

Ingeniería

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica

ISSN 1409-2441

Vol. 17 (1)

Ene/Jul 2007

CONTENIDO

Artículos

1. Dimensionamiento y costeo de una planta de lavado de vehículos recolectores de desechos sólidos para los principales cantones del Área Metropolitana de Costa Rica 17-26
Ruiz, Francisco.
2. Caracterización de los registros acelerográficos obtenidos en el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica..... 27-41
Schmidt, Víctor; Quirós, Christopher.
3. Optimización aplicada a la calibración y validación de modelos de elementos finitos de puentes 43-59
Rodríguez, Wilson; Muñoz, Edgar; Núñez, Federico.
4. Análisis mediante modelos físicos de interacción suelo-estructura en tuberías encerradas 61-76
Rodríguez, Jorge; Ruiz, Daniel; Coral, Álvaro; Pereira, Mauricio.
5. Pasta hidrotérmica y termoquímica a la soda obtenida a partir de residuos de paste (*Luffa cylindrica Roem*) 77-84
Blanco, María Lorena.
6. Diseño y construcción de un equipo de pruebas para la determinación de la resistencia al flujo de aire en granos y semillas..... 85-96
Aguilar, José Francisco.

Notas técnicas

1. Prototipo didáctico para la enseñanza de la Ingeniería Estructural 99-111
Muñoz, Edgar; Núñez, Federico; Otalora, Camilo.
2. Análisis de los factores que intervienen sobre la resistencia al flujo de aire en granos y semillas en operaciones de manejo poscosecha 113-124
Aguilar, José Francisco.

Trabajos de Graduación

Lista de proyectos de graduación de grado y posgrado del año 2006 de la Facultad de Ingeniería..... 127-140

Normas

Normas para la presentación de artículos a la Revista Ingeniería 143-150

EDITORIAL
UCR

EDITORIAL
UCR

Número (1)

Enero / Julio 2007

Volumen 17

REVISTA INGENIERÍA



ANÁLISIS MEDIANTE MODELOS FÍSICOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA EN TUBERÍAS ENTERRADAS

*Jorge A. Rodríguez Ordóñez
Daniel M. Ruiz Valencia
Álvaro Coral Otero
Mauricio Pereira Ordóñez*

Resumen

Se presentan los resultados de ensayos sobre modelos físicos instrumentados, a escala natural de la interacción suelo-estructura en la cimentación de una tubería rígida y de una tubería flexible de 600 mm de diámetro. Los modelos se hicieron con un montaje especialmente diseñado para tal efecto, en el Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Javeriana. Se aplicó una fuerza en dirección vertical sobre la tubería enterrada y se midieron las cargas y los desplazamientos horizontales y verticales, tanto del terreno como de las tuberías, en diferentes puntos del modelo. Adicionalmente, se hicieron ensayos de caracterización mecánica, de las tuberías, así como del material de cimentación utilizado, que correspondió a un recebo (arena arcillosa) representativo del material de ataque para cimentación de tuberías, utilizado en la ciudad de Bogotá. Con los datos de los ensayos, se calibraron modelos numéricos con el fin de realizar análisis de interacción suelo-estructura que permitan extender las observaciones realizadas a problemas con diferentes condiciones de frontera.

Palabras clave: tuberías enterradas, modelos físicos, interacción suelo-estructura.

Abstract

Results are presented from tests by physical modeling of instrumented buried pipes. These tests were conducted at natural size in a special set up in the structures lab at the Javeriana University in Bogotá. The soil structure interaction for a concrete and a PVC 600 mm diameter pipes are studied. The buried pipes were loaded at the surface, and the applied loads and vertical as well as horizontal displacements were measured both at the surface and in several points within the model. Tests were conducted in the lab to determine the stiffness and strength of the pipes, as well as for the typical soil used in Bogota for the pipes foundation. This soil corresponds to clayey sand clay locally called "recebo". The data from the tests was used to calibrate finite element models to analyze the soil structure interaction in this problem. These models can be used to analyze field conditions.

Key words: buried pipes, physical modeling, soil-structure interaction.

Recibido: 01 de agosto del 2006 • **Aprobado:** 18 de enero del 2007

1. INTRODUCCIÓN

La interacción suelo-estructura en la cimentación de tuberías enterradas es un problema complejo y de mucho interés práctico. Los métodos tradicionales para el análisis de este problema en tuberías rígidas se remontan a Marston (1930) y se basan en consideraciones de equilibrio de fuerzas en una sección transversal a la tubería. En estos métodos, no se tiene en cuenta la rigidez relativa del suelo de cimentación y el material

de ataque con respecto a la tubería, ni las deformaciones que se producen en el sistema durante el proceso de carga, así como tampoco los efectos de la instalación.

Más recientemente se han venido formulando métodos de análisis y de diseño basados en análisis mecánicos más completos de interacción suelo-estructura para tuberías rígidas, tal como la presentan Heder y McGrath (1982); Kurdziel y McGrath (1989). Estos estudios han dado lugar a métodos alternativos

de diseño propuestos por la American Concrete Pipe Association (ACPA) y que pueden revisarse en ACPA (1998) y en ACPA (1992).

En el caso de las tuberías flexibles, el efecto de la deformabilidad de la tubería es muy importante para su adecuado funcionamiento y también determina la respuesta del sistema en adición a los otros factores ya mencionados para las tuberías rígidas, tal como se presenta en la referencia AWWA (1996).

En este artículo se resumen los resultados de una investigación tendiente a estudiar en detalle la interacción suelo-estructura en cimentaciones de tuberías enterradas, bajo condiciones controladas mediante modelos físicos a escala natural en el laboratorio, complementados con análisis numéricos que permitieron modelar dicha interacción y que puede ampliarse en la referencia Coral & Pereira (2005).

Como parte de esta investigación se caracterizaron también las tuberías y los materiales de cimentación en el laboratorio. Los resultados de esta investigación permiten entender mejor el problema y calibrar los modelos numéricos, los cuales se pueden utilizar para extrapolar el análisis a condiciones de campo diferentes a las consideradas en el laboratorio, y dan información importante para poder utilizar los métodos de diseño más recientes propuestos por la ACPA.

2. ENSAYOS MECÁNICOS DEL MATERIAL DE LAS TUBERÍAS

Para los modelos físicos se usaron dos tipos de tuberías, una rígida y una flexible. La tubería flexible tenía 609,6 mm (24 pulgadas) de diámetro, 15 mm espesor de pared, 400 mm de longitud y estaba elaborada con policloruro de vinilo (PVC). Por su parte, la tubería rígida era de concreto reforzado, de 609,6 mm (24 pulgadas) de diámetro, 72 mm espesor de pared y 600 mm de longitud.

Con el fin de caracterizar el comportamiento mecánico de las tuberías rígidas (concreto) y las flexibles (PVC) a usar dentro del modelo

experimental, se realizaron una serie de ensayos para determinar, de manera indirecta, el módulo de elasticidad del material componente de las tuberías. Para ello se realizaron pruebas de carga en dirección perpendicular al eje de la tubería, midiendo simultáneamente la carga aplicada y dos desplazamientos en dirección radial (deflexión horizontal y vertical). En la Figura 1a se presentan detalles del proceso de aplicación de carga sobre la tubería flexible mediante la máquina universal de ensayos, con su respectiva instrumentación (celda de carga, deformímetro vertical, deformímetros horizontales y sistema de adquisición de datos). De la misma manera, en la Figura 2 se muestra tanto el montaje como la falla posterior de la tubería rígida.

El método de ensayo consistió en aplicar pequeños incrementos de carga en el rango elástico (aproximadamente veinte incrementos), con la medición simultánea de la carga aplicada y los desplazamientos de los deformímetros usados en la instrumentación.



Figura 1a. Montaje del ensayo.
Fuente: (Los autores).

Posteriormente, se retiraron los deformímetros horizontales y se continuó el ensayo hasta la falla de la tubería o hasta el punto en que, por restricciones de espacio o de carga, no se pudiese continuar con la prueba de laboratorio.

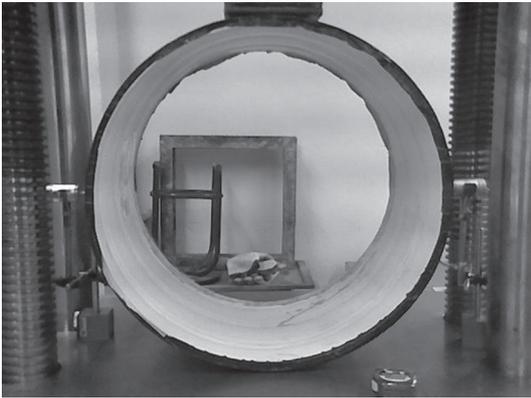


Figura 1b. Detalle de los deformímetros laterales.
Fuente: (Los autores).

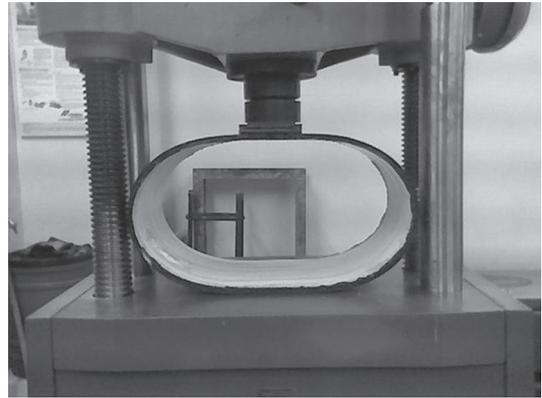


Figura 1c. Detalle del estado final de la tubería (se recuperó totalmente la deformación luego del ensayo).
Fuente: (Los autores).

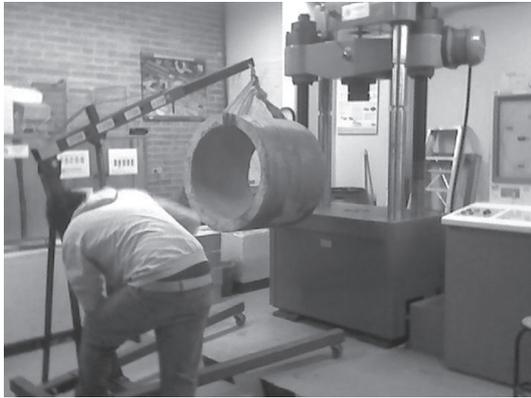


Figura 2a. Proceso de montaje de la tubería rígida del ensayo.
Fuente: (Los autores).

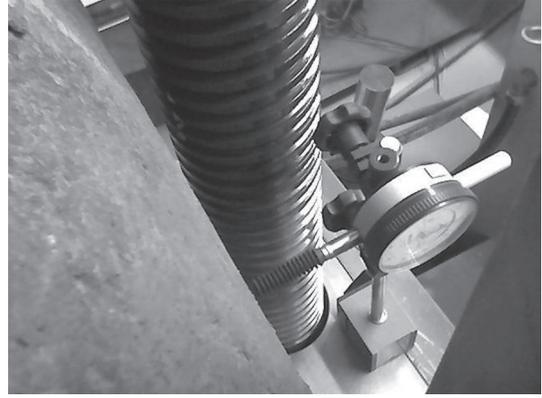


Figura 2b. Detalle de los deformímetros.
Fuente: (Los autores).

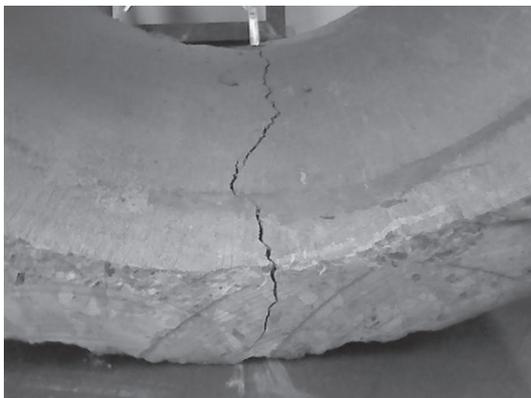


Figura 2c. Grieta en la zona inferior de la tubería de concreto.
Fuente: (Los autores).

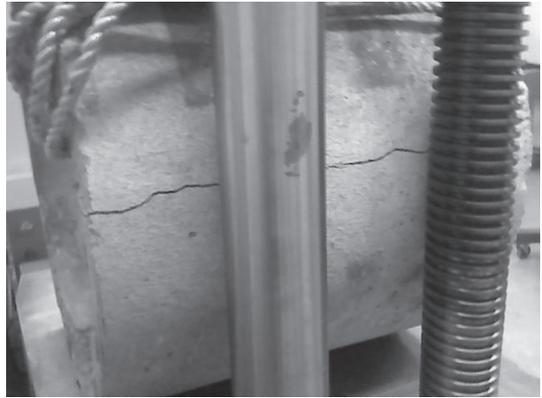


Figura 2d. Grieta en el costado de la tubería rígida.
Fuente: (Los autores).

Con base en el procedimiento anterior, se establecieron las curvas de carga en función de los desplazamientos verticales y horizontales tanto para la tubería rígida como para la tubería flexible, en el rango elástico. Estos registros se presentan en la Figura 3.

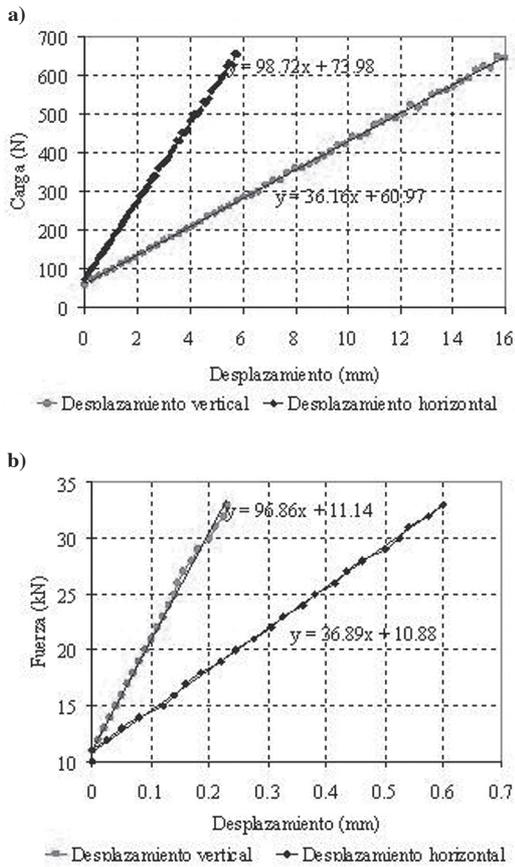


Figura 3. Curvas de comportamiento en el rango elástico de las tuberías a) flexible y b) rígida. Fuente: (Los autores).

La tubería rígida colapsó para una carga aproximada de 30 kN distribuidas sobre sus 600 mm de longitud. Por su parte, la tubería flexible no fue posible fallarla, ya que presentó grandes desplazamientos laterales que impidieron continuar el ensayo. Es importante anotar que el valor de la resistencia máxima de la tubería flexible no es uno de los parámetros dominantes en el cálculo y diseño de las tuberías enterradas.

Con los resultados de rigidez vertical y transversal de las tuberías, presentados en la Figura 3 (pendientes de las rectas de regresión) y con la ayuda del programa de elementos finitos SAP 2000®, se estimó de manera indirecta el módulo de elasticidad. Para ello, se desarrolló el modelo numérico mostrado en la Figura 4, asignándole las dimensiones y las características de las tuberías ensayadas en el laboratorio, tales como diámetro, espesor, promedio de pared, longitud, así como las respectivas restricciones de movimiento y condiciones de frontera correspondientes al modelo experimental.

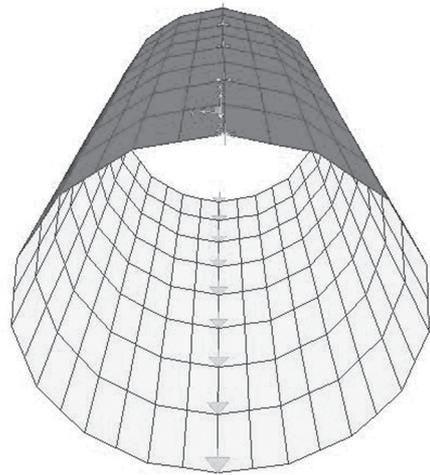


Figura 4a. Partición de la tubería en elementos finitos y condiciones de frontera. Fuente: (Los autores).

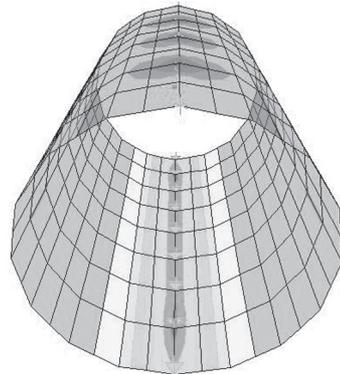


Figura 4b. Distribución de esfuerzos máximos. Fuente: (Los autores).

Así se determinó que el módulo de elasticidad para la tubería Novaloc de 609,6 mm (24 in) era de 1433 MPa y que el módulo elástico de la tubería de concreto era de 21 000 MPa. Este último valor se encuentra en el orden de magnitud del módulo que típicamente se usa para el concreto reforzado.

3. ENSAYOS SOBRE MODELOS FÍSICOS DE TUBERÍAS INSTALADAS A ESCALA REAL

Para realizar el montaje a escala real de las tuberías enterradas, se diseñó y construyó un sistema de seis pórticos de acero (cuatro en dirección transversal y dos en dirección longitudinal) que tenían la función primordial de confinar una caja elaborada mediante platinas metálicas de 6,35 mm de espesor. Dicho sistema se diseñó y se construyó mediante A-36 y con conexiones a base de pernos de alta resistencia. Esta caja de acero y su estructura de soporte se instalaron sobre el marco de pruebas, adjunto a la máquina universal, y sus características principales se presentan en las Figuras 5a y 5b.

Es importante tener en cuenta que el diseño del sistema consideró una adecuada resistencia (factor de seguridad de 3) y una adecuada rigidez (baja flexibilidad del sistema), lo cual permitió confinar adecuadamente el suelo y la tubería ubicados en su interior. Asimismo, debe tenerse en cuenta que la caja fue diseñada para que fuese capaz de soportar la carga máxima del gato hidráulico (200 kN), distribuida en un área tal que se generara una presión de contacto del orden de 1 MPa.

En esta caja, bajo condiciones típicas de instalación empleando el material de relleno previamente caracterizado, se procedió a cimentar la tubería flexible (PVC) y posteriormente, en un ensayo independiente, se hizo lo propio con la tubería rígida (concreto reforzado). En la Figura 6 se presentan las distancias a borde, así como la ubicación de las tuberías dentro de la caja en los ensayos efectuados.

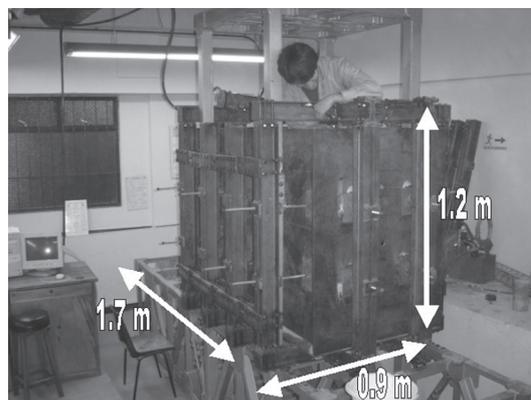


Figura 5a. Dimensiones de la caja de acero para la ejecución de los ensayos sobre las tuberías.

Fuente: (Los autores).

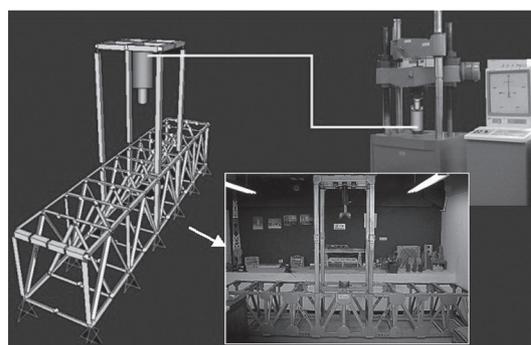


Figura 5b. Esquema del marco de pruebas y del sistema de aplicación de carga.

Fuente: (Los autores).

La instrumentación del sistema de aplicación de carga consistió en una celda de carga (la cual se ubicó entre el gato hidráulico y los perfiles de aplicación de carga) y un deformímetro análogo para medir el desplazamiento vertical de los perfiles de distribución de la carga, como se muestra en la Figura 7.

Por otro lado, para registrar los valores de desplazamiento del suelo en diez diferentes puntos del montaje, se instalaron dispositivos en el momento de la compactación, que permitieron medir los desplazamientos mediante extensómetros análogos (Sistema de *tell-tales*).

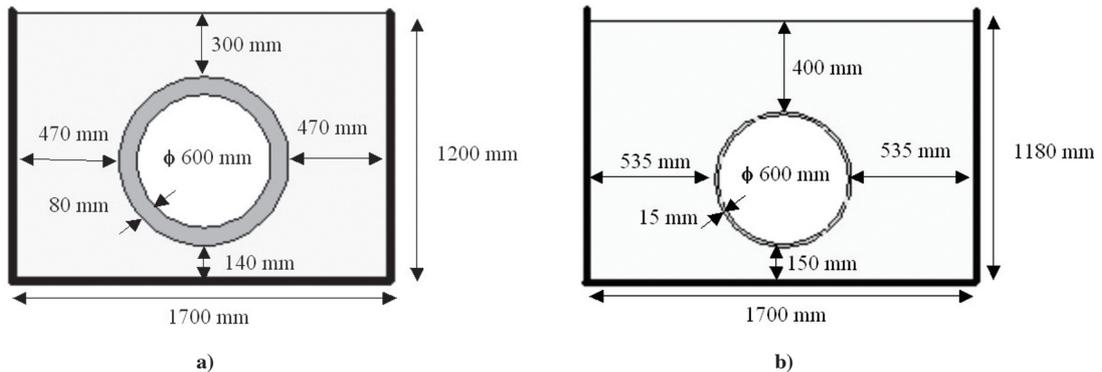


Figura 6. Ubicación de la tubería dentro del montaje de los modelos físicos. a) Tubería flexible b) Tubería rígida.
Fuente: (Los autores).



Figura 7. Detalle de la celda de carga, del deformímetro testigo del desplazamiento y de los perfiles de aplicación de carga.
Fuente: (Los autores).

El montaje de estos aditamentos consta de un anclaje mecánico al suelo (Figura 8a) y una varilla de 6,35 mm de diámetro de acero inoxidable (Figura 8b) que se desliza dentro de una funda libre de fricción y el desplazamiento de esta varilla se mide por medio de un deformímetro análogo fijado en su extremo (Figura 8b).

Estos extensómetros análogos se distribuyeron en el modelo físico, en diferentes lugares, con el fin de obtener los valores de desplazamiento del suelo en varios puntos. En la Figura 9 se presenta la distribución de algunos de estos elementos en el montaje a escala real y la respectiva numeración usada en la toma de datos.

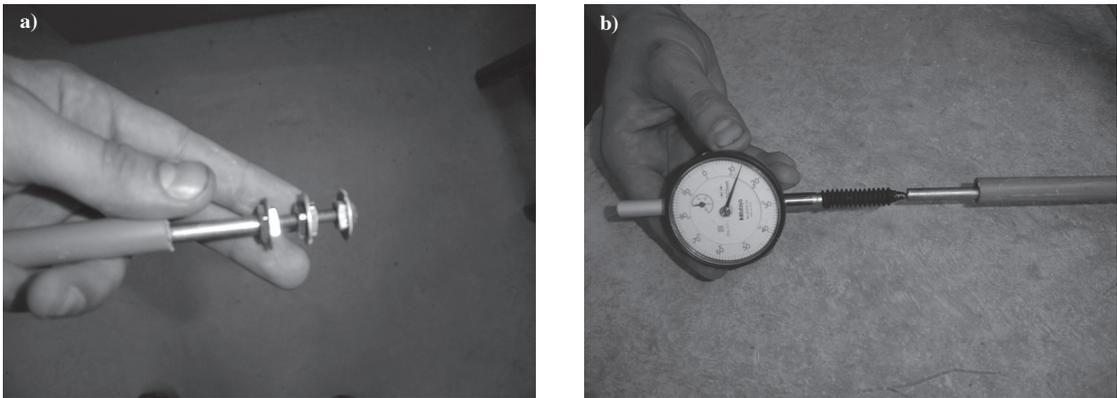


Figura 8. *Tell-tales* a) anclaje mecánico b) Funda, varilla lisa y deformímetro análogo.
Fuente: (Los autores).

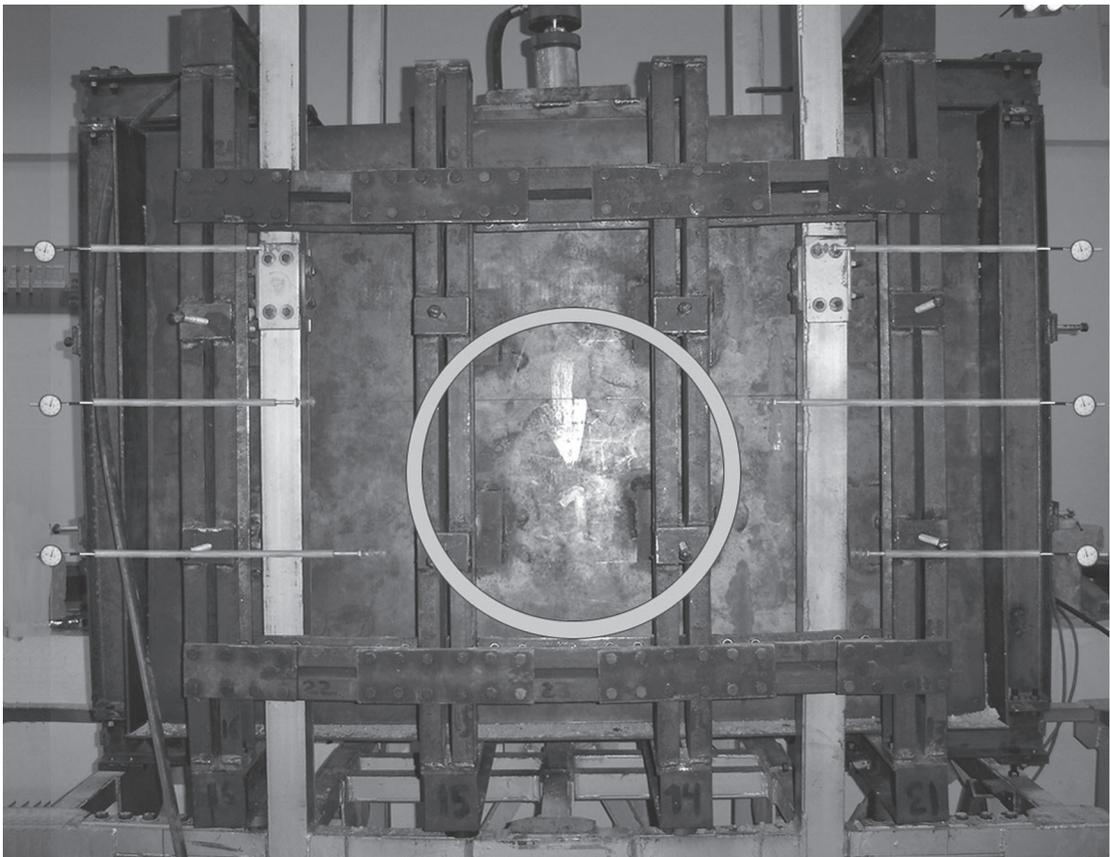


Figura 9a. Vista frontal de los *tell-tales* antes del ensayo.
Fuente: (Los autores).

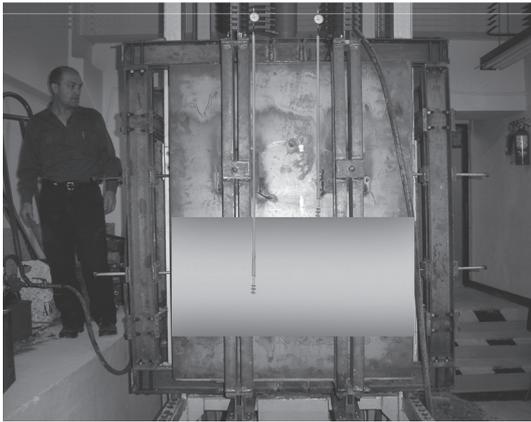


Figura 9b. Vista lateral de los *tell-tales* antes del ensayo.
Fuente: (Los autores).



Figura 9c. Detalle de los *tell-tales* al desmontar el sistema después de ejecutar el ensayo.
Fuente: (Los autores).

Finalmente, la tubería fue instrumentada con extensómetros para registrar el desplazamiento con respecto a la caja metálica (desplazamiento vertical y horizontal), el desplazamiento relativo

vertical entre la clave y la batea del tubo, así como los desplazamientos relativos entre los costados de la tubería (Figura 10).

Mediante la instrumentación y el montaje presentados anteriormente, se llevaron a cabo ensayos de laboratorio sobre una tubería flexible y una tubería rígida. En ambos casos, se aplicó una carga máxima de 100 kN de tal manera que se generó una presión en superficie de 250 kPa para la tubería flexible y una presión de 550 kPa para la tubería rígida (para aplicar mayor presión, la superficie de contacto fue menor en el caso de la tubería rígida).

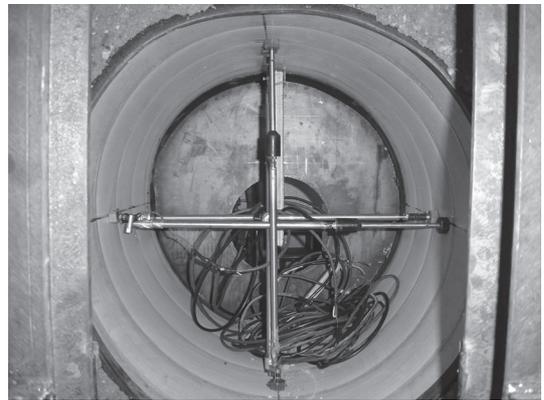


Figura 10a. Extensómetros para medir desplazamientos de la tubería con respecto a la caja.
Fuente: (Los autores).



Figura 10b. Extensómetros para medir desplazamientos relativos (alargamiento y acortamiento).
Fuente: (Los autores).

El proceso seguido durante el ensayo consistió en la aplicación de ciclos de carga y descarga con posterior recarga, con el fin de observar el comportamiento del suelo. En las Figuras 11 y 12, se presentan detalles de la evolución del desplazamiento de los *tell-tales* para diferentes esfuerzos de contacto en la tubería flexible. A la luz de los resultados, se observa un marcado comportamiento no lineal en la respuesta a nivel de esfuerzo y desplazamiento de los *tell-tales* originada en el comportamiento no lineal del material del relleno.

De la misma manera, en la Figura 13 se muestran los resultados a nivel de esfuerzos para desplazamientos de la tubería flexible (desplazamientos totales y relativos). Se observa una marcada tendencia de la tubería a enterrarse en dirección vertical, acompañada de un desplazamiento lateral inferior. Asimismo, se observa una tendencia de la tubería a cambiar su geometría circular, mayoritariamente debido a desplazamientos relativos en dirección vertical.

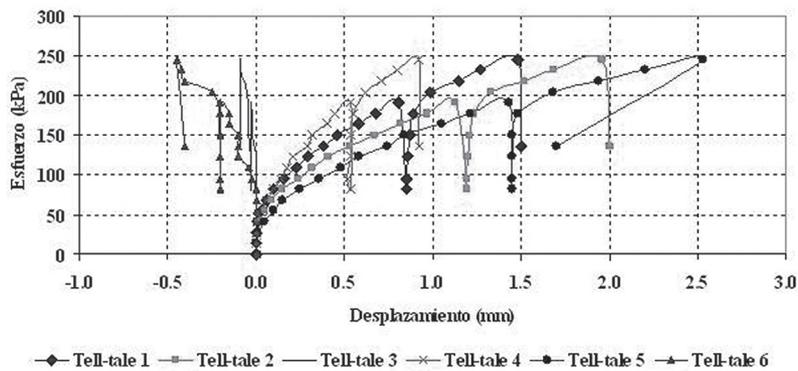


Figura 11. Gráficas de esfuerzo contra desplazamiento horizontal del suelo en los diferentes extensómetros. Tubería flexible.
Fuente: (Los autores).

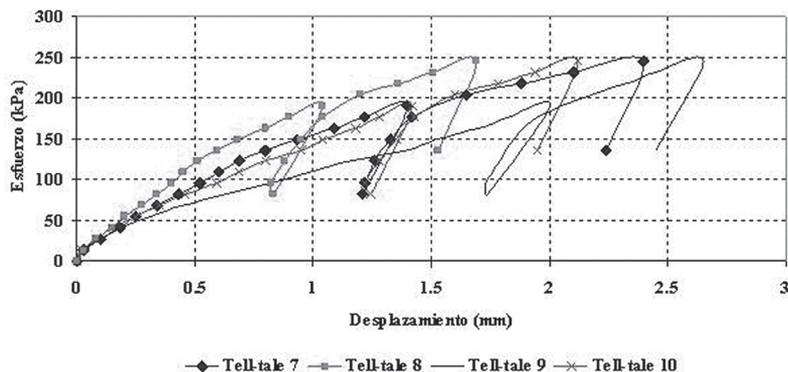


Figura 12. Gráficas de esfuerzo contra desplazamiento vertical del suelo en diferentes extensómetros. Tubería flexible.
Fuente: (Los autores).

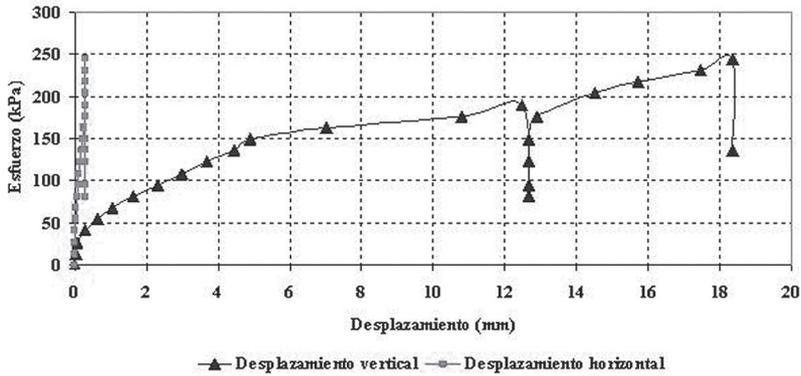


Figura 13a. Esfuerzo contra desplazamiento absoluto del tubo.
Fuente: (Los autores).

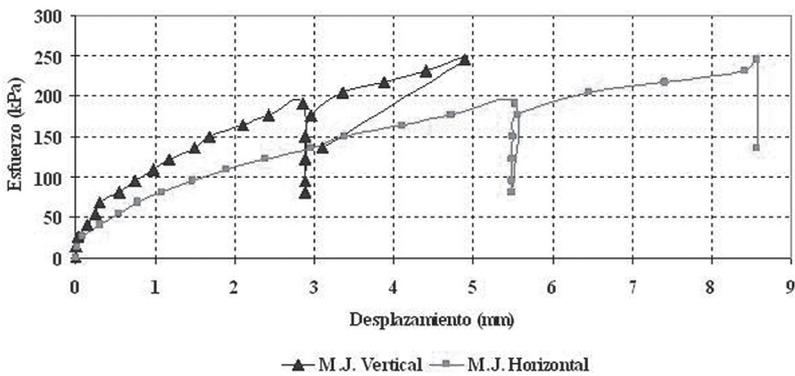


Figura 13b. Esfuerzo contra desplazamientos relativos del tubo. Tubería flexible.
Fuente: (Los autores).

Una vez efectuado el ensayo, se retiraron las tapas de la caja de acero, encontrándose una deformación importante de la tubería (Figura 14) acompañada de una falla en el suelo. Debe mencionarse que la tubería flexible no presentó ninguna falla o fisura al finalizar el ensayo.

flexible, el tubo rígido presenta una marcada tendencia a enterrarse en dirección vertical. Asimismo, antes de que se genere el colapso de la tubería, los desplazamientos relativos del tubo son inferiores a los desplazamientos absolutos del mismo.

En las Figuras 15, 16 y 17 se presentan los resultados para la tubería rígida. En estas gráficas se observa de nuevo un comportamiento no lineal del sistema. No obstante, y a diferencia de la tubería

A diferencia de la tubería flexible, el tubo rígido se agrietó sustancialmente en los lugares de máximos esfuerzos a tracción originados en la flexión, tal como se puede apreciar en la Figura 17.



Figura 14. Deformación de la tubería al final del ensayo.
Fuente: (Los autores).

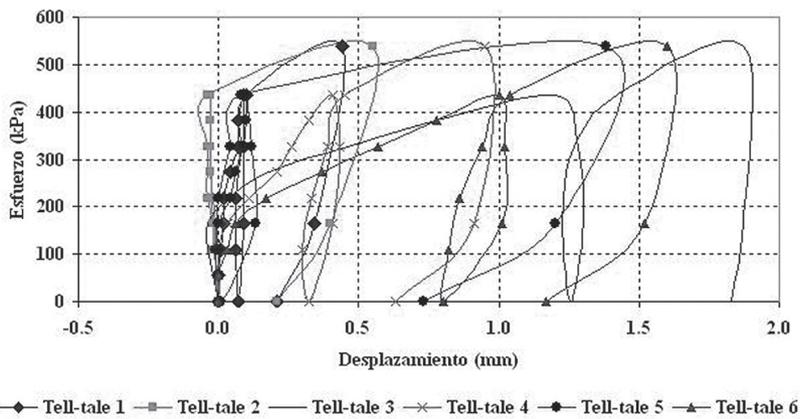


Figura 15. Gráficas de esfuerzo contra desplazamiento horizontal del suelo en los diferentes extensómetros. Tubería rígida.
Fuente: (Los autores).

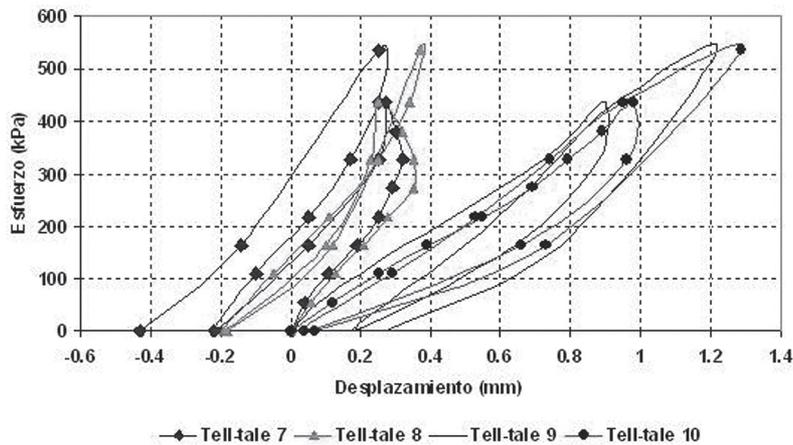


Figura 16. Gráficas de esfuerzo contra desplazamiento vertical del suelo en diferentes extensómetros. Tubería rígida.
Fuente: (Los autores).

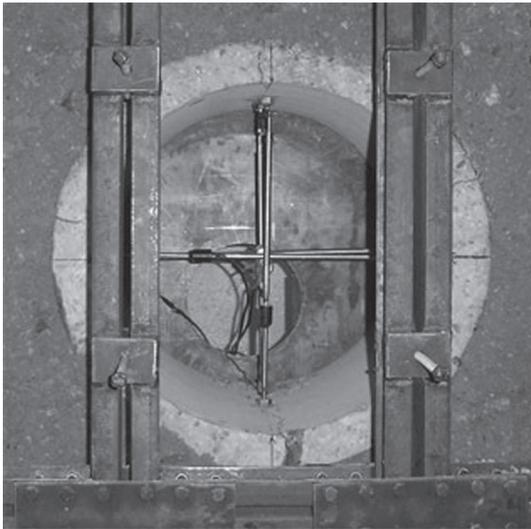


Figura 17. Estado de la tubería al finalizar el ensayo.
Fuente: (Los autores).

4. CALIBRACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS A PARTIR DE LA EVIDENCIA EXPERIMENTAL

Con el fin de interpretar los resultados de los modelos físicos experimentales, se elaboraron modelos numéricos utilizando el programa PLAXIS (1998), simulando las mismas

condiciones de los ensayos descritos anteriormente, tanto a nivel de cargas como de configuración geométrica. Los modelos numéricos se alimentaron con la información derivada de los ensayos de caracterización de los materiales (material de relleno y materiales constitutivos de las tuberías). Es importante mencionar que el modelo constitutivo usado para modelar el comportamiento del suelo fue el de “Hardening Soil” (Endurecimiento por deformación), el cual permite reproducir la no linealidad del comportamiento esfuerzo-deformación del suelo. Estas propiedades se presentan en los Cuadros 1 y 2.

El modelo fue sometido a un proceso de calibración con los datos registrados de los modelos físicos, teniendo en cuenta, adicionalmente, las condiciones de frontera del sistema. En la Figura 18 se presenta una imagen del modelo en elementos finitos desarrollado para las dos tuberías estudiadas. Estos corresponden a elementos triangulares de quince nodos. Para la tubería flexible, la carga se distribuyó en un ancho de 600 mm, mientras que para la tubería rígida, la carga se distribuyó en 300 mm de ancho, de acuerdo con las condiciones de los modelos físicos efectuados.

Cuadro 1. Parámetros del suelo ingresados al modelo numérico en el programa PLAXIS.

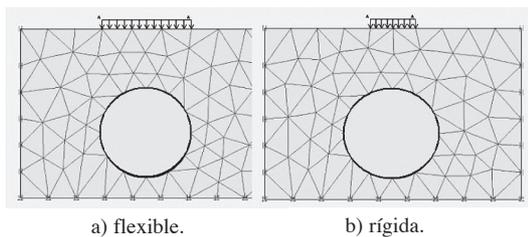
	Parámetro	Unidad	Valor
Peso unitario seco	gam_dry	kN/m ³	16,3
Peso unitario húmedo	gam_wet	kN/m ³	16,3
Módulo secante al 50 % de esfuerzo último en corte	E50ref	kN/m ²	35000
Módulo tangente de deformación volumétrica a la presión de referencia	Eoedref	kN/m ²	25709,2
Módulo elástico de descarga en esfuerzo cortante a la presión de referencia	Euref	kN/m ²	80000
Cohesión	c_ref	kN/m ²	33
Ángulo de fricción interna	phi	°	25
Ángulo de dilatación	psi	°	0
Relación de poisson efectiva	nu_ur	-	0,2
Presión de referencia	p_ref	kN/m ²	100
Exponente de variación con la presión de confinamiento	Power	-	0,75
Coefficiente de empuje de tierras en reposo en compresión virgen	K0nc	-	0,58

Fuente: (Los autores).

Cuadro 2. Parámetros de las tuberías ingresados al modelo numérico en el programa PLAXIS.

	Parámetro	Unidad	Valor	
			Tubo PVC	Tubo concreto
Módulo de elasticidad por sección transversal.	EA	kN/m	21450	1 287 200
Módulo de elasticidad por inercia	EI	kNm ² /m	0,4	686,4
Peso unitario (diferencia con el peso del suelo)	w	kN/m/m	0,16	3
Relación de Poisson	v	-	0,3	0,3

Fuente: (Los autores).

**Figura 18.** Detalle del modelo en elementos finitos elaborado para la tubería a) flexible b) rígida.

Fuente: (Los autores).

En la Figura 19 se comparan cualitativamente los resultados numéricos con los experimentales, para las tuberías a nivel de esfuerzos cortantes máximos en el suelo. Obsérvese que, para la tubería flexible (Figura 19 a) los esfuerzos cortantes máximos fluyen desde la superficie hasta la tubería y es claro que se presenta una grieta en

el suelo, originada en esfuerzos cortantes en el mismo lugar que el modelo numérico lo predice.

Por su parte, al comparar y revisar el diagrama de momentos internos de la tubería rígida estimado mediante el modelo numérico (Figura 19b), se observa que los momentos máximos en la tubería rígida se presentan en la parte exterior del tubo, ubicados en ambos costados, levemente por encima del eje horizontal. Asimismo, se presentan momentos críticos en la zona interna de la tubería ubicados en la clave y la batea del tubo, como se muestra en el diagrama de momentos, obtenido con el modelo de Plaxis de la Figura 19b). Lo anterior coincide con la ubicación física de los momentos máximos de la Figura 17 (grietas presentadas en el tubo), por lo que se concluye una adecuada concordancia entre el ensayo experimental y las estimaciones numéricas.

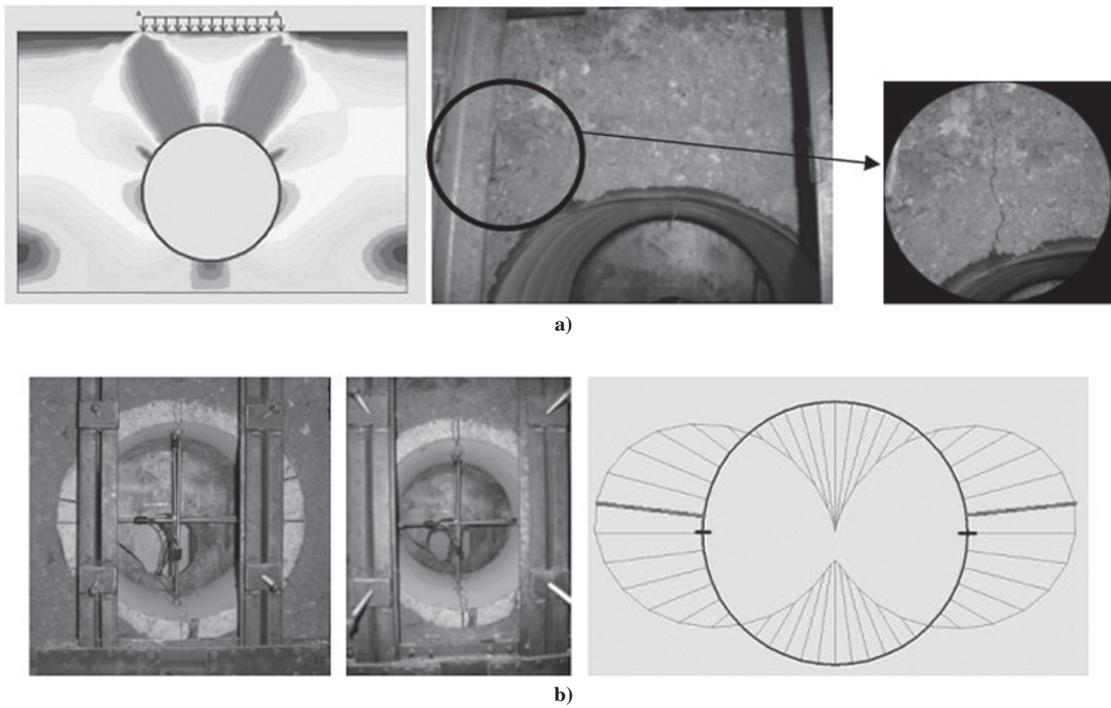


Figura 19. Comparación entre el modelo numérico y el modelo físico a nivel de esfuerzos en el suelo. a) tubería flexible, b) tubería rígida.
Fuente: (Los autores).

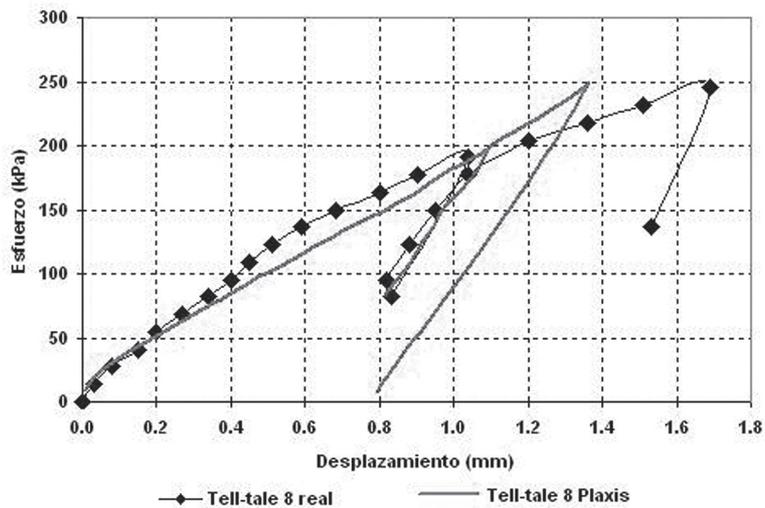


Figura 20. Comparación entre los resultados numéricos y los resultados experimentales a nivel de desplazamiento vertical para el ensayo sobre la tubería flexible.
Fuente: (Los autores).

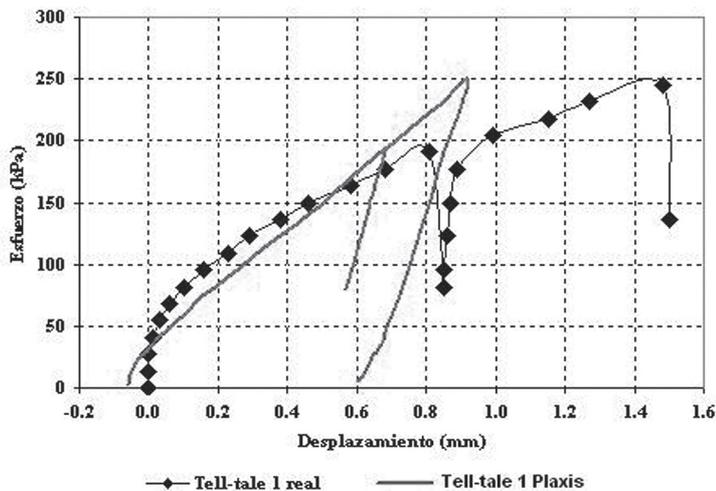


Figura 21. Comparación entre los resultados numéricos y los resultados experimentales a nivel de desplazamiento horizontal sobre la tubería flexible.

Fuente: (Los autores).

Adicionalmente, los datos de desplazamiento del terreno en el montaje real, obtenidos por medio de los extensómetros análogos, fueron comparados con los datos de desplazamiento arrojados por el programa de elementos finitos. Para los movimientos verticales se presenta en la Figura 20 la comparación de desplazamientos para el extensómetro análogo (tell-tale) No. 8. Es claro que existe una gran similitud en el comportamiento en ambos modelos que validan la utilización del modelo numérico para el análisis de la interacción suelo estructura de tubería ante fuerzas verticales y desplazamientos verticales.

De la misma forma, se realizó una comparación para las deformaciones horizontales, para lo cual en la Figura 21 se presentan los datos numéricos y experimentales para el extensómetro análogo (tell-tale) No. 1. Se observa en esta figura que el modelo numérico presenta una curva similar a la experimental, sin embargo, para deformaciones mayores a 0,5 mm y en la descarga – recarga, sus valores presentan desfases notables con respecto

a los medidos. El origen de esta discrepancia puede asociarse a que el modelo numérico no considera la anisotropía del suelo causada por los procesos de compactación.

CONCLUSIONES

1. Se presentaron resultados de una investigación tendiente a estudiar en detalle la interacción suelo-estructura en cimentaciones de tuberías enterradas bajo condiciones controladas mediante modelos físicos a escala natural en el laboratorio.
2. Estos modelos físicos se complementaron con análisis numéricos tendientes a modelar dicha interacción. Así mismo se caracterizaron también las tuberías y materiales de cimentación en el laboratorio.
3. Los resultados de esta investigación permiten entender mejor el problema y calibrar los modelos numéricos.

4. Se mostró que los modelos utilizados pueden representar razonablemente bien el comportamiento observado, por lo que se pueden utilizar para extrapolar los análisis para condiciones de campo diferentes a las consideradas en el laboratorio.
5. La información obtenida de estas pruebas se usará para revisar las normas y criterios colombianos de diseño que se utilizan para las cimentaciones de tuberías rígidas y flexibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AWWA, (American Water Works Association). (1996). *Fiberglass pipe design*, AWWA Manual M45. Denver: American Water Works Association.
- ACPA, (American Concrete Pipe Association). (1988). *Concrete Pipe Handbook*. Irwing, Texas: American Concrete Pipe Association
- ACPA, (American Concrete Pipe Association). (1992). *Concrete Pipe Design Manual*. Irwing, Texas: American Concrete Pipe Association
- Computers and Structures (CSI) (2005). *SAP 2000, Nonlinear static and dynamic finite element analysis and design*. Berkeley, California, USA.
- Coral, A. & Pereira, M. (2005). Análisis mediante modelos físicos de interacción suelo-estructura en tuberías enterradas. Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Heger, F. J., & McGrath, T. J. (1982). *Design method for reinforced concrete pipe and box sections*.
- Kurdziel, J. M. & McGrath, T. J. (1989). *SPIDA Method for reinforced concrete pipe design*. En:

ASCE Application Conference on Materials Engineering. David J. Akers, Ed.

Marston, A. (1930). *The theory of external loads on closed conduits In the light of the latest experiments*. Bulletin 96, Iowa State College.

PLAXIS. (1998). *Finite element code for soil and rock analyses*. Delft, Netherlands.

SOBRE LOS AUTORES

Jorge A. Rodríguez Ordóñez

Ingeniero Civil, MSCE, Ph. D.

Profesor Asociado

Investigador del grupo *Estructuras* y del grupo *CECATA*

Director del Departamento de Ingeniería Civil Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Teléfono: (571) 3808320 Ext: 5258

Correo electrónico: rodriguezja@javeriana.edu.co

Daniel M. Ruiz Valencia

Ingeniero Civil, MSCE

Profesor Asistente

Investigador del grupo *Estructuras*

Jefe del Laboratorio de Pruebas y Ensayos

Departamento de Ingeniería Civil

Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Teléfono: (571) 3808320 Ext: 5269

Correo electrónico: daniel.ruiz@javeriana.edu.co

Álvaro Coral Otero

Ingeniero Civil

Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Teléfono: (571) 3808320 Ext: 5256

Correo electrónico: acorl@hotmail.com

Mauricio Pereira Ordóñez

Ingeniero Civil

Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Teléfono: (571) 3808320 Ext: 5256

Correo electrónico: maopereira01@hotmail.com