesgo de incendio, regulaciones internacionales recomiendan distancias mínimas de separación con el criterio de minimizar la posibilidad de extensión del fuego a toda la planta. Estos códigos no tienen en cuenta el efecto de vientos fuertes sobre la inclinación de la llama. Para determinar los niveles de viento correspondientes a distancias mínimas seguras, realizamos un análisis sistemático considerando fuego en uno de los tanques y diferentes distancias de separación que van desde la distancia mínima reglamentaria hasta una distancia de dos diámetros, bajo condiciones ambientales con vientos crecientes. La radiación incidente sobre tanques adyacentes a la llama en ausencia de viento, triplica las temperaturas máximas estimadas cuando la separación se reduce desde dos diámetros hasta la distancia mínima reglamentaria, incrementando el riesgo de colapso estructural. Sin embargo, cuando los vientos superan los 20 km/h, las distancias mínimas reglamentarias suponen un riesgo potencial aún mayor: la generación de un segundo evento de fuego por contacto directo entre llama y tanques vecinos e incluso la explosión del o los tanques alcanzados por la llama. En regiones geográficas como la Patagonia Argentina, donde los vientos promedio superan los 45 km/h con ráfagas superiores a los 100 km/h, la llama se inclina desde la vertical con ángulos superiores a 70°. La probabilidad de extensión del fuego a múltiples tanques por contacto directo se reduce con distancias de separación superiores a un diámetro.

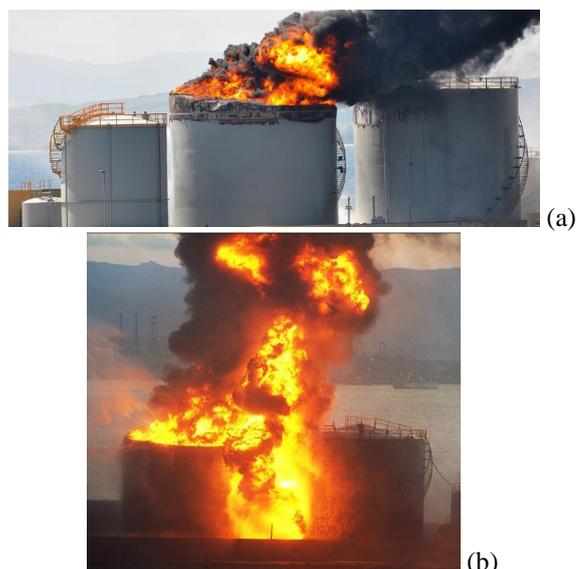


Figura 8: Ejemplos de localización de llama en tanques durante el incendio en Gibraltar, 31 de Mayo de 2011: (a) Llama a nivel del techo; (b) Llama a nivel de piso.

Amenazas debidas a explosiones

Una detonación es una reacción química de alta velocidad que produce una liberación repentina y localizada de energía que se disipa violentamente mediante ondas de choque. La intensidad de la explosión en el foco se expresa como una masa equivalente de trinitrotolueno (TNT). Cuando la onda de presiones llega a un punto de la estructura se genera una sobrepresión que crece casi instantáneamente hasta su pico (que es la presión reflejada), para luego decrecer a cero. La sobrepresión constituye la fase positiva de presiones y su duración (que es del orden de los 30 ms) permite calcular el impulso. El retardo en la llegada de la onda entre el punto más cercano al foco de la explosión y otros puntos más alejados se conoce como tiempo de arribo.

El Departamento de Defensa de los Estados Unidos produce gráficas que permiten encontrar características de presiones y tiempos sobre una superficie plana (United Facilities Criteria, 2008) en función de la intensidad y de la distancia al foco de la explosión. En una superficie curva como un tanque, los tiempos de arribo son diferentes de los que se esperan en una superficie plana.

La modelación de explosiones puede realizarse mediante ensayos experimentales sobre tanques en escala reducida, mediante modelación física (presión/volumen), o mediante modelos de reacción físico-químicos.

En primer lugar, consideremos los estudios físicos de explosiones y presiones generadas sobre tanques. El estudio más importante se realizó en la Universidad Valle del Loira en Francia (Duong et al. 2012), con ensayos sobre modelos en pequeña escala, con $H = 0.25\text{m}$. Las presiones causadas por la explosión se midieron sobre modelos “rígidos” de PVC, mientras que modos de falla se apreciaron sobre modelos de acero “flexibles”. Esta es la evidencia empírica más importante que existe en la actualidad y es crucial para calibrar modelos computacionales.

Un segundo conjunto de ensayos se llevó a cabo en la Universidad de Carolina del Norte en Charlotte, Estados

Unidos (Weggel y Whelan, 2013), nuevamente sobre tanque rígido y tanque flexible con $H = 1\text{m}$ (ver Figura 9). El estudio fue realizado en coordinación con investigadores de IDIT, a fin de comparar resultados experimentales y computacionales.



(a)



(b)

Figura 9: Tanques metálicos en escala reducida sometidos a explosión, ensayos en la Universidad de Carolina del Norte en Charlotte. (a) Tanque rígido para medición de presiones; (b) Tanque metálico de pared delgada para visualización de modos de pandeo. Fotografías de L. A. Godoy, gentileza de D. Weggel.

En segundo lugar, se han realizado estudios de modelación computacional. El primer nivel de estudio consistió en simular la explosión como un proceso físico, en el que se estudia una esfera que contiene aire (como un gas ideal) inicialmente a presión y temperaturas elevadas. A continuación, se liberó el proceso para generar una onda de choque en tres dimensiones. Las curvas de presión sobre una superficie plana se validaron con respecto a la información de United Facilities Criteria (2008) y también contra los resultados de Weggel y Whelan (2013), lográndose un buen acuerdo en ambos casos.

En tercer lugar, se avanza en la modelación de una explosión como un proceso físico-químico. Para ello, se desarrollan códigos fluido-dinámicos que incorporan la química del proceso, para tratar detonaciones, en el cual el frente de reacción es una onda de choque. La implementación en el contexto de tanques y tuberías es incipiente, encontrándose en etapa de validación con respecto a ensayos sobre explosiones en el interior de tanques.

RESPUESTA ESTRUCTURAL DE TANQUES

Sobre la base de la acción que llega a la estructura (sea térmica en el caso de fuego, de presiones pseudo-estáticas en casos de viento, o presiones dinámicas en casos de explosiones), en esta investigación se modela la respuesta estructural de manera secuencial. El significado de secuencial es que no se acopla en un mismo análisis la acción con la respuesta estructural, sino que se llevan a cabo dos estudios por separado, el primero partiendo de la fuente determina presiones o temperaturas sobre la estructura, mientras que el segundo toma esas presiones/temperaturas para determinar la respuesta estructural. Esta segunda etapa se hace mediante recursos de la Mecánica Computacional, empleando modelos no-lineales de elementos finitos de la cáscara.

La caracterización del estado crítico se logra mediante Análisis de Bifurcación Lineal (LBA), por medio de la solución de un problema de autovalores y autovectores que representan las cargas críticas y las formas de modo respectivamente. La representación del comportamiento poscrítico se logra realizando Análisis No Lineal Geométrico con Imperfecciones (GNIA) que permite exhibir trayectorias poscríticas inestables con una carga máxima que depende de la amplitud de la imperfección geométrica.

En esta línea de trabajo se han desarrollado aproximaciones a cargas de inestabilidad de cascaras mediante metodologías de penalización que permiten obtener límites inferiores de cargas de pandeo (Godoy et al. 2015). Finalmente se han iniciado búsquedas de soluciones analíticas (Eisenberger y Godoy, 2019) orientadas a evaluar curvas de fragilidad (Gehl et al. 2014).

La revisión de la literatura referida a respuesta estructural de tanques se puede consultar en los trabajos de Zingoni (2015) y Godoy (2016) y no se repiten aquí. Esta revisión se concentra en los aportes del grupo de trabajo de IDIT. Las recomendaciones de esta parte del proyecto están vinculadas a las nuevas normativas europeas (Rotter y Schmidt, 2008) que se actualizaran en un futuro próximo.

Respuesta de tanques frente a viento

Los estudios de inestabilidad del equilibrio de tanques metálicos de almacenamiento de petróleo bajo cargas de viento han mostrado que el pandeo se produce en la forma de una bifurcación bajo pequeños desplazamientos en el estado crítico, presentando estados poscríticos inestables con grandes desplazamientos y sensibilidad a la presencia de imperfecciones geométricas. Los estudios realizados concluyen que la inestabilidad se produce principalmente por efectos estáticos con un comportamiento elástico del material y que la plasticidad se presenta en estados poscríticos avanzados.

En tanques dispuestos en una segunda línea de una batería se observaron reducciones en las cargas críticas obtenidas por LBA y también en las cargas máximas obtenidas por GNIA respecto a los tanques aislados, para las configuraciones estudiadas (Burgos et al., 2014). Las mayores reducciones se obtuvieron para tanques alineados con la dirección del viento y separados un diámetro entre sí, del orden del 30%, con valores menos significativos

para otras disposiciones, del orden del 5%. Para mayores separaciones, 1.5 y 1.8 veces el diámetro de ambos tanques, las reducciones son del orden del 20% acercándose a los valores obtenidos para tanques dispuestos en la periferia de la batería. Estas conclusiones corresponden a tanques con techo cónico y se podría extender a domo esférico, pero se pueden esperar resultados diferentes si el tanque obstáculo tiene un techo plano o su altura varía respecto al tanque que apantalla. Es decir que existe una influencia en los resultados relacionada a la forma del tanque, distancia y posición respecto a la dirección del viento del tanque obstáculo.

Un tanque metálico horizontal para almacenamiento de fluidos con evidencia de daño fue analizado en Burgos et al. (2018). Estos tanques son de dimensiones más reducidas que los de eje vertical, con relaciones radio-espesor entre 150 y 500 y menor esbeltez que los tanques verticales. El tanque estudiado presenta un cuerpo cilíndrico horizontal con extremos cónicos y con tres puntos de apoyo materializado mediante cunas metálicas. Para presión externa uniforme representando vacío, la menor carga crítica desarrolla desplazamientos en los extremos cónicos mientras que el pandeo en el cilindro aparece para cargas mayores. Sin embargo, por la presencia de imperfecciones, el análisis GNIA pone en evidencia daño en el cilindro con reducciones de carga del orden del 25% con respecto a la geometría perfecta.

Al analizar un nivel de fluido fijo y presión de vacío creciente, el pandeo se produce a menores cargas, por ejemplo, para una relación de altura de fluido respecto al diámetro del tanque (h/D) de valor 0.42 las cargas máximas son del orden de la mitad del valor hallado para vacío. Es decir que, si bien en los tanques verticales el fluido tiene un efecto estabilizante, para tanque horizontal el efecto es inverso porque el fluido genera una deformada inicial que produce una mayor caída de la carga máxima resistida al aumentar la presión de vacío en el tanque. Este comportamiento está asociado a las tensiones de compresión que se producen en la parte superior del cilindro.

La simulación del proceso de extracción de fluido, en el que a continuación de eliminar totalmente el fluido continúa actuando una presión uniforme de vacío, genera las mayores reducciones de la capacidad de carga y deformadas del tipo de las evidencias de daño en el cilindro con desplazamientos hacia abajo de los extremos del cilindro.

En el análisis de estabilidad de tanques con techo cónico o techo flotante se suelen realizar simplificaciones en la modelación del techo a los efectos de reducir el trabajo computacional, omitiendo algunos detalles de los techos, pero conservando las características de la respuesta estructural frente a diferentes acciones como viento, vacío o fuego. Para techos cónicos generalmente se considera un techo "equivalente" que es auto-soportado pero con un espesor mayor al que tiene en la realidad, sin incluir la compleja estructura que suelen tener formada por anillos y vigas que se sostienen en columnas. Otra simplificación frecuente se hace cuando el tanque está abierto en la parte superior y tiene un anillo rigidizador, que se sustituye en el análisis por una condición de borde que restringe los desplazamientos radiales. En Burgos et al. (2015) se

analizaron condiciones de equivalencia comparando las rigideces de la configuración original y la sustituta, con el fin de identificar las características de la simplificación que se asume. Para techo fijo se encontró que un espesor de techo de 2.25 veces el espesor de la parte superior del cilindro permite igualar los momentos de inercia del techo con estructura rigidizadora y con espesor equivalente. La influencia sobre las cargas críticas no es igual para todos los tipos de carga analizados. Para carga térmica los resultados simplificados son un 7% menores que los exactos mientras que para viento o presión uniforme varían en un 12% y 14% respectivamente, con valores también inferiores. Las formas de modos reproducen las correspondientes a la solución exacta. En el tanque abierto para cargas térmicas se recomienda considerar en el borde superior una sección de inercia equivalente al rigidizador, mientras que para presión uniforme o viento es posible usar como simplificación una restricción de desplazamiento en el plano horizontal superior resultando cargas críticas con valores 2.5 % o 3.1% menores respectivamente. El espesor equivalente es de 4.75 veces el espesor superior del cilindro, obteniéndose iguales valores para carga térmica y 2.7% o 3.5 % menores para viento o presión uniforme, respectivamente.

Las cargas de viento actuando sobre los tanques de almacenamiento son variables tanto circunferencialmente como en altura. En Burgos et al. (2018a) se estudió el efecto de usar diferentes modelos de distribución de presiones en altura sobre las cargas de pandeo de tanques. Se estudió la respuesta estructural planteando: viento uniforme en altura, con variación lineal o cuadrática por tramos aproximando aquella estipulada en los reglamentos de Australia y Nueva Zelanda y de Argentina, en comparación con variaciones provenientes de ensayos en túnel de viento (Burgos et al., 2014). Todas las variaciones propuestas mostraron resultados conservadores frente a las cargas experimentales y si bien una variación uniforme en altura resulta fácil de incorporar en un modelo numérico, se obtienen cargas de pandeo 17 % inferiores a las correspondientes a lo medido en ensayos. La variación propuesta en ambos reglamentos es una de las menos conservadoras de las evaluadas en este estudio y para esta relación de esbeltez del tanque (0.52) resulta la más indicada para el diseñador en su práctica profesional.

Las normas que permiten diseñar los tanques de almacenamiento se concentran en su comportamiento finalizada la construcción, pero se han registrado colapsos durante la etapa constructiva para velocidades de viento del orden de un tercio de las velocidades de diseño. En Jaca et al. (2010, 2014) y Hernández et al. (2017) se estudió la estabilidad de tanques en construcción no anclados y con condiciones de apoyo muy debilitadas frente a la de servicio mediante un análisis secuencial realizando en una primera etapa un análisis fluido-dinámico, con medición de presiones sobre modelos de tanques en túnel de viento, y en una segunda etapa la evaluación numérica de pandeo con las cargas de viento evaluadas experimentalmente. Se consideraron dos casos de estudio con relaciones de esbeltez altura-diámetro de 0.24 y 0.61 en el momento del colapso. En los ensayos se midieron presiones exteriores, interiores y en el fondo del tanque logrando identificar la formación de un vórtice en el interior del tanque que no es

correctamente evaluado en los reglamentos. Sin embargo, la acción de dicho vórtice no logra explicar por sí solo el colapso a velocidades como las registradas en el momento de la falla (entre 55 y 65km/h). Es necesario también incluir en la modelación la posibilidad de levantamiento del fondo del tanque como elemento importante para poder explicar el mecanismo de falla. Esta característica está presente durante el proceso constructivo ya que es una práctica usual que los tanques sean anclados solamente por requerimientos de estabilidad frente a carga de viento con una condición de tanque con fluido interior para la etapa de operación. Estos episodios de falla durante el proceso constructivo no son contemplados en las normativas y no se tienen en cuenta en el diseño de la estructura. Sin embargo, el colapso genera demoras en la ejecución y mayores costos. La presencia de anclajes podría limitar este comportamiento ya que, si el levantamiento del apoyo no fuera posible, la inestabilidad del equilibrio se produciría para cargas que se relacionan con velocidades de viento mayores, que no son tan frecuentes como los que se presentaron en estos casos considerados.

Considerando como amenaza el viento, en Muñoz et al. (2018) se evaluó la vulnerabilidad de tanques de almacenamiento con techo cónico mediante la obtención de curvas de fragilidad que permiten analizar niveles de riesgo evaluando la probabilidad de alcanzar un determinado nivel de daño en función de la velocidad del viento.

Respuesta de tanques frente a fuego

El análisis de la respuesta estructural de los tanques en situación de incendio es secuencial en todos los casos estudiados, es decir con las distribuciones de temperatura obtenidas por transferencia de calor entre tanques se realizaron análisis de inestabilidad del equilibrio para llama vertical o inclinada por el viento.

Los efectos en la respuesta estructural de las simplificaciones de la parte superior de los tanques también se analizaron considerando cargas térmicas (Burgos et al, 2015). En el tanque abierto para cargas térmicas se recomienda considerar en el borde superior una sección de inercia equivalente al rigidizador, resultando un espesor de 4.75 veces el espesor del cilindro en la parte superior. En este caso sustituir la viga de borde por una condición de restricción de desplazamiento en el plano lleva a malos resultados de cargas críticas y deformadas asociadas no compatibles. Para simplificar la estructura soporte en un techo cónico equivalente, para cargas térmicas se obtienen respuestas similares para espesores reducidos de techo autoportante, siendo suficiente que sean semejantes la inercia global del techo rigidizado y del autoportante.

La metodología usualmente usada para evaluar la inestabilidad del equilibrio de tanques con cargas de viento, combinando un análisis de bifurcación lineal (LBA) y análisis no lineal geométrico con imperfecciones (GNIA) implementado por métodos de longitud de arco como el método de Riks, permite detectar las primeras inestabilidades en sectores localizados, pero no permite hacer un análisis detallado de la respuesta estructural en el estado poscrítico avanzado. Investigando la inestabilidad de tanques bajo efectos térmicos, Calabró et al. (2014) usaron análisis no lineal geométrico para detectar el primer estado

crítico, pero encontraron que la trayectoria se bloqueaba sin lograr avanzar a estados con niveles superiores de temperatura. Este problema se encontró también en análisis con imperfecciones. Al parecer, esta dificultad está en el algoritmo y no en el fenómeno físico. En Jaca et al. (2018) se implementó una metodología numérica que utiliza un amortiguamiento artificial (ADM) que permite avanzar más allá de las primeras inestabilidades localizadas comparándola con GNIA. Se simuló el comportamiento de dos tanques metálicos con techo cónico donde uno de ellos está en situación de incendio, con llama vertical o inclinada por viento, sin presencia de fluido interior. Ambos métodos (GNIA y ADM) dan resultados coincidentes en el cálculo de la trayectoria fundamental y también predicen adecuadamente la temperatura correspondiente al estado crítico asociado a las primeras inestabilidades que aparecen en la estructura. La metodología ADM permite superar inestabilidades localizadas estabilizando la respuesta y detectar situaciones similares para temperaturas crecientes hasta que las temperaturas llegan a los valores del estado estacionario térmico. Las deformadas obtenidas en el estado crítico corresponden a una leve inestabilidad cerca del apoyo y se extiende hacia la parte superior al avanzar la trayectoria poscrítica extendiendo este patrón de deformada a casi la totalidad de la cáscara cilíndrica.

Otros trabajos basados en LBA estuvieron orientados a analizar la influencia del nivel de fluido contenido y del viento actuando simultáneamente con el fuego, explorando las situaciones más desfavorables y los modos de falla asociados (Jaca et al. 2016) o la incidencia de anillos rigidizadores a distintas alturas de un tanque abierto (Calabró et al., 2016). En este último trabajo también se consideró la respuesta de un tanque con techo cónico ante la posibilidad de que, por las elevadas temperaturas, se genere una presión interna tan elevada que el techo se desprende del cuerpo del tanque y la envolvente cilíndrica quede sin techo expuesta a la llama incidente. La situación más comprometida para la envolvente cilíndrica del tanque corresponde a fuego actuando sobre el tanque sin fluido y llama vertical desde la base del tanque en ausencia de viento, con deformaciones desarrolladas en toda la altura del cilindro en la zona que enfrenta la llama. La presencia de fluido es estabilizante en todos los casos estudiados, ya que las temperaturas críticas son mayores a las correspondientes a tanque vacío y además los daños se concentran en la parte superior del tanque o en el techo. Los análisis de pandeo para el tanque abierto con anillos rigidizadores mostraron poca sensibilidad al cambio de posición del rigidizador, tanto en temperatura crítica como modo de deformación asociado con deformaciones localizadas en la parte inferior del tanque. Si los tanques con techo cuentan con un anillo rigidizador en la unión entre cilindro y cono, hay un cambio significativo en el modo de deformación, ya que los lóbulos de deformación se localizan en la parte inferior, disminuyendo la temperatura crítica en un 10%. Esto puede deberse a que la incorporación del anillo en la parte superior, genera un aumento de la rigidez en esta zona favoreciendo la localización de la deformación en la parte inferior. El análisis del tanque con el techo desprendido, muestra un aumento importante de la temperatura crítica con localización del modo de deformación en la parte inferior

del tanque. Otro aspecto estudiando es la incidencia de las escaleras perimetrales helicoidales de acceso a la parte superior, para evaluar el efecto rigidizador que generan (Calabró et al., 2018). Se encontró que las escaleras aportan una rigidización en el caso que la zona de incidencia del fuego sea en el sector de desarrollo de la escalera modificándose la forma de modo asociada.

Respuesta de tanques frente a explosiones

En este proyecto se llevaron a cabo estudios de la inestabilidad elástica y elasto/plástica de tanques frente a cargas debidas a explosiones, mediante procedimientos semi-analíticos (Ameijeiras y Godoy, 2016) o de la mecánica computacional.

Bajo presiones dinámicas de amplitud creciente, puede ocurrir inestabilidad en el modo inicial de deformación, en cuyo caso puede producirse plasticidad antes de que cese la acción de la presión impulsiva (Ameijeiras y Godoy 2013, Ameijeiras et al. 2014); o bien en un modo diferente (ortogonal) a la deformación original, lo que se conoce como cuasi-bifurcación, según el cual cuando la velocidad del movimiento se anula el sistema pasa por un estado casi-estático, de manera que si coincide con las condiciones de un estado crítico estático inestable, el sistema experimenta una falla por inestabilidad como en el caso estático (Ameijeiras y Godoy 2018, 2019). Ambos modos son objeto de estudio en la actualidad en el equipo de trabajo.

AMENAZA DE CONTAMINACIÓN POR DERRAMES Y SU EFECTO EN SUELOS

Tanto el suelo como el agua subterránea resultan afectados por los accidentes y daños que sufren las estructuras de almacenamiento y transporte de combustibles líquidos. Este fenómeno tiene múltiples consecuencias para el medio físico, entre las que se destacan alteraciones en sus propiedades físicas y químicas y la modificación de las propiedades mecánicas. De esta manera, constituye una amenaza para la calidad del suelo y agua subterránea que, dependiendo de la vulnerabilidad en un determinado emplazamiento, determina el riesgo asociado.

En el proyecto se abordan los siguientes aspectos asociados a la amenaza de los derrames para el medio físico: a) Estrategias para la contención de posibles derrames, b) Alteración de las propiedades mecánicas del suelo debido a la interacción con los contaminantes, c) Influencia de este cambio en las propiedades mecánicas sobre el comportamiento de cimentaciones o estructuras enterradas y d) Evaluación de mecanismos de transporte del contaminante derramado, la vulnerabilidad de los acuíferos y posibles estrategias de remediación.

Estudio de materiales para disminuir la vulnerabilidad de suelos y agua subterránea frente a derrames

Cuando ocurre un derrame inmediatamente se generan riesgos para el ambiente y la salud del ser humano. Conocidas las amenazas, una manera de controlar o disminuir el riesgo es actuar sobre la vulnerabilidad del medio físico. Una alternativa es interponer barreras que permitan contener los derrames y el transporte de contaminantes (Glatstein et al. 2017). Existen diferentes

configuraciones para estas barreras. Las distintas consideraciones contemplan desde la posibilidad de una única capa de suelo del lugar compactado, mezclas de suelo del lugar mejoradas por adición de arcillas u otro tipo de material granular, o bien sistemas de barreras compuestas que incluyen tanto capas de suelo compactado como capas de suelo en combinación con una o más capas de materiales geosintéticos. El propósito de combinar capas diferentes de estos materiales es aprovechar las diferentes ventajas de cada uno respecto a las propiedades mecánicas, hidráulicas y de durabilidad (Giroud y Bonaparte 1989).

Se realizaron estudios a nivel de ciencia de materiales con el objeto de determinar formas de optimizar las barreras de contención que se construyen, con materiales locales, debajo de los tanques de almacenamiento.

Para ello se cuantifica experimentalmente la influencia de incorporar escorias siderúrgicas y bentonita para mejorar las propiedades del suelo y optimizar así los mecanismos de retención y contención de hidrocarburos. Los ensayos realizados se orientan a determinar la influencia del contenido de bentonita y escoria en la conductividad hidráulica y propiedades mecánicas de los limos compactados con los que se construyen las barreras (Juárez et al. 2018, Mozejko y Francisca 2018).

El diseño de barreras de contención de derrames requieren por un lado un correcto desempeño hidráulico de las mismas el cuál se garantiza alcanzando una conductividad hidráulica lo suficientemente baja de manera que la infiltración del contaminante al subsuelo lleve un tiempo muy elevado; por otro lado se requieren niveles de resistencia al corte y rigidez adecuada para resistir las distintas cargas a las que se verá sometida la misma durante su vida útil, incluyendo tránsito peatonal, tránsito de maquinarias y equipos, y disposición en taludes o terraplenes como barreras laterales. El correcto desempeño hidráulico a su vez se encuentra ampliamente condicionado por la interacción entre el fluido contaminante y las partículas del suelo (Montoro y Francisca 2010).

Se avanzó con el estudio de las propiedades mecánicas de barreras de suelos locales con diferentes porcentajes de adición de bentonita. Se estudiaron mezclas de suelos locales compactados con adición de 5% y 10% de bentonita. Estos porcentajes de adición fueron adoptados en consonancia con los recomendados para lograr conductividades hidráulicas inferiores a 1×10^{-9} m/s (Nieva y Francisca 2007). Sobre las mezclas se realizaron ensayos de compresión confinada en condiciones de humedad de compactación y condiciones saturadas, ensayos triaxiales consolidados no drenados y ensayos de corte directo consolidado - drenado.

Entre los principales resultados encontrados, Juárez et al. (2018) reportan una disminución en el ángulo de fricción interna determinado en tensiones efectivas con el aumento en el porcentaje de adición de bentonita determinado mediante ensayos triaxiales; sin embargo, la tendencia encontrada a partir de resultados de ensayos de corte directo no fue tan clara debido a una importante dispersión en los resultados obtenidos. Los autores reportan tendencias a comportamiento contractivo de las mezclas para presiones de confinamiento inferiores a 120 kPa y comportamiento dilatativo para presiones superiores. En compresión confinada las mezclas mostraron un aumento en la rigidez

con el incremento de adición de bentonita al ser ensayadas a humedad de compactación. La tendencia opuesta se evidenció al ser ensayadas en estado de inundación. Este comportamiento se justifica en el incremento de la succión de la muestra con el aumento del porcentaje de bentonita, según se pudo determinar mediante la técnica del papel de filtro.

Para minimizar la vulnerabilidad del medio físico y el riesgo de ingresos de contaminantes al subsuelo, Juárez et al. (2018) recomienda realizar la dosificación de mezclas de suelo local – bentonita, procurando el contenido más bajo posible que permita lograr los niveles adecuados de conductividad hidráulica, pero afectando lo menos posible a la degradación de las propiedades resistentes y de deformabilidad de la barrera.

Los trabajos de investigación están continuando con el estudio de las propiedades resistentes de interfaces entre suelos locales compactados con diferentes porcentajes de bentonita y geomembranas de polietileno de alta densidad utilizadas para la construcción de barreras compuestas.

Las principales mejoras obtenidas en el comportamiento de los suelos con escorias con los que se construyen las barreras fueron atribuidas por Mozejko y Francisca (2018) a reacciones de tipo puzolánicas. En este momento se busca lograr avances en relación a la compatibilidad química entre las barreras y los contaminantes.

Por otro lado, se avanzó con el estudio de interacción fluido contaminante - partículas de suelos locales y arcillas utilizadas en barreras. En este aspecto en particular se analizó la sensibilidad eléctrica de suelos locales y arcillas utilizadas para la construcción de barreras de contención mediante la evaluación del cambio en la magnitud del límite líquido de los materiales cuando se los determina utilizando agua destilada, salmuera y un hidrocarburo siguiendo la metodología propuesta por Jang y Santamarina (2016). Esta metodología permite clasificar a los suelos en función de la importancia del cambio de sus propiedades cuando son puestos en contacto con líquidos contaminantes de diferente naturaleza, entre ellos el petróleo y sus derivados. De acuerdo a los resultados obtenidos (Montoro y Francisca, 2017) se encuentra que los limos, zeolitas y bentonitas utilizadas en el medio local para la construcción de barreras son materiales de baja, media y alta sensibilidad eléctrica.

Por otro lado, se evaluó la magnitud de la interacción contaminante – partícula mediante la evaluación del cambio de las propiedades reológicas de dispersiones de partículas. Para ello se realizaron ensayos en dispersiones de partículas de bentonita con distintas proporciones volumétricas de partículas/fluidos en soluciones con diferentes concentraciones iónicas y con distintas especies de iones y ensayos de dispersiones de partículas de bentonita, zeolitas o limos en agua destilada, aceites de parafina de diferente viscosidad y kerosene.

La interacción entre contaminantes y partículas se explica de manera tradicional en función de los cambios esperados en el espesor de la doble capa difusa alrededor de las partículas de los distintos suelos (Spagnoli et al. 2017). En la medida que la superficie específica de las partículas es mayor, la magnitud de la consecuencia en el comportamiento reológico del material con el cambio en el

espesor de las dobles capas difusas es mayor. Cuando estos cambios se deben a cambios en concentraciones o valencias en soluciones iónicas se pueden cuantificar a través de la magnitud del efecto electro-viscoso primaria. Este efecto marca o resalta la diferencia en el comportamiento real de las partículas con el esperable en dispersiones de partículas inertes sin interacción alguna con el fluido en el que están suspendidas. Existen diferentes formulaciones para evaluar la magnitud de este efecto (Hiemenz y Rajagopalan 1997, Rubio-Hernández et al. 2004). Montoro y Francisca (2019) propusieron una forma nueva y simple a partir de la incorporación de modificaciones en la ecuación tradicional de Dougherty-Krieger (Krieger 1972) para evaluar la magnitud de este fenómeno. Se determinó la disminución de la magnitud del efecto electro-viscoso primario en la medida que aumenta la concentración iónica. Para bajas concentraciones prácticamente no hay diferencias para distintos tipos de iones en el efecto electro-viscoso primaria, pero las diferencias entre tipo de iones se hacen evidentes para altas concentraciones iónicas.

Para el caso particular de dispersiones de partículas de diferentes tipos de suelos finos en fluidos orgánicos y agua, se propuso una forma novedosa para identificar el impacto de la interacción entre los contaminantes y las partículas, definiendo un contenido volumétrico límite de partículas en la dispersión para el cual la resistencia al corte de las mismas es de 1 Pa. El análisis de las relaciones entre la conductividad hidráulica, el contenido volumétrico límite y los límites líquidos permite identificar situaciones de interacción y de no interacción entre los contaminantes y las partículas, con el consecuente cambio en las propiedades mecánicas e hidráulicas asociadas en estos materiales (Francisca y Montoro 2019).

Alteración de las propiedades mecánicas por efecto de la contaminación

En primer lugar, fue necesario cuantificar el efecto o cambio en las propiedades mecánicas de los suelos afectados por derrames de fluidos combustibles. Para ello se realizaron ensayos experimentales para determinar la influencia de saturación de los suelos loésicos pampeanos con hidrocarburos, simulando un derrame o vertido ocasionado por daños en tanques de almacenamiento.

A partir de estos resultados se verificó que la magnitud del colapso en la estructura del suelo y posible afectación a las fundaciones de construcciones civiles e instalaciones de conducción está controlada por el tipo de suelo (como presencia de cementantes naturales, relación de vacíos) y la presencia del hidrocarburo (Francisca et al., 2015).

Se calibraron modelos constitutivos ampliamente utilizados en la ingeniería geotécnica, con el objeto de comprender los mecanismos que gobiernan el comportamiento mecánico de los suelos contaminados (Giomi y Francisca 2018). Esta temática se está desarrollando en la actualidad, a fin de incorporar en el futuro mecanismos acoplados de flujo de calor producto de explosiones o incendios. Para llevar adelante estas investigaciones se están desarrollando modelos numéricos utilizando un programa computacional multifísica (COMSOL Multiphysics 2019).

CONCLUSIONES

El estudio considerado en este artículo es el mayor esfuerzo interdisciplinario de investigación a nivel internacional sobre infraestructura y medio físico en el área de producción y explotación de petróleo y sus derivados.

Las principales conclusiones de este estudio pueden sintetizarse en tres aspectos, que se espera que guíen investigaciones hacia el futuro.

En primer lugar, los esfuerzos de investigación, tanto por parte del grupo de autores de este artículo como de otros investigadores a nivel internacional, se llevan a cabo con fondos de investigación de organismos de apoyo a la ciencia, y separados de quienes son propietarios, responsables u operadores de una planta relacionada a la industria del petróleo. Esta situación está asociada a la responsabilidad económica que tienen las petroleras en casos de contaminación causada por derrames de productos combustibles al ambiente y medio físico. De manera que saltos cualitativos en nuestro nivel de conocimiento son esperables solo en la medida en que los resultados de investigaciones de accidentes sean dados a conocer públicamente, pero al presente esto solamente ocurre en unos pocos países, notablemente en el Reino Unido.

En segundo lugar, se dispone al presente de herramientas suficientes para evaluar la seguridad de tanques individuales sometidos a acciones naturales o causadas por accidentes; este artículo muestra los esfuerzos llevados a cabo para evaluar la respuesta estructural, daño y eventual colapso de infraestructura, focalizándose aquí en tanques de almacenamiento de combustible. Los trabajos incipientes en infraestructura de transporte de petróleo o gas (Giudicci et al. 2017) se completarán mediante estudios detallados de respuesta estructural frente a las acciones de interés en este proyecto. Sin embargo, se carece de estudios que permitan evaluar la vulnerabilidad de infraestructura petrolera, con la única excepción de amenazas sísmicas llevadas a cabo en Estados Unidos por FEMA.

En tercer lugar, la protección del medio físico, tanto de suelos como de aguas subterráneas, frente a inevitables derrames de fluidos contaminantes, parece depender de la efectividad de barreras que se construyan con el fin de contener derrames y transporte de contaminantes. A su vez, estas barreras pueden modificar propiedades físicas e hidráulicas del suelo, de manera que su estudio se encuentra en la confluencia de diversas áreas de la física cuya evaluación requiere tanto de estudios experimentales como de simulación computacional. Este es un campo al que se abocará el proyecto en los próximos años.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto surgió en respuesta a una iniciativa de CONICET para que sus institutos coordinen actividades a través de proyectos integradores. Los autores agradecen a CONICET por el otorgamiento del subsidio a la Unidad Ejecutora IDIT. Además de los autores, en este proyecto trabajaron los investigadores D. Barulich, M. Carro-Pérez, M. Ceballos, C. F. Estrada, F. G. Flores, G. Gerbaudo, A. Giudicci, A. Glatstein, F. Gutierrez-Marcantoni, G. Krause, F. Pinto, J. P. Saldia, J. Stuardi; los doctorandos/becarios G. Bogado, C. Burgos, D. Calabró, M. Grioni, A. Trono;

ayudantes de investigación A. Muñoz, F. Hernández. Como colaboradores internacionales intervinieron M. Eisenberger, D. Pantousa, D. Weggel, M. Whelan, y L. E. Suárez.

REFERENCIAS

1. Ameijeiras M. P., Godoy L. A., Respuesta no lineal de tanques de almacenamiento de petróleo frente a cargas debidas a explosiones, *Mecánica Computacional* 32, 3323-3340, 2013.
2. Ameijeiras M. P., Godoy L. A., Simplified analytical approach to evaluate the nonlinear dynamics of elastic cylindrical shells under lateral blast loads, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13(5), 1281-1298, 2016.
3. Ameijeiras M. P., Godoy L. A., On quasi-bifurcation of simple shell-like systems under impulsive loads, *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil* 18, 2018.
4. Ameijeiras M. P., Godoy L. A., Quasi-bifurcation and imperfection-sensitivity of cylindrical shells under pressures due to an explosion, *Int. J. of Advanced Structural Engineering*, en revision 2019.
5. Ameijeiras M. P., Godoy L. A., Weggel D., Whelan M. J., Incidencia del tiempo de arribo de onda en la respuesta de tanques sometidos a explosiones externas, *Mecánica Computacional* 33, 931-942, 2014.
6. Atkinson G., Blast damage to storage tanks and steel-clad buildings, *Process Safety and Environmental Protection* 89: 382-390, 2011.
7. Batista-Abreu J.C., Godoy L.A., Investigación de causas de explosiones en una planta de almacenamiento de combustible en Puerto Rico, *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 11(2), 109-122, 2011.
8. Buncefield Major Incident Investigation Board, The Buncefield Incident, 11 December 2005, Final report, The Office of Public Sector Information, Richmond, Surrey, United Kingdom, 2008.
9. Burgos C. A., Jaca R. C., Lassig J. L., Godoy L. A., Wind buckling of tanks with conical roof considering shielding by another tank, *Thin-Walled Structures* 84: 226-240, 2014.
10. Burgos C. A., Batista-Abreu J. C., Calabró H. D., Jaca R. C., Godoy L. A., Buckling estimates for oil storage tanks: Effect of simplified modeling of the roof and wind girder, *Thin-Walled Structures* 91: 29-37, 2015.
11. Burgos C. A., Jaca R. C., Godoy L. A., Post-buckling behavior of fluid-storage steel horizontal tanks, *Int. J. of Pressure Vessels and Piping* 162: 46-56, 2018.
12. Burgos C., Jaca R., Godoy L., Modelación de viento en altura para tanques de almacenamiento de petróleo, *XXXVIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, Lima, 2018a.
13. Calabró H.D., Godoy L. A., Jaca R.C., Inestabilidad de tanques de almacenamiento de petróleo con techo cónico debido a fuego, *Rev. Sudamericana de Ingeniería Estructural* 11(1): 7-28, 2014.
14. Calabró H.D., Godoy L. A., Jaca R.C., Comportamiento de tanques de almacenamiento con techo flotante frente a acciones térmicas, *Mecánica Computacional*, 34, 517-528, 2016.

15. Calabró H.D., Godoy L. A., Jaca R.C., Efecto de escaleras perimetrales en tanques de almacenamiento de hidrocarburo frente a acciones térmicas, *Mecánica Computacional*, 36, pp. 327, 2018.
16. Chang J. I., Lin Ch-C. A study of storage tank accidents. *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, 51-59, 2006.
17. COMSOL, *COMSOL Multiphysics v. 5.4*, COMSOL Inc, Burlington, MA, USA, 2019.
18. Duong D. H., Hanus J. L., Bouazaoui L., Penetier O., Moriceau J., Prod'homme G., Reimeringer M., Response of a tank under blast loading – Part I: Experimental characterization, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 16(9), 1023-1041, 2012.
19. Eisenberger M., Godoy L.A., New analytical solutions for vibrations of shallow shells, *XII Int. Symposium on Vibrations of Continuous Systems*, Corvara in Badia, Italia, 2019.
20. Espinosa S. N., Jaca R. C., Godoy L.A., Thermal and structural analysis of a fuel storage tank under an adjacent pool fire, *Fire Research* 2(1), 31-36, 2017.
21. Falcinelli O., Elaskar S., Godoy L. A., Tamagno J., Efecto de viento sobre tanques y silos mediante CFD, *Mecánica Computacional* 21: 256-273, 2002.
22. Falcinelli O. A., Elaskar S. A., Godoy L. A., Influence of topography on wind pressures in tanks using CFD, *Latin American Applied Research* 41, 379-388, 2011.
23. Francisca, F.M., Montoro, M.A., Redolfi, E.R., Pesca Pinto, G., Capdevila, L.A., Behavior of collapsible loess saturated with NAPL in confined compression tests. Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires, 2015.
24. Francisca, F.M. y Montoro, M.A. (2019). Rheology of concentrated particles dispersions in non-polar organic liquids. *Environmental Geotechnics* (En revision)
25. Gehl P., Desramaut N., Reveillere A., Modaressi H. Fragility Functions of Gas and Oil Networks, Chapter 7 in: *SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk*, K. Pitilakis, H. Crowley, A. M. Kaynia (Editors), Springer, 187-220, 2014.
26. Giomi, I. y Francisca, F.M., Simulación numérica del comportamiento tenso deformacional de suelos loésicos contaminadas con hidrocarburos Memorias del XXIV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Salta, 2018.
27. Giroud, J.P., Bonaparte R. Leakage through liners constructed with geomembranes – Part II. *Composite Liners, Geotextiles and Geomembranes*, 8: 71-111, 1989.
28. Glatstein, D.A., Montoro, M.A., Carro-Pérez, M.E., Francisca, F.M., Hydraulic, Chemical and Biological Coupling on Heavy Metals Transport Through Landfill Liners. *The Journal of Solid Waste Technology and Management* 2017.
29. Giudici A., Stuardi J., Estrada C., Caracterización de gasoductos de la provincia de Córdoba, Argentina, *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil* 17: 116-127, 2017.
30. Godoy L. A., Performance of Storage Tanks in Oil Facilities Following Hurricanes Katrina and Rita, *ASCE Journal of the Performance of Constructed Facilities* 21(6), 441-449, 2007.
31. Godoy L. A., Buckling of oil storage steel tanks: Review of static buckling, *Thin-Walled Structures* 103(1), 1-21, 2016.
32. Godoy L. A., Jaca R. C., Sosa E. M., Flores F. G., A penalty approach to obtain lower bound buckling loads for imperfection-sensitive shells, *Thin-Walled Structures* 95, 183-195, 2015.
33. Grioni M., Elaskar S., Miraso A., Simulación de la acción del viento sobre un tanque de almacenamiento usando el código FLUENT. *Mecánica Computacional* 34, 2047-2062, 2016.
34. Grioni M., Elaskar S., Miraso A., Simulación del flujo transitorio 2D alrededor de un cilindro circular horizontal considerando el efecto suelo. *Mecánica Computacional* 35, 873-885, 2017.
35. Grioni M., Elaskar S. A., Mirasso A. E., Scale-adaptive simulation of flow around a circular cylinder near a plane boundary, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 11(6), 1477-1488, 2018.
36. Grioni M., Elaskar S. A., Mirasso A. E., A numerical study of the flow interference between two circular cylinders in tandem by scale-adaptive simulation model, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 13(1), 169-183, 2020.
37. Hargreaves D.M., Wright N.G., On the use of the k-ε model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 95(5), 355-369, 2007.
38. Hernández F. C., Jaca R. C., Natalini B., Godoy L. A., Inestabilidad de tanques de petróleo durante su construcción: Estudio de caso, *Mecánica Computacional* 35, 2205-2229, 2017.
39. Hernández F. C., Natalini, B., Jaca, R. C., Godoy, L. A., Cargas de viento en tanques de almacenamiento, *XXIV Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*, Buenos Aires, 2016.
40. Hiemenz, P. C., Rajagopalan, R., 1997. *Principles of Colloid and Surface Chemistry*, Third ed., CRC Taylor & Francis, Boca Raton.
41. Jaca R.C., Godoy L. A., Wind buckling of metal tanks during their construction, *Thin Walled Structures* 48, 453-459, 2010.
42. Jaca R. C., Cicerone E., Hernández F. C., Lassig J. L., Godoy L. A., Falla de tanques de acero durante su construcción, *Rev. Int. Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil* 14(1-2), 181-194, 2014.
43. Jaca R. C., Espinosa S. N., Godoy L. A., Comparación de metodologías para no linealidades geométricas en cáscaras bajo efectos térmicos, *Mecánica Computacional* 36, 235-244, 2018.
44. Jaca R. C., Calabró H. D., Espinosa S. N., Influencia del nivel de fluido y viento en la respuesta estructural de un tanque de petróleo en situación de incendio, *Mecánica Computacional*, 34: 163-180, 2016.
45. Jang, J. y Santamarina, J.C. Fines classification based on sensitivity to pore – fluid chemistry. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 142(4), 2016.
46. Juárez, M.A.; Montoro, M.A., Francisca, F.M. Comportamiento tenso - deformacional de mezclas de

- limo-bentonita compactadas. *Memorias del XXIV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Salta, 2018.
47. Krieger, I.M., Rheology of monodisperse lattices". *Advances in Colloid and Interface Science* 3(2):111-136, 1972.
 48. Liu Y., *Thermal buckling of metal oil tanks subject to an adjacent fire*. PhD thesis, The University of Edinburgh, Edinburgh, UK, 2011.
 49. MacDonald P.A., Kwok K.C., Holmes J.D., Wind Loads on circular storage bins, silos and tanks. *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 31, 165-188, 1988.
 50. Montoro, M.A., Francisca, F.M. Soil Permeability Controlled by Particle-Fluid Interaction. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(6):851-864. 2010.
 51. Montoro M.A., Francisca F.M. Discussion on "Fines Classification Base on Sensitivity to Pore - Fluid Chemistry" by J. Jang and J. C. Santamarina. *ASCE Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*. 2017.
 52. Montoro, M.A., Francisca, F.M. Effect of ion type and concentration on rheological properties of natural sodium bentonite dispersions at low shear rates. *Applied Clay Science*, en prensa. 2019.
 53. Mozejko, C.A., Francisca, F.M., Caracterización mecánica de los suelos loésicos de Córdoba estabilizados con escorias siderúrgicas". *Memorias del XXIV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Salta, 2018.
 54. Muñoz A., Jaca R. C., Godoy L. A., Vulnerabilidad de tanques metálicos con techo cónico para almacenamiento de petróleo debido a acción de viento, *Mecánica Computacional* 36: 33, 2018.
 55. Myers, P. E., *Aboveground Storage Tanks*, McGraw Hill, 1997.
 56. NASTRAN CFD Design. The MacNeal-Schwendler Corporation (MSC), Newport Beach, California, 2000.
 57. Nieva, P. M., Francisca F. M. On the permeability of compacted and stabilized loessical silts in relation to liner system regulations. *Int. Congress on Development, Environment and Natural Resources: Multi-level and Multi-scale Sustainability*, Cochabamba, Bolivia, 69 - 77, 2007.
 58. OpenFOAM, ESI Group, Paris, Francia, 2014.
 59. Rotter J. M., Schmidt H. (Eds.), *Buckling of Steel Shells: European Design Recommendations*, ECCS Technical Committee 8 on Structural Stability, Eurocode 3, Part 1-6, 2008.
 60. Rubio-Hernández, F. J., Carrique, F., Ruiz-Reina, E., The primary electroviscous effect in colloidal suspensions, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 107, 51-60. 2004.
 61. Soria-Castro L. M., Elaskar S. A., Godoy L. A., Modelado de la acción del viento sobre tanques en el interior de un dique de contención, *Mecánica Computacional* 32, 549-565, 2013.
 62. Soria-Castro L. M., Elaskar S. A., Godoy L. A., Presiones debidas a viento en tanques de petróleo alineados en tandem mediante CFD, *Mecánica Computacional*, 34: 775-794, 2016.
 63. Spagnoli G, Stanjek H, Sridharan A. Some observations considering undrained shear strength, liquidity index, and fluid/solid ratio of mono-mineralic clays with water-ethanol mixtures. *Canadian Geotechnical Journal* 55(7): 1048-1053, 2017.
 64. United Facilities Criteria, *Structures to resist the effects of accidental explosions*, UFC 3-340-02, United Facilities Criteria, US Department of Defense, 2008.
 65. Weggel D., Whelan M. J., *Rigid tank testing summary and procedures for estimating blast overpressure distribution on a cylindrical tank surface*, ISSERT Report, University of North Carolina at Charlotte, NC, USA, 2013.
 66. Zingoni A., Liquid containment shells of revolution: a review of recent studies on strength, stability and dynamics, *Thin-Walled Structures* 87, 102-114, 2015.