

# Análisis mediante modelos físicos de interacción suelo-estructura en tuberías enterradas

## Analysis by physical modeling of buried pipes soil structure interaction

Jorge A. Rodriguez O.

*Ingeniero Civil, MSCE, PhD. Director, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana Bogotá (PUJ)*

Daniel M. Ruiz.

*Ingeniero Civil, MS. Profesor Departamento de Ingeniería Civil, PUJ*

Álvaro Coral.

*Ingeniero civil, PUJ*

Mauricio Pereira.

*Ingeniero civil, PUJ*

### 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 una tubería flexible de 0,6m de diámetro. Los modelos se hicieron con un montaje especialmente diseñado para tal efecto en el laboratorio de estructuras de la Universidad Javeriana. Se aplicó una carga 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. Se hicieron ensayos de caracterización mecánica tanto de las tuberías como del material de cimentación utilizado que correspondió a un recebo (arena arcillosa) representativa del material de atraque para cimentación de tuberías utilizado en la ciudad de Bogotá. Con los datos de los ensayos se calibraron modelos numéricos para hacer análisis de interacción suelo-estructura que permitan extender las observaciones realizadas a problemas con diferentes condiciones de frontera.*

### 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 0,6 m 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 Bogotá 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.*

### 1 INTRODUCCION

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 atraque 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 diseño basados en análisis mecánicos más completos de interacción suelo estructura para tuberías rígidas (Heger, F.J., and McGrath, T.J. 1982, Kurdziel, J.M. and McGrath, T.,J. 1989), lo que ha dado lugar a métodos alternativos de diseño propuestos por la American Concrete Pipe Association (ACPA, 1998, 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 (AWWA, 1996)

En el presente artículo se resumen 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 tendientes a modelar dicha interacción (Coral y Pereira, 2005). Como parte de la investigación se caracterizaron también las tuberías y 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 al análisis de problemas 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 24" de diámetro, espesor de pared de 15 mm, longitud de 400 mm y estaba elaborada con Policloruro de vinilo (PVC). Por su parte la tubería rígida era de concreto reforzado de con 60.96 cm (24 pulgadas) de diámetro, con un espesor de pared de 7.2cm y 60 cm de longitud.

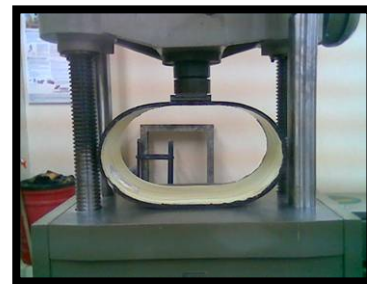
Con el fin de caracterizar el comportamiento mecánico de las tuberías rígidas (concreto) y las flexibles (PVC) a usar dentro del modelo experimental, se realizaron una serie de ensayos para determinar de manera indirecta el módulo de elasticidad del material componente de las tuberías. Para ello se realizaron 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 1 se presentan detalles del proceso de aplicación de carga de 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).



a)



b)



c)

Figura 1 a) Montaje del ensayo b) Detalle de los deformímetros laterales c) Detalle del estado final de la tubería (se recuperó totalmente la deformación luego del ensayo)

De la misma manera en la Figura 2 se muestra tanto el montaje como la posterior falla de la tubería rígida. El método de ensayo consistió en aplicar pequeños incrementos de carga en el rango elástico (aproximadamente 20 incrementos) con la medición simultánea de la carga aplicada y los desplazamientos de los

deformímetros usados en la instrumentación. 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.



a)



b)



c)

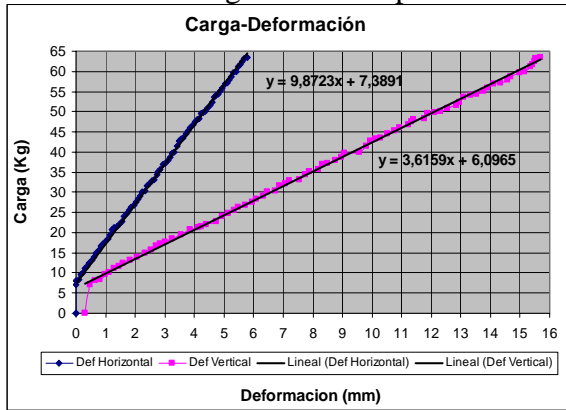


d)

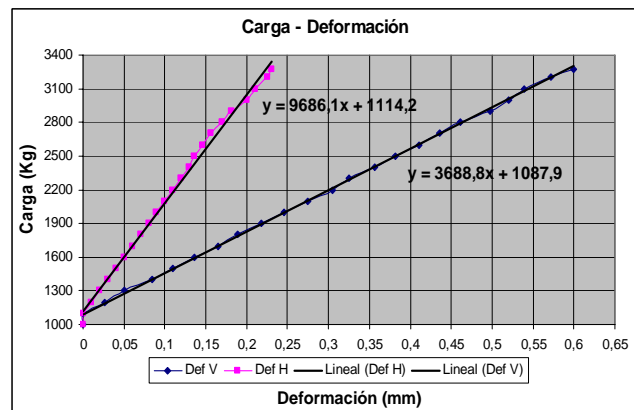
Figura 2 a) Proceso de montaje de la tubería rígida del ensayo b) Detalle de los deformímetros laterales c) Grieta en la zona inferior de la tubería de concreto d) Grieta en el costado de la tubería rígida

Con base en el anterior procedimiento se obtuvieron 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 que se presentan en la Figura 3.



a)



b)

Figura 3 Curvas de comportamiento en el rango elástico de las tuberías a) flexible y b) rígida

La tubería rígida colapsó para una carga aproximada de 3 toneladas distribuidas sobre sus 60 cm 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

Fue así como se determinó que el módulo de elasticidad para la tubería Novaloc de 24" era de 1433 MPa y para la tubería de concreto de 21000 MPa. Este último valor está en el orden de magnitud del módulo que típicamente se usa para el concreto reforzado.

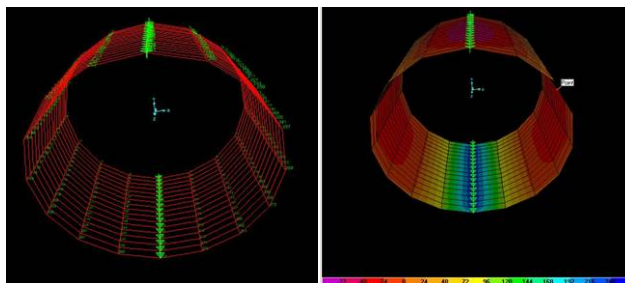
### 3 ENSAYOS SOBRE MODELOS FÍSICOS DE TUBERÍAS INSTALADAS A ESCALA REAL

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 mostrado en la Figura 4 asignándole las dimensiones y 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.

Para realizar el montaje a escala real de las tuberías enterradas se diseñó y construyó un sistema de 6 pórticos de acero (4 en dirección transversal y 2 en dirección longitudinal) que tenían la función primordial de confinar una caja elaborada mediante platinas metálicas de 1/4" de espesor. Todo el sistema se diseñó y construyó mediante acero A-36 y con conexiones a base de pernos de alta resistencia (grado 5). Esta caja de acero y su estructura de soporte se instaló sobre el marco de pruebas adjunto a la máquina universal y sus características principales se presentan en la Figura 5.

Es importante tener en cuenta que el diseño del sistema consideró una adecuada resistencia (Factores 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.

Así mismo debe tenerse en cuenta que la caja fue diseñada para que fuese capaz de soportar la carga máxima del gato hidráulico (20 Toneladas) distribuida en un área tal que se generan una presión de contacto del orden de 1 MPa.



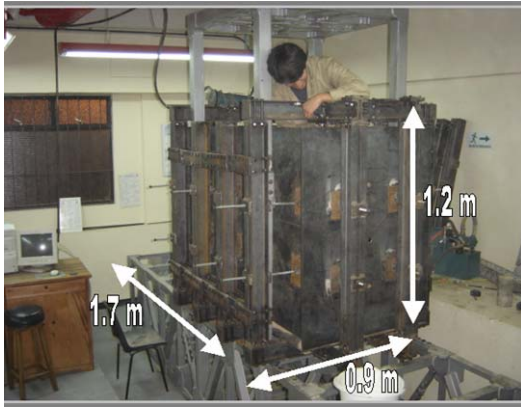
a)

b)

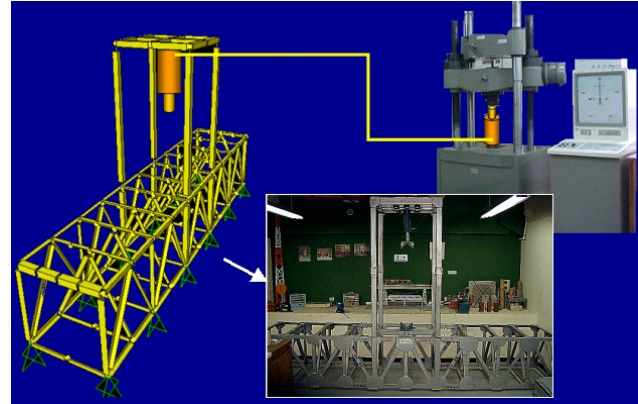
Figura 4 a) Partición de la tubería en elementos finitos y condiciones de frontera b) Distribución de esfuerzos máximos

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.

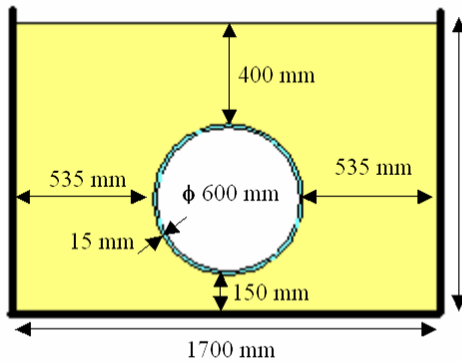


a)

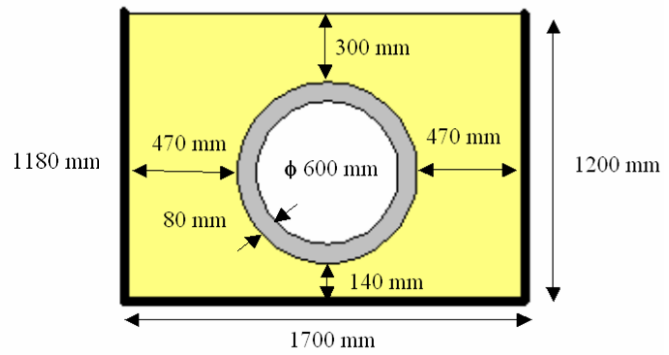


b)

Figura 5 a) Dimensiones de la caja de acero para la ejecución de los ensayos sobre las tuberías  
b) Esquema del marco de pruebas y del sistema de aplicación de carga



a)



b)

Figura 6 Ubicación de la tubería dentro del montaje de los modelos físicos a) Tubería flexible  
b) Tubería rígida



Figura 7 Detalle de la celda de carga, del deformímetro testigo del desplazamiento y de los perfiles de aplicación de carga

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 (Figura 7).

Por otro lado, para registrar los valores de desplazamiento del suelo en diez (10) 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).

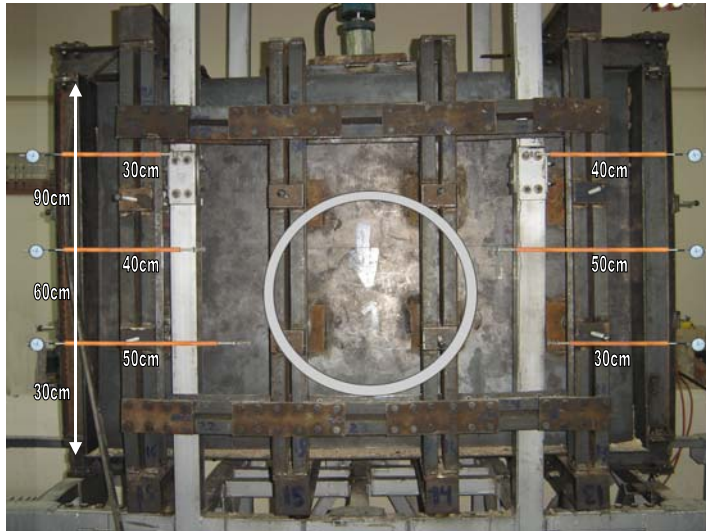


Figura 8 Tell tales a) anclaje mecánico b) Funda, varilla lisa y deformímetro análogo

El montaje de estos aditamentos consta de un anclaje mecánico al suelo (Figura 8a), una varilla de 1/4" 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



a)



b)

Figura 9 a) Vista frontal de la ubicación de los tell tales antes del ensayo b) Detalle de los tell tales al desmontar el sistema después de ejecutar el ensayo



a)

b)

Figura 10 a) Extensómetros para medir desplazamientos de la tubería con respecto a la caja b) Extensómetros para medir desplazamientos relativos (alargamiento y acortamiento)

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 10 toneladas 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). 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

el montaje a escala real y la respectiva numeración usada en la toma de datos.

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).

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. Así mismo se observa una tendencia de la tubería a cambiar su geometría circular, mayoritariamente debido a desplazamientos relativos en dirección vertical.

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

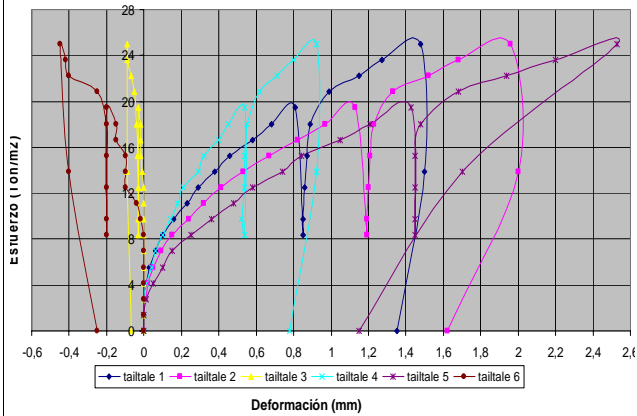


Figura 11 Gráficas de esfuerzo vs. desplazamiento horizontal del suelo en los diferentes extensómetros. Tubería flexible

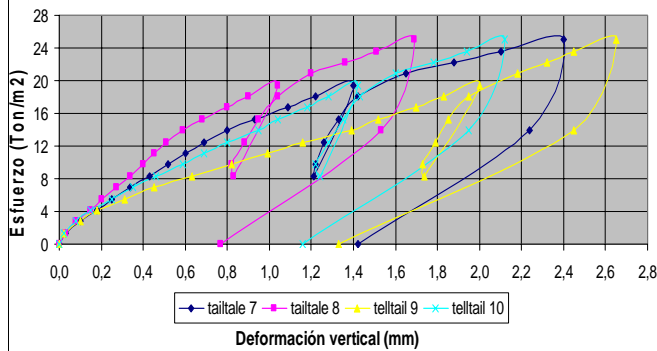
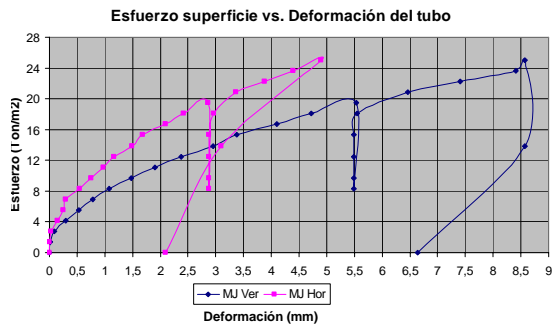


Figura 12 Gráficas de esfuerzo vs. desplazamiento vertical del suelo en diferentes extensómetros. Tubería flexible

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



a)

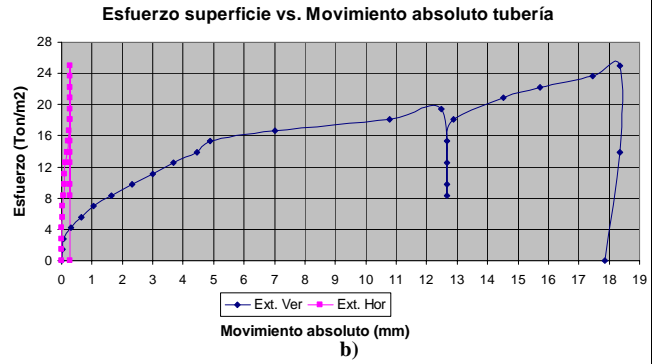


Figura 13 a) Esfuerzo vs desplazamiento relativo del tubo b) Esfuerzo vs desplazamiento absoluto del tubo. Tubería flexible.



Figura 14 Deformada de la tubería el final del ensayo

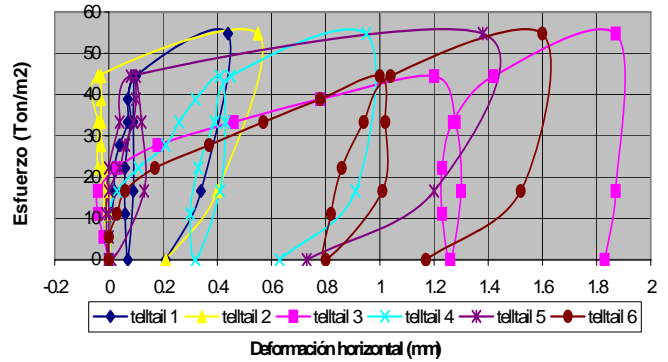


Figura 15 Gráficas de esfuerzo vs. desplazamiento horizontal del suelo en los diferentes extensómetros. Tubería Rígida

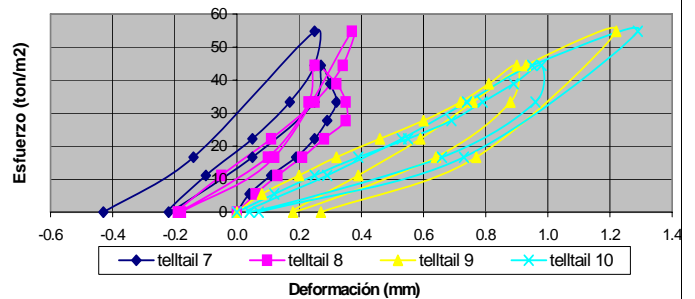


Figura 16 Gráficas de esfuerzo vs. desplazamiento vertical del suelo en diferentes extensómetros. Tubería Rígida

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.

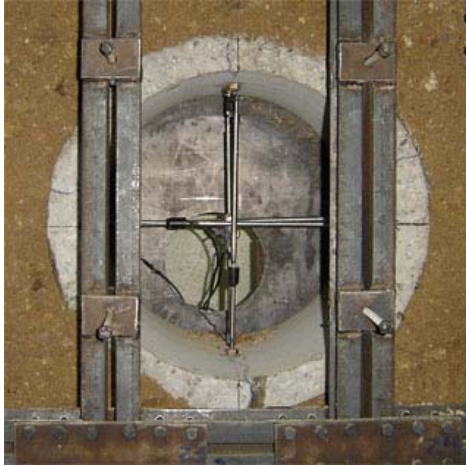


Figura 17 Estado de la tubería al finalizar el ensayo (en azul están marcados los lugares de aparición de grietas)

#### 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 las Tablas 1 y 2.

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

	Parámetro	Unidad	Valor
Peso unitario seco	gam_dry	[kN/m <sup>3</sup> ]	16.3
Peso unitario húmedo	gam_wet	[kN/m <sup>3</sup> ]	16.3
Módulo secante al 50% de esfuerzo último en corte	E50ref	[kN/m <sup>2</sup> ]	35000
Módulo tangente de deformación volumétrica a la presión de referencia	Eoedref	[kN/m <sup>2</sup> ]	25709.2
Módulo elástico de descarga en esfuerzo cortante a la presión de referencia	Eurref	[kN/m <sup>2</sup> ]	80000
Cohesión	c_ref	[kN/m <sup>2</sup> ]	33
Angulo de fricción interna	phi	[°]	25
Angulo de dilatación	psi	[°]	0
Relación de poisson efectiva	nu_ur	[-]	0.2
Presión de referencia	p_ref	[kN/m <sup>2</sup> ]	100
Exponente de variación con la presión de confinamiento	Power	[-]	0.75
Coefficiente de empuje de tierras en reposo en compresión virgen	K0nc	[-]	0.57738174

Tabla 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	1287200
Módulo de elasticidad por Inercia	EI	[kNm <sup>2</sup> /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

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 15 nodos. Para la tubería flexible la carga se distribuyó en un ancho de 60cm de ancho mientras que para la tubería rígida la carga se distribuyó en 30 cm. de ancho, de acuerdo con

las condiciones de los modelos físicos efectuados.

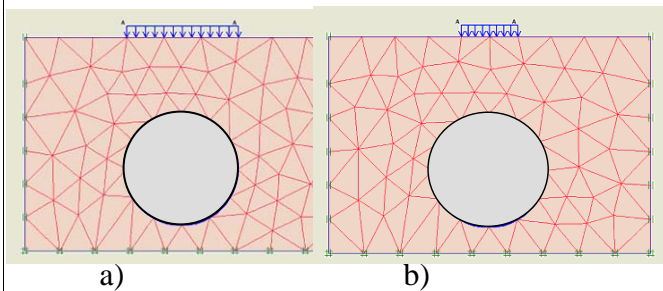


Figura 18 Detalle del modelo en elementos finitos elaborado para la tubería a) flexible b) rígida

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.

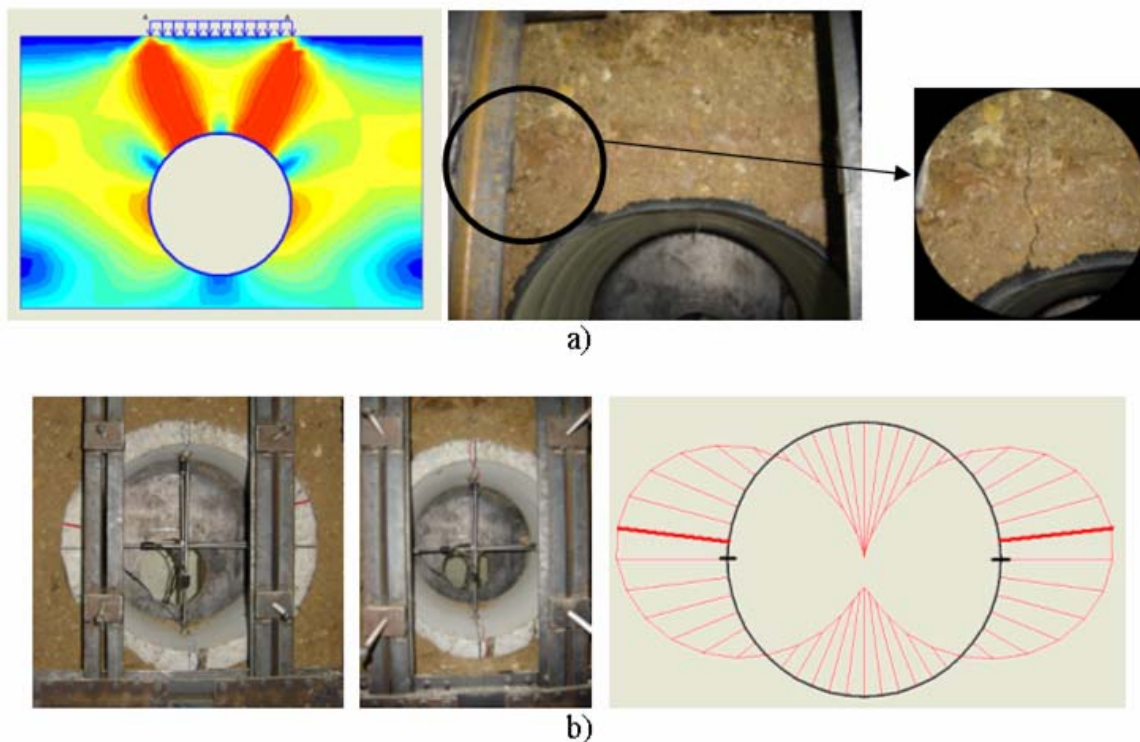


Figura 19 Comparación entre el modelo numérico y el modelo físico a nivel de esfuerzos en el suelo. a) tubería flexible, b) tubería rígida

Por su parte al comparar y revisar el diagrama de momentos interno de la tubería rígida estimado mediante el modelo analítico (Figura 19 b), 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. Así mismo 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.

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. Al nivel de desplazamientos 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 y validan la utilización del modelo numérico para el análisis de la interacción suelo estructura de tubería ante fuerzas verticales y desplazamientos verticales.



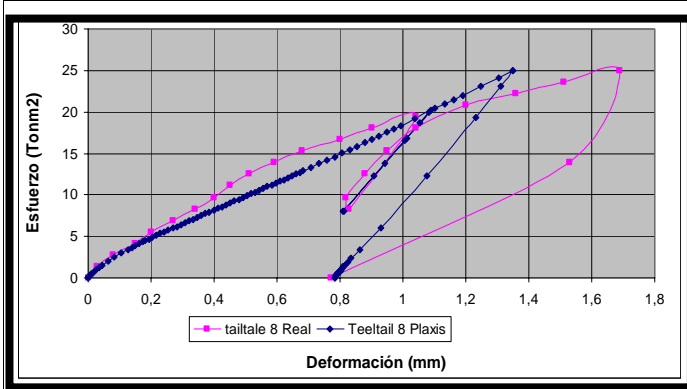


Figura 20 Comparación entre los resultados numéricos y los resultados experimentales a nivel de desplazamiento vertical para el ensayo sobre la tubería flexible

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.

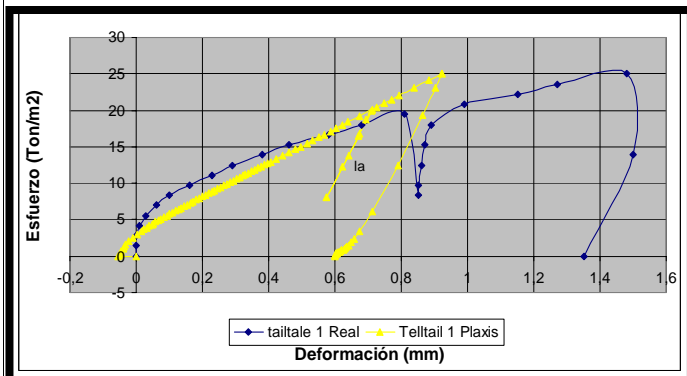


Figura 21 Comparación entre los resultados numéricos y los resultados experimentales a nivel de desplazamiento horizontal sobre la tubería flexible

## 5 CONCLUSIONES

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 complementados con análisis numéricos tendientes a modelar dicha interacción. Como parte de la investigación se caracterizaron también las tuberías y materiales de cimentación en el laboratorio. Los resultados de esta investigación permiten entender mejor el problema y calibrar los modelos numéricos. 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. La información obtenida de estas pruebas se puede utilizar para revisar las normas y criterios de diseño que se utilizan para las cimentaciones de tuberías rígidas y flexibles.

## REFERENCIAS

- American Water Works Association (AWWA), (1996) *"Fiberglass pipe design, AWWA Manual M45"*. Denver, American Water Works Association.
- American Concrete Pipe Association (ACPA), (1988). *"Concrete Pipe Handbook"*. Irving, Texas
- American Concrete Pipe Association, (1992). *"Concrete Pipe Design Manual"* Irving, Texas
- Coral Alvaro, Pereira Mauricio, (2005). *"Análisis mediante modelos físicos de interacción suelo-estructura en tuberías enterradas"* Proyecto de Grado en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Heger, F.J., and McGrath, T.J. (1982). "Design Method for Reinforced Concrete Pipe and Box Sections", American Concrete Pipe Association.
- Kurdziel, J.M. and McGrath, T.,J. (1989). *"SPIDA Method for Reinforced Concrete Pipe Design"*, ASCE Conference on Materials Engineering Application 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"*.. Elsevier, Rotterdam..