



Evaluación de esfuerzos por el efecto de grupo de tuberías enterradas.

Evaluation of stresses due to the group effect of buried pipeline.

Van de Velde, Germán¹ ✉; Rinaldi, Víctor²; Viguera, Ricardo³; Ulloa, Horacio⁴

1. Instituto de Geología y Geofísica, UNAN Managua.
2. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC.
3. Consultora de Ingeniería Mediterránea, CIM Group.
4. Instituto de Geología y Geofísica, UNAN Managua.

Recibido: 18/10/2023
Aceptado: 29/11/2023
© 2021-Revista Tierra (Earth Journal) IGG-CIGEO



Este trabajo está licenciado bajo una [Licencia Internacional Creative Commons 4.0 Atribución-NoComercial-CompartirIgual](#).

Resumen

Las tuberías enterradas son ampliamente utilizadas en la industria de la construcción. Los esfuerzos sobre estas dependen de la magnitud y distribución de las cargas externas e internas a la que está sometida, así como también, de las condiciones del suelo, el material y las condiciones geométricas. La falla de una tubería enterrada ocurre cuando las tensiones aplicadas exceden la capacidad estructural de la tubería. El uso de software computacional empleando el método de los elementos finitos es cada vez más frecuente ya que estos permiten incluir una mayor cantidad de condiciones de borde en comparación con las ecuaciones aproximadas. Esto permite evaluar con mayor realismo la problemática. En este trabajo se evalúan los esfuerzos en tuberías obtenidos en diferentes modelos de tuberías enterradas que cumplen función de drenaje superficial en carretera empleando elementos finitos, a partir de los cuales se analiza la influencia del efecto de grupo en la fuerza axial, corte y momento flector que originan las fallas. Los modelos propuestos son válidos para evaluar el efecto de grupo en los esfuerzos de tuberías enterradas y así eliminar las incertidumbres que aparecen al utilizar ecuaciones aproximadas.

Abstract

Buried pipes are widely used in the construction industry. The stresses on these pipes depend on the magnitude and distribution of external and internal loads to which they are subjected, as well as the soil conditions, material, and geometric conditions. The failure of a buried pipe occurs when the applied stresses exceed the structural capacity of the pipe. The use of computational software employing the finite element method is becoming increasingly common as it allows for the inclusion of a greater number of boundary conditions compared to approximate equations. This enables a more realistic assessment of the problem. This work evaluates the stresses in pipes obtained from different models of buried pipes that serve as surface drainage in roads using finite elements. From these models, the influence of the group effect on the axial force, shear, and bending moment that lead to failures is analyzed. The proposed models are valid for evaluating the group effect on the stresses of buried pipes and thus eliminate uncertainties that arise when using approximate equations.

Palabras Claves: mecánica de los suelos, tuberías enterradas, análisis numérico, efecto de grupo, esfuerzos

Keywords: Soil mechanics, Buried pipelines, Numerical analysis, Group effect, Stresse

1. INTRODUCCIÓN

Las tuberías enterradas son ampliamente utilizadas en la industria de la construcción. Estas pueden ser utilizadas en carretera como alcantarillas de drenaje, conducción de agua potable y aguas residuales, entre otros. Las tuberías enterradas empleadas como alcantarillas tienen la función de eliminar el exceso de agua superficial en obras de carretera (Kosaiyakanon y Pisitpaibool, 2022). En general, estas pueden ser ubicadas a profundidad variable, en el eje, los bordes o cruzando la sección transversal de la vía, dependiendo de las especificaciones del proyecto.

El proceso constructivo para su instalación puede ser diferente en cada proyecto. Si la vía existe, la instalación de la tubería se realiza empleando equipos de perforación horizontal o tuneladoras, dependiendo del diámetro de la tubería. Si la vía está en construcción, el proceso de instalación incluye el mejoramiento de la cama de cimentación, apoyo de la tubería sobre el suelo de cimentación y compactación del suelo mejorado en la vecindad y por encima de la clave del tubo.

Para todos los casos, los esfuerzos en una tubería dependen de la magnitud y distribución de las cargas externas e internas a la que está sometida, así como también, las condiciones del suelo, el material del tubo y las propiedades geométricas. La contribución de cada una de estas variables necesita ser determinada e incorporada en los modelos

de predicción de tensiones en tuberías (Merrin et al., 2014).

Spangler (1941) desarrolló la primera ecuación para predecir esfuerzos en tuberías enterradas sometidas a carga de tráfico. Más tarde, Warman et al. (2009) propusieron la ecuación de Spangler modificada combinando la fórmula de Spangler y la fórmula de Iowa.

Merrin et al. (2014) mencionaron que la exactitud al predecir las tensiones en tuberías por medio de estas ecuaciones podría ser cuestionable debido a las siguientes razones: (1) la teoría de Boussinesq es comúnmente utilizada para estimar la carga de tráfico experimentada en la tubería, asumiendo que la masa de suelo cargado es homogénea y desprecia la rigidez de la tubería dentro del suelo; (2) la fórmula de tensión propuesta por Spangler y la fórmula de Iowa involucran un tratamiento inconsistente de la presión interna y el efecto de la resistencia del suelo; (3) las ecuaciones de tensiones están basadas en una distribución de tensiones asumida y aproximada alrededor de la tubería; (4) las variaciones de la densidad del suelo que pueden ocurrir en varias zonas durante la instalación de la tubería no son consideradas; (5) la fricción entre la tubería y el suelo de la vecindad no es considerado. Independientemente de los que menciona Merrin et al. (2014), siempre será conveniente aplicar metodologías analíticas para la evaluación preliminar del problema y después, realizar una comparación cuidadosa con los resultados de modelaciones numéricas.

La falla de una tubería enterrada ocurre cuando las tensiones

aplicadas exceden la capacidad estructural de la tubería. El tipo de falla experimentada por una tubería es dictado por las condiciones de carga a la cual es sometida. Los dos tipos de falla más comunes son las longitudinales y falla circunferencial. Las fallas longitudinales y circunferenciales resultan de la tensión a tracción o compresión actuante en la dirección longitudinal y circunferencial, respectivamente. (Gould et al., 2011). Por estas razones, se han generado un gran número de fallas en tuberías atribuidos principalmente a desplazamientos que ocurren en el terreno, tales como las inducidas por un túnel (Hou et al., 2015), excavaciones (Yoo et al., 2006), deslizamientos (Akagawa et al., 2012) y terremotos (O’rourke y Liu, 1999; Cubrinovski et al., 2011), rellenos recompactados, entre otros.

En la actualidad, el uso de software computacional empleando elementos finitos es cada vez más frecuente ya que estos consideran mayores condiciones de borde en comparación con ecuaciones cerradas que solamente consideran condiciones ideales a las que la tubería está sometida.

El método de los elementos finitos se considera viable para su uso en el dimensionamiento de tuberías enterradas, pues hace posible la consideración de suelos de diferentes tipos y densidades, diferentes y complejas condiciones de carga, variación del tamaño y la rigidez de las tuberías, y por encima de todo permite tener en cuenta la secuencia constructiva en la colocación del tubo. Galvez (2009), Khademi-Zahedi (2018), Kosaiyakanon et al. (2022), Merrin et al. (2014) y Warman y Francini (2009) son algunos autores que investigaron el comportamiento de tuberías enterradas utilizando elementos finitos. Todas estas investigaciones están centradas en la determinación del estado tensional de una sola tubería, sin tener en cuenta el comportamiento por la influencia del efecto de grupo de tuberías.

Este trabajo intenta evaluar el efecto de múltiples cañerías enterradas (efecto de grupo) utilizadas como alcantarillas en carreteras empleando las técnicas numéricas de elementos finitos, a partir de los cuales se analiza la influencia del efecto de grupo en el esfuerzo axial, corte y momento flector que originan las fallas

2. METODOLOGÍA

2.1. Materiales

Este estudio es realizado a partir de un caso real de una alcantarilla que atraviesa el proyecto carretera Autovía Alternativa 8N N° 38, provincia de Córdoba, Argentina, la cual sufrió daños estructurales inmediatamente posterior a su colocación. La Figura 1 muestra la geometría real de la alcantarilla que atraviesa el proyecto carretero. Para su construcción se emplearon tres alcantarillas de Acero de 3 m de diámetro y espesor de pared 4.7 mm. La Tabla 1 muestra las propiedades de las tuberías. La Tabla 2 muestra las propiedades de los suelos considerados.

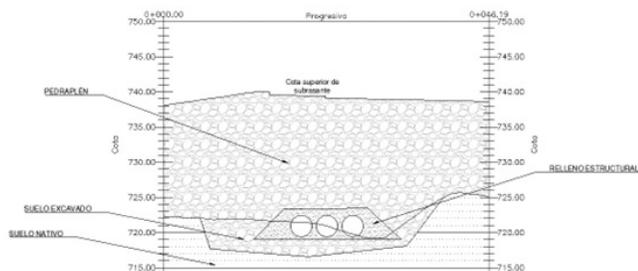


Figura 1. Geometría de la alcantarilla que atraviesa el proyecto carretero Autovía Alternativa 8N

Tabla 1. Propiedades de la tubería

N°	Propiedades	e = 4.7 mm
1	Diámetro [m]	3.00
2	Espesor [m]	0.0047
3	A [m ²]	0.0442
4	R ₁ [m]	1.5000
5	R ₂ [m]	1.4953
6	I [m ⁴]	0.0496
7	E _{acero} [kN/m ²]	206,920,315
8	EA [kN/m]	9,151,477
9	EI [kNm ² /m]	10,263,203

donde: A es el área de la sección, R₁ es el radio exterior, R₂ es el radio interior, I Inercia, E_{acero} el módulo de elasticidad del acero.

Tabla 2. Propiedades de la tubería

N°	Propiedades	Suelo Nativo	Suelo Excavado	Pedraplén	Relleno Estructural
1	γ [kN/m ³]	21	14	19.4	18
2	k _x [m/día]	8.00E-06	1.00E-03	1	864
3	k _y [m/día]	8.00E-06	1.00E-03	1	864
4	E [kN/m ²]	5.00E+07	2000	1.53E+04	1.53E+04
5	v	0.50	0.30	0.30	0.30
6	c [kN/m ²]	150	5	1	1
7	φ [°]	45	25	42	35
8	Crit. Falla	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
9	Comp del material	No Drenado	Drenado	Drenado	Drenado

donde γ es el peso específico, k_x y k_y el coeficiente de permeabilidad en la dirección x, y, E el módulo de elasticidad del suelo, v coeficiente de Poisson, c es la cohesión del suelo y φ el ángulo de fricción del suelo.

2.2. Métodos

La herramienta de cálculo utilizada para determinar las tensiones en las tuberías fue el código de elementos finitos del programa comercial PLAXIS V8.6, que utiliza el método de los elementos finitos en 2D. Se caracteriza por tener un CAD basado en interfaz gráfica, con una amplia variedad de modelos y opciones de interpretación de datos, las que permiten realizar análisis completos y rápidos.

La Figura 2 muestra la geometría y el mallado adoptado en el modelo computacional numérico. La Figura 2.a muestra el modelo numérico construido por la presencia de 1 tubo. La Figura 2.b muestra el modelo numérico construido por la presencia de 2 tubos. La Figura 2.c muestra el modelo numérico construido por la presencia de 3 tubos. Para todos los casos, se realizaron análisis bajo la condición de deformación plana. La malla de elementos finitos cuenta con elementos triangulares isoperimétricos de 15 nodos. El mallado en las zonas aledañas a la tubería fue refinado con el objetivo de mejorar el proceso de interacción entre las tuberías y el terreno, mejorando de esta manera la precisión del cálculo. El modelo constitutivo considerado en este estudio es elastoplástico perfecto para el suelo del tipo Mohr – Coulomb, asignando las propiedades tenso-deformacionales y resistentes de los suelos.

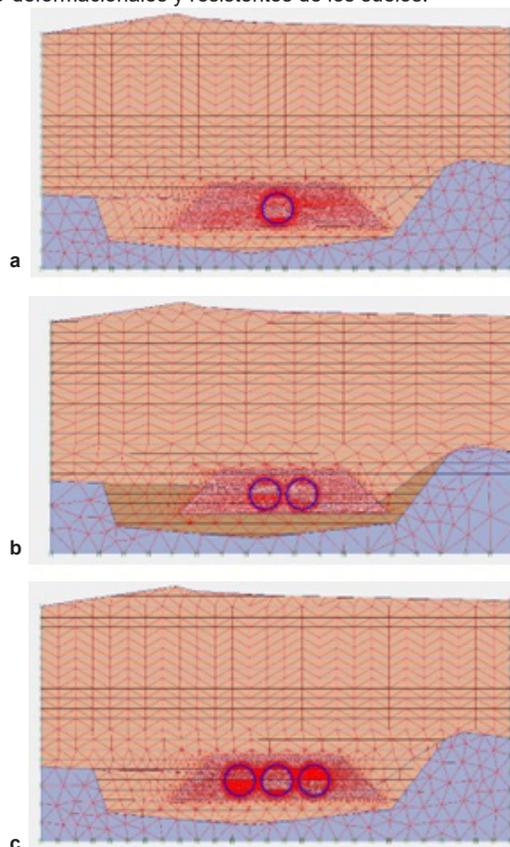


Figura 2. Geometría y mallado de los modelos numéricos.

2.3. Etapas constructivas

La Figura 3 muestra las etapas constructivas programadas en el modelo numérico de 3 tubos. La Figura 3a muestra el terreno encontrado en su forma original. La Figura 3b muestra la etapa de excavación de material nativo. La Figura 3c muestra la etapa de saneo de fondo (con pedraplén) y colocación de tubería sobre relleno estructural. La Figura 3d muestra la etapa de colocación de relleno con pedraplén hasta una altura de 17 m. La Figura 3e muestra la etapa de carga, considerando una carga de tráfico de 6 kN/m²

Estas mismas etapas fueron consideradas para el modelo numérico de uno y dos tubos. Las modelaciones numéricas realizadas no consideran la presencia de agua ya que se asume que la alcantarilla tiene la capacidad de evacuar la crecida máxima existente que puede pasar por el punto. De esta forma, las tensiones efectivas verticales ($\sigma'v$) son iguales a las tensiones totales verticales (σv).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 4 muestra los diagramas de esfuerzo obtenido para el modelo de 1 tubo, considerando sobrecarga de suelo y tráfico (6kN/m²). La Figura 4.a muestra los resultados obtenidos para fuerza axial. La Figura 4.b muestra los resultados obtenidos para fuerza cortante. La Figura 4.c muestra los resultados obtenidos para el Momento Flector.

La Figura 5 muestra la variación de los esfuerzos obtenidos para el modelo de 1, 2 y 3 tubos. La Figura 5.a muestra la variación de del esfuerzo axial. La Figura 5.b muestra la variación del esfuerzo de corte. La Figura 5.c muestra la variación del momento flecto .

La Figura 6 muestra la variación de los esfuerzos en los elementos mecánicos de las tuberías en función de la tensión vertical efectiva por sobre carga del suelo y carga de tráfico obtenidos para el modelo de 1, 2 y 3 tubos. La Figura 6a muestra la variación del esfuerzo axial. La Figura 6b muestra la variación del esfuerzo de corte. La Figura 6c muestra la variación del momento flecto .

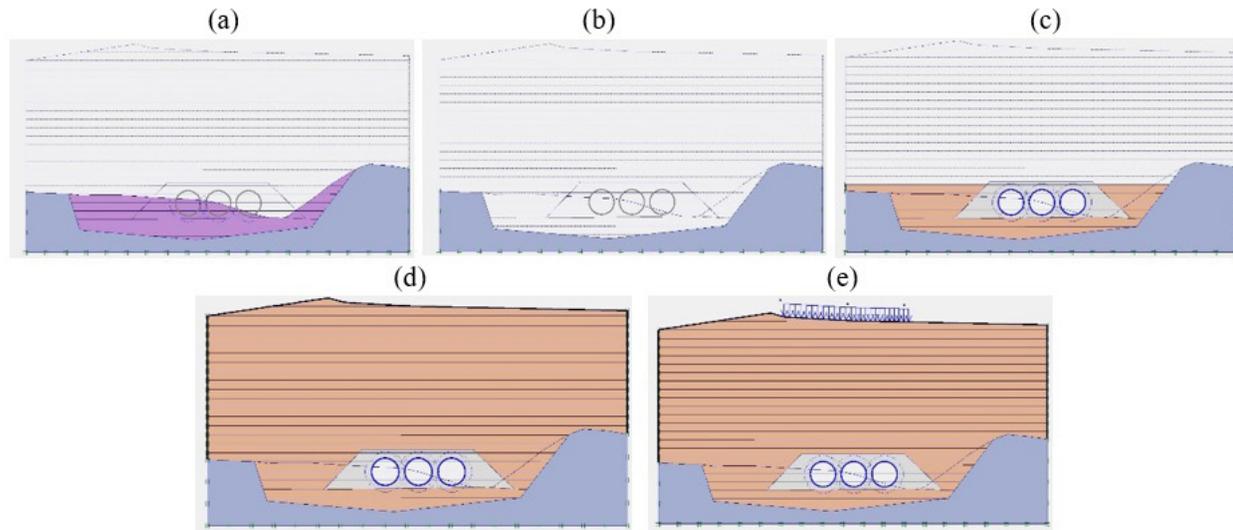


Figura 3. Etapas constructivas programadas en el modelo numérico (a) terreno natural, (b) excavación del material nativo, (c) relleno de pedraplén y colocación de tubería sobre material estructural, (d) relleno de pedraplén hasta el nivel de pavimento, (e) aplicación de la carga.

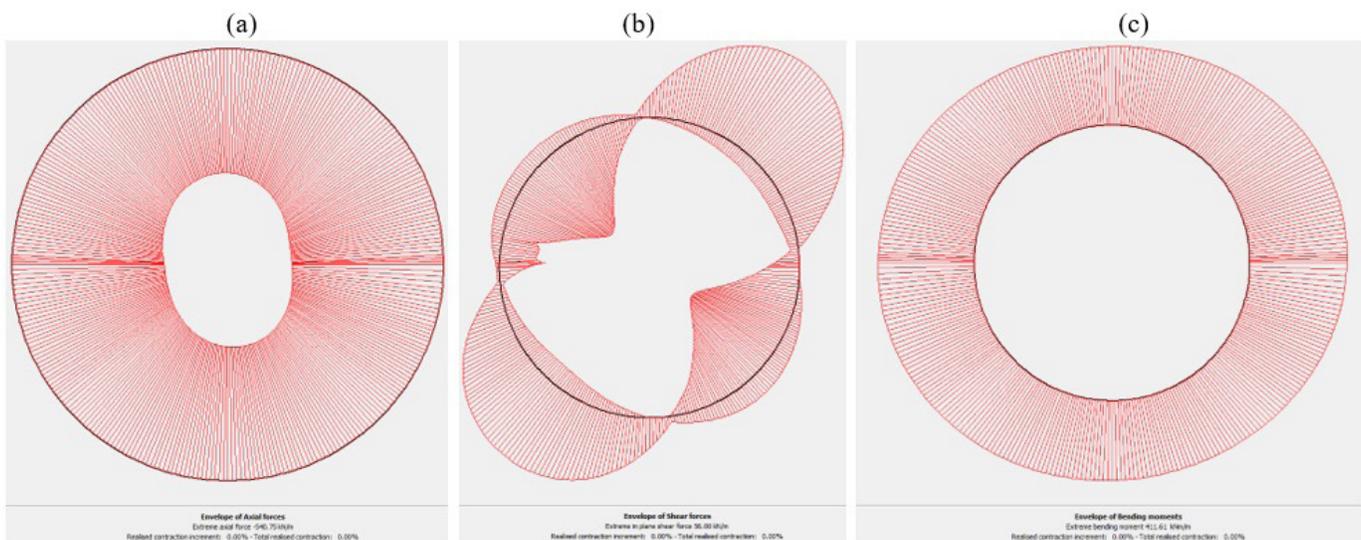
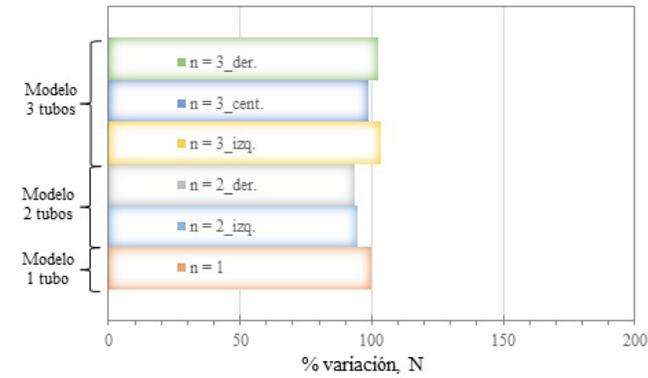
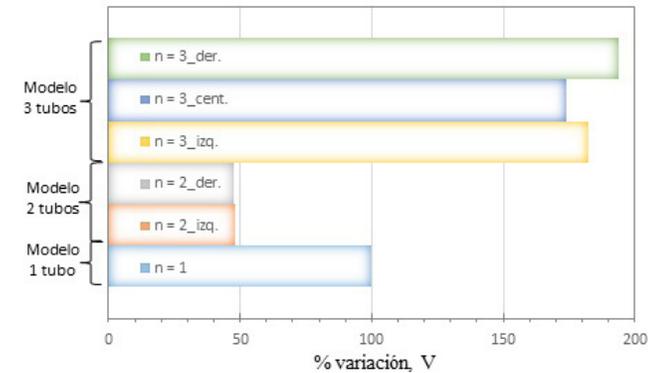


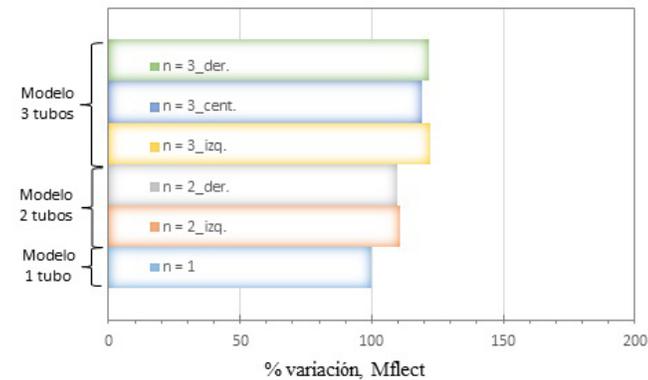
Figura 4. Gráfico de esfuerzo sobre la tubería con sobrecarga de suelo + tráfico (6kN/m²) (a) Axial, $N_{\max} = -540.75$ kN/m; (b) Corte, $V_{\max} = 56$ kN/m; (c) Momento flecto , $Mf_{\max} = 411.61$ kNm/m



a

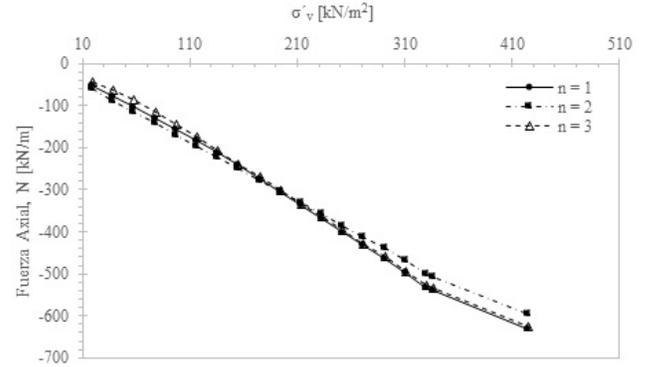


b

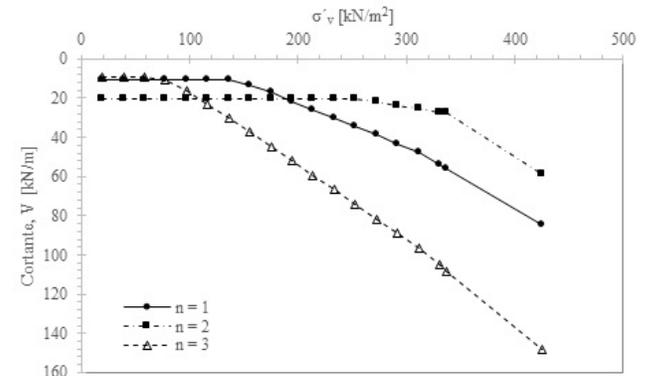


c

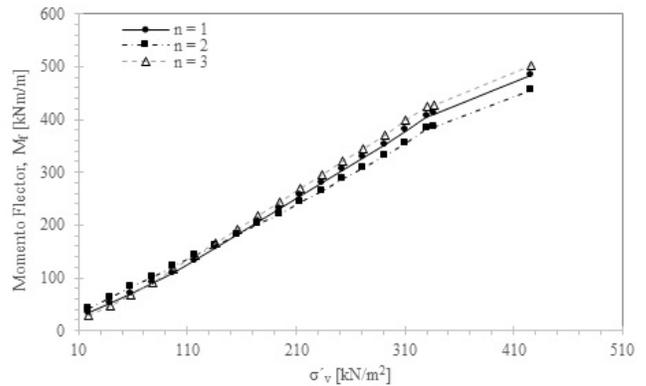
Figura 5. Esfuerzos obtenidos en los tubos para el modelo de 1, 2 y 3 tubos. (a) Axial, (b) Corte, (c) Momento flecto



a



b



c

Figura 6. Variación de los esfuerzos en tuberías en función de la tensión efectiva vertical (σ_v) actuante por la masa de suelo y carga de tráfico (a) Axial, (b) Corte, (c) Momento Flector

3.1. Discusión

El caso real aquí estudiado presentó falla en los pernos de anclaje colocados en sentido longitudinal, rotura que se produjo por corte o cizallamiento en el plano de solapamiento de dos placas de acero que conforman el perímetro circunferencial del tubo. La rotura de los pernos produjo un acortamiento del diámetro del conducto por desplazamiento de las dovelas en los planos de superposición. La falla solo es atribuida a la fuerza de corte que sufrieron los pernos. El colapso más marcado se observó en el sector medio (eje de la autopista) donde se constató el mayor daño en lo que respecta a cantidad de pernos fallados y desplazamiento de dovelas.

El modelo numérico de elementos finitos permite obtener diagramas de fuerza axial, corte y momento flector según las distintas etapas constructivas. El efecto de grupo no tiene influencia en la forma de los diagramas de esfuerzos obtenidos, ya que todos tienen la misma forma.

Considerando como referencia los resultados obtenidos en el modelo de 1 tubo, es posible discutir la influencia del efecto de grupo en los esfuerzos obtenidos. Para la condición de sobrecarga de suelo y carga de tráfico

actuante, el esfuerzo axial de compresión disminuye en un 5 % para el modelo de dos tubos, mientras que para el modelo de tres tubos, en las tuberías laterales incrementa el valor en un 3 % y disminuye en 1 % en la tubería central. El esfuerzo de corte disminuye en un 30 % para el modelo de 2 tubos, mientras que para el modelo de 3 tubos, incrementa en 64 % para el tubo ubicado al lado izquierdo, en un 61 % para el tubo central y en un 75 % para el tubo derecho. El momento flector incrementa en un 11 % para el modelo de dos tubos, mientras que para el modelo de tres tubos el incremento es de 22 %.

La tensión total vertical (σ_v) incrementa los esfuerzos en la tubería. El esfuerzo axial y el momento flector incrementan su valor linealmente con leves variaciones en su pendiente. En cambio, el esfuerzo de corte varía de forma constante hasta un punto de inflexión de σ_v . Después de este valor, el esfuerzo de corte incrementa linealmente con distinta pendiente. Para el modelo de 1 tubo, el punto de inflexión es obtenido a una σ_v de 140 kN/m², incrementando de forma lineal hasta un valor de esfuerzo de corte de 60 kN/m. Para el modelo de 2 tubos, el punto de inflexión es obtenido a una σ_v de 260 kN/m², incrementando de forma lineal hasta un valor de esfuerzo de corte de 25 kN/m. Para el modelo de 3 tubos, el

punto de inflexión es obtenido a una σ_v de 80 kN/m², incrementando de forma lineal hasta un valor de esfuerzo de corte de 115 kN/m. Todos los valores de esfuerzo de corte son obtenidos cuando se aplica una carga de tráfico de 6 kN/m²

La variación del esfuerzo de corte en función de la tensión vertical evidencia el efecto de grupo en los esfuerzos de tuberías enterradas. El punto de inflexión coincide con el aporte máximo de la rigidez de la tubería y la presión horizontal del suelo sobre la tubería. La utilización de un paquete de 2 tubos es más eficiente desde el punto de vista estructural que el de 3 tubos.

4. CONCLUSIONES

En esta investigación se evalúa el efecto de grupo en los esfuerzos de tuberías enterradas empleando el método de elementos finitos. Se construyeron diferentes modelos numéricos considerando la presencia de 1, 2 y 3 tubos, bajo las mismas condiciones de carga. Los resultados y análisis realizado, permiten llegar a las siguientes conclusiones:

- Para el modelo de 2 tubos, el efecto de grupo disminuye el esfuerzo axial y corte, mientras que el momento flector incrementa levemente. Para el modelo de 3 tubos, el efecto de grupo incrementa el esfuerzo axial, corte y momento flector obtenidos en las tuberías

- Con la variación del número de tuberías, la tensión vertical tiene poca influencia en el esfuerzo axial y momento flector resultante. En cambio, para el esfuerzo de corte, la influencia de la tensión vertical deja ver el efecto de grupo. El modelo de 2 tubos disminuye el esfuerzo de corte actuante en cada tubería.

- El modelo de elementos finitos indica que los esfuerzos determinados en etapas constructivas en el grupo de tubos son mayores a los que podrían determinarse de un cálculo de excavación en zanja y posterior en el que el suelo de tapada reduciría su influencia en las tensiones inducidas por efecto de arco o fricción lateral. En el proceso de obra ejecutado, las tensiones se transmiten completamente y resultan ligeramente mayores a las tensiones geostáticas verticales (columna de suelo) debido a la componente de tensiones horizontales.

Finalmente, los modelos propuestos son válidos para evaluar el efecto de grupo en los esfuerzos de tuberías enterradas y así eliminar las incertidumbres que aparecen al utilizar ecuaciones que consideran condiciones de contorno limitadas.

5. REFERENCIAS

- Akagawa, S., Huang, S., Kanie, S., Fukuda, M. (2012). Movement due to heave and thaw settlement of a full-scale test chilled gas pipeline constructed in fairbanks Alaska. OTC 23733. Technology Conference held in Houston, Texas, USA. 3 – 5 Decembrer.
- Cubrinovski, M., Bradley, B., Wotherspoon, L., Green, R., Bray, J., Wood, C., Pender, M., Allen, J., Bradshaw, A., Rix, G., Taylor, M., Robinson, K., Henderson, D., Giorgini, S., Ma, K., Winkley, A., Zupan, J., O'Rourke, T., DePascale, G., Wells, D. (2011). Geotechnical aspects of the 22 February 2011 Christchurch earthquake. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering. New Zealand, pp. 205 – 226
- Gálvez, D. (2011). Cálculo estructural de tuberías enterradas por el método de elementos finitos, con base en el Informe Técnico Cen/Tr 1295-3. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela técnica superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, España.
- Gould, S., Boulaire, F., Burn, S., Zhao, X y Kodikara, K. (2011). Water Science & Technology. pp. 63.11. pp. 2692 – 2699
- Hou, Y., Fang, Q., Zhang, D., Yuen, Yuen Wong, L. (2015). Excavation failure due to pipeline damage during shallow tunneling in soft ground. Tunneling and Underground Space Technology. pp. 76-84
- Khademi-Zahedi, R. (2018). Application of the finite element method for evaluating the stress distribution in buried damage polyethylene gas pipes. Underground Space. Vol. 4. pp. 59-71.
- Kosaiyakanon N. y Pisitpaibool, C. (2022). Behaviors of precast reinforced concrete drainage pipes under static load using finite element. International Transaction Journal of Engineering, Management & Applied Sciences & Technologies, pp. 1-22.
- Merrin, J., Rajeev, P., Kodikara, J. y Robert, D. (2014). Stress analysis of buried pipes. 8th Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM 8 23 – 26 November 2014, Melbourne, Australia.
- O'Rourke, M. y Liu, X. (2012). Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines. Monograph of Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), United State.

Spangler, M. (1941). The structural design of flexible pipe culverts. Bulletin 153, Iowa Engineering Experiment Station, Ames, Iowa. pp. 235 – 239.

Warman, D., Hart, J. y Francini, R. (2009). "Development of a pipeline surface loading screening process & assessment of surface load dispersing methods". Final Report 05-44R1. Canadian Energy Pipeline Association (CEPA).

Yoo, C., Seok Choi, B., Young Jung, H. (2006). Excavation-induced buried pipeline failure – A case study. Solid State Phenomena. Vol. 110. pp. 23-30.