



# Estudio experimental del comportamiento mecánico de tuberías enterradas sometidas a ciclos de carga térmica

## Experimental study on the mechanical behavior of buried pipelines subjected to thermal load cycles

Antonio Vidal <sup>1</sup>, Junes Villarraga-Ossa <sup>2</sup>, Carlos Graciano <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. Orcid: [0000-0003-0595-8763](https://orcid.org/0000-0003-0595-8763). Correo electrónico: [antoniovidal@usb.ve](mailto:antoniovidal@usb.ve)

<sup>2</sup> Grupo de Diseño Mecánico, Universidad de Antioquia, Colombia. Orcid: [0000-0002-7893-5362](https://orcid.org/0000-0002-7893-5362). Correo electrónico: [junes.villarraga@udea.edu.co](mailto:junes.villarraga@udea.edu.co)

<sup>3</sup> Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil, Colombia. Orcid: [0000-0003-0659-7963](https://orcid.org/0000-0003-0659-7963). Correo electrónico: [cagracionog@unal.edu.co](mailto:cagracionog@unal.edu.co)

Recibido: 12 agosto, 2023. Aceptado: 27 enero, 2024. Versión final: 3 marzo, 2024.

### Resumen

En este trabajo se presenta un estudio experimental sobre el comportamiento mecánico de tuberías enterradas sometidas a ciclos de carga térmica. En primer lugar, se miden los esfuerzos y las deformaciones de manera experimental sobre una tubería enterrada sometida a cargas térmicas monotónicas y cíclicas, reproduciendo de esta manera las condiciones típicas de operación de sistemas de tubería enterrados. Posteriormente, se elabora un modelo numérico usando el método de los elementos finitos, el cual se validó utilizando los resultados obtenidos experimentales. A continuación, este modelo computacional se utilizó para llevar a cabo un estudio paramétrico de la influencia de las propiedades mecánicas del suelo sobre en el estado de esfuerzos del sistema. Finalmente, a partir de los resultados tanto experimentales como numéricos se concluyó que el caso más crítico para la tubería enterrada corresponde al primer ciclo de carga térmica y que las demás variables estudiadas tienen poco impacto.

**Palabras clave:** estudio experimental; análisis de esfuerzos en tuberías; comportamiento mecánico; cargas térmicas; elementos finitos; tuberías enterradas; mecánica de suelos; ingeniería geotécnica; ingeniería de petróleo; modelado numérico.

### Abstract

This paper presents an experimental study on the mechanical behavior of buried pipes subjected to thermal load cycles. Firstly, stresses and deformations are measured experimentally on a buried pipe subjected to monotonic and cyclic thermal loads, hence reproducing the typical operating conditions of buried piping systems. Subsequently, a numerical model is developed using the finite element method, which is validated using the results obtained experimentally. Subsequently, this computational model was used to carry out a parametric study of the influence of the mechanical properties of the soil on the stress state of the system. Finally, from the results obtained experimentally and numerically, it is concluded that the most critical situation in terms of stresses takes place when

the pipe is firstly placed into operation, i.e. in the first cycle of thermal load and the other variables studied have little impact.

**Keywords:** experimental study, piping stress analysis; mechanical behavior; thermal loads; finite elements; buried pipes; soil mechanics; geotechnical engineering; petroleum engineering; numerical modeling.

## 1. Introducción

En la actualidad, los sistemas de tuberías enterradas se emplean como medio de transporte para recursos vitales como gas y crudos. También son comúnmente utilizadas en proyectos de recuperación en refinerías, explotación de pozos de petróleo y para el transporte de todo tipo de productos esenciales [1], [2]. En muchos de estos casos las temperaturas de trabajo pueden superar los 100 °C. Esta situación ha traído como consecuencia el surgimiento de un nuevo problema, el estudio de la interacción entre tuberías enterradas y el sustrato en el que se encuentran, con el fin de determinar los esfuerzos generados en la tubería y sobre el terreno [3], [4] y facilitar así el proceso de diseño de estos sistemas.

Las normas para el diseño de sistemas de tuberías ASME B31.4 [5] (*Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries*) y ASME B31.8 [6] (*Gas Transmission and distribution Piping Systems*) definen los esfuerzos admisibles y las condiciones que deben ser consideradas en el diseño de tuberías enterradas, estas normas están basadas en los estudios [7], [8]. Sin embargo, estos códigos no proveen pauta alguna en lo referente al tratamiento de la interacción de la estructura con el sustrato, cómo se afectan los esfuerzos por las imperfecciones iniciales que se introducen en el sistema, los gradientes de temperatura ni los procesos de calentamiento y enfriamiento del fluido y la tubería, entre otros, todos estos factores son importantes durante la realización del cálculo de esfuerzos. Los códigos establecen además cual debe ser el espesor mínimo de la tubería asumiendo que se encuentra totalmente restringida, sujeta a un cambio de temperatura y a una presión de operación. Estos modelos han sido cuestionados [1], [9] debido a que en aplicaciones reales las tuberías no se encuentran sometidas a estas condiciones y hasta la actualidad el comportamiento de este tipo de tuberías no es comprendido completamente.

Las características especiales a las que se ve sometida una tubería enterrada hacen que su diseño sea diferente del proceso típico. En estudios previos varios autores han estudiado la interacción entre el sustrato y la tubería [10], [11], [12], [13], pero en escenarios muy particulares en los cuales el efecto de la temperatura ha sido secundario, por otro lado, las imperfecciones y sus efectos en los esfuerzos y el pandeo han sido analizados [14], [15], [16], [17]. En este trabajo se estudia el efecto

de la temperatura en el comportamiento mecánico de tuberías enterradas. En primer lugar, se realiza un estudio experimental en el cual una tubería enterrada es sometida a cargas térmicas de manera monotónica y cíclica. Posteriormente, se elabora un modelo computacional utilizando el método de los elementos finitos. Este modelo se valida con los resultados experimentales, para luego llevar a cabo un estudio paramétrico, en el cual se estudia el efecto de las propiedades del suelo sobre el estado de esfuerzos en la tubería. Finalmente, los resultados indican que la condición más crítica para tubería ocurre cuando ésta entra en operación por primera vez.

## 2. Materiales y métodos

En esta sección se establecen los parámetros para la realización de los experimentos mediante las condiciones típicas de operación de una tubería enterrada. Estos resultados luego serán utilizados para la validación del modelo computacional.

### 2.1. Análisis experimental

El estudio experimental se lleva a cabo utilizando un banco de pruebas diseñado e instrumentado para el estudio del comportamiento mecánico de tuberías enterradas.

### 2.2. Descripción banco de pruebas

Utilizando el banco de pruebas se realiza el estudio de los cambios en el estado de esfuerzos en una tubería enterrada sometida a un cambio de temperatura, se estudia el efecto de la restricción del suelo sobre los esfuerzos en la tubería para el caso de una carga térmica monotónica (calentamiento únicamente) y para cargas térmicas cíclicas (calentamiento-enfriamiento-calentamiento). En la Figura 1 se muestra el esquema general del montaje. En su construcción se empleó una tubería de acero al carbono con un diámetro nominal de 2 pulgadas y espesor estándar de 0.154 pulgadas ( $\phi 2''$  Sch. STD), con una longitud enterrada de 10 m, a una profundidad de 0.35 m, siguiendo las recomendaciones dadas para este tipo de tubería [18]. El banco de pruebas consta de una bomba de 0.75 HP para la recirculación del agua, un tanque de succión para la bomba, un calentador de 80 litros y tres resistencias eléctricas.

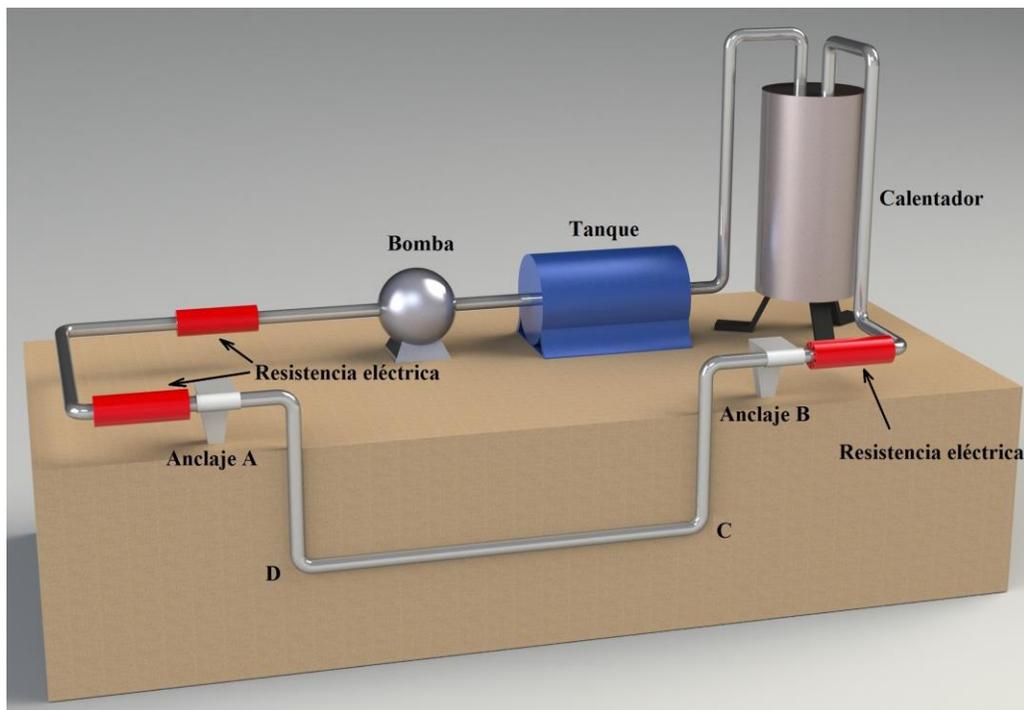


Figura 1. Representación esquemática del montaje experimental. Fuente: elaboración propia.

Tres resistencias adicionales compensan la pérdida de calor de la tubería en el tramo enterrado, permitiendo que el circuito alcance una temperatura estable. El resto de la tubería se encuentra aislada con fibra de vidrio para minimizar las pérdidas térmicas. El presente arreglo permite calentar la tubería hasta alcanzar una temperatura de 55 °C. El banco está instrumentado con galgas extensométricas, termocuplas y manómetros para la medición de las deformaciones y la temperatura en la tubería, el suelo y el ambiente durante las pruebas.

Los desplazamientos de la tubería se encuentran restringidos de movimiento en los puntos en los que ésta se entierra y aflora del suelo (Anclajes A y B en la Figura 1). De esta manera se garantiza que la sección más crítica de la porción enterrada se encuentra en los codos (Puntos C y D), los cuales son los puntos de interés en el presente estudio experimental. Las deformaciones en las cercanías del codo (Punto C), fueron determinadas mediante el uso de tres galgas extensométricas (roseta delta de  $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$ ) que permiten caracterizar completamente el estado de esfuerzos en el punto.

La Figura 2, muestra la ubicación de galgas en el codo (Punto C) y en la tubería, y las termocuplas para medir la temperatura del tubo y del suelo durante el experimento. La galga en el tramo recto de la tubería se ubicó a una distancia de 50 cm (10 diámetros

nominales) de la línea centroidal del codo. Las galgas empleadas fueron del tipo 202YMR3-45ESTK de 120 Ohms y factor de galga,  $FG=2,02$  fabricadas por Dentronics para trabajar a alta temperatura y autocompensadas térmicamente.

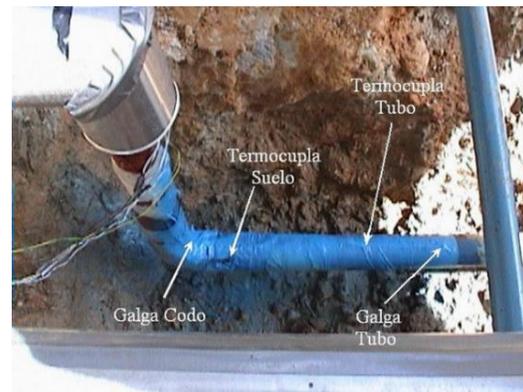


Figura 2. Arreglo de galgas extensométricas y detalle del codo instrumentado. Fuente: elaboración propia.

### 2.3. Propiedades mecánicas de la tubería y el suelo

Las propiedades mecánicas del material de la tubería se determinaron tomando tres probetas planas, a partir de un segmento de la tubería. Con este fin se realizaron ensayos de tensión empleando la norma ASTM E8 / E8M [19] en una máquina universal de ensayos MTS

con una capacidad de 50 kN. Las propiedades promedio obtenidas de los ensayos de tensión se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Resultados de los ensayos de tensión

$S_y$ (MPa)	$S_{max}$ (MPa)	$E$ (GPa)
373.9	541.5	202.5

Fuente: elaboración propia.

En la **Tabla 1**,  $S_y$  es el esfuerzo de fluencia del material de la tubería,  $S_{max}$  es el esfuerzo máximo de tracción, y  $E$  el módulo de elasticidad de la tubería.

La arena (seca) empleada para enterrar la tubería fue traída de una región de Venezuela (*Temblador*), bien gradada, para garantizar una adecuada resistencia la corte, con una composición de 99,7% de sílice y un tamaño de partícula de 400  $\mu\text{m}$  de diámetro promedio, un ángulo de fricción de 37° y un módulo elástico de 25 MPa. El comportamiento del suelo se modeló basado en la mecánica de medios continuos [20], lo cual permite simular el suelo con un amplio rango de parámetros y permite tener una mejor comprensión de la interacción suelo-tubería [2], [21].

### 3. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados experimentales y numéricos, el estudio paramétrico y se realiza el análisis correspondiente.

#### 3.1. Resultados de experimentales

Para capturar las condiciones típicas de operación de sistemas de tubería enterradas se realizaron dos tipos de ensayos en el banco de pruebas:

- Ensayo I: Consistió en carga monotónica de la tubería enterrada, se calentó la tubería hasta una temperatura de 55 °C, las deformaciones se midieron durante todo el proceso.
- Ensayo II: Consistió en carga cíclica de la tubería, primero se calentó hasta alcanzar una temperatura de 55 °C, posteriormente se enfría el sistema, y por último se calienta de nuevo hasta los 55 °C.

El Ensayo I representa las condiciones iniciales (puesta en funcionamiento de un sistema nuevo) a los que este tipo de sistemas se ven sometidos, mientras que el Ensayo II comprende escenarios posteriores a los que este tipo de sistemas de tuberías se ven expuestos debidos principalmente a paradas por mantenimiento o

interrupciones de producción. Todos los resultados se reportan en términos del esfuerzo equivalente de von Mises  $\sigma_e$  definido como [22]:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2} \quad (1)$$

donde  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  son los esfuerzos principales en el punto.

Como un primer paso, se midió el esfuerzo en el codo cuando éste se encontraba al descubierto (sin arena) mientras el resto de la tubería estaba cubierta. Esta prueba se realizó con la finalidad de minimizar el efecto que la restricción impuesta por el suelo restante y poder comparar con el modelo numérico. En la **Figura 3** se muestran los resultados obtenidos para el caso de carga térmica monotónica para el codo descubierto. La **Figura 3a**, muestra la temperatura de la tubería, el suelo y el ambiente en función del tiempo, y la **Figura 3b** muestra la variación del esfuerzo equivalente en el codo a través del tiempo.

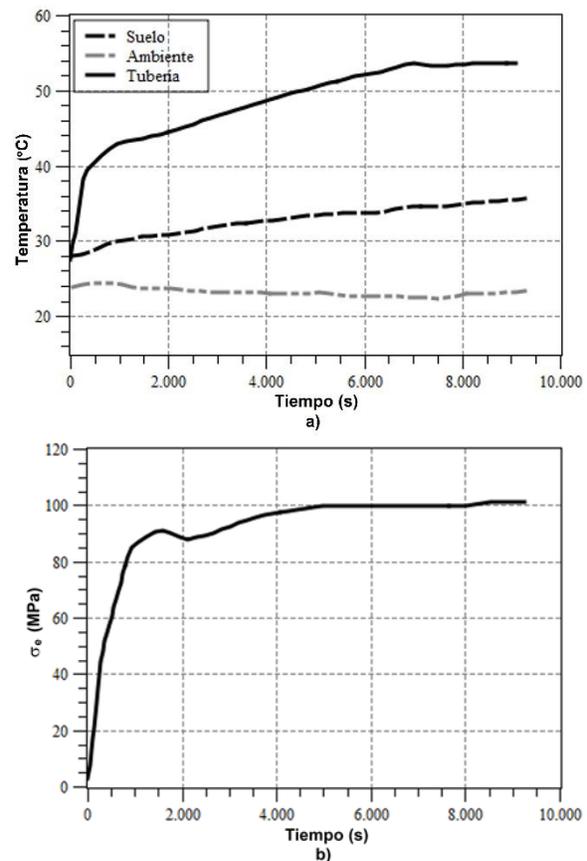


Figura 3. Resultados del ensayo térmico monotónico: (a) Perfiles de temperatura; (b) Esfuerzos de von Mises en la tubería. Fuente: elaboración propia.

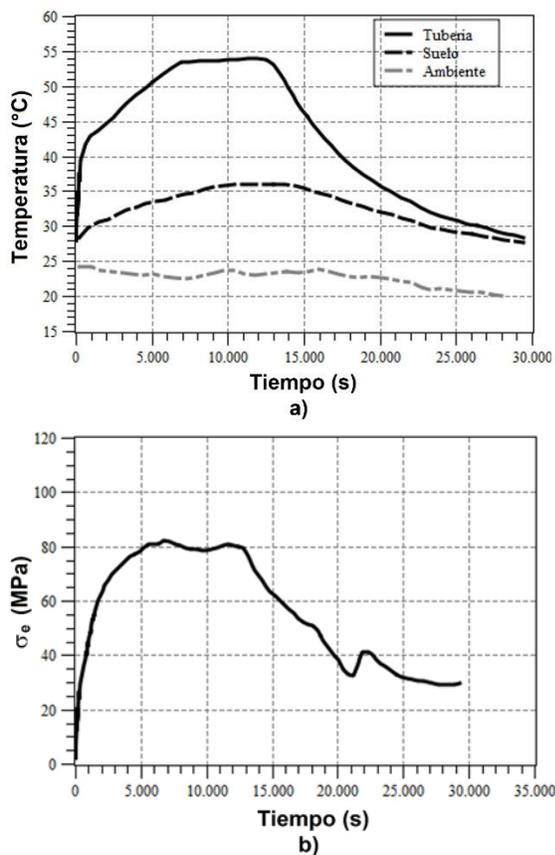


Figura 4. Resultados para el caso de carga térmica cíclica: (a) Perfiles de temperatura; (b) Esfuerzo equivalente de von Mises en la tubería. Fuente: elaboración propia.

La Figura 4 muestra los resultados para el caso de carga y descarga térmica (calentamiento y enfriamiento), una vez colocada la arena en el área del codo, es decir para el suelo virgen en el área del codo, sin ninguna deformación previa. El resto del suelo que cubre la tubería ha sido previamente deformado en la prueba monotónica. En la Figura 4b se muestra que el valor máximo del esfuerzo equivalente en el codo se reduce un 20% de 100 MPa a 80 MPa, en comparación al caso monotónico con 100 MPa, debido a la presencia del suelo. Este resultado parece contradecir a lo esperado que debiera ser un incremento en el esfuerzo debido a que el sistema se ha rigidizado [22]. Sin embargo, hay que considerar que gran parte del suelo ha sido deformado previamente. En este sentido, la naturaleza no lineal del comportamiento mecánico del suelo, que posee muy poca capacidad de restitución elástica, explica que exista una reducción en los esfuerzos, ya que una vez deformado, el suelo ofrece una menor restricción a la deformación para cuando la tubería vuelve a ser calentada a las mismas condiciones de

operación, reduciendo entonces los esfuerzos en el codo de la misma. Sin embargo, esto no afecta la condición para carga térmica cíclica del sistema.

La Figura 5 muestra los resultados para carga cíclica (calentamiento y enfriamiento), pero tras haber deformado el suelo previamente. En esta se puede observar que los esfuerzos en el codo alcanzan un máximo de 65 MPa. Esto corresponde a una reducción de un 19% con respecto al caso de la Figura 4 con el suelo virgen en el codo. Sin embargo, cuando la tubería se calienta nuevamente hasta la misma temperatura de operación, los esfuerzos en el codo prácticamente no cambian. Este comportamiento es de esperarse, de acuerdo a lo explicado anteriormente acerca del comportamiento no lineal del suelo.

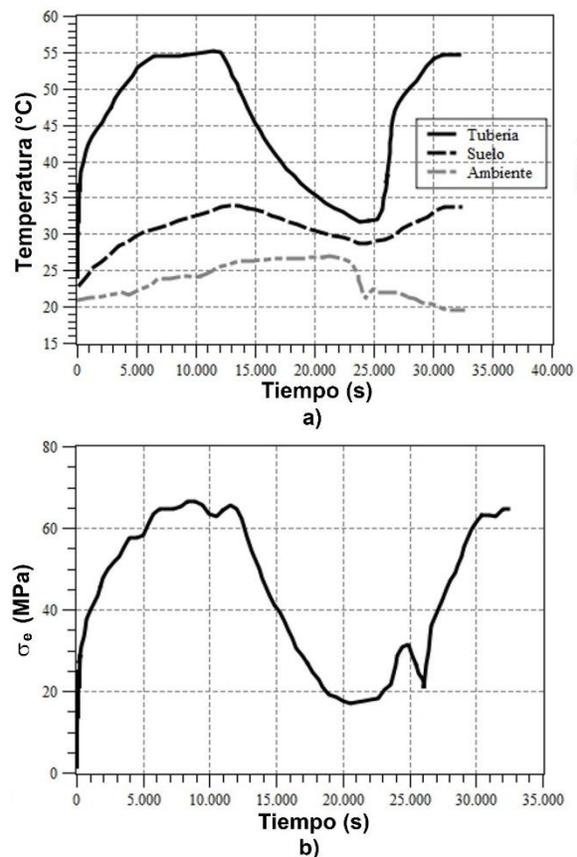


Figura 5. Resultados para el caso de carga térmica cíclica en suelo precargado: (a) perfiles de temperatura; (b) esfuerzo equivalente de von Mises en la tubería. Fuente: elaboración Propia.

Estos resultados ofrecen una conclusión importante y es que el caso más crítico de carga en una tubería enterrada corresponde a la primera vez en que ésta entra en operación. Una vez que la tubería salga de servicio y

vuelva a ser puesta en operación, los esfuerzos se ven reducidos si las condiciones de operación se mantienen iguales. Físicamente lo que ocurre es que se generan holguras entre la tubería y el suelo tras la primera deformación causada por el gradiente de temperatura, esta holgura reduce los esfuerzos considerablemente ya que el suelo opone menor resistencia durante ese período de deformación de la tubería.

### 3.2. Análisis numérico

En el área del procesamiento del petróleo, las simulaciones numéricas se han convertido en una herramienta muy útil para predecir el comportamiento y para el análisis de fallas en equipos petroleros [23], [24], [25].

En este trabajo el modelo numérico se elaboró usando ANSYS [26]. En la definición de la geometría del problema se tomó ventaja de la simetría inherente al banco de pruebas, y por ello se tomó tan solo la mitad de la longitud de tubería enterrada y la mitad de la sección de la misma, la Figura 6a muestra la geometría empleada.

Este modelo corresponde a las pruebas experimentales realizadas en las que parte del suelo ha sido deformado previamente a enterrar el codo de la tubería. Las dimensiones de la porción de suelo, la profundidad a la que la tubería ha sido enterrada y la altura de afloramiento con respecto al nivel del suelo se muestran en la Figura 6b. Las dimensiones del volumen de suelo fueron seleccionadas basadas en el hecho de que éstas definen el dominio de influencia del problema.

En cuanto a las condiciones de borde del problema, se consideraron las siguientes: condición de empotramiento en ambos extremos de la tubería y condición de simetría en la sección media de la misma, en el suelo se colocaron condiciones de simetría en todas las superficies excepto en la superior que se dejó libre por representar la superficie del suelo. Adicionalmente, la porción de tubería enterrada recta que no posee suelo de contacto fue restringida de movimiento vertical. La interacción entre la tubería y el suelo fue modelada a través de una restricción de contacto sin fricción entre la superficie de la tubería y la del suelo en contacto con la misma. Cabe señalar que el modelo considera únicamente el efecto del cambio de temperatura en la tubería, el peso del suelo y la tubería no es considerado en este caso (la tubería se considera asentada en el suelo).

En la construcción del modelo de elementos finitos se tomaron las propiedades mecánicas definidas en la Tabla 1 para la tubería, con un módulo de Poisson,  $\nu = 0,3$  y un coeficiente de expansión térmica,  $\alpha = 1,12 \times 10^{-5}/^{\circ}C$ . El suelo se trató como un material no-lineal, específicamente como un material elastoplástico. Se empleó el modelo de Mohr-Coulomb para la ley de endurecimiento (resistencia del suelo) y la teoría de Drucker para la ley de flujo o deformación plástica. El modelo de Mohr-Coulomb es el comúnmente empleado para describir suelos granulares como el involucrado en este estudio y se expresa mediante

$$\tau_{ff} = c + \sigma_{ff} \tan(\phi) \quad (2)$$

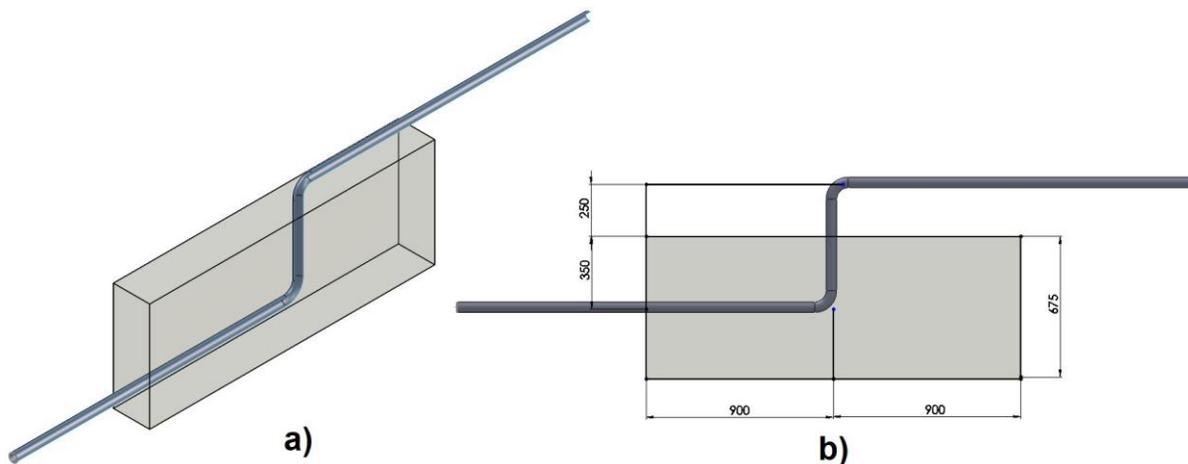


Figura 6. Modelo de la tubería enterrada: (a) Modelo 3D; (b) Geometría y dimensiones (mm).

Fuente: elaboración propia.

donde  $c$  es la cohesión,  $\tau_{ff}$  es el esfuerzo de corte en la condición de falla,  $\sigma_{ff}$ , el esfuerzo normal en la condición de falla y  $\phi$  el ángulo de fricción, este modelo es una buena aproximación para la simulación de suelos, debido a su facilidad de implementación, su respuesta lineal permite la discretización del modelo ya que no requiere muchos parámetros, como desventaja su respuesta no tiene en cuenta la dilatación ocasionada por el aumento de temperatura; la calibración de este modelo se realizó según lo reportado por Colasanti [21]. El valor de la cohesión se asumió en 0.038 MPa [27], debido a su tamaño de grano uniforme y a la condición seca de la misma. Por otro lado, el valor del ángulo de fricción se obtuvo de los valores obtenidos para el suelo para la verificación del experimento y fue uno de los parámetros a variar en los estudios numéricos que se llevaron a cabo. Para las relaciones esfuerzo-deformación en el rango elástico, se asumió un módulo de Poisson  $\nu = 0.3$  [27], y el módulo de elasticidad,  $E$ , también se tomó de los datos del suelo para la verificación con los datos experimentales y se varió para el estudio numérico.

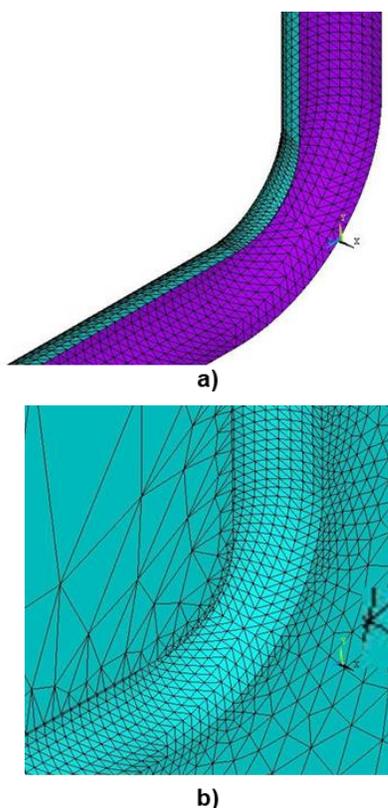


Figura 7. Detalle del modelo por elementos finitos para (a) el codo de la tubería; (b) el suelo que lo rodea. Fuente: elaboración propia.

El suelo se modeló con elementos sólidos tetrahedrales, y elementos triangulares tipo *Shell* para la tubería, tomando en cuenta el espesor de la misma en la definición del elemento. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de convergencia, obteniéndose un modelo con 425.620 grados de libertad. El análisis de convergencia se detuvo al alcanzar una variación en los esfuerzos máximos del 0.6% para la tubería y 2% para el suelo. La Figura 7 muestra detalles del mallado por elementos finitos en el codo y en la zona del suelo cercana, que es la zona donde ocurren las mayores deformaciones del mismo.

### 3.3. Estudio paramétrico

En la Tabla 2 se muestra el rango de los parámetros variados en el estudio paramétrico. El efecto de las propiedades del suelo (módulo de elasticidad  $E_s$  y ángulo de fricción  $\phi$ ) sobre el esfuerzo máximo en el codo de la tubería fueron analizados.

Tabla 2. Diseño de experimentos utilizado en el estudio numérico

Experimento	1	2	3	4	5	6
$E_s$ (MPa)	13.8	23.8	33.8	43.8	53.8	63.8
$\phi$ (°)	37	37	37	37	37	37
Experimento	7	8	9	10	11	12
$E_s$ (MPa)	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
$\phi$ (°)	28	30	34	36	40	42

Fuente: elaboración propia.

El rango de las variables empleadas corresponde a valores típicos para suelos granulares (arenas) con granulometría media a fina [27], comúnmente empleados en aplicaciones con tuberías enterradas. La Figura 8 muestra el efecto del módulo de elasticidad sobre el esfuerzo máximo en el suelo y en el codo enterrado de la tubería.

Al contrario de lo obtenido para el módulo de elasticidad, el esfuerzo máximo en el codo de la tubería enterrada decrece con el ángulo de fricción tal como se observa en la Figura 9. Esto se debe a que, para un mayor ángulo de fricción, el suelo granular alcanza la condición de deformación plástica a un menor esfuerzo [21], [27], tras lo cual éste no opone resistencia a la deformación (reduce la rigidez) dando lugar a un menor esfuerzo en la tubería. Este comportamiento también es demostrado en investigaciones de tuberías no rígidas [1], y presenta una relación análoga al reportado en

investigaciones de tuberías para transporte de aguas a temperatura ambiente [28].

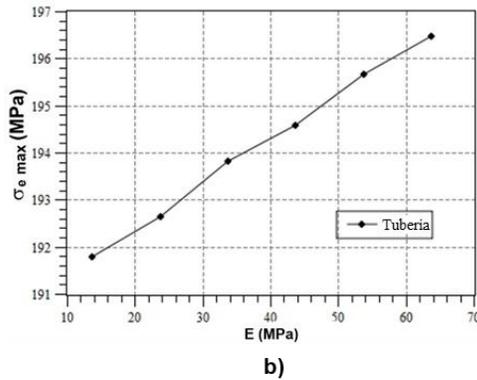


Figura 8. Efecto del módulo de elasticidad del suelo sobre los esfuerzos máximos en (a) el suelo, (b) en la tubería enterrada. Fuente: elaboración propia.

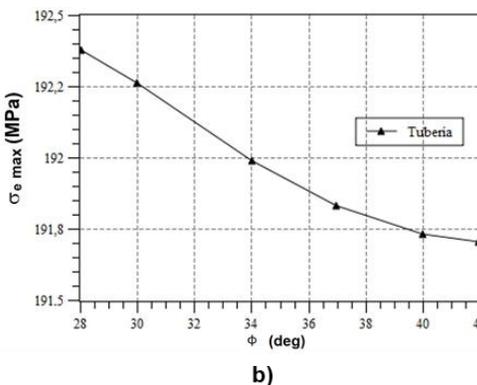
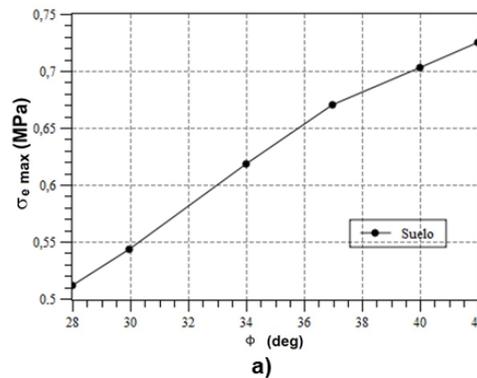


Figura 9. Efecto del módulo de elasticidad del suelo sobre los esfuerzos máximos (a) en el suelo; (b) en la tubería enterrada. Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, la variación en el esfuerzo máximo es de menos del 0,5% en el rango estudiado. La comparación numérica de los experimentos se muestra en la Figura 10, donde se tiene una gráfica del esfuerzo equivalente de von Mises en el codo para una condición de carga

térmica de 30 °C, en esta se puede observar que los esfuerzos en el codo, arrojan un valor de 103 MPa, lo cual es muy cercano al valor de 100 MPa determinado experimentalmente para el caso de carga monotónica con el suelo virgen, lo cual demuestra una excelente capacidad predictiva para el modelo.

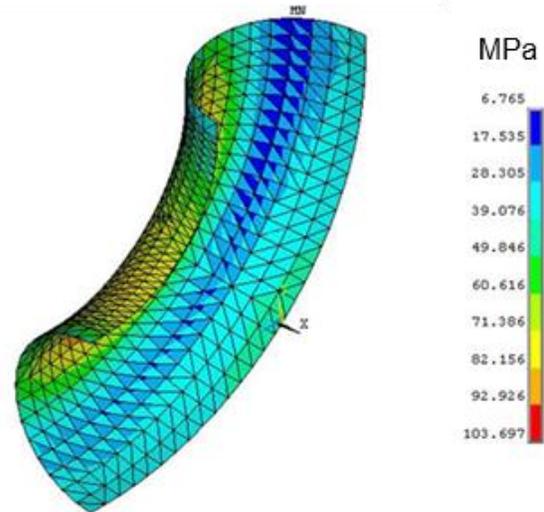


Figura 10. Distribución de esfuerzos de von Mises en el codo para las condiciones del ensayo experimental. Fuente: elaboración propia.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se realizó un estudio experimental y numérico en tuberías enterradas sometidas a ciclos de carga montónica y cíclica. De los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente: la peor condición de carga para las tuberías enterradas es la correspondiente a la puesta en operación de la tubería pues corresponde al escenario de mayor rigidez del suelo.

La poca restitución elástica del suelo tras existir deformación da lugar a holguras entre la tubería y el suelo que contribuyen a reducir los esfuerzos térmicos en la tubería en sucesivas puestas en operación, los resultados numéricos arrojan que, para el rango de valores del módulo de elasticidad estudiado el esfuerzo máximo en el codo enterrado de la tubería no se ve afectado de forma significativa, incrementándose, sin embargo, con el módulo de elasticidad.

El ángulo de fricción tiene relativamente poca influencia sobre el esfuerzo máximo en el codo enterrado de la tubería, con variaciones que no superan el 1% para todo el rango de ángulos de fricción estudiado y que comprenden los valores típicos de los suelos arenosos.

La tendencia de los resultados indica una reducción en el esfuerzo máximo con el ángulo de fricción, esto debido a que los suelos con un mayor ángulo de fricción alcanzan la deformación plástica más rápidamente (menor deformación). Por último, el modelo de Mohr-Coulomb para suelos no-cohesivos resulta satisfactorio para el análisis de esfuerzos de tuberías enterradas en suelos arenosos y sujetas a cambios de temperatura.

Para estudios futuros, se recomienda analizar diferentes tipos de sustrato y de compactación, para ver su influencia y ampliar los resultados presentados por esta investigación.

### Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen a la Universidad Simón Bolívar por facilitar sus instalaciones en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos, las cuales permitieron la realización de los ensayos experimentales, así como a todas las personas que de alguna manera contribuyeron con la realización de este estudio.

### Financiación

No aplica.

### Contribución de los autores

A. Vidal: conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, redacción –borrador original. J. Villaraga-Ossa: metodología, validación, visualización, redacción –revisión y edición. C. Graciano: conceptualización, supervisión, metodología, validación, visualización, redacción –borrador original, redacción –revisión y edición. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

### Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

### Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

### Declaración de consentimiento informado

No aplica.

### References

- [1] R. Saadeldin, Y. Hu, A. Henni, “Numerical analysis of buried pipes under field geo-environmental conditions,” *International Journal of Geo-Engineering*, vol. 6, no. 1, p. 1-22, 2015, doi: <https://doi.org/10.1186/s40703-015-0005-4>
- [2] D. Wijewickreme, “Role of geotechnical engineering in assuring the integrity of buried pipeline systems,” International conference on sustainable built environments. Kandy, Sri Lanka, 2012.
- [3] M. M. Shahzamanian, M. Kainat, N. Yoosef-Ghods, S. Adee, “Systematic literature review of the application of extended finite element method in failure prediction of pipelines,” *Journal of Pipeline Science and Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 241-251, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.02.003>
- [4] J. Zhang, R. Xie, T. Zheng, G. Lu, J. Y. Xu, “Buckling behavior of buried pipe crossing stratum subsidence area”, *Engineering Failure Analysis*, vol. 135, 106130, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106130>
- [5] American Society of Mechanical Engineers. ASME B 31.4. Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids. 2013.
- [6] American Society of Mechanical Engineers. ASME B 31.8. Gas Transmission and Distribution Piping Systems. 2013.
- [7] L. Peng, “Stress analysis methods for underground pipe lines. Part 2,” *Pipe Line Industry*, pp. 65-75, 1978.
- [8] L. Peng, “Stress Analysis Methods for Underground Pipe Lines. Part 1,” *Pipe Line Industry*, pp. 67-71, 1978.
- [9] P. F. Liu, J. Y. Zheng, B. J. Zhang, P. Shi, “Failure analysis of natural gas buried X65 steel pipeline under deflection load using finite element method,” *Materials and Design*, vol. 31, no. 3, pp. 1384-1391, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.04>
- [10] Y. Friedmann, “Some Aspects of the Design of Hot Buried Pipelines,” in *Offshore Oil and Gas Pipe Line Technology Conference*, Paris, France, 1986.
- [11] C. P. K. Gallage, J. Kodikara, D. Chan, “Response of a plastic pipe buried in expansive clay,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, vol. 165, no. 1, pp. 45-57, 2011, doi: <https://doi.org/10.1680/geng.9.00037>

- [12] Y. Hu, H. Q. Vu, "Analysis of soil conditions and pipe behaviour at a field site," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 48, no. 6, pp. 847-866, 2011, doi: <https://doi.org/10.1139/t11-010>
- [13] G. Kruisman, K. W. Radder, "Influence of the soil in advanced buried pipe line analysis," in *Offshore Oil and Gas Pipe Line Technology Conference*, Ostend, 1990.
- [14] Y. Friedmann, B. Debouvry, "Analytical design method helps prevent buried pipe upheaval," *Pipe Line Industry*, pp. 23-27, 1992.
- [15] N. J. R. Nielsen, B. Lyngberg, P. T. Pedersen, "Upheaval buckling failures of insulated buried pipelines: A case story," in *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, paper OTC-6488-MS, 1990, doi: <https://doi.org/10.4043/6488-MS>
- [16] P. E. L. Schaminee; N. F. Zorn; G. J. M. Schotman, "Soil response for pipeline upheaval buckling analyses: Full-scale laboratory tests and modelling," in *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, paper OTC-6486-MS, 1990, doi: <https://doi.org/10.4043/6486-MS>
- [17] J. A. Villarraga, J. F. Rodríguez, C. Martínez, "Buried pipe modeling with initial imperfections," *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 126, no. 2, pp. 250-257, 2004, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1688369>
- [18] FLOWTITE, "Installation Guide for Buried Pipes – AWWA," 2016. [Online]. Available: [https://www.flowtite.com/wp-content/uploads/1901\\_Flowtite-Installation-Guide-Buried-Pipes\\_web.pdf](https://www.flowtite.com/wp-content/uploads/1901_Flowtite-Installation-Guide-Buried-Pipes_web.pdf).
- [19] American Society of Testing Materials. ASTM E 8M. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 2004.
- [20] W. F. Chen, Ed., "Chapter 1 - Introduction," in *Developments in Geotechnical Engineering*, vol. 7, Supplement C vols., Elsevier, 1975, pp. 1–14.
- [21] R. Colasanti, J. Hovarth, "Practical subgrade model for improved soil-structure interaction analysis: Software implementation," *Practice periodical on structural design and construction*, vol. 15, no. 4, 2010, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000060](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000060)
- [22] R. Goncalves, *Introducción al Análisis de Esfuerzos*. Caracas: Editorial Equinoccio, 2011.
- [23] L. Espinoza, O.A. González-Estrada, C. Graciano, "Análisis de un interno tipo brida de un recipiente horizontal a presión utilizando elementos finitos", *Revista UIS Ingenierías*, vol. 18, no. 3, pp. 151-156, 2019, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n3-2019015>
- [24] E. Araque, C. Graciano, D.G. Zapata-Medina, O.A. González-Estrada, "Compressive strength of partially stiffened cylinders at elevated temperatures," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 19, no. 1, pp. 131-142, 2020, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n1-2020013>
- [25] C. Graciano, E. Casanova. "Modelado numérico del proceso de izado de un cabezal hemisférico de un regenerador," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 21, no. 3, pp. 101-110, 2022, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n3-2022009>
- [26] ANSYS, "ANSYS Release 19R2 Elements Reference", 2019.
- [27] T. W. Lambe, R. V. Whitman, *Soil Mechanics Si Version*. Wiley India Pvt. Limited, 2008.
- [28] P. Hudak, B. Sadler, B. Hunter, "Analyzing underground water-pipe breaks in residual soils," *Water Engineering Management*, vol. 145, pp. 15–20, 2000.