

Revisión Sobre el Análisis y Protección de Tuberías Enterradas Ante Cargas Sobre la Superficie del Terreno

Gómez Jiménez Carlos Arturo¹

¹*Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia*

Resumen: Las tuberías enterradas son necesarias para el transporte de productos (agua potable, desechos residuales, hidrocarburos, entre otros) de un punto geográfico a otro. Existen diferentes criterios para seleccionar la calidad, espesor y material de la tubería, que combinados tienen que garantizar que el esfuerzo máximo admisible sea mayor que el esfuerzo aplicado sobre el material. En ocasiones, se requiere del paso de vehículos (no contemplados en el diseño original) sobre la red existente, lo que obliga a implementar soluciones adicionales para proteger la red. Este trabajo tiene la finalidad de hacer una revisión sobre el análisis y protección de tuberías enterradas ante cargas sobre la superficie del terreno, mencionando los métodos de análisis, tendencias de protección y exigencias en la normativa nacional e internacional. Finalmente se concluye el problema de interacción suelo-tubería es de gran complejidad y que la inclusión de protección mecánica entre la superficie del terreno y la tubería influye en el grado de protección de la tubería.

Palabras clave: Análisis numérico; Interacción suelo-tubería; Protección de tuberías enterradas; Métodos de los elementos finitos.

Recibido: 5 de junio de 2022. Aceptado: 1 de agosto de 2022

Received: June 5th, 2022. Accepted: August 1st, 2022

Review on the Analysis and Protection of Buried Pipelines from Ground Surface Loads

Abstract: Buried pipelines are necessary for the transportation of products (drinking water, wastewater, sewage, hydrocarbons, among others) from one geographical point to another. There are different criteria to select the quality, thickness and material of the pipe, which combined have to guarantee that the maximum admissible stress is greater than the stress applied on the material. Sometimes, the passage of vehicles (not contemplated in the original design) over the existing network is required, which makes it necessary to implement additional solutions to protect the network. The purpose of this work is to review the analysis and protection of buried pipelines from loads on the ground surface, mentioning the analysis methods, protection trends and requirements in national and international standards. Finally, it is concluded that the soil-pipe interaction problem is of great complexity and that the inclusion of mechanical protection between the ground surface and the pipe influences the degree of protection of the pipe.

Keywords: Numerical analysis; Soil-pipe interaction; Protection of buried pipelines; Finite element methods.

(1) carlos.gjimenez@mail.escuelaing.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En todo el territorio colombiano, existe un gran sistema de tuberías enterradas que transportan los recursos naturales de un punto a otro, la gran mayoría, se diseñaron hace más de veinte años y están sometidas a cargas que pueden generar fisuración de las tuberías. Lo mismo sucede en otros países. Por ejemplo, solo en Inglaterra y Gales, se desperdician 3113 millones de litros de agua potable cada día (Discover Water, 2021).

Por otra parte, en el sector Oil & Gas, es común emplear tuberías de acero al carbono (AC), las cuales por sus propiedades físicas y mecánicas son ideales para ser empleadas en el transporte de hidrocarburos.

Es importante notar que el comportamiento de las tuberías flexibles total y parcialmente enterradas es un problema complejo de modelamiento de suelo-estructura (Bryden et al., 2015), por la cantidad de variables involucradas e idealizaciones que se hacen a nivel teórico.

Cuando se instala una tubería de conducción enterrada, es imposible predecir todos los eventos que ocurrirán en el derecho de vía (DDV) durante su vida útil. Por esta razón, cada vez que se requiere realizar trabajos sobre o en cercanía de una red existente, se efectúa un análisis de flexibilidad de la tubería con el fin de determinar si el tubo experimentará daños debidos al paso de cargas.

En el caso de tuberías que conducen hidrocarburos, se realiza un análisis de acuerdo con la norma API 1102, la cual recomienda emplear protección mecánica si la distancia entre la cota lomo del tubo y el terreno natural es menor a 1.8 m en cruces de autopista. Sin embargo, esta norma y la NTC 3828, no especifican los tipos de protección mecánica.

Los sistemas de protección más comunes por sus bajos costos corresponden a la construcción de un terraplén con material de la zona hasta lograr un espesor de suelo de 1.8 m entre la rasante del terraplén y la cota lomo de la tubería, y al empleo de láminas de protección entre la tubería y la carga superficial para disminuir los esfuerzos sobre el tubo debido a la carga (Ecopetrol, 2013).

Debido a la posibilidad de agrietamiento de la tubería producto del paso de cargas superficiales de tránsito, que en ocasiones exceden la magnitud de carga considerada inicialmente, es importante comprender el comportamiento de las tuberías enterradas a poca profundidad con el fin de proponer sistemas de protección durante la vida útil de la tubería (Bayton et al., 2018). Además, en el transporte de hidrocarburos, una ruptura puede implicar catástrofes ambientales

Este trabajo tiene la finalidad de hacer una revisión sobre el análisis y protección de tuberías enterradas ante cargas sobre la superficie del terreno, mencionando los métodos de análisis, tendencias de protección y exigencias en la normativa nacional e internacional. La revisión bibliográfica que se consulta está enfocada en modelos numéricos mediante elementos finitos bidimensionales y tridimensionales, modelados físicos a través

de centrífuga y tipos de protección mecánica que se implementan como los agregados derivados de neumáticos (Tire-derived aggregate TDA), geotextiles y geoespuma (Expanded Polystyrene EPS). Por último, se hará un enfoque en tuberías flexibles de material AC usados en el sector Oil & Gas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Principales normativas vigentes sobre tuberías enterradas en Colombia

Entes reguladores:

- ANSI: American National Standards Institute.
- ASME: American Society of Mechanical Engineer.
- API: American Petroleum Institute.
- ASTM: American Society for Testing and Materials.
- NTC: Normas Técnicas Colombianas.
- NSR-10: Norma Sismo Resistente del 2010.
- CCP14: Norma Colombiana de Diseño de Puentes.

Normas específicas:

- ASME B31.4: Norma del Instituto Americano de Normas Nacionales y la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos. Código para los Sistemas de Transporte por Oleoductos.
- ASTM A-36: Carbon Structural Steel.
- NTC 3728: Gaseoductos. Líneas de transporte y redes de distribución.
- NSR-10 Título H: Estudios Geotécnicos.

Las principales normas implementadas en Colombia dentro del sector Oil & Gas es la API 1102 (desarrollada en los Estados Unidos de América) y NTC3828 (específica para Colombia). Ninguna de las dos normas mencionadas, especifican los tipos de protección mecánica que pueden ser usadas.

2.2 Modelos numéricos de análisis mediante elementos finitos bidimensional y tridimensional

Los primeros análisis de esfuerzos en tuberías enterradas fueron realizados por Marston a principios del XX (González y Reyes, 2014), y otros investigadores continuaron este estudio en los años 1930s de acuerdo con la capacidad de la tecnología de su tiempo (Goltabar y Shekarchi, 2010). Sin embargo, el problema de suelo-estructura es desafiante de analizar por medio de cálculos analíticos. En la actualidad se emplean análisis numéricos completos, como, por ejemplo, utilizando el método de los elementos finitos (Kliszczewicz, 2013).

En las últimas décadas, se han desarrollado varios programas de computador basados en modelación numérica para el análisis como ABAQUS, ANSYS, PLAXIS, FLAC2D, FLAC3D, MIDAS, y RS2 y RS3 de ROCSCIENCE, entre otros. Los resultados más representativos, se obtienen al realizar un mallado no estructurado, que consiste en subdividir

el modelo en pequeñas partes, alrededor de la tubería “Figura 1.” y lejos de la tubería se puede incrementar el tamaño de la malla (Goltabar y Shekarchi, 2010). Con respecto a las investigaciones experimentales (modelación física) de

estructuras enterradas, estas requieren una logística compleja, son costosas y en algunos casos, son poco prácticas (Khademi-Zahedi, 2019).

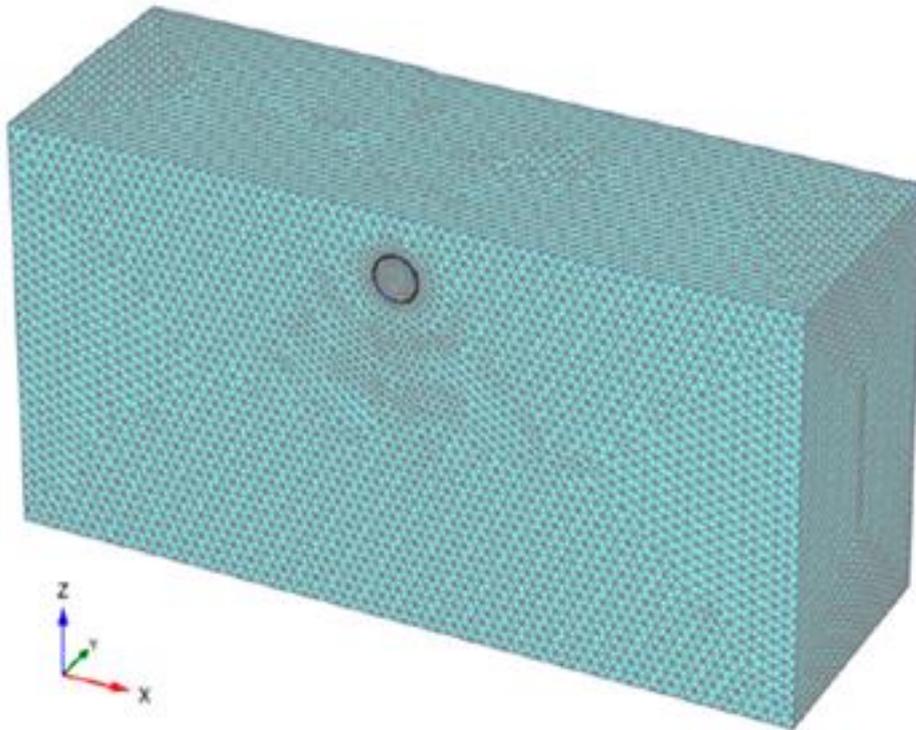


Figura 1. Modelo típico de malla empleado para análisis tridimensional de tuberías enterradas (Bryden et al., 2015).

Estudios realizados por Kevan (1985), mostraron una muy buena correlación entre los resultados obtenidos del análisis de elementos finitos y las respuestas medidas en pruebas de modelos físicos de tuberías enterradas. Esto ha proporcionado una justificación sólida para el uso del método de elementos finitos para modelar adecuadamente diversas condiciones de instalación, materiales del suelo, condiciones de carga, tamaños de tubería, etc., sin el costo adicional de realizar pruebas físicas detalladas (Sharp et al., 1985). Estudios recientes han validado esta conclusión como lo expone Hsu (2020) Emami Saleh et al. (2021) Xia et al. (2021) y Yang y Li (2021)

Por otra parte, se ha demostrado que los esfuerzos en el suelo y la tubería están fuertemente influenciados por el tipo de suelo (Karmaker, 2019). En forma adicional, la densidad del suelo y la profundidad de instalación de la tubería son factores importantes en la interacción suelo-tubería (Bildik, 2012).

Con respecto a la carga superficial aplicada, algunos estudios indican que los esfuerzos producidos por la carga concentrada por rueda son ligeramente superiores a los esfuerzos generados por la carga distribuida por rueda, con una diferencia máxima del 5 % (Khademi-Zahedi, 2019), demostrando resultados muy similares.

En los estudios realizados por Khademi-Zahedi (2019) de tuberías enterradas en arenas sueltas mediante elementos finitos se concluyó que:

- La magnitud y distribución de la sobrecarga superficial afecta el comportamiento de la tubería.
- Los desplazamientos de la tubería disminuyen con el aumento de la relación de profundidad/diámetro de instalación de la tubería.
- El comportamiento de la tubería está fuertemente influenciado por la densidad del material circundante. Los desplazamientos verticales de la tubería disminuyen con el aumento de la densidad del material “Figura 2”.
- Los resultados muestran que los desplazamientos de la tubería disminuyen con el aumento de la rigidez de esta y los desplazamientos de las tuberías de hormigón son menores que los de las tuberías de polietileno.

Investigaciones más recientes, han combinado los elementos finitos con estudios de confiabilidad, en los cuales se ha determinado que a mayor carga de vehículo la magnitud del índice de confiabilidad es menor (Xi et al., 2019).

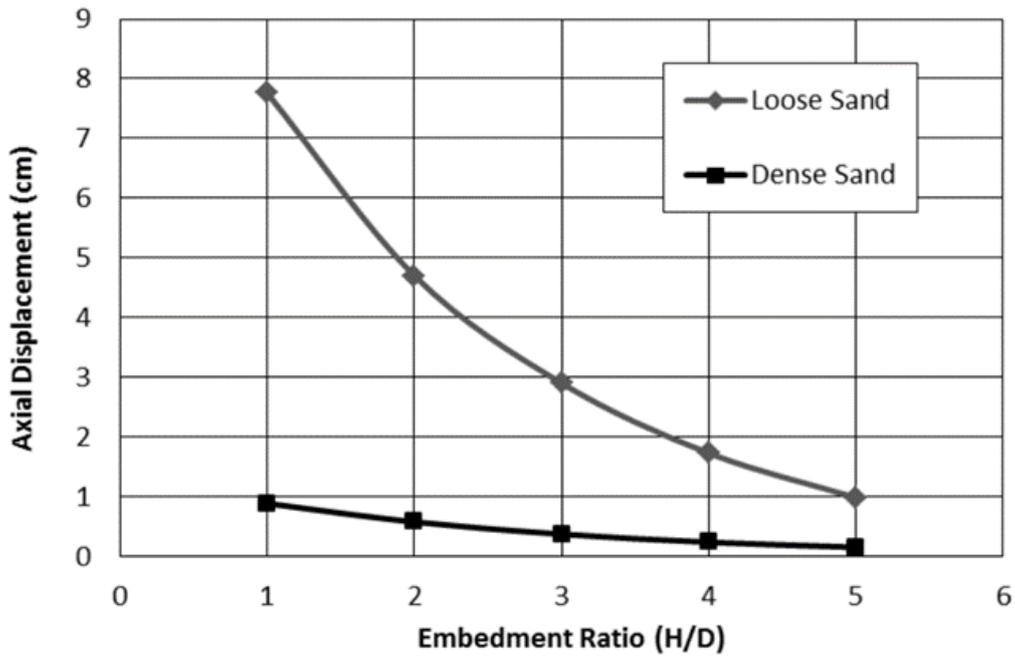


Figura 2. Efecto de la densidad relativa de la arena en las deformaciones de tuberías enterradas (Bildik, 2012).

A partir de análisis numéricos se ha determinado que las predicciones bidimensionales del comportamiento del sistema suelo-tubería indican una relación casi lineal entre la deflexión de la tubería y la presión aplicada, mientras que el análisis tridimensional muestra un comportamiento no lineal, especialmente para las cargas más altas. Sin embargo, a nivel general, se ha observado que la respuesta (deformación) de la tubería al esfuerzo aplicado produce una forma elíptica deformada de la tubería (Fattah et al., 2016).

2.3 Modelos físicos en centrífuga geotécnica

El uso de la centrífuga geotécnica ha demostrado que es una herramienta importante en el comportamiento de las estructuras geotécnicas, la cual principalmente ha sido de utilidad para evaluar las siguientes cuatro aplicaciones: modelado de un prototipo, investigación de conceptos de diseño nuevos, estudios paramétricos y validación de los resultados obtenidos de métodos numéricos (Lozada et al., 2021). En la “Figura 3” se muestra la centrífuga perteneciente a la Escuela Colombiana de Ingeniería.

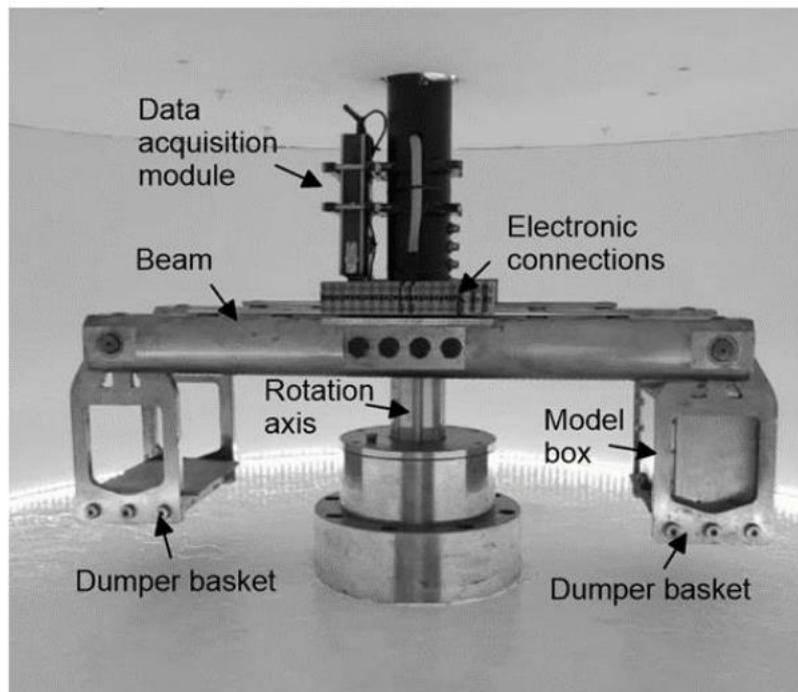


Figura 3. Mini-centrífuga geotécnica perteneciente a la Escuela Colombiana de Ingeniería (Lozada et al., 2021).

El empleo de la centrífuga geotécnica para el estudio de tuberías enterradas ha tenido una amplia atención. Sin embargo, existe relativamente poca literatura disponible con resultados experimentales, en particular con relación a la interacción tubería-suelo (Bayton et al., 2018). En especial el análisis de las tuberías flexibles tiene un grado de dificultad mayor que la evaluación de las tuberías rígidas. (Bryden et al., 2015).

En el diseño de tuberías enterradas, un parámetro clave es minimizar los cambios muy grandes en la flexión en distancias cortas, así como los puntos abruptos de inflexión, ya que estos tienen esfuerzos grandes de corte asociados. De acuerdo con los estudios realizados por Bayton et al (2018), una mayor profundidad de instalación incrementa la reducción en los esfuerzos de la tubería y ayuda a aumentar la vida útil de la tubería.

La clasificación de la flexibilidad de las tuberías se evalúa con base en su rigidez efectiva, definida como el factor de rigidez anular $\frac{EI}{R^3}$ donde E es el módulo Young; I es el momento de inercia; y R es el radio promedio de la tubería (Bryden et al., 2015).

El análisis de modelos de tuberías enterradas en centrífuga está relacionado con la teoría de Boussinesq de incrementos de esfuerzos debido a cargas externas, en donde el efecto de la carga superficial disminuye sustancialmente con la profundidad de instalación de la tubería (Bryden et al., 2015). En la “Figura 4” se muestra un esquema de un modelo típico de Boussinesq utilizado en la modelación física en centrífuga.

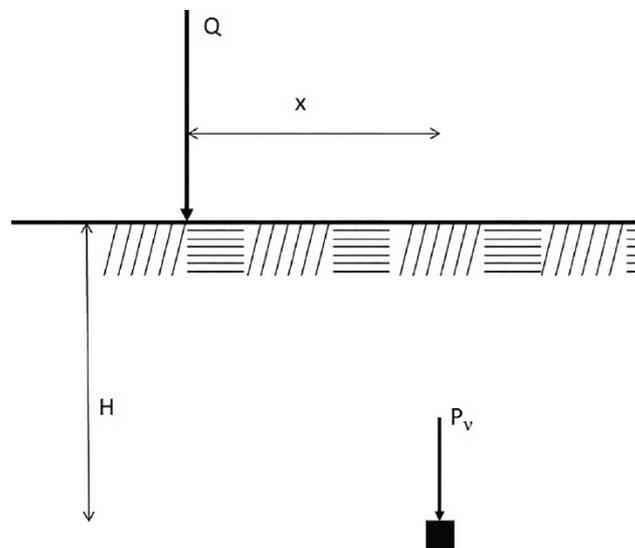


Figura 4. Modelo Boussinesq típico empleado en centrífuga en donde se analizan cargas puntuales a una distancia del punto de interés (Saboya et al., 2020).

Por otro lado, Neves et al. (2021) determinaron que las cargas superficiales producen deformaciones muy pequeñas en la tubería, y en consecuencia se puede asumir que el suelo se comporta en forma lineal.

A continuación, se plantean algunos comentarios a partir de la revisión de algunos de los artículos consultados:

- El análisis de tuberías enterradas a diferentes profundidades muestra que las tuberías menos profundas están sujetas a momentos de flexión significativamente mayores (Bayton et al., 2018).
- En general, el efecto de la carga superficial sobre el empuje desarrollado y la fuerza normal en la pared de la tubería se desvanece cuando la carga se localiza a una profundidad de aproximadamente dos diámetros (Bryden et al., 2015).
- El efecto de la carga superficial sobre las deformaciones máximas de la tubería disminuye rápidamente a medida que la carga se aleja de la

tubería en la horizontal y se desvanece aproximadamente a los dos diámetros del eje vertical de la tubería (Bryden et al., 2015).

- Las deformaciones diametrales provocadas por las cargas de los vehículos no superaron el límite del 2 % sugerido por la norma AWWA. La magnitud de deformación más alta medida fue de 0.2 % (Neves et al., 2021) En la “Figura 6”, se ilustran los resultados de la investigación.

Rakitin y Ming (2016) realizaron un estudio en donde compararon los resultados de centrífuga con un modelo a escala real, y se concluyó que los resultados de la prueba de la centrífuga concordaban razonablemente con los de las pruebas a escala real. En la “Figura 5” se compara el momento flector obtenido de un modelo físico en centrífuga con el obtenido en un modelo a escala real.

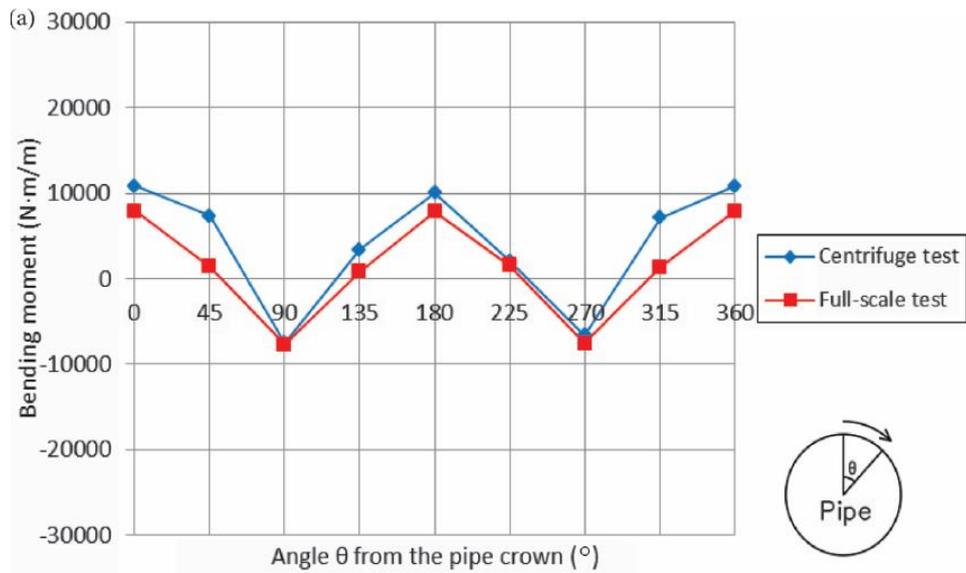


Figura 5. Flexión obtenida en un modelo en centrifuga comparado con un modelo de escala real demostrando un grado alto de coincidencia (Rakitin y Ming, 2016).

Load position	H/D		
	2	1.5	1
4D			
3D			
2D			
1D			
0D			

Figura 6. Sección de la tubería deformada a diferentes relaciones profundidad/diámetro y con respecto a una distancia diametral de la carga (Neves et al., 2021).

Con respecto a la instrumentación de ensayos de tuberías enterradas, se han propuesto diversos montajes con el fin de medir deformaciones. En la “Figura 7” y “Figura 8” se

muestran ejemplos de los ensayos realizados junto con la instrumentación utilizada.

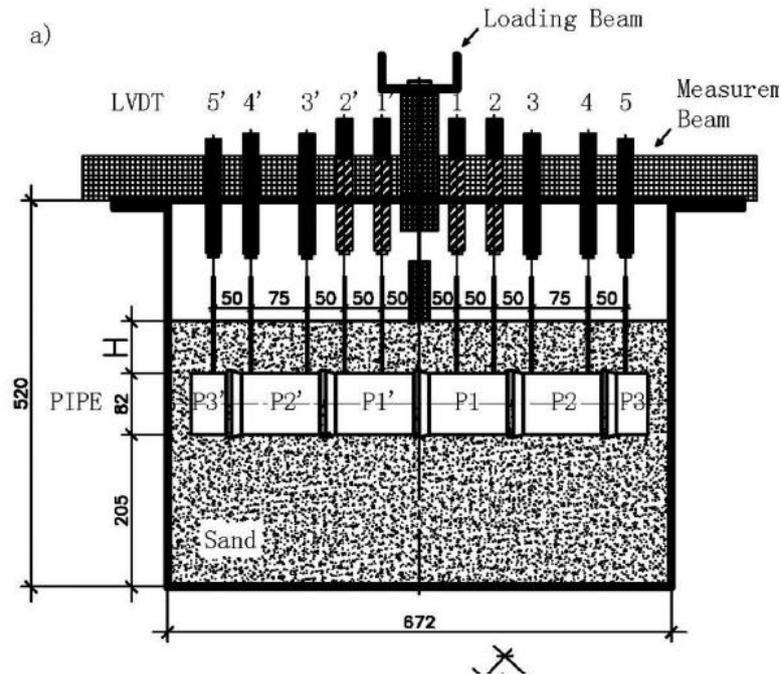


Figura 7. Modelos físicos en centrífuga de tuberías enterradas. Montaje realizado con transductor de desplazamiento lineal variable, LVDT (Rakitin y Xu, 2015).

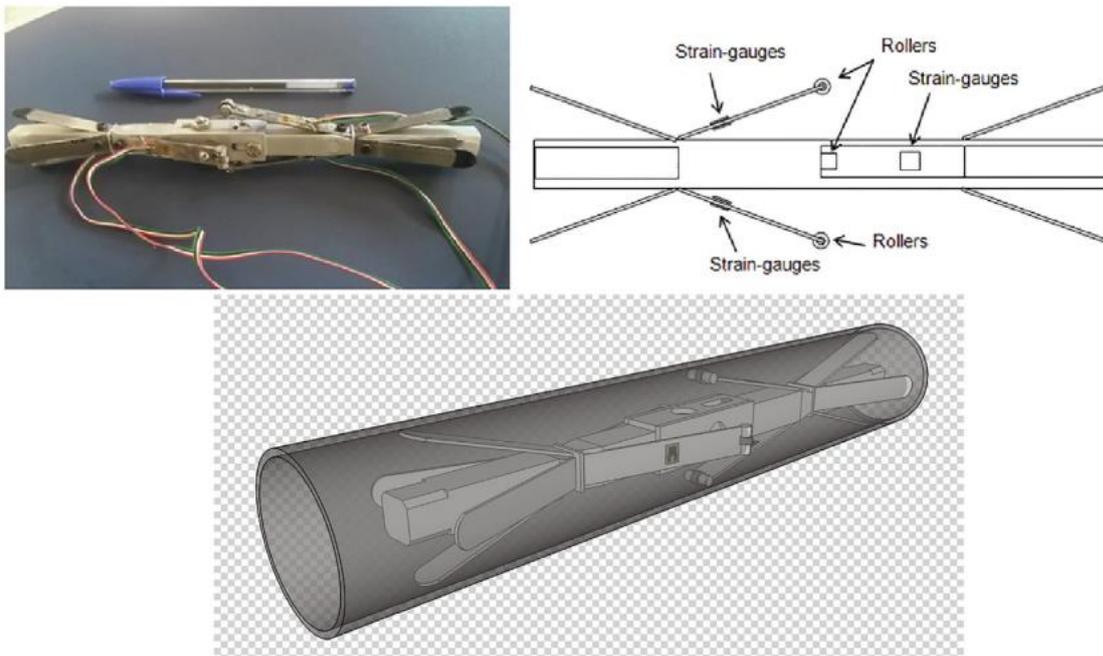


Figura 8. Instrumentación propuesta por Saboya et al (2020) para el estudio de tuberías enterradas en centrífuga geotécnica. Dentro de la tubería enterrada se instalaron cuatro transductores para medir los cambios de diámetro en dos diámetros perpendiculares entre sí.

Con respecto a las cargas dinámicas, se han elaborado montajes complejos en la centrífuga geotécnica como los realizados por Saboya et al. (2020), en donde un motor desplaza una carga para simular cargas de tránsito sobre una tubería. Así mismo, ataron a la tubería con una geomalla, y concluyeron que como sistema de anclaje es prometedor y

proporciona un método simple, económico y directo para mejorar la resistencia al levantamiento de tuberías enterradas (Saboya et al., 2012). En la “Figura 9”, se ilustra el montaje realizado por Saboya et al. (2020).

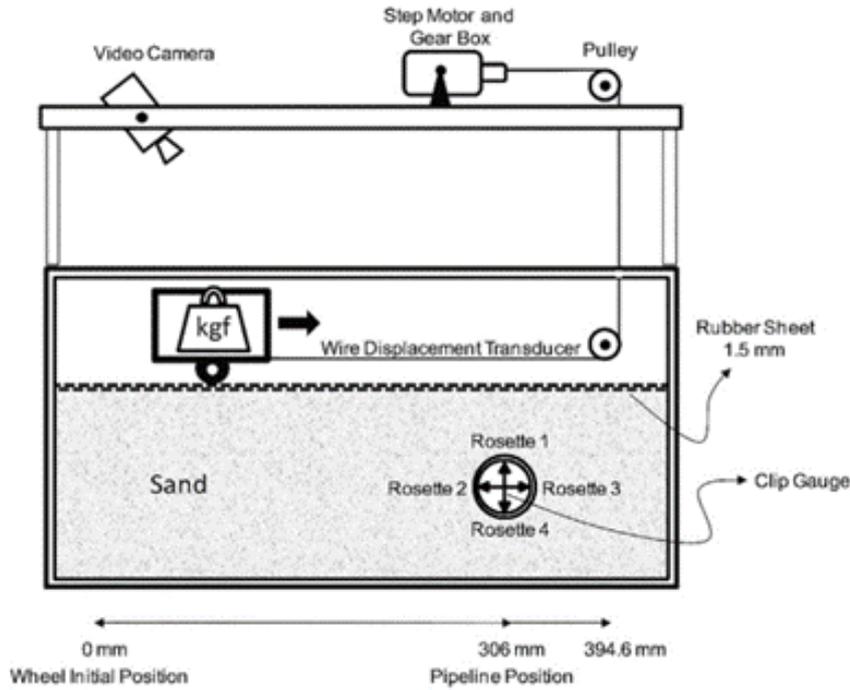


Figura 9. Montaje en la centrífuga geotécnica para simular una carga de tránsito superficial sobre una tubería enterrada (Saboya et al., 2020).

Por último, investigaciones modernas combinan modelados físicos combinado con modelados computacionales, como se aprecia en los trabajos realizados por Ordóñez et al (2007), Dezfooli et al (2015), Demirci et al (2018), Fattah et al (2018), Elshesheny et al (2019) y Park et al (2020) con el fin de demostrar una gran similitud entre los resultados obtenidos y así verificar los modelos matemáticos.

2.4 Análisis de protección de tuberías enterradas

Con el fin de proteger las tuberías enterradas ante cargas aplicadas sobre la superficie del terreno, se han realizado investigaciones con diferentes materiales de protección para determinar los efectos de estos sobre las deformaciones de las tuberías. Se han empleado bloques de poliestireno expandido,

geoceldas, geomallas, agregados de reciclaje de llantas (Tire-derived aggregate TDA), anillos de concreto o combinaciones de estos.

En general, los resultados muestran que el refuerzo mediante geoceldas produce una reducción significativa y positiva en el asentamiento de la superficie y el esfuerzo vertical en la corona de la tubería, con el consecuente aumento de la seguridad de la tubería (Almohammed et al., 2018; Ma et al., 2019). Por otra parte, los bloques de geoespuma se pueden emplear como un sistema ligero de cubierta para proteger tuberías enterradas amenazadas por una posible ruptura como resultado de fallas del suelo (Bartlett et al., 2015). En la “Figura 10”, se muestra un esquema de protección de tuberías enterradas empleando bloques de geoespuma.

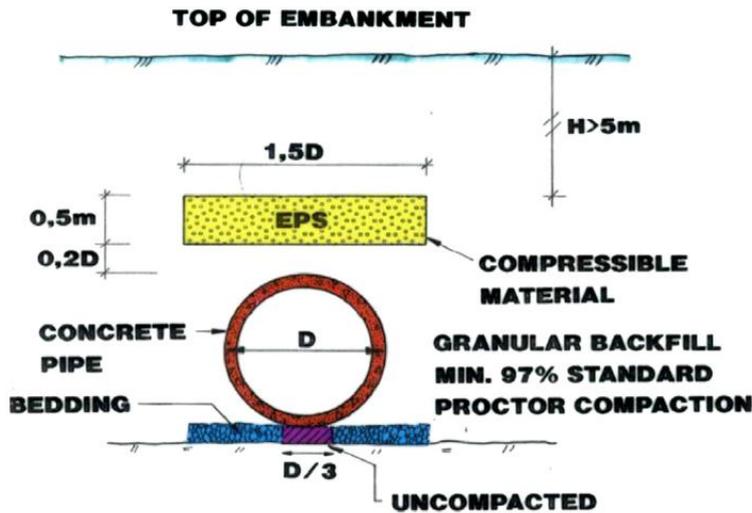


Figura 10. Tubería enterrada y protección mediante geoespuma (Expanded Polystyrene EPS) recomendado para el método de zanja imperfecta (Bartlett et al., 2015).

Diversos trabajos como son Ahmed et al. (2015), Fattah et al. (2016), Elshesheny et al. (2020) y Bildik y Laman (2020) Pires y Palmeira (2021) han concluido que el beneficio de utilizar refuerzo de geomalla por encima de la tubería enterrada es aumentar la capacidad de carga del suelo y disminuir la transferencia de carga a las estructuras subterráneas.

El uso de geoceldas con geomalla reduce significativamente la deformación de la tubería (Hegde y Sitharam, 2015). En

general, de acuerdo con mediciones se han observado reducciones de más del 50% en el esfuerzo y una reducción de más del 40% en la deformación de la tubería (Hegde y Sitharam, 2015). Por otra parte, se han obtenido conclusiones similares en la investigación de Khalaj et al. (2017; 2020) utilizando geoceldas “Figura 11”, y por otros investigadores como en los estudios realizados por Pires y Palmeira (2021) y Tavakoli Mehrjardi et al., (2015).

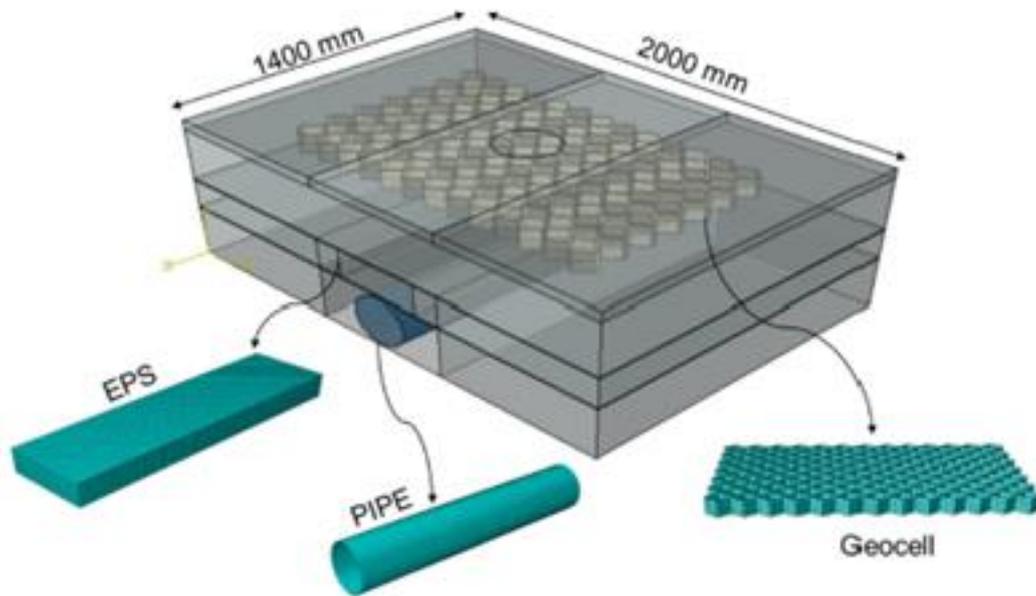


Figura 11. Modelo analítico realizado por Khalaj et al. (2020) empleando geoceldas para la protección de una tubería enterrada.

Con respecto al revestimiento de anillos de hormigón no reforzado, se ha concluido que su comportamiento mecánico no es óptimo, dado que el hormigón no es un material lo suficientemente resistente para soportar las cargas estáticas y dinámicas, y produce cargas punzantes sobre las tuberías cuando el revestimiento de hormigón se fractura como se ilustra en la “Figura 12” (Mill-Pro, 2019).

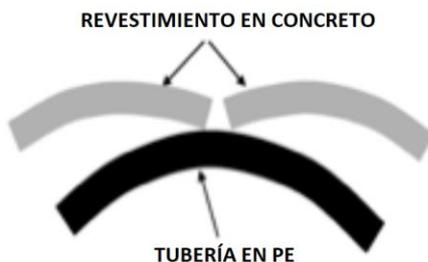


Figura 12. Fractura y esfuerzo de punzonamiento en una tubería generada por un revestimiento de concreto fracturado (Mill-Pro, 2019).

Recientes estudios han investigado protecciones mediante rellenos constituidos por agregados de reciclaje de llantas (TDA). Los resultados de campo muestran que el uso de una capa de TDA sobre la tubería es significativamente efectivo para reducir los esfuerzos sobre la tubería y la magnitud de las presiones transferidas en comparación con el uso de rellenos convencionales. El TDA actúa como un colchón de esfuerzos, el cual que absorbe las cargas impuestas en un rango entre 20 % y 50 % minimizando el área expuesta de la tubería a los esfuerzos producidos por las cargas externas como se muestra en investigaciones realizadas por Humphrey (2004), Ashari y El Nagggar (2017), Ashari (2018), Meguid y Youssef (2018), Mahgoub y Nagggar (2019), Quin y Wang (2021).

Mahboub y Nagggar (2020), combinaron el empleo de geoceldas con TDA y concluyeron que el uso de una capa de TDA sobre las tuberías enterradas reduce los esfuerzos de la tubería antes de que ocurra la falla por punzonamiento. En la “Figura 13” se ilustra el modelo de análisis empleado dentro de sus investigaciones.

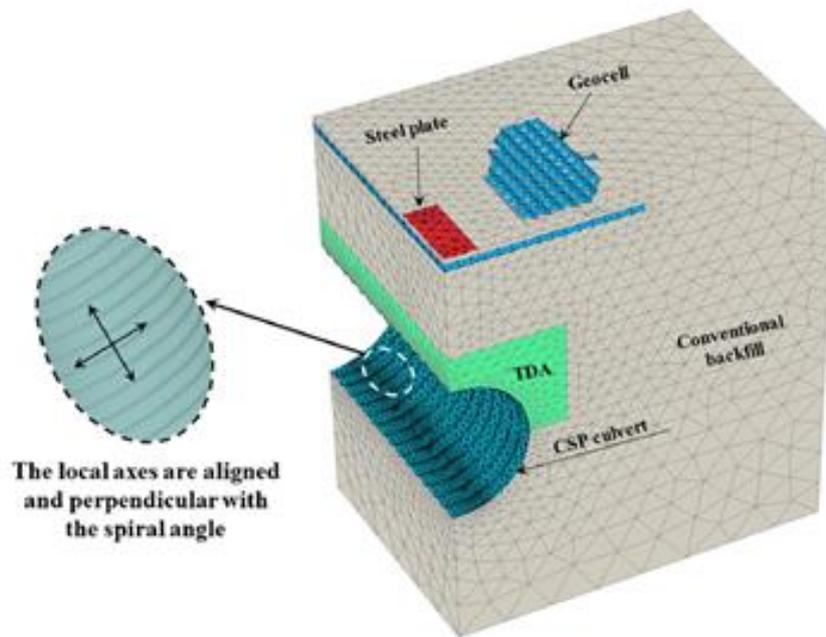


Figura 13. Modelo de análisis numérico de una protección de tuberías enterradas constituida por agregado de llantas recicladas (TDA) y geoceldas (Mahgoub y Naggar, 2020).

3. METODOLOGÍA

De forma esquemática se realizarán gráficas de esfuerzos versus profundidad, para tres diferentes casos de tuberías enterradas con y sin protección mecánica. En las figuras expuestas en se emplean los siguientes tipos de cargas y esfuerzos:

- Carga muerta (C_m): esfuerzos permanentes en el terreno.
- Carga viva (C_v): esfuerzo producto del paso de un vehículo, a modo esquemático, se asume un camión de carga pesada sin considerar las vibraciones producto del paso.
- Esfuerzo geostático vertical (σ_v): producto del peso propio del suelo.
- Esfuerzo total: sumatoria de los esfuerzos por la carga muerta, la carga viva y por los esfuerzos geostáticos.
- Esfuerzo admisible: esfuerzo máximo que puede soportar una tubería.

La aplicación de cada carga genera un aumento de los esfuerzos sobre la tubería, se realiza un análisis de las diferentes combinaciones de esfuerzos que puede llegar a experimentar una tubería enterrada:

- En el primer caso: no se contempla cargas vivas ni protección mecánica.
- En el segundo caso: se contempla la carga viva, pero sin protección mecánica.
- Tercer caso: se contempla la carga viva y protección mecánica.

4. RESULTADO Y DISCUSIÓN

De manera esquemática, se modela el comportamiento conceptual de tuberías enterradas sin y con protección mecánica, para tres casos diferentes.

4.1 Caso 1: tubería enterrada sin carga viva y sin protección mecánica

En la “Figura 14” la carga viva es igual a cero, es decir, no se considera tránsito de un vehículo, sólo se tiene en cuenta C_m y σ_v :

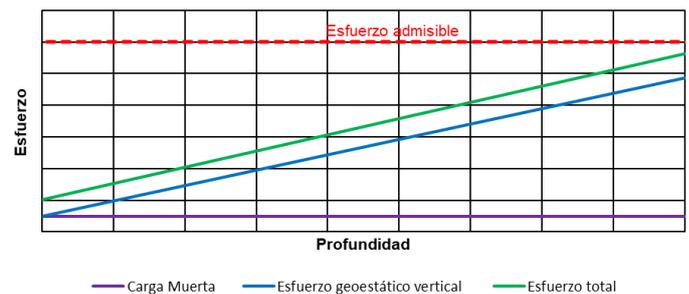


Figura 14. Tubería enterrada sin carga externa. Resultado esquemático de los esfuerzos con respecto a la profundidad. Se aprecia que a una determinada profundidad la tubería no tiene capacidad de soporte de las cargas impuestas.

De la figura, se concluye que existe una profundidad en la cual la tubería no es capaz de resistir los esfuerzos impuestos el peso del suelo y la carga muerta.

4.2 Caso 2: tubería enterrada con carga viva y sin protección mecánica

En la “Figura 15” se ilustra esquemáticamente la aplicación de la carga viva, constituida por el tránsito de un vehículo, sin tener en cuenta condiciones dinámicas.

Se aprecia que se sigue presentando que, a determinada profundidad la tubería no es capaz de resistir los esfuerzos impuestos el peso del suelo y la carga muerta.

Adicionalmente, a profundidades cercanas a la superficie del terreno, la tubería no es capaz de soportar las cargas impuestas producto de la carga viva dado que los esfuerzos son muy altos y aún no se ha disipado.

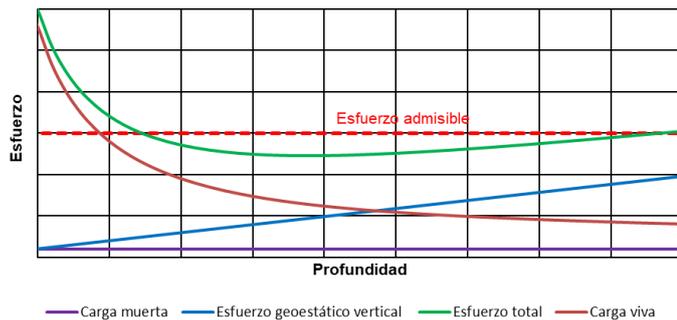


Figura 15. Tubería enterrada con carga viva y sin protección. Resultado esquemático al aplicarse la carga viva, los esfuerzos totales pueden ser superiores al esfuerzo admisible de la tubería, lo que desencadena en una fisuración de esta. Se aprecia que para profundidades pequeñas los esfuerzos son muy altos. Esto se debe a que la carga no se ha disipado

4.3 Caso 3: tubería enterrada con carga viva y con protección mecánica

En la “Figura 16” se ilustra esquemáticamente el grado de disipación de esfuerzos de diferentes protecciones mecánicas. Se asume que la capacidad de disipación t1 es mayor que t2 y a su vez es mayor que t3.

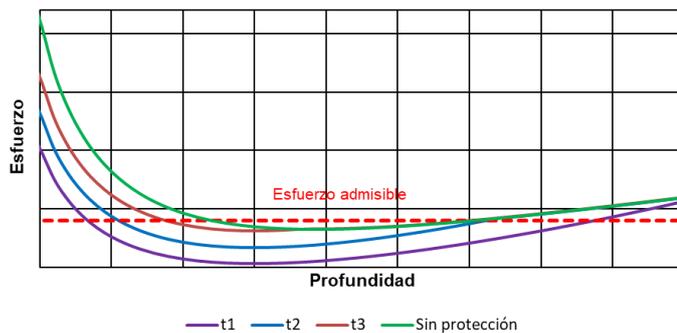


Figura 16. Tubería enterrada con carga viva y con diferentes protecciones mecánicas. Resultado esquemático en donde se asume que el grado de disipación de esfuerzos de t1 es mayor a t2 y a su vez mayor que t3.

Se aprecia que, con la incrustación de protecciones mecánicas entre la rasante y la tubería, el rango de profundidad en el cuál la tubería puede estar enterrada, aumenta, es decir, la protección mecánica disipa y protege la tubería.

5. CONCLUSIONES

La interacción suelo-tubería enterrada es un problema muy complejo en geotecnia, para el cual se requiere investigar

aspectos particulares, como la protección de tuberías enterradas ante cargas superficiales. Existen muchas condiciones que controlan el comportamiento mecánico del sistema suelo-tubería enterrada, entre ellas el suelo natural, el material de relleno, las cargas, el material de la tubería junto con su espesor y diámetro. La combinación de variables se traduce en idealizaciones de comportamiento que tienen como objeto aproximar los resultados de los métodos numéricos con resultados de ensayos reales, y por los artículos consultados se demuestra que estas aproximaciones han sido correctas.

Aunque los métodos de protección de tuberías enterradas no están reglamentados, de los estudios revisados se concluye que si generan una protección y disminuyen los esfuerzos a los que está sometida la tubería enterrada. Además, es cuenta con un respecto de estudios con métodos numéricos y modelados físicos como es la centrífuga geotécnica.

Por último, se concluye que los diferentes tipos de protección mecánica disponibles comercialmente, tienen la capacidad de disipar las cargas impuestas sobre la superficie del terreno; la selección del grado de disipación dependerá de las características del proyecto, del factor económico y el grado de peligro que conlleva una ruptura.

AGRADECIMIENTO

Agradezco al Ingeniero Edgard Robert Barbosa Cruz, PhD. quien es mi tutor para el proceso de elaboración de la tesis de grado y quien me ha brindado consejos y sugerencias con el fin de mejorar cada día.

REFERENCIAS

Ahmed, M. R., Tran, V. D. H., & Meguid, M. A. (2015). On the Role of Geogrid Reinforcement in Reducing Earth Pressure on Buried Pipes: Experimental and Numerical Investigations. *Soils and Foundations*, 55(3), 588–599. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.04.010>

Almohammed, W. H., Fattah, M. Y., & Rasheed, S. E. (2018). Numerical Analysis of the Effect of Geocell Reinforcement above Buried Pipes on Surface Settlement and Vertical Pressure. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Geotechnical and Geological Engineering* 12(3), 256–262.

Ashari Ghomi, M. 2018. “Large-scale triaxial testing of sustainable TDA backfilling alternatives.” Master’s thesis, Dalhousie University

Ashari, M., and H. El Naggar. 2017. “Evaluation of the physical properties of TDA-Sand mixtures.” In *GeoOttawa, the 70th Canadian Geotechnical Conf.* Ottawa: Canadian Geotechnical Society

Alotaibi, E., Omar, M., Shanableh, A., Zeiada, W., Fattah, M. Y., Tahmaz, A., & Arab, M. G. (2021). Geogrid bridging over existing shallow flexible PVC buried pipe – Experimental study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103945>

- Bartlett, S. F., Lingwall, B. N., & Vaslestad, J. (2015). Methods of protecting buried pipelines and culverts in transportation infrastructure using EPS geofoam. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(5), 450–461. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.019>
- Bayton, S. M., Elmrom, T., & Black, J. A. (2018). Centrifuge modelling utility pipe behaviour subject to vehicular loading. *Physical Modelling in Geotechnics*, 1(July), 163–168. <https://doi.org/10.1201/9780429438660-17>
- Bildik, S. (2012). Parametric studies of buried pipes using finite element analysis. 3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 28-30. June 2012, Near East University, Nicosia, North Cyprus.
- Bildik, S., & Laman, M. (2020). Effect of geogrid reinforcement on soil - structure – pipe interaction in terms of bearing capacity, settlement and stress distribution. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(6), 844–853. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.07.004>
- Bryden, P., El Naggar, H., & Valsangkar, A. (2015). Soil-Structure Interaction of Very Flexible Pipes: Centrifuge and Numerical Investigations. *International Journal of Geomechanics*, 15(6), 04014091. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000442](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000442)
- Demirci, H. E., Bhattacharya, S., Karamitros, D., & Alexander, N. (2018). Experimental and numerical modelling of buried pipelines crossing reverse faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114(June), 198–214. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.06.013>
- Dezfooli, M. S., Abolmaali, A., Park, Y., Razavi, M., & Bellaver, F. (2015). Staged Construction Modeling of Steel Pipes Buried in Controlled Low-Strength Material Using 3D Nonlinear Finite-Element Analysis. *International Journal of Geomechanics*, 15(6), 04014088. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000436](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000436)
- Discover Water. (2021). Leaking pipes. <https://discoverwater.co.uk/leaking-pipes>
- Ecopetrol. (2013). Tipos de interferencias y sus parámetros identificados. Gestión institucional de gerencia con terceros.
- Elshesheny, A., Mohamed, M., Nagy, N. M., & Sheehan, T. (2019). Numerical behaviour of buried flexible pipes in geogrid-reinforced soil under cyclic loading. *Computers and Geotechnics*, 122(July 2019), 103493. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103493>
- Elshesheny, A., Mohamed, M., & Sheehan, T. (2020). Protection of buried rigid pipes using geogrid-reinforced soil systems subjected to cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106210>
- Emami Saleh, A., Hojat Jalali, H., Pokharel, A., & Abolmaali, A. (2021). Deformation of buried large diameter steel pipes during staged construction and compaction-case study and finite element analysis. *Transportation Geotechnics*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100649>
- Fattah, M. Y., Hassan, W. H., & Rasheed, S. E. (2018). Behavior of flexible buried pipes under geocell reinforced subbase subjected to repeated loading. *International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering*, 9(1), 22–41. <https://doi.org/10.4018/IJGEE.2018010102>
- Fattah, M. Y., Zbar, B. S., & Al-Kalali, H. H. M. (2016). Three-dimensional finite element simulation of the buried pipe problem in geogrid reinforced soil. *Journal of Engineering*, 22(5), 60–73. <https://joe.uobaghdad.edu.iq/index.php/main/article/view/218>
- Goltabar, A. M., & Shekarchi, M. (2010). Investigation of traffic load on the buried pipeline by using of real scale experiment and plaxis-3D software. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2(2), 107–113
- González, H., Reyes, G. (2014). Análisis comparativo de la teoría de Marston para tuberías enterradas y la modelación numérica con elementos finitos. Universidad Nacional de Colombia.
- Hegde, A. M., & Sitharam, T. G. (2015). Experimental and numerical studies on protection of buried pipelines and underground utilities using geocells. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(5), 372–381. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.010>
- Hegde, A., Kadabinakatti, S., & Sitharam, T. G. (2014). Protection of Buried Pipelines Using a Combination of Geocell and Geogrid Reinforcement: Experimental Studies. *January*, 289–298. <https://doi.org/10.1061/9780784413401.029>
- Humphrey DN. Effectiveness of design guidelines for use of Tire Derived Aggregate as lightweight embankment fill. Recycled materials in geotechnics (GSP 127). In: Proceedings of ASCE civil engineering conference and exposition; 2004
- Hsu, Y. S. (2020). Finite element approach of the buried pipeline on tensionless foundation under random ground excitation. *Mathematics and Computers in Simulation*, 169, 149–165. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2019.09.004>
- Karmaker, R. (2019). A Comparative Study on a Buried Pipeline in different soil conditions under static load using ABAQUS Engineering 9790: Subsea Pipeline Engineering Term Project On A Comparative Study on a Buried Pipeline in different soil conditions under static load usi. April 2017.
- Khademi-Zahedi, R. (2019). Application of the finite element method for evaluating the stress distribution in buried damaged polyethylene gas pipes. *Underground Space (China)*, 4(1), 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.05.002>
- Khalaj, O., Azizian, M., Darabi, N. J., Tafreshi, S. N. M., & Jirková, H. (2020). The role of expanded polystyrene and

- geocell in enhancing the behavior of buried HDPE pipes under trench loading using numerical analyses. *Geosciences* (Switzerland), 10(7), 1–15. <https://doi.org/10.3390/geosciences10070251>
- Khalaj, O., Joz, N., Moghaddas, S. N., & Mašek, B. (2017). Protection of Buried Pipe under Repeated Loading by Geocell Reinforcement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 95(2). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/2/022030>
- Kluszczewicz, B. (2013). Numerical 3D Analysis of Buried Flexible Pipeline. *European Scientific Journal*, 9(36), 93–101. <http://eujournal.org/index.php/esj/article/view/2214>
- Lozada, C., Garzón, L. X., & Campagnoli, S. X. (2021). Geotechnical centrifuge application in the teaching of applied soil mechanics. *Educación En Ingeniería*, 10(20), 1–2.
- Mahgoub, A., & El Naggar, H. (2020). Coupled TDA–Geocell Stress-Bridging System for Buried Corrugated Metal Pipes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(7), 04020052. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002279](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002279)
- Ma, Q., Ku, Z., Xiao, H., 2019. Model tests of earth pressure on buried rigid pipes and flexible pipes underneath expanded polystyrene (EPS). *Adv. Civ. Eng.* 2019, 13. <https://doi.org/10.1155/2019/9156129>.
- Mahgoub, A., & El Naggar, H. (2019). Using TDA as an Engineered Stress-Reduction Fill over Preexisting Buried Pipes. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 10(1), 04018034. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ps.1949-1204.0000362](https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000362)
- Meguid, M. A., & Youssef, T. A. (2018). Experimental investigation of the earth pressure distribution on buried pipes backfilled with tire-derived aggregate. *Transportation Geotechnics*, 14, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.11.007>
- Mill-Pro. (2019). Concrete encasement of flexible plastic pipes. Technical note. Mill-Pro, Hong Kong. <http://millpro.com.hk/>
- Neves, J. B., Saboya, F., & Esquivel, E. R. (2021). Geotechnical centrifuge and numerical modelling of buried pipelines. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 21(1), 18–25. <https://doi.org/10.1680/jphmg.18.00092>
- Ordóñez, J. A. R., Valencia, D. M. R., Otero, A. C., & Ordóñez, M. P. (2007). Análisis mediante modelos físicos de interacción suelo-estructura en tuberías enterradas. *Ingeniería* 17(1), 61–76.
- Park, J., Chung, Y., & Hong, G. (2020). Reinforcement effect of a concrete mat to prevent ground collapses due to buried pipe damage. *Applied Sciences* (Switzerland), 10(16). <https://doi.org/10.3390/AP10165439>
- Pires, A. C. G., & Palmeira, E. M. (2021). The influence of geosynthetic reinforcement on the mechanical behaviour of soil-pipe systems. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(5), 1117–1128. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.03.006>
- Rakitin, B., & Ming, X. (2016). Centrifuge Modeling of Large Diameter Underground Pipes Subjected To Heavy Traffic Loads. *Bulletin of South Ural State University Series “Construction Engineering and Architecture,”* 16(3), 31–46. <https://doi.org/10.14529/build160305>
- Rakitin, B., & Xu, M. (2015). Centrifuge testing to simulate buried reinforced concrete pipe joints subjected to traffic loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(11), 1762–1774. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0483>
- Saboya, F. A., Santiago, P. de A. C., Martins, R. R., Tibana, S., Ramires, R. S., & Araruna, J. T. (2012). Centrifuge Test to Evaluate the Geotechnical Performance of Anchored Buried Pipelines in Sand. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 3(3), 84–97. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ps.1949-1204.0000105](https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000105)
- Saboya, F., Tibana, S., Reis, R. M., Durand, A., & Rangel, C. M. de A. (2020). Centrifuge and numerical modeling of moving traffic surface loads on pipelines buried in cohesionless soil. *Transportation Geotechnics*, 23(February), 100340. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100340>
- Sharp, K. D., Anderson, L. R., Moser, A. P., & Bishop, R. R. (1985). Finite-Element Analysis Applied To the Response of Buried Frp Pipe Under Various Installation Conditions. *Transportation Research Record*, 63–72. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(86\)90497-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(86)90497-3)
- Si Xi, Z., Ying, W., & Peng, J. (2019). Reliability analysis of buried polyethylene pipeline subject to traffic loads. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(10), 1–11. <https://doi.org/10.1177/1687814019883785>
- Tavakoli, G., Moghaddas, S. N., & Dawson, A. R. (2015). Numerical analysis on buried pipes protected by combination of geocell reinforcement and rubber-soil mixture. *International Journal of Civil Engineering*, 13(2B), 90–104.
- Quin, X. Wang, Y. (2021). Reliability-based design of rigid pipes installed by induced trench method with tire-derived aggregate inclusions. *Computers and Geotechnics*, Vol 140. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104456>.
- Xia, Y., Jiang, N., Zhou, C., Meng, X., Luo, X., & Wu, T. (2021). Theoretical solution of the vibration response of the buried flexible HDPE pipe under impact load induced by rock blasting. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106743>
- Yang, C., & Li, S. (2021). Theoretical analysis and finite element simulation of pipeline structure in liquefied soil. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07480>