

Una reseña de (casi) 30 años de investigación sobre el comportamiento y falla de tanques de almacenamiento de petróleo

GODOY, Luis A.¹

¹a) Universidad Nacional de Córdoba. Profesor Emérito

¹b) Investigador Superior del CONICET

RESUMEN

En este trabajo intentamos recapitular brevemente la evolución de nuestros propios intereses sobre temáticas relacionadas con la estabilidad elástica y las acciones dinámicas sobre estructuras industriales y la manera en la cual pasamos de focalizar las investigaciones “teóricas” (extender una teoría existente) a intentar dar respuesta a problemas de estructuras de interés en una industria específica, tal como se presentan en la práctica.

Aunque se trata de experiencias y trayectorias del autor de esta nota a lo largo de tres décadas, esperamos que esta panorámica contenga algunas observaciones que pueden ser de utilidad a investigadores jóvenes.

Palabras claves: Estabilidad elástica – Viento – Tanques de petróleo

A review of (almost) 30 years of research into the behavior and failure of oil storage tanks

Abstract

In this paper we attempt to briefly recapitulate the evolution of our own interests on topics related to elastic stability and dynamic actions on industrial structures and the way in which we went from focusing “theoretical” research (extending an existing theory) to trying to respond to structural problems of interest in a specific industry, as they are presented in practice. Although these are experiences and trajectories of the author of this note over three decades, we hope that this overview contains some observations that may be useful to young researchers.

Keywords: Elastic Stability – Wind – Oil Tanks

Introducción

Primeras exploraciones en la teoría general de estabilidad elástica

Como muchos investigadores jóvenes, enfoqué mis primeros años post-doctorales en temas teóricos de la mecánica estructural, con

la esperanza de hacer contribuciones que enriquecieran una disciplina con un historial centenario. Con la culminación de mis estudios doctorales en la Universidad de Londres, la única opción que me planteaba era continuar profundizando los problemas que había identificado durante mis estudios en Inglaterra.

A mi regreso a Argentina, un colega que trabajaba en Tucumán, a quien había conocido en Londres, iniciaba un nuevo programa de Maestría en Ingeniería Estructural, algo que era altamente innovador en el país. La invitación de este colega, Rodolfo Danesi, fue de colaborar con el dictado de asignaturas en ese programa, y con el tiempo constituyeron cursos de elementos finitos y de estabilidad de estructuras. Con motivo de esa participación tuve el privilegio de interactuar con Danesi y sus colegas y con estudiantes de primer nivel (aunque ellos no lo supieran todavía) de diferentes lugares de Argentina.

Las primeras versiones de estas lecciones de estabilidad de estructuras se enfocaban en temas de interés teórico, en los que enfatizaba la formulación y la metodología por sobre la aplicación de esas ideas hacia problemas de interés práctico en la ingeniería de estructuras. Hacia 1980 la teoría de estabilidad elástica estaba bien fundamentada, en gran medida por las contribuciones de mis profesores en Londres, pero había áreas que permanecían inexploradas y que requerían de introducir modificaciones para abarcarlas. Como ejemplo de nuestras contribuciones, abordamos problemas que presentaban restricciones en el campo de desplazamientos, un tema en el que trabajó un egresado de Tucumán. Otros temas fueron la implementación de elementos finitos sobre la formulación de estabilidad y la interacción entre cargas estáticas y dinámicas en problemas de estabilidad. Algunos de esos avances dieron origen a numerosos artículos y un texto sobre la teoría de estabilidad elástica **Godoy** (2000).

En estas páginas quisiera comentar acerca de cómo fue el cambio de énfasis que me llevó a estudiar la estabilidad en problemas ingenieriles de interés práctico. Algunas reseñas del trabajo realizado se encuentran en **Godoy** (2016) y **Godoy et al.** (2022).

Desarrollo

La realidad supera la ficción: Consecuencias de desastres naturales sobre estructuras de tanques

Hacia 1995 había cambiado varias veces de lugar de trabajo cuando, estando como profesor e investigador en la Universidad de Puerto Rico, pude

conocer de primera mano lo que era un huracán (no ya en teoría sino porque tuve que sufrirlos con bastante angustia). Con motivo del huracán Marilyn que azotó las Islas Vírgenes americanas en 1995, viajamos con colegas a investigar las consecuencias estructurales y allí encontré que, entre las estructuras metálicas de pared delgada, las que más habían sufrido eran los tanques de petróleo. Debido a la esbeltez de estos tanques, la forma más común de falla estaba asociada al pandeo de la cáscara, lo que se acercaba mucho a mis intereses relacionados con estabilidad de estructuras de paredes delgadas. Fue mi oportunidad de unir la teoría y llevarla a problemas que fueran de interés no solo dentro de la academia sino también en la ingeniería y la producción de bienes y servicios.

En los años siguientes en Puerto Rico, con estudiantes de maestría y doctorado, nos enfocamos en problemas de pandeo de tanques de petróleo bajo cargas de viento, lo cual nos permitió relacionarnos con otros grupos de investigación principalmente en Europa y Asia.

En 1998 el huracán Georges cruzó la isla de Puerto Rico dejando importantes secuelas en las plantas de petróleo cercanas a la costa, lo cual motivó nuestra curiosidad e interés por investigar las formas de falla que no eran comunes en este tipo de estructuras. Los estudios de túnel de viento realizados en Australia eran la base del estado del arte, mientras que las modelaciones de tanques se hacían usando métodos simplificados. En Puerto Rico hicimos estudios en túnel de viento para determinar presiones debidas a viento, las cuales se aplicaban en forma secuencial sobre la cáscara para evaluar su estabilidad mediante análisis de elementos finitos. Este enfoque secuencial fue una novedad en el estado del arte en ese momento.

La escala del problema real subió en 2005 con la llegada de los huracanes Katrina y Rita, que en el lapso de un mes destruyeron buena parte de las facilidades de almacenamiento de crudo y derivados del petróleo en las costas del Golfo de México en Luisiana y Texas. Con el apoyo de la Fundación Nacional de Ciencias de Estados Unidos (NSF) y por encargo de NIST (National Institute of Standards and Technologies), tuvimos acceso a recorrer las zonas afectadas a fin de identificar

modos de falla. Basado en una amalgama entre expectativas teóricas y la visualización de las consecuencias del fenómeno, fue posible establecer formas de daño que pueden esperarse de estos desastres naturales actuando sobre tanques de almacenamiento **Godoy** (2007). De los trabajos que hemos publicado en estos años, quizás esos fueron los que han tenido mayor repercusión tanto en la academia como en la ingeniería.

Un aspecto nuevo que surgió de estas misiones de reconocimiento de zonas afectadas por huracanes fue la dimensión social, porque a cada paso uno se enfrenta con personas que han sido afectadas por una u otra razón y su vida cambió asociada al evento. En zonas cercanas al río Mississippi en New Orleans, el desborde del río causó inundación en poblaciones enteras, como en Chalmette, y en las granjas de tanques se produjeron flotaciones de tanques, causando ruptura de la conexión entre tuberías y tanques. Esto ocasionó derrames de petróleo que desbordaron las instalaciones y las aguas contaminadas llegaron a zonas vecinas habitadas. Los pobladores debieron huir de sus viviendas y ya no pudieron regresar.

Esta línea de estudio del pandeo bajo viento continuó algunos años después con estudiantes de las Universidades Nacionales de Córdoba y del Comahue y posteriormente incursionamos en estudios de túnel de viento para tanques sometidos a condiciones especiales con colegas de La Plata y Resistencia. La modelación del flujo de viento sobre tanques realizada en la Universidad Nacional de Córdoba permitió identificar factores topográficos en este problema.

Recientemente hemos trabajado en temas de riesgo y fragilidad de tanques bajo la acción de viento, con énfasis en eventos asociados a vientos regionales y no ya a vientos huracanados. Estos estudios permiten explorar probabilidad de ocurrencia de niveles de daño para valores crecientes de la intensidad de viento. Esta es un área en la que estamos en proceso de incluir nuevos investigadores con experiencia en metodologías de análisis de fragilidad.

La experiencia de moverse de temas “teóricos” a temas “aplicados” fue algo muy beneficioso y enriquecedor, permitiendo palpar de cerca la

importancia de usar estudios avanzados de mecánica aplicada para comprender temas que preocupan a ingenieros, industriales y a la población.

Paralelamente con los estudios de viento surgió el interés de investigar la respuesta sísmica de tanques. Esta temática fue motivo de una tesis doctoral en Puerto Rico. En esta línea de trabajo había muchos investigadores interesados en diferentes países, incluyendo Estados Unidos, Japón y Argentina. Finalmente decidimos discontinuar esos estudios sísmicos y concentrarnos en otros temas que eran novedosos en el área de tanques. Uno de ellos fue el pandeo de tanques debido a descenso de la fundación. Por primera vez, el tema de cedimiento de la fundación en tanques fue visto como un problema de estabilidad. Esta temática fue posteriormente explorada principalmente por investigadores de China.

Nuevas experiencias que surgieron de accidentes de incendios en tanques

Nuestro interés en problemas de fuego como causa de daño de tanques de almacenamiento de combustibles estuvo nuevamente asociado a un accidente de grandes proporciones: en 2009 se produjo un incendio en una planta de almacenamiento en Bayamón, cercana a la ciudad de San Juan de Puerto Rico, que destruyó más de 20 tanques durante los tres días que duró antes de ser extinguido. Para tener una idea de su magnitud, las nubes negras ocasionadas por el incendio podían verse desde la Estación Espacial Internacional. A diferencia de desastres de origen natural, como viento o sismo, los incendios de este tipo se conocen como de origen tecnológico.

Este era un campo bastante nuevo, que había sido estudiando principalmente en Edimburgo motivado por el incendio de una planta de almacenamiento de combustible en la localidad de Buncefield en 2005. Una novedad del incendio de Buncefield fue que quienes llevaron a cabo las investigaciones forenses a fin de delimitar responsabilidades fueron comisiones designadas por el gobierno y los resultados de esas investigaciones eran de dominio público. Por el contrario, en problemas similares ocurridos en otros países (incluyendo Estados Unidos), las compañías petroleras evitan compartir detalles de sus accidentes y no revelan información que pueda perjudicarlas de

alguna forma, por ejemplo, en litigios con compañías aseguradoras o con terceros que reclaman perjuicios.

El estudio detallado del comportamiento de tanques en la planta de Bayamón permitió reconstruir el proceso de deformación de algunos tanques, incluyendo modos de pandeo y de falla. En estas simulaciones iniciales no se estudió el problema acoplado, es decir modelando tanto la llama como el tanque al que llegan los efectos de radiación térmica, sino que se consideró como un problema desacoplado en el que se supone un campo de temperaturas que llegan al tanque objetivo. Esto es adecuado si solamente se intenta representar la primera ocurrencia de pandeo, pero no para estados más avanzados. Debido a la fuerte incidencia de las condiciones de contorno en este problema, se identificaron grandes diferencias de comportamiento entre tanques con techo fijo y tanques abiertos en su parte superior.

Estudios posteriores, en los que se incluyó a una investigadora de ingeniería química de la Universidad Nacional del Comahue, permitieron simular detalles de la llama y estudiar la transferencia de calor desde la fuente al tanque objetivo. Esto puso en evidencia qué factores importantes del accidente podían incluirse en la simulación, como el combustible que se quema, la distancia entre la llama y el tanque, efectos debidos a viento y su direccionalidad, así como detalles de la llama misma, como las zonas en las cuales el fuego está acompañado de humo. También se refinó el análisis estructural, siguiendo por primera vez el comportamiento post-crítico hasta alcanzar las máximas temperaturas que pueden obtenerse en la llama en base a sus condiciones.

Accidentes en plantas de tanques de almacenamiento debidos a explosiones

La evidencia de accidentes disponible muestra que en la mayoría de los casos de incendios de tanques de almacenamiento de combustibles se generan explosiones que afectan a tanques vecinos, independientemente de los efectos térmicos. Tales explosiones se manifiestan como ondas de presión que se liberan en el foco de la explosión y se transmiten hacia el tanque objetivo, que recibe fuertes presiones dinámicas.

Para comprender mejor la problemática se hicieron inicialmente ensayos de explosiones con colegas de la Universidad de Carolina del Norte en Charlotte sobre modelos de tanques en escala reducida. Esto permitió confirmar la distribución espacial y temporal de las presiones dinámicas que afectan el tanque objetivo. El modelado de la respuesta dinámica del tanque objetivo, realizado en la Universidad Nacional de Córdoba, supuso tales distribuciones, permitiendo evaluar la estabilidad estática y dinámica de tanques bajo explosiones. Se ensayaron diferentes estrategias de análisis y de criterios de estabilidad del problema, dado que las categorías existentes no conducían a una adecuada representación del fenómeno de pandeo de cáscaras bajo cargas repentinas. También se tomaron en cuenta efectos de plasticidad en el material de un tanque.

La siguiente etapa ha sido el trabajo en conjunto con investigadores de la Universidad Nacional de Tucumán, quienes aportaron su gran experiencia en simulaciones de explosiones que afectan las estructuras vecinas, en gran medida gracias a la participación de Rodolfo Danesi y sus discípulos directos. En este caso las simulaciones fueron de tipo acoplado, en las que tanto la fuente como el objetivo forman parte del mismo modelo. Esto permite seguir la generación de la onda de choque en un ambiente computacional hasta su impacto con la estructura del tanque y evaluar las deformaciones de las paredes del tanque y daño del material. De modo similar al estudio acoplado entre la llama y el tanque, en este caso la modelación acoplada permite incluir factores como el tipo de explosivo, la localización con respecto al tanque objetivo, la distancia entre la fuente y el objetivo y los efectos del suelo en la transferencia de la onda.

Conclusiones

En este trabajo intentamos recapitular brevemente la evolución de nuestros propios intereses y la manera en la cual pasamos de focalizar las investigaciones “teóricas” (extender una teoría existente), a intentar dar respuesta a problemas de estructuras de interés en una industria específica, tal como se presentan en la práctica.

Aunque se trata de experiencias y trayectorias del autor de esta nota, esperamos que esta panorámica contenga algunas observaciones que puedan ser de utilidad a investigadores jóvenes.

Reflexiones finales

Nuestros temores iniciales estaban asociados a desprendernos del bagaje teórico que conlleva una teoría general bien establecida, lo cual permite trabajar con una cierta seguridad. Pero la experiencia de estos 30 años nos ha demostrado que la transferencia de conocimientos a situaciones de la práctica no es trivial y que requiere de superar nuevos desafíos que vale la pena enfrentar. En nuestra experiencia, el nivel de las investigaciones no se redujo en tal proceso, sino que cambiaron las motivaciones y los interlocutores.

Un cambio sustancial experimentado durante estos años fue el pasaje de investigaciones llevadas a cabo individualmente o con un grupo muy reducido, a la interacción y trabajo en equipo con investigadores de otras instituciones y países. La interacción con investigadores de Argentina fue de inmensa importancia, porque los lazos establecidos se han prolongado por décadas, como en el caso de la Universidad Nacional de Tucumán, liderada por Rodolfo Danesi en muchos momentos. En un inicio la interacción se materializó mediante el dictado de cursos, pero pronto se transformó en el desarrollo de líneas de investigación.

Los investigadores asociados extranjeros en estos temas provenían principalmente de Estados Unidos, Inglaterra, Grecia e Israel, llevándose también a cabo intercambios con investigadores de Francia, China, Brasil, Sudáfrica. En algunos casos no llegamos a conocer de manera presencial a algunos investigadores con quienes colaboramos, pero la interacción se mantuvo por muchos

meses y se lograron resultados importantes.

Nuestra experiencia en estos años de trabajo sobre tanques de petróleo también incluye aspectos como la conveniencia de abandonar un tema cuando las condiciones no parecen ser favorables para su estudio por un grupo de investigación. Esto quedó ilustrado luego de cuatro años dedicados a la respuesta sísmica de tanques, que fueron muy productivos, pero llegó un momento en que nuestros propios límites y posibilidades nos indujeron a cambiar de rumbo. La lección aprendida fue que no debíamos aferrarnos a un tema específico cuando se llega a un punto en el cual se hace difícil continuar produciendo trabajo original.

Agradecimientos

Este trabajo está dedicado a la memoria del Dr. Rodolfo Danesi, el gran propulsor de los estudios avanzados e investigación de Ingeniería Estructural en Tucumán. Su actuación permitió colocar esta área en un primer plano a nivel nacional e internacional.

Agradecemos a los miembros de grupos de investigación con quienes compartimos estos estudios sobre tanques: Fernando G. Flores, Sergio A. Elaskar, Oscar Falcinelli, Luis Soria-Castro, Mariano P. Ameijeiras, Carlos A. Prato (en Córdoba), Julio C. Méndez, Sandra López-Bobonis, Genock Portela, Juan C. Virella, Eduardo M. Sosa, Jean C. Batista-Abreu, Luis E. Suárez, Ali Saffar (en Puerto Rico), Rossana C. Jaca, Susana N. Espinosa, H. Daniel Calabró, Carlos A. Burgos (en Neuquén), Bibiana Luccioni (en Tucumán), David Weggel, Mathew J. Whelan (en Carolina del Norte), James G. A. Croll (en Londres), Daphne Pantousa (en Grecia), Aphonse Zingoni (en Sudáfrica), Moshe Eisenberger (en Israel).

Referencias

Godoy L. A. (2000) "Theory of Elastic Stability: Analysis and Sensitivity", *Taylor and Francis*, Philadelphia, PA, USA.

Godoy L. A. (2007) "Performance of storage tanks in oil facilities following Hurricanes Katrina and Rita", *ASCE Journal of the Performance of Constructed Facilities*, vol. 21 (6), pp. 441-449.

Godoy L. A. (2016) "Buckling of oil storage steel tanks: Review of static buckling", *Thin-Walled Structures*, vol. 103(1), pp. 1-21.

Godoy L. A., Jaca R. C., Ameijeiras M. P. (2022) "On buckling of oil storage tanks under nearby explosions and fire", *Above Ground Storage Tank Oil Spills: Applications and Case Studies*, M. Fingas (Ed.), Elsevier, Capítulo 7, pp. 199-259.

AUTOR

GODOY, Luis A ID  ORCID 0000-000323618471



cet

REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología