

ANÁLISIS DE TUBERÍAS ENTERRADAS EN SUELOS LOÉSSICOS: EFECTO DE LA SATURACIÓN DEL SUELO

Franco M. Francisca¹, Emilio R. Redolfi² y Carlos A. Prato³

RESUMEN: El cálculo y diseño de tuberías enterradas se realiza normalmente mediante formulas aproximadas o métodos semiempíricos. A pesar de su amplia difusión, estas teorías no permiten explicar las fallas observadas en numerosas tuberías. Tampoco es posible tener en cuenta el efecto de la pérdida de confinamiento lateral que ocurre cuando se satura o inunda el terreno natural. Este problema es de fundamental importancia en los limos loéssicos del centro de Argentina, y se ha convertido en una de las principales causas de rotura de tuberías. En este trabajo se desarrolló un modelo bidimensional en elementos finitos para analizar el comportamiento de tuberías enterradas en suelos loéssicos. Los resultados obtenidos permitieron determinar la influencia de la rigidez de la tubería y de la saturación del suelo en las deflexiones de la misma. Se analizó el efecto de las interfases suelo-caño, la influencia del comportamiento no-elástico del suelo, la necesidad de considerar pequeñas y grandes deformaciones en el cálculo, y la contribución del ancho de la trinchera y del módulo de deformación del relleno en las deflexiones de las tuberías. Se concluye en este trabajo, que el método de elementos finitos permite modelar en forma efectiva el comportamiento de las tuberías enterradas en suelos loéssicos. Se demostró que los métodos tradicionales de cálculo tienden a predecir deflexiones y esfuerzos no conservadores, lo cual permite apreciar la importancia de utilizar métodos numéricos en el análisis de tuberías enterradas.

INTRODUCCIÓN

Las tuberías y caños enterrados son habitualmente calculados considerando las cargas que deben soportar las mismas durante su vida útil. Para ello, es usual utilizar la teoría de Marston-Spangler (Spangler, 1948; Mayol, 1981). Esta metodología de cálculo se basa en soluciones del tipo elásticas para el diseño de la tubería, predice las cargas que actúan en la misma, y calcula las deformaciones de la tubería a partir de las solicitaciones y los módulos elásticos de la misma y del terreno. Tohda *et al.* (1997) estudiaron el comportamiento mecánico de tuberías mediante modelos físicos ensayados en una centrífuga, y mostraron que las solicitaciones que deben soportar las tuberías difieren de las consideradas en el análisis de Marston-Spangler. Sin embargo, esta última teoría es utilizada en la práctica debido a que permite realizar el cálculo de tuberías teniendo en cuenta el método constructivo y la rigidez de la cañería. En las últimas décadas la teoría de Marston-Spangler ha sido revisada debido a los numerosos casos de tuberías que han fallado (Gurí, 1980; Tohda *et al.*, 1997; Davis y Bardet, 1998). En muchos casos, los métodos tradicionales de cálculo de tuberías enterradas no permiten explicar el colapso de las mismas.

Una de las principales causas de la falla de tuberías en suelos loéssicos es el cambio de sus propiedades con el contenido de humedad. Este caso se presenta en los suelos limosos de origen loéssico del centro de la Argentina. Los mismos tienen una estructura macroporosa y sufren grandes variaciones de volumen, denominadas colapso, cuando se incrementa el contenido de humedad o el estado tensional. Las principales características físicas, químicas y mecánicas de estos suelos han sido recopiladas por Reginatto y Ferrero (1973), Rocca (1985), Rocca y Quintana (1997) y Rinaldi *et al.* (2001). El comportamiento tenso-deformacional del loess argentino es altamente dependiente del contenido de humedad del suelo, observándose una importante caída del módulo elástico cuando se produce la saturación completa del suelo (Redolfi, 1990). Las principales fuentes de saturación del suelo son los ascensos generalizados del nivel freático, la inundación del suelo debido a escorrentía superficial, y las pérdidas de agua en las redes de distribución. La pérdida de confinamiento lateral, y el incremento en las deformaciones que se producen en el loess cuando se satura, son las principales causas de rotura de conductos pluviales y cloacales en la ciudad de Córdoba en el centro de la Argentina (Terzariol y Abbona, 1992).

Cuando se aplican cargas en la superficie del terreno, por sobre una tubería, debido al incremento del estado tensional éstas tienden a deformarse. En las tuberías flexibles, cuando tienen a ovalarse las deformaciones

¹ Becario Post-doctoral CONICET, Departamento de Ing. Civil, Univ. Nacional de Córdoba, Argentina.

² Profesor Titular, Departamento de Ing. Civil, Univ. Nacional de Córdoba, Argentina.

³ Profesor Titular Plenario, Departamento de Estructuras, Univ. Nacional de Córdoba, Argentina.

horizontales reaccionan contra el terreno lateral, y se produce un incremento de las tensiones del suelo. Este fenómeno evidencia la importancia de la interacción entre el suelo y la estructura.

En este trabajo se presenta un análisis del comportamiento de tuberías enterradas en trincheras en suelo loésicos. Para ello, se realizó un estudio paramétrico que consistió en simulaciones numéricas mediante el método de elementos finitos. Con esta metodología se evaluó la influencia del suelo en el comportamiento de las tuberías enterradas. A partir de los resultados obtenidos se determinó la influencia de la saturación del suelo en las deformaciones y esfuerzos en tuberías enterradas. Se determinó la importancia de considerar la interacción suelo-estructura, evaluando la influencia de las propiedades mecánicas de la interfase suelo-tubería. Se evidenció la influencia de considerar la contribución de las pequeñas y grandes deformaciones en el comportamiento de tuberías flexibles. Finalmente, se evaluó la influencia del ancho de zanja o trinchera excavada y de las propiedades mecánicas del relleno en el comportamiento de las mismas.

INFLUENCIA DEL SUELO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS TUBERÍAS

Características de los limos loésicos argentinos

Los limos loésicos del centro de la Argentina presentan una estructura abierta compuesta por macroporos. La fábrica del suelo se encuentra compuesta por una fracción granular unida entre sí a través de materiales cementantes (sales, partículas de arcilla, carbonatos y silicatos). En Rocca (1985) y Rinaldi *et al.* (2001) pueden encontrarse imágenes de microscopio electrónico en donde se observa la microestructura del loess del centro de la Argentina.

En el caso del loess, la estabilidad y resistencia de la masa de suelo es altamente dependiente de la resistencia de las uniones y contactos entre partículas. La alteración de los contactos disminuye la resistencia y aumenta la deformabilidad de la masa de suelo. Esta falla local en los contactos entre granos produce un desmoronamiento o colapso de la estructura del loess. Usualmente se atribuye el colapso a dos factores: a) un incremento en el estado tensional, en donde las tensiones entre partículas exceden la resistencia de los contactos, y b) una disminución de la resistencia de los contactos debido a la saturación del suelo, el cual solubiliza las uniones salinas y produce expansión de los puentes de arcilla (Kane, 1973). Redolfi *et al.* (1986) presentaron una recopilación de los diferentes métodos utilizados para evaluar el potencial de colapso de los limos loésicos argentinos.

Debido a la naturaleza de los limos loésicos, el cambio en las condiciones de humedad del suelo modifica las propiedades mecánicas del mismo. La ruptura de los vínculos entre partículas, la disolución de sales e hidratación de los puentes de arcilla producen un aumento notable en la deformabilidad del suelo (Reginatto y Ferrero, 1973; Moll *et al.*, 1990). Este fenómeno se manifiesta en una disminución notable de la rigidez y del módulo de deformación del mismo.

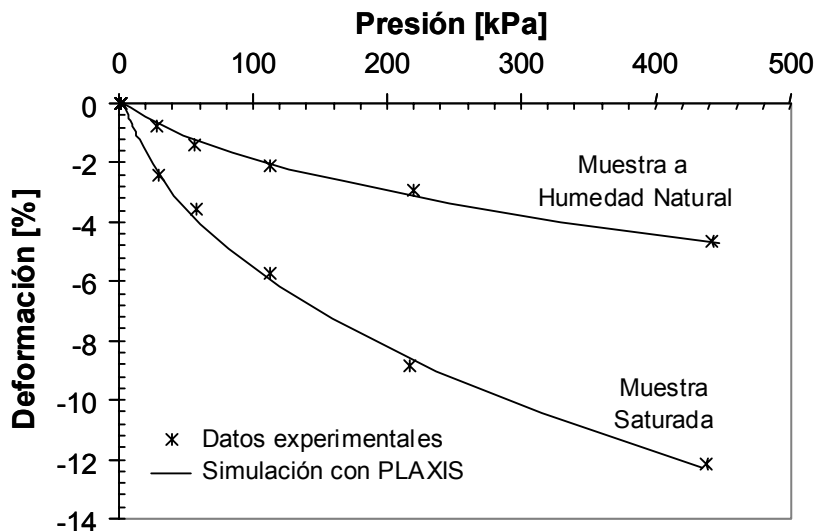
La Figura 1 muestra resultados típicos del comportamiento tenso-deformacional de los limos loésicos del centro de la Argentina. En la Figura 1.a se presentan los resultados de un ensayo de compresión confinada doble o doble edómetro. En el mismo, una de las muestras se ensaya a humedad natural y la otra saturada. Observe que al saturarse la muestra de suelo, se produce un notable incremento de las deformaciones, con el consecuente decaimiento del módulo confinado del suelo. Por otro lado, la Figura 1.b presenta un resultado típico de curvas tensión-deformación obtenidas en un ensayo triaxial consolidado drenado en muestras de loess. A partir de estos resultados se evidencia que el módulo de deformación del suelo disminuye con el contenido de humedad y con el nivel de deformación, y aumenta con el estado tensional. Es importante destacar, que los resultados presentados en la Figura 1 son sólo orientativos, ya que en cada caso particular el comportamiento del suelo puede diferir del aquí presentado. La razón de ello es la gran cantidad de variables que influyen en la respuesta tenso-deformacional del suelo (densidad, relación de vacíos, humedad, estado tensional, presencia de agentes químicos, cementantes, historia de presiones, etc.).

En la Tabla 1 se presentan las propiedades físico-mecánicas típicas del loess del centro de la Argentina. Las propiedades reportadas en la Tabla 1 son valores medios representativos del loess que se encuentra en la Ciudad Universitaria en la Ciudad de Córdoba, Argentina. Las variaciones encontradas, tanto en las propiedades físicas como mecánicas, se debe al origen, y a la composición química y mineralógica de los sedimentos (presencia de sales, carbonatos, cenizas volcánicas, etc.). Mayor información sobre las propiedades físico-químicas puede encontrarse en Teruggi (1957), Reginatto y Ferrero (1973), y Rocca y Quintana (1997).

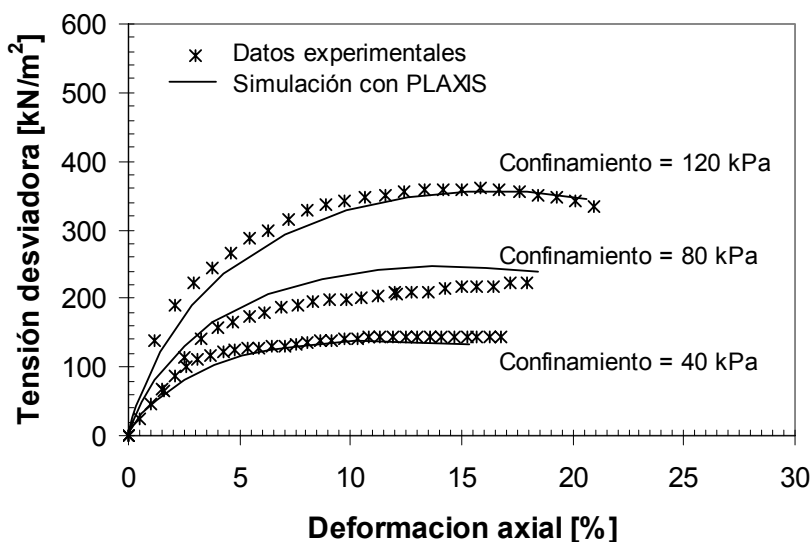
Comportamiento de las tuberías enterradas

Las tuberías durante su vida útil se encuentran sometidas a distintos estados de carga: presiones verticales y horizontales del terreno, peso propio, presión interna, cargas superficiales estáticas o dinámicas, y esfuerzos sísmicos. El manual de ingeniería y diseño de conductos y tuberías del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers, 1997) presenta en detalle el método de análisis para el cálculo de

tuberías. La magnitud de las cargas que deberá soportar una cañería dependerá de la rigidez relativa entre el caño y el suelo circundante. Debido a ello, los métodos de cálculos de tuberías difieren según se trate de cañerías rígidas o flexibles (Mayol, 1981; U.S. Army Corps of Engineers, 1997). Para el cálculo de las mismas se realizan verificaciones de deformaciones o deflexiones, tensiones, inestabilidad o pandeo, y fisuración. En todos los casos, se verifica que el nivel de tensiones durante la vida útil sea inferior a las tensiones de rotura con un determinado nivel de seguridad, y que las deformaciones sean inferiores a las máximas admisibles. La primera de las verificaciones prevalece en el análisis de tuberías rígidas, mientras que la verificación de deformaciones resulta de mayor interés para las tuberías flexibles.



(a)



(b)

Figura 1: (a) Resultados típicos de un ensayo doble edómetro y (b) triaxial consolidado drenado en los limos loésicos del centro de la Argentina.

Una alternativa para el estudio de tuberías enterradas es la utilización de modelos mecánicos, métodos analíticos, métodos empíricos, diferencias finitas, equilibrio límite, modelo de vigas, ensayos a escala, etc (Leca, 1996). En el caso de tuberías rígidas, los métodos numéricos son los más utilizados para el cálculo, ya que posibilitan realizar sofisticados análisis a un bajo costo. Entre las técnicas más utilizadas se encuentra el Método de Elementos Finitos (MEF). Diferentes códigos de elementos finitos especializados permiten simular el comportamiento no lineal del suelo y considerar el efecto de éste sobre la estructura.

Tabla 1: Propiedades físicas y mecánicas típicas de los limos loésicos argentinos. Los valores entre paréntesis indican los valores más frecuentemente encontrados (Datos recopilados del Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina).

Propiedad física o mecánica	Unidad	Valores
Peso unitario seco	kN/m ³	12,2 – 14,5 (13,0)
Peso unitario húmedo	kN/m ³	14,9 – 16,8 (15,2)
Límite Líquido (LL)	%	20,8 – 32,2 (24,0)
Índice de Plasticidad (IP)	%	0 – 8,0 (3,5)
Fracción arenosa (> 0,1 mm)	%	5 – 15
Fracción limosa (0,1 mm - 0,002 mm)	%	40 – 75
Fracción arcillosa (< 0,002 mm)	%	7 – 25
Conductividad hidráulica (ks)	cm/seg	(1 x 10 ⁻⁵)
Peso unitario máximo (Proctor Standard)	kN/m ³	16,0 – 17,8 (16,7)
Ángulo de fricción efectiva ϕ'	°	26 – 30 (28)
Cohesión efectiva c'	kN/m ²	< 8 (~ 0)
Módulo confinado a humedad natural ^(*) (a 100 kPa)	kN/m ²	1500 – 8000 (4000)
Módulo confinado saturado ^(*) (a 100 kPa)	kN/m ²	1000 – 4000 (1900)
Resistencia a la compresión simple	kN/m ²	45 – 130 (85)

Nota: ^(*) Pueden encontrarse valores más elevados en muestras cementadas

El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos U.S Army Corp of Engineers (1997) recomienda la utilización del MEF para el cálculo de “cañerías rígidas” enterradas. En la mayoría de los casos, cuando se utiliza el MEF con este propósito, se considera al suelo como un medio continuo, homogéneo, elástico y lineal (Tohda *et al.*, 1997; Fernando y Carter, 1998).

En las tuberías flexibles, cuando tienden a deformarse u ovalarse, las paredes reaccionan contra el suelo circundante. Debido a ello, se produce un incremento de las tensiones horizontales del suelo, sometiéndose al mismo a un estado de resistencia pasiva. Este cambio en el estado tensional del suelo circundante influye a su vez en las deformaciones que se producirán en la estructura. Debido a ello, en estos casos es fundamental realizar un análisis de la tubería considerando al mismo como un mecanismo de interacción suelo-estructura.

El diseño de tuberías flexibles requiere fundamentalmente del control de deflexiones o deformaciones. Las deflexiones que producen las cargas de servicio en las tuberías dependen fundamentalmente de la calidad y nivel de compactación del material de relleno de la trinchera. Cuando en los laterales se colocan suelos limosos compactados, resulta difícil poder obtener niveles de compactación adecuados en las zonas curvas próximas al caño. Debido a ello, estudios recientes intentan evaluar diferentes alternativas para el relleno de trincheras en reemplazo del suelo compactado. En este aspecto, Terzariol *et al.* (2000) mostraron que el suelo-cemento plástico es un material adecuado para el relleno de trincheras.

Para el análisis de tuberías es común utilizar el método de Marston-Spangler (Spangler, 1948; American Concrete Pipe Association, 1992). Este método permite tener en cuenta tanto el método constructivo como la rigidez relativa de la cañería. Como se mencionó en párrafos anteriores, el MEF es una alternativa con numerosas ventajas para el cálculo de tuberías rígidas. Sin embargo, para el análisis de tuberías flexibles el “U.S. Army Corps of Engineers” (1997) propone la fórmula de Spangler como método de análisis y cálculo de las deflexiones (Spangler, 1948):

$$\Delta x = F_K F_D \frac{P}{\frac{E J}{r^3} + 0.061 K r} \quad (1)$$

en donde Δx [m] es la deflexión horizontal o variación del diámetro del tubo, F_K y F_D son parámetros adimensionales que tienen en cuenta, respectivamente, la forma de apoyo del tubo en el fondo de la zanja y las deformaciones producidas a largo plazo, P [N/m] es la carga de servicio que debe actuar sobre la tubería durante su vida útil, r [m] el radio, E [N/m²] el módulo de elasticidad del material, J [m⁴/m] es el momento de inercia de las paredes del tubo, y K [N/m³] es el módulo o coeficiente de reacción del suelo.

En el segundo miembro de la ecuación (1), el primer término del denominador representa la contribución de la rigidez del caño, y el segundo término la contribución de la rigidez del suelo en la ovalización de la tubería. En el caso de las tuberías flexibles, la contribución de la rigidez del caño puede llegar a ser despreciable respecto de la

contribución de la rigidez del suelo. Por esta razón resulta de fundamental importancia el comportamiento del suelo. En el caso de los limos argentinos, cuando se humedecen disminuyen notablemente la capacidad de contener lateralmente a la tubería cuando ésta tiende a ovalarse.

En muchos casos, la ecuación (1) no permite explicar las fallas y colapso observado en tuberías en servicio. Debido a ello, en este trabajo se revisan los fundamentos y limitaciones de la misma. En primer lugar, la ecuación (1) considera que las presiones verticales actuantes en la tubería tienen una distribución uniforme (Mayol, 1981). Por lo tanto, no permite explicar el mecanismo de concentración de tensiones que ocurre en la parte superior e inferior de las tuberías rígidas. Además, observe que no es posible considerar diferentes interfases suelo-tubería, o el deslizamiento relativo del suelo en la interfase. El método de Spangler (1948) asume que no se produce deslizamiento relativo entre el suelo y la tubería, lo cual difiere con las mediciones realizadas mediante ensayos en la centrífuga por Tohda *et al.* (1997). Como se mencionó precedentemente, la rigidez del suelo es fundamental para contrarrestar la tendencia a la ovalización de las tuberías. La fórmula de Spangler (1948) tiene en cuenta a la rigidez del suelo a través del coeficiente de reacción K , también conocido como “módulo de reacción o de balasto”. Es muy bien conocido en la ingeniería geotécnica que este parámetro no es una propiedad intrínseca del suelo sino que depende de las dimensiones de la estructura. El módulo de reacción, K , se determina mediante un ensayo de plato de carga realizado in situ, y los valores que se obtienen dependen de las dimensiones del plato que se utilice. Finalmente, la ecuación (1) subestima las deflexiones que se producen en tuberías muy flexibles, y sobrestima las mismas para las tuberías muy rígidas (U.S. Army Corps of Engineers, 1997). Debido a las limitaciones de la teoría de Spangler (1948), recientes estudios alientan el uso del MEF para el cálculo de “tuberías flexibles” (Moore y Brachman, 1994; Tohda *et al.*, 1997; Scarpelli *et al.*, 2001; Tohda y Yoshimura, 2001).

METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Se realizó un estudio paramétrico sobre los distintos parámetros que afectan el comportamiento de las tuberías enterradas en suelo loésicos. Para ello, se realizaron simulaciones numéricas utilizando el MEF. Las simulaciones fueron efectuadas en un modelo bidimensional utilizando el programa computacional PLAXIS. Se asumió que la tubería puede ser representada mediante elementos de viga, con propiedades elásticas, y espesor y diámetro constante. Para la modelación del suelo se utilizó una malla de elementos finitos triangulares con seis nodos.

En la Tabla 2 se presentan las propiedades físicas y mecánicas del suelo utilizadas en la modelación. En todos los casos, se asumió que el suelo tiene un comportamiento elastoplástico perfecto, y se adoptó el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb como criterio de plasticidad y rotura.

Tabla 2: Propiedades físicas y mecánicas del suelo utilizadas en el modelo en elementos finitos.

Identificación	Modelo	γ_d [kN/m ³]	γ [kN/m ³]	ks [cm/seg]	E_{oed} [kN/m ²]	ν	ϕ' [°]	c' [kN/m ²]	E_{50} [kN/m ²]	m
Terreno natural	elástico lineal	13,0	15,7	1×10^{-5}	4000	0,33	-	-	-	-
	elastoplástico perfecto	13,0	15,7	1×10^{-5}	4000	0,33	29	5	-	-
	elastoplástico hiperbólico	13,0	15,7	1×10^{-5}	4000	0,33	29	5	6500	0,6
Base compactada	elastoplástico perfecto	16,5	19,0	1×10^{-7}	5000	0,33	32	5	-	-
Relleno de la zanja	elastoplástico perfecto	15,6	18,2	1×10^{-7}	4800	0,33	29	5	-	-

Notas: γ_d = peso unitario seco, γ = peso unitario húmedo, ks = conductividad hidráulica, E_{oed} = módulo confinado a 100 kPa, ν = coeficiente de Poisson, ϕ' = ángulo de fricción, c' = cohesión, E_{50} = módulo del suelo en compresión triaxial a 100 kPa de confinamiento (Figura 1), m = exponente que relaciona los módulos con el nivel tensional mediante una relación exponencial (PLAXIS, 1998).

Se analizaron cinco tuberías, de 1,0 metros de diámetro, y de diferentes materiales: acero, plástico reforzado con fibra de vidrio (FRPV), policloruro de vinilo PVC, fibrocemento, y hormigón armado H^oA^o. Las tuberías seleccionadas corresponden a distintas alternativas constructivas para la ejecución de alcantarillas, conductos pluviales, cloacales o de drenaje. En la Tabla 3 se presentan las principales propiedades mecánicas utilizadas en la modelación de las tuberías.

Mediante el modelo realizado se simuló el comportamiento del suelo y la tubería a través de todo el proceso constructivo de la misma. Para ello, una vez definida la geometría del modelo, se discretizó el suelo mediante una

mallado de elementos finitos, se definieron las propiedades de los materiales y condiciones de borde, y se asignaron los materiales a cada uno de los elementos (Figura 2). Para tener en cuenta el proceso constructivo, se consideró un estado inicial en donde el terreno se encuentra con un estado tensional geostático (comúnmente denominado “estado K_0 ”). Luego, se simuló la excavación de una trinchera de 2,0 metros de ancho y 3,20 metros de profundidad. Se asumió que se construiría en el fondo de la zanja una base de suelo compactado, fundación o “cama”, de 0,20 centímetros de espesor, sobre la que se colocaría posteriormente la cañería. Finalmente, se simuló la colocación de la tubería y el relleno de la zanja. Se asumió que la excavación, colocación de la tubería y relleno de la zanja ocurre en un breve lapso de tiempo. En esta situación, el comportamiento del suelo corresponde a un estado no drenado. De allí que pueda considerarse que los taludes de la zanja pueden mantenerse verticales durante la excavación. Finalmente, se analizó el efecto de una carga superficial actuante sobre la trinchera en la superficie del terreno (Figura 2), verificando el comportamiento tenso-deformacional de la tubería a largo plazo.

Tabla 3: Propiedades mecánicas de las tuberías utilizadas en las simulaciones numéricas

	Espesor de la pared (t) [m]	Rigidez axial (EA) [kN/m]	Rigidez flexional (EJ) [kNm ² /m]	Material
Acero	0,002	$4,2 \times 10^5$	0,1	Elástico
FRPV	0,0125	$8,4 \times 10^5$	1,1	Elástico
PVC	0,03	$6,0 \times 10^4$	4,5	Elástico
Fibrocemento	0,03	$5,4 \times 10^5$	40,5	Elástico
Hormigón Armado	0,1	$3,0 \times 10^6$	2500,0	Elástico

Nota: ‘ t ’ es el espesor de la pared del tubo, ‘ A ’ es el área, ‘ E ’ es el módulo de elasticidad, y ‘ $J = t^3/12$ ’ es el momento de inercia por unidad de longitud de la pared del tubo.

En la Figura 3 se presenta un resultado típico obtenido con el modelo. En la misma se muestran los desplazamientos, esfuerzo normal y momento flector en las paredes de la tubería al rellenar la zanja. Los desplazamientos contienen componentes de traslación (hacia abajo), y contracción y ovalización de la tubería (debido al incremento tensional).

La Figura 3.a muestra que al someter a la tubería a un incremento tensional la misma tiende a ovalarse, reaccionando contra el terreno lateral. Este efecto influye en el comportamiento de la tubería y en el comportamiento de la interfase entre la misma y el suelo. Para contemplar la interacción suelo-estructura se utilizaron elementos de interfase, que permiten considerar que en el contacto suelo-caño, las propiedades mecánicas difieren de las del suelo circundante. Estos elementos de interfase, o elementos junta, fueron inicialmente implementados en estudios de rocas y se diseñaron para representar el comportamiento de discontinuidades. Gens *et al.* (1995) presentaron una revisión detallada de la implementación de elementos de interfase en el MEF. La modelación de la discontinuidad entre el suelo y la estructura permite considerar el deslizamiento relativo entre ambos.

Con PLAXIS es posible asignarle a las interfaces propiedades particulares a través de un factor de reducción de resistencia R_{int} . Este factor relaciona la resistencia de la interfase (fricción ϕ_i y adhesión c_i), con los parámetros resistentes del suelo en tensiones efectivas (ángulo de fricción ϕ' , y cohesión c'), (PLAXIS, 1998):

$$\phi_i = R_{int} \phi' \quad (2)$$

$$c_i = R_{int} c' \quad (3)$$

En la realidad, cuando el suelo se encuentra en contacto con una estructura, la interfase es más débil y flexible que el suelo circundante ($R_{int} < 1$).

Finalmente, se determinó la influencia del modelo constitutivo adoptado para el suelo en la ovalización en la tubería de acero al aplicar una carga superficial. Los modelos de comportamiento del suelo utilizados fueron: a) Modelo elástico lineal, b) Modelo elastoplástico perfecto y c) Modelo elastoplástico hiperbólico con endurecimiento plástico. El modelo elástico perfecto, a pesar de no ser adecuado para representar el comportamiento del suelo, se lo utilizó como elemento de comparación debido a su amplia utilización, y porque es la hipótesis de cálculo asumida en la ecuación (1). En el modelo elastoplástico perfecto, la plasticidad y rotura están asociadas con el criterio de Mohr-Coulomb, el cual es muy utilizado en la ingeniería geotécnica. Finalmente, el modelo hiperbólico con endurecimiento plástico (“Hardening Soil Model”), considera una relación no lineal entre las tensiones y deformaciones, el módulo del suelo depende de las tensiones y deformaciones, diferencia el comportamiento elástico del plástico a través de funciones de potencial plástico, y define la rotura a través del criterio de Mohr-Coulomb. En la Figura 1 se muestra la utilización de este modelo para la simulación del comportamiento del loess en compresión confinada (a) y compresión triaxial (b). En ambos casos, el modelo

representó en forma adecuada la dependencia del módulo, respecto de las tensiones y deformaciones. Mayores detalles de cada uno de estos modelos, y la validación de los mismos pueden encontrarse en PLAXIS (1998).

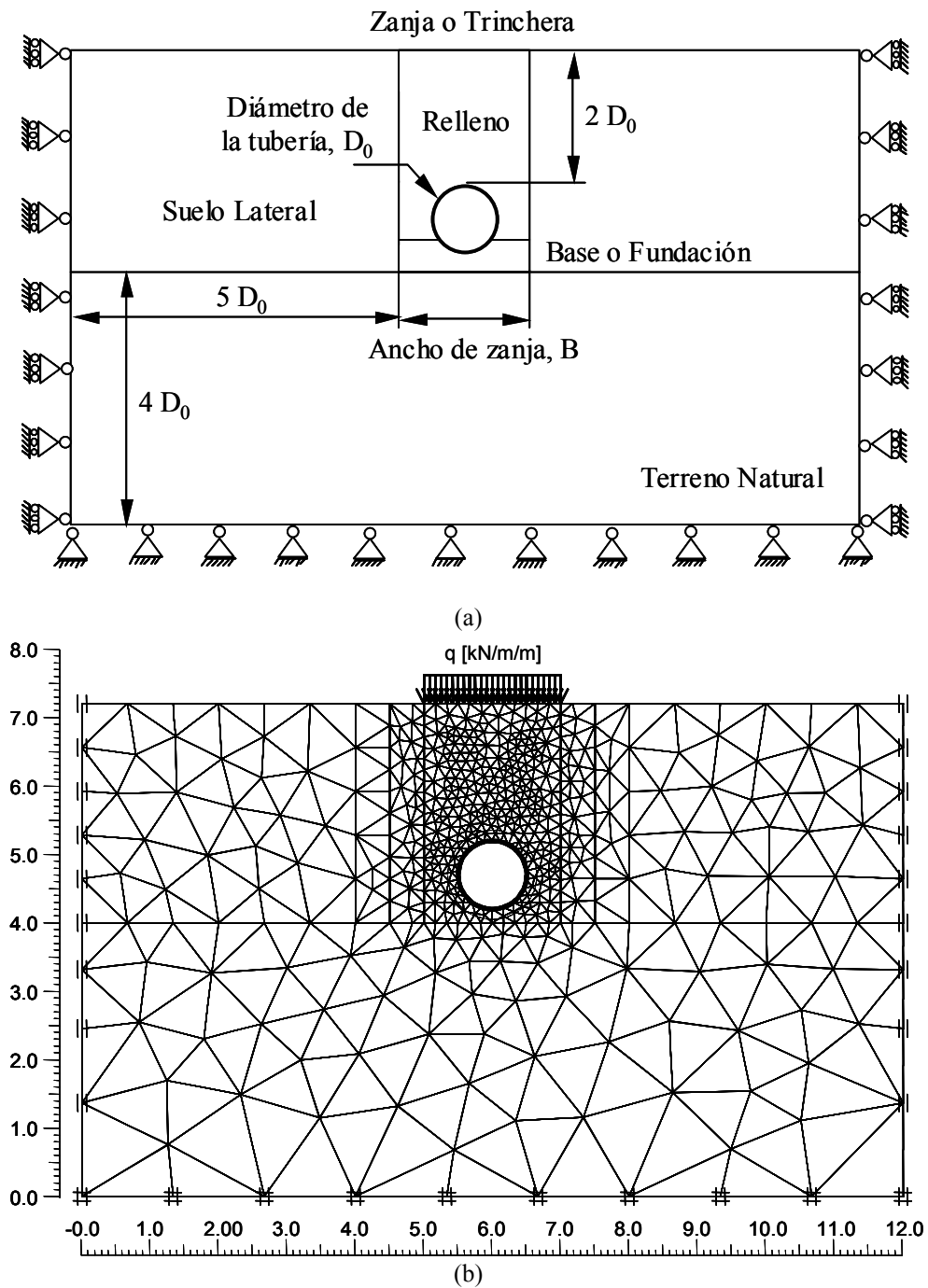


Figura 2: Geometría, materiales, y condiciones de borde (a), geometría y malla de elementos finitos típica utilizada en el análisis (b).

Es importante destacar que los resultados obtenidos en este estudio se limitan a la condición geométrica presentada en la Figura 2. La misma corresponde a un caso típico de construcción de tuberías para alcantarillas, o red principal de conductos pluviales, cloacales o de drenaje. Un análisis similar puede realizarse para resolver casos particulares con diferentes propiedades geométricas o método constructivo.

DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para analizar la importancia de las distintas variables que intervienen en el comportamiento tenso-deformacional de las tuberías enterradas se evaluó:

- La contribución relativa de la rigidez del suelo y de la cañería.
- El efecto de la disminución de la rigidez o soporte lateral del suelo debido a la saturación del mismo.
- La influencia de las interfases e interacción suelo-estructura.
- La necesidad de considerar la contribución de pequeñas y grandes deformaciones en el cálculo de tuberías flexibles.
- La influencia del comportamiento tenso-deformacional del suelo.
- La influencia del ancho de la trinchera excavada (B), en la ovalización de las tuberías.
- El efecto del mejoramiento del material de relleno de las trincheras mediante la utilización de mezclas de suelo-cemento.

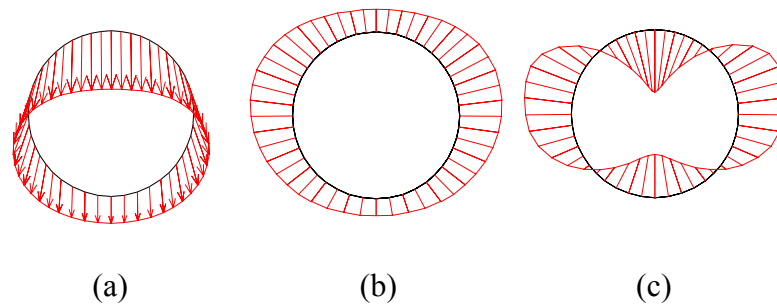


Figura 3: Resultados típicos obtenidos de desplazamientos (a), esfuerzo normal (b) y momento flector (c) de las tuberías.

Efecto de la rigidez relativa suelo-tubería

Se realizaron simulaciones numéricas mediante el modelo presentado en la Figura 2, para cada una de las tuberías consideradas (Tabla 3). La magnitud de la carga superficial se consideró igual a 100 kN/m/m.

La Figura 4.a muestra la influencia de la relación de rigideces, $EJ/D_0^3/E_s$, en la ovalización de la tubería, $\Delta x/D_0$, cuando la misma es sometida al incremento tensional producido por el relleno de la zanja, y por la carga superficial. En esta figura, ' E_s ' es el módulo del terreno natural (en el que se ha excavado la trinchera), Δx es la variación del diámetro horizontal, y D_0 la dimensión inicial del mismo. Para el terreno natural, el módulo de deformación puede ser calculado a partir de los datos presentados en la Tabla 2, resultando $E_s = 2700$ kN/m/m.

A medida que las tuberías tienen una mayor rigidez relativa, $EJ/D_0^3/E_s$, menores son la deformación y ovalización de la misma (Figura 4.a). Observe que el eje correspondiente a la rigidez relativa se encuentra en escala logarítmica, por lo que las deformaciones en la tubería resultan altamente dependientes de la relación de rigidez.

La Figura 4.b presenta el efecto de la rigidez relativa suelo-tubería en el esfuerzo normal ' N ' y momento flector ' M ' máximo en la tubería, luego de rellenar la zanja, y al aplicar la carga superficial. En todos los casos analizados, el esfuerzo N máximo ocurre en los costados de la tubería (Figura 3.b), y el M máximo en el extremo superior de la misma (Figura 3.c). Los esfuerzos N y M máximos tienden a aumentar con la relación de rigideces. Las mayores variaciones relativas se produjeron en los valores de momento flector máximo. Por último, se observa que M presenta un importante aumento en las tuberías con rigideces intermedias (FRPV y PVC).

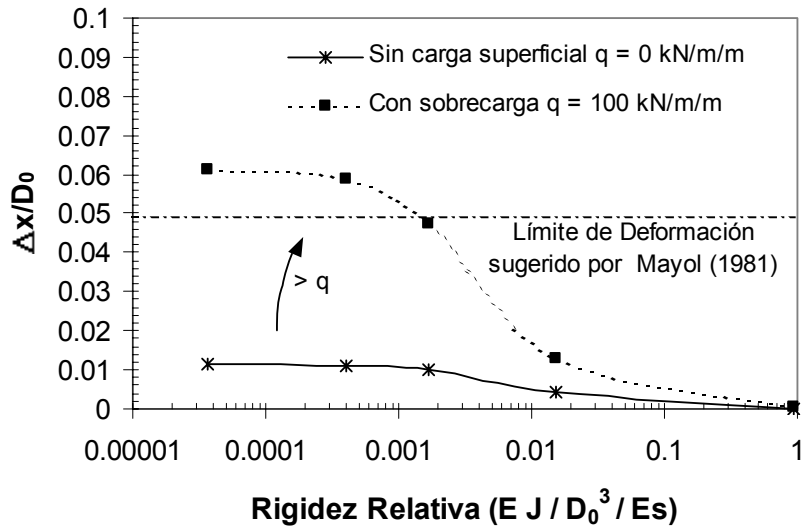
Observe que la ovalización $\Delta x/D_0$, y la relación de rigideces $EJ/D_0^3/E_s$, son parámetros adimensionales. De allí que los resultados obtenidos representan tendencias generales para la condición geométrica analizada en este trabajo.

Influencia de la saturación del suelo lateral

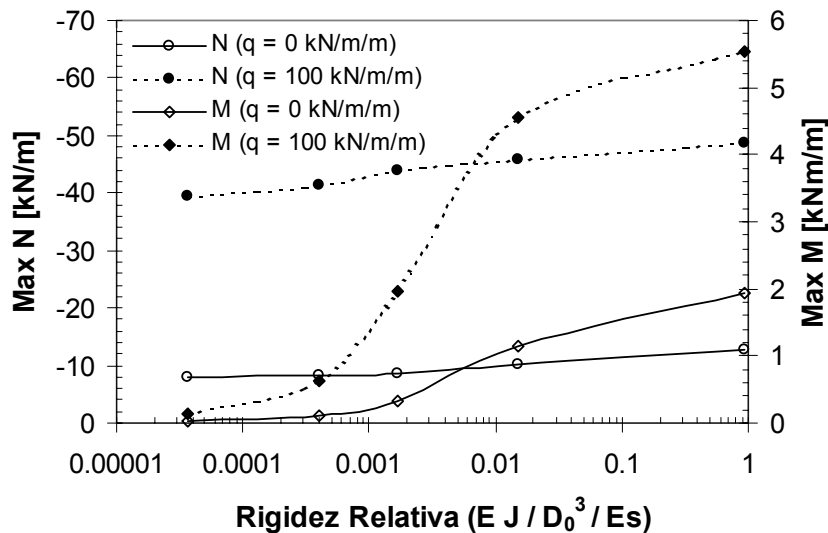
Cuando se produce el humedecimiento del suelo, el terreno a ambos lados de la trinchera sufre una disminución del módulo elástico E_s . No se tiene en cuenta en este trabajo la disminución del módulo elástico del suelo compactado en la trinchera. Para cada una de las tuberías estudiadas se determinó la influencia del humedecimiento del terreno natural. En todos los casos, se simuló una disminución del módulo elástico del suelo,

determinando los valores máximos de $\Delta x/D_0$, N y M , para los módulos confinados $E_{oed} = 4000, 2000, 1500$ y 1000 kN/m^2 .

La Figura 5 presenta la influencia del humedecimiento del suelo lateral en la ovalización $\Delta x/D_0$ para cada una de las tuberías estudiadas. El sentido de las flechas indica la tendencia observada a medida que disminuye el módulo del suelo. Note que a medida que decae el módulo E_s , mayor resulta la rigidez relativa de la tubería. En todos los casos se observó un incremento de la ovalización $\Delta x/D_0$ con el humedecimiento del suelo. Además, el incremento de la ovalización es mucho más importante en las tuberías más flexibles (Acero, FRPV y PVC), que en las más rígidas (Fibrocemento y hormigón armado). Por lo tanto, las tuberías flexibles son las que mayores deformaciones sufren, y las que se encuentran más afectadas por la saturación o inundación del suelo.



(a)



(b)

Figura 4: Influencia de la rigidez relativa de las tuberías en las deformaciones (a) y esfuerzos (b).

La Figura 6 muestra la influencia de la saturación del suelo lateral en el esfuerzo normal máximo (Figura 6.a) y momento flector máximo (Figura 6.b) para cada una de las tuberías. En ambos casos las flechas indican la tendencia observada a medida que disminuye el módulo del suelo. En todos los casos, el esfuerzo normal se incrementa cuando se produce una disminución del módulo del terreno (Figura 6.a). El aumento observado en los valores de N máximos osciló entre un 6% (tubería de PVC) hasta un máximo del 22% (tubería de FRPV). Los momentos máximos M , también se incrementaron a medida que disminuye E_s (Figura 6.b). Las variaciones más

importantes se registraron en las tuberías más flexibles (gráfico en escala semilogarítmica). Para la tubería de acero y FRPV el incremento de M fue superior al 200%, para el PVC próximo al 66%, y para el fibrocemento y hormigón armado inferior al 5%.

La razón por la cual se ven afectadas principalmente las tuberías con una menor rigidez relativa se debe a la forma en que se transmiten las cargas en el suelo. Si la rigidez de la tubería es mayor que la rigidez del suelo, las cargas se transmiten a la tubería. Cuando la rigidez de la misma es menor que la del suelo, las cargas se distribuyen hacia los laterales de la tubería mediante un “efecto arco”. Al humedecerse y disminuir el módulo del suelo, menor es la capacidad de reacción lateral que contrarresta la transmisión de esfuerzos horizontales producido por el “efecto arco”. Esto explica el incremento de deformaciones y esfuerzos observados en las tuberías flexibles, cuando se humedece y disminuye el módulo elástico del terreno natural. La saturación e inundación del suelo es un problema crítico, ya que las deformaciones de las tuberías producidas por la disminución del módulo del suelo, en ocasiones producen fisuras y pérdidas en las tuberías agravando aún más el problema. Esta situación es una de las principales causas de rotura de tuberías en suelos loésicos (Terzariol y Abbona, 1992).

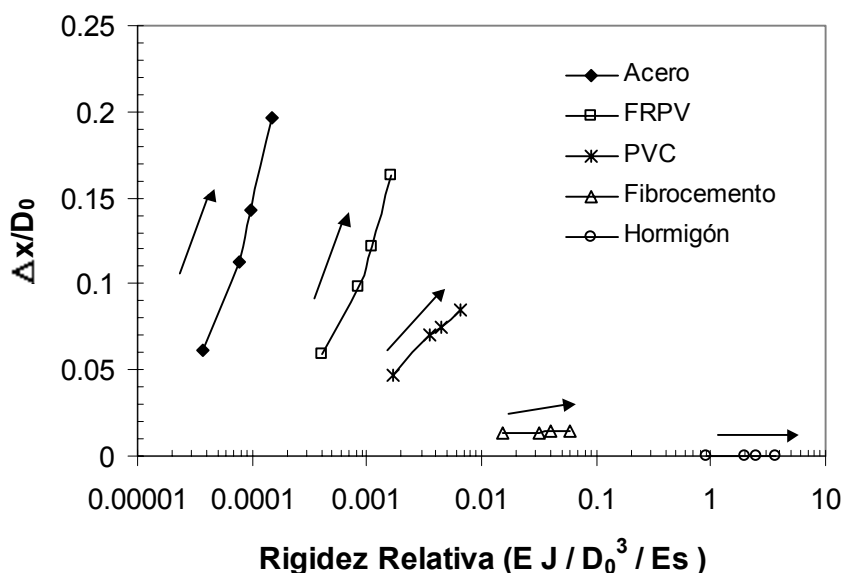


Figura 5: Variación de las deformaciones de las tuberías con la disminución del módulo elástico del suelo.

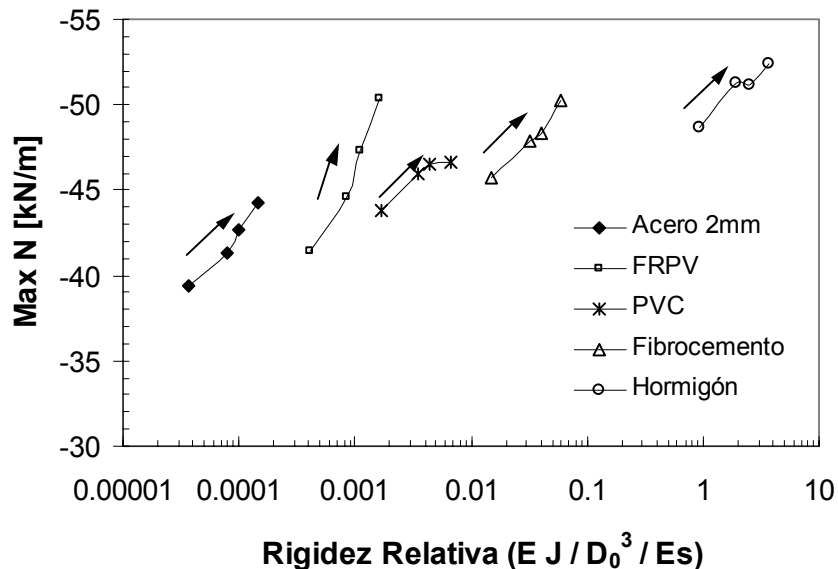
Interacción suelo-tubería

Para considerar el efecto de la interacción suelo-tubería, se determinó la influencia de la reducción de resistencia en las interfases (R_{int}) en los resultados obtenidos. Se analizaron las cinco tuberías estudiadas (Tabla 3), determinando la ovalización, esfuerzo normal, y momento flector máximo para una carga en la superficie de 100 kN/m/m.

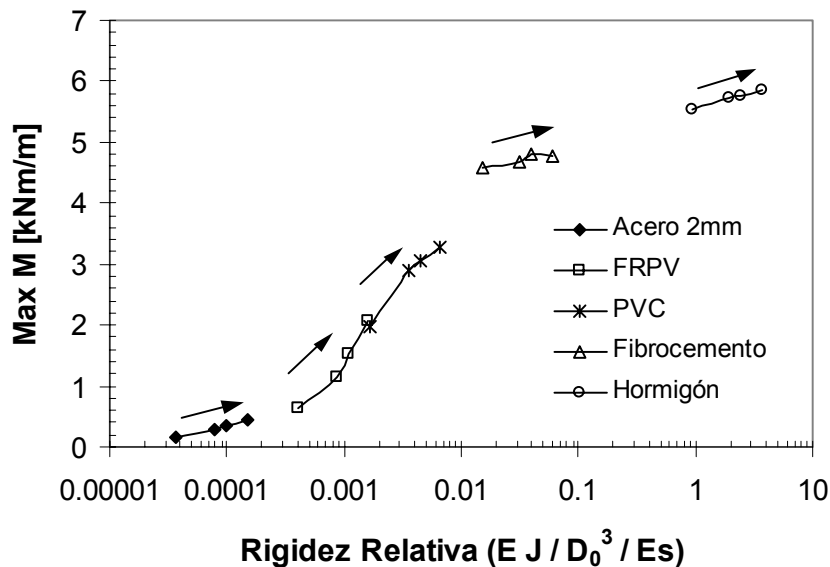
La Tabla 4 presenta la relación entre los valores máximos de $\Delta x/D_0$, N y M , para $R_{int} = 0,7$; $0,5$; y $0,3$, respecto de los valores obtenidos para $R_{int} = 1,0$. Observe que la reducción de resistencia en las interfases tiene mayor efecto en los esfuerzos normales N , y momento flector M , que en la ovalización de la tubería $\Delta x/D_0$. En el caso de considerar interfases reales, correspondientes a $R_{int} < 1,0$, se observó que los valores de ovalización de la tubería resultaron ligeramente más altos que si se considerara $R_{int} = 1,0$. La tendencia muestra que a medida que disminuye R_{int} mayores son las deformaciones registradas, siendo más notable este efecto en las tuberías flexibles. Esto indica que al considerar que no se produce deslizamiento relativo en la interfase suelo-caño, se estaría subestimando las deflexiones de la tubería. Note que esta condición es la que se asume en el método de Spangler presentado a través de la ecuación (1) (Tohda *et al.*, 1997).

Respecto a los esfuerzos normales y momentos flectores obtenidos, se observó en todos los casos una disminución con el factor de reducción de resistencia R_{int} . Por lo tanto al considerar $R_{int} = 1,0$ se obtendrían valores conservadores de N y M . Una tendencia opuesta se obtuvo en los momentos obtenidos para las tuberías de FRPV y PVC con $R_{int} = 0,7$, que mostraron momentos flectores ligeramente superiores. La razón por la cual los esfuerzos tienden a disminuir es que al considerar que puede plastificarse la interfase, y producirse un deslizamiento relativo entre el suelo y la tubería, se produce un acomodamiento de esfuerzos transmitiéndose mayores cargas al suelo.

El efecto contrario observado en el FRPV y PVC cuando $R_{int} = 0,7$ indican que en estos casos mayores cargas fueron transmitidas a la sección superior de la tubería. Es interesante que este efecto no se haya observado ni en tuberías menos rígidas, ni en más rígidas para $R_{int} = 0,7$. Este hecho indica que existiría una relación de rigideces y R_{int} crítica, y muestra la importancia de poder determinar experimentalmente los parámetros resistentes de la interfase.



(a)



(b)

Figura 6: Variación de esfuerzo normal (a) y momento flector (b) en las tuberías con la disminución del módulo elástico del suelo.

Tabla 4: Influencia de las interfases en las deformaciones y esfuerzos en las tuberías.

	R = 0,7			R = 0,5			R = 0,3		
	$\Delta x / \Delta x_{R=1}$ [%]	$N / N_{R=1}$ [%]	$M / M_{R=1}$ [%]	$\Delta x / \Delta x_{R=1}$ [%]	$N / N_{R=1}$ [%]	$M / M_{R=1}$ [%]	$\Delta x / \Delta x_{R=1}$ [%]	$N / N_{R=1}$ [%]	$M / M_{R=1}$ [%]
Acero	101	93	89	103	86	81	105	77	80
FRPV	100	94	102	100	87	89	102	78	91
PVC	100	94	101	100	88	98	99	81	89
Fibrocemento	99	94	97	100	90	96	106	91	95
H°A°	102	97	99	102	93	98	102	89	93

Contribución de pequeñas y grandes deformaciones

En el ejercicio de la ingeniería, generalmente se utiliza la teoría de pequeños desplazamientos para el cálculo de las deformaciones de un cuerpo. Sin embargo, esta teoría introduce considerables errores en el cómputo de los esfuerzos y desplazamientos que se producen en cuerpos flexibles y de pequeño espesor (ver por ejemplo Boresi *et al.*, 1993). En estos casos, es necesario utilizar la teoría de grandes deformaciones.

Para determinar la contribución de pequeñas y grandes deformaciones, se simuló un proceso de carga en la superficie de la trinchera (Figura 2). A diferencia de los casos anteriores, se consideró todo el suelo homogéneo y con las mismas propiedades físicas y mecánicas, correspondientes al terreno natural.

Las Figuras 7.a y 7.b muestran, respectivamente, la variación de la ovalización a medida que aumenta el esfuerzo en la superficie cuando se utilizó la teoría de pequeñas, y de grandes deformaciones. Comparando las curvas de las Figuras 7.a y 7.b, correspondientes a cada tubería, es posible visualizar la importancia de realizar los cálculos utilizando la teoría de grandes deformaciones. Para el caso de las tuberías de hormigón armado y fibrocemento, no se observaron variaciones apreciables en las deformaciones $\Delta x/D_0$ determinadas con ambas teorías. En el caso de las tuberías de acero, FRPV y PVC, al ser más deformables las diferencias se hacen más importantes. Los valores entre paréntesis presentados en la Figura 7.b indican la diferencia entre la ovalización determinada con la teoría de pequeñas y de grandes deformaciones cuando la carga superficial alcanzó los 100 kN/m/m. Claramente puede observarse que la teoría de pequeñas deformaciones subestimaría la ovalización máxima de manera apreciable (37% para la tubería de acero).

Efecto del comportamiento tenso-deformacional del suelo

En la Figura 8 se presenta la influencia del modelo de comportamiento del suelo adoptado en las simulaciones, en la ovalización de la tubería de acero al incrementar la presión actuante en la superficie del terreno. En las simulaciones se asumió al suelo como un material homogéneo, con las propiedades correspondientes al terreno natural.

Las menores deformaciones tendientes a ovalar la tubería ($\Delta x/D_0$) se obtuvieron al modelar al suelo como un material “elástico lineal” (Figura 8). La subestimación de $\Delta x/D_0$ se debe a que este modelo no tiene en cuenta la rotura del suelo, ni considera la contribución de las deformaciones plásticas.

Cuando se modeló el suelo como “elastoplástico perfecto” (criterio de Mohr-Coulomb), para cada nivel de carga q , la ovalización resultó mayor a la obtenida mediante el modelo “elástico lineal”. Si el incremento de presión es pequeño la diferencia entre ambos modelos es mínima. La proximidad de $\Delta x/D_0$, cuando las cargas en la superficie del terreno son bajas, indica que la contribución de las deformaciones plásticas podría despreciarse. A medida que aumenta q , la diferencia entre los modelos es mayor debido a la contribución de las deformaciones plásticas.

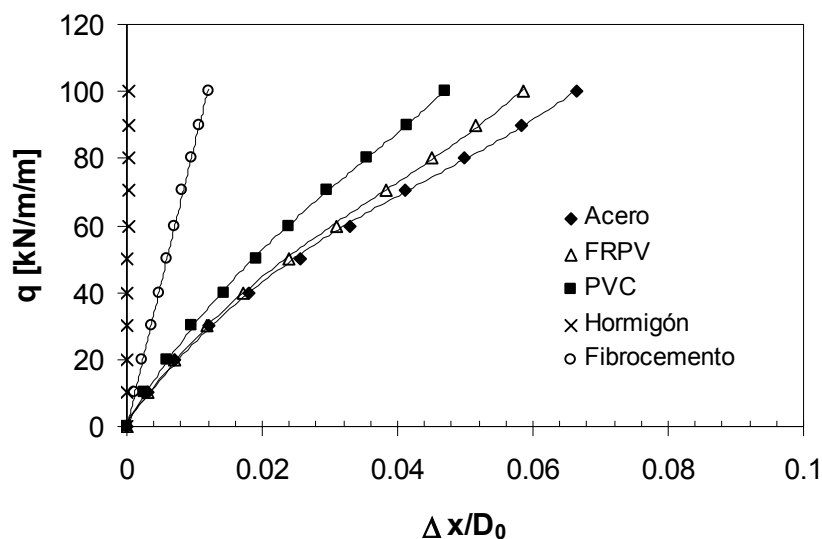
Finalmente, la misma Figura 8 muestra los resultados obtenidos cuando se modeló al suelo mediante el modelo hiperbólico con endurecimiento plástico. Se observa que la respuesta de la tubería se aproxima al modelo elastoplástico perfecto. Esto puede ser explicado debido a que ambos modelos consideran la contribución de las deformaciones plásticas. Las diferencias entre uno y otro modelo se deben a que en el hiperbólico con endurecimiento plástico, el suelo tiene un comportamiento no lineal. A niveles tensionales bajos, las deformaciones resultaron más altas que las obtenidas con el modelo elastoplástico perfecto. Esto se debe a que el modelo hiperbólico utilizado, considera la contribución de las deformaciones plásticas antes de que se alcance la rotura del suelo. Por otro lado, cuando las tensiones aplicadas son más altas, este modelo predice deformaciones $\Delta x/D_0$ inferiores a las obtenidas con el modelo elastoplástico perfecto. La dependencia del módulo del suelo respecto de las tensiones explica este comportamiento. Cuando mayores son las tensiones en el suelo, mayor resulta el módulo del suelo, y menores las deformaciones calculadas en la tubería.

Efecto del ancho de la trinchera ‘B’ en las deformaciones esperadas en las tuberías

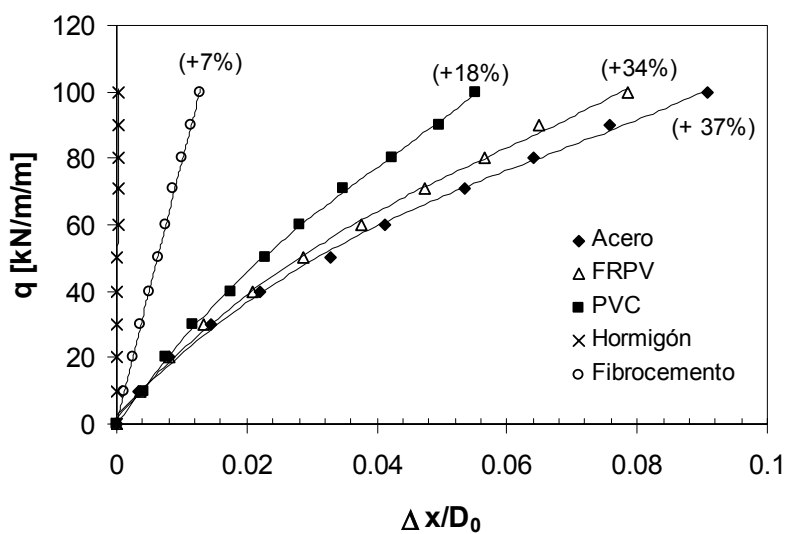
Terzariol y Abbona (1992) utilizaron la teoría de Marston-Spangler para estudiar la influencia del ancho de zanja en el comportamiento de tuberías enterradas en suelos limosos. Los autores mostraron que esta teoría predice resultados incongruentes cuando se produce una disminución del confinamiento lateral de la zanja debido al humedecimiento del suelo. En algunos casos, la teoría predice mayores deflexiones en las tuberías cuando mayor es el ancho de la trinchera con suelo mejorado, lo que resultaría ilógico.

Para evaluar el efecto del ancho de la trinchera excavada (B), en las deformaciones de las tuberías, se consideraron tres casos. Los mismos corresponden a anchos de zanja relativos $B/D_0 = 2, 3$ y 4 . Para cada uno de estos casos se analizó el comportamiento de la tubería con el suelo en condiciones de humedad natural, y saturado. Con las hipótesis mencionadas, se determinó la ovalización de las tuberías $\Delta x/D_0$ al aplicar en la superficie una

carga de 100 kN/m/m. En todas las simulaciones se adoptó el criterio de Mohr-Coulomb (modelo elastoplástico perfecto), y se consideró sólo la contribución de pequeñas deformaciones.



(a)



(b)

Figura 7: Influencia de las cargas actuantes en la ovalización de las tuberías. Resultados obtenidos mediante la teoría de pequeñas deformaciones (a) y grandes deformaciones (b). Los valores entre paréntesis indican la diferencia entre las deformaciones calculadas con ambas teorías para $q = 100$ kN/m/m.

La Tabla 5 muestra la influencia del ancho de zanja en la ovalización de las tuberías $\Delta x/D_0$. Observe que el ancho de zanja influye notablemente en las deformaciones $\Delta x/D_0$. A medida que las trincheras excavadas son más anchas, menores son las deformaciones que sufren las tuberías cuando son sometidas a esfuerzos. Esta tendencia, opuesta a la determinada por Terzariol y Abbona (1992), resulta lógica ya que con un mayor ancho de zanja, mayor es el espesor de suelo mejorado alrededor de la tubería.

Es importante destacar que la influencia del ancho de zanja resultó muy importante en el comportamiento de las tuberías flexibles, y muy poco relevante en el caso de tuberías rígidas (hormigón y fibrocemento). Adicionalmente, la dependencia de las deformaciones de la tubería respecto del ancho de zanja, aumenta cuando se humedece el terreno natural a los costados de la trinchera.

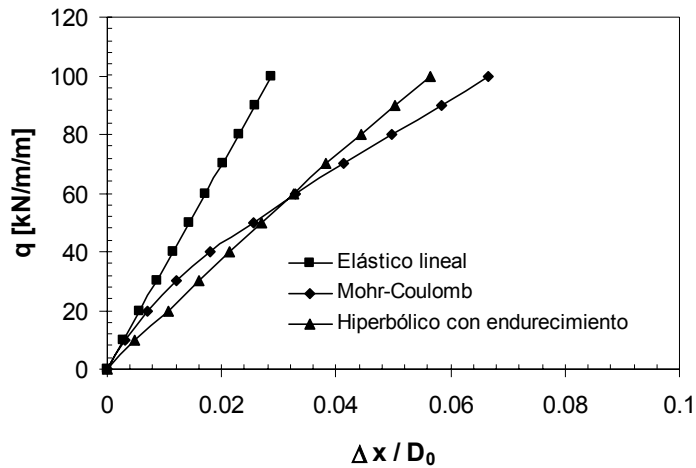


Figura 8: Influencia del modelo de comportamiento del suelo en la ovalización de la tubería de acero al aplicar cargas en la superficie del terreno.

Tabla 5: Variación de la ovalización porcentual $\Delta x/D_0$ [%] de la tubería, con la relación de ancho de zanja B/D_0 , al aplicar la carga superficial $q = 100$ kPa.

	$\Delta x/D_0$ [%] para $B/D_0 = 2$		$\Delta x/D_0$ [%] para $B/D_0 = 3$		$\Delta x/D_0$ [%] para $B/D_0 = 4$	
	Terreno Natural	Suelo Húmedo	Terreno Natural	Suelo Húmedo	Terreno Natural	Suelo Húmedo
Acero	6,15	19,70	5,83	15,08	5,63	11,35
FRPV	5,88	16,34	5,55	12,94	5,42	9,78
PVC	4,73	8,47	4,50	7,08	4,37	6,92
Fibrocemento	1,29	1,48	1,28	1,39	1,24	1,39
H ^o A ^o	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02

Nota: Para el suelo húmedo se consideró un módulo confinado $E_{oed} = 1000$ kN/m².

La mayor o menor influencia del ancho de zanja en el comportamiento de tuberías rígidas y flexibles se debe al mecanismo de transmisión de cargas y esfuerzos a través del suelo y las cañerías. El hecho de que en las tuberías rígidas la influencia del ancho de zanja sea despreciable, se debe a que los esfuerzos se transfieren fundamentalmente hacia la tubería. Este fenómeno ocurre debido a la elevada rigidez de la misma y resulta por lo tanto poco relevante la contribución del terreno lateral y el ancho de la zona compactada en la trinchera. En el caso de las tuberías flexibles la influencia es mayor, ya que las cargas se transmiten fundamentalmente al terreno mediante efecto arco. Esto origina una componente horizontal de reacción, la cual es soportada por el terreno lateral compactado. Esta disminución observada en las deflexiones indica que el incremento del ancho de zanja permitiría contrarrestar parcialmente el efecto de la saturación del terreno lateral.

Influencia del módulo elástico del relleno en las deformaciones de las tuberías

Los esfuerzos transmitidos a las tuberías dependen de la rigidez relativa de la misma. Debido a ello, resultan de interés no sólo la rigidez de la tubería, y el módulo del suelo, sino también el módulo de deformación del material de relleno de la zanja (E_r). Cuando se utiliza suelo compactado como material de relleno, el módulo E_r se incrementa con el grado de compactación. En el caso de los limos loésicos, este efecto fue estudiado por Terzariol *et al.* (2000). En general, debido a la dificultad de realizar una adecuada compactación del suelo en los sectores próximos a la tubería, no se podrían esperar importantes aumentos en el módulo del relleno. Una alternativa para ello es la utilización de mezclas de suelo-cemento.

La incorporación de cemento mejora el comportamiento tenso-deformacional del suelo. Mayores contenidos de cemento producen un incremento del módulo de deformación y un aumento de la resistencia (Winterkorn y Pamukcu, 1991). Fernández y Santamarina (2001) mostraron mediante un análisis micromecánico y experimental, que el módulo de elasticidad medido a bajas deformaciones aumenta con el contenido de cemento.

Se determinó la influencia del módulo de deformación del relleno (E_r) en las deflexiones de la tubería. Para ello se realizó un análisis paramétrico en donde se consideraron rellenos de mezclas de limo-cemento con módulos

$E_r = 10^4, 10^5, \text{ y } 10^6 \text{ kN/m}^2$. Según la experiencia de los autores, en los limos loésicos argentinos estos módulos se podrían obtener en mezclas con porcentajes de cemento de $C\% = 2, 3 \text{ a } 5, \text{ y } 8 \text{ a } 12$ respectivamente.

La Figura 9 presenta la influencia del módulo de relleno en la ovalización de las tuberías. Para obtener una tendencia general para el tipo de suelo analizado, los resultados se expresaron en función de la relación entre el módulo del relleno (E_r), y el módulo del terreno natural (E_s). Las relaciones de módulos consideradas resultaron $E_r/E_s = 1.2, 3.7, 37, \text{ y } 370$. El primer caso corresponde al relleno de suelo compactado, y los demás a mezclas de suelo-cemento. Observe que a mayor módulo relativo (E_r/E_s), menores son las deflexiones de las tuberías. Además, note que para las tuberías flexibles las deflexiones fueron similares en todos los casos. Esta tendencia indica que las deflexiones resultan independientes de la rigidez del caño, y que es la rigidez del relleno la que gobierna las deformaciones de la tubería. La disminución de las deformaciones en las tuberías flexibles osciló entre un 70% a un 93% respecto de las observadas cuando la zanja se rellena con suelo compactado. En el caso de las tuberías rígidas, fibrocemento y hormigón, el aumento de la rigidez del relleno colabora en la disminución de las deformaciones. Sin embargo, es la propia rigidez del caño la que gobierna las deflexiones observadas.

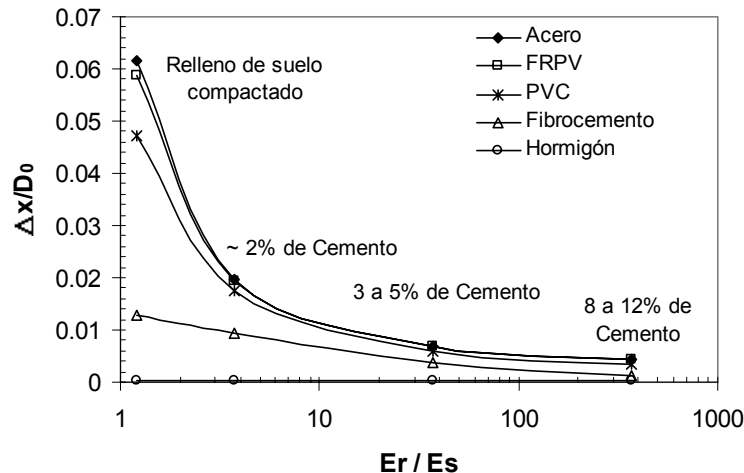


Figura 9: Influencia de la rigidez del relleno en las deformaciones de las tuberías cuando se aplica una carga $q = 100 \text{ kN/m/m}$.

La Figura 10 muestra el efecto conjunto de la inundación o saturación del suelo y del módulo elástico del relleno en las deformaciones esperadas en las tuberías flexibles. Se incluyen como referencia las deflexiones obtenidas cuando se inunda el suelo y el material de relleno es suelo compactado ($E_r/E_s = 1.2$). Observe que cuando se utilizan mezclas de suelo-cemento como material de relleno ($E_r/E_s = 3.7, 37 \text{ y } 370$), el efecto de la inundación disminuye notablemente. La disminución de las deflexiones, respecto de las esperadas cuando se utiliza suelo compactado como material de relleno, superó en todos los casos el 90%. Estos resultados indican que la utilización de mezclas de suelo-cemento como material de relleno sería una solución adecuada para prevenir excesivas deformaciones en tuberías flexibles debido a la saturación o inundación del suelo.

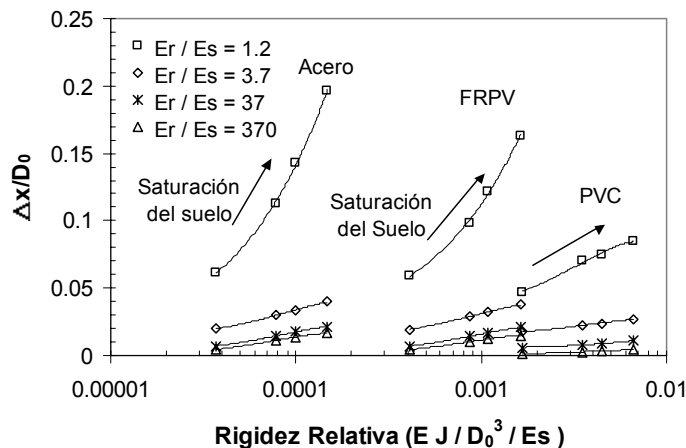


Figura 10: Efecto conjunto del humedecimiento del suelo y de la rigidez del relleno en las deformaciones de las tuberías flexibles cuando se aplica una carga $q = 100 \text{ kN/m/m}$.

CONCLUSIONES

Se realizó un estudio paramétrico sobre las distintas variables que intervienen en el comportamiento de tuberías enterradas. El análisis se realizó mediante simulaciones numéricas en un modelo bidimensional en elementos finitos. A partir de los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

El comportamiento mecánico de los loess argentinos es altamente dependiente de las condiciones de humedad. Cuando se satura, se producen grandes deformaciones y disminuye su módulo de deformación, afectando el comportamiento de las tuberías. Adicionalmente, estos suelos presentan un comportamiento altamente no lineal, y no elástico. Por lo tanto es indispensable utilizar modelos constitutivos elastoplásticos en las modelaciones numéricas.

Cuando el terreno natural se satura, se producen importantes incrementos en las deflexiones y esfuerzos en las tuberías. Además, para bajos valores de rigidez relativa las tuberías se encuentran más afectadas por el humedecimiento del suelo.

Las deflexiones y esfuerzos en las tuberías dependen fundamentalmente de la rigidez relativa entre la tubería y el suelo. La utilización de mezclas de suelo-cemento es una alternativa de gran utilidad para incrementar la rigidez del relleno de las zanjas, y disminuir las deflexiones de las tuberías. La utilización de mezclas de suelo-cemento permitiría disminuir entre un 70% y un 93% la ovalización de las tuberías. Además, se disminuyen notablemente los incrementos de deformación debidos a la saturación del suelo.

En los estudios de interacción suelo-tubería, es necesario considerar el efecto de la interfase. Si no se tiene en cuenta el desplazamiento relativo entre el suelo y la estructura, se sobreestiman los esfuerzos y se subestiman las deflexiones en las tuberías.

Para el cálculo y verificación de tuberías es necesario considerar la contribución de pequeñas y grandes deformaciones. La consideración de sólo pequeñas deformaciones resulta poco conservador para el análisis y cálculo de las tuberías con rigideces intermedias y bajas.

A mayor ancho de zanja excavado y relleno con suelo mejorado, menores son las deflexiones que se producen en las tuberías flexibles. Cuando se produce el humedecimiento del terreno lateral, la contribución del suelo compactado en la trinchera es más importante. Al aumentar el ancho de zanja, se incrementa la disminución de las deflexiones esperadas.

El MEF permite realizar análisis numéricos del comportamiento de las tuberías enterradas considerando la contribución y comportamiento del suelo y de la tubería. Esta herramienta resulta ventajosa debido a la versatilidad que tienen los códigos actuales de elementos finitos para representar problemas de interacción suelo-tubería, teniendo en cuenta el comportamiento no lineal del suelo.

AGRADECIMIENTOS

El Dr. Ing. Franco M. Francisca agradece profundamente al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina ya que esta investigación fue llevada a cabo en el marco de una beca posdoctoral otorgada por este organismo.

REFERENCIAS

- American Concrete Pipe Association (1992). *Concrete Pipe Design Manual*, Vienna, VA.
- Boresi A., Schmidt R. y Sidebottom O. (1993). *Advanced Mechanics of Materials*, Fifth Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- Davis C.A. y Bardet J.P. (1998) "Seismic Analysis of Large-Diameter Flexible Underground Pipes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(10), pp. 1005-1015.
- Fernandez A. y Santamarina J. (2001). "Effect of Cementation on the Small-Strain Parameters of Sand", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38, pp. 191-199.
- Fernando N. S. y Carter J. P. (1998). "Elastic Analysis of Buried Pipes Under Surface Path Loadings", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(8), pp. 720-728.
- Gens A., Carol I. y Alonso E.E. (1985). "Rock Joints: FEM Implementation and Applications", *Studies in Applied Mechanics 42: Mechanics of Geomaterials Interfaces*, Selvadurai y Boulon (Eds.), Elsevier, pp.395-420.
- Gurí R.J. (1980). "Interacción Suelo-Cañón en Cañerías de FRP (Fiber Reinforced Plastic) de Gran Diámetro", *VI Reunión Argentina de Mecánica de Suelo e Ingeniería en Fundaciones RAMSIF*, pp. 233-246.
- Kane H. (1973). "Confined Compression of Loess", *Proceedings of the Eighth International Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 2, pp. 115-122.
- Leca E. (1996). "Modeling and Prediction for Bored Tunnels", *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Mair & Taylor (Eds.), Balkema, Rotterdam, pp. 27-41.
- Mayol J.M. (1981). *Tuberías*, Editores Técnicos Asociados S.A., Barcelona, España.

- Moll L., Rocca R., Abbona P., y Vassia S. (1990). "Estudios de Deformación en Suelos Loésicos", Programa de Investigación de la Secretaría de Ciencia y Técnica, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Moore I. D. y Brachman R. W. (1994). "Three Dimensional Analysis of Flexible Circular Culverts", *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 120(10), pp. 1829-1844.
- PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analyses (1998). "*Complete Set of Manuals*", Brinkgreve y Vermeer (Edit.), Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- Redolfi E. (1986). "Estudio Comparativo de Diferentes Métodos para Evaluar el Potencial de Colapso en Suelos Loésicos Argentinos", *Simposio Argentino de Suelos Colapsables*, Sociedad Argentina de Mecánica de Suelos, pp. 46-66.
- Redolfi E. (1990). "Comportamiento de Pilotes en Suelos Colapsables", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Reginatto A.R. y Ferrero J.C. (1973). "Collapse Potential of Soils and Soil Water Chemistry", *Proceedings of the Eight International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, pp.177-183.
- Rinaldi V., Clariá J.J. y Santamarina J.C. (2001). "The Small-Strain Shear Modulus (Gmax) Of Argentinean Loess", *Proceedings of the Fifteenth International Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 1, pp. 495-499.
- Rocca R. (1985). "Review of Engineering Properties of Loess", *Report CE 299*, University of California, Berkeley, California, USA.
- Rocca R. y Quintana Crespo E. (1997). "La Gestión de la Información Geotécnica de la Ciudad de Córdoba", GT'97 Congreso Argentino de Ingeniería Geotécnica, Sesión VII: Exploración de Suelos y Zonificación Geotécnica, pp. 1-16.
- Scarpelli G., Sakellariadi E. y Furlani G. (2001). "Numerical Analysis of Soil-Pipeline Interaction Phenomena in Unstable Slopes", XV ICSMFE, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, pp. 1315-1318.
- Spangler M.G. (1948). "Underground Conduits – An Appraisal of Modern Research", *Transactions American Society of Civil Engineers ASCE*, pp. 316-373.
- Teruggi M. E. (1957). "The Nature and Origin of Argentine Loess", *Journal of Sed. Petrol.*, No 27, pp. 323-332.
- Terzariol R. y Abbona P. (1992). "Interacción Suelo-Estructura para el Diseño de Cañerías Enterradas en Suelos-Loésicos", Consejo de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Provincia de Córdoba, Proy. 2543/92, pp. 1-58.
- Terzariol R., Abbona P. y Redolfi E. (2000). "Uso de Suelo-Cemento Plástico como Relleno de Zanjas", XV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, pp. 549-556.
- Tohda J., Yoshimura H. y Li L. (1997). "Mechanical Behaviour and Design of Buried Pipes as a Soil-Structure Interaction", XIV ICSMFE, *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, pp.1049-1052.
- Tohda J. y Yoshimura H. (2001). "A New Design Method for Buried Pipes", XV ICSMFE, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, pp. 1319-1322.
- U.S. Army Corps of Engineers (1997). "Engineering and Design: Conduits, Culverts, and Pipes", Department of the Army, *U.S. Army Corps of Engineers Report EM 1110-2-2902*, Washington DC, USA.

