

LA DEFORMABILIDAD DEL SUELO "IN SITU" UN METODO PARA LA INTERPRETACION CONJUNTA DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO Y DE CAMPO

F. J. GOMEZ PUYUELO

F. J. ANDREU

y

J. DE LA GANDARA

Ing. C. C. y P. - EPTISA

Madrid, España

RESUMEN

Los ensayos de laboratorio y de campo que permiten evaluar la deformabilidad del terreno conducen generalmente a resultados poco acordes entre sí. La interpretación conjunta de los resultados de ambos tipos de ensayos es un procedimiento habitual para el establecimiento de leyes constitutivas tensión-deformación del suelo "in situ", con validez para estados tensionales variables dentro de límites determinados. El ensayo "in situ" estudiado en este caso (placa de carga) se reproduce de forma numérica utilizando un modelo de cálculo capaz de admitir la ley constitutiva establecida en el laboratorio (modelo hiperbólico) y, posteriormente, se comparan sus resultados con los del ensayo real.

Para simular el ensayo de carga se ha desarrollado un modelo simplificado que permite tener en cuenta la respuesta heterogénea del suelo debida a la existencia de presiones de confinamiento variables y la no linealidad entre tensiones y deformaciones para un confinamiento dado. El modelo simplificado se ha desarrollado en lenguaje FORTRAN ("PLACAR"), consiguiéndose un programa de utilización sencilla y coste reducido. Los resultados se han contrastado con un modelo de elementos finitos.

Finalmente, se incluyen dos ejemplos de aplicación práctica. En el primero la interpretación conjunta resulta eficaz y se analiza la extrapolación de los resultados a las dimensiones de las cimentaciones reales. En cambio, en el segundo ejemplo la interpretación no tiene utilidad práctica.

SUMMARY

Field and laboratory deformability testing often lead to different results. It is a common practice, then, to understand them as a whole to state the constitutive stress-strain law of the "in situ" soil, suitable for a range of stresses.

The field test studied here (bearing plate) is simulated by a numerical model in conjunction with the constitutive law stated in the laboratory (hyperbolic model), doing a final comparison with the actual field test.

A simplified (numerical) Model has been developed to perform the simulation, taking into account the non-homogeneous response of the soil due to the variable confining pressure and the non-linear stress-strain law. The Simplified Model has been developed in a FORTRAN program ("PLACAR") getting this way a cheap and easy to use tool. Results are checked versus a FEM model.

Finally two examples of practical application are included. First of them appears to be successful and a extrapolation of its results to actual foundation size is made. On the contrary, second example is unsuccessful and no practical application is found.

INTRODUCCION

Los ensayos de laboratorio y de campo que permiten evaluar la deformabilidad del terreno conducen generalmente a resultados poco acordes entre sí. La diferencia es menor cuando disminuye la resistencia del suelo aunque, en cualquier caso, el valor del módulo de deformación obtenido "in situ" suele estar comprendido entre 2 y 13 veces el laboratorio (Burland³, Fedá¹⁰). En las margas azules de Sevilla y las arcillas rojas barcelonesas se ha encontrado que la relación entre los valores de ambos módulos es del orden de 10 (Jiménez Salas¹³, Alonso¹).

Considerando un ensayo determinado, tanto "in situ" como de laboratorio, los valores del módulo de deformación presentan coeficientes de variación intrínsecos del ensayo comprendidos entre 15% y 45%, según los resultados de diversos autores recopilados por Fedá¹⁰. Dichos coeficientes no explican en absoluto las diferencias anteriormente apuntadas, que deben atribuirse entre otros a los siguientes factores:

- Perturbación de las muestras
- Tamaño de las probetas (en suelo con gruesos)
- Distintas tensiones inicialés y trayectorias de tensiones en los ensayos de laboratorio e "in situ".
- Aparición de zonas plastificadas en el terreno durante la ejecución de los ensayos "in situ".
- Métodos de interpretación de los ensayos.

En el laboratorio es posible controlar algunas de las variables que influyen en la deformabilidad del suelo y la información que se obtiene es más completa. Sin embargo, únicamente los ensayos "in situ" pueden ofrecer garantías respecto al carácter inalterado del terreno ensayado. Por estos motivos es frecuente efectuar ambos tipos de ensayos durante una misma investigación geotécnica.

La interpretación conjunta de los resultados obtenidos en el laboratorio y en el campo es un procedimiento eficaz para el establecimiento de leyes constitutivas tensión-deformación del suelo en su estado natural, con validez para estados tensionales variables dentro de límites determinados.

La interpretación que se propone obedece al proceso siguiente:

- a) Obtención de la ley constitutiva tensión-deformación del suelo mediante ensayos de laboratorio.
- b) Simulación numérica del ensayo "in situ" utilizando un modelo de cálculo capaz de admitir la ley constitutiva anteriormente obtenida.
- c) Comparación de los resultados del ensayo simulado y el real. Obtención de una ley constitutiva *corregida* atribuible al terreno "in situ".

A continuación se describe cada uno de los pasos del proceso y, posteriormente, se incluyen dos ejemplos de aplicación práctica. En el primero la interpretación conjunta resulta eficaz y se analiza la extrapolación de los resultados a las dimensiones de la cimentaciones reales. En cambio, en el segundo ejemplo la interpretación no tiene utilidad práctica.

OBTENCION DE LA LEY CONSTITUTIVA TENSION-DEFORMACION MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO

Para la obtención de la deformabilidad del suelo a largo plazo (con drenaje) los ensayos de laboratorio usuales son el edométrico y el triaxial CD. Para el análisis a corto plazo

(sin drenaje) suelen realizarse ensayos triaxiales CU.

Un modelo capaz de reproducir aproximadamente las relaciones tensión-deformación obtenidas en los ensayos de compresión triaxial es el hiperbólico (Kodner y Zelasko¹⁵, Duncan y Chang⁹). Para cada estado de confinamiento efectivo inicial (σ'_3) la ley tensión-deformación queda representada por la expresión:

$$E_t = E_i \left[1 - \frac{R_f(1-\text{sen}\varphi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos\varphi + 2 \sigma_3 \text{sen}\varphi} \right]^2$$

E_t : módulo de deformación tangente a la hipérbola.

E_i : módulo tangente inicial [$(\sigma_1 - \sigma_3) \cong 0$]. Es función del confinamiento efectivo inicial y obedece a la expresión $E_i = K P_a (\sigma'_3/P_a)^n$, siendo K y n parámetros del modelo y P_a la presión atmosférica, que juega un papel puramente dimensional.

$\sigma_1 - \sigma_3$: Tensión desviadora.

c y φ : parámetros de resistencia intrínseca.

R_f : factor de rotura. Es la relación entre el desviador en rotura (máximo alcanzado durante el ensayo) y el desviador último (ordenada de la asíntota de la hipérbola de ajuste).

Este modelo puede obtenerse también a partir de los resultados de ensayos edométricos (Wong y Duncan²⁰).

La ley hiperbólica adoptada tiene en cuenta la respuesta heterogénea del suelo debida a las distintas presiones de confinamiento y la no linealidad tensión-deformación para un confinamiento dado. Sin embargo, no ofrece la posibilidad de considerar la anisotropía.

SIMULACION DEL ENSAYO "IN SITU"

Modelo simplificado

El ensayo "in situ" considerado es la prueba de carga con placa. Su reproducción numérica con un modelo de cálculo se ha efectuado desde el punto de vista de obtener un método fácil de utilizar y de bajo coste.

En definitiva se trata de reproducir un proceso de carga en un terreno cuya ley constitutiva sea no lineal.

Para ello el terreno y la carga en superficie se dividen respectivamente en un cierto número de capas e incrementos. Se hace la hipótesis de que el módulo de deformación del terreno en cada capa y para cada incremento es constante.

En cada estado de carga y a la profundidad deseada se determinan las tensiones con las soluciones del semiespacio elástico, homogéneo e isótropo, suponiendo la placa de ensayo flexible y lisa.

El estado inicial de tensiones corresponde al geoestático, determinado a partir del peso propio y coeficiente de empuje al reposo del terreno.

Para cada capa, definida por su profundidad e incremento de carga en superficie, se obtiene el módulo de deformación correspondiente a su estado tensional.

Posteriormente se calcula la deformación de dicha capa con la solución de Steinbrenner para el movimiento vertical de un punto situado en el interior del semiespacio.

El sumatorio de los acortamientos de cada una de las capas consideradas, dentro de una cierta profundidad, permite obtener el incremento de asiento correspondiente al escalón de carga en cuestión.

Por último, el valor del asiento de la placa, para un cierto valor de la carga en superficie, corresponderá a la suma de los incrementos de asiento producidos por cada escalón de carga en que aquella se haya subdividido.

El nivel de tensiones y su módulo de deformación asociado, anteriormente referidos, corresponden al punto medio de cada capa o incremento de carga.

Los asientos se calculan en la vertical del centro del área cargada.

El método operativo se ha desarrollado en lenguaje Fortran bajo el nombre de "Placar". Este programa consume tan sólo 2 s de C.P.U. (IBM 4341) y tiene una entrada de datos muy sencilla. Con algunas modificaciones se ha introducido en una calculadora de bolsillo, tipo Texas TI-59 ó HP-41 C.

Puede decirse que las simplificaciones introducidas son usuales en el cálculo de asientos. Los errores en la distribución tensional no son importantes, especialmente en las tensiones verticales, y su influencia en el asiento es relativamente pequeña (Feda¹⁰).

Así, cuando se considera la variación del módulo de deformación con el confinamiento tensional del terreno, los asientos resultan 3 veces inferiores a los obtenidos en el semiespacio de Boussinesq, mientras que en cuanto a tensiones verticales las diferencias son sólo de un 30%. (Huang¹²).

Como se comentará posteriormente, al tener en cuenta la heterogeneidad del suelo y la no linealidad entre tensiones y deformaciones, los asientos pueden ser aún menores que los indicados anteriormente, obteniéndose sin embargo distribuciones tensionales muy similares a las soluciones Schiffman y Aggarwala¹⁸ en el semiespacio de Boussinesq. (Figs. 4 y 5).

Comparación con el método de los elementos finitos

Para contrastar la exactitud del método simplificado propuesto se ha efectuado su comprobación siguiendo exactamente los mismos pasos pero con el método de los elementos finitos, el cual se toma como referencia para la comparación del método.

Se ha empleado el programa ASHD2 (Gosh y Wilson¹¹), axilimétrico y lineal. Asimismo se desarrolló un programa auxiliar, MHIIPER, para obtener los módulos de deformación de cada elemento en función de su estado tensional.

La malla utilizada (Fig. 1) responde a la necesidad de limitar el número de elementos, ya que cada uno de ellos representa un material distinto (E distinto) con un crecimiento desmesurado de la memoria necesaria. La placa de ensayo se ha incluido en la malla para simular el comportamiento real (rígida y perfectamente rugosa), aunque es conocido que la rugosidad es un factor de escasa importancia en los resultados. El coeficiente de Poisson se considera constante, introduciendo así un cierto error en el cálculo. Carrier y Christian⁴, utilizando un módulo de deformación variable linealmente con la profundidad, estiman que la influencia del coeficiente de Poisson en el cálculo de asientos es de un 15% como máximo.

LA DEFORMABILIDAD DEL SUELO IN SITU

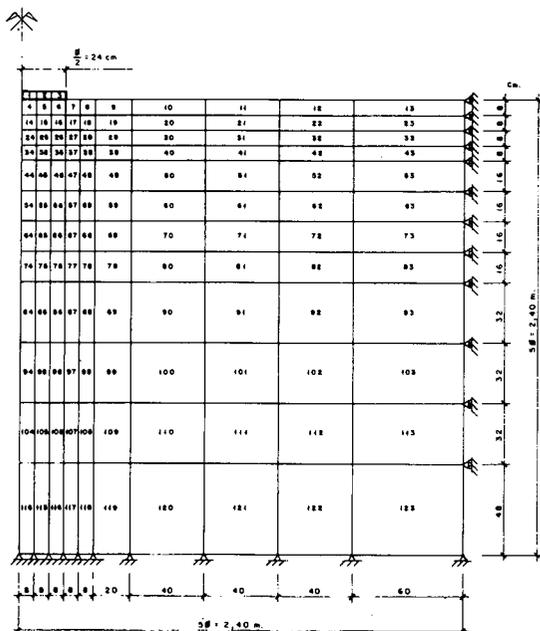


Figura 1.— Discretización del suelo para el modelo de elementos finitos.

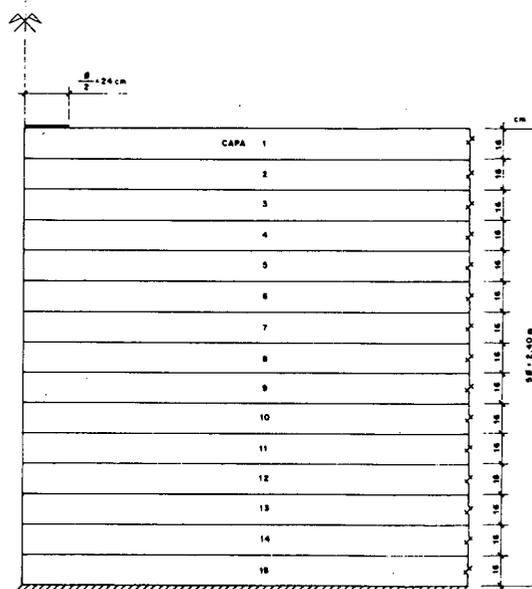


Figura 2.— Discretización del suelo para el modelo simplificado.

Los resultados que se presentan corresponden a un caso desarrollado por ambos métodos. Los datos utilizados se indican a continuación (ver Figura 3).

PLACA SIMULADA

- $\phi = 48 \text{ cm}$
- Profundidad afectada 5ϕ
- Carga $= 4,0 \text{ Kg/cm}^2$
- Nivel freático por debajo de 5ϕ
- Factor de carga $= 5$ (n.º de intervalos de carga)
- n.º de capas $= 15$

MODELO HIPERBOLICO

- Densidad aparente $= 2,16 \text{ t/m}^3$
- $\nu = 0,3$
- $K = 940$
- $n = 0,59$
- $\varphi = 35^\circ$
- $R_f = 0,89$

El modelo hiperbólico corresponde al comportamiento a largo plazo de un relleno granular compactado.

Los asentamientos obtenidos con el modelo simplificado se han comparado con los calculados con el de elementos finitos. Dicha comparación se ha realizado para dos valores del coeficiente de empuje en reposo, $K_o = 0,43$ ($K_o = 1 - \sin\varphi$) y $K_o = 0,75$ (debido a la compactación).

Carga $q = 4,0 \text{ Kp/cm}^2$ en 5 escalones.

LA DEFORMABILIDAD DEL SUELO IN SITU

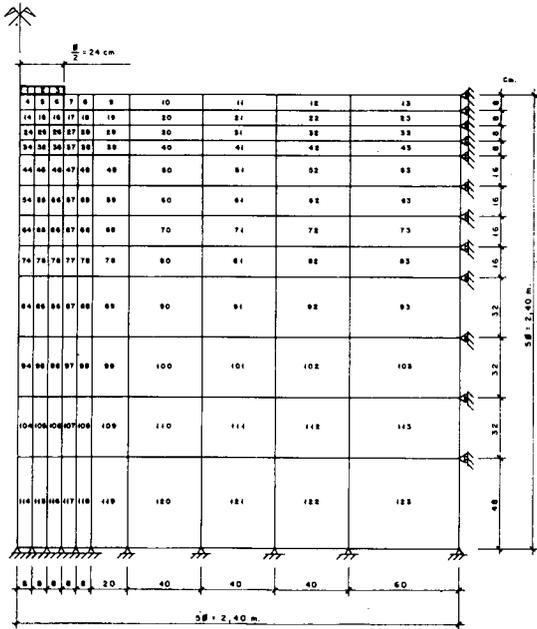


Figura 1.- Discretización del suelo para el modelo de elementos finitos.

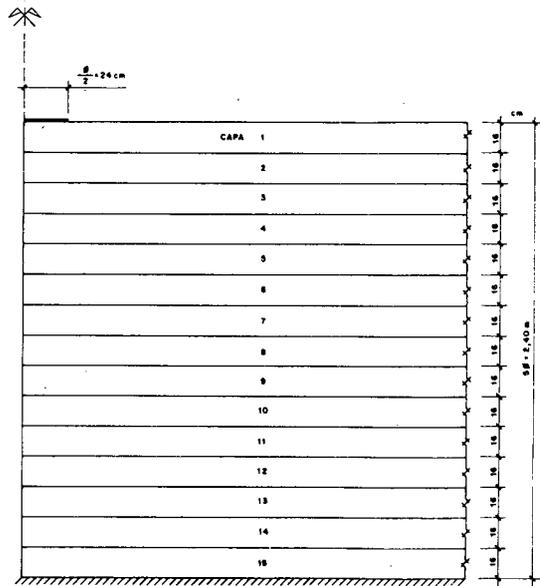


Figura 2.- Discretización del suelo para el modelo simplificado.

Los resultados que se presentan corresponden a un caso desarrollado por ambos métodos. Los datos utilizados se indican a continuación (ver Figura 3).

PLACA SIMULADA

- $\phi = 48$ cm
- Profundidad afectada 5ϕ
- Carga = $4,0 \text{ Kg/cm}^2$
- Nivel freático por debajo de 5ϕ
- Factor de carga = 5 (n.º de intervalos de carga)
- n.º de capas = 15

MODELO HIPERBOLICO

- Densidad aparente = $2,16 \text{ t/m}^3$
- $\nu = 0,3$
- $K = 940$
- $n = 0,59$
- $\varphi = 35^\circ$
- $R_f = 0,89$

El modelo hiperbólico corresponde al comportamiento a largo plazo de un relleno granular compactado.

Los asentamientos obtenidos con el modelo simplificado se han comparado con los calculados con el de elementos finitos. Dicha comparación se ha realizado para dos valores del coeficiente de empuje en reposo, $K_o = 0,43$ ($K_o = 1 - \text{sen}\varphi$) y $K_o = 0,75$ (debido a la compactación).

Carga $q = 4,0 \text{ Kp/cm}^2$ en 5 escalones.

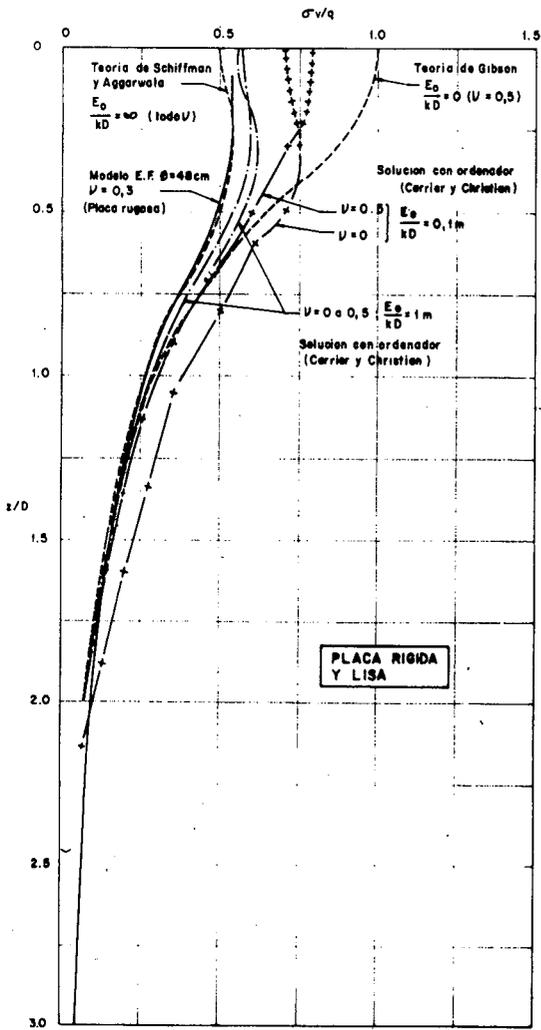


Figura 4.— Distribución de las tensiones verticales bajo el centro.

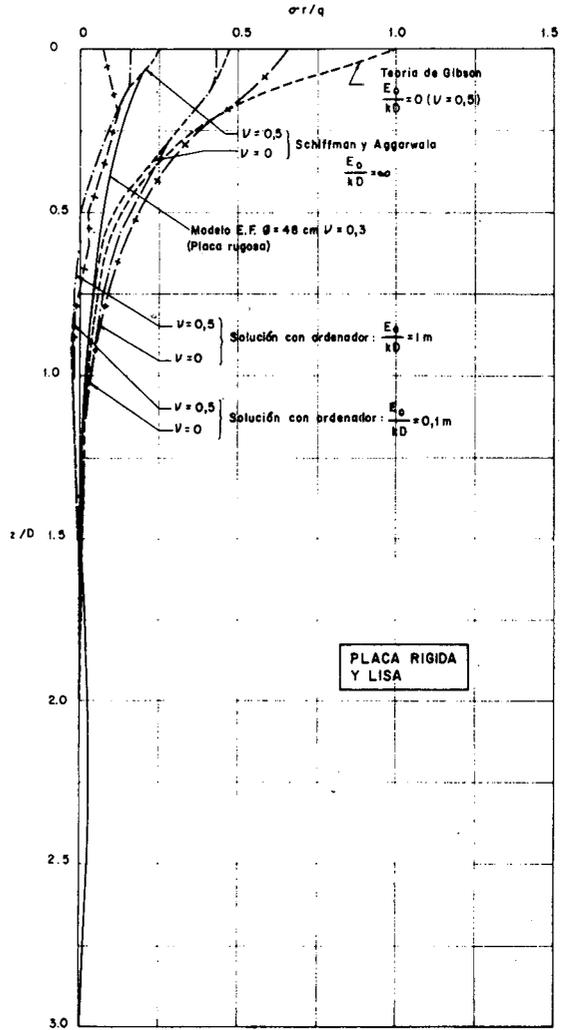


Figura 5.— Distribución de las tensiones radiales bajo el centro.

COMPARACION DEL ENSAYO SIMULADO CON EL REAL.
CORRECCION DE LA LEY CONSTITUTIVA DE LABORATORIO

Comparando el ensayo real con el reproducido analíticamente puede obtenerse un factor de corrección (F) del modelo hiperbólico de laboratorio, de forma que así corregido reproduzca los resultados del ensayo "in situ". El valor de F es variable con la presión aplicada en la placa de ensayo y modifica el valor del módulo tangente inicial (E_t). De esta forma el modelo hiperbólico corregido obedece a la expresión:

$$E_t = F.k. P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f(1-\text{sen}\varphi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos\varphi + 2 \sigma_3 \text{sen}\varphi} \right]^2$$

A continuación se exponen dos ejemplos prácticos de la aplicación del “método de interpretación conjunta”.

Ejemplo de aplicación n.º 1

El terreno estudiado es un relleno estructural granular construido para la cimentación de una central energética. Con el material, tipo GP-GC de acuerdo con la clasificación de Casagrande, se construyó un terraplén de prueba suprimiendo previamente los bolos de tamaño superior a 5”, obteniéndose las siguientes condiciones de puesta en obra:

$$\gamma_d = 2,18 \text{ t/m}^2; W = 4,6\%$$

En el terraplén de prueba se efectuaron 2 ensayos de carga con placa “lentos” (con drenaje) de 48 cm de diámetro y se tomaron muestras para la realización de 5 triaxiales CD, todos ellos con probetas de 4”. Este tamaño de probeta obliga a rechazar la fracción del suelo retenida en el tamiz 3/4”. Dado que aproximadamente el 50 % del material de la muestra original queda retenido por dicho tamiz, la probeta así obtenida no puede considerarse representativa del material de relleno. Para solucionar este inconveniente, la fracción retenida en el tamiz 3/4” se sustituyó en partes proporcionales por material retenido en los tamices 1/2”, 3/8” y 1/4”. De acuerdo con los criterios de Donaghe y Townsend⁸, el suelo así obtenido se compactó con una densidad inferior en 0,10-0,15 t/m³ a la obtenida “in situ”.

El modelo hiperbólico a largo plazo se obtuvo de los ensayos triaxiales CD y queda definido por los valores siguientes: $K = 940$; $n = 0,59$; $R_f = 0,89$; $c' = 0,41 \text{ Kg/cm}^2$; $\phi' = 35^\circ$.

Con el modelo hiperbólico de laboratorio se simuló el ensayo de carga. Para ello se utilizó el programa PLACAR con las siguientes hipótesis de cálculo: $\phi = 48 \text{ cm}$; profundidad afectada = 5ϕ ; $\nu = 0,3$; factor de carga = 5 (n.º de incrementos de carga); $K_o = 0,75$, ya que el relleno donde se efectuó el ensayo real estaba compactado.

La comparación entre la placa real, media de las dos realizadas, y la simulada es la siguiente:

ASIENTO (mm)			
Carga (Q) (Kg/cm ²)	Placa de carga real (R)	Placa de carga simulada (L)	F(L/R)
2,4	1,2	2,9	2,5
5,0	1,7	6,5	3,8
7,5	2,2	11,7	5,3
10,0	2,7	21,1	7,8
12,5	3,2	45,7	14,3
15,0	3,7	—	—

La variación de F con la carga aplicada en la placa es aproximadamente lineal. Admitiendo una relación del tipo $F = KQ$ con $K = 0,8$, obtenida con los valores significativos de la serie (hasta 10 Kg/cm^2), se tienen los resultados siguientes:

LA DEFORMABILIDAD DEL SUELO IN SITU

Carga (Kg/cm ²)	ASIENTO (mm)	
	Placa de carga Real	Placa de carga simulada (F=0,8Q; Q en Kg/cm ²)
2,4	1,2	1,5
5,0	1,7	1,6
7,5	2,2	2,0
10,0	2,7	2,6
12,5	3,2	4,6
15,0	3,7	ROTURA

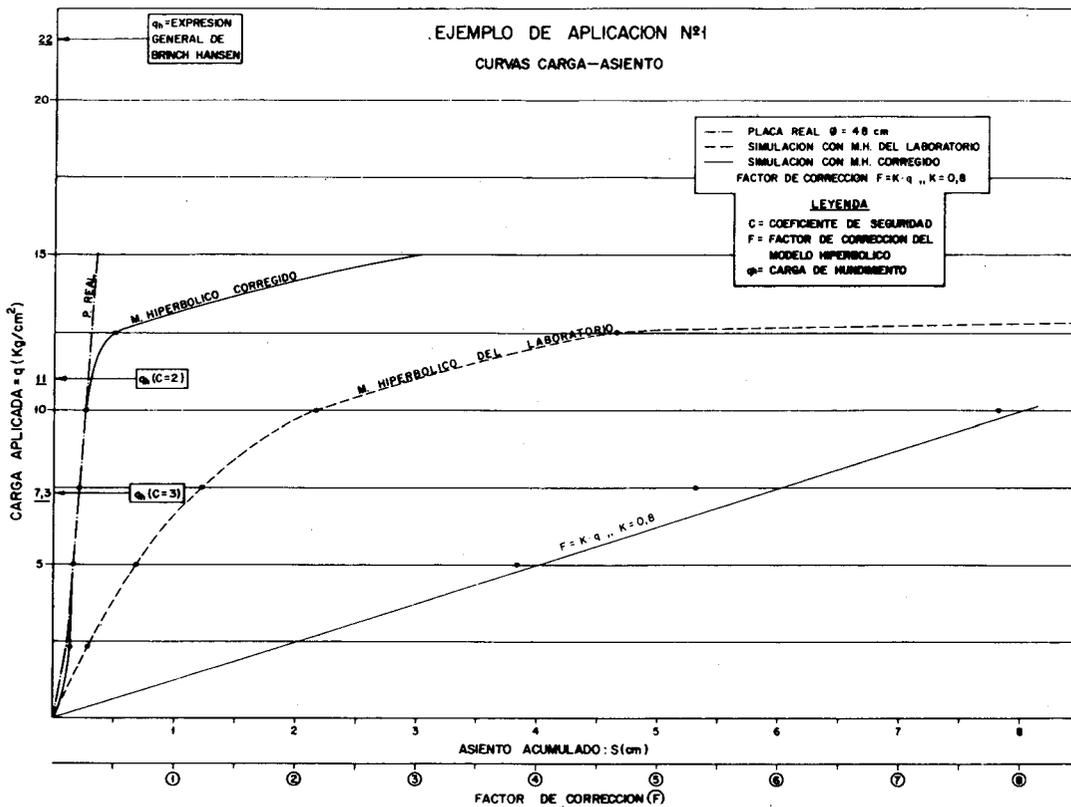


Figura 6.— Curvas carga-asiento.

En la Figura 6 se ha representado la curva carga-asiento real, la simulada con el modelo de laboratorio y la simulada con el modelo corregido.

Puede apreciarse el buen ajuste conseguido con el modelo corregido hasta presiones en la placa de 10 Kg/cm². Para presiones mayores el ensayo simulado no es aplicable dada la limitación del modelo hiperbólico en tensiones cercanas a rotura.

La carga de hundimiento de la placa, obtenida con los sistemas usuales de equilibrio límite y la hipótesis de sólido-rígido-plástico, es de 22 t si se suponen los mismos

parámetros resistentes introducidos en el modelo hiperbólico. Sin embargo en el modelo simplificado (PLACAR) el terreno se discretiza en capas y cuando en una de ellas se alcanzan valores próximos al desviador de rotura, el terreno se comporta anormalmente. Por lo tanto, en este caso, el modelo hiperbólico corregido representaría el comportamiento del suelo "in situ" para valores de la carga en superficie menores que los obtenidos con coeficientes de seguridad frente al hundimiento superiores a 2. Desde un punto de vista práctico esta restricción no disminuye la utilidad del modelo.

Estos resultados están de acuerdo con los publicados por Davis y Poulos⁷, según los cuales las zonas plásticas comienzan a aparecer en suelos ligeramente consolidados cuando se alcanzan coeficientes de seguridad entre 2 y 3.

Los valores del factor de corrección obtenidos (superiores a 2) se deben fundamentalmente a las siguientes causas:

- Diferentes tensiones iniciales "in situ" y en el laboratorio (confinamiento hidrostático).
- Utilización de muestras con distinta granulometría que la real (sustitución) a causa del tamaño de las probetas.
- Diferente trayectoria de tensiones en campo y laboratorio, aunque la elevada permeabilidad del material disminuye la influencia de este factor.
- No consideración de la anisotropía.
- Influencia del coeficiente de Poisson y de la hipótesis $\nu = \text{cte}$.
- Errores del modelo simplificado adoptado (15 %).

Si se tiene en cuenta el valor de los errores debidos a estos factores, se puede deducir que la utilización del modelo simplificado introduce errores prácticamente despreciables frente a aquellos.

Extrapolación de los ensayos de carga con placa a las cimentaciones reales

Es una aplicación inmediata del modelo simplificado (PLACAR). En la Figura 7, tomada de Carrier y Christian⁴, se han representado las curvas normalizadas asiento-radio para distintos modelos $E = E_0 + Kz$ junto con la obtenida mediante el modelo.

Puede apreciarse que esta última no se ajusta a ninguno de los modelos estudiados por Carrier y Christian, sino que según crece la relación entre el radio de la cimentación y el radio de la placa, la curva obtenida se iría adaptando a diferentes modelos de los citados autores con relaciones E_0/K crecientes.

Este comportamiento podría explicarse analizando la variación del módulo de deformación con la profundidad en el modelo simplificado. La curva obtenida para diámetros pequeños ($\phi = 48$ cm) se puede asimilar a modelos Carrier y Christian con valores bajos de la relación E_0/K , frente a la que se obtendría con diámetros mayores ($\phi = 24$ m), que presenta valores menores de K frente a E_0 y consiguientemente valores altos de E_0/K .

Por otra parte, al aumentar el tamaño de la cimentación disminuye la "profundidad activa" medida en diámetros. Este comportamiento del modelo simplificado está de acuerdo con las medidas de asientos a distintas profundidades realizadas "in situ" por diversos autores y recopiladas por Fedá¹⁰. Además, la evolución de los asientos en profundidad obtenida con el modelo simplificado es muy similar a la calculada con el M.E.F.

En la Figura 8 se han representado las curvas de variación asientos-diámetro

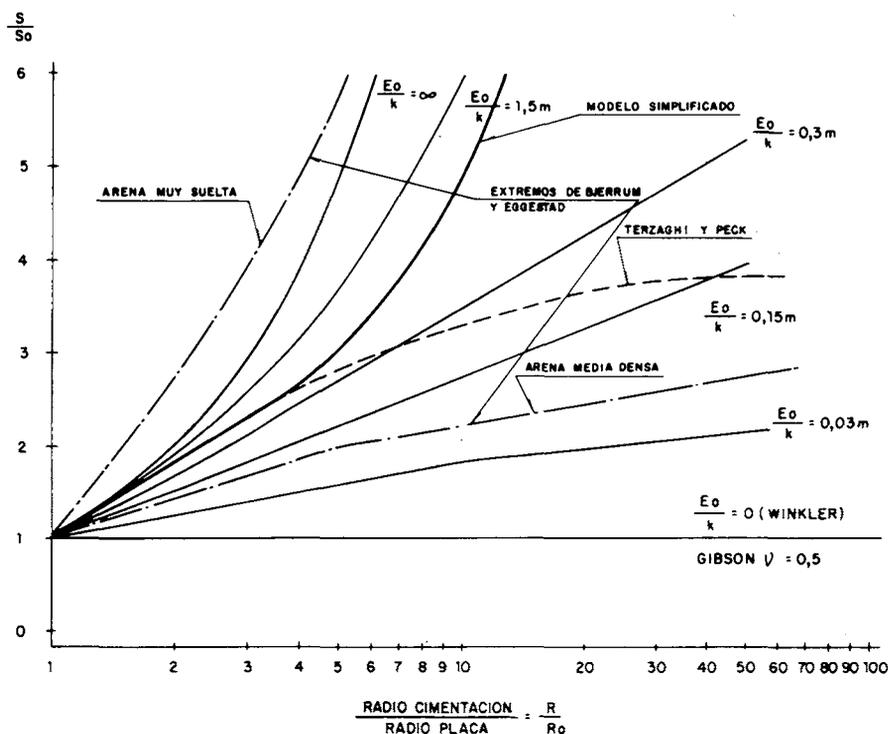


Figura 7.— Extrapolación de los resultados de los ensayos de carga con placa a las dimensiones de la cimentación real. Curvas normalizadas asiento-radio (escala logarítmica).

de la cimentación correspondientes a distintos procedimientos de interpretación de los ensayos de placa:

- Semiespacio de Boussinesq
- Modelo de Winkler
- Ley empírica de Terzaghi y Peck¹⁹
- Teoría de Menard. Se ha buscado una curva límite inferior ($E_A = E_B$) y otra límite superior ($E_B = 4E_A$), siendo E_A el módulo de deformación en el dominio esférico y E_B el módulo en el dominio desviador.
- Modelo simplificado (PLACAR)
- Límites superior e inferior de variación y curva media propuestos por Bjerrum y Eggstad²
- Valores obtenidos por D'Appolonia y otros⁶.

Se puede observar que la ley obtenida con el modelo simplificado, para valores de extrapolación de tamaño de ensayo de placa a tamaño de cimentación inferiores a 10, se ajusta notablemente bien a los valores medios registrados por Bjerrum y Eggstad², Terzaghi y Peck¹⁹, etc. Sin embargo, para relaciones de extrapolación superiores a 10, el ajuste se produce solamente con la curva de valores medios de los primeros autores citados, quedando la ley empírica propuesta por Terzaghi y Peck marcadamente del lado de la inseguridad.

Por último (Figuras 7 y 9), se ha analizado la variación del módulo equivalente E^*

Volviendo al “método de interpretación conjunta”, resulta necesario aclarar que no es conveniente su aplicación cuando las muestras del suelo disponibles presentan una estructura completamente distinta a la del terreno “in situ”. A continuación se expone un caso de aplicación práctica que ilustra este punto de vista.

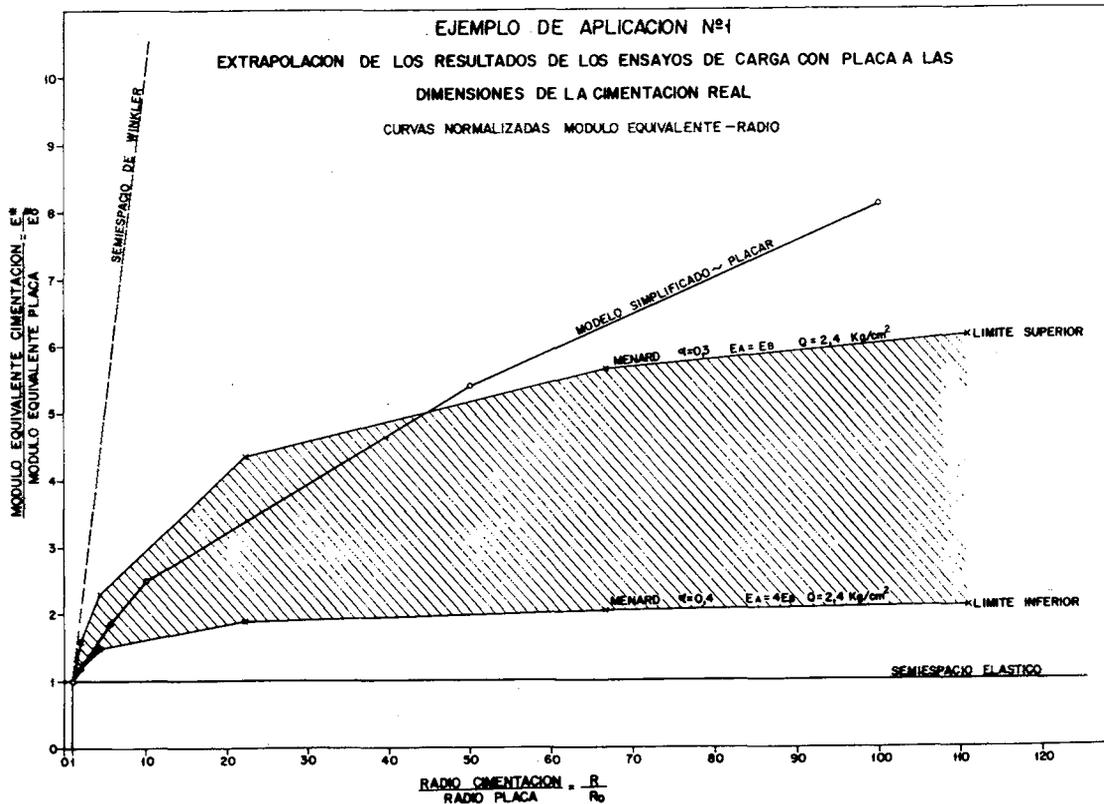


Figura 9.— Extrapolación de los resultados de los ensayos de carga con placa a las dimensiones de la cimentación real. Curvas normalizadas módulo equivalente-radio.

EJEMPLO DE APLICACION N° 2

Para el estudio de un depósito terciario de carácter aluvial situado en el área de emplazamiento de una central energética se realizaron, entre otros, 5 ensayos triaxiales CD y 4 ensayos de placa de carga con drenaje (762 mm ϕ).

Fue imposible tomar muestras en bloque y el estudio se realizó con muestras totalmente alteradas. Los ensayos triaxiales se efectuaron con probetas de 4" y, por lo tanto, hubo que deshechar la fracción del aluvial retenida en el tamiz 3/4" (50%). Los ensayos se realizaron con el material tamizado (sin sustitución), y las condiciones de humedad y densidad iniciales se determinaron de acuerdo con los criterios de Donaghe y Townsend⁸ tratando de estimar el estado de los finos. A partir de la densidad y humedad “in situ”, granulometría completa del aluvial y peso específico de las partículas sólidas se estimó el estado inicial de las probetas.

ESTADO NATURAL

$\gamma_d = 2,07 \text{ t/m}^3$

$W = 3,5\%$

ESTADO INICIAL DE LAS PROBETAS
EN EL TRIAXIAL

$\gamma_d = 1,79 \text{ t/m}^3$

$W = 8,6\%$

La curva carga-asiento real, media de las 4 obtenidas, se comparó con la simulada de acuerdo con los métodos ya expuestos. Se obtuvieron los resultados siguientes:

ASIENTO (mm)

Carga Q (Kg/cm ²)	Placa real	M. hiperbólico de lab.	F
1,0	0,2	10	50
2,0	0,6	21	35
3,0	0,9	34	38
4,0	1,3	54	42
5,0	1,7	ROTURA	ROTURA
7,5	2,5	—	—
10,0	3,4	—	—
12,5	4,3	—	—

Teniendo en cuenta los altos valores del factor de corrección F (superiores a 40), se consideró que los ensayos triaxiales no eran de utilidad para el estudio del comportamiento deformacional del depósito aluvial.

La misma problemática presentan los suelos residuales, en los cuales es frecuente la existencia de trozos de roca menos alterados que el resto.

En estos casos, la extrapolación de los resultados de las pruebas de carga a la escala real del problema es aún más difícil e incierta.

CONCLUSIONES

- 1.—Con objeto de introducir en la interpretación de los ensayos de carga con placa la heterogeneidad y no linealidad del suelo se ha desarrollado un modelo simplificado cuya utilización, por medio del programa PLACAR, es sencilla y de bajo coste.
- 2.—Los asientos obtenidos con el modelo simplificado son del orden de un 11-15% superiores a los calculados con un modelo de elementos finitos. Asimismo, el efecto del coeficiente K_0 en los asientos es muy similar en ambos modelos, al igual que las curvas de variación del asiento con la profundidad.
- 3.—En el ejemplo de aplicación n.º 1, el ensayo de carga simulado con la ley tensión-deformación corregida se ajusta al real siempre que el coeficiente de seguridad frente al hundimiento sea superior a 2. Teniendo en cuenta los valores de los factores de corrección obtenidos (superiores a 2,5), se puede decir que los errores introducidos por el modelo simplificado (15%) son despreciables en la práctica.

- 4.—La interpretación y extrapolación de los resultados de los ensayos de carga debe estar basada en modelos de suelo más realistas que el de Boussinesq, puesto que con el semiespacio se obtienen asientos notablemente exagerados. Incluso en este caso, cuando la extrapolación se efectúa a tamaños de cimentación superiores a 10 veces el tamaño de la placa de ensayo, los resultados pueden ser dudosos.
- 5.—El modelo simplificado puede ser un instrumento útil para la obtención del asiento con cualquier tamaño de cimentación, aunque precisa ser contrastado con resultados de medidas “in situ”. No obstante, los resultados están de acuerdo con las medidas de asientos a distintas profundidades recopiladas por Feda¹⁰, registrándose una disminución de la “profundidad activa”, medida en diámetros, cuando aumenta el tamaño de la cimentación.
- 6.—Cuando se ensayan en el laboratorio muestras no representativas del terreno (por ejemplo tamizado de suelos con alto contenido de gruesos) la interpretación conjunta no resulta útil, ya que los factores de corrección resultantes son superiores a 40 (ejemplo n.º 2).

APENDICE

A continuación se describe someramente el programa PLACAR para cálculo de la curva carga-asiento según el modelo de cálculo descrito en el Apartado 3. Simulación del Ensayo “in situ”.

DESCRIPCION GENERAL DEL PROGRAMA

Programa principal

PLACAR: Realiza la lectura de los datos de entrada y controla los dos bucles principales: iteraciones para cada escalón de carga e iteraciones para cada capa. Imprime la salida.

Subrutinas

TENSIO: Calcula las tensiones principales de cada capa en el punto medio de ésta; en el caso de placa circular se hace bajo el centro de la misma; con placa rectangular, supuestas tensiones principales verticales y horizontales en todos los puntos bajo la placa, el cálculo se hace como media de las tensiones bajo el centro y una esquina.

MODULO: Calcula el estado tensional característico, según el modelo (hiperbólico o edométrico) utilizado.

STEIN: Calcula el asiento parcial de cada capa por el método del Steinbrenner.

SIGMA: Calcula las tensiones en un punto situado bajo la esquina de una placa rectangular cargada.

Otras subrutinas y funciones utilizadas son ASIEN, FI1, FI2 y S.

Posibilidades

El programa permite el cálculo de asientos para placas o zapatas circulares y rectangulares que apoyan sobre un suelo homogéneo e isótropo, cuyo comportamiento deformacional es no lineal en profundidad (discretización en capas) y la ley de tensiones deformaciones responde al modelo hiperbólico de Duncan y Chang⁹.

Además se ha incluido la posibilidad de que esta última ley de tensión-deformación responda a un modelo edométrico.

Permite obtener una "salida completa" en la que se ofrecen los valores de las tensiones, módulo de elasticidad, y asentos en cada capa y para cada incremento de carga, o bien una "salida reducida" que solamente informe del asiento obtenido en cada capa del suelo.

Puede utilizarse con cualquier sistema compatible de unidades, aunque la salida se imprime con escritura de Kp y cm, por lo que es recomendable usar estas unidades.

Limitaciones

Actualmente el programa está limitado a una discretización máxima de 20 capas.

ENTRADAS DE DATOS

El orden y formato de la entrada de datos es la siguiente:

FICHA 1 (18 A 4)

TITULO - Título del problema

FICHA 2 (3I5, F10.0)

IND1	-- Interruptor	IND1 = 1 Placa circular IND1 = 2 Placa rectangular
IND2	--- Interruptor	IND2 = 1 Modelo hiperbólico IND2 = 2 Módulo edométrico
NSR	... Opción de control	NSR = 0 Impresión completa NSR = 1 Salida con impresión reducida
ASIENT	... Asiento inicial.	

FICHA 3 y FICHA 4

La ficha 3 depende del caso considerado. Las variables son las siguientes:

RADIO: Radio de la placa circular (cm)

NDIAM: Profundidad afectada medida en diámetros

CAPA (entero): Número de diámetros a los que equivale el espesor de cada capa en que se discretiza el suelo, o número de anchos en caso de placa rectangular.

CARGA: Carga aplicada en la placa (Kp/cm^2)

LAMBDA: Factor de carga o número de escalones en que se aplica la carga.

NF (real): Profundidad del nivel freático (cm)

PW: Peso específico del agua (Kp/cm^3)

ANCHO: Dimensión menor de la placa rectangular (cm)

LARGO (real): Dimensión mayor de la placa rectangular (cm)

PESO: Peso específico del suelo seco (Kp/cm^3)

PESAT: Peso específico del suelo saturado (Kp/cm^3)

NU (real): Coeficiente de Poisson

K (real), N (real), RF: Parámetros del modelo hiperbólico

PATM: Presión atmosférica = $1.033 Kp/cm^2$

COHE: Cohesión (Kp/cm^3)

FI: Angulo de rozamiento (grados)

KO (real): Coeficiente de empuje lateral

Si $K_o = 0$. se toma $K_o = 1 - \text{sen}\varphi$

INDCOM: (real): Índice de compresibilidad

INDPOR: (real): Índice de poros

Caso 1: IND1 = 1; IND2 = 1
Placa circular y modelo hiperbólico

FICHA 3: (F10.0, 2I5, F10.0, I5, F10.0)
RADIO, NDIAM, CAPA, CARGA, LAMBDA, NF, PW

FICHA 4: (3F7.0, F10.0, F5.0, F10.0, 3F5.0, F5.3)
PESO, PESAT, NU, K, N, PATM, COHE, FI, RF, KO

Caso 2: IND1 = 1; IND2 = 2
Placa circular y módulo edométrico

FICHA 3: (F10.0, 2I5, F10.0, I5, F10.0)
RADIO, NDIAM, CAPA, CARGA, LAMBDA, NF, PW

FICHA 4: (3F7.0, 2F10.0)
PESO, PESAT, NU, INDCOM, INDPOR

Caso 3: IND1 = 2; IND2 = 1
Placa rectangular y modelo hiperbólico

FICHA 3: (2F10.0, 2I5, F10.0, I5, F10.0)
ANCHO, LARGO, NDIAM, CAPA, CARGA, LAMBDA, NF, PW

FICHA 4: (3F7.0, F10.0, F5.0, F10.0, 3F5.0, F5.3)
PESO, PESAT, NU, K, N, PATM, COHE, FI, RF, KO

Caso 4: IND1 = 2; IND2 = 2
Placa rectangular y módulo edométrico

FICHA 3: (2F10.0, 2I5, F10.0, I5, F10.0)
ANCHO, LARGO, NDIAM, CAPA, CARGA, LAMBDA, NF, PW

FICHA 4: (3F7.0, 2F10.0)
PESO, PESAT, NU, INDCOM, INDPOR, KO

FICHA 5: (F10.0)

QS - Sobrecarga superficial

EJEMPLO

A continuación se incluye un ejemplo con la salida impresa reducida.

APENDICE A. A.3. EJEMPLO

PLACA CIRCULAR MODELO HIPERBOLICO

RADIO..... 24.000 CM.
 PROFUNDIDAD AFECTADA..... 4 DIAMETROS
 ESPESOR CAPA(DIAMETRO/CAPA)..... 3
 CARGA..... 0.00 KG/CM2
 FACTOR DE CARGA..... 3
 PROFUNDIDAD DEL NIVEL TREATICO... 1000.00 CM.
 PESO ESPECIFICADO DEL AGUA..... 0.0010 KG/CM3

PESO PESO SAT K N PATH C FI IF CF. POISSON KO
 0.00216 0.00216 940. 0.59 1.033 0.410 0.6 0.87 0.30 0.750

ASIENTO INICIAL= 0.0
 SOBRECARGA SUPERFICIAL , QS = 0.9

ESCALON DE CARGA NO. 1

CARGA SUP. INCRE. ASIENTO ASIENTO ACUM.
 2.00 0.23652 0.237

ASIENTOS ACUMULADOS EN CADA CAPA

CAPA NO. 8	ASIENTO ACUMULADO =	0.0027
CAPA NO. 7	ASIENTO ACUMULADO =	0.0071
CAPA NO. 6	ASIENTO ACUMULADO =	0.0133
CAPA NO. 5	ASIENTO ACUMULADO =	0.0233
CAPA NO. 4	ASIENTO ACUMULADO =	0.0409
CAPA NO. 3	ASIENTO ACUMULADO =	0.0748
CAPA NO. 2	ASIENTO ACUMULADO =	0.1582
CAPA NO. 1	ASIENTO ACUMULADO =	0.2365

ESCALON DE CARGA NO. 2

CARGA SUP. INCRE. ASIENTO ASIENTO ACUM.
 4.00 0.25985 0.496

ASIENTOS ACUMULADOS EN CADA CAPA

CAPA NO. 8	ASIENTO ACUMULADO =	0.0030
CAPA NO. 7	ASIENTO ACUMULADO =	0.0072
CAPA NO. 6	ASIENTO ACUMULADO =	0.0137
CAPA NO. 5	ASIENTO ACUMULADO =	0.0242
CAPA NO. 4	ASIENTO ACUMULADO =	0.0437
CAPA NO. 3	ASIENTO ACUMULADO =	0.0886
CAPA NO. 2	ASIENTO ACUMULADO =	0.1972
CAPA NO. 1	ASIENTO ACUMULADO =	0.2598

ESCALON DE CARGA NO. 3

CARGA SUP. INCRE. ASIENTO ASIENTO ACUM.
 6.00 0.32147 0.818

ASIENTOS ACUMULADOS EN CADA CAPA

CAPA NO. 8	ASIENTO ACUMULADO =	0.0030
CAPA NO. 7	ASIENTO ACUMULADO =	0.0074
CAPA NO. 6	ASIENTO ACUMULADO =	0.0140
CAPA NO. 5	ASIENTO ACUMULADO =	0.0251
CAPA NO. 4	ASIENTO ACUMULADO =	0.0470
CAPA NO. 3	ASIENTO ACUMULADO =	0.1050
CAPA NO. 2	ASIENTO ACUMULADO =	0.2640
CAPA NO. 1	ASIENTO ACUMULADO =	0.3215

RESUMEN FINAL I CURVA CARGA-ASIENTO

ESCALON	CARGA	ASIENTO
1	2.000	0.237
2	4.000	0.496
3	6.000	0.818

LISTADO

Igualmente se incluye un listado del programa.

FILE: A1 A1 A1 EPIISA.- PROCESO DE DATOS.- CMC

```

C          PLACAR
C          *****
C          PROGRAMA 'PLACAR' PARA INTERPRETACION DE ENSAYOS DE CARGA CON
C          PLACA Y APLICACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A DISTINTOS TI-
C          POS DE CIMENTACION, ADMITE PLACAS O CIMENTACIONES DE FORMA
C          CIRCULAR Y RECTANGULAR, EL COMPARTAMENTO DIMENSIONAL DEL SUE-
C          LO SE CONSIDERA DE DOS FORMAS, A PARTIR DE LOS RESULTADOS DE EN-
C          SAYOS TRIAXIALES (MODELO HIPERBOLICO) Y A PARTIR DE LOS RESULTA-
C          DOS DE ENSAYOS EDMETRICOS (MODELO EDMETRICO).
C          DEFINICION DEL TIPO DE VARIABLES, LECTURA Y ESCRITURA DE DATOS
C          DIMENSION A(50), S(20), P(20)
C          REAL K,N,NU,INDCOM,INDFOR,NF,LARGO,KO
C          INTEGER CAPA, TITULO(18)
C          DATA P1/3.1415926536
C          ANCHO=0
C          RADIO=0
C          READ (5,100) TITULO
C          WRITE (6,200) TITULO
C          READ (5,110) INDI,IND2,NSR,ASIENT
C          IF (INDI.EQ.1) GO TO 20
C          IF (IND2.EQ.1) GO TO 10
C          CASO DE PLACA O CIMENTACION RECTANGULAR Y MODULO EDMETRICO
C          READ (5,120) ANCHO,LARGO,NDIAM,CAPA,CARGA,LAMBDA,NF,FW
C          READ (5,130) PESO,PESAT,NU,INDCOM,INDFOR,KO
C          WRITE (6,210) ANCHO,LARGO,NDIAM,CAPA,CARGA,LAMBDA,NF,FW,PESO,
C          PESAT,INDCOM,INDFOR,NU
C          WRITE (6,250) ASIENT
C          GO TO 40
C          CASO DE PLACA O CIMENTACION RECTANGULAR Y MODELO HIPERBOLICO
C          10 READ (5,140) RADIO,NDIAM,CAPA,CARGA,LAMBDA,NF,FW
C          READ (5,150) PESO,PESAT,NU,INDCOM,INDFOR,KO
C          FI = F1*PI/180.
C          IF (KO.EQ.0.0) KO = 1 - SIN(FI)
C          WRITE (6,220) ANCHO,LARGO,NDIAM,CAPA,CARGA,LAMBDA,NF,FW,PESO,
C          PESAT,K,N,PATH,COHE,FI,RF,NU,KO
C          WRITE (6,250) ASIENT
C          GO TO 40
C          CASO DE PLACA O CIMENTACION CIRCULAR Y MODULO EDMETRICO
C          20 IF (IND2.EQ.1) GO TO 30
C          READ (5,140) RADIO,NDIAM,CAPA,CARGA,LAMBDA,NF,FW
C          READ (5,130) PESO,PESAT,NU,INDCOM,INDFOR
C          WRITE (6,230) RADIO,NDIAM,CAPA,CARGA,LAMBDA,NF,FW,PESO,PESAT,
C          INDCOM,INDFOR,NU,ASIENT
C          GO TO 40
    
```

```

FILE: A1 A1 A1 EPIISA.- PROCESO DE DATOS.- CMC
C          CASO DE PLACA O CIMENTACION CIRCULAR Y MODELO HIPERBOLICO
C          30 READ (5,140) RADIO,NDIAM,CAPA,CARGA,LAMBDA,NF,FW
C          READ (5,150) PESO,PESAT,NU,K,N,PATH,COHE,FI,RF,KO
C          FI = F1*PI/180.
C          IF (KO.EQ.0.0) KO = 1 - SIN(FI)
C          WRITE (6,240) RADIO,NDIAM,CAPA,CARGA,LAMBDA,NF,FW,PESO,PESAT,K,N,
C          PATH,COHE,FI,RF,NU,KO
C          WRITE (6,250) ASIENT
C          CALCULA EL ESPESOR DE CADA CAPA Y EL INCREMENTO DE CARGA.
C          40 READ (5,160) DS
C          WRITE (6,280) DS
C          IF (NSR.NE.0) WRITE (6,260)
C          IF (NSR.NE.0) WRITE (6,270)
C          IF (INDI.EQ.1) DELTAZ=PI*RADIO/CAPA
C          IF (INDI.EQ.2) DELTAZ=ANCHO/CAPA
C          DELTAZ=CARGA/LAMBDA
C          INICIALIZA VARIABLES UTILIZADAS EN EL CALCULO DEL MODULO
C          EDMETRICO
C          SIGMED=0
C          SIGEDI=0
C          PROCESO DE CALCULO CON DOS BUCLES, UNO PARA VARIAR LA CARGA EN
C          SUPERFICIE Y OTRO PARA REPETIR EL PROCESO EN CADA CAPA
C          DO 60 I=1,LAMBDA
C          WRITE (6,290) I
C          CARGA=I*DELTAZ
C          DELTAZ=0
C          NCAPAS=NDIAM/CAPA
C          CARGAM=DELTAZ*(I-1)+DELTAZ/2.
C          IPRINT = 0
C          DO 50 J=1,NCAPAS
C          IF (NSR.NE.0) GO TO 45
C          IPRINT = IPRINT + 1
C          IF (IPRINT.EQ.6) WRITE (6,370)
C          IF (IPRINT.EQ.6) IPRINT = 0
C          WRITE (6,330) J
C          45 CONTINUE
C          ZM=(J-1)*DELTAZ+DELTAZ/2.
C          IF (NF.GT.2M) TENSGE=PESQ*ZM + QS
C          IF (NF.LE.2M) TENSGE=PESQ*(ZM-NF)*(PESAT-FW) + QS
C          CONFGS=TENSGE*KO
C          CALCULO DE LAS TENSIONES
C          CALL TENSIO (SIGMA1,SIGMA3,SIGMED,SIGEDI,RADIO,ANCHO,LARGO,CARGAM,PLA01080
C          ,NU,ZM,INDI,TENSGE,CONFGS)
C          IF (NSR.EQ.0) WRITE (6,310) SIGMA1,SIGMA3
    
```

LA DEFORMABILIDAD DEL SUELO IN SITU

```

FILE: A1      A1      A1      EPTISA.- PROCESO DE DATOS.- CMS

C
C
C
CALCULO DEL MODULO DE DEFORMACION
CALL MODULO (K,N,PATH,COME,FI,RF,SIGMA1,SIGMA3,INIMCO,INFOR,
,SIGMED,EM,IND2)
IF(NSR,EG.0) WRITE(6,300) EM

C
C
C
CALCULO DEL ASIENTO
CALL STEIN (EM,DELTA,DELTAC,DELTAZ,NU,RADIO,ANCHO,LARGO,IND1,J)
DELTAS=DELTAS+DELT
IF(NSR,EG.0) WRITE(6,340) DELTA
A(J) = DBELTA
50 CONTINUE
ASIENTO=ASIENTO+DELTAS
IF(NSR,EG.0) WRITE(6,345)
WRITE (6,300) CARGAI,DELTAS,ASIENT
S(I) = ASIENT
P(I) = CARGAI
AA = 0.
WRITE(6,350)
DO 70 L=1,NCAPAS
L1 = NCPAS-L+1
AA = AA + A(L1)
WRITE(6,360) L1,AA
70 CONTINUE
60 CONTINUE
WRITE (6,360)
DO 65 I=1,LAMBDA
WRITE (6,390) I,P(I),S(I)
65 CONTINUE
STOP

C
C
C
FORMATOS DE ENTRADA Y SALIDA
100 FORMAT (18A4)
110 FORMAT (3I5,F10.0)
120 FORMAT (2F10.0,2I5,F10.0,15,2F10.0)
130 FORMAT (3F7.0,2F10.0)
140 FORMAT (F10.0,2I5,F10.0,15,2F10.0)
150 FORMAT (3F7.0,F10.0,F5.0,F10.0,3F5.0,F5.3)
160 FORMAT (F10.0)
200 FORMAT ('1',18A4)
210 FORMAT (/,/, PLACA RECTANGULAR MODULO EDOMETRICO,/,/,
1' ANCHO.....,/,F9.3,/,CM,/,/,
2' LARGO.....,/,F9.3,/,CM,/,/,
3' PROFUNDIDAD AFECTADA.....,/,I5,/, ANCHOS,/,/
4' ESPESOR CAPA(ANCHO/CAPA):CAPA.....,/,I5,/,
5' CARGA.....,/,F9.2,/, KG/CM2,/,/
6' FACTOR DE CARGA.....,/,I5,/,
7' PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREATICO.....,/,F9.2,/, CM,/,/
8' PESO ESPECIFICO DEL AGUA.....,/,F9.4,/, KG/CM3,/,/
9' PESO PESO SAT IND. COMP IND. POROS COEF. POISSON,/,/
/,/,F9.5,F9.5,F12.3,F12.3,F12.2,/,/
220 FORMAT (/,/, PLACA RECTANGULAR MODELO HIPERBOLOIDICO,/,/,
1' ANCHO.....,/,F9.3,/,CM,/,/,
2' LARGO.....,/,F9.3,/,CM,/,/,
3' PROFUNDIDAD AFECTADA.....,/,I5,/, ANCHOS,/,/
4' ESPESOR CAPA(ANCHO/CAPA):CAPA.....,/,I5,/,
5' CARGA.....,/,F9.2,/, KG/CM2,/,/
6' FACTOR DE CARGA.....,/,I5,/,
7' PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREATICO.....,/,F9.2,/, CM,/,/
8' PESO ESPECIFICO DEL AGUA.....,/,F9.4,/, KG/CM3,/,/
9' PESO PESO SAT K N PATH C FI HF CF-POISSON,/,/
/,/,F9.5,F9.5,F6.0,F6.2,F7.3,F6.3,F6.1,F6.2,F6.2,F6.3,/,/
230 FORMAT (/,/, PLACA CIRCULAR MODULO EDOMETRICO,/,/,
1' RADIO.....,/,F9.3,/,CM,/,/,
2' PROFUNDIDAD AFECTADA.....,/,I5,/, DIAMETROS,/,/
3' ESPESOR CAPA(DIAMETRO/CAPA):CAPA.....,/,I5,/,
4' CARGA.....,/,F9.2,/, KG/CM2,/,/
5' FACTOR DE CARGA.....,/,I5,/,
6' PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREATICO.....,/,F9.2,/, CM,/,/
7' PESO ESPECIFICO DEL AGUA.....,/,F9.4,/, KG/CM3,/,/
8' PESO PESO SAT IND. COMP IND. POROS COEF. POISSON,/,/
/,/,F9.5,F9.5,F12.3,F12.3,F12.2,/,/
/,/,F9.5,F9.5,F6.0,F6.2,F7.3,F6.3,F6.1,F6.2,F6.2,F6.3,/,/
240 FORMAT (/,/, PLACA CIRCULAR MODELO HIPERBOLOIDICO,/,/,
1' RADIO.....,/,F9.3,/,CM,/,/,
2' PROFUNDIDAD AFECTADA.....,/,I5,/, DIAMETROS,/,/
3' ESPESOR CAPA(DIAMETRO/CAPA):CAPA.....,/,I5,/,
4' CARGA.....,/,F9.2,/, KG/CM2,/,/
5' FACTOR DE CARGA.....,/,I5,/,
6' PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREATICO.....,/,F9.2,/, CM,/,/
7' PESO ESPECIFICO DEL AGUA.....,/,F9.4,/, KG/CM3,/,/
8' PESO PESO SAT K N PATH C FI HF CF-POISSON,/,/
/,/,F9.5,F9.5,F12.3,F12.3,F12.2,/,/
250 FORMAT (/,/, PLACA CIRCULAR MODELO HIPERBOLOIDICO,/,/,
1' RADIO.....,/,F9.3,/,CM,/,/,
2' PROFUNDIDAD AFECTADA.....,/,I5,/, DIAMETROS,/,/
3' ESPESOR CAPA(DIAMETRO/CAPA):CAPA.....,/,I5,/,
4' CARGA.....,/,F9.2,/, KG/CM2,/,/
5' FACTOR DE CARGA.....,/,I5,/,
6' PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREATICO.....,/,F9.2,/, CM,/,/
7' PESO ESPECIFICO DEL AGUA.....,/,F9.4,/, KG/CM3,/,/
8' PESO PESO SAT K N PATH C FI HF CF-POISSON,/,/
/,/,F9.5,F9.5,F12.3,F12.3,F12.2,/,/
260 FORMAT (/,/, ASIENTO INICIAL=F,10.4)
270 FORMAT (/,/, ASIENTO INICIAL=F,10.4)
280 FORMAT (/,/, ASIENTO INICIAL=F,10.4)
290 FORMAT (1H1,/, ESCALON DE CARGA NO.,/,I2)
300 FORMAT (/,/, ASIENTO INICIAL=F,10.4)
310 FORMAT (1H0,2X,/, SIGNAL =,/,F10.4,RK,SIGMA3 =,/,F10.4)
320 FORMAT (1H0,2X,/, EM =,/,F10.4)
330 FORMAT (1H0,2X,/, CAPA NO.,/,I2)
340 FORMAT (10 ASIENTO EN LA CAPA=,/,F9.5)
345 FORMAT (11)
350 FORMAT (10 ASIENTOS ACUMULADOS EN CADA CAPA=,/,)
360 FORMAT (1 CAPA NO.,/,I3,/, ASIENTO ACUMULADO =,/,F10.4)
370 FORMAT (11)
380 FORMAT (11 RESUMEN FINAL : CURVA CARGA-ASIENTO=,/,)
/,/,
/,/,
/,/,
390 FORMAT (5X,I5,2F10.3)
END
    
```

```

FILE: B1      B1      A1      EPTISA.- PROCESO DE DATOS.- CMS

C
C
C
T E N S I O
C
C
C
SUBROUTINE PARA EL CALCULO DE LAS TENSIONES CARACTERISTICAS DE
DE CADA CAPA (LAS DEL PUNTO MEDIO DE LA CAPA, SITUADO BAJO EL
CENTRO DE LA PLACA)
SUBROUTINE TENSI0 (SIGMA1,SIGMA3,SIGMED,SIGED1,RADIO,ANCHO,LARGO,
,CARGAM,NU,ZH,IND1,TENSGE,LUNFGE)
REAL H,LARGO,NU
IF (IND1,EG.2) GO TO 10
C
C
C
CASO DE PLACA O CIMENTACION CIRCULAR
CALCULO DE LAS TENSIONES BAJO EL CENTRO
M=2H/RADIO
SIGME=CARGAM*(1-(1/(1+(M**2))))**1.5 + TENSGE
SIGMRE=(CARGAM/2.)*(1+2*NU-2*(1+NU)*M/(1+M**2)**1.5**2*(1+M**2)**1.5
)+ CONFGE
SIGMA1 = SIGMZE
SIGMA2 = SIGMRE
SIGMA3 = SIGHRE
C
C
C
SIGMED=SIGED1
SIGED1=SIGMA1
RETURN
C
C
CASO DE PLACA O CIMENTACION RECTANGULAR
CALCULO DE LAS TENSIONES BAJO EL CENTRO
10 ANCHO=5*ANCHO
LARGO=5*LARGO
CALL SIGMA (SIGMZE,SIGMRE,SIGME,ANCHO,LARGO,ZH,CARGAM)
SIGMZE=4*SIGMZE
SIGMRE=2*(SIGMZE+SIGME)
C
C
C
CALCULO DE LAS TENSIONES BAJO LA ESQUINA
ANCHO=2*ANCHO
LARGO=2*LARGO
CALL SIGMA (SIGMAZ,SIGMAX,SIGMY,ANCHO,LARGO,ZH,CARGAM)
SIGMAH=5*(SIGMAX+SIGMY)
C
C
C
CALCULO DE LAS TENSIONES PRINCIPALES(SUPUESTAS HORIZONTAL Y
VERTICAL) Y DE LA TENSION VERTICAL EN EL ESTADO DE CARGAS ANTERIORES
SIGMA1=.5*(SIGMZE+SIGMAZ)+TENSGE
SIGMA3=.5*(SIGMRE+SIGMAX)+CONFGE
SIGMED=SIGED1
SIGED1=SIGMA1
    
```

```

FILE: B1      B1      A1      EPTISA.- PROCESO DE DATOS.- CMS

RETURN
END
PLA02780
PLA02760
    
```

```

FILE: C1      C1      A1      EPTISA.- PROCESO DE DATOS.- CMS

C
C
C
S T E I N
C
C
C
SUBROUTINE PARA EL CALCULO DEL ASIENTO PARCIAL DE CADA CAPA
POR EL METODO DE STEINBRENNER
C
C
C
SUBROUTINE STEIN (EM,DELTA,DELTAC,DELTAZ,NU,RADIO,ANCHO,LARGO,
IND1,J)
REAL LARGO,NU,LARGO1
DIMENSION XA(2)
DATA XA /,26,1.74/
DATA PI/3.1415927
C
C
C
ALFA=1-(NU*NU)
BETA=1-NU-(2*NU*NU)
Z1=(1-I)*DELTAZ
Z2=J*DELTAZ
DBELTA = 0.
IF (IND1,EG.2) GO TO 20
C
C
C
CASO DE PLACA O CIMENTACION CIRCULAR
ANCHO1 = RADIO * SORT(PI) /2.
DO 100 I=1,2
A = XA(I) * ANCHO1
DO 100 K=1,2
B = XA(K) * ANCHO1
A1 = A
B1 = B
IF (A,EG.B) GO TO 150
A1 = AMAXI(A,B)
B1 = AMINI(A,B)
150 CONTINUE
ENL = A1/B1
CALL ASIENT(EM,DELTA,C,B1,Z1,Z2,ALFA,BETA,ASIENT1,ASIENT2,ENL)
DBELTA = DBELTA + (ASIENT1-ASIENT2)
100 CONTINUE
RETURN
C
C
C
CASO DE PLACA O CIMENTACION RECTANGULAR
20 CONTINUE
ANCHO1 = ANCHO/2.
LARGO1 = LARGO/2.
DO 200 I=1,2
A = XA(I) * LARGO1
DO 200 K=1,2
B = XA(K) * ANCHO1
A1 = A
B1 = B
IF (A,EG.B) GO TO 250
A1 = AMAXI(A,B)
B1 = AMINI(A,B)
250 CONTINUE
    
```

FILE: C1 C1 A1 EPTISA.- PROCESO DE DATOS.- CMS

```

250 CONTINUE
ENE = A1/B1
CALL ASIEN(EN, DELTAC, B1, Z1, Z2, ALFA, BETA, ASIEN1, ASIEN2, ENE)
DDELTA = DDELTA + (ASIEN1-ASIEN2)
200 CONTINUE
RETURN
END
    
```

```

FLA03320
FLA03330
FLA03340
FLA03350
FLA03360
FLA03370
FLA03380
    
```

FILE: E1 E1 A1 EPTISA.- PROCESO DE DATOS.- CMS

```

SUBROUTINE SIGMA (SIGMZ, SIGHX, SIGHY, ANCHO, LARGO, ZH, CARGAM)
REAL LARGO
DATA PI/3.141592/
R1=SQRT(LARGO*LARGO+ZH*ZH)
R2=SQRT(ANCHO*ANCHO+ZH*ZH)
R3=SQRT(R1*R1+ANCHO*ANCHO)
CONST=ATAN(LARGO*ANCHO/(R3*ZH))
SIGMZ=CARGAM/(2*PI)*(CONST+ANCHO*LARGO+ZH/R3*(1/(R1*R1)+1/(R2*R2)))
SIGHX=CARGAM/(2*PI)*(CONST-ANCHO*LARGO+ZH/(R3*R1*R1))
SIGHY=CARGAM/(2*PI)*(CONST-ANCHO*LARGO+ZH/(R3*R2*R2))
RETURN
END
    
```

```

FLA03930
FLA03940
FLA03950
FLA03960
FLA03970
FLA03980
FLA03990
FLA04000
FLA04010
FLA04020
FLA04030
FLA04040
FLA04050
FLA04060
FLA04070
FLA04080
FLA04090
FLA04100
FLA04110
    
```

FILE: I1 I1 A1 EPTISA.- PROCESO DE DATOS.- CMS

```

SUBROUTINE ASIEN (EM, DELTAC, ANCHO1, Z1, Z2, ALFA, BETA, ASIEN1, ASIEN2,
ENE)
DATA PI/3.141592/
EME1=Z1/ANCHO1
EME2=Z2/ANCHO1
RAIZ=SQRT(1+ENE*EME1+EME2*EME2)
F1=F11(ENE, RAIZ)
F2=F12(ENE, EME2, RAIZ)
ASIEN1=(DELTAC, ANCHO1, ALFA, BETA, F1, F2, EM)
RAIZ=SQRT(1+ENE*EME1+EME1)
IF (EME1.EQ.0) GO TO 10
F1=F11(ENE, RAIZ)
F2=F12(ENE, EME1, RAIZ)
ASIEN1=(DELTAC, ANCHO1, ALFA, BETA, F1, F2, EM)
RETURN
10 ASIEN1=(DELTAC, ANCHO1, ALFA, PI/EM*(ENE+ALOG((1+RAIZ)/EME)+ALOG(EME-
RAIZ)))
RETURN
END
    
```

```

FLA03390
FLA03400
FLA03410
FLA03420
FLA03430
FLA03440
FLA03450
FLA03460
FLA03470
FLA03480
FLA03490
FLA03500
FLA03510
FLA03520
FLA03530
FLA03540
FLA03550
FLA03560
FLA03570
FLA03580
FLA03590
FLA03600
FLA03610
FLA03620
FLA03630
    
```

FILE: F1 F1 A1 EPTISA.- PROCESO DE DATOS.- CMS

```

FUNCTION F11 (ENE, RAIZ)
DATA PI/3.141592/
F11=(1/PI)*(ALOG((RAIZ+ENE)/(RAIZ-ENE))+ENE*ALOG((RAIZ+1)/(RAIZ-1)))
RETURN
END
    
```

```

FLA04120
FLA04130
FLA04140
FLA04150
FLA04160
FLA04170
FLA04180
FLA04190
FLA04200
FLA04210
FLA04220
FLA04230
    
```

FILE: D1 D1 A1 EPTISA.- PROCESO DE DATOS.- CMS

```

SUBROUTINE MODULO (K, N, PATH, COHE, FI, RF, SIGMA1, SIGMA3, INDCOH, INDPOR,
SIGMED, EM, INDI2)
REAL K, N, INDCOH, INDPOR
IF (INDI2.EQ.2) GO TO 10
CASO DE MODELO HIPERBOLICO
DESV=SIGMA1-SIGMA3
EI=K*PATH*(ABB(SIGMA3/PATH))**N
EME1=(1-RF*(1-SIN(FI)))*DESV/2/(COHE*COS(FI)+SIGMA3*SIN(FI))**2
RETURN
CASO DE MODELO EDOMETRICU
10 SIGMA0=SIGMED
DELSIG=SIGMA1-SIGMA0
EM=DELSIG*(1+INDPOR)/INDCOH*ALOG10(1+DELSIG/SIGMA0)
RETURN
END
    
```

```

FLA03640
FLA03650
FLA03660
FLA03670
FLA03680
FLA03690
FLA03700
FLA03710
FLA03720
FLA03730
FLA03740
FLA03750
FLA03760
FLA03770
FLA03780
FLA03790
FLA03800
FLA03810
FLA03820
FLA03830
FLA03840
FLA03850
FLA03860
FLA03870
FLA03880
FLA03890
FLA03900
FLA03910
FLA03920
    
```

FILE: G1 G1 A1 EPTISA.- PROCESO DE DATOS.- CMS

```

FUNCTION F12 (ENE, EME, RAIZ)
DATA PI/3.141592/
F12=EME/PI*ATAN(ENE/(EME+RAIZ))
RETURN
END
    
```

```

FLA04240
FLA04250
FLA04260
FLA04270
FLA04280
FLA04290
FLA04300
FLA04310
FLA04320
FLA04330
FLA04340
    
```

FILE: H1 H1 A1 EPTISA.- PROCESO DE DATOS.- CMS

```

SUBROUTINE S (DELTAC, ANCHO, ALFA, BETA, F1, F2, EM)
S=DELTAC*ANCHO*(F1+ALFA-F2*BETA)/(EM*2)
RETURN
END
    
```

```

FLA04350
FLA04360
FLA04370
FLA04380
FLA04390
FLA04400
FLA04410
FLA04420
FLA04430
FLA04440
    
```

REFERENCIAS

1. E. E. Alonso. "Toma de muestras en sondeos de reconocimiento geotécnico en España", *E.T.S. d'Enginyers de Camins, Canals i Ports. Universitat Politècnica de Barcelona*. Publicació n.º GT-06, 1980.
2. L. Bjerrum y A. Eggestad. "Interpretation of Loading Tests on Sand", *Proc. of European CSMFE*, Wiesbaden, 1963.
3. J. B. Burland. Discussion, *Proc. 8th ICOSMFE*, Moscú, 1973.
4. W. D. Carrier y J. T. Christian. "Rigid Circular Plate Resting on a Non-Homogeneous Elastic Half-Space", *Geotechnique*, 23, N.º 1, Marzo 1973.
5. D. J. D'Appolonia y T. W. Lambe. "Method for Predicting Initial Settlement", *Journal S.M. Div.*, ASCE 96, GT-2, Febrero, 1970.
6. D. J. D'Appolonia, E. D'Appolonia y R. T. Brisette. "Settlement of Spread Footings on Sand", *Journal S.M. Div.*, ASCE 94, GT-5, Mayo 1968.
7. E. H. Davis y H. G. Poulos. "The Use of Elastic Theory for Settlement Prediction under Three-Dimensional Conditions", *Geotechnique* 18, N.º 1, Marzo, 1968.

8. R. T. Donaghe y F. C. Townsend. "Scalping and Replacement Effects on the Compaction Characteristics of Earth-Rock Mixtures. Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing", *A.S.T.M.* STP-599, 1976.
9. J. M. Duncan y Y. Y. Chang. "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils". *Journal S.M. Div.*, ASCE 96, GT-10, Septiembre, 1970.
10. J. Fedá. "Stress in Subsoil and Methods of Final Settlement Calculation", *Developments in Geotech. Engng.*, Vol. 18, Elsevier, Praga, 1978.
11. S. Gosh y E. Wilson. "Dynamic Stress Analysis of Axisimetric Structures under Arbitrary Loading", Report No. EERC 69-10, *University of California*, Berkeley, 1975.
12. V. H. Huang. "Stresses and Displacements in Nonlinear Soil Mech.", *Journal S.M. Div.*, ASCE 94, GT-1, Enero 1968.
13. J. A. Jiménez Salas. "Soil Sampling", *General Report Special Session on Soil Sampling*, IX. ICOSMFE, Tokyo, 1977.
14. R. L. Kondner. "Hyperbolic Stress-Strain Response in Cohesive Soils", *Journal S.M. Div.*, ASCE 89, GT-2, Febrero, 1963.
15. R. L. Kondner y J. S. Zelasko. "A Hyperbolic Stress-Strain Formulation of Sands", *Proc. of the 2nd Panamerican CSMFE*, Vol. 1, Brasil, 1963.
16. L. Mênard. "Calcul de la Force Portant des Foundations sur la Base de Résultats des Essais Pressiometriques", *Sols-Soils*, Vol. II, NO 5 y 6, 1963.
17. L. Mênard. "Le Tassement des Foundations et les Techniques Experimentaux", *Annales de L'I.T.B.T.P.*, 1971.
18. R. L. Schiffman y B. D. Aggarwala. "Stress and Displacements Produced in a Semi-Infinite Elastic Soil by a Rigid Elliptical Footing", *Proc. 5th. ICOSMFE*, Vol. 1, París.
19. K. Terzaghi y R. B. Peck. "Soil Mechanics in Engineering Practice", *John Willey & Sons*, Nueva York, 1967.
20. K. S. Wong y J. M. Duncan. "Hyperbolic Stress-Strain Parameter for Non-linear Finite Analyses of Stresses and Movements in Soil Masses", Rep. n.º TE-74-3, *National Science Foundation*, Univ. of California, Berkeley, 1974.