

GEOMECC

BOLETIN DE DIVULGACION GEOTECNICA

EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS
EN LAS APLICACIONES GEOTECNICAS
"ANALISIS DE ASENTAMIENTOS DE FUNDACIONES"

GIANFRANCO PERRI Y NELSON RODRÍGUEZ



Nº

9

MARZO, 1982

CARACAS

Se presentan cinco ejemplos de aplicación del método de los Elementos Finitos a problemas geotécnicos, con referencia específica al análisis de los asentamientos que se producen en las fundaciones de las estructuras: fundaciones directas (zapatas y placas) y fundaciones profundas (pilotes).

A manera de introducción también se resumen los principios básicos del MEF, para aquellos lectores que no estén familiarizados con la materia y que no han tenido la oportunidad de conocer el contenido de los números anteriores de este boletín (Nos. 1, 3, 4 y 7) enteramente dedicados al tema.

Cabe también señalar que el contenido que se presenta refleja parte de la exposición que el profesor Gianfranco Perri realizó sobre el tema, durante el dictado de una conferencia en la Sede del Colegio de Ingenieros de Venezuela el día 01-09-81, organizada por la Sociedad Venezolana de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones.

Caracas, marzo de 1982

EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS
EN LAS APLICACIONES GEOTECNICAS
"ANALISIS DE ASENTAMIENTOS DE FUNDACIONES"

POR:

GIANFRANCO PERRI (*) Y NELSON RODRIGUEZ (**)

(*) Profesor de Mecánica de Rocas en la U.C.V.

(**) Profesor de Obras de Tierra en la U.C.V.

EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El problema central es, el de determinar el estado de soli citación y deformación en una estructura continua sujeta a determinadas condiciones de borde.

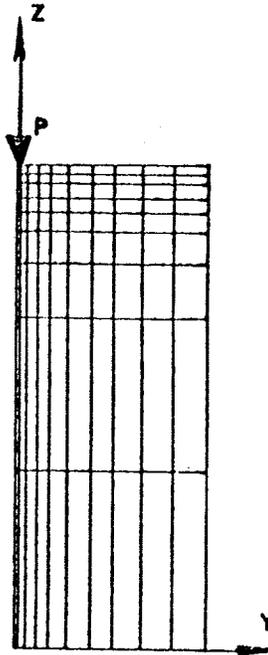
Lo primero que debe hacerse es dividir idealmente el contin uo en elementos finitos, sustituyendo de tal forma a la est ructura dada, por una estructura formada por muchos elementos de formas diferentes, oportunamente conectados entre ellos. Si la estructura en examen es de tipo tridimensional, ella deberá ser dividida en elementos tridimensionales. Si en cambio se tiene una estructura con un eje de simetría geomét rica y con cargas a simetría radial, los elementos elegidos son por ejemplo, anillos toroidales de sección triangular o rectangular, y finalmente, si la estructura es plana, sea en condiciones de deformación plana, o de esfuerzos planos, el continuo puede ser dividido en elementos planos de diferente forma (triángulos, rectángulos, cuadriláteros, etc.)

En la figura A se muestran ejemplos de idealización de una estructura en elementos finitos de un dado tipo, y para cada uno de los tres casos mencionados, puede observarse que el tip o de elemento a ser usado y el tamaño de la división son generalmente arbitrarios, aunque están ligados a la forma de la estructura, a la precisión que se requiere en el cálculo y al tipo de programa de cálculo disponible.

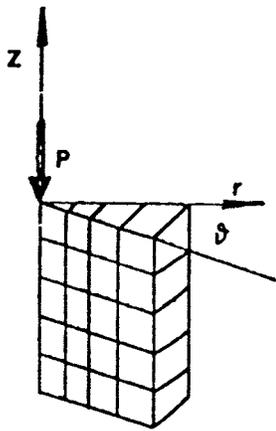
El problema en exámen para una estructura continua es por lo tanto transformado en aquel de una estructura articulada comp letamente equivalente y para la cual pueden ser empleadas las técnicas del análisis estructural.



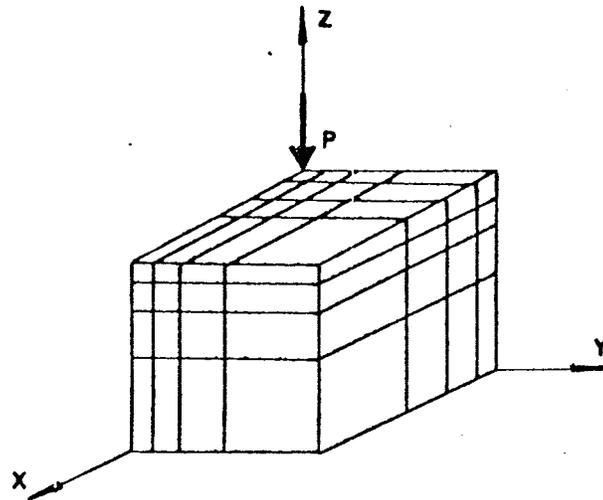
MODELO MONODIMENSIONAL



MODELO PLANO



MODELO AXIALSIMETRICO



MODELO TRIDIMENSIONAL

EJEMPLOS DE IDEALIZACION DE UNA ESTRUCTURA CON ELEMENTOS FINITOS

FIG. A

Vale la pena enfatizar aquí que el método de los elementos finitos, a diferencia de otros métodos numéricos como por ejemplo el de las diferencias finitas, es un método en el cual la aproximación es simplemente física, siendo la solución matemática que sigue extremadamente rigurosa.

Puede fácilmente comprenderse, por analogía con el análisis estructural clásico, que la parte más delicada del método reside en la definición de las características de deformabilidad, o rigidez, de cada elemento finito, las cuales deben respetar las condiciones de compatibilidad entre elementos adyacentes. Esta fase lleva a definir para cada elemento una matriz, denominada matriz de rigidez, la cual es función de la forma, dimensiones y características de deformabilidad del material que constituye el elemento mismo.

Las ecuaciones fundamentales del método de los elementos finitos pueden resumirse en las siguientes:

1) Relación deformaciones - desplazamientos nodales:

$$\{ \epsilon \} = \{ B \} \{ \delta \}$$

que establece la relación entre las deformaciones en el interior de cada elemento $\{ \epsilon \}^e$ y sus desplazamientos nodales $\{ \delta \}^e$. La matriz $\{ B \}$ es:

$$\{ B \} = \{ L \} \{ M \}$$

en donde $\{ L \}$ es el conocido operador diferencial que liga $\{ \epsilon \}$ y los desplazamientos en el interior del elemento $\{ u \}$. y $\{ M \}$ es una matriz cuyos términos son unas funciones prescritas de las coordenadas de los nodos del elemento.

./..

2) Relación esfuerzos-deformaciones:

$$\{ \sigma \}^e = \{ D \} \{ \epsilon \}^e$$

que establece la relación entre los componentes de la solicitación $\{ \sigma \}$ y de la deformación $\{ \epsilon \}$ que es característica del material. $\{ D \}$ es en efecto una matriz - que para un material elástico es función de los módulos de elasticidad del mismo.

3) Ecuación de equilibrio para el elemento:

$$\{ F \}^e = \{ k \}^e \{ \delta \}^e$$

que establece la relación entre las fuerzas nodales $\{ F \}^e$ y los desplazamientos nodales $\{ \delta \}^e$. La matriz $\{ K \}^e$ es la matriz de rigidez del elemento. Es posible demostrar, por ejemplo mediante consideraciones sobre la energía de deformación, que:

$$\{ K \}^e = \int_V \{ B \}^T \{ D \} \{ B \} dv$$

en donde " T " indica matriz traspuesta y " v " es el volumen del elemento.

4) Ecuación de equilibrio para la estructura:

$$\{ R \} = \{ K \} \{ \delta \}$$

que establece, para la estructura completa, la relación - entre las fuerzas $\{ R \}$ y los desplazamientos $\{ \delta \}$ nodales. La matriz $\{ K \}$ es la matriz de rigidez de la estructura y

./..

sus términos pueden ser obtenidos mediante una adecuada superposición de las matrices de rigidez de cada uno de los elementos.

Esta ecuación de equilibrio resulta con respecto a los desplazamientos:

$$\{ \delta \} = \{ K \}^{-1} \{ R \}$$

en donde $\{ K \}^{-1}$ es la matriz inversa de $\{ K \}$.

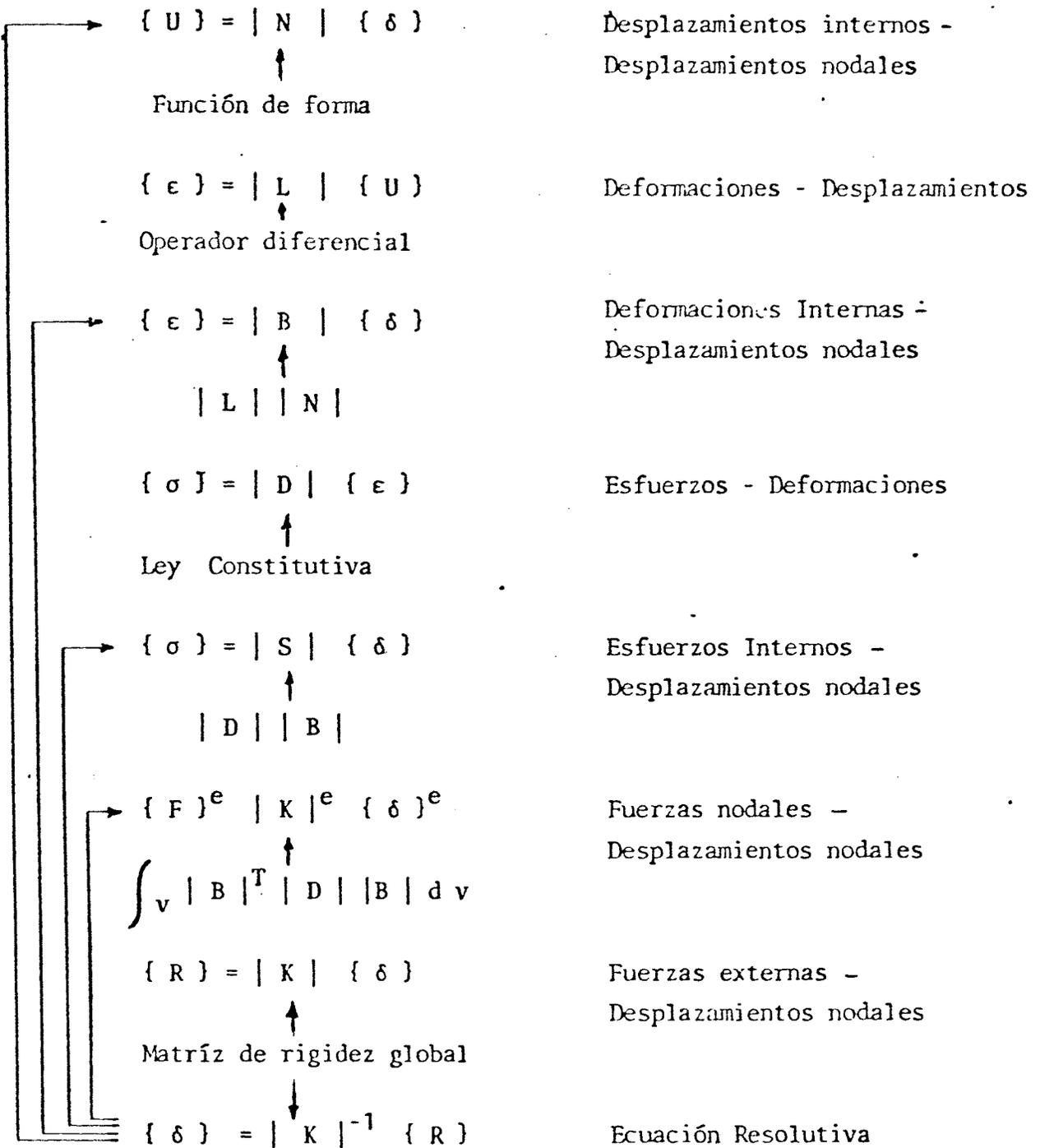
Una vez que se hayan determinado los desplazamientos nodales, mediante la relación (1) se calculan las deformaciones en el interior de cada elemento y de estas, mediante la relación (2), se obtienen las solicitaciones para cada elemento. (ver también la figura B).

El problema matemático fundamental es el cálculo de $\{ K \}^{-1}$, la cual, en general representa una matriz con cientos de términos y no puede ser resuelta por inversión directa. Es por lo tanto necesario hacer recurso a esquemas de solución de tipo numérico para los cuales han sido desarrollados diferentes métodos, los mismos que se encuentran descritos en numerosas publicaciones algunas de las cuales están citadas en la bibliografía.

Para resumir muy brevemente algunas entre las principales características del método de los elementos finitos, y limitándose al campo de la elasticidad lineal, pueden mencionarse que:

- a) El método se presenta especialmente versátil para el estudio de estructuras con geometría compleja como sea, debiéndose en cada caso solamente elegir elementos cu

./..



FORMULAS PRINCIPALES DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS .

ya forma se ajusta mejor para reproducir la estructura dada;

- b) Debido a que la estructura es dividida en elementos y - que para cada una de ellos se efectúa independientemente el cálculo de la matriz de rigidez, es posible tratar con extrema sencillez estructuras no homogéneas;
- c) El estudio de una estructura anisótropa, por ejemplo transversalmente isótropa, no presenta mayores dificultades que una isótropa, debiéndose en este caso solamente definir la nueva matriz $\{ D \}$, o sea la ley constitutiva del material.

El análisis mediante computador se realiza a través de los pasos siguientes. Se divide la estructura a ser examinada en un dado número de elementos, los cuales son numerados consecutivamente. Los puntos nodales de estos elementos, identificados por sus coordenadas referidas a un sistema de ejes arbitrario, también son numerados consecutivamente e independientemente de la numeración anterior. Cada elemento finito es identificado por los puntos nodales que a él pertenecen. Sucesivamente, la estructura así transformada es introducida en la máquina precisando también, para cada elemento, sus características físico-mecánica (peso unitario y deformabilidad), y para cada nodo las condiciones de contorno que deben ser respetadas en la solución (bajo forma de fuerzas o desplazamientos).

El programa de cálculo comienza con el determinar las matrices de rigidez de cada elemento, las cuales luego son superpuestas hasta obtener la matriz de rigidez de la estructura completa. Se introducen las condiciones de contorno en forma de desplazamientos o fuerzas nodales prescritas y se procede a la resolución del sistema de las ecuaciones de equilibrio (esto es fundamentalmente la inversión de la matriz de rigidez global $\{ K \}$).

Se obtienen al fin los desplazamientos y los esfuerzos en toda la estructura, por ejemplo para cada nodo (ver diagrama de flujo en la figura C).

Para completar esta sumaria exposición sobre el método de los elementos finitos (FEM) hace falta mencionar algunos ulteriores alcances, como son su aplicabilidad a estructuras cuyos materiales que la conforman tienen un comportamiento físico más complejo: elástico no lineal, elasto plástico, visco elástico. Así mismo se han estudiado interesantes técnicas que permiten el análisis de estructuras geotécnicas con comportamientos especiales: no resistencia a tracción, presencia de discontinuidades estructurales, efectos de la existencia de flujos hidráulicos, etc. (Ver fig. D).

Las principales limitaciones al uso del MEF están en cambio esquematizadas en la figura E.

A continuación sigue la descripción de cinco ejemplos de aplicación del M.E.F. al análisis de asentamientos de fundación directa y profunda (en zapatas, placas y pilotes de fundación). En todos los ejemplos, el cálculo es llevado a cabo bajo la hipótesis de comportamiento elástico-lineal para los materiales involucrados.

PRINCIPALES ETAPAS EN EL CALCULO CON M.E.F.

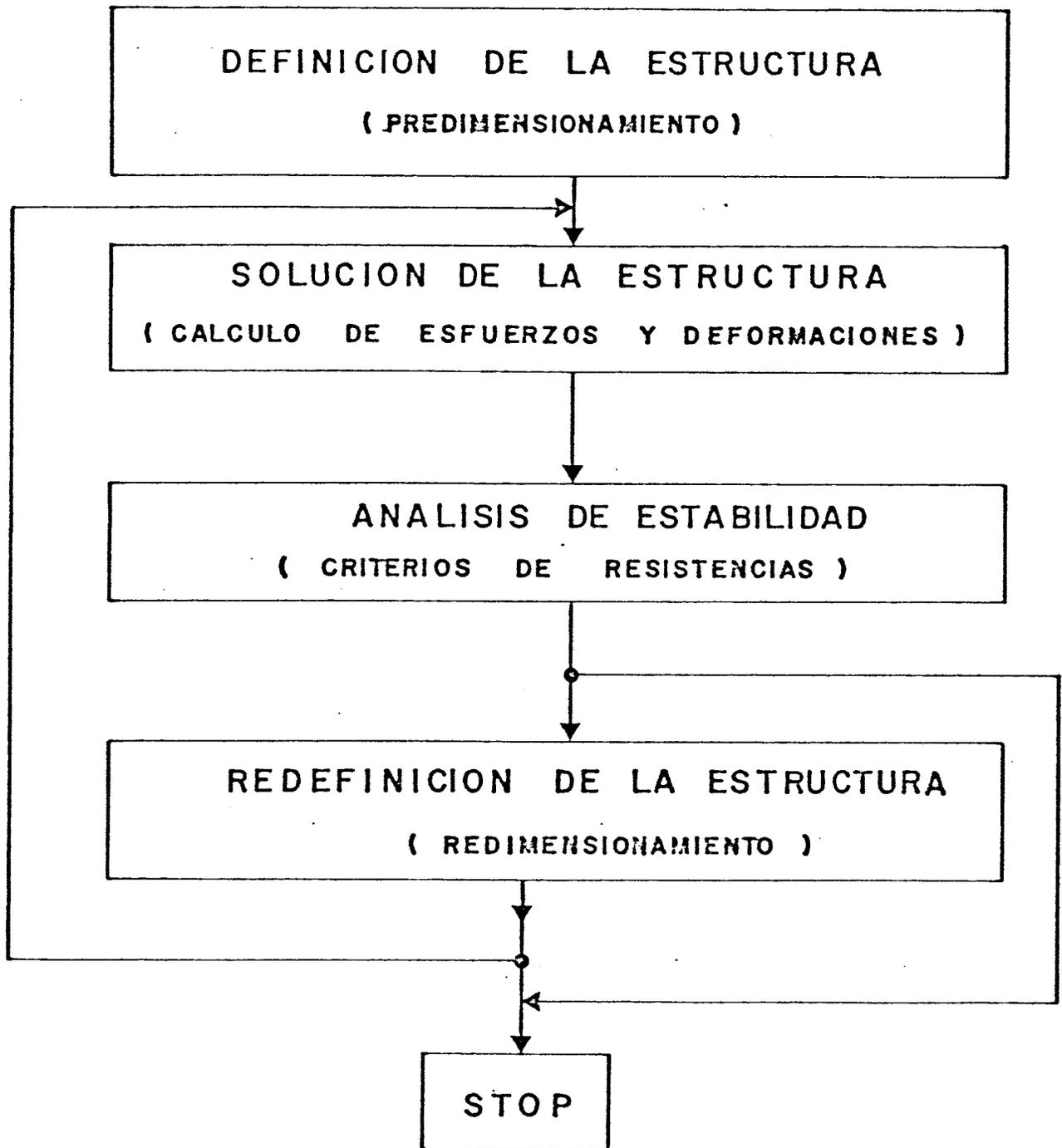


FIG. C

ALCANCES PRINCIPALES DEL M.E.F

- GEOMETRIA CUALQUIERA
- CONDICIONES DE BORDE CUALESQUIERA
- HETEROGENEIDAD Y ANISOTROPIA
- LEYES CONSTITUTIVAS CUALESQUIERA
- EFECTOS TRIDIMENSIONALES
- COMPORTAMIENTOS ESPECIALES:
 - MATERIAL NO RESISTENTE A TRACCION
 - DISCONTINUIDADES ESTRUCTURALES
 - INTERACCION ENTRE ESTRUCTURAS
 - PROBLEMAS DE CAMPO (Flujo en medios porosos)
 - SIMULACION DE FASES CONSTRUCTIVAS
 - ANALISIS PARAMETRICOS
 - INTERPRETACION DE MEDICIONES
 - EFECTOS DINAMICOS

LIMITACIONES PRINCIPALES DEL M.E.F.

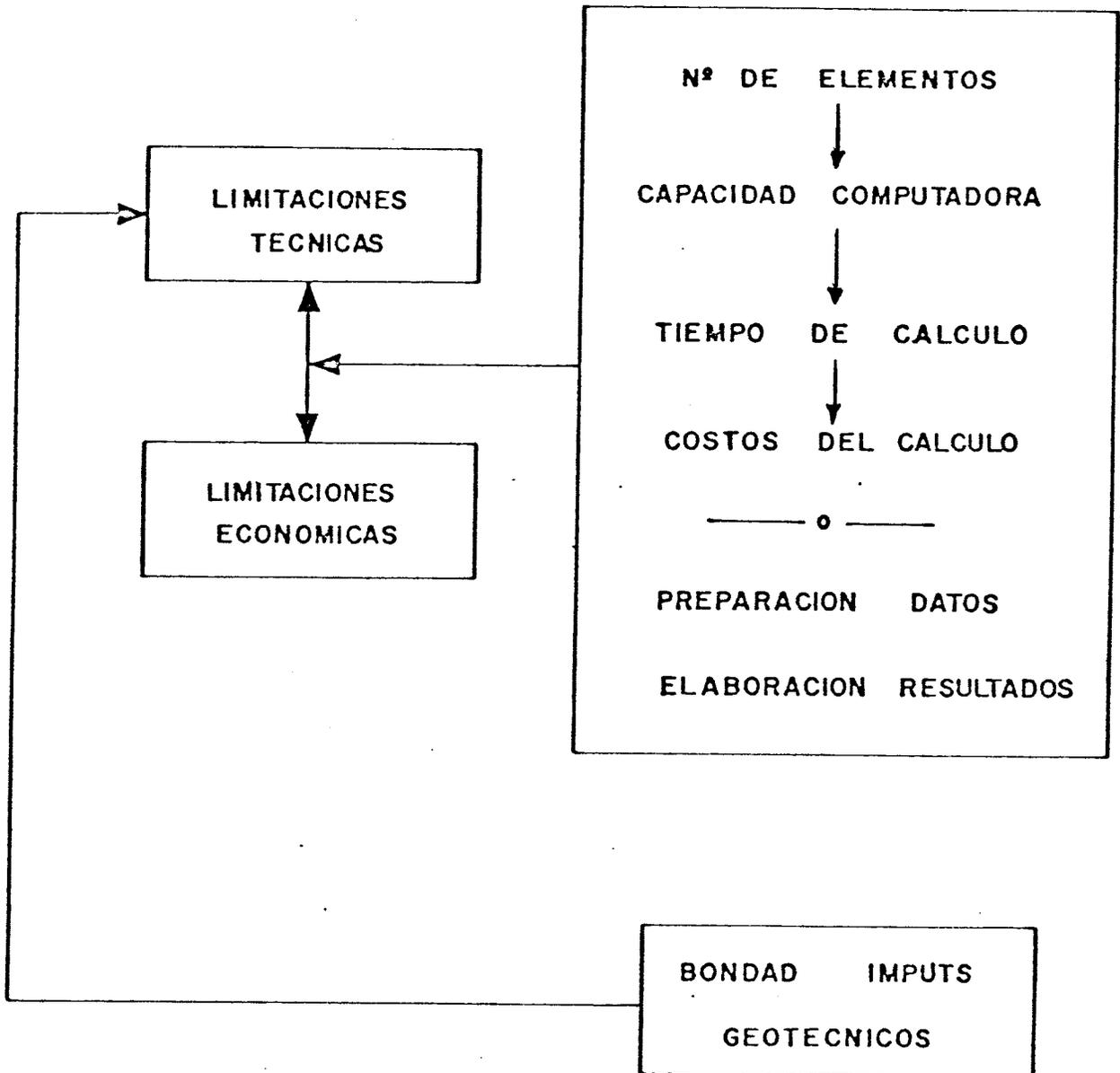


FIG. E

EJEMPLOS Nos. 1 y 2:

ANALISIS DE ASENTAMIENTOS EN PLACAS DE FUNDACION

En ambos ejemplos presentados, con el doble objetivo de evaluar los asentamientos elásticos totales y diferenciales máximos a ser experimentados a nivel de fundación de las estructuras de viviendas, y estimar el módulo de reacción o de balasto del subsuelo a ser sucesivamente utilizado para el diseño estructural de las placas de fundación, se realiza un análisis elástico por elementos finitos.

En ambos casos los elementos usados son cuadrangulares e isótropos y los modelos geomecánicos correspondientes, reproducen la heterogeneidad del terreno en profundidad la cual queda evidenciada al considerar los parámetros de deformabilidad elástica (módulo de elasticidad y de Poisson) correspondientes a cada manto.

Para los casos específicos en análisis, la estratificación del subsuelo es obtenida mediante la elaboración del perfil generalizado del mismo en términos de módulo de elasticidad, partiendo de los resultados del ensayo de resistencia a la penetración standard SPT y de resistencia a la penetración del cono estático.

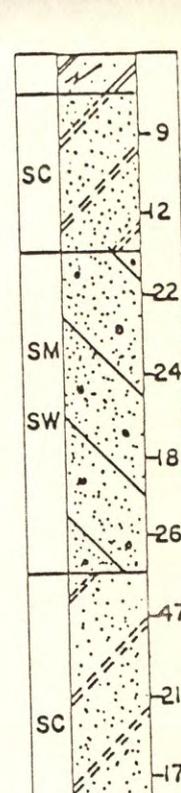
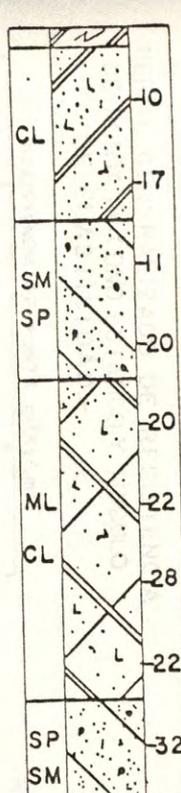
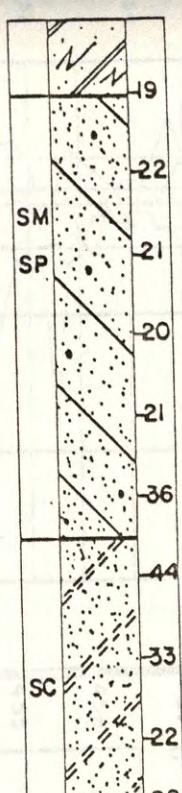
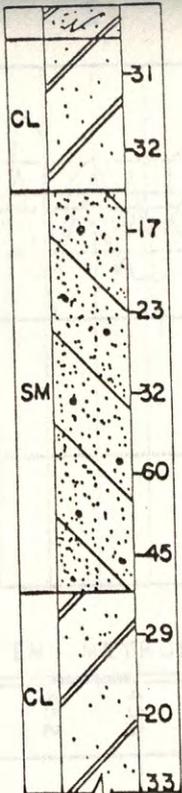
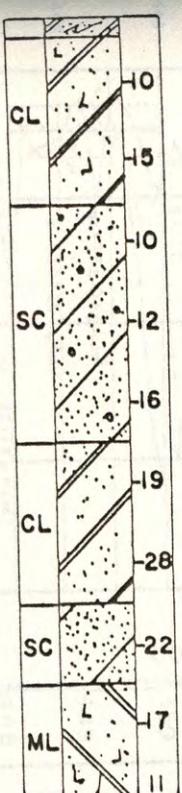
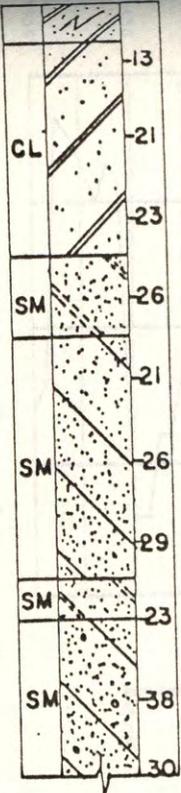
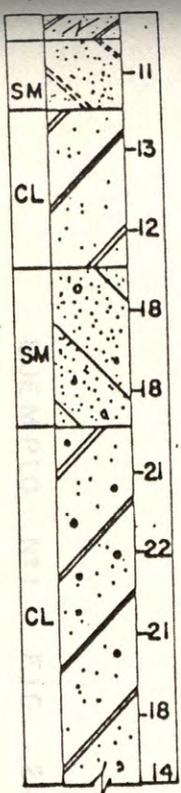
El primer ejemplo se refiere a un terreno ubicado en parcela sobre la carretera Cagua-Grupo Experimental Shell, en Cagua, Edo. Aragua, y el segundo ejemplo se refiere a un terreno ubicado en la Urbanización El Merey en Pariaguan, Edo. Anzoategui.

En ambos casos la solución recomendada para las estructuras de viviendas es la de placa maciza de espesor constante para cada una de las diferentes estructuras tipo previstas.

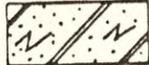
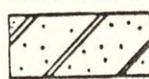
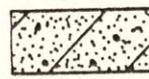
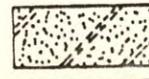
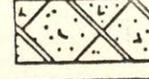
En las figuras de 1 a 4, se presentan los perfiles generalizados

COTAS EN METROS

456
455
454
453
452
451
450
449
448
447
446

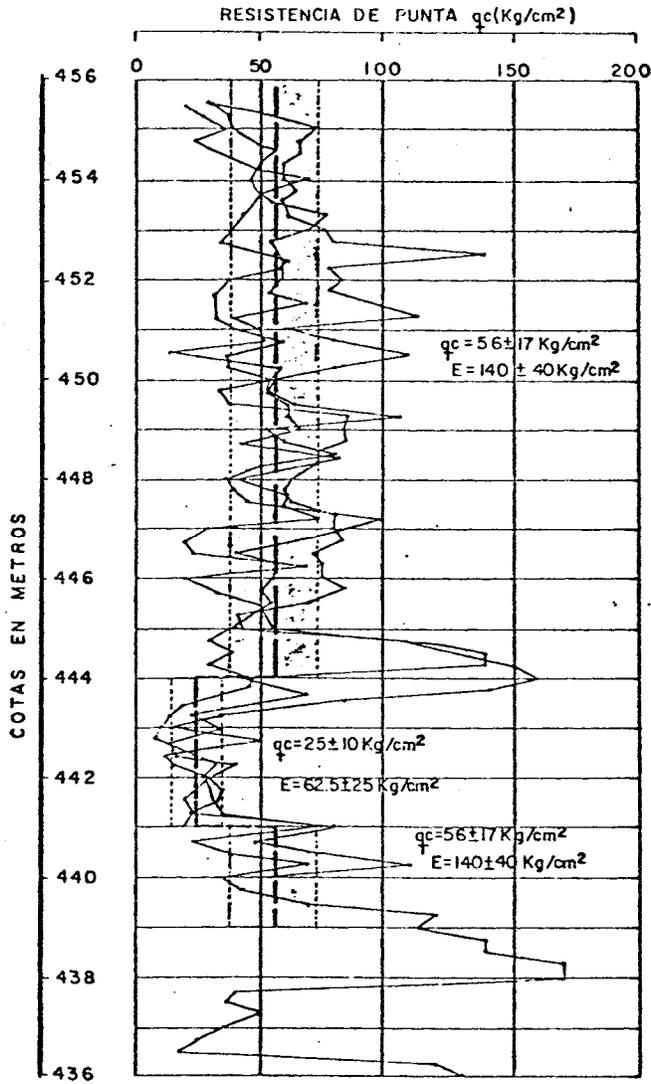


LEYENDA

-  Capa vegetal
-  Arcilla arenosa media a fina de mediana plasticidad. (CL)
-  Arena fina a media arcillosa con bajo porcentaje de grava fina. (SC)
-  Arena fina a media muy arcillosa. (SC)
-  Limo arcilloso muy arenoso fino micaceo. (ML-CL)
-  Arena fina a media poco limosa. (SP-SM)

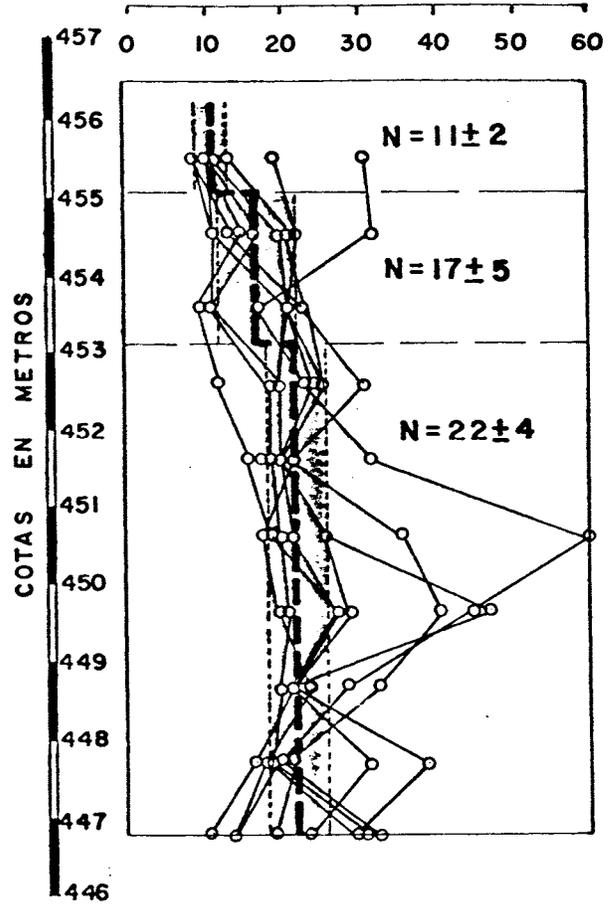
COLUMNAS ESTRATIGRAFICAS

PERFIL GENERALIZADO DE RESISTENCIA DE PUNTA AL CONO ESTATICO Y MODULO DE ELASTICIDAD.-



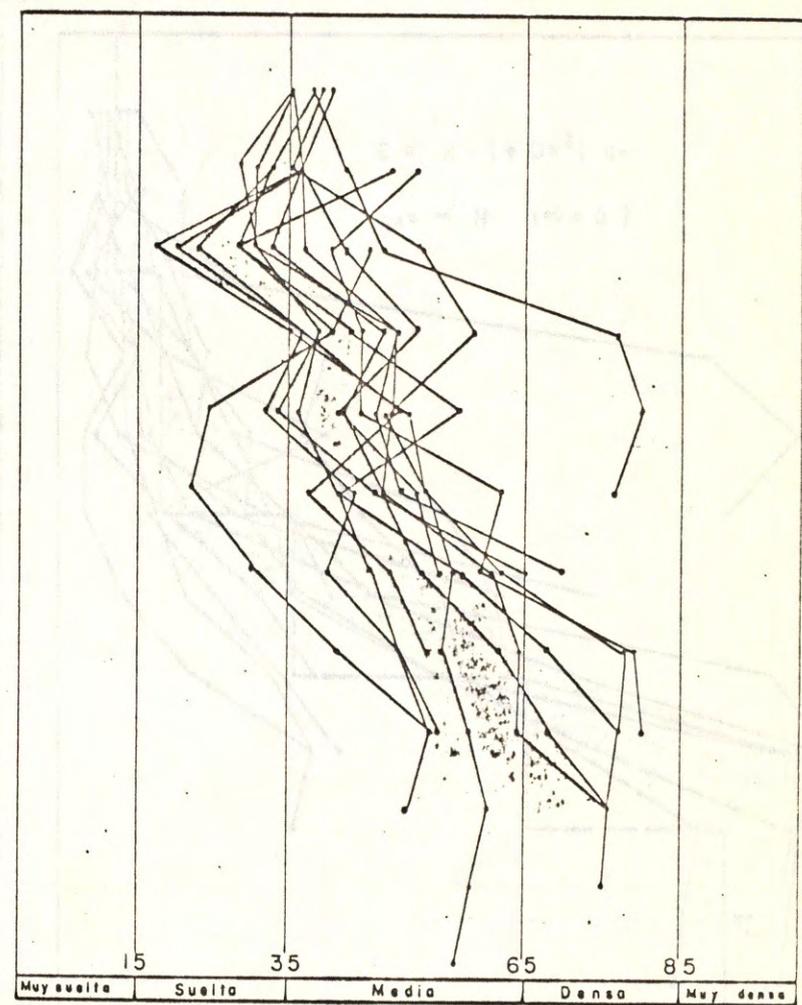
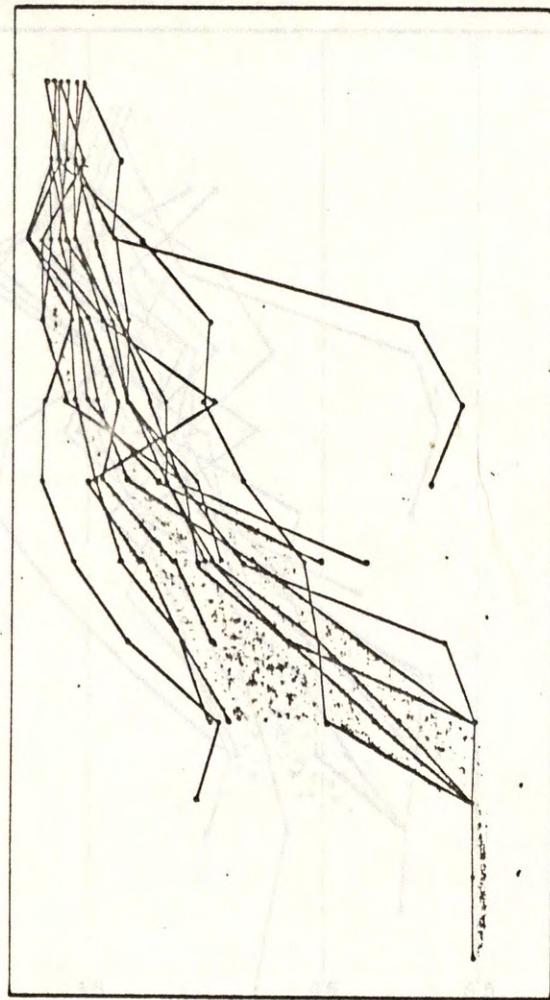
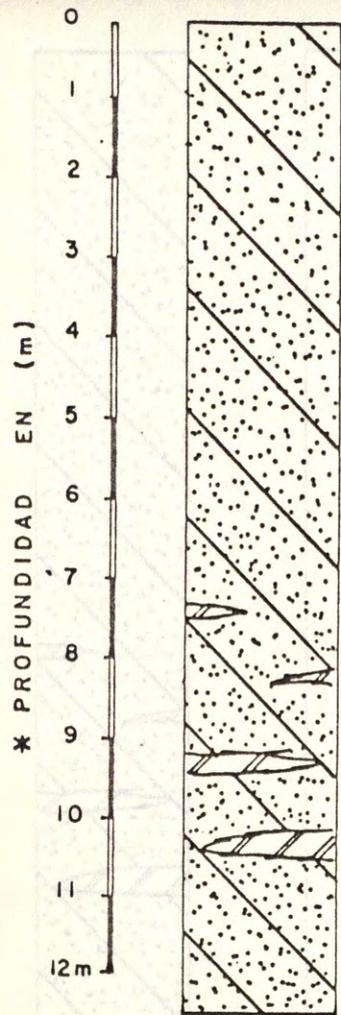
q_c = Valor medio \pm 1 desviación estandar.
 E = Modulo de elasticidad.

RESISTENCIA A LA PENETRACION S.P.T. N: GOLPES/PIE



EJEMPLO Nº1 FIG. - 2-

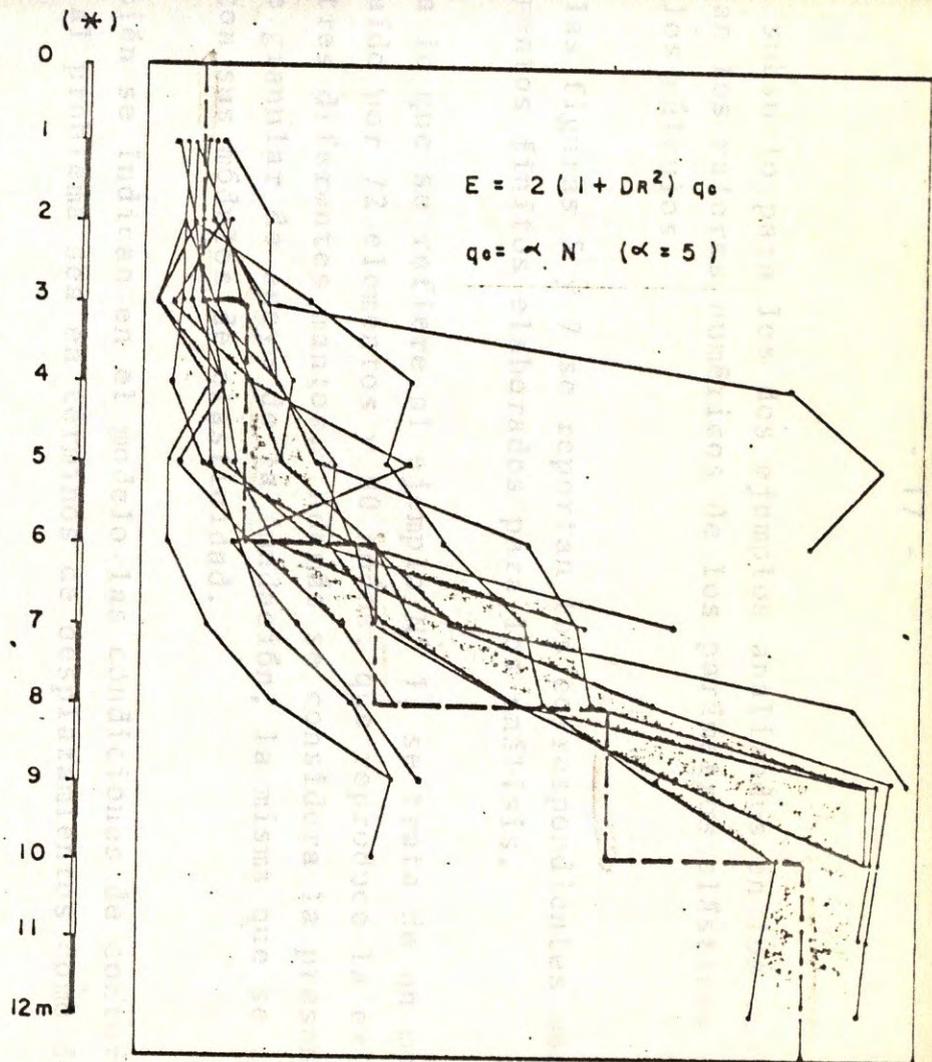
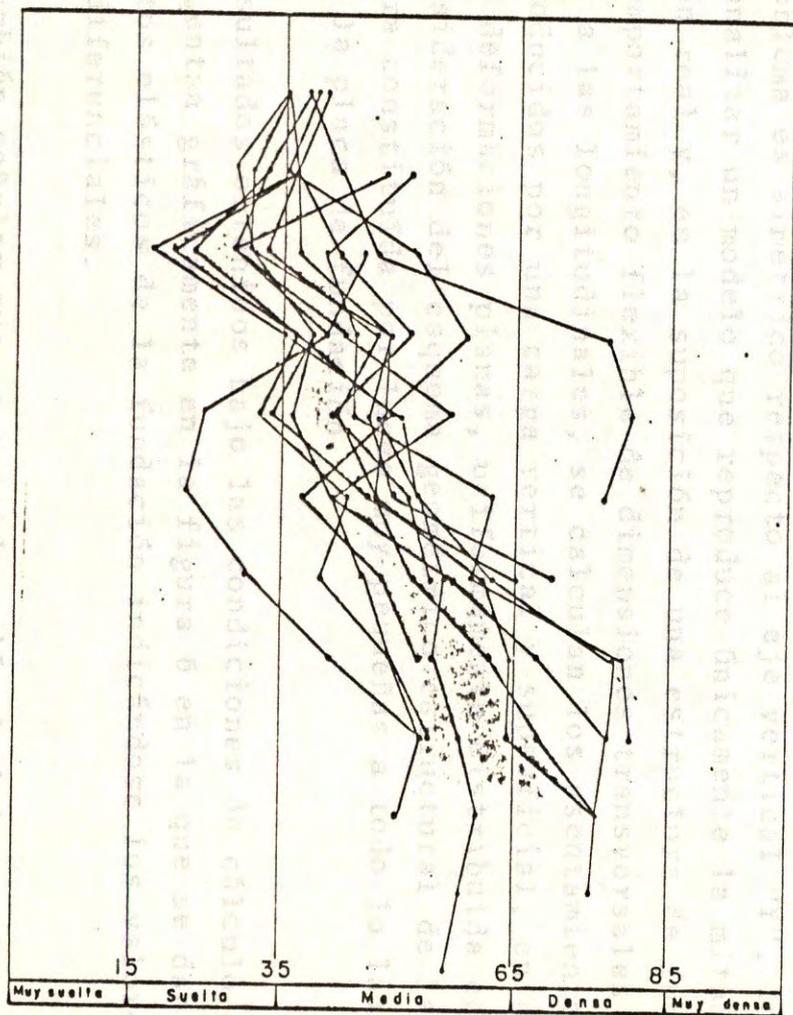
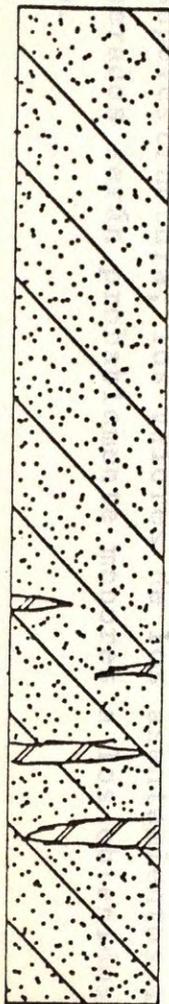
(*)



(*) LAS PROFUNDIDADES SE REFIEREN A LA TOPOGRAFIA MODIFICADA

$$D_r = \sqrt{\frac{N}{20(1+4\sigma_v)}} \quad \text{Para } \sigma_v \leq 0.75 \text{ Kg/cm}^2$$

$$D_r = \sqrt{\frac{N}{20(3.25+\sigma_v)}} \quad \text{Para } \sigma_v > 0.75 \text{ Kg/cm}^2$$



(*) LAS PROFUNDIDADES SE REFIEREN A LA TOPOGRAFIA MODIFICADA

del subsuelo para los dos ejemplos analizados en los cuales se indican los valores numéricos de los parámetros elásticos utilizados en los cálculos.

En las figuras 5 y 7 se reportan los correspondientes modelos de elementos finitos elaborados para los análisis.

Para lo que se refiere al ejemplo N° 1, se trata de un modelo constituido por 72 elementos y 90 nodos, que reproduce la existencia de tres diferentes mantos. Además se considera la presencia de la base granular de apoyo de la fundación, la misma que se caracteriza con sus módulos de elasticidad.

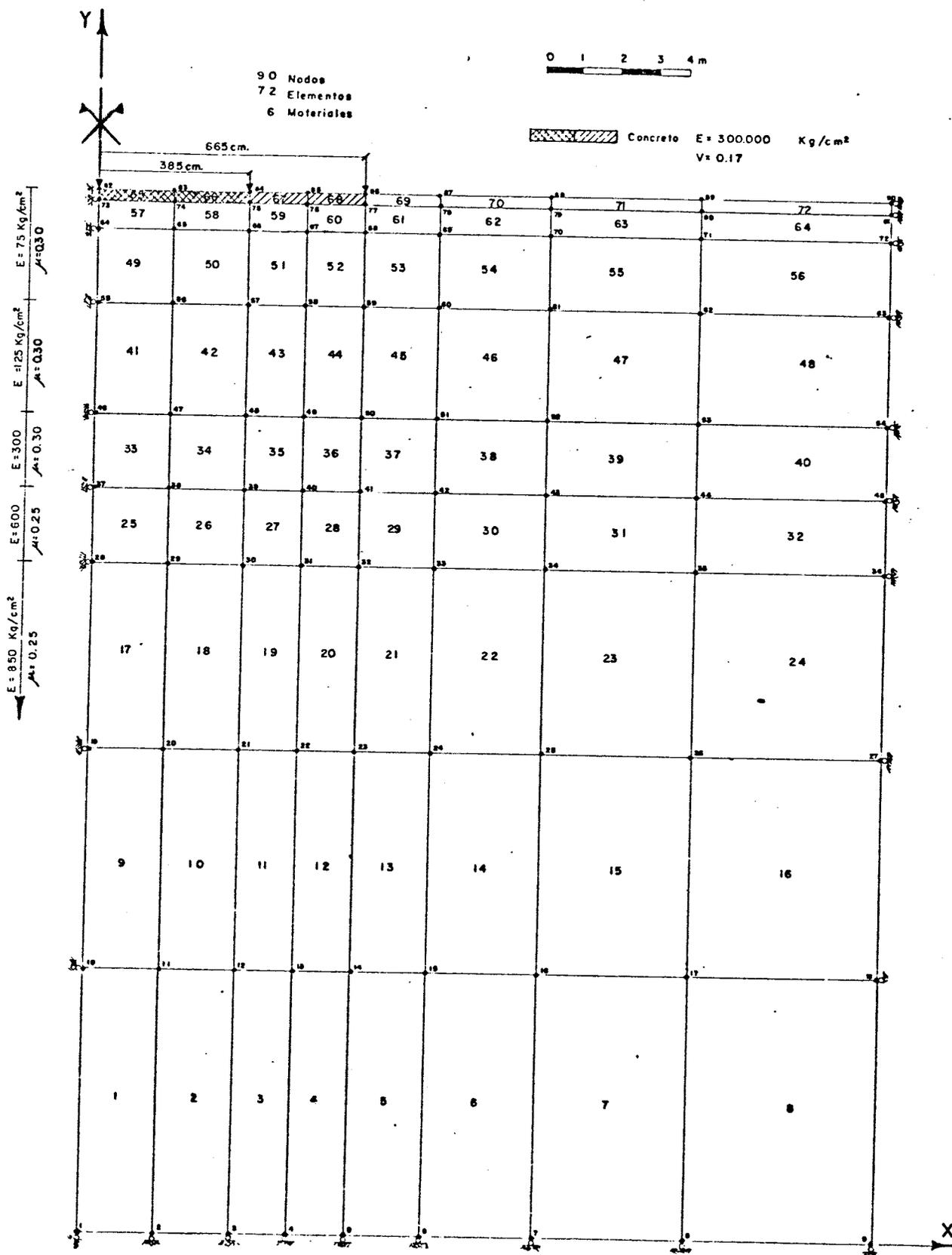
También se indican en el modelo las condiciones de contorno impuestas al problema sea en términos de desplazamientos como de fuerzas.

El problema es simétrico respecto al eje vertical "Y", lo cual permite analizar un modelo que reproduce únicamente la mitad de la sección real y, en la suposición de una estructura de fundación con comportamiento flexible de dimensiones transversales muy inferiores a las longitudinales, se calculan los asentamientos elásticos producidos por una carga vertical y superficial, en condiciones de deformaciones planas, uniformemente distribuida en la placa en consideración del esquema geométrico estructural de la superestructura constituida por luces muy pequeñas a todo lo largo y ancho de la placa de fundación.

Los resultados obtenidos bajo las condiciones de cálculo descritas, se presentan gráficamente en la figura 6 en la que se dan los asentamientos elásticos de la fundación indicándose los valores absoluto y diferenciales.

Cabe también señalar que en consideración de haberse despreciado el efecto rigidizante de la estructura de la placa de fundación y de la superestructura, los valores de los asentamientos reales a ser esperados serán probablemente menores a los obtenidos por el cálculo.

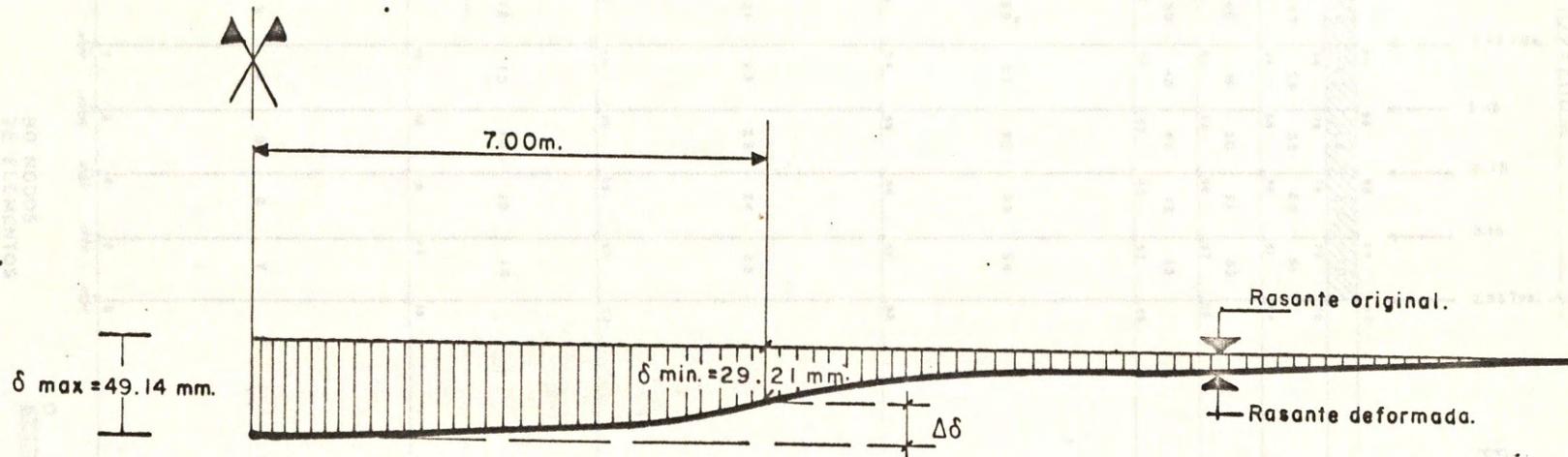
MODELO DE ELEMENTOS FINITOS



EJEMPLO N° 1

FIGURA -5-.

ASENTAMIENTOS SUPERFICIALES ELASTICOS



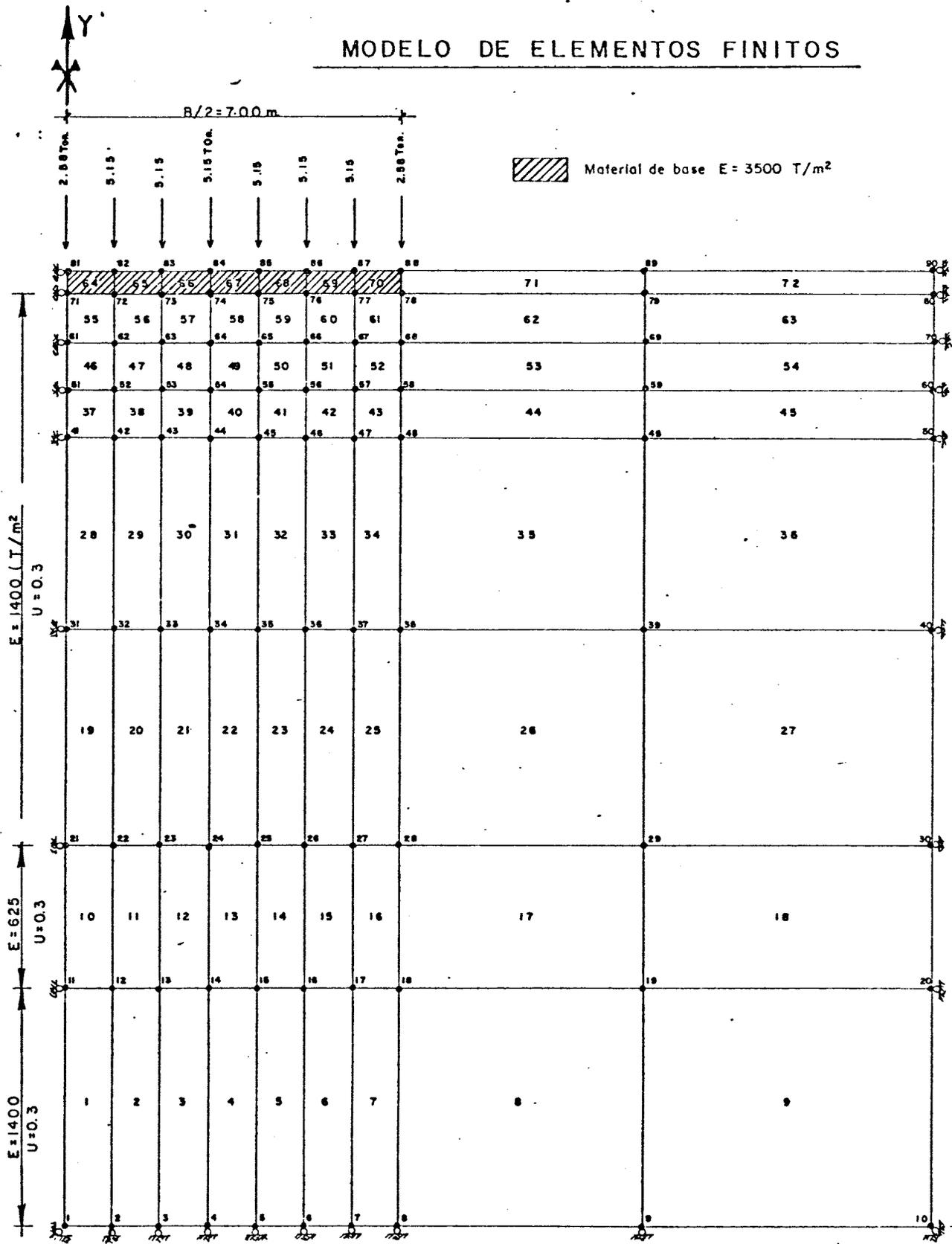
ASENTAMIENTO DIFERENCIAL MAXIMO $\Delta \delta = 19.93 \text{ mm.}$
(Correspondiente a condiciones de placa flexible)

EJEMPLO N° 1

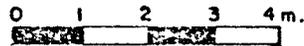
FIG - 6 -

ESC: H: 1:100
V: 1:0.5

MODELO DE ELEMENTOS FINITOS



90 NODOS
72 ELEMENTOS



EJEMPLO N°2 FIGURA - 7-

Los resultados obtenidos han sido también utilizados en el sentido de estimar el valor del módulo de reacción del terreno (K), correspondiente a la estratificación existente y reproducida en el modelo:

$$K = \frac{4}{\gamma_{\max}} = \frac{5 \text{ Ton/m}^2}{0.05 \text{ m}} = 100 \text{ Ton/m}^3$$

valor con el cual se recomendó proceder al diseño estructural de la placa de fundación.

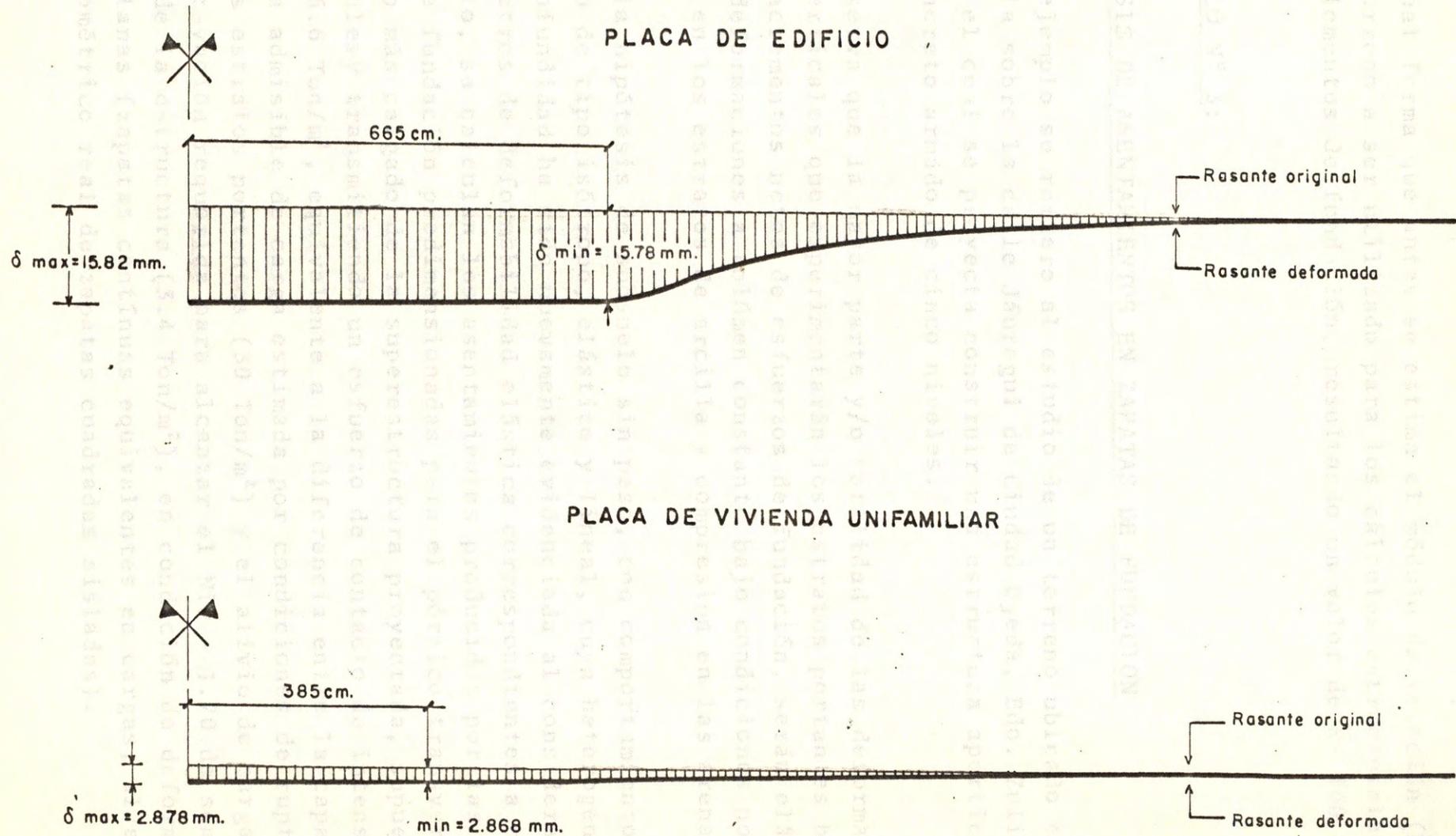
Para lo que se refiere al ejemplo N°2, se trata de un modelo, igualmente simétrico, constituido por 81 nodos y 64 elementos. El mismo reproduce la estratificación del subsuelo que en este caso comprende cinco mantos de materiales caracterizados por valores crecientes con la profundidad del módulo de elasticidad y, a diferencia del caso anterior, se incluye en el modelo la presencia de la estructura misma de la placa de fundación.

Nótese que el mismo modelo permite analizar placas de diferentes dimensiones transversales (la longitudinal se considera también en este caso muy grande y en consecuencia el cálculo se desarrolla en condiciones de deformaciones planas) habiéndoselo utilizado para el caso de estructuras tipo de edificios y para estructuras tipo de viviendas unifamiliares, ambas previstas en el desarrollo en cuestión.

También contrariamente al caso anterior, las cargas esta vez están concentradas en el centro y bordes de la placa de fundación en atención fiel al esquema geométrico estructural de las superestructuras.

Los resultados nuevamente se reportan gráficamente en la figura 8, para los asentamientos de las fundaciones de las dos estructuras tipo analizadas, observándose la sustancial pequeñez resultante en los valores diferenciales, como reflejo de la rigidez transversal tomada en cuenta para las placas de fundación.

ASENTAMIENTOS SUPERFICIALES ELASTICOS



NOTA: Los asentamiento diferenciales despreciables

ESC: H = 1:100
V = 1:1

EJEMPLO N° 2 FIG - 8 -

En igual forma que antes se estima el módulo de reacción (K) del terreno a ser utilizado para los cálculos estructurales de los elementos de fundación, resultando un valor de $K = 200 \text{ Ton/m}^3$.

EJEMPLO N° 3:

ANALISIS DE ASENTAMIENTOS EN ZAPATAS DE FUNDACION

Este ejemplo se refiere al estudio de un terreno ubicado en parcela sobre la calle Jáuregui de Ciudad Ojeda, Edo. Zulia, sobre el cual se proyecta construir una estructura aporticada en concreto armado de cinco niveles.

Se observa que la mayor parte y/o totalidad de las deformaciones verticales que experimentarán los estratos portantes bajo los incrementos netos de esfuerzos de fundación, serán elásticos (deformaciones a volúmen constante bajo condiciones no drenadas en los estratos de arcilla y compresión en las arenas).

Bajo la hipótesis de subsuelo sin peso, con comportamiento mecánico de tipo isótropo, elástico y lineal, cuya heterogeneidad en profundidad ha sido nuevamente evidenciada al considerar los parámetros de deformabilidad elástica correspondientes a cada estrato, se calculan los asentamientos producidos por las zapatas de fundación predimensionadas para el pórtico transversal típico más cargado de la superestructura proyectada, supuestas flexibles y transmitiendo un esfuerzo de contacto de intensidad $q = 26.6 \text{ Ton/m}^2$, equivalente a la diferencia entre la capacidad máxima admisible de carga estimada por condiciones de ruptura de los estratos portantes (30 Ton/m^2) y el alivio de carga por la excavación requerida para alcanzar el Niv - 1.70 de semi-sótano de la estructura (3.4 Ton/m^2), en condición de deformaciones planas (zapatas continuas equivalentes en cargas, al esquema geométrico real de zapatas cuadradas aisladas).

En la figura 9, se presenta el modelo geomecánico de elementos finitos usado para el análisis. Se trata de un modelo plano constituido por 149 elementos triangulares y 94 puntos nodales, que reproduce la existencia de tres diferentes estratos bajo la superficie de asiento de las zapatas; cada estrato caracterizado por su correspondiente módulo de elasticidad bajo condiciones no drenadas E_u (estimados conservadoramente en ausencia de ensayos triaxiales apropiados, en consideración de la litología de los estratos y de las características de consistencia y densidad relativa de los materiales). El coeficiente de Poisson se ha puesto $\nu = 0.35$, igual para cada manto (la magnitud de los asentamientos no es especialmente sensitiva a pequeñas variaciones de este coeficiente).

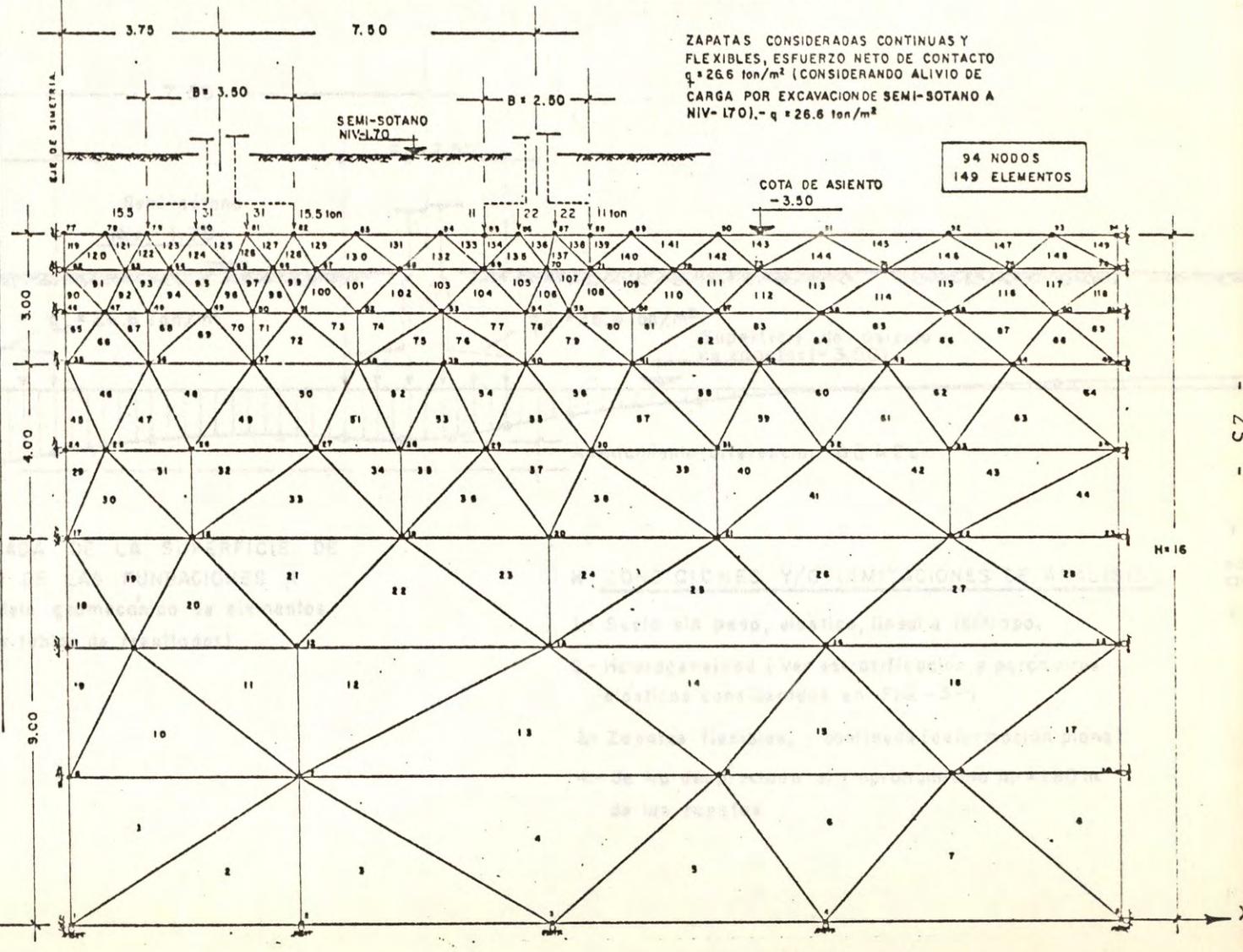
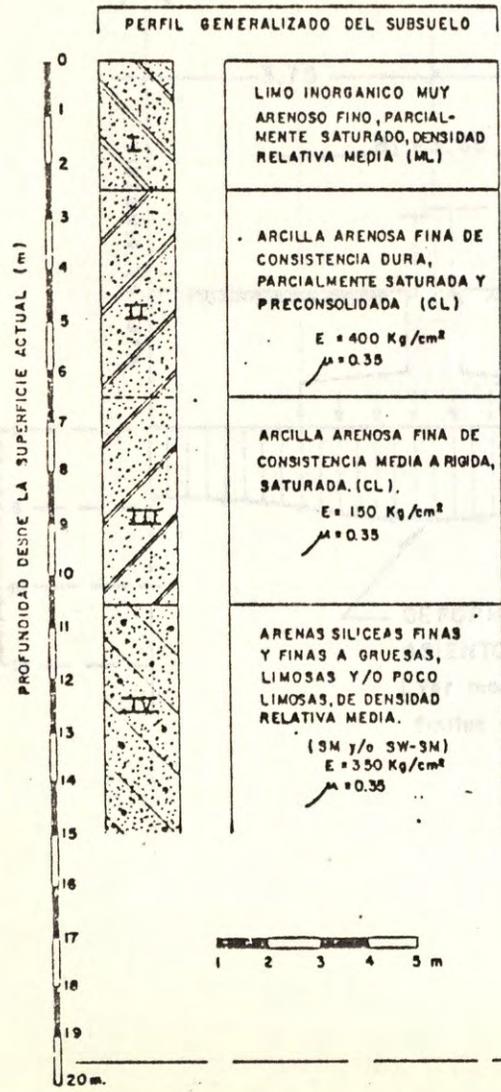
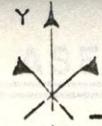
En el modelo se identifican todos los elementos y puntos nodales, y se indican todas las condiciones de borde del problema analizado.

Para lo que se refiere a los resultados del análisis, en la figura 10 se reporta la deformada de la superficie de asiento de las zapatas: el asentamiento elástico total obtenido para las zapatas mayores ($B_1 = 3.50$ m) es del orden de 6 cm., mientras que para las zapatas adyacentes de menor ancho ($B_2 = 2.50$ m.), es del orden de 4 cm, resultando por tanto un asentamiento diferencial del orden de 2 cm, bajo las hipótesis y condiciones de análisis anteriormente indicadas.

Cabe finalmente señalar que la forma (cuadrada) y el empotramiento real ($h_o = 1.80$ m) de las zapatas propuestas como solución de fundación de la estructura proyectada, son factores que inciden en reducir notablemente la magnitud de los asentamientos totales y diferenciales anteriormente estimados en base a un esquema geométrico de zapatas contínuas con cargas equivalentes y ausencia de empotramiento.

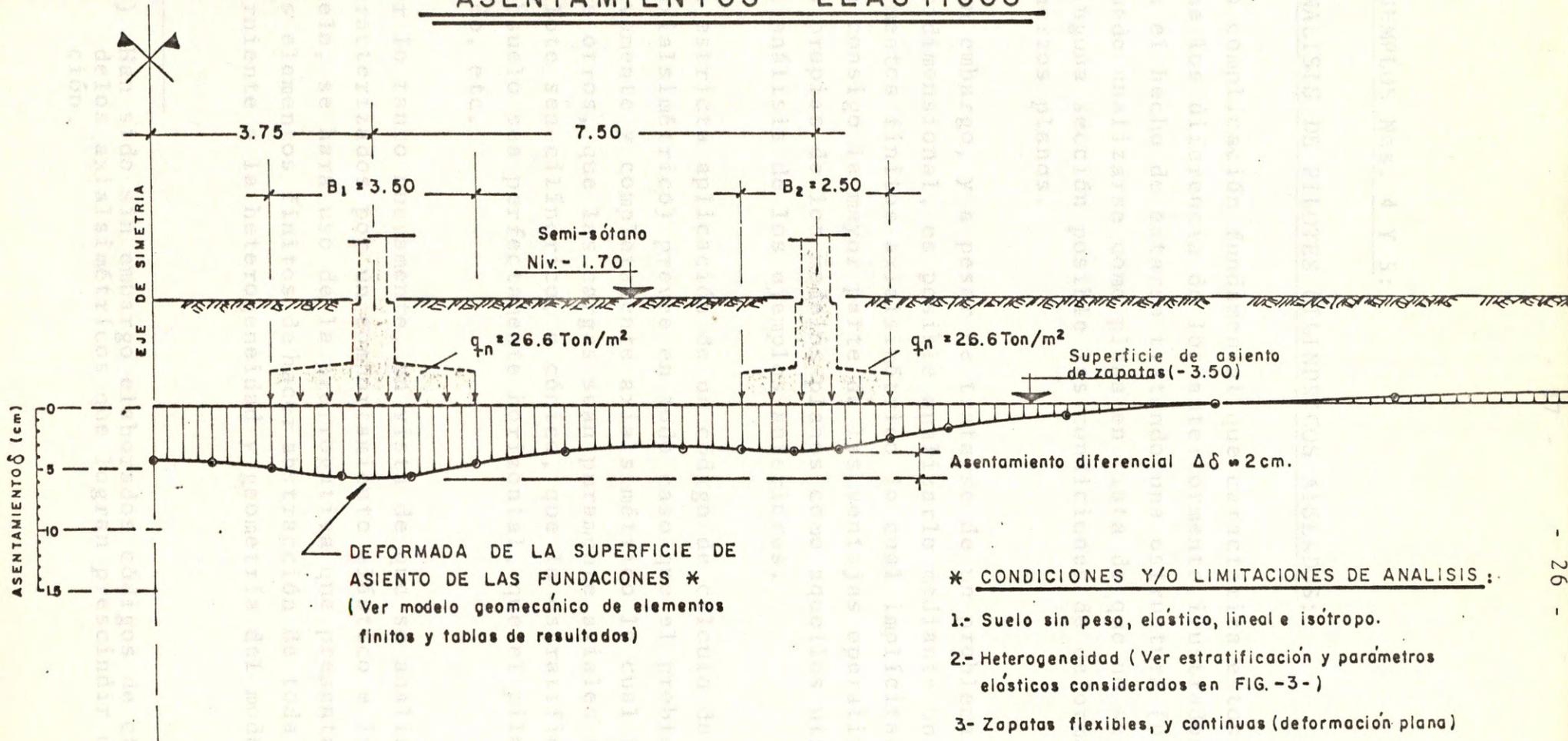
ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS ELÁSTICOS

MODELO GEOMECÁNICO DE ELEMENTOS FINITOS



EJEMPLO N.º 3 FIG. 10

ASENTAMIENTOS ELASTICOS



EJEMPLO Nº 3 FIG.- 10 -

EJEMPLOS Nos. 4 Y 5:

ANALISIS DE PILOTES CILINDRICOS AISLADOS:

La complicación fundamental que caracteriza estos ejemplos y que los diferencia de los anteriormente ilustrados, consiste en el hecho de estarse tratando una estructura (pilote) que no puede analizarse como plana en vista de que no se verifican en ninguna sección posible las condiciones de deformaciones o esfuerzos planos.

Sin embargo, y a pesar de tratarse de un problema claramente tridimensional, es posible analizarlo mediante un modelo de elementos finitos axialsimétrico lo cual implícitamente conlleva consigo la mayor parte de las ventajas operativas de cálculo propias de los modelos planos como aquellos utilizados para el análisis de los ejemplos anteriores.

La estricta aplicación de un código de cálculo de este tipo (axialsimétrico) prevee en todo caso que el problema sea efectivamente y completamente axialsimétrico lo cual implica, entre otros, que las cargas sean puramente axiales (*), que el pilote sea cilíndrico, o cónico, que la estratificación del subsuelo sea perfectamente horizontal, que el pilote sea aislado, etc.

Por lo tanto nuevamente, en vista de que se analizarán ejemplos caracterizados por un comportamiento elástico e isótropo del subsuelo, se hará uso de la prerrogativa que presenta el método de los elementos finitos de hacer abstracción de toda limitación concerniente a la heterogeneidad y geometría del modelo de cálculo.

(*) Han sido sin embargo elaborados códigos de cálculo para modelos axialsimétricos que logran prescindir de esta condición.

De esta manera se analizará el comportamiento de pilotes cilíndricos verticales sujetos a cargas puramente axiales, pero de geometría cualquiera y ubicados en un terreno caracterizado por toda clase de heterogeneidad en profundidad, aunque ligado a la condición de axialsimetría.

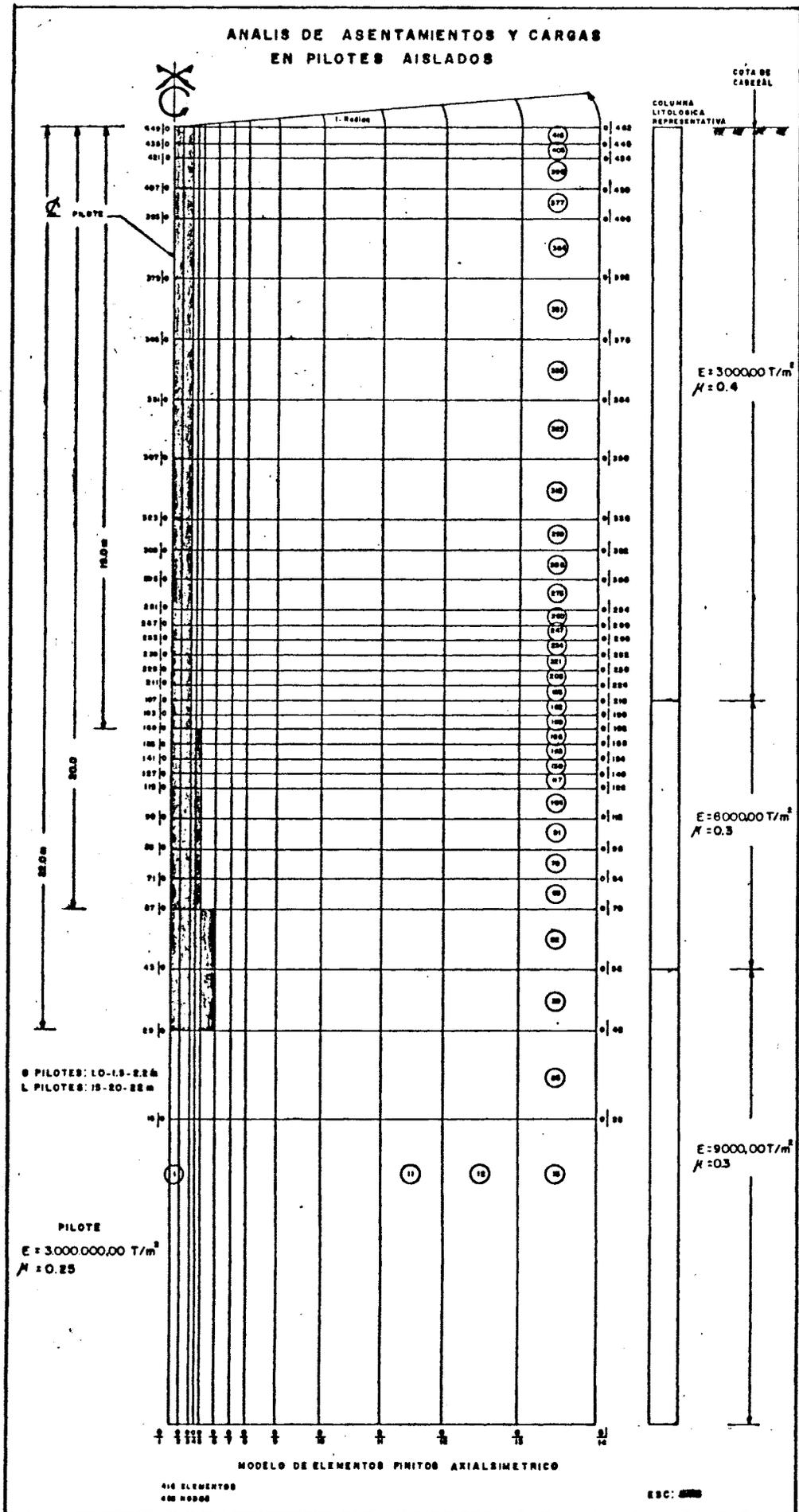
En el primer ejemplo que se ilustra se busca concretamente evaluar el valor de los asentamientos elásticos de pilotes de diferentes diámetros y de longitud y esfuerzo de trabajo definidos, ubicados en un subsuelo también geomecánicamente definido.

En el segundo caso se utilizan los resultados de una serie de pruebas de cargas sobre pilotes de 1 m de diámetro y longitudes distintas, para calibrar el modelo geomecánico del subsuelo para sucesivamente simular la ejecución de nuevas pruebas de carga sobre pilotes de diámetro diferentes. Los resultados se utilizarían finalmente para evaluar la capacidad de carga de pilotes de diferentes diámetros y profundidades.

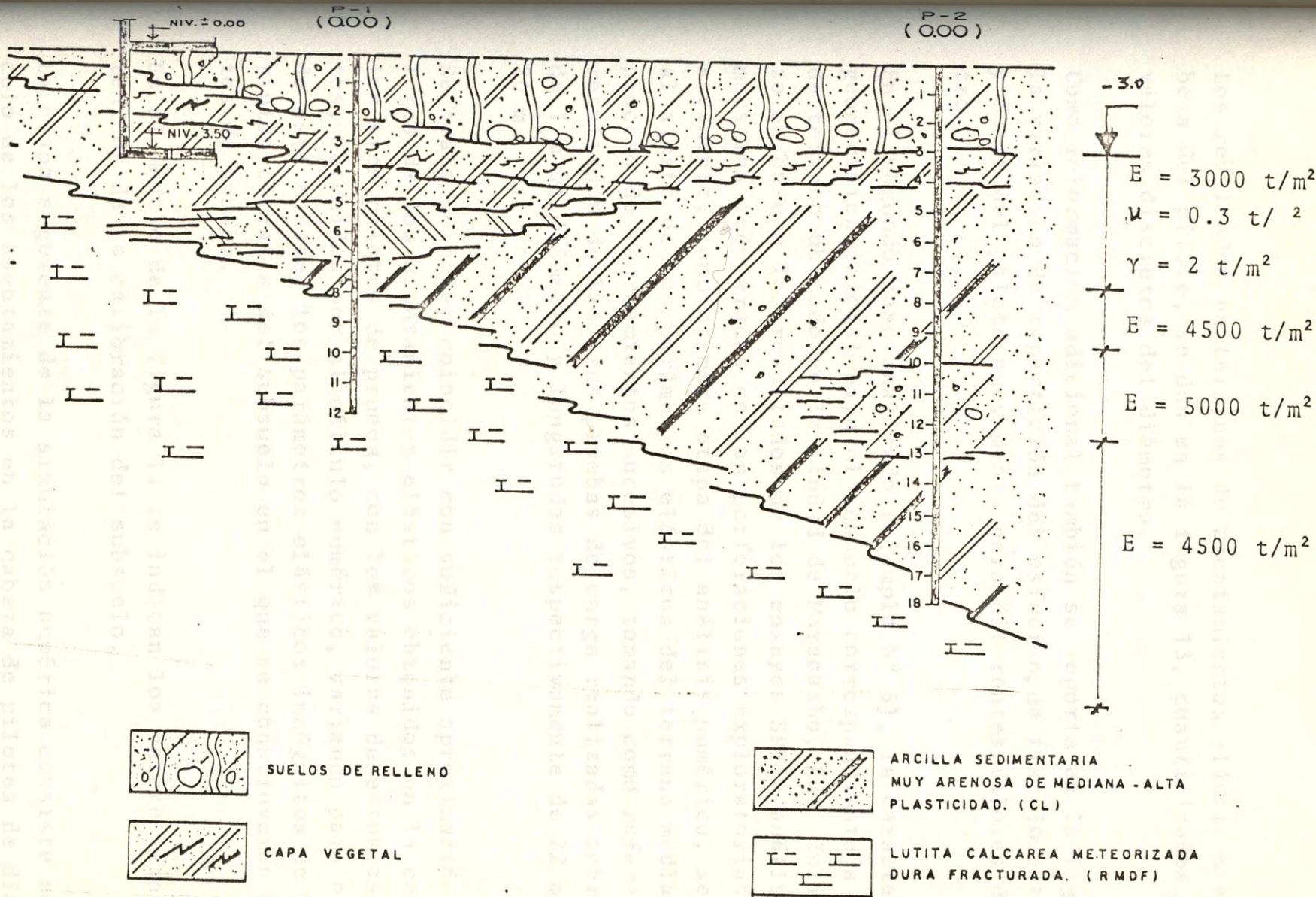
En la figura 11, se reporta el modelo de elementos finitos utilizado en ambos casos. Se trata de un modelo axialsimétrico constituido por 416 elementos cuadrangulares y 462 nodos, caracterizado por un grado de detalle suficientemente alto como para permitir, sin mayores dificultades, la simulación de geometrías diferentes (diámetro y longitud) para los pilotes, así como para la distribución en profundidad (espesores) de las diferentes capas que integran el subsuelo de cada caso en estudio.

El primer caso (ejemplo N°4) el subsuelo, corresponde a una parcela ubicada sobre la antigua carretera Barquisimeto-Yaritagua (Km. 2.550), Edo. Lara, está definido por la existencia de cuatro diferentes estratos caracterizados cada uno de ellos por los valores del módulo de elasticidad, módulo de Poisson y peso unitario (ver Fig. 12). El pilote tiene longitud fija de 9.00 m y esfuerzo de trabajo constante de 40 Kg/cm².

ANALIS DE ASENTAMIENTOS Y CARGAS
EN PILOTES AISLADOS



EJEMPLOS Nos. 4 y 5 FIG. -11-



EJEMPLO N° 4 - FIGURA N° 12

Los resultados en términos de asentamientos elásticos en la cabeza del pilote, se dan en la figura 13, cuantificados para tres valores discretos del diámetro.

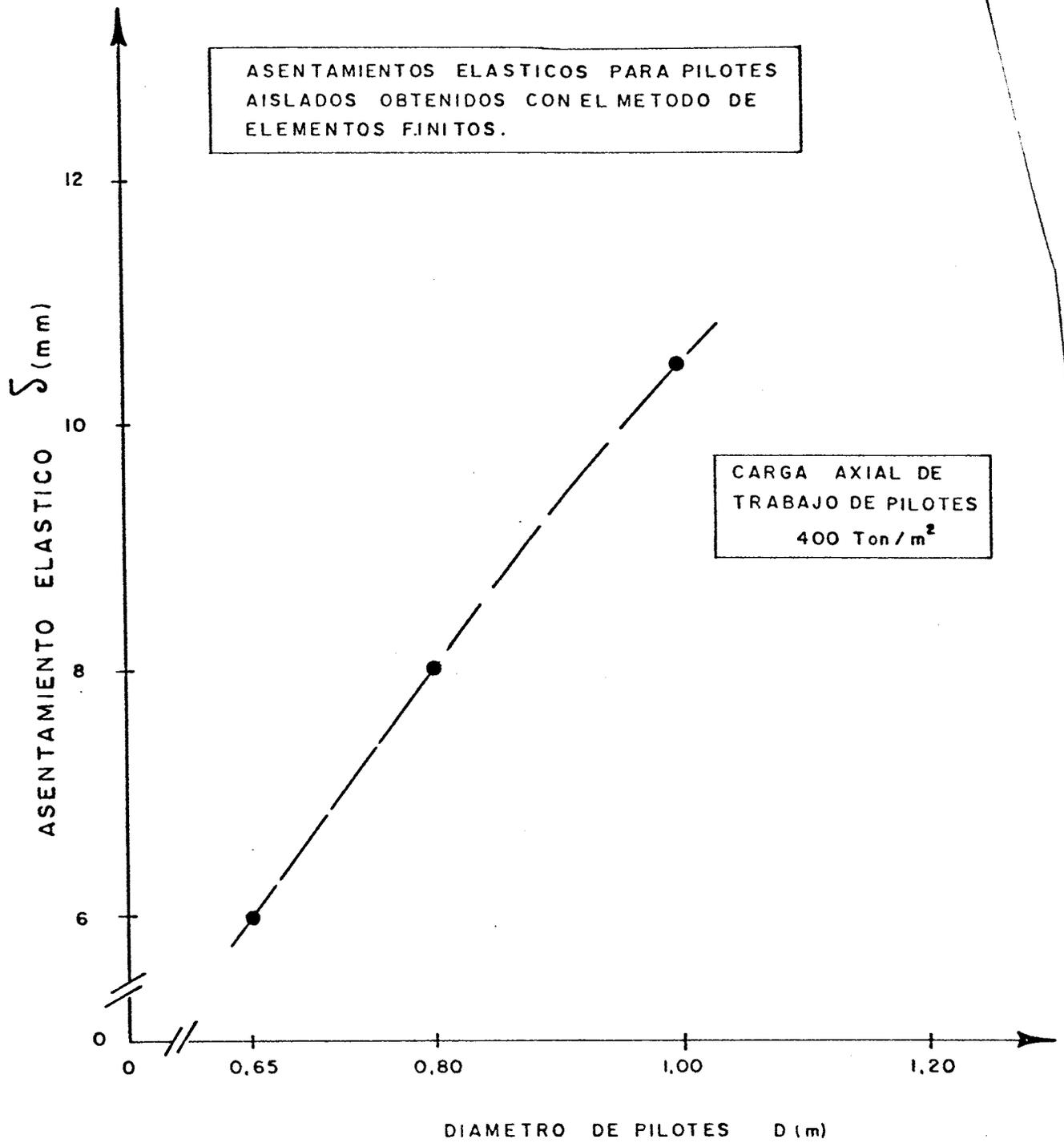
Como información adicional también se reporta en la figura 14 la variación de repartición del esfuerzo, de trabajo entre punta y fuste del pilote nuevamente para diferentes valores del diámetro.

En el segundo caso analizado (ejemplo N° 5), la caracterización geomecánica inicial para el subsuelo correspondiente a un lote de terreno ubicado en la ciudad de Maracaibo, Edo. Zulia, se hizo en base a los resultados de los ensayos SPT y análisis de las muestras recuperadas en las perforaciones exploratorias, y sucesivamente, como primera etapa del análisis numérico, se procedió al ajuste de los parámetros elásticos del terreno mediante un proceso de acercamientos sucesivos, tomando como referencia los resultados de las tres pruebas de carga realizadas sobre pilotes de 1 m de diámetro y longitudes respectivamente de 22 m, 15 m y 20 m.

Se trata de hacer coincidir con suficiente aproximación, los valores de los asentamientos elásticos obtenidos en la cabeza de los tres pilotes de prueba, con los valores de estos asentamientos, obtenidos por el cálculo numérico, variando para el logro de este ajuste, los parámetros elásticos incógnitos de los distintos estratos del subsuelo en el que se construyeron los pilotes de prueba.

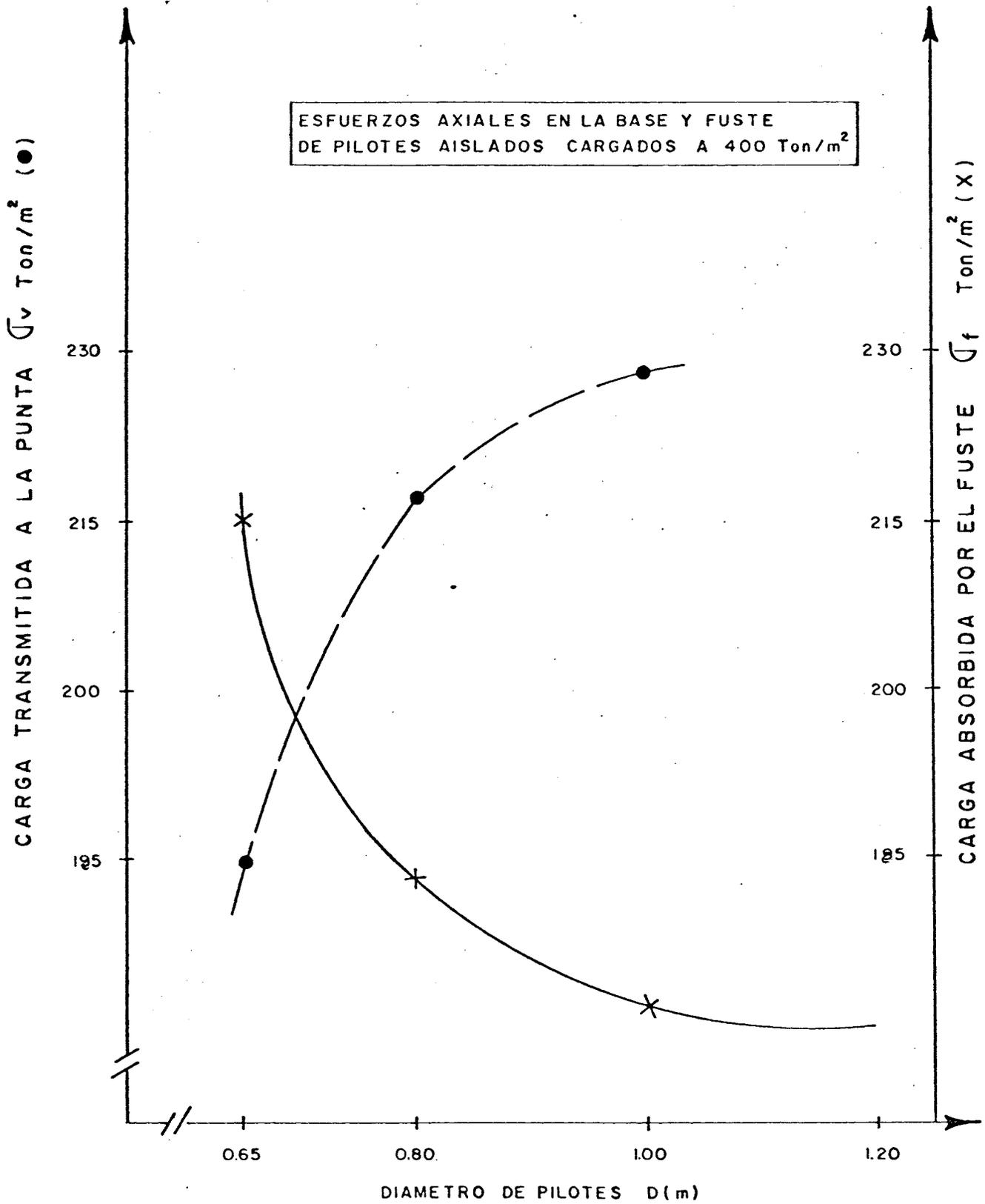
En el modelo de la figura 11 se indican los valores finales obtenidos de la calibración del subsuelo.

La etapa siguiente de la simulación numérica consiste en el cálculo de los asentamientos en la cabeza de pilotes de diámetro y longitudes diferentes de los ensayados. Así mismo el programa de cálculo permite para cada caso evaluar la repartición de la

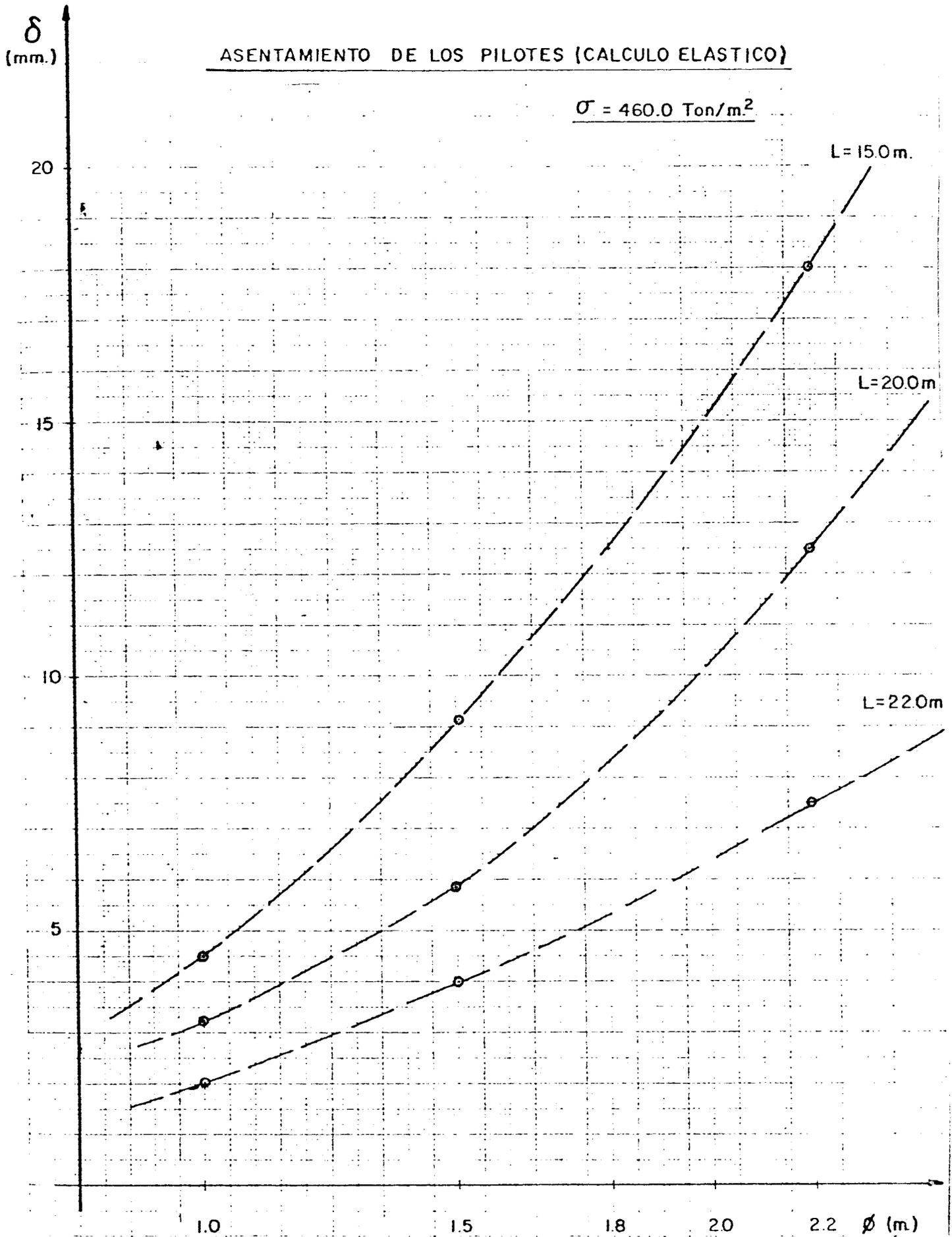


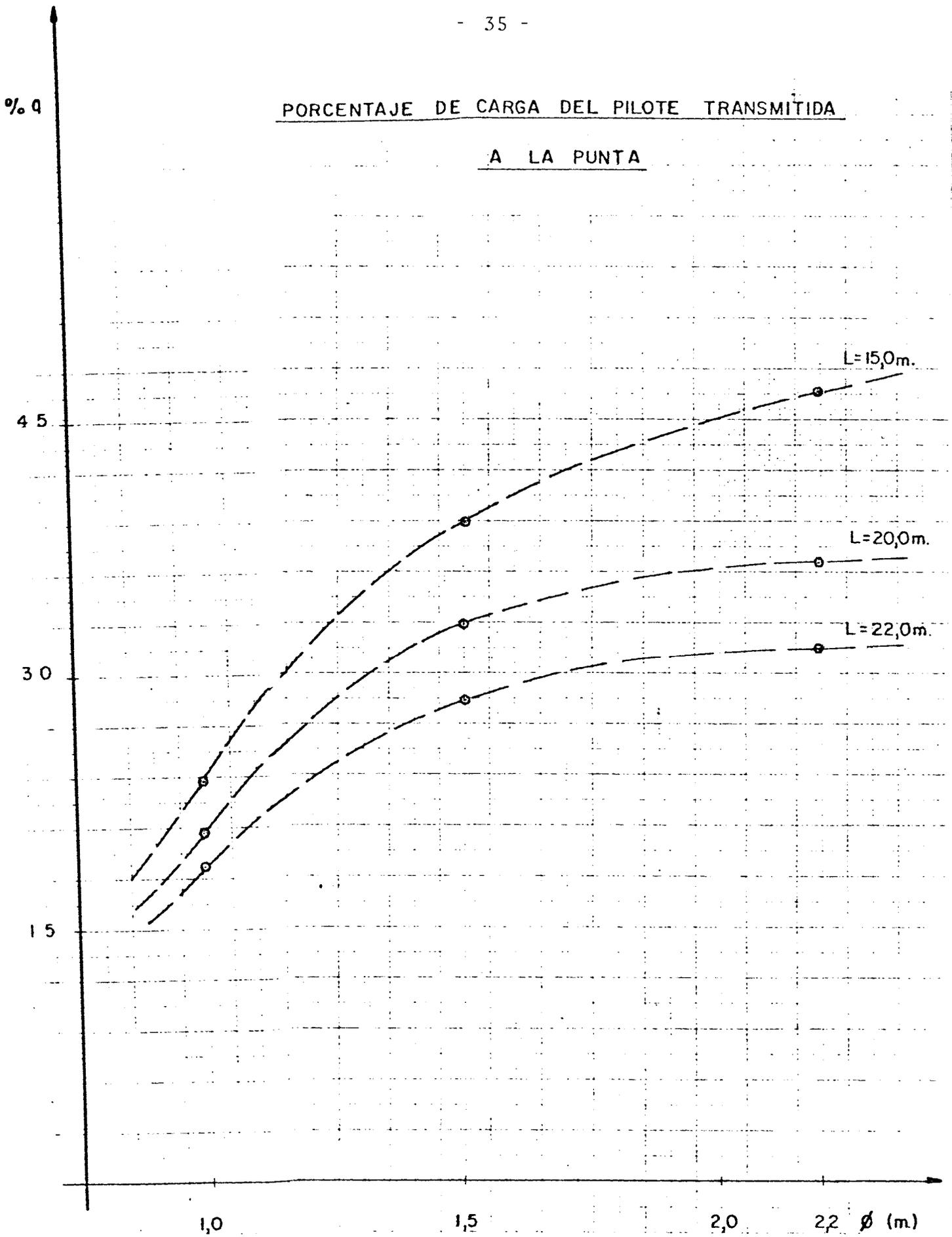
EJEMPLO N°4

FIG - 13 -



EJEMPLO N°4 FIG - 14





cargas sobre los pilotes entre el fuste y la punta de estos.

Todas estas informaciones reservadas de la simulación numérica se utilizan sucesivamente para optimizar el diseño del sistema de pilotaje en análisis.

En las figuras 15 y 16 se reportan en forma gráfica los resultados más importantes de los cálculos numéricos, específicamente los valores de los asentamientos en la cabeza de los pilotes y el porcentaje de carga transmitida a la punta en las diferentes condiciones de geometría del pilote y para las condiciones reales del subsuelo en que se irán a construir los elementos de fundación.

Caracas, marzo de 1982