

*Sociedad Ecuatoriana de Mecánica de Suelos y Rocas  
y El Instituto de Investigación y Estudios Avanzados  
de la Universidad de Guayaquil*

## **Seminario Ecuatoriano de Suelos Trópico - Andinos**

---

UN ASPECTO DE LA APLICACION DEL METODO DE  
ELEMENTOS FINITOS EN LAS CONSTRUCCIONES  
SOBRE SUELOS COHESIVOS SUAVES



# **MEMORIA**

**GUAYAQUIL, JULIO 1977**

## UN ASPECTO DE LA APLICACION DEL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS EN LAS CONSTRUCCIONES SOBRE SUELOS COHESIVOS SUAVES

Por: Gianfranco Perri \*

### P R O L O G O

Debido a mi falta de experiencia directa en el estudio de los problemas referentes a suelos tropicales, y para responder a la apreciada petición de participación recibida por parte del directivo del Seminario, presento esta que considero una pequeña contribución a la amplia problemática propuesta.

El análisis de tensiones-deformaciones en la simulación de las fases de construcción de un relleno para carretera sobre suelos cohesivos suaves tratado en esta nota, hace parte de un estudio mucho más amplio que, sobre el empleo del método de los elementos finitos para estudios geotécnicos, se ha conducido y sigue conduciendo en el Politécnico de Turin - el Profesor Giovanni Barla Ph. D. y Profesor de la Columbia University de New York.

Personalmente he tomado parte como colaborador en las investigaciones del Profesor Barla durante unos años, antes de mi llegada al Ecuador, - tiempo en el cual fué también estudiado el problema que a continuación se presenta.

---

\* Dr. Ing. Gianfranco Perri, Profesor de Geotecnia en el Departamento - de Ingeniería de Geología, Minas y Petróleos de la ESPOL.

## EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS Y LA SIMULACION DE LAS FASES DE CONSTRUCCION DE UNA OBRA

Se trata de un método que consiste en una aproximación simplemente física del problema. La estructura en estudio es substituida por una estructura físicamente equivalente dividida en elementos de diferentes formas "los elementos finitos", ligados en puntos llamados nudos. Este último, entre los métodos a disposición, es el que empleado preferencialmente en Geotecnia, sobretodo por la versatilidad que tiene en el estudio de estructuras con características geométricas y comportamiento físico de los materiales muy complejos.

La posibilidad de simular con el FEM las diferentes fases de la construcción de una estructura es otro aspecto de notable interés de la aplicación del método en el estudio de obra construida sobre suelos cohesivos suaves.

A este propósito los diferentes tipos de simulación están ilustrados en el Figura 1:

- a) las cargas, correspondientes a diferentes estratos de la construcción de un relleno de carretera están aplicadas una después de la otra sobre la superficie superior del suelo, de tal manera se despreja obviamente la influencia sobre el resultado final, de la presencia de la obra y luego su rigidéz;
- b) La estructura y el suelo son ambos tomados en cuenta en la elaboración del modelo a elementos finitos y las cargas correspondientes a los varios estratos están aplicadas por incrementos o totalmente, sobre los nudos del nuevo retículo de elementos finitos; este procedimiento considera entonces que la obra está siempre presente y que luego ofrece una contribución a la rigidez total del modelo;

c) La sucesión de las diferentes fases a tomarse en cuenta consiste en los siguientes pasos:

- I.- Se aplican las cargas correspondientes al primer incremento, o al primer estrato en construcción, y se evalúan las tensiones y las deformaciones en el suelo;
- II.- Los elementos, pertenecientes a la zona de material recién tomado en cuenta como carga, son añadidos al modelo de manera de contribuir con su rigidez;
- III.- Se aplica el nuevo estrato de carga sobre el modelo así obtenido y se calcula otra vez las tensiones y las deformaciones en el suelo;
- IV.- Se repite para las diferentes fases, el procedimiento indicado en II y III hasta terminar la construcción de la obra.

#### RESULTADOS DE LA APLICACION DEL METODO

Se trata de un relleno de carretera, con características experimentales construido hasta una altura de 3,50 mts. con una rapidéz tal de no permitir una apreciable disipación de las sobrepresiones intersticiales. Sucesivamente, después de un período de espera (55) días, el relleno ha sido llevado hasta 7 mts., después de que se ha tenido una imprevista rotura que se puede esquematizar en el modo ilustrado en la figura 2b.

El terreno de fundación está constituido de: desde la superficie a 8.8 mts., un estrato de arcilla limosa tierna con una costra reseca de cerca de 4 mts. de espesor; bajo los 8,8 mts. se encuentra arena y grava.

Las propiedades índices del terreno (contenido de agua y peso de volumen natural), la resistencia al corte en condiciones no drenadas  $C_u$  - y el módulo edométrico  $E_{ed}$  determinados sobre muestras tomadas a diversas profundidades, están dados en la figura No. 3

El modelo a elementos finitos empleado en el presente análisis es representativo en la figura 4. Este está constituido de elementos triangulares (CST) y cuadrangulares (4 CST). Las condiciones de vínculo introducido en el cálculo consisten en imponer fijos los puntos nodales a lo largo de el lado (BC) y móviles, en la sola dirección vertical, - aquellos a lo largo de (AB) y (CD).

El programa empleado en el cálculo tiene aquí en cuenta también la contribución de la rigidez del relleno. La simulación de la construcción es por tanto realizada en modo incremental recurriendo a 10 incrementos de carga (procedimiento 2 antes descrito). Las características de resistencia al corte, definidas ahora por la sola  $C_u(Z)$ , son tomadas en cuenta según el esquema ilustrado en la figura 4, donde se trata - de seguir en forma discreta la curva interpoladora dada por:

$$C_u(Z) = 0.24 Z + 7.0 \exp \left( -\left(\frac{Z}{2.54}\right)^2 \right)$$

sobre la base de las curvas  $C_u(Z)$  y de los resultados de algunas pruebas triaxiales de tipo UU (realizadas sobre muestras tomadas a 5 mts. de profundidad) que han dado valores de  $E_{tu}$  comprendidos entre 30 y 50  $\text{Kg/cm}^2$ , parece aceptable la siguiente hipótesis para  $E_{tu}$

$$E_{tu}(Z) = 150 C_u(Z)$$

La relación de Poisson del terreno es puesta igual a 0.450. Los valores del coeficiente  $K_0$  son aquellos indicados en la figura 4. La ley del comportamiento es representada por una bilínea, donde la inclinación del segundo tramo vale  $10^{-2} E_{tu}$ . Algunos de los resultados obtenidos por el cálculo son ilustrados en las figuras 4-8. Estos permiten de hacer las observaciones resumidas en seguida:

1.- Cuando el relleno alcanza 2.1 mts. de altura se determina en el terreno de fundación, una amplia zona de plasticización que se propaga gradualmente hasta detenerse en proximidad de la costra reseca y proseguir entonces casi paralelamente a la intercara entre terreno suave y estrato subsiguiente de arena y grava. Esta zona de plasticización tiene origen cerca de 5.5 mts. de profundidad, donde se verifican los valores más elevados del coeficiente de movilización de la resistencia al corte.

2.- Las deformaciones horizontales ( $E_r$ ) en el terreno permiten distinguir para el elemento genérico en la zona bajo el relleno, una expansión lateral, cuyos valores máximos se tienen cerca del área de carga sufre en cambio una contracción lateral. Los desplazamientos horizontales ( $U_r$ ) mayores se verifican a lo largo de la vertical pasante por el pié del relleno con un máximo en la profundidad de cerca de 4.5 mts.

3.- La comparación entre los asentamientos inmediatos calculados en proximidad a la base del relleno y aquellas medidas pone en evidencia una buena concordancia que viene sin embargo disminuida cuando la altura del relleno supera los 2.1 mts. Por cuanto el cálculo con FEM permita de observar un característico comportamiento no lineal, asentamiento medido aumenta considerablemente al aumentar la altura del relleno alejándose así del valor calculado.

- FIG. 1.- Procedimientos comunmente empleados con el fin de simular con el FEM las fases de la construcción de un relleno.
- FIG. 2.- Propiedades índices, cohesión no drenada y módulo edométrico determinados sobre muestras de suelos tomadas a diferentes profundidades.
- FIG. 3.- Modelos a elementos finitos y condiciones de contorno. Ley de variación de la cohesión no drenada  $C_u$  y del módulo de deformación  $E_{tu}$ .
- FIG. 4.- Zonas de plasticización que se desarrollan en el suelo cuando aumenta la altura del relleno. Cálculos hechos con el FEM.
- FIG. 5.- Coeficiente de movilización de la resistencia al corte. Las zonas con rayas representan áreas de plasticización.
- FIG. 6.- Deformación horizontal (por  $10^3$ ) en el suelo calculada con el FEM.
- FIG. 7.- Desplazamientos horizontales calculados con el FEM a lo largo de direcciones verticales preestablecidas. Diferencias entre el cálculo elástico lineal y el elástico no lineal.
- FIG. 8.- Asentamiento inmediato en la cercanía de la base de relleno. Diferencias entre los valores calculados con el FEM y aquellos medidos.

#### Bibliografía

- Balby, W.A.: *Stability analysis by limiting equilibrium*, C.E. Thesis, M.I.T., 1964.
- Baria, G.: *Mecanica delle rocce - Teoria ed applicazioni*, Parte Prima, CLUT, Torino, 1973.
- Baria, G., Cornati, C., Crivara, M. e Gianì, G.: *L'applicazione del metodo dell'equilibrio limite nello studio dei pendii naturali e delle scarpate*, Politecnico di Torino, 1974.
- Bell, J.M.: *Nonlinear sliding surfaces*, J. Soil Mech. Found. Div., Vol. 95, 1968.
- Bishop, A.W.: *The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes*, Geotechnique, Vol. 5, 1955.
- Burgell, F.R.S.: *Analysis of a trial embankment on soft ground*, M. Sc. Thesis, University of London, 1972.
- Christian, J.T.: *Finite element deformation analysis*, M.I.T. Soils Publication 205, 1971.
- Christian, J.T. e Boshner, J.W.: *Plane strain consolidation by finite elements*, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 96, SM4, 1970.
- Clough, R.W. e Woodward, R.J.: *Analysis of embankment stresses and deformations*, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 93, SM4, 1967.
- D'Appolonia, D.J. e Lamb, T.W.: *Method for predicting initial settlement*, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 96, SM2, 1970.
- Desai, S.C. e Abel, J.F.: *Introduction to the finite element method. A numerical method for engineering analysis*, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1972.
- Duncan, J.M. e Cheng, C.Y.: *Non-linear analysis of stress and strain in soils*, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 90, SM5, 1964.
- Hsiung, C.C. e Christian, J.T.: *Extended lesson-1, An ICES Sub-system*, Final report, M.I.T. Soils Publication 234, 1968.
- Irons, B.M. e Zienkiewicz, O.C.: *The isoparametric finite element system - A new concept in finite element analysis*, Proceedings, Conference on Recent Advances in Stress Analysis, Royal Aero. Soc., 1968.
- Jones, C.H.C., Erick, R.J. e Sahr, W.M.: *Bearing capacity of purely cohesive soils with a non-homogeneous strength distribution*, Highway research record, 222, 1968.
- Joub, M.: *An advanced method of slope stability analysis*, Lecture of an Extension Course at UCLA, University of California, Berkeley, 1968.
- Kondner, R.L.: *Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils*, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 89, SM1, 1963.
- Lambe, T.W.: *Up-to-date methods of investigating the strength and deformability of soils (laboratory and field testing of soils for their strength, deformative and rheological properties)*, Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, General report, Session 1, 1973.
- Morgenstern, N.R. e Price, V.E.: *The analysis of the stability of general slip surfaces*, Geotechnique, Vol. XV, 1965.
- Simon, R.M., Ladd, C.C. e Christian, J.T.: *Finite element program FEECON for undrained deformation analyses of granular embankments on soft clay foundations*, M.I.T. Soils Publication N. 294,

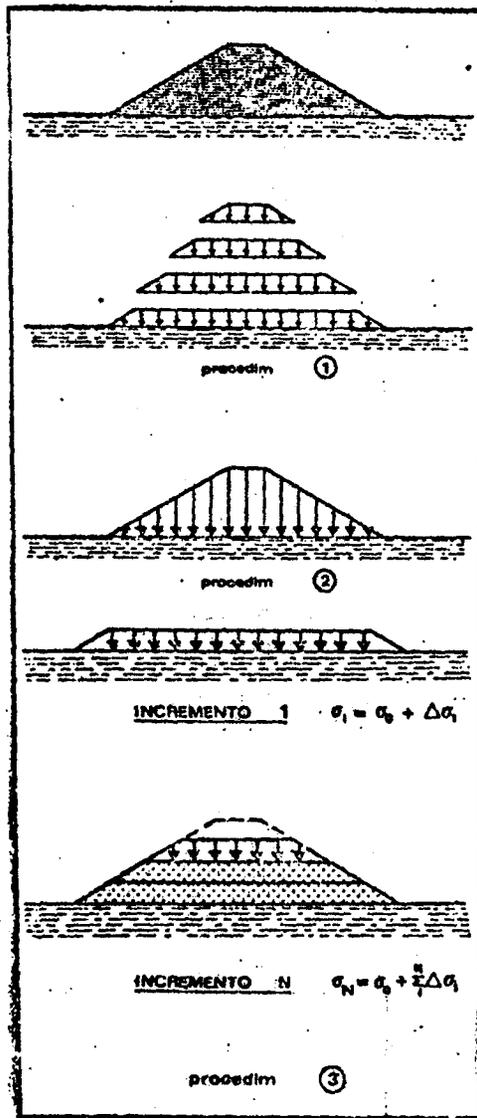


FIG. 1

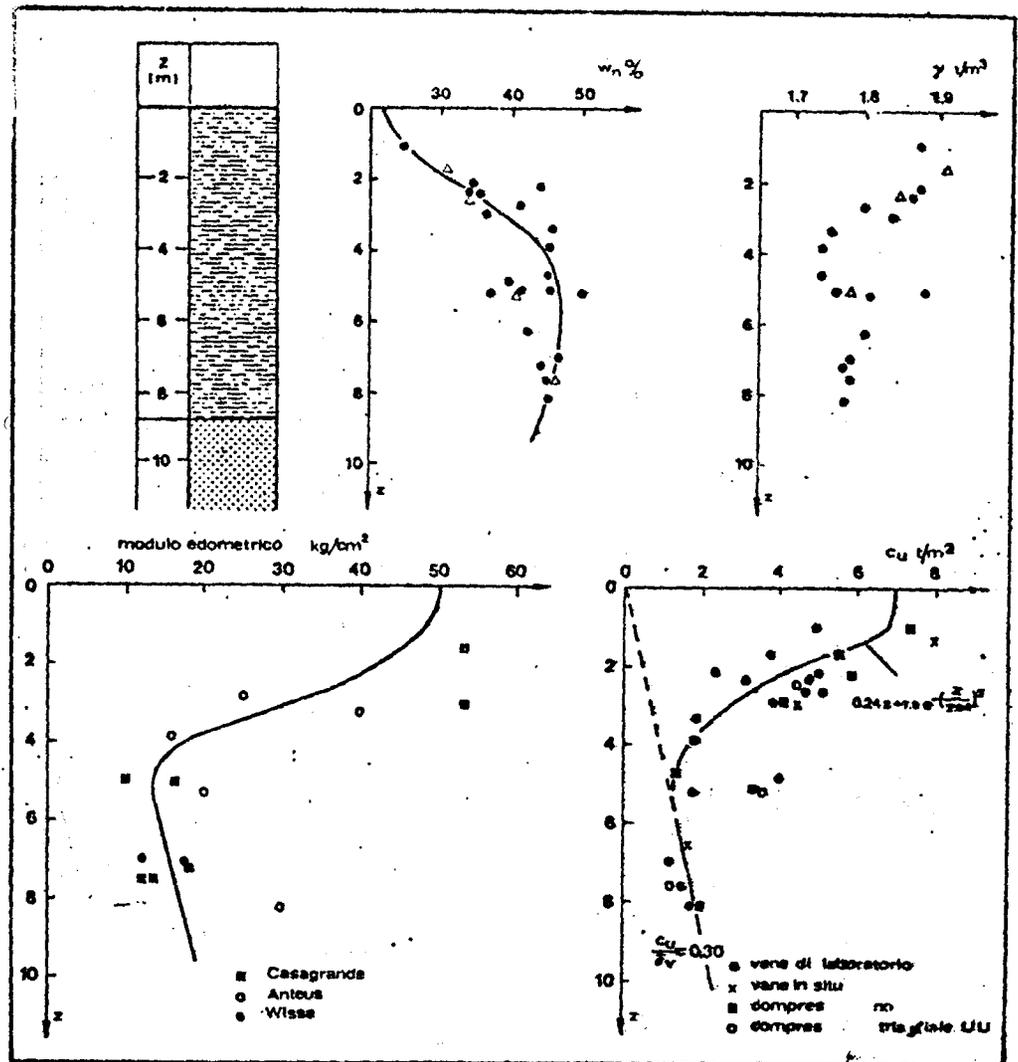


FIG. 2

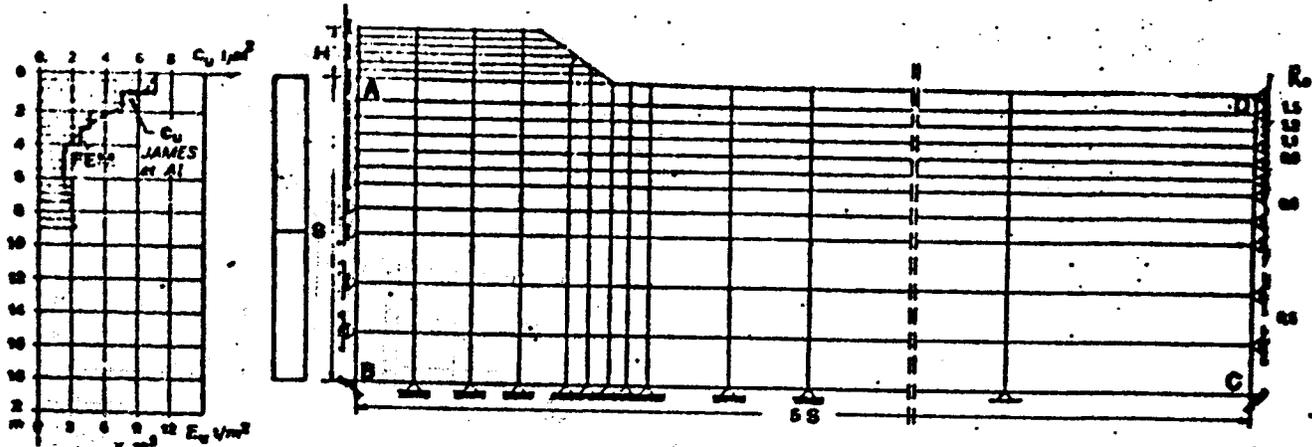


FIG. 3

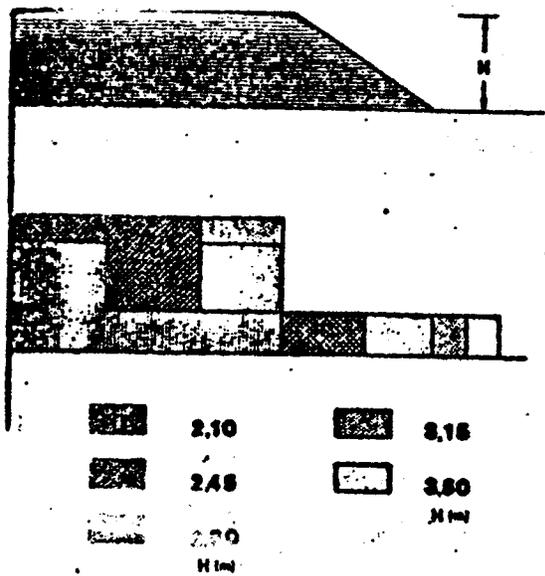


FIG. 4

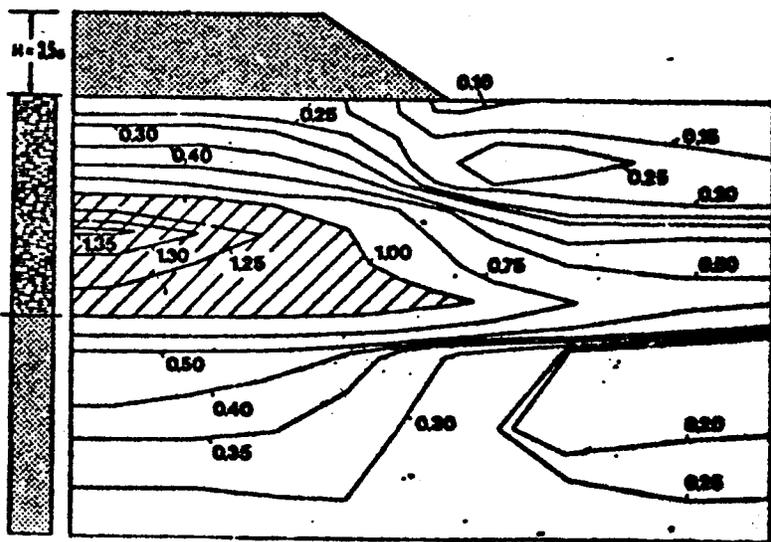


FIG. 5

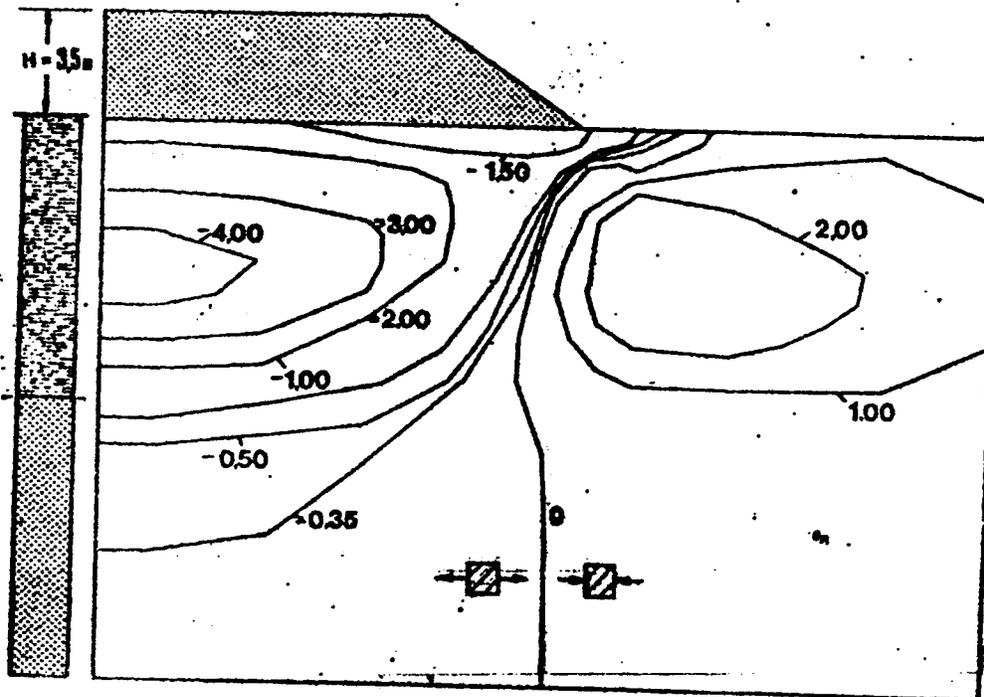


FIG. 6

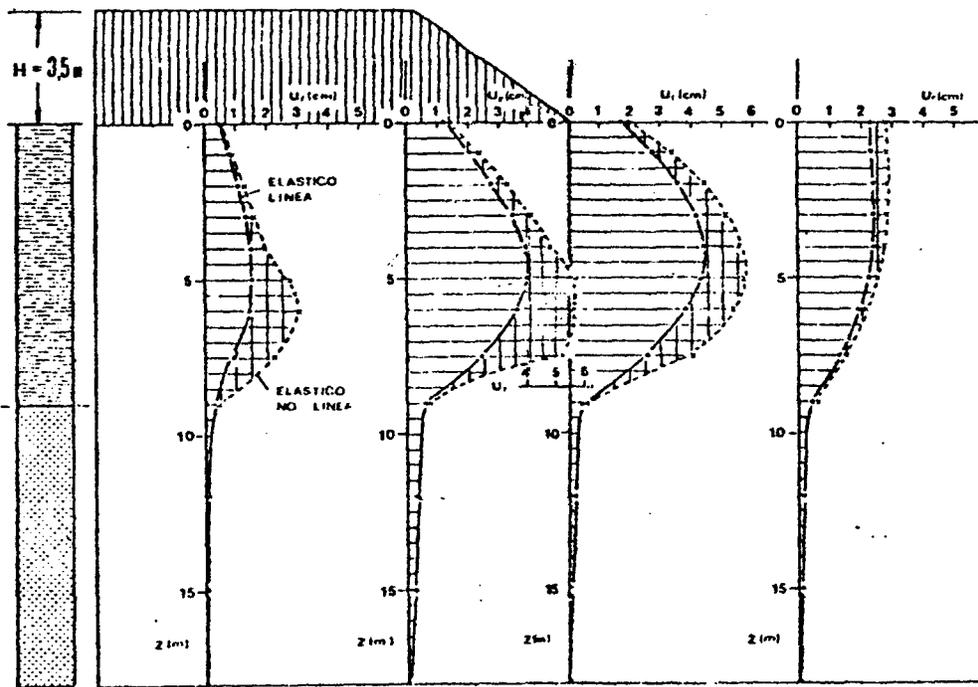


FIG. 7

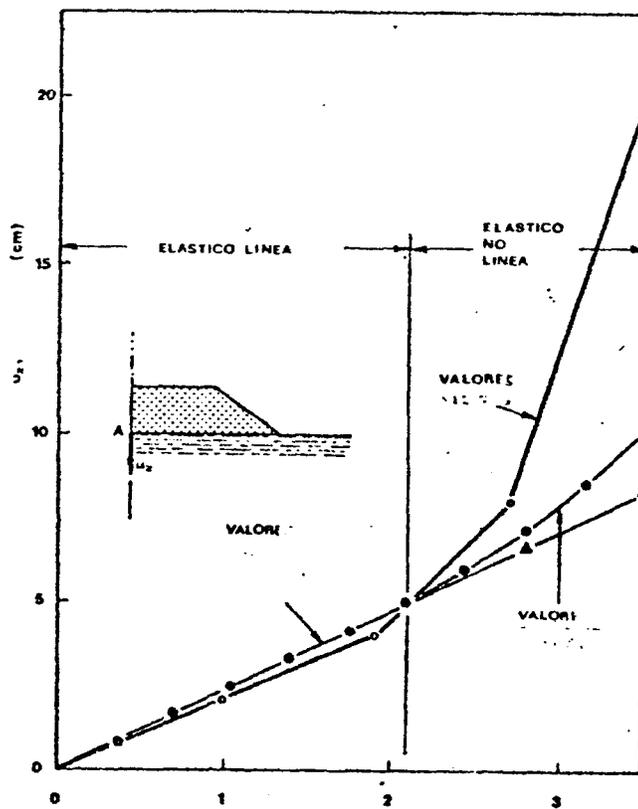


FIG. 8