

ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN SIN DRENAJE DE SUELOS DEBIDA A PERDIDA DE TERRENO⁽¹⁾

C. SAGASETA (*)

RESUMEN. Se presentan soluciones analíticas para la distribución de deformaciones en un suelo incompresible, inicialmente homogéneo e isotrópico, debidas a pérdida de terreno (ground loss) a pequeña profundidad. Este problema pertenece a una categoría de casos en los que las condiciones de contorno impuestas son sólo o principalmente en términos de desplazamientos (problemas de deformación controlada). En estos casos, existe la posibilidad de eliminar las tensiones y obtener las deformaciones por medio únicamente de la condición de incompresibilidad. La presencia de la superficie libre se considera por medio de una técnica de imágenes virtuales y usando algunas soluciones para el semiespacio elástico. Los resultados son simples, especialmente para los desplazamientos de la superficie del terreno. La aplicación a algunos problemas típicos, como excavación de túneles e hiena o extracción de pilotes muestra que los resultados obtenidos concuerdan razonablemente bien con las observaciones reales y presentan ventajas respecto a métodos numéricos comúnmente usados. Se dan algunas indicaciones para la extensión del método a otros casos, como el de suelos compresibles.

ABSTRACT. Closed form solutions are presented for obtaining the strain field in an initially isotropic and homogeneous incompressible soil due to near-surface ground loss. This problem fits into a category of cases in which the imposed boundary conditions are only or mainly in terms of displacements (strain-controlled problems). In these cases there is a possibility of eliminating the stresses and obtaining the strains by using only the incompressibility condition. The presence of the top free surface is considered by means of a virtual image technique and some results for the elastic half-space. The results are simple, especially for the movements of the soil surface. The application to some typical problems, such as soft ground tunnelling and pile driving or extraction, shows that the calculated movements agree well with the experimental observations and compare favourably with commonly used numerical methods. Some hints are given for extending the method to other cases, such as to compressible materials.

INTRODUCCION

La determinación de los campos de tensiones y deformaciones en el terreno resultantes de la acción de cargas externas y/o deformaciones impuestas en sus contornos es uno de los objetivos primordiales de la mecánica teórica del suelo. En el pasado, el uso de métodos de elementos finitos ha ido creciendo de forma continua y ha llegado a ser la herramienta más eficaz para este fin.

El uso de soluciones analíticas ha ido restringiéndose a casos sencillos, en los que las simplificaciones necesarias no resultan excesivas. Sin embargo, queda un campo importante en el cual los métodos analíticos son aplicables (Selvadurai, 1978). Hay muchos casos en los que la información disponible sobre las propiedades del suelo es escasa y no justifica el uso de un modelo constitutivo complejo y un método refinado de resolución. En otras

ocasiones, se necesita una aproximación rápida de las tensiones y deformaciones, para lo cual el empleo de soluciones analíticas resulta adecuado.

Los posibles problemas tensión-deformación pueden clasificarse según la naturaleza del input de acciones aplicadas (condiciones de contorno) y la del output deseado. Según esto, se pueden considerar los siguientes tipos de problemas:

- Problemas fuerza-fuerza (F-F), en los que las condiciones de contorno son sólo en tensiones (o fuerzas) y sólo se desea obtener el campo de tensiones.
- Problemas desplazamiento-desplazamiento (D-D), cuando las condiciones de contorno son sólo en deformaciones (o desplazamientos) y sólo se desea el campo de deformaciones (o desplazamientos).
- Problemas fuerza-desplazamiento o desplazamiento-fuerza, definidos de forma similar.
- Problemas mixtos, cuando se imponen simultáneamente tensiones y deformaciones en el contorno o se desea obtener ambos campos.

Cuando sólo intervienen las tensiones (problemas F-F), existe la posibilidad de eliminar las deformaciones de las ecuaciones y trabajar sólo con las tensiones, reduciendo la complejidad del problema; esto se ha hecho con éxito

(1) Artículo publicado en Géotechnique, vol. 37, 3301-3320, y al que se le concedió el premio Thomas Telford por el ICE de Londres, al mejor artículo publicado en esta revista durante el año.

(*) Catedrático de Geotecnia de la Universidad de Cantabria (Santander).

en el pasado, por ejemplo, en el análisis del equilibrio límite de problemas en deformación plana por el método de las características (Sokolowski, 1960).

Por otra parte, cuando se trata de un problema D-D, es posible eliminar las tensiones y trabajar sólo en deformaciones. Estos casos son menos frecuentes que los problemas F-F, pero existe un buen ejemplo en el problema de la expansión de cavidades cilíndricas o esféricas en materiales incompresibles y su aplicación a la interpretación de ensayos presiométricos o al análisis de la capacidad portante de pilotes (Gibson y Anderson, 1961).

La mayor parte de los problemas son de tipo mixto. Sin embargo, en muchos casos uno de los datos (tensiones o deformaciones) es de importancia secundaria, y el problema puede contemplarse en una primera aproximación como de tipo F-F o D-D, y el efecto del input ignorado puede introducirse posteriormente. Por ejemplo, este es el caso representado en la fig. 1a), que es un problema F-F con la excepción de los desplazamientos impuestos al muro, o en la fig. 1-b), en la que se puede ver un problema D-D excepto en la superficie libre en la que se impone la condición de tensiones normales y tangenciales nulas.

El problema objeto de este artículo es un problema «cuasi-D-D». Consiste en la determinación del campo de desplazamientos en un suelo homogéneo, isótropo e incompresible cuando en algún punto de su interior, a pequeña profundidad, se extrae material y el suelo situado alrededor cierra completamente la cavidad formada por la extracción (fig. 2). En algunos problemas geotécnicos (p. ej., en construcción de túneles), esto se denomina «pérdida de terrenos», mientras que en mecánica de fluidos se usa el término «sumidero». En lo que sigue se usarán indistintamente ambas denominaciones. Si el sumidero se desplaza a lo largo de un segmento de línea o

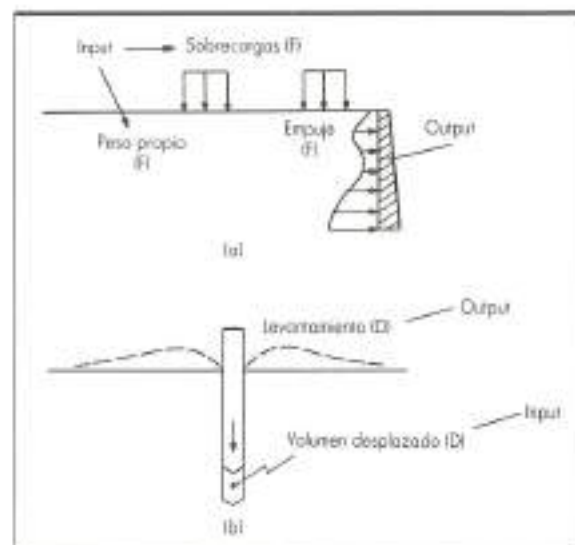


FIGURA 1. Tipos de problemas geotécnicos tensión-deformación.
a) Empuje de tierras (problema cuasi F-F).
b) Levantamiento por hincas (problema cuasi D-D).

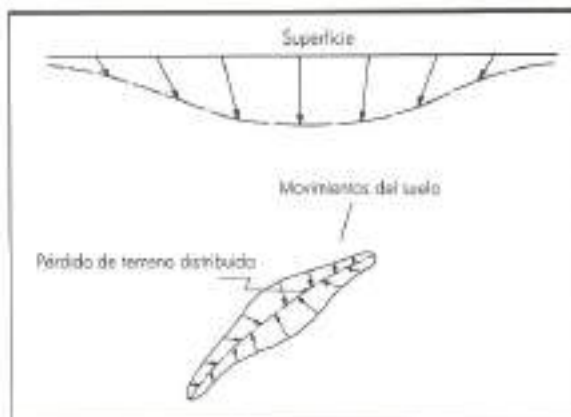


FIGURA 2. Pérdida de terreno a pequeña profundidad.

superficie, se produce una pérdida de terreno distribuida. Considerando un valor negativo para la pérdida de terreno (es decir, introduciendo una fuente en lugar de un sumidero), se reproduce la inyección de un material no penetrante (p. ej., inyección de compactación o hincas de pilotes).

El análisis se realiza ignorando en primera instancia el efecto de la superficie libre y suponiendo que el terreno es un medio infinito. En un paso posterior se introduce el efecto de la superficie, por medio de un método híbrido, basado en la técnica de imágenes virtuales y soluciones para el semiespacio elástico.

Los resultados se dan en forma analítica. Ello permite el cálculo de valores particulares por medio de una simple calculadora de bolsillo, precisándose de un pequeño ordenador únicamente para evaluar los desplazamientos en un gran número de puntos o para tratamiento gráfico de los resultados.

CONCEPTOS BASICOS

Las ecuaciones que gobiernan cualquier problema tensión-deformación son:

- Condiciones de equilibrio.
- Ecuaciones constitutivas.
- Condiciones de contorno.

Las ecuaciones de equilibrio están en función de las tensiones solamente, mientras que las leyes constitutivas incluyen a la vez tensiones y deformaciones y pueden ser muy complejas. La eliminación de las tensiones sólo es posible en modelos de suelo sencillos (materiales elásticos lineales). Sin embargo, si el suelo es incompresible, sin deformación volumétrica (como, por ejemplo, en la deformación sin drenaje de suelos saturados), las tres ecuaciones de la ley constitutiva correspondientes a las deformaciones según tres ejes ortogonales pueden sumarse, con el resultado:

$$\epsilon_{ii} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

independientemente del modelo de suelo, siempre que respete la condición de incompresibilidad.

La ecuación (1) es independiente de las tensiones y puede usarse para el análisis directo de las deformaciones en un problema D-D. Sin embargo, en problemas bi o tridimensionales no es suficiente para la determinación de todas las componentes de la deformación.

Si, por cualquier razón, se conoce la dirección del vector desplazamiento en cada punto, y sólo su magnitud es desconocida, entonces la ecuación (1), con las condiciones de contorno adecuadas, es suficiente para determinar el campo de desplazamientos. Esto ocurre, por ejemplo, en problemas con simetría esférica, en los que el vector desplazamiento en cualquier punto pasa por el centro de simetría.

Esta es la base de la simplicidad de las teorías de expansión (o contracción) de cavidades, en las que, para suelos isotrópicos, homogéneos e incompresibles, el campo de deformaciones se obtiene en primer lugar de la condición de incompresibilidad, para después obtener las tensiones usando las ecuaciones constitutivas. La teoría de expansión de cavidades se desarrolló en primer lugar para su aplicación a problemas de indentación de metales (Bishop, Hill y Mott, 1945). Su aplicación a problemas geotécnicos fue posterior (Gibson y Anderson, 1961) y se ha ido refinando progresivamente.

Esta simplicidad ha permitido soluciones analíticas o cuasi-analíticas, incluso con modelos de suelo relativamente complejos (Carter, Randolph y Wroth, 1979; Davis, Scott y Mullenger, 1984). Otra característica importante es que la ley presión-desplazamiento obtenida en un ensayo presiométrico es reflejo directo de algunas propiedades de la ley tensión-deformación del suelo (Palmer, 1972; Selvadurai, 1984). También se ha considerado el efecto de una fricción longitudinal en el fuste de una cavidad cilíndrica en expansión (importante en análisis de capacidad portante de pilotes) (Sagaseta,

Houlsby, Norbury y Wheeler, 1984). La base esencial de la teoría limita su aplicabilidad a materiales incompresibles (suelos sin drenaje); sin embargo, Vesic (1972) ha extendido el análisis a suelos compresibles, suponiendo que la deformación volumétrica del suelo no es nula, sino un valor finito, conocido en cada punto, valor que se introduce en el segundo miembro de la ecuación (1).

En la última década ha habido esfuerzos para extender el campo de aplicación de la teoría de expansión de cavidades. Como se ha dicho, el campo de deformaciones es independiente de la rigidez del suelo, siendo válido y único para cualquier material incompresible, incluso para un fluido. Es posible aprovechar esto y aplicar algunos aspectos y procedimientos de mecánica de fluidos, como las técnicas de transformación conforme o la superposición de casos elementales (flujos uniformes, fuentes y sumideros puntuales, vórtices o dobletes).

Ambos métodos se han aplicado a problemas geotécnicos en los últimos años. El trabajo de Baligh y sus colaboradores en M.I.T. ha dado lugar al llamado «método de la trayectoria de deformaciones» (Baligh, 1985). Combinando una fuente puntual y un flujo uniforme vertical se reproduce la penetración en el suelo de un pilote lubricado de punta redondeada (el llamado «pilote simple»), obteniéndose una solución exacta y elegante para las deformaciones, que es independiente del modelo constitutivo de suelo. La simulación de otras geometrías de la punta requiere la superposición de varias fuentes y sumideros en el flujo vertical (fig. 3). Por otra parte, al mismo problema se han aplicado con éxito técnicas de transformación conforme (Tumay, Aear, Cekirge y Ramesh, 1985) (fig. 4).

La hipótesis común de estos métodos es la irrotacionalidad del movimiento del suelo. En el método de transformaciones conformes, esta condición se impone

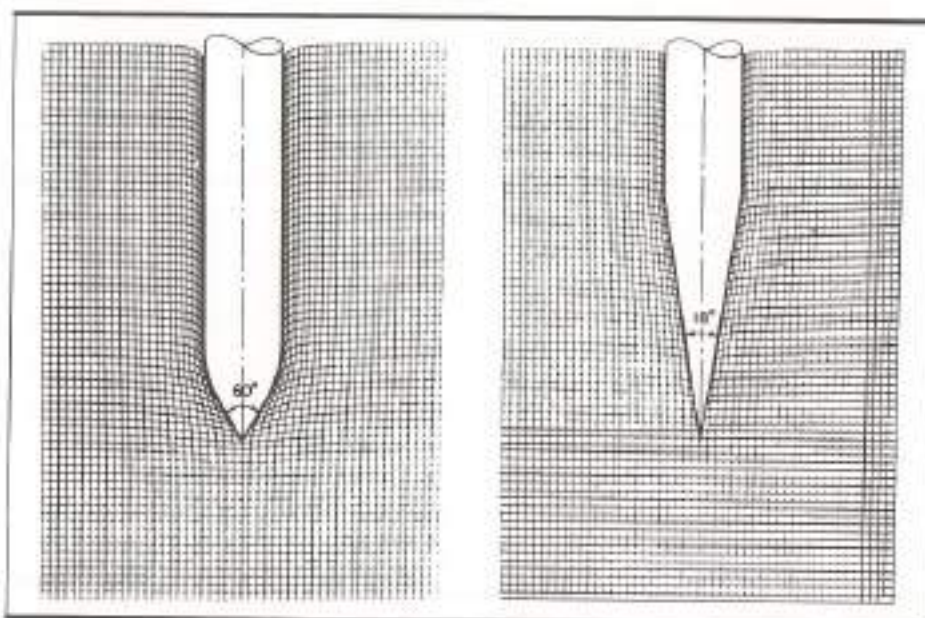


FIGURA 3. Deformación del suelo alrededor de penetrómetros: método de superposición (Baligh, 1985).

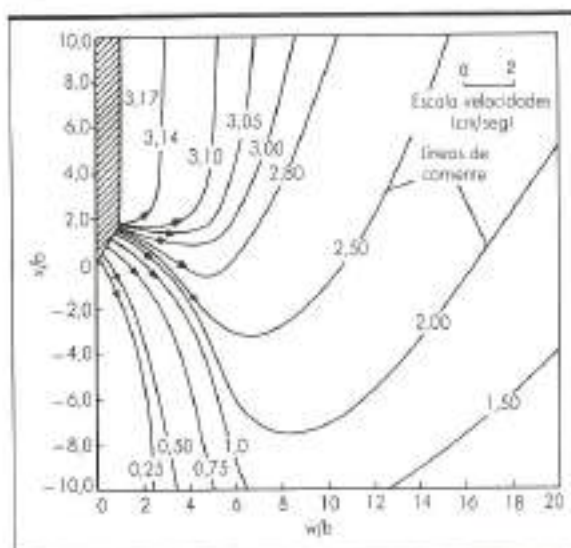


FIGURA 4. Flujo de suelo alrededor de un cono. Técnica de transformación conforme (Tunay et al., 1985).

explícitamente y, junto con la ecuación (1) de incompresibilidad, proporciona un sistema de ecuaciones diferenciales parciales de primer orden en función de los desplazamientos o velocidades, que puede resolverse sin introducir las tensiones en el análisis. Con respecto a los métodos de superposición, se demuestra fácilmente que cualquier combinación de los flujos elementales cito los antes es siempre irrotacional. Esta es una hipótesis común en mecánica de fluidos. En flujo elasto-plástico, la rigidez a esfuerzo cortante del material implica que en un contorno rugoso la deformación del suelo debe ser de tipo «corte simple», lo cual a su vez implica una deformación de distorsión pura más una rotación. Esto supone una limitación de los procedimientos antedichos a casos con contornos lubricados. Sin embargo, la solución es suficientemente buena como primera aproximación para ser posteriormente mejorada introduciendo las tensiones y el resto de ecuaciones, o incluso para adoptarse como solución final con un grado de aproximación razonable.

Todas las soluciones descritas se refieren a problemas profundos, es decir, a casos en los que el efecto de la superficie libre del terreno puede despreciarse. El objeto de este artículo es usar un método en deformaciones, similar a los descritos, para el análisis de las deformaciones en un suelo incompresible causados por pérdida de terreno a profundidad moderada bajo la superficie.

Es un hecho conocido en mecánica de fluidos que una superficie libre implica una dificultad adicional importante. El método de superposición deja de ser aplicable. Por otra parte, si se imponen en la superficie libre las condiciones de incompresibilidad e irrotacionalidad, ello conduce a soluciones triviales, excepto para fluidos perfectos (inviscosos). Por tanto, se necesita acudir a otros procedimientos. El método que aquí se presenta intenta resolver el problema combinando el análisis como fluido

con soluciones elásticas, aprovechando sus ventajas respectivas. En el primer paso se emplea el método basado en la mecánica de fluidos, utilizando los desplazamientos como variables, en lugar de las velocidades. El análisis de un problema como el representado en la fig. 5 comprende varios pasos, como sigue.

- A. Se desprecia el efecto de la superficie libre y las deformaciones se calculan como si el sumidero estuviera en un medio infinito (paso 1).
- B. Estas deformaciones producirán unas ciertas tensiones en la posición de la superficie libre, violando por tanto la condición de tensiones nulas en la misma. Estas tensiones pueden relajarse por uno de los métodos siguientes:

- i) La consideración de una fuente virtual, imagen negativa del sumidero real con respecto a la superficie libre producirá unas tensiones normales opuestas y unas tensiones tangenciales iguales a las del sumidero real.
- ii) Como en i) pero tomando una imagen positiva (es decir, un sumidero imagen), producirá las mismas tensiones normales y tensiones tangenciales opuestas.

En cualquier caso, las deformaciones debidas a la imagen se suman a las calculadas en el paso 1 (paso 2).

- C. A continuación se evalúan las tensiones remanentes en la superficie libre, normales o tangenciales, y se eliminan. Las deformaciones resultantes se añaden a las obtenidas en los pasos 1 y 2 (paso 3).

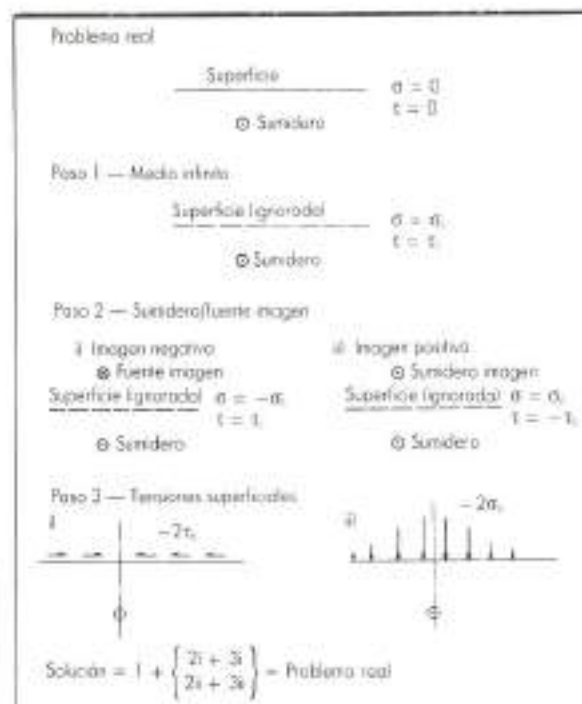


FIGURA 5. Pasos del análisis.

CADdy

Transparencia

...en el departamento de topografía significa: calcular datos correctos, transformarlos eficientemente en visualización gráfica y, en todas las fases de su trabajo, organizar transparentemente la inter-dependencia entre datos y mapas. Los módulos de aplicación TOPOGRAFICA de **CADdy** cuidan que haya un flujo de datos exacto y bi-direccional desde la toma de datos en el campo hasta la formación de mapas definidos, un concepto CAD totalmente transparente. Con las cómodas funciones de **CADdy** Vd. transforma sus datos de campo en un archivo de coordenadas. A partir de aquí **CADdy** le convierte automáticamente dichos puntos en su mapa correspondiente de acuerdo con los standards. Generación automática de la red de triangulación e interpolación de las curvas de nivel. Obtención de las secciones longitudinales y transversales del terreno. Representación tridimensional del terreno para cálculo de volúmenes. Y, además, la definición de nuevos puntos en el mapa y su conversión al campo, por ejemplo para desarrollos en la construcción de carreteras. Escriba, o simplemente llámenos, ...tenemos la solución en cualquier aplicación CAD/CAM/CAE.



Constructora de Equipos Eléctricos, S.A.

A. General Eléctrica Española

DELEGACIONES:

La Coruña (981) 28 36 00
Barcelona (93) 302 32 62
Bilbao (94) 418 24 00
San Sebastián (943) 21 75 58

Madrid: (91) 435 09 45
Gijón: (985) 34 74 00
Sevilla: (954) 21 71 99
Las Palmas: (928) 26 00 73

Valencia: (96) 333 45 25
Castellón: (964) 20 77 96
Zaragoza: (976) 33 44 47
Málaga: (952) 25 04 75

Expertos en CAD

TODO EN SEÑALIZACION Y SEGURIDAD VIAL

• Equipos reflectantes
para Policía Municipal.



• Señales de Tráfico pintadas
y reflexivas.



• Nueva señalización urbana.



• Barreras de Seguridad.

• Señalización para obras.



señalizaciones **VILLAR**

Avda. Valladolid, 58 apdo. 61 42004 **SORIA**

Telf. (975) 22 05 04

Fax (975) 22 06 45

Los pasos 1 y 2 no implican consideración de las tensiones. Las tensiones en la superficie no se evalúan, sino que el método aprovecha el hecho de que el sumidero y su imagen producirán tensiones tangenciales o normales nulas en su plano de simetría. Sin embargo, el paso 3 sí requiere la evaluación de las tensiones en la superficie, que se duplican por la acción del sumidero imagen. Por tanto, los pasos 1 y 2 constituyen un «análisis directo en deformaciones», mientras que el paso 3 implica la introducción de tensiones y por tanto la adopción de un determinado modelo de suelo, como se describirá más adelante.

De las dos posibilidades del paso 2, la primera es más útil. Ello se debe a que las tensiones tangenciales en la superficie producirán desplazamientos de dirección predominantemente horizontal, mientras que tensiones normales en la superficie causarían mayores movimientos verticales. Por ello, el uso del primer método proporciona la posibilidad de omitir el paso 3 del análisis, es decir, de no introducir las tensiones, dando una solución razonablemente aproximada para los movimientos verticales, sobre los que generalmente recae mayor interés que sobre los horizontales. Este punto se discutirá más adelante, analizando las ventajas relativas de ambos métodos.

Si se desea tener en cuenta de forma completa el efecto de la superficie, el paso 3 es necesario para eliminar las tensiones remanentes de los pasos 1 y 2. Para lograr esto, los métodos derivados de la mecánica de fluidos ya no son válidos, siendo necesario utilizar métodos de la mecánica de sólidos. Para el paso 3 puede usarse la siguiente secuencia:

- A. Evaluar las deformaciones en la superficie por derivación del campo de desplazamientos obtenido en los pasos 1 y 2 (paso 3.1).
- B. A partir de estas deformaciones, calcular las correspondientes tensiones en la superficie (paso 3.2).
- C. Obtener el campo de deformaciones en un semiespacio sometido a un sistema de fuerzas en su superficie igual y opuesto a las calculadas en el paso 3.2 (paso 3.3).

El primer paso es directo, porque las ecuaciones que se deducen del sumidero en un medio infinito son simples, como más adelante se mostrará. El paso 3.2 es también fácil, incluso para un modelo de suelo relativamente complejo, ya que éste se usa en forma directa, calculándose las tensiones a partir de unas deformaciones conocidas. Sin embargo, el paso 3.3 sólo es posible para el modelo más simple, es decir, semiespacio elástico lineal, homogéneo e isótropo, a menos que se emplee un método numérico.

La hipótesis de elasticidad lineal en el paso 3.2 está justificada plenamente, ya que los puntos de suelo de la superficie están muy lejos del sumidero, por lo que sus deformaciones plásticas serán despreciables. La exactitud de esta hipótesis en el paso 3.3 no es tan clara, pero en cualquier caso las diferencias respecto a un modelo mejor deben ser pequeñas al ser los movimientos asociados al paso 3 sustancialmente menores que los resultan-

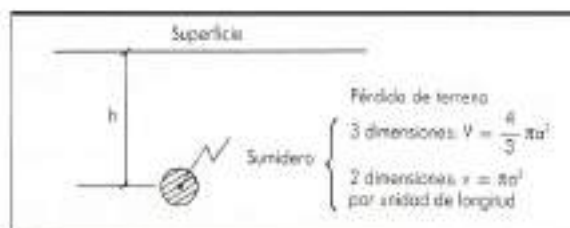


FIGURA 6. Sumidero puntual. Definición del problema.

tes de los pasos 1 y 2, particularmente si se emplea el método i) (imagen negativa), por las razones antedichas.

PERDIDA DE TERRENO CONCENTRADA: SUMIDERO PUNTUAL

Se considera el caso básico de la acción de un sumidero puntual que extrae un volumen finito de suelo a una profundidad h bajo la superficie. El suelo extraído tiene un volumen V si el problema es en tres dimensiones, o un volumen v por unidad de longitud en deformación plana (fig. 6). Por conveniencia, la pérdida de terreno se define en ambos casos por el radio a de la esfera o cilindro equivalente. El análisis se realiza en pasos sucesivos, como se ha descrito anteriormente.

MEDIO INFINITO

Si se ignora la superficie del terreno, el problema posee simetría esférica alrededor del sumidero, por lo que el campo de desplazamientos es radial, siendo nulas las otras componentes. La condición de incompresibilidad implica que los puntos situados a una distancia r del sumidero deben tener un desplazamiento radial hacia el origen (fig. 7):

$$S_r(r) = \frac{\alpha}{n} \cdot \left(\frac{\alpha}{r}\right)^{n-1} \quad (2)$$

donde $n = 2$ en deformación plana y $n = 3$ en tres dimensiones. La ecuación (2) se ha obtenido en la hipóte-

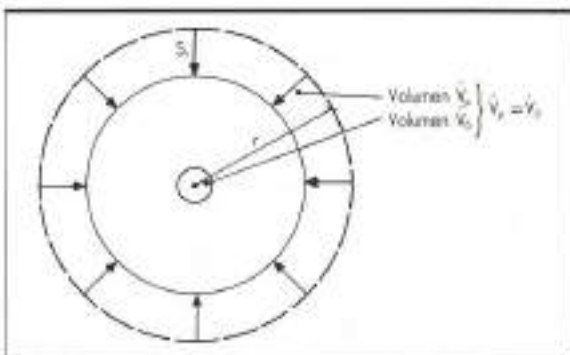


FIGURA 7. Sumidero puntual. Medio infinito.

sis de pequeños desplazamientos, despreciando los cambios de geometría. Esta hipótesis se mantendrá en lo que sigue. Para grandes deformaciones, la expresión equivalente a (2) sería:

$$S_r(r) = r_0 - (r_0^a - a^a)^{1/a} \quad (2a)$$

donde r_0 es la coordenada inicial (material), para una formulación Lagrangiana, o:

$$S_r(r) = (r^a + a^a)^{1/a} - r \quad (2b)$$

donde r es la coordenada deformada (espacial), para una formulación Euleriana.

En un sistema de referencia cartesiano las componentes del desplazamiento en un punto $P(x,y,z)$ son, si el sumidero está en $C(x_0, y_0, z_0)$ (fig. 8):

$$S_x = -\frac{a^a}{n} \cdot \frac{x - x_0}{r^{a+1}} \quad (3a)$$

$$S_y = -\frac{a^a}{n} \cdot \frac{y - y_0}{r^{a+1}} \quad (3b)$$

en tres dimensiones y

$$S_z = 0 \quad (3c)$$

en deformación plana

$$S_z = -\frac{a^a}{n} \cdot \frac{z - z_0}{r^{a+1}} \quad (3d)$$

donde

$$r = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{1/2}$$

en tres dimensiones y

$$r = [(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2]^{1/2}$$

en deformación plana.

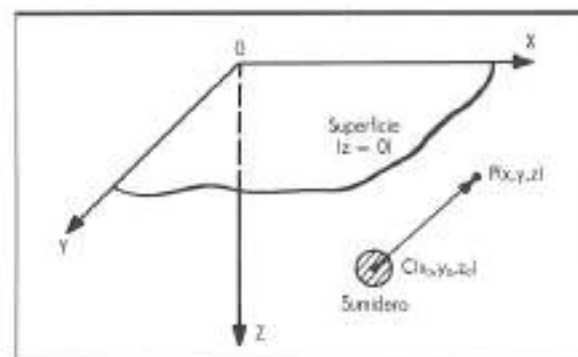


FIGURA 8. Sumidero puntual. Coordenadas cartesianas.

SUMIDERO IMAGEN: SEMIESPACIO «PAVIMENTADO»

Los desplazamientos de la ecuación (3) producirán un cierto campo de tensiones, que dependerá de las propiedades tensión-deformación del suelo. En la superficie resultarán tensiones normales y tangenciales, que violan la condición de contorno de superficie libre.

Estas tensiones superficiales pueden eliminarse parcialmente mediante el uso de fuentes y sumideros imagen, como se ha descrito en el apartado precedente. Si se usa una imagen negativa, entonces se eliminan las tensiones normales, mientras que el empleo de una imagen positiva anula las tensiones tangenciales.

Mediante la primera posibilidad (método (i)), el resultado es un semiespacio cuya superficie está libre de tensiones normales, pero que está constreñida en dirección horizontal. La situación es como si la superficie estuviera cubierta por una membrana flexible pero inextensible. A esta situación se le denomina en adelante semiespacio «pavimentado».

Esta condición no está muy alejada de la realidad. En zonas urbanas, que es precisamente donde interesan las deformaciones causadas por excavaciones próximas, es frecuente la presencia de un pavimento rígido. De hecho, es una práctica usual cuando se trata de medir movimientos superficiales en zonas urbanas el referir los puntos de observación a una cierta profundidad para evitar la influencia del pavimento. En estas condiciones, la solución para semiespacio pavimentado puede ser al menos tan buena como la de superficie completamente libre. Esta consideración es especialmente válida para la componente vertical de los desplazamientos, como ya se ha discutido.

Sumando los desplazamientos causados por el sumidero y su imagen negativa, se obtiene el siguiente resultado para los puntos del plano XZ (los restantes puntos vienen definidos bien por la condición de deformación plana o de simetría axial) (fig. 9):

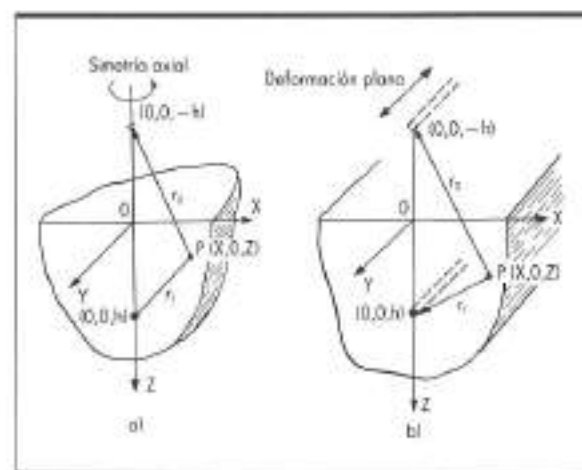


FIGURA 9. Sumidero puntual, imagen negativa.

$$\begin{aligned} S_x &= -\frac{a^3}{n} \cdot \left(\frac{x}{r_1^3} - \frac{x}{r_2^3} \right) \\ S_y &= 0 \\ S_z &= -\frac{a^3}{n} \cdot \left(\frac{z-h}{r_1^3} - \frac{z+h}{r_2^3} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

donde

$$\begin{aligned} r_1 &= [x^2 + (z-h)^2]^{1/2} \\ r_2 &= [x^2 + (z+h)^2]^{1/2} \end{aligned}$$

Si se usara una imagen positiva (método (ii)), el resultado sería un semiespacio cuya superficie está libre en dirección horizontal pero que no puede experimentar movimientos verticales, como si estuviera suspendido de un sistema de hilos inextensibles (semiespacio «suspendido»). Esta condición es completamente irrealista. La única razón para mantener en mente este método es que se usará más adelante como elemento de razonamiento respecto a los movimientos de la superficie.

SUPERFICIE LIBRE

Para la eliminación completa de las tensiones superficiales debe seguirse el procedimiento descrito anteriormente (pasos 3.1-3.3).

Las deformaciones tangenciales en la superficie se obtienen de las ecuaciones (4) como (paso 3.1)

$$\begin{aligned} \gamma &= \left(\frac{\partial S_x}{\partial z} + \frac{\partial S_z}{\partial x} \right)_{z=0} = \\ &= -4 \cdot a^3 \cdot \frac{h \cdot x}{(x^2 + h^2)^{1+n/2}} \end{aligned} \quad (5)$$

Para material elástico lineal, las tensiones tangenciales asociadas son (paso 3.2)

$$\tau = G \cdot \gamma = -4 \cdot G \cdot a^3 \cdot \frac{h \cdot x}{(x^2 + h^2)^{1+n/2}} \quad (6)$$

La distribución de tensiones tangenciales se muestra en la fig. 10 para los casos de deformación plana y tres dimensiones.

El paso 3.3 del análisis comprende la evaluación de los desplazamientos en un semiespacio elástico homogéneo sujeto a un sistema de fuerzas horizontales en su superficie opuestas a las tensiones tangenciales de la ecuación (6). Esto puede hacerse por integración directa de las soluciones conocidas para carga puntual horizontal (problema de Cerruti). Los resultados, para el caso de deformación plana, son

$$\begin{aligned} S_{xx} &= -a^3 \cdot \frac{x}{r_2^3} \cdot \left[1 - 2 \cdot \frac{z(z+h)}{r_2^2} \right] \\ S_{xz} &= a^3 \cdot \frac{z}{r_2^3} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{z^2}{r_2^2} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

donde

$$r_2 = [x^2 + (z+h)^2]^{1/2}$$

La fig. 11 muestra estos desplazamientos en forma adimensional. En tres dimensiones

$$\begin{aligned} S_{xx} &= \frac{2}{\pi} \cdot a^3 \cdot \frac{h}{x} \cdot \int_0^\infty r_0 \cdot \frac{a}{(h^2 + a^2)^{3/2}} \cdot \\ &\cdot [J_E \cdot E(k) + I_F \cdot F(k)] \cdot da \\ S_{xz} &= \frac{2}{\pi} \cdot a^3 \cdot h x \cdot \int_0^\infty \frac{1}{r_0} \cdot \frac{a}{(h^2 + a^2)^{5/2}} \cdot \\ &\cdot [J_E \cdot E(k) + F(k)] \cdot da \end{aligned} \quad (8)$$

donde

$$I_E = 1 + \frac{1}{2} \cdot x^2 \cdot \left(\frac{1}{r_0^2} + \frac{1}{r_0^4} \right)$$

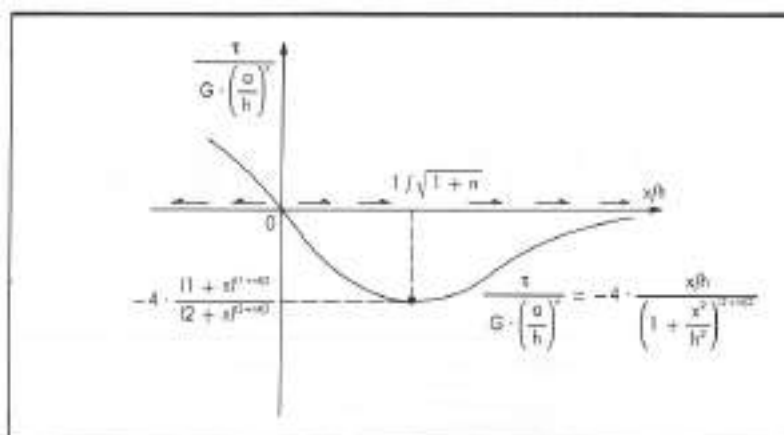
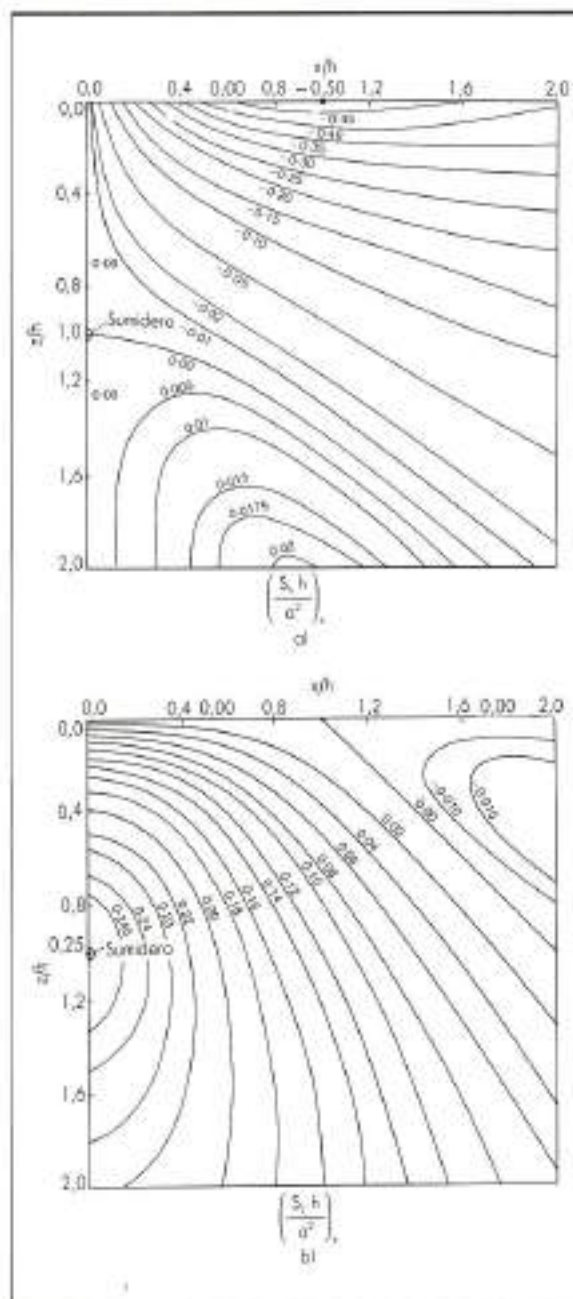


FIGURA 10. Semidura puntual.
Tensiones tangenciales en superficie.



$F(k)$ y $E(k)$ son las funciones elípticas completas de primera y segunda especie, respectivamente, con

$$k = \left(1 - \frac{\gamma_0}{\gamma_0^*}\right)^{1/2}$$

Las integrales de las ecuaciones (8) deben evaluarse numéricamente. Los resultados se han representado en forma adimensional en la fig. 12.

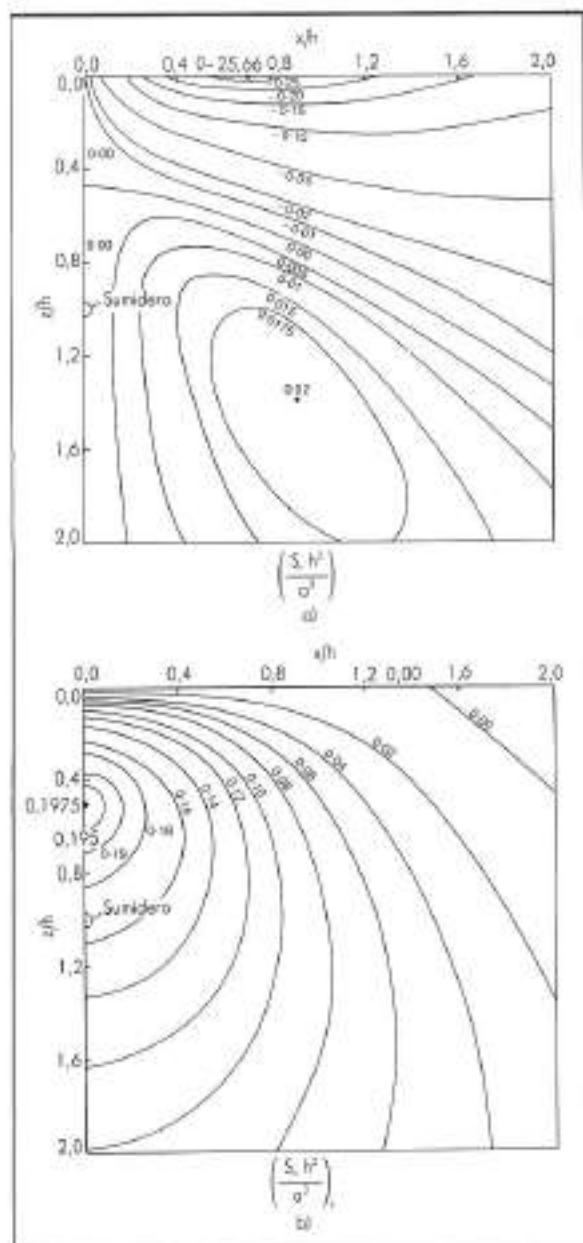


FIGURA 12. Suministro puntual. Tres dimensiones. Eliminación de tensiones superficiales tangenciales.

$$I_F = -(q^2 + x^2 + 2x^2)$$

$$J_E = -1 + 2 \cdot \frac{a(a-x)}{r_x^2}$$

$$r_n = [(a - x)^2 + z^2]^{1/2}$$

$$r_c = [(a + z)^2 + z^2]^{1/2}$$

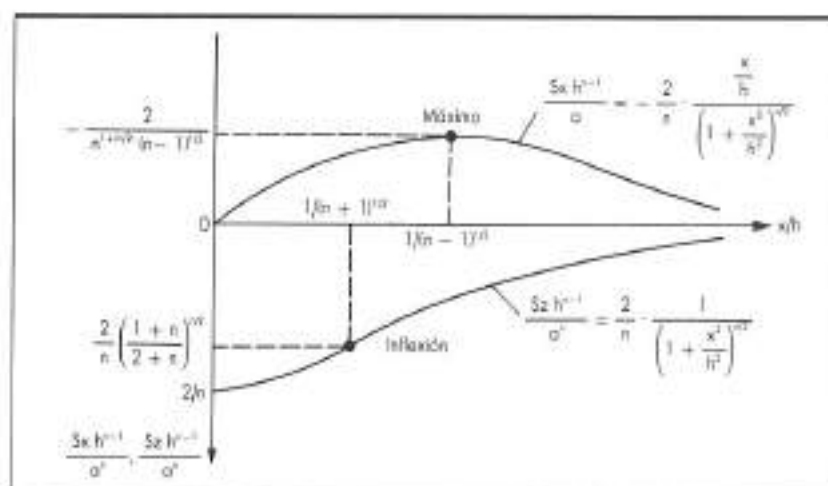


FIGURA 13. Sumidero puntual. Desplazamientos finales de la superficie.

MOVIMIENTOS SUPERFICIALES

La suma de los desplazamientos de las ecuaciones (7) u (8) a los valores de la ecuación (4) define los valores finales de los movimientos del suelo en cualquier punto. En la mayor parte de los casos, el interés radica fundamentalmente en los desplazamientos de la superficie del suelo. Para estos puntos los resultados son considerablemente más simples y la evaluación de las tensiones superficiales (paso 3 del proceso general) no es precisa.

La simplicidad nace de que, para un material incompresible (coeficiente de Poisson de 0,5), la aplicación de una carga puntual vertical en la superficie (problema de Boussinesq) produce movimientos horizontales nulos en todos los puntos de la superficie, y los desplazamientos de la superficie debidos a una carga horizontal (problema de Cerruti) son también cero.

Teniendo esto en mente, si se consideran los movimientos verticales, la superposición de la imagen negativa (método (i)) cancela las tensiones superficiales normales, y la eliminación posterior de las tensiones tangenciales remanentes no produce ningún movimiento vertical adicional, por lo que puede omitirse.

Para obtener los desplazamientos horizontales de la superficie, puede seguirse la posibilidad alternativa del método (ii) (es decir, la superposición de una imagen positiva). En este caso, se cancelarán las tensiones tangenciales superficiales, y entonces la eliminación de las tensiones normales remanentes no producirá movimientos horizontales adicionales, por lo que puede obviarse este paso.

Dado que los movimientos verticales de la superficie se duplican por la acción de la imagen negativa, y por otra parte los desplazamientos horizontales también resultan duplicados por la imagen positiva, la conclusión es que los movimientos de la superficie pueden obtenerse directamente multiplicando por un factor de 2 los desplazamientos debidos al sumidero en un medio infinito, ignorando la presencia de la superficie del suelo.

De esta forma, los desplazamientos finales exactos de la superficie del suelo debidos al sumidero puntual son

$$S_{x0} = S_{x(z=0)} = -2 \cdot \frac{\alpha^n}{n} \cdot \frac{x}{(x^2 + h^2)^{n/2}} \quad (9)$$

$$S_{z0} = S_{z(z=0)} = 2 \cdot \frac{\alpha^n}{n} \cdot \frac{h}{(x^2 + h^2)^{n/2}}$$

Estos valores se representan en forma adimensional en la fig. 18.

PERDIDA DE TERRENO DISTRIBUIDA

La solución precedente puede extenderse al caso en que la pérdida de terreno no está concentrada en un punto sino distribuida a lo largo de un segmento de línea o superficie en el interior del terreno. La intensidad del sumidero (es decir, el volumen perdido por unidad de longitud o área) puede ser variable a lo largo de dichos segmentos (fig. 14). La mayoría de los problemas son de este tipo, como se verá más adelante en los ejemplos de aplicación.

La integración se lleva a cabo en la forma indicada en la fig. 14. Se toman las soluciones básicas anteriores, pero considerando un volumen perdido diferencial, dV o dv , en lugar del volumen finito, V o v , y luego integrando la solución a lo largo del segmento de línea o superficie. En algunos casos, la integración puede ser analítica. De no ser así, debe hacerse de forma numérica, en cuyo caso puede ser conveniente dividir el segmento, en general irregular y de intensidad variable, en elementos rectos de intensidad constante, sumando los desplazamientos causados por cada uno de ellos. En el apéndice 1 se dan algunas soluciones básicas en deformación plana y tres dimensiones que se pueden usar para este fin.

ALGUNAS APLICACIONES

En este apartado se aplica el método propuesto a algunos problemas geotécnicos que tienen en común la evaluación de los desplazamientos del terreno causados por la extracción o inyección de material. Todos ellos se refieren a deformaciones sin drenaje, por lo que la aplicación se restringe a arcillas. En un apartado posterior se

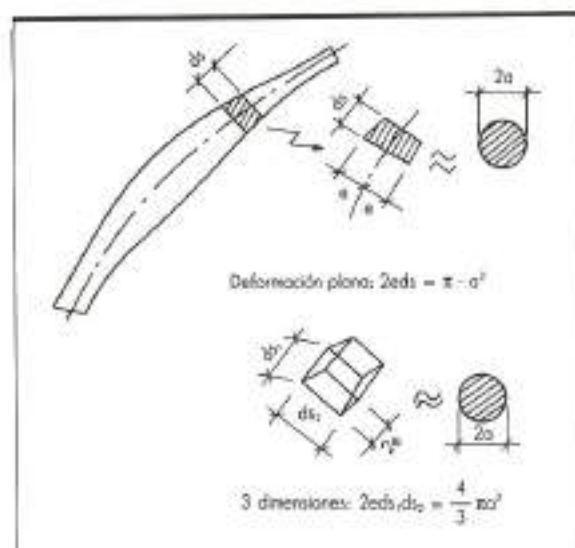


FIGURA 14. Pérdida de terreno distribuida. Método de integración.

indica la posibilidad de extensión a materiales compresibles.

EXTRACCION DE TABLESTACAS

La extracción de una tablestaca del terreno implica la creación de una cavidad formada por el hueco dejado por la tablestaca en sí y algo de suelo que sale adherido a ella. Esta cavidad colapsa de forma continuada bajo la punta de la tablestaca, a medida que ésta es extraída. El volumen de la tablestaca es pequeño, por lo que los desplazamientos del terreno resultantes son despreciables en la mayor parte de los casos, pero en ocasiones puede tener cierta importancia. Un buen ejemplo es la instalación de tuberías en zanjas, en las que la anchura de la zanja se reduce al mínimo, por lo que el tubo queda muy próximo a la tablestaca (Oteo, Sagaseta y Sánchez, 1985).

Este fenómeno puede modelarse adecuadamente como una pérdida de terreno distribuida a lo largo del eje de la tablestaca. La intensidad de la pérdida de terreno está definida por la anchura de la tablestaca más el espesor del suelo adherido. La aplicación de las soluciones presentadas es entonces directa.

El problema es en deformación plana. La integración de las ecuaciones (4) y (7) a la tablestaca (fig. 15) da:

$$S_x = -\frac{e}{\pi} \cdot \left[\theta_{12} + 2 \cdot x \cdot z \cdot \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \right]$$

$$S_z = \frac{e}{\pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{R^2} \right) - 2 \cdot z \cdot \left(\frac{z+H}{R_1^2} - \frac{z}{R^2} \right) \right] \quad (10)$$

donde

$$R = (x^2 + z^2)^{1/2}$$

$$R_1 = [x^2 + (z-H)^2]^{1/2}$$

$$R_2 = [x^2 + (z+H)^2]^{1/2}$$

$$\theta_{12} = \arctg \left(\frac{z+H}{x} \right) - \arctg \left(\frac{z-H}{x} \right)$$

y $2e$ es el espesor de la cavidad dejada por la tablestaca. El campo de desplazamientos resultante se muestra en la fig. 16. Para la superficie del terreno las ecuaciones (10) se reducen a

$$S_{x0} = -2 \cdot \frac{e}{\pi} \cdot \arctg \left(\frac{H}{x} \right)$$

$$S_{z0} = 2 \cdot \frac{e}{\pi} \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{H}{x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

HINCA DE PILOTES

El levantamiento del terreno causado por la hincada de pilotes es un fenómeno bien conocido. El proceso puede simularse mediante la inyección de material a lo largo del eje del pilote con una intensidad constante, definida por el radio del mismo (fig. 17). El análisis así planteado no tiene en cuenta el efecto de las fuerzas verticales ejercidas por el pilote, pero estas fuerzas son de naturaleza

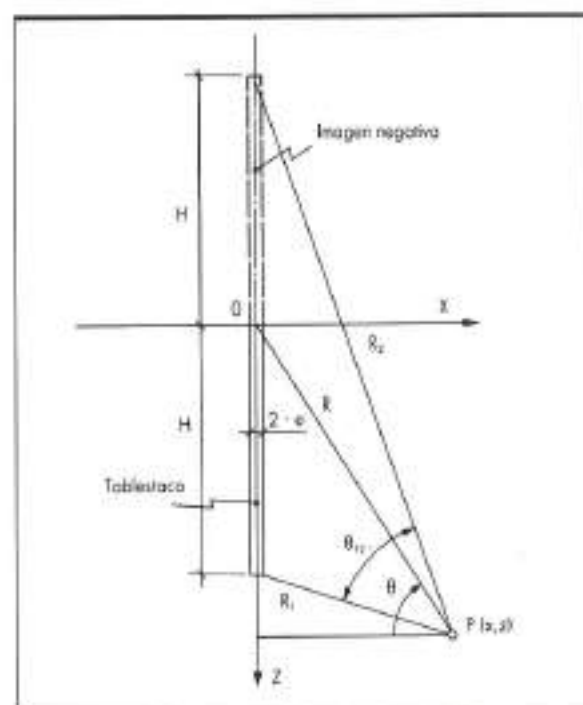


FIGURA 15. Extracción de tablestacas. Definición del problema.

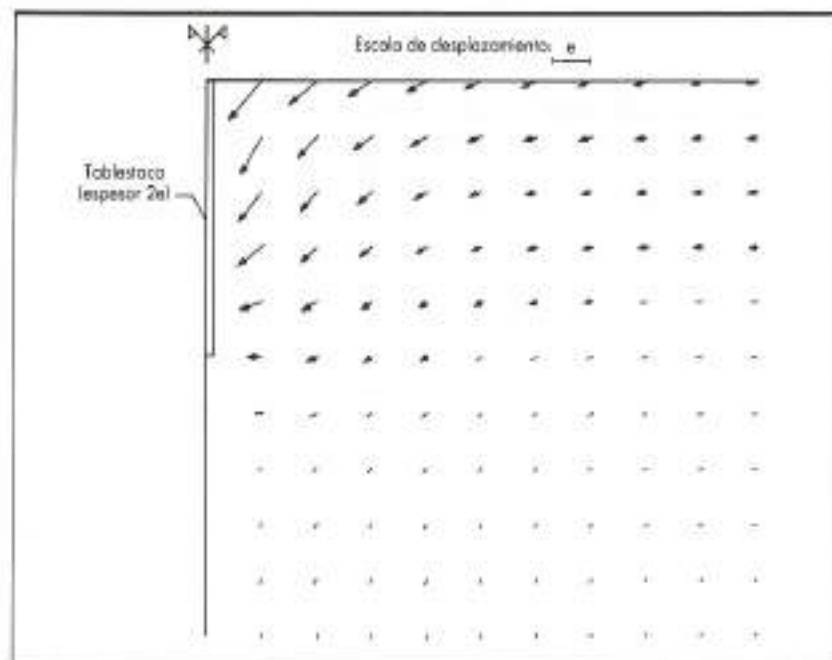


FIGURA 16. Extracción de tablones. Campo de desplazamientos.

transitoria, actuando sólo durante el impacto de la maza, y su efecto debe ser pequeño comparado con la deformación causada por el desplazamiento del terreno.

El problema posee simetría axial, por lo que deben usarse las ecuaciones (4) y (8). La integración se debe hacer numéricamente, o bien haciendo uso de las simplificaciones dadas en el apéndice 1 para este tipo de problemas. Sin embargo, el interés radica sobre todo en el levantamiento de la superficie del terreno, y para estos puntos se precisa sólo integrar la ecuación (9). El desplazamiento resultante para los puntos de la superficie es

$$S_{x0} = -\frac{2}{3} \cdot a^2 \cdot \frac{H}{x^2 \cdot (x^2 + H^2)^{1/2}} \quad (12)$$

$$S_{x0} = \frac{2}{3} \cdot a^2 \cdot \left[\frac{1}{x} - \frac{1}{(x^2 + H^2)^{1/2}} \right]$$

En la fig. 18 se representa el levantamiento de la superficie en forma adimensional.

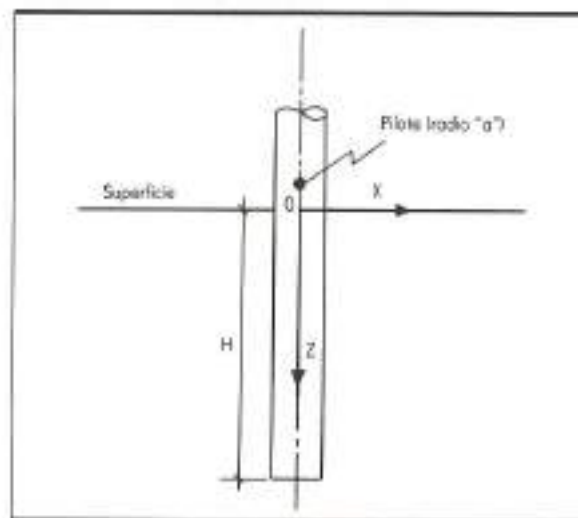


FIGURA 17. Hincado de pilotes. Definición del problema.

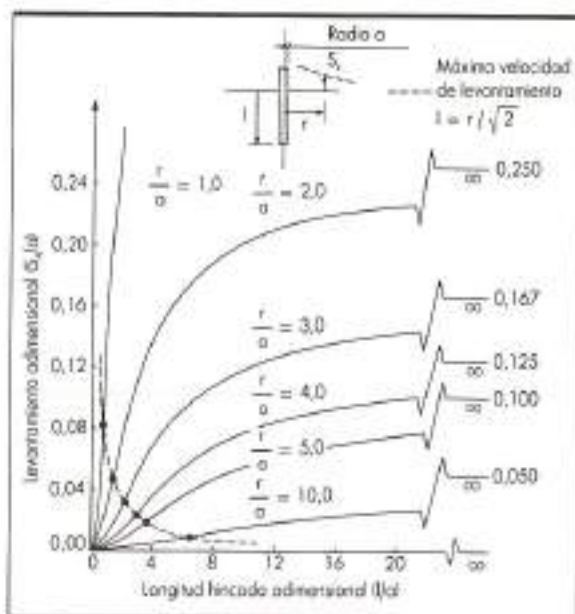


FIGURA 18. Hincado de pilotes. Levantamiento de la superficie.

TUNELES

El análisis de los movimientos del terreno debidos a la construcción de túneles es una de las aplicaciones más obvias del método presentado en este artículo.

El proceso consta de dos pasos diferentes: primeramente, las operaciones de excavación y revestimiento del túnel producen una cierta pérdida de terreno; en segundo lugar, esta pérdida de terreno causa la deformación del terreno circundante. Los intentos de predicción de movimientos del terreno en túneles tropiezan siempre con la dificultad asociada al primer paso, debido a la complejidad de los factores que intervienen: comportamiento tensión-deformación-resistencia-tiempo del suelo, naturaleza tridimensional del problema, modelación de detalles del proceso constructivo, etc. Como resultado, es práctica usual determinar la magnitud de la pérdida de terreno a partir de medidas directas en túneles o de correlaciones empíricas con otros parámetros, como el «factor de carga» (cociente entre la presión vertical efectiva y la resistencia al corte sin drenaje). En cualquier caso, la pérdida de terreno es una variable supuesta conocida, que se introduce después en un modelo tensodeformacional numérico (comúnmente de elementos finitos), con un modelo de comportamiento de suelo lineal o no-lineal.

Bajo estas condiciones, el método de análisis presentado en el artículo es aplicable. La pérdida de terreno (conocida) puede suponerse distribuida a lo largo del frente y periferia del túnel. Sin embargo, como primera aproximación y para un análisis general, la pérdida de terreno puede concentrarse en el eje del túnel (fig. 19). El mayor interés radica en los movimientos de la superficie del terreno, y para estos puntos los resultados son simples y fáciles de integrar, como ya se ha comentado. Los movimientos de la superficie son (fig. 20)

$$S_{xy} = -\frac{v}{2\pi} \cdot \frac{x}{x^2 + h^2} \cdot \left[1 + \frac{y}{(x^2 + y^2 + h^2)^{1/2}} \right]$$

$$S_{y0} = \frac{v}{2\pi} \cdot \frac{1}{(x^2 + y^2 + h^2)^{1/2}} \quad (13)$$

$$S_{x0} = \frac{v}{2\pi} \cdot \frac{h}{x^2 + h^2} \cdot \left[1 + \frac{y}{(x^2 + y^2 + h^2)^{1/2}} \right]$$

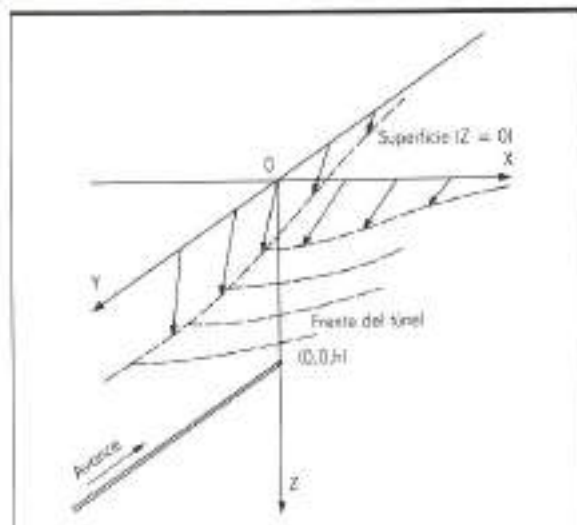


FIGURA 20. Avance de túnel puntual. Definición del problema.

A gran distancia del frente del túnel ($y \rightarrow \infty$) las condiciones son de deformación plana y los movimientos son

$$S_{xy}(y \rightarrow \infty) = -\frac{v}{\pi} \cdot \frac{x}{x^2 + h^2} \quad (14)$$

$$S_{y0}(y \rightarrow \infty) = \frac{v}{\pi} \cdot \frac{h}{x^2 + h^2}$$

El perfil transversal de movimientos superficiales se muestra en la fig. 21. Los asentamientos forman una campana centrada con el eje del túnel y con un punto de inflexión a una distancia horizontal $x = h/\sqrt{3}$. Los movimientos horizontales son nulos en el eje y máximos a una distancia $x = h$ del mismo. Los movimientos máximos horizontales y verticales son

$$S_{x0}(\text{máx}) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{v}{\pi} \cdot \frac{1}{h} \quad \text{para } x = h \quad (15)$$

$$S_{y0}(\text{máx}) = \frac{v}{\pi} \cdot \frac{1}{h} \quad \text{para } x = 0$$

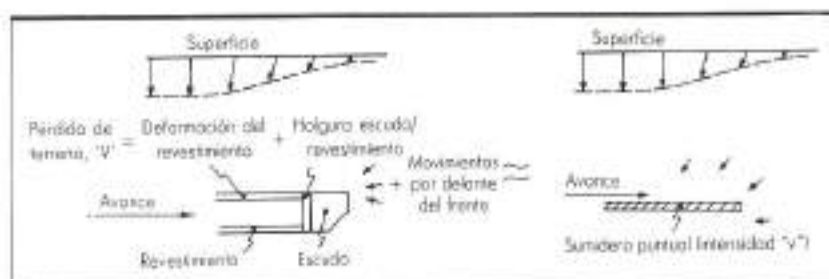
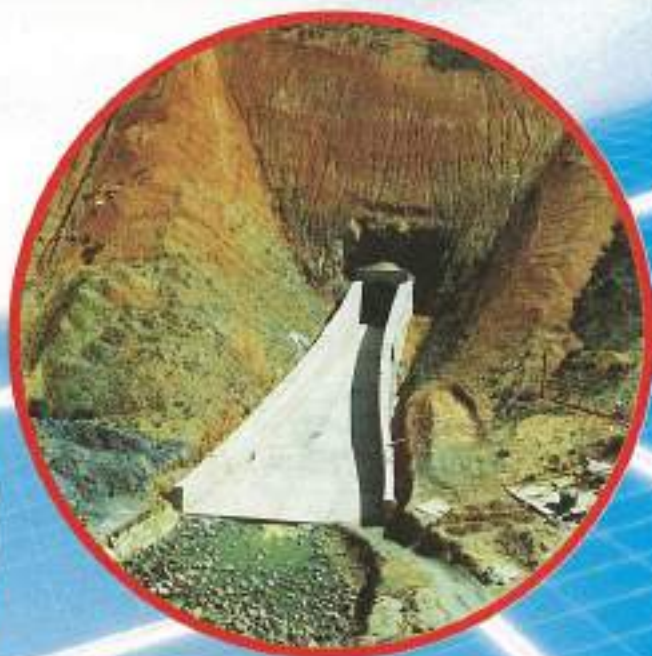


FIGURA 19. Pérdida de terreno en túneles. Sumidero puntual equivalente.



CENTRALES ELECTRICAS • AGRONOMIA • OBRAS HIDRAULICAS
• CARRETERAS • PUERTOS Y COSTAS • ARQUITECTURA Y URBANISMO
GEOLOGIA Y GEOTECNIA • MEDIO AMBIENTE • PLANTAS INDUSTRIALES



inypsa

INFORMES Y PROYECTOS, S.A.

INGENIEROS CONSULTORES

MADRID

General Diaz Portier, 49
Teléfono: (91) 402 45 92*
Télex: 42456 inyp E
28001 MADRID

BARCELONA

Gran Via de Carlos III, 124
Teléfono: (93) 205 08 62
Télex: 97809 inyp E
08034 BARCELONA



En la ejecución de obras o en los suministros a organismos oficiales.



En sus obligaciones ante las Autoridades Aduaneras.



Afianzamiento de los préstamos concedidos por Entidades financieras a particulares.

NO INMOVILICE sus recursos en avales y fianzas



En el afianzamiento de los anticipos para la venta de viviendas en construcción.



Solicite a

CREDITO Y CAUCION

Las garantías que precise
y reduzca sus costes

DIRECCION GENERAL: Raimundo Fernández Villaverde, 61 - 28003 MADRID - Teléfs. 253 68 00 y 253 87 04
DIRECCIONES REGIONALES: BARCELONA: Provenza, 216. BILBAO: Gran Vía, 53. LA CORUÑA: Real, 85. LAS PALMAS:
José Ramírez Betancourt, 23. SEVILLA: Pl. Nueva, 8-B. VALENCIA: Avda. Barón de Cárcer, 34. OVIEDO: Conde de Toreno, 4.
VALLADOLID: Duque de la Victoria, 4.
Sucursales, Delegaciones o Agencias en todas las capitales de provincia.

más de **50** años al servicio de las empresas

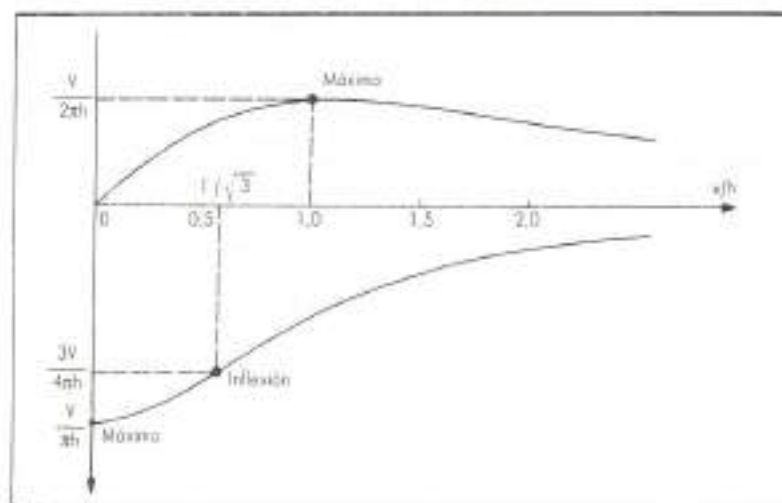


FIGURA 21. Túnel puntal. Desplazamientos finales de la superficie.

Existe una cantidad considerable de información publicada sobre medidas de movimientos del terreno sobre túneles. En lo que sigue, se analizan algunos ejemplos ilustrativos con el único fin de examinar la capacidad del método propuesto para reproducir las líneas generales observadas en casos reales.

Las ecuaciones (14) pueden usarse para el análisis de los movimientos finales de la superficie. La reducción de la sección transversal del túnel a un punto situado entre el eje y la clave parece razonable, si la relación profundidad/diámetro no es muy pequeña. La fig. 22 muestra los asientos finales medidos en una sección del Metro de Caracas en esquists meteorizados (Oteo y Sagaseta, 1982). El sumidero equivalente se puede considerar a una profundidad de unos 10 metros. La magnitud de la pérdida de terreno se elige de forma que se obtenga el m -

ximo asiento superficial medido de 7,5 mm. Los resultados de la ecuación (14) se representan en la fig. 22, junto con los obtenidos mediante un análisis convencional elástico lineal por elementos finitos, con un coeficiente de Poisson de 0,3. Como puede verse, la concordancia entre los movimientos medidos y calculados es buena, con una tendencia a sobreestimar los desplazamientos en zonas alejadas, debido a la hipótesis de incompresibilidad. La rápida disminución de los desplazamientos horizontales en el análisis por elementos finitos se debe al efecto del contorno lateral fijo horizontalmente, situado en $x = 30$ m.

El desarrollo de los movimientos de la superficie con el avance del túnel se puede analizar fácilmente por medio de las ecuaciones (13). En la fig. 23 se muestran los resultados obtenidos para un túnel excavado con escudo en arcilla plástica en San Francisco (Peck, 1969). El frente del túnel equivalente se ha situado en el centro de la zona ocupada por el escudo. La pérdida de terreno se ha ajustado con el asiento final.

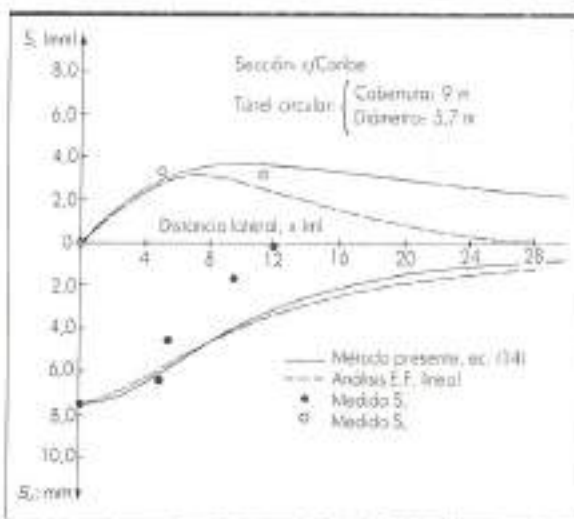


FIGURA 22. Metro de Caracas (Oteo y Sagaseta, 1982). Desplazamientos líneas superficiales medidos y calculados.

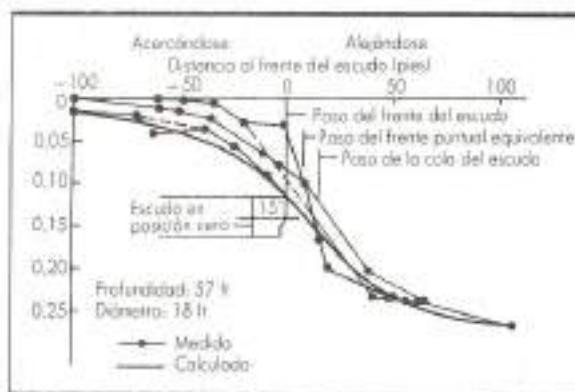


FIGURA 23. Túnel en arcilla plástica en San Francisco (Peck, 1969). Desarrollo de asientos de la superficie.

La información disponible acerca de movimientos en el interior del terreno no es tan abundante. Con respecto a la aplicación del método presente, las ecuaciones que dan los desplazamientos en el interior del suelo son mucho más complejas que para la superficie y, en casos tridimensionales, requieren integración numérica. Por otra parte, el efecto de la relajación de las tensiones tangenciales en la superficie es importante sólo en puntos a poca profundidad. Por estas razones, la solución «pavimentada» se supone razonablemente válida para los alrededores del túnel. Sin embargo, la reducción a un punto de la sección del túnel ya no es aceptable, por lo que la pérdida de terreno debe distribuirse a lo largo de la periferia del túnel. En los ejemplos que siguen, la pérdida de terreno se ha considerado variable linealmente a lo largo de la pared del túnel, desde un valor máximo en clave hasta anularse en solera. Esta distribución se ha simplificado dividiendo la pared del túnel en segmentos rectos de intensidad constante, usando las soluciones dadas en el apéndice 1. Los túneles circulares que se presentan a continuación se han discretizado en 16 elementos de este tipo.

La fig. 24 muestra los resultados para el mismo túnel de la fig. 22. Los desplazamientos verticales calculados se comparan con las medidas en tres extensómetros. Como puede verse, los rasgos generales de la distribución se reproducen bien, incluyendo la extensión de las zonas que sufren levantamiento.

El último ejemplo corresponde a un túnel experimental completamente instrumentado en Edmonton (Eisenstein, El-Nahhas y Thompson, 1981). Aquí la pérdida de terreno se ha elegido para ajustar el desplazamiento vertical de 30 mm de un punto situado algo por encima de la clave. La fig. 25 muestra las li-

neas de igual desplazamiento horizontal y vertical, medidos y calculados.

EXTENSIONES DEL METODO

El método y resultados presentados en este artículo cubren un amplio rango de problemas. Es posible extender su ámbito en cierta medida. En este apartado se indican las mejoras de incluir contornos rígidos y materiales compresibles.

CONTORNOS RIGIDOS

La existencia de un contorno rígido que limita la masa de suelo puede considerarse de forma análoga a la usada para la superficie libre. Las condiciones de contorno en la superficie libre son de tensión normal y tangencial nulas. En una pared rígida lubricada, las condiciones son de tensión tangencial y desplazamiento normal nulos (fig. 26). Esta condición es opuesta a la de superficie pavimentada comentada anteriormente, y se cumple exactamente añadiendo una imagen positiva del sumidero respecto a la pared rígida (fig. 26). Si la pared es rugosa, es decir, el desplazamiento paralelo a ella también está impedido, la dificultad aumenta, y se precisaría un método similar a la relajación de tensiones en la superficie.

Sin embargo, la acción conjunta de una pared rígida y la superficie libre trae consigo reflexiones múltiples. Por ejemplo, el caso usual de una base rocosa rígida produce una serie doblemente infinita de reflexiones (fig. 27). Es entonces necesario superponer un número infinito de fuentes y sumideros virtuales y el resultado deja de ser práctico. Por esta razón, se puede emplear un método más simple, ignorando la base rígida, evaluando los asientos a esta profundidad y restándolos de

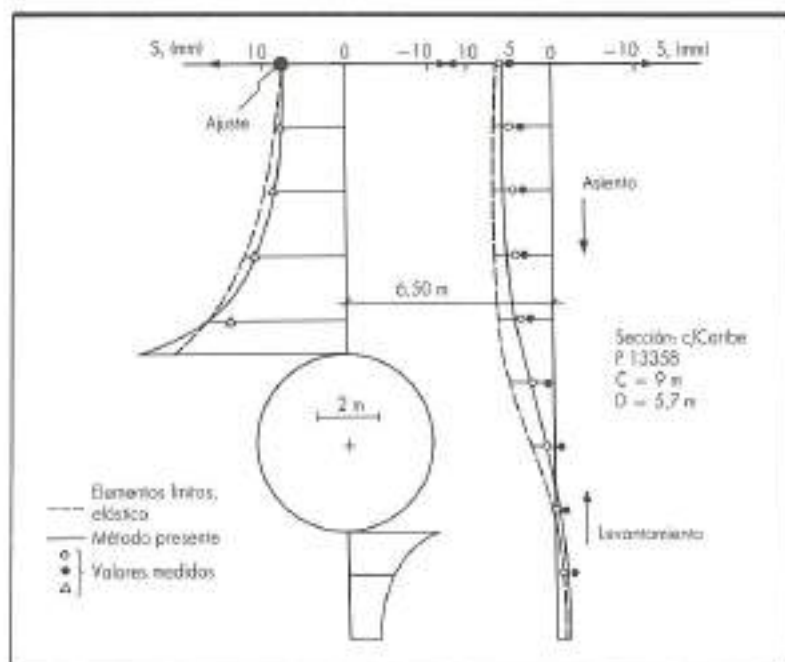


FIGURA 24. Metro de Caracas Iñero y Sagasta, 1982. Asientos del terreno alrededor del túnel medidos y calculados.

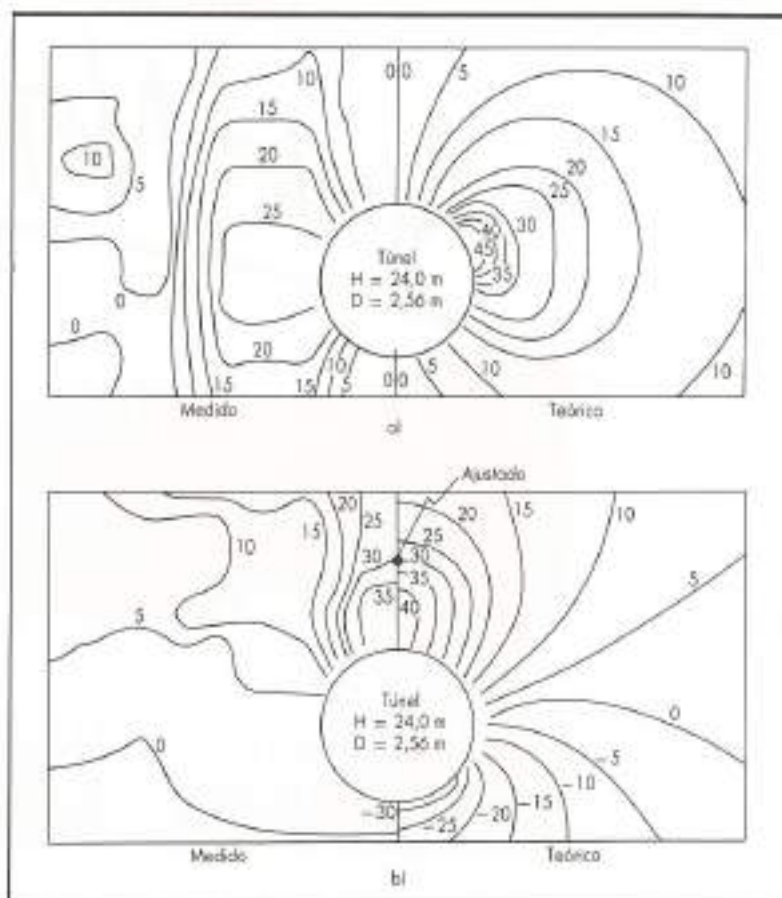


FIGURA 25. Túnel experimental, Edinon Eisenstein et al., 1981. a) Desplazamientos horizontales (mm); b) Desplazamientos verticales (mm).

los movimientos verticales de los puntos situados por encima

$$S_z(x, y, z) = S_{zi}(x, y, z) - S_{zi}(x, y, h_r) \quad (16)$$

donde el subíndice i indica movimientos calculados para el semiespacio infinito y h_r es la profundidad de la base rígida. Este es un método usual en la evaluación de asentamientos de cimentaciones.

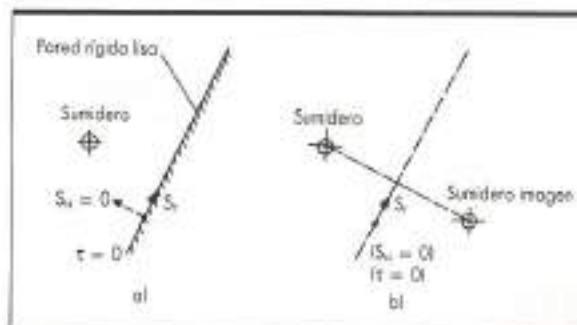


FIGURA 26. Simulación de contornos rígidos lubricados.

MATERIALES COMPRESIBLES

Toda la presentación anterior se refiere a materiales incompresibles, siendo la ecuación (1) la base de todo el desarrollo. Cuando se consideran deformaciones con drenaje, el método pierde su aplicabilidad. Sin embargo, el concepto fundamental puede mantenerse y obtenerse una solución aproximada.

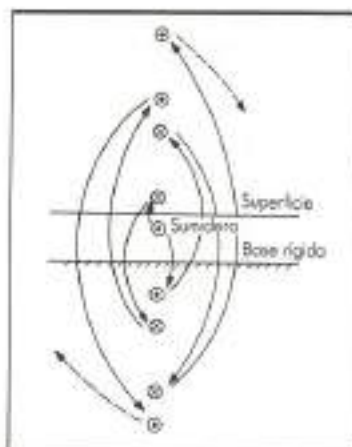


FIGURA 27. Reflexiones múltiples debidas a una base rígida y la superficie libre.

PLA DE SANEJAMENT DE CATALUNYA

OBJECTIU:

AIGÜES NETES



EL CONJUNTO DE LAS ACTUACIONES SUBVENCIONADAS SUPONE ENTRE COMPROMISOS Y GASTOS, MÁS DE 50.000 MILLONES DE PESETAS HASTA EL I.I.89

—ALGUNAS ACTUACIONES SUBVENCIONADAS—

ACTUACIONES ACABADAS

Depuradoras:

- VILADECANES I GAVÀ.
- CERVELLÀ.
- CERVERA.
- SOLSONA.
- MARTORELL.
- IGUALADA, ODENÀ, VILANOVA DEL CAPI I SANTA MARGARIDA DE MONTSUR.
- ORONDA, SALT I SARRÀ DE TER.
- MANRESA.
- SANT JOAN DE VILATORrada

Collectores:

- L'ESPENT.
- VILASAR DE MAR.
- VILASAR DE DALT, CABRILS I CARRERA.
- MANRESA.
- SANT JOAN DE VILATORrada.
- MARTORELL.
- IGUALADA, ODENÀ, VILANOVA DEL CAPI I SANTA MARGARIDA DE MONTSUR.
- ORONDA, SALT I SARRÀ DE TER.
- VIC.
- VILANOVA I LA GELTRÚ.
- COSTA DE GAVÀ.
- SANT FELIU DE LLOBREGAT.
- SANT SOVIADOCANS.
- CORNELLA-ELIOSTALLET.

- BANYOLES, CAMÓS, CORNELLA DE TERRA I FORQUERES.
- SABADELL.
- GRANOLLERS, CANDOLLES I LES FRANQUESES DEL VALLES.
- EL PRAT DE LLOBREGAT.
- CARRER TER, A BARCELONA.
- CARRER FONTE, A BARCELONA.

Emissaris submarines:

- EL VENDRELL I CALAFELL.
- EL MASNOU ALLELLA, TESA, PREMA DE MAR I PREMA DE DALT.

ACTUACIONES EN MARCHA

Depuradoras:

- MONTCADA.
- GUISONA.
- SANT FELIU DE LLOBREGAT.
- VIC.
- BARCELONABUSCA, AMPLIACIÓ.
- PREVENIENDO EL PASADU ALLELLA, TESA, PREMA DE MAR I PREMA DE DALT.
- BILGUES I BELL.

Collectores:

- ARENYS DE MAR, ARENYS DE MAR I CANET DE MAR.
- EL MASNOU ALLELLA, TESA, PREMA DE MAR I PREMA DE DALT.
- SANT CUGAT DEL VALLES.
- Cerdanyola del Valles I MONTCADA I REINAC.

- LA LLANOSA, MOLLET DEL VALLES, MARTORELLS, SANT FOST DE CAMPSENTLES, POLINYA I SANTA ROSETA DE LA MORDA.
- MOHONNES DEL VALLES.
- LUGA DE VAL, LUGA DE MUNT, PIRETS DEL VALLES, GRANOLLERS, MONTELO, VILANOVA DEL VALLES I MOLLET DEL VALLES.

EXPLORACIONES

Depuradoras:

- TERRASSA.
- SABADELL I SANT QUIRZE DEL VALLES.
- LLEDA.
- GIRONA.
- SANT CUPENT DE LLOBREGAT.
- COSTA BARCELONA.
- VILADECANES I GAVÀ.
- CASTELLER.
- MOLLET DEL MAR, SANT FELIU DE LLOBREGAT, SANT JUST DESVERN, EL PRAT, MALUJA I SANT VICENÇ DELS FORTS.
- CASTELLER DEL VALLES, SANT ANDREU.
- REBA BLANCA, A BARCELONA.
- ARANDEU TORRES, A L'HOSPITALET.
- SALMORRES.
- RUBI I SANT CUGAT.
- CASTELLER DEL VALLES.
- LA GARROSA.
- SANT CECILI.

Emissaris submarines:

- ARENYS DE MAR, ARENYS DE MAR I CANET DE MAR.
- SALON.

EXPLORACIONES

Depuradoras:

- CERVERA.
- PATAJO.
- STUEL.
- MACANET DE LA SEIGRA.
- CORBERA DE LLOBREGAT.
- VILANOVA.
- EL VENDRELL.
- VILAFRANCA DEL PRIEDS.
- REUS.
- IGUALADA, ODENÀ, VILANOVA DEL CAPI I SANTA MARGARIDA DE MONTSUR.
- MARTORELL.
- PINEDA, CAUILLA, SANTA SUSANNA, MALGRAT DE MAR I PALAFOLLS.
- GAVÀ-VILADECANES.
- ORONDA, SALT I SARRÀ DE TER.
- MANRESA.
- SANT JOAN DE VILATORrada.
- BESOS-ROGERS, BARCELONA.

Emissaris submarines:

- ORIXELL.
- EL MASNOU.
- PATAJO.
- EL VENDRELL.
- VILANOVA I LA GELTRÚ.
- PINEDA, CAUILLA, SANTA SUSANNA, MALGRAT DE MAR I PALAFOLLS.



Consideremos el caso básico de la fig. 7. Para materiales incompresibles, la condición de deformación volumétrica nula conduce a una disminución del desplazamiento radial con el inverso de la distancia radial en deformación plana y con el de su cuadrado en tres dimensiones (ec. 2). Para un suelo elástico lineal compresible, se demuestra fácilmente que se llega al mismo resultado para cualquier valor del coeficiente de Poisson. Por ello, la solución dada por la ecuación (2) es válida incluso para deformación drenada de un suelo elástico. Sin embargo, en las cercanías del sumidero tendrán lugar deformaciones plásticas. Estas implican un cierto cambio de volumen, con lo que la variación del desplazamiento radial con la distancia seguirá una de las pautas indicadas en las figs. 28 y 29, en función del comportamiento dilatante del suelo. El efecto de la dilatación consiste en aumentar el gradiente radial de los desplazamientos para materiales contractantes (flojos) y disminuirlo para materiales dilatantes (densos). Este efecto se invierte si se considera una fuente en lugar de un sumidero, porque la dilatación del suelo no depende del signo de las distorsiones.

Algunos estudios sobre las deformaciones alrededor de cavidades en expansión en materiales granulares (Hughes, Wroth y Windle, 1977; Carter, Booker y Yeung, 1986) muestran que las curvas de las figs. 28 y 29 pueden describirse por la ecuación general

$$S_r(r) = k \cdot \frac{\alpha}{n} \cdot \left(\frac{a}{r}\right)^n \quad (17)$$

El exponente α tiene los valores siguientes: en la zona elástica o para materiales incompresibles

$$\alpha = n - 1$$

en la zona plástica para materiales compresibles

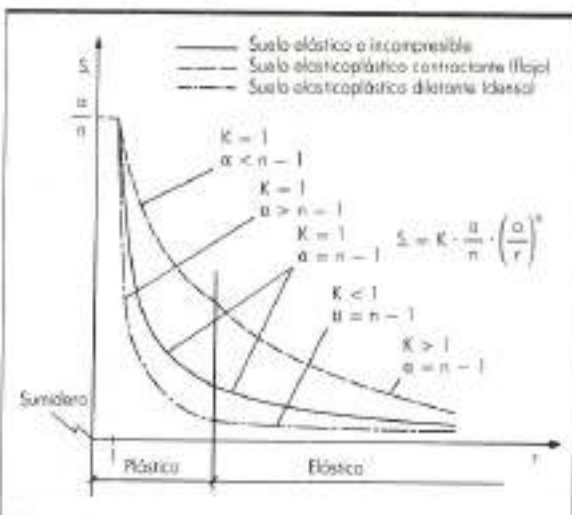


FIGURA 28. Sumidero puntual en suelo compresible: pautas de distribución de desplazamientos.

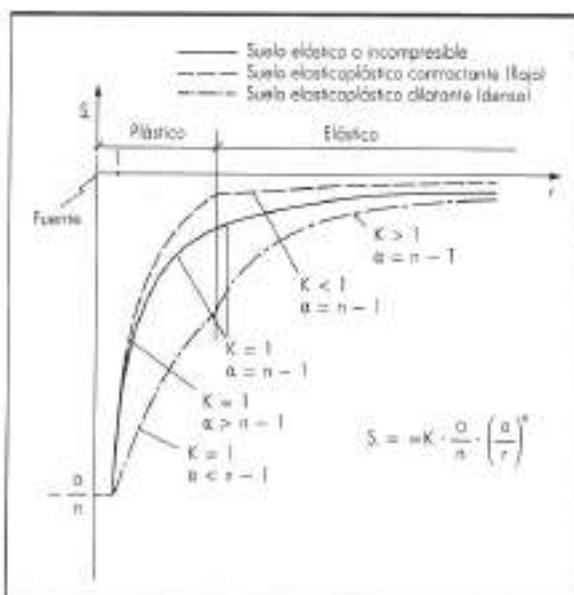


FIGURA 29. Fuente puntual en suelo compresible: pautas de distribución de desplazamientos.

$$\alpha = \frac{n - 1}{\alpha_n}$$

para un sumidero en suelo denso (dilatante) o una fuente en un suelo flojo (contractante) o

$$\alpha = (n - 1) \cdot \alpha_n$$

para un sumidero en un suelo flojo o una fuente en un suelo denso, donde

$$\alpha_n = \frac{1 - \sin \nu}{1 + \sin \nu}$$

y donde ν es el ángulo de dilatación del suelo.

El factor k se aplica sólo a la parte elástica de las curvas de las figs. 28 y 29. En consecuencia, para aplicaciones prácticas, la ecuación (2) puede sustituirse por la ecuación (17), dejando libres los parámetros k y α dentro de los rangos señalados.

La condición de incompresibilidad se empleó también en el razonamiento referente a los movimientos de la superficie. Para un suelo incompresible, la evaluación de las tensiones de la superficie y su relajación posterior podrían obviarse si únicamente se deseaban los movimientos de la superficie. Esto ya no es válido para materiales compresibles, pero, nuevamente desde un punto de vista ingenieril, puede suponerse que se sigue cumpliendo con aproximación razonable.

CONCLUSIONES

Se ha presentado un nuevo método para la determinación de los campos de deformaciones en materiales in-

compresibles debidas a pérdida (o ganancia) de terreno cerca de la superficie. Se han obtenido algunas soluciones analíticas tomando como base la condición de incompresibilidad y usando una técnica de imágenes virtuales.

Para la determinación de los movimientos de la superficie, se encuentra que el efecto de ésta puede simularse exactamente multiplicando por 2 los movimientos calculados para un medio infinito. Esto lleva a resultados simples, permitiendo integración analítica incluso en casos tridimensionales. La distribución de movimientos interiores es más compleja y en casos tridimensionales requiere integración numérica.

La aplicación del método a varios problemas geotécnicos muestra que los resultados reproducen bastante bien las líneas generales observadas de la distribución de movimientos, con una precisión similar a la conseguida con más sofisticados y costosos métodos numéricos de análisis.

Como conclusión de carácter general, se ha probado que en problemas D-D (es decir, cuando se imponen desplazamientos en algunos puntos y sólo se desea el campo de deformaciones) la condición de incompresibilidad transmite la mayor parte de la información y por tanto, si las restantes condiciones de contorno pueden simplificarse de forma que dicha ecuación se pueda integrar, la solución obtenida se aproxima mucho a la exacta. Incluso en materiales compresibles, la hipótesis de un valor conocido para la deformación volumétrica lleva a soluciones válidas.

Como resultado práctico, se han dado algunas expresiones simples para los movimientos superficiales debidos a excavación de túneles o línea de pilotes, que pueden usarse para casos reales con razonable confianza y con una base racional.

AGRADECIMIENTOS

Las ideas básicas que sustentan el artículo surgieron como resultado de los trabajos del autor en problemas de expansión de cavidades y penetración, en una Acción Integrada entre la Universidad de Cantabria y el Department of Engineering Science de la Universidad de Oxford. Especialmente valiosos fueron los comentarios y críticas del Prof. C. P. Wroth y el Dr. G. T. Houlsby. La posibilidad de aplicación a problemas prácticos nació de un trabajo para el Consorcio de Aguas de Bilbao, que proporcionó la oportunidad de estudiar un problema para el que los métodos convencionales de análisis no eran adecuados y requería el desarrollo de nuevos métodos.

REFERENCIAS

- BALIGH, M. M. (1985). «Strain path methods». *J. Geot. Engg., A.S.C.E.* 111:9, 1108-1136.
 BISHOP, R. F.; HILL, R. y MOTT, N. F. (1945). «Theory of indentation and hardness tests». *Proc. Phys. Soc.* 57:3, 147.
 CARTER, J. P.; BOOKER, J. R. y YEUNG, S. K. (1986). «Cavity expansion in cohesive frictional soils». *Geotechnique* 36:3, 349-358.
 CARTER, J. P.; RANDOLPH, M. F. y WROTH, C. P. (1979). «Stress and pore pressure changes in clay during and after ex-

pansion of a cylindrical cavity». *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.* 3:4, 305-322.

DAVIS, R. O.; SCOTT, R. F. y MULLENGER, G. (1984). «Rapid expansion of a cylindrical cavity in a rate-type soil». *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.* 8:2, 125-140.

EISENSTEIN, Z.; EL-NAHHAS, F. y THOMPSON, S. (1981). «Strain field around a tunnel in stiff soils». *Proc. Xth. Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Stockholm*, 1, 283-288.

GIBSON, R. E. y ANDERSON, W. F. (1961). «In situ measurement of soil properties with the pressuremeter». *Civ. Engg. Pub. Works. Rev.* 56, 615.

HUGHES, J. M. O.; WROTH, C. P. y WINDLE, D. (1977). «Pressuremeter tests in sands». *Geotechnique* 27:4, 455-477.

OTEO, C. S. y SAGASETA, C. (1982). «Prediction of settlements due to underground openings». *Int. Symp. Num. Model. Geom., Zurich*, 1, 653-659.

OTEO, C. S.; SAGASETA, C. y SANCHEZ, J. M. (1985). «Informe sobre los asentamientos de colectores en suelos blandos». Consorcio para el Abastecimiento de Aguas y Saneamiento de la Comarca del Gran Bilbao. Informe no publicado.

PALMER, A. C. (1972). «Undrained plane strain expansion of a cylindrical cavity in clay. A simple interpretation of the pressuremeter test». *Geotechnique* 22:3, 451-457.

PECK, R. B. (1969). «Deep excavations and tunnelling in soft grounds». *Proc. VIIth. Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Mexico*. State-of-the-Art Report, 4, 225-290.

SAGASETA, C.; HOULSBY, G. T.; NORBURY, J. y WHEELER, A. A. (1984). «Quasi-static undrained expansion of a cylindrical cavity in clay in the presence of shaft friction and anisotropic initial stresses». *Oxford Univ. Engg. Lab. Report*.

SELVADURAI, A. P. S. (1979). «Elastic analysis of soil-foundation interactions». Elsevier, Amsterdam.

SELVADURAI, A. P. S. (1984). «Large strain and dilatancy effects in pressuremeters». *J. Geot. Engg., A.S.C.E.* 110:3, 421-436.

SOKOLOWSKII, V. V. (1960). «Statics of soil media». Butterworths, London.

TUMAY, M. T.; ACAR, Y. B.; CEKIRGE, M. H. y RAMESH, N. (1985). «Flow field around cones in steady penetrations». *J. Geot. Engg., A.S.C.E.* 111:2, 193-204.

VESIC, A. S. (1972). «Expansion of cavities in infinite soil mass». *J. Soil. Mech. Found. Div., A.S.C.E.* 98:SM3, 265-290.

APENDICE 1

ALGUNAS SOLUCIONES BASICAS

Como se muestra en el texto, los desplazamientos asociados con una pérdida de terreno pueden considerarse como suma de tres términos

- Desplazamientos en un medio infinito.
- Fuentes o sumideros imagen.
- Relajación de tensiones superficiales.

La superficie libre se ignora en a) y b). La solución básica para un sumidero puntual en un medio infinito (ec. 3) se puede integrar a segmentos rectos de línea o superficie de intensidad constante, los cuales a su vez pueden usarse para discretización de pérdidas de terreno distribuidas a lo largo de líneas o superficies irregulares.

En este apéndice se dan algunos resultados de la integración de un sumidero puntual a lo largo de segmen-

tos de línea o superficie en un medio infinito. En todos los casos, los resultados se dan en coordenadas locales, con el origen en el punto medio del segmento.

SEGMENTO LINEAL EN DEFORMACIÓN PLANA

(Ver fig. 30)

$$S_x = -\frac{e}{\pi} \cdot \theta_{12} \quad (18)$$

$$S_z = \frac{e}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right)$$

donde

$$\theta_{12} = \arctg \left(\frac{z+L}{x} \right) - \arctg \left(\frac{z-L}{x} \right)$$

$$R_1 = [x^2 + (z-L)^2]^{1/2}$$

$$R_2 = [x^2 + (z+L)^2]^{1/2}$$

SEGMENTO LINEAL EN TRES DIMENSIONES

(Ver fig. 31)

$$S_x = -\frac{e^2}{4} \cdot \frac{1}{x} \cdot \left(\frac{z+L}{R_2} - \frac{z-L}{R_1} \right) \quad (19)$$

$$S_z = -\frac{e^2}{4} \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

donde

$$R_1 = [x^2 + (z-L)^2]^{1/2}$$

$$R_2 = [x^2 + (z+L)^2]^{1/2}$$

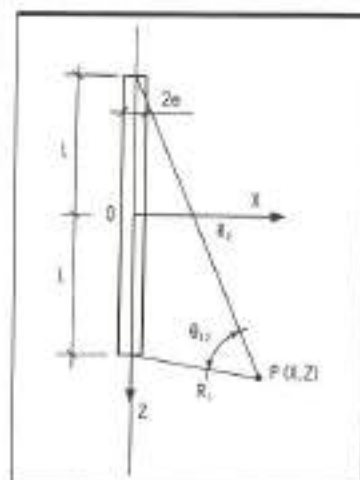


FIGURA 30. Segmento lineal en deformación plana. Medio infinito.

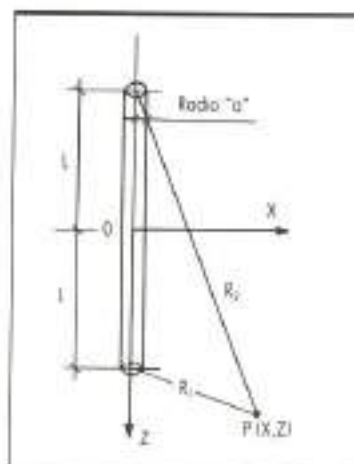


FIGURA 31. Segmento lineal en tres dimensiones. Medio infinito.

SEGMENTO PLANO EN TRES DIMENSIONES

(Ver fig. 32)

$$S_x = -\frac{e}{4\pi^2} \cdot \left\{ \arctg \left[\frac{(y+a)(z+b)}{xR_{12}} \right] - \arctg \left[\frac{(y-a)(z+b)}{xR_{12}} \right] - \arctg \left[\frac{(y+a)(z-b)}{xR_{21}} \right] - \arctg \left[\frac{(y-a)(z-b)}{xR_{21}} \right] \right\} \quad (20)$$

$$S_y = -\frac{e}{8\pi^2} \cdot \ln \left[\frac{(R_{22} - z - b)(R_{21} + z - b)}{(R_{22} + z + b)(R_{21} - z + b)} \cdot \frac{(R_{12} - z - b)(R_{11} + z - b)}{(R_{12} + z + b)(R_{11} - z + b)} \right]$$

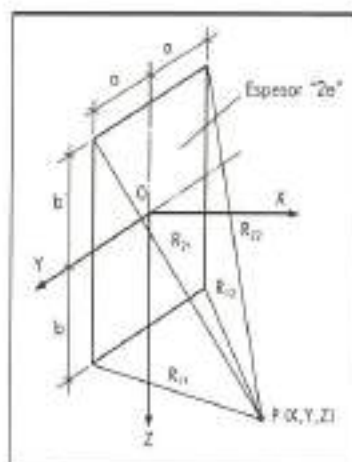


FIGURA 32. Segmento de plano en tres dimensiones. Medio infinito.

$$S_z = -\frac{e}{8\pi^2} \cdot \ln \left[\frac{(R_{22} - y - a)(R_{12} + y - a)}{(R_{22} + y + a)(R_{12} - y + a)} \cdot \frac{(R_{21} - y - a)(R_{11} + y - a)}{(R_{21} + y + a)(R_{11} - y + a)} \right]$$

donde

$$R_{11} = [x^2 + (y - a)^2 + (z - b)^2]^{1/2}$$

$$R_{12} = [x^2 + (y - a)^2 + (z + b)^2]^{1/2}$$

$$R_{21} = [x^2 + (y + a)^2 + (z - b)^2]^{1/2}$$

$$R_{22} = [x^2 + (y + a)^2 + (z + b)^2]^{1/2}$$

Con respecto a los desplazamientos causados por la eliminación de las tensiones tangenciales de la superficie, dados por las ecuaciones (7) y (8), las expresiones no son fáciles de integrar. Para aplicaciones prácticas, la pérdida de terreno distribuida puede concentrarse en un número finito de puntos a lo largo del segmento, y después añadir el resultado de aplicar las ecuaciones (7) u (8) a cada uno de ellos. El error asociado con esta simplificación es pequeño, pues la distribución de tensiones superficiales no es muy sensible a la distribución de pérdida de terreno a lo largo del segmento.

Ampliamos nuestros horizontes



La conducción de fluidos plantea cada día mayores exigencias de calidad y variedad de productos. Nuestra experiencia en este campo nos ha llevado a crear una infraestructura capaz de dar respuesta a las necesidades del Mercado, tanto presentes como futuras.

Con nuestra tecnología y nuestros productos de fibrocemento, de PVC y de polietileno hemos estado siempre en primera línea. Ahora, además, ofrecemos nuestras tuberías de **HORMIGÓN REFORZADO CON CAMISA DE CHAPA**, con la tecnología más avanzada y reconocida de **TUBOS BONNA**.

Cuando de conducir fluidos se trate, cuente con verdaderos especialistas, cuente con **FIBROTUBO**.

FIBROTUBO

CADAGUA.
TENEMOS LA FORMULA.

H₂O



Estación de Tratamiento de Verta Alta (Bilbao).

Agua sana, clara. Limpia. Para cualquier necesidad que tenga: agua para abastecimiento, agua para procesos industriales, depuración de aguas residuales, desalación de aguas salobres o de mar, sea cual sea su problema, Cadagua tiene la fórmula: H₂O, el agua.



cadagua, s.a.