

Geosynthetic Reinforcement of Buried Flexible Pipes

Juán José CLARÍA^{a,1} y Francis Morella MORENO GUILLÉN^a
^a*Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.*

Abstract. Buried pipes perform a key role in urban centers, including multiple functions from fluid transport to electric lines conduction. Usually, flexible pipes design is developed by means of approximate formulations derived from the elasticity theory (v.g. Spangler Iowa). Although there are many studies about the interaction between a soil and a buried pipe, several failures are observed in these systems. In order to reduce the pipe deflections and stresses, the system reinforcement with a geosynthetic is proposed. The present paper shows the results of a parametric study about the interaction between a flexible buried pipe (e.g. polyester reinforced with fiberglass pipe - PRFV) with the surrounding soil and a geosynthetic acting as a reinforcement element. For the analysis of the soil-pipe-geosynthetic interaction and behavior, a bidimensional finite element model was built using PLAXIS software. By means of the numeric model, the contribution of the geosynthetic as a function of the soil and pipe stiffness was determined. The influence of the geosynthetic burial depth on the pipe deflection is also analyzed. The maximum geosynthetic contribution is observed for the case of pipe trenches excavated on rigid natural soils backfilled with softly compacted materials in order to avoid pipe damage.

Keywords. Geosynthetics - buried pipes - reinforcement.

1. Introducción

Frecuentemente, se proyectan tuberías enterradas sin darle importancia al diseño geotécnico, lo que se traduce en comportamientos indeseados, como por ejemplo, obstrucciones en los tubos, aberturas de las juntas, perforaciones localizadas, pérdidas de fluidos, e incluso la inducción de fallas en elementos que se encuentren en los alrededores de la tubería, tales como estructuras de pavimentos, fundaciones etc.

El comportamiento de las tuberías flexibles ha sido objeto de numerosos estudios, iniciados a partir de la década de 1940, con los trabajos pioneros de [1]. En general las investigaciones se concentran en predecir las deformaciones que se producen en las tuberías flexibles enterradas. Cuando las deformaciones resultan muy grandes, se puede producir la ruptura por deflexión excesiva, la cual ocurre generalmente en rellenos mal compactados donde la sección transversal del caño adquiere una forma elíptica caracterizada por el aumento del diámetro horizontal como consecuencia de la falta de confinamiento ([2], [3]). [2] propone un método de diseño que calibra la ecuación de Iowa a partir de datos experimentales en tuberías flexibles.

¹ jclaria@com.uncor.edu.

Con el avance de la geomecánica computacional, numerosos autores han estudiado el comportamiento de tuberías enterradas a través de modelaciones numéricas ([4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12] y [13]).

En el presente trabajo se presentan los resultados de un estudio sobre la interacción entre una tubería enterrada con el suelo circundante y una geogrilla o geotextil actuando como refuerzo. El análisis es válido para tuberías de tipo flexible, como son por ejemplo las de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), de amplia difusión en nuestro medio. Para el análisis del comportamiento e interacción del suelo-tubería-geosintético se realizó un estudio paramétrico que consistió en simulaciones numéricas mediante un modelo bidimensional basado en el método de elementos finitos, construido utilizando el software comercial PLAXIS versión 7.

2. Metodología de estudio

2.1. Modelo numérico

El modelo se planteó bajo la hipótesis de deformación plana en un modelo bidimensional. La geometría adoptada en el modelo depende de la manera como se instala la tubería. Para el caso de estudio se consideró la tubería instalada en una zanja.

Los elementos finitos utilizados se definen a continuación:

- Suelo: se modeló mediante elementos triangulares de seis nodos. Se adoptó el modelo constitutivo de Mohr - Coulomb como criterio de plasticidad y rotura.
- Geosintético: se representó a través de una barra con propiedades elásticas lineales, dispuesto en el interior de la masa de suelo, horizontalmente, sobre la corona de la tubería, a diferentes profundidades.

El geosintético se asume anclado en sus extremos para asegurar que se comporte como una membrana fija cargada en su parte central.

- Tubería: la tubería se representó mediante elementos de cáscara, con propiedades elásticas lineales.

En la Fig. 1a se observa la malla de elementos finitos y geometría del modelo planteado. La Figura 1b muestra un resultado típico de deformación del modelo.

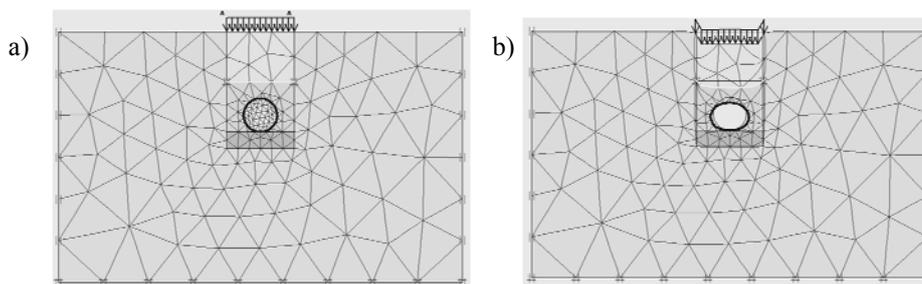


Figura 1: Modelo de elementos finitos: a) Mallado del modelo b) Resultado típico de deformación del modelo: malla deformada (deformaciones ampliadas diez veces).

2.2. Propiedades del material de relleno y terreno natural

Debido a que una de las principales variables que gobiernan el comportamiento de la interacción suelo, tubería flexible y geosintético corresponde a la diferencia de

rigideces entre los distintos materiales, las modelaciones fueron hechas con diferentes valores de E_S (módulo de Young del material de relleno de la zanja, que circunda la tubería y sobre el cual se coloca el geosintético) y E_T (módulo de Young del terreno natural, fuera de la zanja con relleno).

En la Tabla 1 se presenta la nomenclatura y módulos adoptados para el material de relleno y terreno natural empleados en el modelo.

Tabla1: Definición de material de relleno y terreno natural utilizados en las simulaciones.

Material de relleno	E_S (kN/m ²)	Terreno Natural	E_T (kN/m ²)
M1	100	A	50.000
M2	500	B	20.000
M3	1500	C	10.000
M4	2500	D	5.000
M5	5000	E	2.500
M6	10000		

E_S : Módulo de Young del material de relleno de la zanja. E_T : Módulo de Young del terreno natural.

El Módulo de Young de la base de apoyo (E_B) de la tubería se mantuvo constante en todas las simulaciones realizadas e igual a 5000 kN/m².

2.3. Tubería

Las tuberías flexibles se fabrican con diferentes materiales y en un amplio rango de diámetros dependiendo del uso y de las características de la instalación para la cual están destinadas. El presente estudio se realizó con tuberías de poliéster reforzado con fibra de vidrio o PRFV. Las propiedades de la tubería varían según la rigidez de sección $SR=EI/D^3$. Los análisis se realizaron para tuberías de PRFV con tres rigideces de sección diferentes: $SR=2500$ N/m², $SR=5000$ N/m² y $SR=10000$ N/m², todas con un diámetro $D=1$ m.

2.4. Geosintético

En el presente estudio se consideró un geotextil de rigidez axial $EA=100$ kN/m. A modo de referencia la rigidez axial de un geotextil tejido se encuentra entre los 100-300 kN/m mientras que la de un geotextil no tejido varía de 5-100 kN/m.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las deflexiones en la tubería ($\Delta y/D$) se definen como el acortamiento en el diámetro vertical (Δy) en relación al diámetro de la tubería sin deformar (D).

Para comparación de los resultados se define la variable “porcentaje de reducción de la deflexión”(PRD) de la siguiente manera:

$$PRD = \frac{\Delta_{yi} - \Delta_{yo}}{\Delta_{yi}} \times 100\% \quad (1)$$

donde Δ_{yi} es la deflexión sin geosintético y Δ_{yo} es la deflexión con geosintético.

3.1. Efecto de la relación de módulos E_s/E_T sobre las deflexiones en la tubería

Se realizaron simulaciones numéricas con el modelo presentado en la Fig. 1 incluyendo la presencia de un geosintético ubicado sobre la tubería y anclado en sus extremos. Se consideró una sobrecarga en superficie de 50 kN/m/m y una profundidad de enterramiento del geosintético de 1,5D, siendo D el diámetro de la tubería. La Fig. 2 muestra la influencia de la relación de rigideces E_s/E_T (módulo del relleno sobre el módulo del terreno natural) en la deflexión relativa al diámetro de la tubería ($\Delta y/D$), cuando se somete a un incremento tensional producto del relleno de la zanja y aplicación de la sobrecarga.

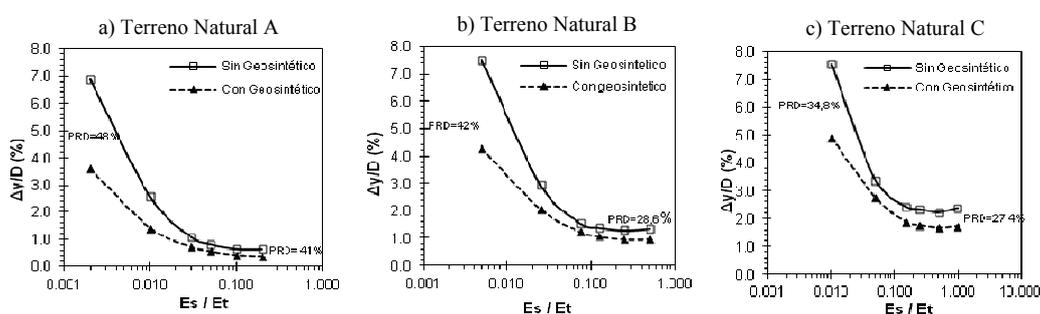


Figura 2: Variación de la deflexión relativa ($\Delta y/D$) con la relación de módulos (E_s/E_T): a) Terreno natural A, b) Terreno natural B, c) Terreno natural C. (PRD=porcentaje de reducción de la deflexión).

A medida que se incrementa la relación de rigideces E_s/E_T , las deflexiones en la tubería disminuyen. Para valores bajos de relación de módulos E_s/E_T el aporte logrado con el geosintético es mayor, alcanzando valores de PRD de 48% como se observa en la Fig. 2a.

Nótese que los valores $\Delta y/D$ y E_s/E_T son parámetros adimensionales, por lo que los resultados obtenidos representan tendencias generales para la configuración geométrica analizada en este estudio.

De la Fig. 2 se observa que para el caso de terreno natural más rígido con material de relleno de módulo bajo, se logra el mayor aporte del geosintético (máximo valor de PRD). Esto es consecuencia de que al existir una elevada diferencia de rigideces entre terreno natural (prisma externo) y material de relleno-tubería (prisma interno) el efecto arco positivo en la redistribución de tensiones resulta pronunciado. Por otra parte al ser el material de relleno de baja rigidez en relación a la rigidez del geosintético, permite que último se deforme y que se desarrollen mayores fuerzas de tracción con la consecuente componente vertical del geosintético (efecto membrana), disminuyendo la carga que el mismo transfiere a la zona que se encuentra por debajo de él y por consiguiente la carga que alcanza a la tubería.

Para valores bajos del módulo del material de relleno (E_s) y terreno natural blando, las deflexiones se encuentran entre el 4 y el 8%, valores próximos o por encima del límite de deflexión del 5% establecido por las normativas internacionales ([14]) y recomendadas por los fabricantes de tuberías. A medida que el módulo de relleno (E_s) aumenta, los valores en las deflexiones disminuyen encontrándose por debajo del 4%. Esto es debido a que la capacidad de carga de las tuberías flexibles depende del desarrollo de resistencia pasiva en el suelo circundante una vez que la tubería se deforma. Sin embargo, en el caso de terrenos naturales blandos (suelos D y E) para relaciones E_s/E_t mayores a 0.5 las deflexiones de la tubería comienzan a crecer

levemente con el aumento de E_s/E_t . Existe por lo tanto una relación de módulos E_s/E_t que minimiza las deflexiones en la tubería porque coincide con el punto óptimo de desarrollo de resistencia pasiva, efecto membrana y efecto arco positivo, pero que no es necesariamente el punto donde el geosintético genera el máximo aporte.

3.1.1. Efecto de la rigidez de sección de la tubería SR

Se realizaron una serie de simulaciones para los tres tipos de tuberías presentados en la sección 2.3 y con el modelo descrito en la Fig. 1a. Se asumió una sobrecarga de 50 kN/m/m y una profundidad de enterramiento del geosintético igual a 1D. Se hicieron variar los valores de módulo de material de relleno E_s y de terreno natural E_T manteniendo constante la rigidez axial del geosintético $EA=100$ kN/m².

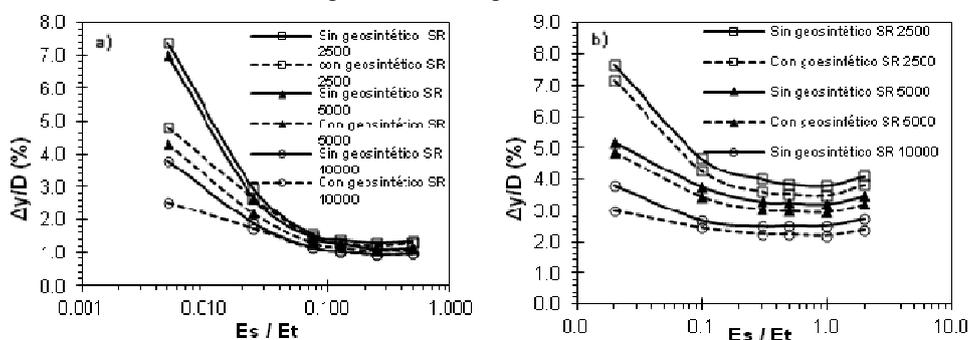


Figura 3: Variación de la deflexión con la relación de módulos E_s/E_T para tuberías con rigidez de sección 2500; 5000 y 10000 N/m². a) Terreno natural B, b) Terreno natural D.

En general el mayor aporte del geosintético se logra para el caso de las tuberías más flexibles $SR=2500$ y $SR=5000$ N/m² y con el terreno natural más rígido alcanzando un porcentaje de reducción de la deflexión (PRD) alrededor del 30% (Ver Fig. 3a) para el caso de un terreno natural tipo B. A medida que disminuye la rigidez del terreno natural las tendencias en la disminución de la deflexión se vuelven similares para todos los casos de tuberías, como se observa en la Fig. 3b, en donde para todos los tipos de tuberías el porcentaje de reducción de la deflexión (PRD) con la incorporación del geosintético resultó de 5%. La disminución en la rigidez del terreno natural, hace que la rigidez relativa del sistema, definida como la relación entre la rigidez del suelo y la rigidez de la tubería, disminuya y que por lo tanto el porcentaje de carga que soporta la tubería se incremente. Al disminuir la rigidez relativa del sistema el prisma central tiende a deformarse menos generando disminución en el aporte por efecto arco del suelo y efecto membrana del geosintético.

3.1.2. Influencia de la profundidad de enterramiento del geosintético

En la siguiente serie de simulaciones se define la profundidad de enterramiento del geosintético como la distancia entre el mismo y la superficie del terreno. Se analizan dos profundidades $h=1D$ y $h=1,5D$, estando la corona de la tubería a una profundidad constante e igual a $2D$. Se asumió una sobrecarga de 50 kN/m/m, una tubería de rigidez $SR=2500$ N/m² y se hicieron variar los parámetros E_s y E_T .

De la Fig. 4 puede observarse que en todos los casos la profundidad de enterramiento del geosintético influye notablemente en la disminución de las deflexiones en la tubería. En los casos estudiados se obtuvieron mejores aportes en el

caso del geosintético a una profundidad $h=1,5D$. En la Fig. 4a (Terreno B) se observa que el porcentaje de reducción de la deflexión (PRD) alcanza un 42% para el caso de una relación de módulos (E_s/E_T) baja cuando el geosintético se encuentra más cercano a la tubería ($h=1,5D$). Para el terreno C se observa que el PRD aumenta de 10 % para $h=1D$ a 27,4% para $h=1,5D$ para la mayor relación de módulos E_s/E_T . En general puede concluirse que un geosintético colocado cercano a la corona del tubo puede aportar entre un 22,5% a un 48% en la disminución de las deflexiones dependiendo de las rigideces del suelo natural y de relleno para la configuración estudiada en este trabajo.

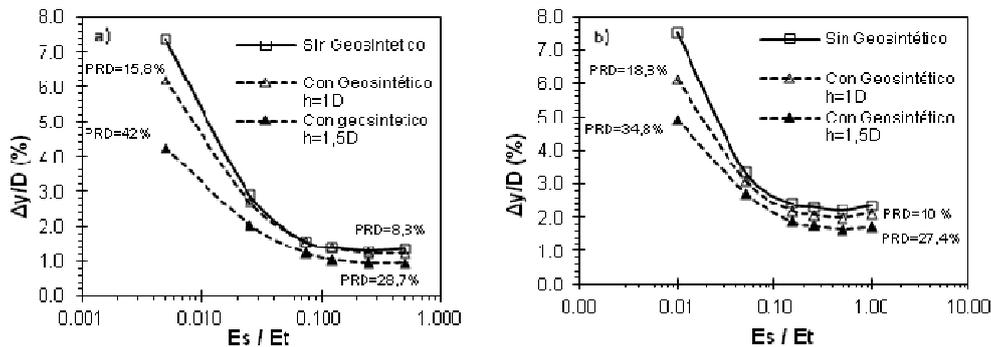


Figura 4: Deflexión en la tubería versus relación de módulos E_s/E_T para diferentes profundidades de enterramiento del geosintético. a) Terreno B b) Terreno C.

3.2. Deflexiones mínimas en la tubería

En la Fig. 5 se representan todas las curvas de deflexiones máximas versus relación E_s/E_t , para los diferentes casos de terreno natural con la inclusión de geosintético a una profundidad igual a 1D y en tuberías de 2500 N/m² de rigidez de sección.

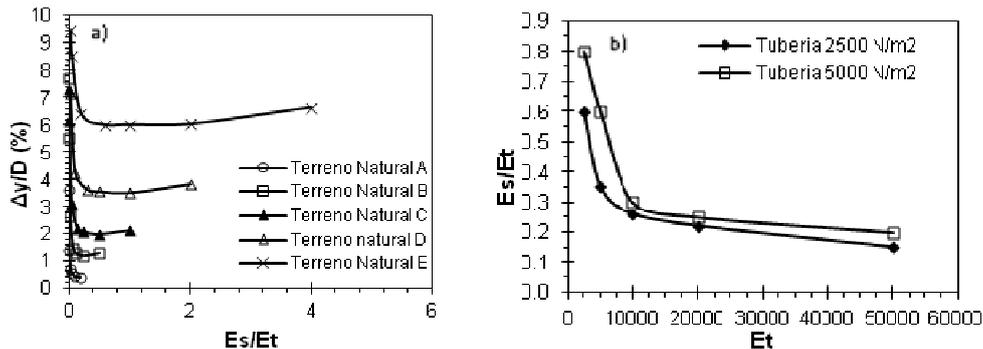


Figura 5: a) Curvas de variación de la deflexión máxima con la relación E_s/E_T . Tubería de 2500 N/m² de rigidez de sección. b) Relación de módulos E_s/E_t versus E_T que minimizan las deflexiones en la tubería. Tubería de 2500 y 5000 N/m² de rigidez de sección.

Nótese que en todas las curvas existe una relación E_s/E_t que minimiza las deflexiones en la tubería, es decir, una relación E_s/E_t que resulta ser las más apropiada en cuanto a aporte del suelo, efecto membrana del geosintético y efecto arco, aún cuando para estas relaciones el aporte del geosintético no sea el máximo lograble. Uniendo esos puntos mínimos se puede obtener la curva representada en la Fig. 5b,

que también incluye el mismo análisis para tuberías de 5000 N/m² de rigidez de sección. Se pueden construir gráficos similares para diversas profundidades de enterramiento del geosintético.

De la Fig. 5b se puede concluir que para la configuración estudiada:

- En terrenos naturales con $E_T > 10000$ kN/m² se obtienen las mínimas deflexiones para un material de relleno con un módulo entre un 20 a 30% del módulo del terreno natural en el caso de tubería de 2500 N/m² y entre 15 y 25% del módulo de terreno natural en el caso de una tubería de 5000 kN/m² de rigidez de sección.

- Para Terrenos naturales blandos con $E_T < 10000$ kN/m² la situación resulta más compleja y se obtienen las mínimas deflexiones para un material de relleno con un módulo entre un 30% a un 80% del módulo de terreno natural en el caso de un tubería de 2500 N/m² y entre 25% a un 60% del módulo de terreno natural para tuberías de 5000 kN/m² de rigidez de sección. Es evidente que para terrenos naturales blandos la interacción de las variables analizadas resulta más compleja.

4. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio paramétrico sobre distintas variables que intervienen en la interacción suelo-tubería-geosintético. El análisis se realizó mediante simulaciones numéricas a través del método de elementos finitos utilizando un modelo bidimensional. Los resultados presentados corresponden a tendencias generales para la configuración geométrica estudiada. Las principales conclusiones son:

- En la interacción entre suelo-tubería-geosintético, quien gobierna el comportamiento del sistema es la relación de rigideces entre los distintos componentes del mismo. Ocurren tres fenómenos: efecto arco del suelo, efecto membrana del geosintético y desarrollo de resistencia pasiva en el suelo circundante a la tubería, que dependen de la relación de rigideces. Para un valor dado de módulo de terreno natural (E_T) existe una relación de rigidez (E_S/E_T) que minimiza la deflexión en la tubería con la inclusión del geosintético.

- En el caso de zanjas para tuberías excavadas en terrenos naturales medianamente rígidos, rellenas con materiales granulares poco compactados para no dañar la tubería, se logra el mayor aporte del geosintético. Para el caso de terrenos naturales blandos la interacción entre los distintos parámetros se hace más compleja y el aporte del geosintético puede llegar a ser despreciable.

- Para el caso de tuberías de elevada flexibilidad (rigidez $SR=2500$ N/m²) y terreno natural medianamente rígido, el geosintético provee gran aporte estructural. Al disminuir la rigidez del terreno natural y por tanto la rigidez relativa del sistema, la tendencia en la disminución de las deflexiones se hace similar para todas las tuberías independientemente de la rigidez de sección de la misma.

- La configuración de colocación del geosintético es determinante, el mismo debe estar anclado en sus extremos para desarrollar efecto membrana.

- Las deflexiones en la tubería dependen de la profundidad de enterramiento del geosintético. El geosintético colocado a una profundidad de 1,5D (más cercano a la corona de la tubería) generó mayor aporte en todos los casos analizados que aquel colocado a una profundidad de 1D.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el aporte técnico de los Ings. Carlos Maina y Eugenio Rodríguez de la Empresa AMITECH ARGENTINA.

6. REFERENCIAS

- [1] Spangler. (1941). "The Structural Design of Flexible Pipe Culverts". Iowa Engineering Experiment Station Bulletin 153.
- [2] Watkins y Anderson (2000). "Structural Mechanics of Buried Pipes". USA: CRC Press.
- [3] Moser A. y Folkman S. (2008). "Buried Pipe Design", 3er ed, MacGraw-Hill.
- [4] Francisca F., Redolfi E. (2002). "Tuberías enterradas en suelos loessicos. Efectos de la saturación del suelo". Revista Internacional de desastres naturales, Vol. 2, N°2, pp. 3 – 19. Universidad de Puerto Rico, Mayagüez
- [5] Terzariol R., Arrúa P. y Aiassa G. (2006). "Comportamiento de Cañerías Flexibles y Rígidas Enterradas en Suelos Loésicos". XVIII Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, San Juan, Argentina.
- [6] Kennedy J. B. y Laba J. T. (1989). "Suggested Improvements in Designing Soil-Steel Structures", Transportation Research Record, pp 96-104.
- [7] Liedberg N. S. D. (1994). "Reduction of vertical stresses on rigid pipes by the use of soft inclusions under the invert". XIII ICSMFEL, New Delhi, Pp 579-582.
- [8] Das B. y Khing K. H. (1994). "Foundation on Layered Soil with Geogrid Reinforcement - effect of a void", Geotextiles and Geomembranes, Vol 13, Pp 545-553.
- [9] Viana P. M. F. y Bueno B. (1998). "Condutos enterrados: reducao de esforcos sobre a estrutura", XII COBRAMSEG, Brasilia, Vol. 2, pp 1055-1061.
- [10] Rajkumar R. e Ilamparuthi K. (2008). "Experimental Study on the Behavior of Buried Flexible Plastic Pipe", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 13.
- [11] Moghaddas S. N. y Khalaj O. (2008). "Laboratory tests of small-diameter HDPE pipes buried in reinforced sand under repeated load". Geotextiles and Geomembranes , Vol 26, 145-163
- [12] Viana P. M. F. (2003). "Geovalva: um novo processo contrutivo para dutos enterrados", Tesis doctoral, Sao Carlos- Brasil
- [13] Bueno B. y Costa Y. D. J. (2009). "Dutos Enterrados: Aspectos Geotécnicos", Escola de Engenharia de Sao Carlos, Universidade Sao Paulo-Brasil, Sao Carlos.
- [14] American Water Works Association. Manual M45 (2006). "Fiber Glass Pipe Design", 2nd ed.