

PRIMER ENCUENTRO NACIONAL DE INGENIEROS
DE SUELOS Y ESTRUCTURAS

CIMENTACIONES PROFUNDAS - SISTEMA PLACA-PILOTES

Julio Moya IC. MSc. DIC
Ingeniería y Geotecnia Ltda. Ingenieros Consultores

1. INTRODUCCION

La combinación de placa y pilotes de fricción, como sistema de cimentación de edificaciones de alturas y cargas importantes, se ha puesto de moda en los últimos años. Comparada con la solución de cimentaciones profundas con sólo pilotes, la alternativa placa-pilotes resulta en general económicamente atractiva, sin embargo, los factores que controlan su comportamiento no han sido investigados suficientemente y los resultados obtenidos indican que no siempre se logra una mejora sobre el comportamiento de la sola placa de cimentación. Se justifica por lo tanto comentar los progresos alcanzados por algunos investigadores, basados en modelos y en la observación del comportamiento de cimentaciones instrumentadas, e informar sobre la experiencia local.

2. PRINCIPIOS DE DISEÑO

El término placa-pilotes identifica un sistema de cimentación (Figura 1) por medio del cual la carga del edificio se transfiere al suelo de fundación, en parte por la presión de contacto entre la placa y el suelo subyacente y en parte por la fricción lateral entre los pilotes y el suelo que los rodea.

Muchas estructuras pueden cimentarse sobre placas en depósitos de suelos arcillosos, con un adecuado factor de seguridad contra la falla por capacidad portante. Sin embargo, se ha demostrado que bajo condiciones normales de trabajo, los asentamientos son proporcionales a las dimensiones en planta de las placas y pueden resultar excesivos para la mayoría de las grandes estructuras. Cuando se acude a los pilotes para reducir los asentamientos, usualmente se supone en el diseño que toda la carga es soportada por los pilotes. Esto trae como resultado una dramática reducción de los asentamientos a valores muy pequeños, si se les compara con los asentamientos de la placa, pero usualmente nos olvidamos que esta reducción es debida al trabajo combinado de la placa y los pilotes o al efecto de bloque proporcionado por el suelo entre los pilotes cercanamente espaciados, con lo cual el factor de seguridad real resulta excesivamente alto. Esta no es una filosofía de diseño satisfactoria y resulta más

lógico si el número de pilotes se relaciona directamente con la reducción que se requiere para los asentamientos, esto es, calculando primero el asentamiento de una placa no piloteada y luego estimando la reducción de asentamientos que se obtiene después de adicionar uno o más pilotes que movilizan la totalidad de su capacidad de soporte. La carga soportada por la placa se ve reducida en la fracción tomada por los pilotes y el asentamiento se aproxima a la suma de dos componentes, el necesario para movilizar la capacidad portante del grupo de pilotes y el requerido para desarrollar la carga de trabajo de la placa. Si la reducción en el asentamiento alcanzado es inadecuada, el proceso se repite hasta lograr el número óptimo de pilotes. Sin embargo, a medida que nos aproximamos al comportamiento de bloque, la contribución de cada pilote adicional a la reducción del asentamiento es cada vez menor, hasta hacerse nula. En este caso límite la capacidad de carga y el asentamiento dependen de las dimensiones del bloque y de las propiedades del suelo.

Hay dos prerequisites importantes que deben cumplirse al considerar una alternativa placa-pilotes.

- (1) La sola placa de cimentación experimenta asentamientos totales muy grandes y por lo tanto existe un alto riesgo de asentamientos diferenciales y desplomes importantes de la estructura que afectan su funcionamiento.
- (2) Los pilotes deben soportar su carga principalmente por fricción lateral y la capacidad por la base debe ser muy baja o despreciable. Si la base del pilote se apoya o penetra en un estrato muy competente, de alta resistencia y de baja compresibilidad, resulta evidente que la placa no transfiere ninguna parte de la carga al suelo subyacente.

Un aspecto de interés local es establecer si el sistema placa-pilotes es eficiente en el caso de arcillas de consistencia blanda a media como las de la Formación Sabana. En la Figura 2, se muestran algunos resultados de estudios de interacción placa-pilotes basados en modelos de comportamiento linealmente elástico entre la placa, los pilotes y el medio semi-infinito de suelo y bajo la hipótesis adicional de un movimiento relativo nulo entre pilote y suelo. (Butterfield and Banerjee 1971, Poulos 1980. EL-MOSSALLAMY 1990).

Se observa que las placas con baja relación de rigidez geométrica, definida como T/d , transmiten directamente mas carga al suelo entre más firme sea éste. Esta dependencia desaparece a medida que aumenta la rigidez de la placa. Se puede concluir por lo tanto, que el sistema placa-pilotes no está limitado a las arcillas muy firmes como las de Londres, Frankfurt y otras similares, con valores de G muy grandes. Por otra parte la fracción de la carga total que la placa transmite directamente al suelo subyacente, disminuye entre mayor sea la longitud de los pilotes, representada por el parámetro dimensional L/d , el cual es comparativamente más importante que las relaciones de rigidez del pilote y de rigidez de la placa T/d .

Los primeros trabajos analíticos de Butterfield y Banerjee (1971) sugieren que, aunque la proporción de la carga tomada por los pilotes disminuye con

la inclusión de la placa cabezal en contacto con el suelo, ésta tiene poco efecto sobre la rigidez del grupo de pilotes. Por el contrario, la inclusión de unos pocos pilotes bajo una placa de cimentación, puede aumentar substancialmente la rigidez de la cimentación.

Un método simple que combina la rigidez de la placa y la rigidez del grupo de pilotes ha sido propuesto por Randolph (1983). El método está basado en el empleo de factores de interacción promedio α_{cp} , entre el pilote y la placa con la siguiente expresión aproximada propuesta por Randolph (1983).

$$\alpha_{cp} = \frac{\ln(r_m/r_c)}{\ln(r_m/r_o)}$$

donde r_m es el radio de influencia de los pilotes, el cual se puede suponer del mismo orden de magnitud de la longitud de los pilotes, r_c el radio efectivo del elemento de placa asociado con cada pilote o radio equivalente del área de influencia de la placa por pilote y r_o es el radio del pilote. Si K_c es la rigidez de la placa y K_p la rigidez del grupo de pilotes, la rigidez del sistema placa-pilotes está dado por la siguiente expresión:

$$K_f = \frac{K_p + K_c (1 - 2\alpha_{cp})}{1 - \alpha_{cp}^2 K_c / K_p}$$

y la proporción de la carga tomada por la placa, con relación a la carga total

$$\frac{P_c}{P_c + P_p} = \frac{K_c (1 - \alpha_{cp})}{K_p + K_c (1 - 2\alpha_{cp})}$$

La rigidez de la placa (K_c) y del grupo de pilotes (K_p) se evalúan aplicando para cada caso la relación $K=P/\delta$.

La Figura 3 muestra el efecto del cabezal sobre la rigidez de un pilote aislado. Un cabezal pequeño ($r_c/r_o \leq 4$) tiene poco efecto en la rigidez de la fundación, aunque una proporción significativa de la carga total es tomada por el cabezal o placa como se muestra en la Figura 4.

Algunos otros resultados de análisis numéricos se describen a continuación. En la Figura 5 se observa que la longitud del pilote L/d y la rigidez del pilote λ no tienen una influencia muy significativa en la distribución de la carga Q pilote/ P_{total} en un grupo de pilotes. Esto también es válido para placas flexibles. En la Figura 6 se aprecia el efecto de la rigidez de la placa (T/d) sobre la distribución de la carga en el grupo de pilotes. En la Figura 7 se muestra la influencia bien marcada de la longitud del pilote (L/d) y del espaciamiento S/d , sobre la relación de asentamiento $\delta_{grupo}/\delta_{pilote}$; la influencia de la rigidez es baja. De acuerdo con la Figura 8 la relación de asentamiento de una placa rígida con y sin pilotes ($\delta_{placa-pilote} / \delta_{placa rígida}$) depende de la longitud del pilote L/d y del espaciamiento S/d y es independiente de la rigidez del pilote.

En general los resultados anteriores se basan en métodos de análisis con hipótesis de un comportamiento linealmente elástico entre la placa, los pilotes y el suelo.

Poulos y Davis (1980) han presentado un método para el análisis del sistema placa-pilote con relación a los asentamientos. Para una cimentación cuadrada de ancho B, el asentamiento bajo la carga de trabajo está dada

$$\xi = P_p R_g \delta_i + 0.946 \frac{(P_T - P_p)(1 - \nu^2)}{B E}$$

donde R_g es la relación entre el asentamiento promedio del grupo de pilotes y el asentamiento de un solo pilote bajo la misma carga total que la del grupo, δ_i es el asentamiento de un pilote bajo una carga unitaria, ν es la relación de Poisson y E el módulo de elasticidad del suelo. Los demás factores se han definido anteriormente. Los valores de R_g dependen del número de pilotes, dimensiones de los pilotes y placa y de la relación de Poisson y son presentados por Poulos y Davis en gráficos.

La evacuación anterior es válida únicamente cuando se moviliza la totalidad de la resistencia de los pilotes. Utilizando los parámetros drenadas del suelo E' y ν' y los valores de R_g correspondientes a la relación de Poisson drenada, es posible calcular también el asentamiento por consolidación

3. GRUPO INFINITO DE PILOTES

Una limitación importante en los modelos elásticos es la restricción total al deslizamiento pilote-suelo. No parece muy conocido el concepto de que en un grupo de pilotes de fricción, la resistencia por fricción no se desarrolla a lo largo del pilote de arriba hacia abajo como en los pilotes aislados, sino de abajo hacia arriba. En el caso de un grupo infinito, las secciones verticales intermedias entre filas de pilotes vecinos, son planos de simetría y el esfuerzo cortante sobre estos planos es nulo. La Figura 14b modela este caso. Los resultados de una aplicación de este modelo en el caso de un pilote tubular de acero de 60 m de longitud se muestra en Figura 15.

La Figura 9 muestra la dependencia entre el espaciamiento entre pilotes y la resistencia lateral desarrollada para una determinada carga sobre un pilote por fuera del grupo. En la Figura 10 se presenta un método simple de cálculo para el caso de pilotes rígidos y comportamiento rígido/plástico de la resistencia lateral y $q_b = 0$.

La consecuencia de estas consideraciones sobre la resistencia del vástago es que, en el caso de grupo de pilotes de fricción, ésta tiende rápidamente a su valor último f_{su} en la proximidad de la base del pilote, aun bajo cargas relativamente bajas. Por lo tanto, la suposición de adherencia total entre pilote-suelo, en el caso de grupo de pilotes y sistema placa-pilotes, causa errores.

En el caso de pilotes de fricción bajo sistemas placa pilotes, el desarrollo de la resistencia por fricción lateral desde la base hacia arriba es causado adicionalmente por el hecho de que la placa, los pilotes y el suelo entre ellos son obligados a moverse juntos hacia abajo por condiciones cinemáticas.

4. ASPECTOS ESPECIALES EN LA INSTRUMENTACION

Hay diferencias en las condiciones de medición del comportamiento de pilotes sometidos a pruebas de carga y de grupos de pilotes de un sistema placa-pilotes. En este último caso, la medición debe hacerse durante todo el tiempo de construcción del edificio y aún durante su funcionamiento. Las medidas deben hacerse con métodos que no obstaculicen el normal desarrollo de la obra.

Como la acción de grupo debe tenerse en cuenta, es importante seleccionar pilotes representativos para registrar las desviaciones del comportamiento con el de pilotes aislados. La medición de las cargas soportadas por los pilotes a diferentes profundidades es indispensable en el caso de placa-pilotes. Necesitamos conocer, que tanto se ha movilizado de la resistencia lateral última y a que niveles. Esto es de especial interés porque el objetivo de lograr una determinada relación P_t/P_t se consigue entre más resistencia lateral última f_{su} se haya movilizado sobre una mayor longitud de pilote.

5. COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES PLACA-PILOTES INSTRUMENTADAS

Uno de los objetivos de esta discusión es mostrar el comportamiento de algunas edificaciones y tratar de correlacionarlos con los resultados a partir de los métodos de análisis disponibles.

ARCILLAS FUERTEMENTE SOBREDONSOLIDADAS

TORHAUS / DOORHOUSE

Este es un edificio localizado en la ciudad de Frankfurt, tiene 130 m de altura y está cruzado por una calle con un canal y causa la división de la placa de cimentación en dos partes. Las dos placas tienen 2.5 m de espesor, 17.5 m de ancho y 24.50 m de longitud y cada una está unida a 42 pilotes pre-excavados y fundidos en el sitio, de 20 m de longitud y 0.90 m de diámetro, distribuidos uniformemente como se muestra en la Figura 11. Se indica también la instrumentación colocada.

El subsuelo consiste de una arena y grava aluviales hasta unos 10 m de profundidad, seguida de una arcilla de edad terciaria de consistencia muy firme hasta grandes profundidades. El nivel frático está unos pocos metros bajo la superficie del terreno. En la Tabla 1 se muestran los valores límites y promedios de algunos parámetros.

El módulo de young empleado en el cálculo de asentamiento con teoría linealmente elástica está dado por la siguiente expresión:

$E_s = 7 (1+0.35 Z)$	[MPa]	para Z en metros y primera carga.
$E_s = 120$	[MPa]	para descarga
$E_s = 70$	[MPa]	para recarga

La aplicación de la teoría de elasticidad para el cálculo de asentamientos de cimentaciones en arcillas firmes fué mostrada por Burland (1977) suponiendo igualdad de los módulos de rigidez bajo condiciones drenadas y no drenadas. En este caso el efecto del tiempo por consolidación influye muy poco sobre los asentamientos.

Los asentamientos medidos son alrededor del 50% de los esperados sin el uso de pilotes como lo muestra la Figura 12.

La presión de contacto entre la placa y el suelo es ligeramente mayor que el peso de la placa de cimentación y la carga total de la superestructura es soportada por los pilotes. Parece que en este caso no se logró en su totalidad el objetivo esperado.

La distribución de la carga en los pilotes es similar a una distribución del tipo Boussinesq de presiones del suelo bajo una placa rígida (Figuras 13 y 14). A primera vista parece algo sorprendente lo que éste resultado revele a pesar de que se esperaba alcanzar la carga última de los pilotes Q_u para introducirla como fuerzas independientes, directamente bajo la placa, como lo menciona Burland en su artículo de 1977. Es en esta situación que se puede lograr el máximo valor de la presión de contacto.

Como consecuencia de este resultado, para aumentar la eficiencia del sistema placa-pilotes los pilotes deben seleccionarse:

- (1) Mas cortos que los adoptados.
- (2) Los pilotes centrales deben ser más largos que los pilotes de borde si se desea igualar la distribución de la carga en los pilotes.

MESSETURM/FAIRTOWER

Este es el edificio más alto de Europa Figura 15. La placa es de 60 m x 60 m y sin pilotes se esperaban asentamientos del orden de 40 cm y diferenciales entre un 10 y 20% del total. Esto causa una rotación angular de $8/6000 = 1/750$ que es bastante menor que el límite visible de $1/250$ pero que se consideró que no estaba del lado de la seguridad. Por lo tanto se adoptó un sistema placa-pilotes con un total de 64 pilotes distribuidos en la forma de tres anillos concéntricos como se muestra en la Figura. El espesor de la placa varía de 6.0 m en el centro a 3 m en los bordes. La carga vertical es del orden de 2000 MN.

En esta oportunidad el arreglo de los pilotes se hizo de una manera mas estudiada comparada con el edificio anterior. El objeto fué minimizar:

- (1) Asentamientos
- (2) Inclinación
- (3) Fuerzas internas en la placa.

Como se puede ver en la Figura 15 los dos anillos exteriores se encuentran bajo los muros portantes de la torre y el anillo interior soporta directamente las cargas del núcleo de la estructura. En esta oportunidad los pilotes no se distribuyen por igual o regularmente sobre el área de la fundación. Adicionalmente, la longitud de los pilotes disminuye hacia el centro con el objeto de evitar la distribución de Boussinesq.

En la Figura 16 se muestra que la uniformidad en las cargas de los pilotes se logró bastante bien. Las cargas se distribuyeron exitosamente entre la placa y los pilotes con un 45% y 55% respectivamente.

La distribución del asentamiento con la profundidad se muestra en la Figura 17. De esta última se puede concluir que el sistema experimentó un comportamiento bastante rígido.

ARCILLAS LIGERAMENTE SOBRECONSOLIDADAS

PILOTES DE FLUENCIA

En Suecia, la carga del edificio en exceso a la presión de preconsolidación de la arcilla se supone que será soportada por los pilotes, mientras que la carga restante (o sea el incremento de esfuerzo hasta la presión de preconsolidación) se supone soportada por la presión directa de contacto entre placa/suelo. La carga de diseño de los pilotes es igual a la llamada "carga de fluencia" que significa la carga del pilote que causa un estado de falla por fluencia o "creep".

En los casos en donde el incremento de la carga neta promedio, excede la presión de preconsolidación de la arcilla, el objeto de los pilotes de fluencia es reducir los asentamientos. Esto último se logra por el hecho de que el incremento los en esfuerzos que exceden la presión de preconsolidación de la arcilla, es transferido a mayores profundidades donde la presión de preconsolidación es en general más alta.

Puesto que los pilotes están en un estado de falla de fluencia, el diseño de la placa se hace mas simple. Los pilotes pueden considerarse como placas puntuales hacia arriba, iguales a la carga de fluencia. Los pilotes pueden ser distribuidos de manera que se reduzcan a un mínimo los asentamientos diferenciales del edificio.

La existencia de una carga de falla por fluencia se ha observado en ensayos de veleta a diferente velocidad de rotación y triaxiales no drenados con carga mantenida. Esto determina la llamada resistencia de fluencia (ver Figura 18).

$$\tau_{ft} / \tau_{fu} = A + B \log(t_0 / t + C)$$

para $t \rightarrow \infty$ $\tau_{ft} = \tau_{for}$

por lo tanto $\tau_{for} / \tau_{fu} = A + B \log C$

Otro método para determinar la carga de falla de fluencia es a partir de los resultados de ensayos de carga rápidos. Cada incremento de carga se mantiene 16 min con lecturas a 2,4,8 y 16 min. El asentamiento por fluencia entre 2 y 16 minutos se grafica contra la carga. El punto de fluencia o carga de fluencia corresponde al punto de la curva con radio de curvatura mínimo como se muestra en la Figura 19.

Como la determinación de la resistencia de fluencia consume bastante tiempo y normalmente no se puede realizar sino una determinación por sitio del edificio, se supone por experiencia que τ_{fcr}/τ_{fu} permanece constante en todo el perfil del suelo.

EDIFICIO DE OFICINA - STAMPEN

El suelo está formado por un relleno de 0.50 a 1.50 m y a continuación 30 a 40 m de arcilla blanda de alta plasticidad sobre un suelo sedimentario no cohesivo o morrena. En la Figura 20 se presentan características típicas. La arcilla es ligeramente sobreconsolidada. En el momento de la investigación del subsuelo, la presión de preconsolidación supera la presión efectiva de la sobrecarga en 30 a 40 kPa. La relación de compresión virgen $CR=C_c/(1+e_0)$ varía entre 0.4 y 0.55. El edificio fue construido en 1974-75, es de oficinas de 7 pisos en parte del área y de 1 a 3 en el resto y un sótano para garajes de 2.5 a 3.0 m bajo el nivel de la calle. En la Figura 21 se muestra la carga promedio del edificio y la carga neta (total menos peso del suelo excavado). Como puede observarse, únicamente en el área de 7 pisos se presenta una carga neta y por lo tanto es la única parte cimentada con el sistema placa-pilotes de fluencia. Los pilotes son de madera de 12 m de longitud. Su carga de fluencia ha sido calculada sobre la suposición de una resistencia de fluencia de 60% de la resistencia al corte no drenada convencional. Esto da una carga de fluencia de 100 kN. El diseño del sistema placa-pilote se hace bajo la suposición de que la carga neta promedio es tomada por los pilotes de fluencia. De acuerdo con este principio de diseño, se requiere un pilote por cada 4.0 m² de área de placa. La distribución de asentamientos, 8 años después de completar el edificio se muestra en la Figura 21.

EDIFICIOS RESIDENCIALES, OLSKROKEN

Se presenta el caso de dos edificios vecinos de cuatro pisos y sótano reducido para instalaciones domiciliarias, uno cimentado por el sistema de placa-pilotes de fluencia y el otro con pilotes convencionales de fricción. Las dos cimentaciones fueron instrumentadas cuidadosamente con piezómetros a diferentes profundidades, bajo las edificaciones, medidores de asentamientos, celdas de presión para medir la carga sobre los pilotes y la presión de contacto placa-suelo. En la Figura 22 se presentan características típicas del subsuelo. Teniendo en cuenta las posibles variaciones del nivel freático la arcilla puede considerarse normalmente consolidada. La relación de compresión virgen CR varía entre 0.4 y 0.65.

El edificio sobre pilotes convencionales tiene un área cubierta de 14.0 m de ancho y 50 m de longitud y transmite una carga total de 46.4 MN que

distribuida en el área resulta una presión de 6.6 ton/m². Los pilotes de cimentación se diseñaron para soportar la carga total del edificio con un factor de seguridad de 3 contra la falla a corto plazo. En total se tienen 211 pilotes combinados de madera en los 18 m inferiores y de concreto en los 10 m superiores y de 270 mm de lado.

El edificio sobre placa-pilotes de fluencia tiene un área cubierta mayor, 75.0 m por 12.0 m. La placa de cimentación tiene 0.40 m de espesor y la subestructura en conjunto puede considerarse relativamente rígida. La presión transmitida es de 6.0 ton/m². Puesto que la arcilla es normalmente consolidada, el incremento neto en la presión total será soportado por los pilotes de fluencia, mientras que la carga compensada por el peso del suelo excavado es transmitida como presión de contacto directa entre la placa y el suelo. Sin embargo, para tener en cuenta posibles variaciones del nivel del agua del subsuelo, la presión de contacto de diseño se supuso igual a 23 KPa mientras que el peso de suelo corresponde a un alivio de presión de 30 KPa al nivel de fundación.

Los pilotes combinados utilizados para la cimentación consisten en pilotes de madera de 18 m de longitud, acoplados a pilotes de concreto de 8 m de longitud y 0.30 m de diámetro. La carga de falla de fluencia de estos pilotes, calculada sobre la base de una resistencia de fluencia de la arcilla del 70% de la resistencia al corte no drenada, es de 330 kN. Esto da un total de 104 pilotes.

Los resultados de la carga para los pilotes de fluencia y de la presión de contacto entre la placa y el suelo se muestran en las Figuras 23 y 24.

La distribución de asentamientos después de 1.5 años de completados los edificios, se presenta en las Figuras 25 y 26. El asentamiento varía entre 17 y 27 mm para el edificio sobre pilotes de fricción y entre 15 y 20 mm para el edificio sobre pilotes de fluencia. Las rotaciones angulares máximas resultan de 1:800 y 1:1500 en cada caso. Los resultados son muy similares, pero el periodo de observación es muy corto para sacar conclusiones a largo plazo.

6 - EXPERIENCIA LOCAL CON PLACA-PILOTES

PROYECTO RAFAEL NÚÑEZ

El Proyecto Habitacional Rafael Núñez, de propiedad de la Caja de Vivienda Militar, está localizado al occidente de la Ciudad Universitaria en Bogotá. Consta de 58 edificios de 10 pisos y 4500 m² de construcción cada uno, agrupados en 11 unidades con semisótano común.

Hasta el momento se han desarrollado completamente las dos primeras etapas del proyecto y se halla en construcción la Tercera Etapa. En la Figura 27 se presenta la distribución de columnas con sus cargas de uno de los edificios de la primera etapa.

Durante la construcción se realizaron dos pruebas de carga sobre pilotes instrumentados de 20 y 30 metros de longitud efectiva y 0.60 m de diámetro

nominal. Los resultados de las pruebas permitieron determinar la capacidad real por fricción lateral y por la base. Además, en todos los edificios se instalaron puntos para control de asentamiento real del sistema de cimentación.

El subsuelo del lote está formado por una secuencia de arcillas de consistencia media, algo limosas de alta plasticidad con algunas intercalaciones de turba, las cuales sobreyacen a estratos de arena fina limosa densa que se encuentran a partir de 29 a 30 m de la profundidad explorada de 40 m. Se trata de suelos lacustres de origen reciente pertenecientes a la Formación Sabana, con un perfil bastante homogéneo en toda el área del proyecto, como se puede apreciar en las Figuras 28, 29 y 30.

La solución que se adoptó finalmente, teniendo en cuenta criterios técnicos y económicos fue la de placa y pilotes preexcavados de concreto, de 20 m de longitud efectiva. En la primera etapa se emplearon pilotes de 0.60 m de diámetro y en las dos siguientes pilotes de 0.40 m de diámetro. La presión total transmitida por un edificio es de 11.0 ton/m² y el alivio por excavación de 4.5 ton/m². Los pilotes se diseñaron para trabajar a un 70% de su capacidad, tomando la carga correspondiente a la presión neta de 6.5 ton/m² aplicada por los edificios. Los asentamientos máximos calculados a corto y largo plazo fueron de 1.8 y 7.0 cm respectivamente, para un factor de seguridad promedio de 2.4.

En la actualidad se cuenta con un registro muy completo de asentamientos de las dos primeras etapas. Se tienen datos de todos los edificios, de puntos localizados en la periferia y en el centro de cada placa, con los cuales se hicieron gráficas de asentamientos contra tiempo.

En las Figuras 31 y 32 se muestran dos gráficas típicas de la primera etapa. En general se observa que la tendencia del movimiento fue creciente, más o menos proporcional con la aplicación de la carga hasta la época de ocupación de los edificios, en donde se alcanzaron asentamientos entre 40 y 50 mm, seguida de una disminución muy notoria de la velocidad de asentamiento.

En general los asentamientos que se han presentado coinciden bastante bien con lo calculado durante la etapa de diseño. Los asentamientos registrados corresponden a los inmediatos durante construcción, en condiciones no drenadas, y a un porcentaje muy alto de los totales.

PROYECTO EDIFICIO APOTEMA I

El edificio Apotema I se construyó en 1989, en un lote plano de 30.0 m de frente por 30 m de ancho, localizado en la Calle 127 con Carrera 12 de la ciudad de Santa Fe de Bogotá. El edificio destinado a apartamentos, consta de sótano, semi-sótano y diez pisos, cubre un área de 690 m² y tiene como característica especial que la torre a partir del sexto piso se reduce en 7 m por el costado occidental, por efecto de exigencias de aislamiento con el lote vecino. Debido a esa distribución arquitectónica las cargas no son simétricas con respecto al centro geométrico del área cubierta por el

edificio. La excentricidad resultante debió corregirse con la geometría de la placa de cimentación y la distribución de los pilotes de refuerzo como se muestra en la Figura 33.

El subsuelo está compuesto por una capa vegetal de unos 20 cm de espesor, seguida por un limo algo arcilloso de color café oscuro, oxidado y de consistencia media. Este estrato limoso alcanza una profundidad de 1.50 m, a partir de la cual aparece la arcilla habana oxidada, sobreconsolidada por desecación y que se extiende hasta 4.50 ó 5.0 m de profundidad. Desde esa profundidad y hasta los 45.0 m, se encuentran arcillas de colores habano oscuro y gris oscuro, de consistencia blanda a media y de alta plasticidad (ver Figuras 34 y 35).

Luego de los análisis de varias alternativas de cimentación, se adoptó la solución de placa aligerada en concreto reforzado combinada con pilotes fricción de 0.60 m de diámetro y 35.0 m de profundidad (29.25 m de longitud efectiva). Para el diseño, se calculó la capacidad de carga de los pilotes y se efectuaron análisis de modelos de vigas con apoyos elásticos representando a los pilotes y el suelo en contacto con la placa, para todas las vigas principales de la cimentación. Se buscó colocar pilotes de refuerzo bajo las columnas y en partes intermedias de las vigas en las zonas de concentración de cargas, tratando en lo posible de obtener asentamientos uniformes de manera que los diferenciales fueran mínimos.

La distribución final a que se llegó consta de 38 pilotes de refuerzo, localizados como se muestra en la Figura 33. Los análisis de asentamientos inmediatos y por consolidación indicaban un asentamiento total del orden de 7.0 a 8.0 cm. Después de dos años de funcionamiento incluyendo la época de construcción, el asentamiento medido es del orden de 8 a 10 cm. Desafortunadamente no hay un registro completo sobre este control.

PROYECTO EDIFICIO TAMINANGO

El edificio Taminango tiene doce pisos y dos sótanos y se encuentra actualmente en construcción, en un lote de forma rectangular de 45.8 m de longitud por 30 m de ancho, localizado en la Calle 123 con Carrera 11B, al norte de la ciudad Santa Fe de Bogotá. Las cargas que transmiten las columnas a la cimentación varían entre 338 y 716 ton y las pequeñas excentricidades fueron fácilmente corregidas con la geometría de la placa de cimentación.

La presión total que aplica el edificio, incluyendo el peso propio de la placa de cimentación es de 14.80 ton/m^2 , y el alivio por excavación de 10.8 ton/m^2 . La cimentación resulta parcialmente compensada y se aplica al suelo de fundación una sobrecarga o presión neta de 4.0 ton/m^2 .

El subsuelo del lote de este proyecto, al igual que el del edificio Apotema I y el proyecto Rafael Núñez, es típico de la Formación Sabana y está constituido por material arcilloso de alta plasticidad a partir de 2.0 m y se extiende hasta 36.0 m de profundidad. A continuación aparecen unas arenas finas sueltas a medianamente densas (ver Figura 36). Los dos

primeros metros arcillosos son de color habano, se les encuentra oxidados y fisurados, y de consistencia media a firme. Sigue una arcilla es gris verdosa o gris oscura, de consistencia blanda a media y con resistencia al corte no drenada, C_u , entre 2.0 y 4.0 ton/m^2 . Intercalados con estas arcillas se presentan estratos de turba de poco espesor. En general se encuentran ligeramente sobreconsolidadas, con relaciones de sobreconsolidación entre 1.5 y 2.0, tal como puede deducirse de la Figura 37.

Se llegó a la conclusión de que la solución de cimentación técnica y económicamente más adecuada para el edificio Taminango consiste en placa aligerada combinada con pilotes de fricción del tipo preexcavados de concreto y fundidos en el sitio.

Considerando que la placa transmite al suelo una carga equivalente a la resultante del alivio por excavación y los pilotes la presión neta con un factor de seguridad del orden de 2.0, se obtuvo un sistema conformado por una placa de 920 m^2 de área, reforzada con 46 pilotes de 35 m de profundidad (28.0 m de longitud efectiva) y 0.60 m de diámetro, con la distribución que se muestra en la Figura 38. Para este sistema se calcularon asentamientos totales de 8 cms.

Durante la etapa de excavación se tuvieron algunos problemas de inestabilidad que originó una expansión del fondo de excavación entre 10 y 20 cm, muy superior a la calculada en la etapa de diseño y por lo tanto los asentamientos por recompresión deben resultar superior a los cálculos. En la actualidad el edificio se encuentra en aproximadamente un 70% de la carga total y el asentamiento promedio registrado es del orden de 8.0 cm.

7. CONCLUSIONES

La combinación de placas con pilotes de fricción es un sistema de cimentación que permite mantener los asentamientos totales y diferenciales dentro de límites tolerables por la estructura y en general resulta económicamente más favorable que las cimentaciones profundas con pilotes de fricción.

Con una adecuada distribución de los pilotes, usualmente bajo los elementos estructurales que transmiten las cargas como las columnas o muros portantes, se puede lograr una ventaja estructural al reducirse las fuerzas internas de la placa.

Para demostrar la bondad del sistema en arcillas de consistencia blanda a media y ligeramente sobreconsolidadas como las del subsuelo de la Formación Sabana, es muy importante una adecuada instrumentación de la placa, los pilotes y el suelo de fundación. Esto permitiría registrar el comportamiento a corto plazo y a largo plazo del sistema placa-pilotes y compararlo con las predicciones de la etapa de diseño.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la colaboración de los Ingenieros y Auxiliares de Ingeniería y Geotecnia Ltda., en especial al Ingeniero Bernardo Castañeda por la preparación de parte del material. El Ingeniero Diego Sanabria proporcionó información básica para el desarrollo del tema. La labor de dibujo estuvo a cargo de las Señoras María Mercedes Rodríguez y Cecilia Nuñez y la mecanografía de la Señorita Olga Lucía Aponte A.

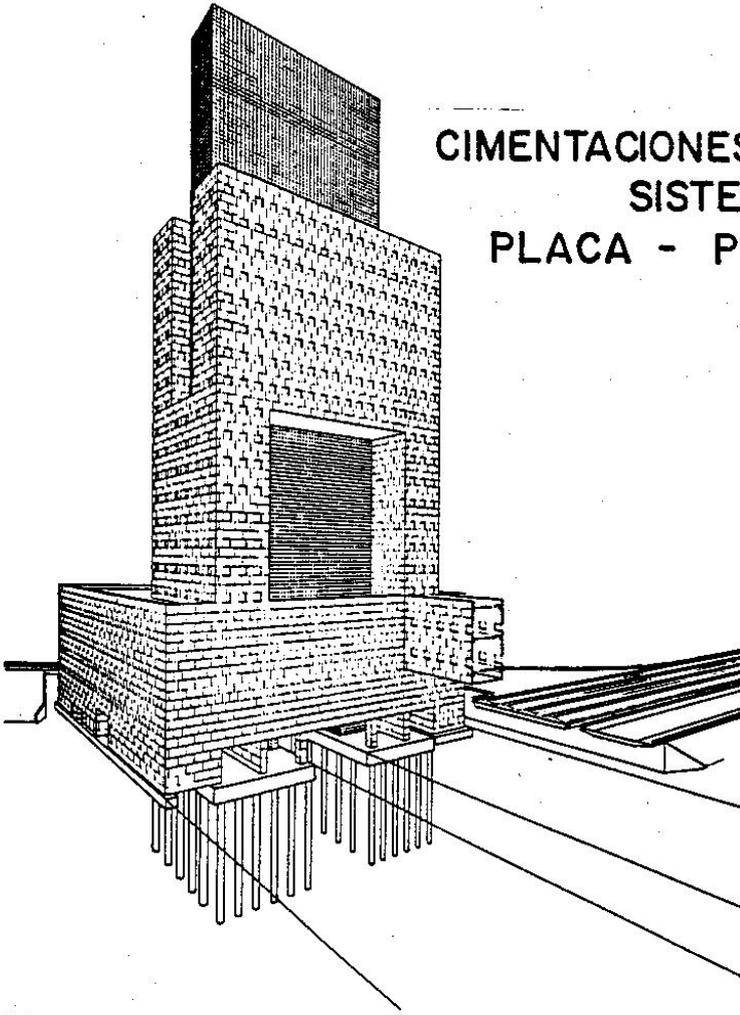
BIBLIOGRAFIA

- BUTTERFIELD, R. y BANERJEE, P. K., (1971), "The Problem of Pile Group-Pile Cap Interaction", *Geotechnique* 21, No. 2, pp 135-142.
- COMBARIEU D. (1991), "Shallow and Piles Composite Foundations with or without Direct Link", *Proceedings of the International Conference of Deep Foundations*. París, Francia.
- COOKE, R. W., (1978), "The Settlement of Friction Pile Foundations", *Foundation and Soil Technology*, The Construction Press, New York.
- COOKE, R. W., (1986), "Piled Raft Foundations on Stiff Clays - a contribution to design philosophy", *Geotechnique* 36 No. 2, pp 169-203.
- FRANKE, E., (1985), Discussion Contribution: Group action of piles. *Proceedings of 11th ICSMFE, San Francisco 1985, Vol. 5, P 2727*.
- FRANKE, E., (1991), "Measurements Beneath Piled Rafts", *Proceedings of the International Conference of Deep Foundations*. París, Francia.
- HANSBO, SVEN, (1984), "Foundations on Friction Creep Piles in Soft Clays", *Proceedings of the International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Missouri.
- MOYA, J. y RODRIGUEZ, J., (1987), "El suelo de Bogotá y los Problemas de Cimentaciones", *Memorias del VII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones*. Sociedad Colombiana de Geotecnia, Cartagena.
- MOYA, J. y RODRIGUEZ, J., (1988), "Comportamiento de Cimentaciones Compensadas Combinadas con pilotes de Fricción", *Memorias de Quintas Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana*. Sociedad Colombiana de Ingenieros, Bogotá.
- POULOS, H. G. y DAVIS E. H., (1980), "Piles Foundation Analysis and Design", John Wiley and Sons, New York.
- SOMMER, WITTMANN, RIPPER (1985), "Piled Raft Foundation of tall Building in Frankfurt Clay", *Proceeding of 11th ICSMFE, San Francisco 1985, Vol. 4*.
- THAHER M., JESSBERGER H. L. (1991), "Load Transfer to the Supporting Soil Using Pile - Raft Foundations", *Proceedings of the International Conference of Deep Foundations*. París, Francia.

VESGA, L. F., GONZALEZ, L. y BONILLA, N., (1991), "Método para el Análisis de Asentamientos del Sistema de Cimentación Placa-Pilotes de Fricción", Memorias del IV Congreso Colombiano de Geotecnia. Sociedad Colombiana de Geotecnia, Bogotá.

ZEEVAERT, L., (1972), "Design of Compensated Friction Pile Foundations", Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions, Van Nostrand Reinhold Company, New York.

CIMENTACIONES PROFUNDAS
SISTEMA
PLACA - PILOTES



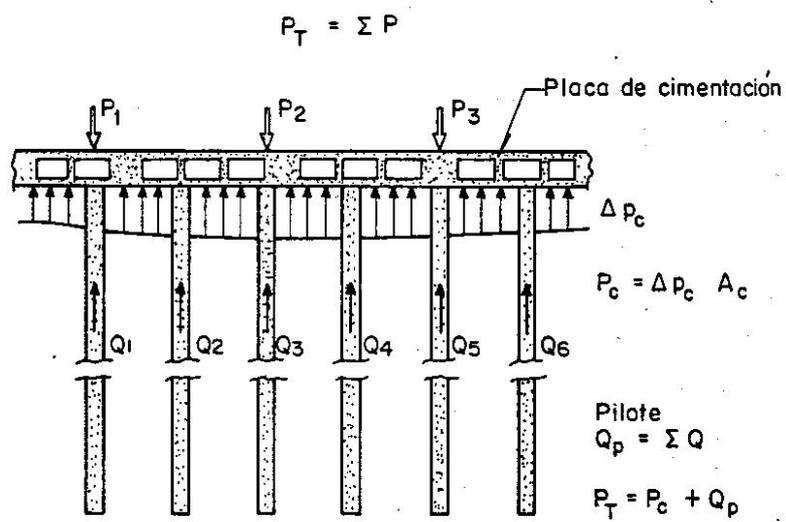
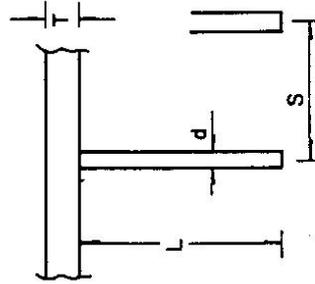
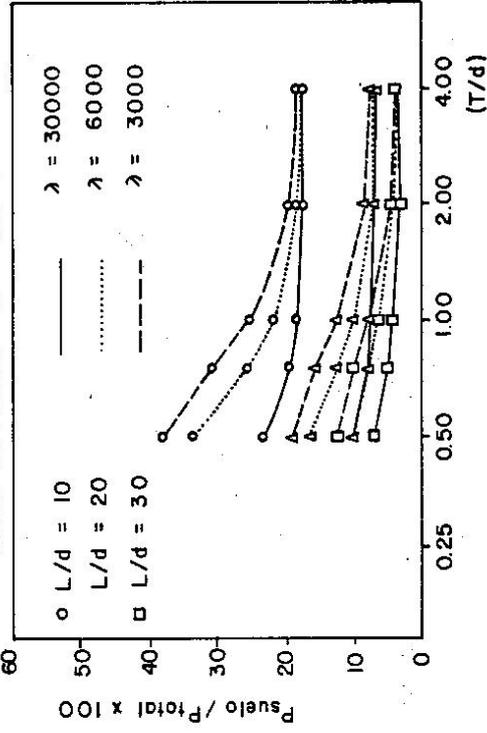


FIGURA 1- SISTEMA PLACA PILOTES



GRUPO DE PILOTES 3x3 S/d = 5



T/d = relación de rigidez placa/pilote

λ = E_{pilote}/G = relación de rigidez pilote/suelo

G = $E_{suelo}/2 (1 + \nu_{suelo})$

E_p = 150000 Kg/cm²

S = separación entre pilotes

L = longitud del pilote

FIGURA 2 PORCENTAJE DE LA CARGA Psuelo / Ptotal

(FRANKE, 1.991)

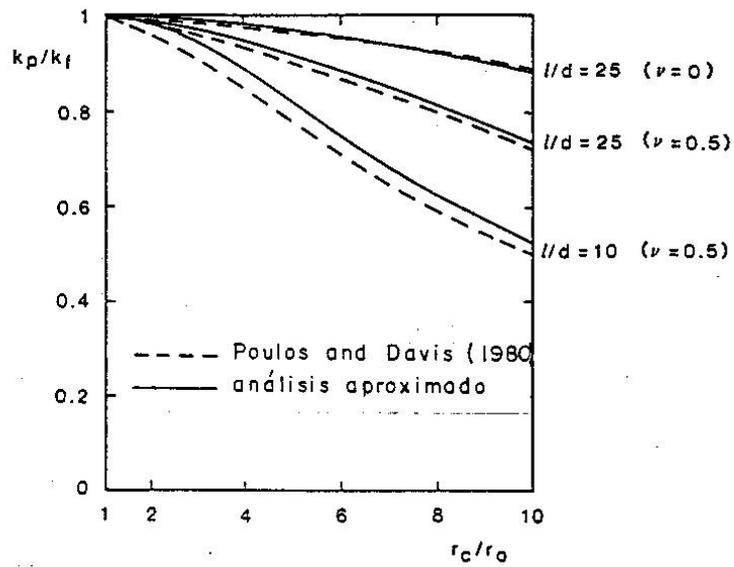


Figura 3 - Efecto del cabezal sobre la rigidez de un solo pilote. (RANDOLPH, 1.983)

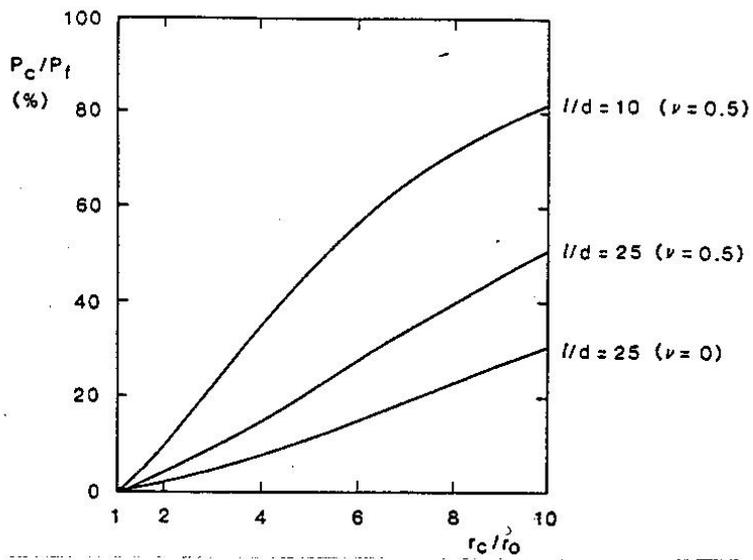


Figura 4 - Proporción de la carga soportada por el cabezal (RANDOLPH, 1.983)

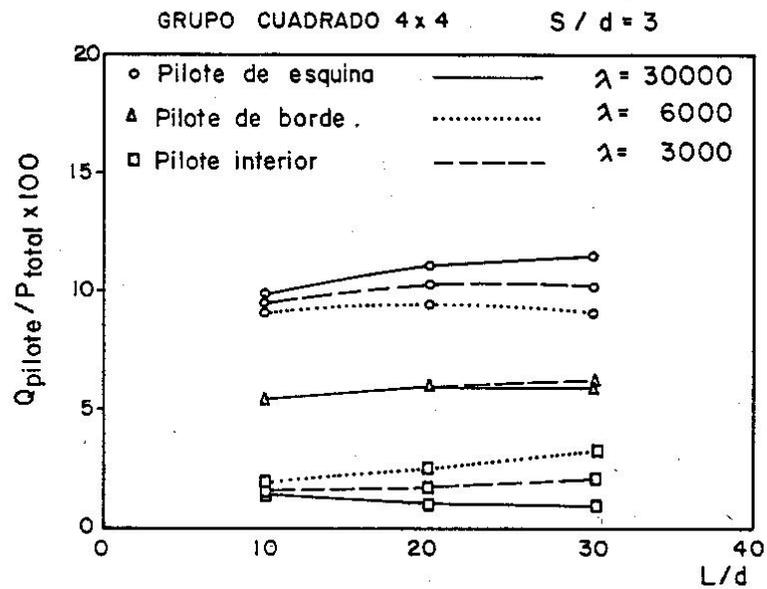


FIGURA 5 DISTRIBUCION DE LA CARGA DE LOS PILOTES DE UN GRUPO CON PLACA RIGIDA (FRANKE, 1.991)

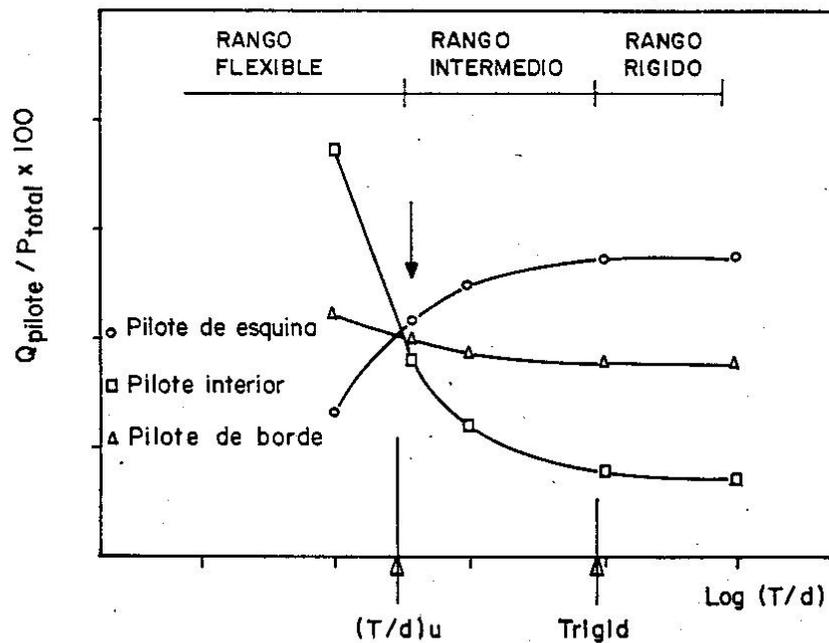


FIGURA 6 LA DISTRIBUCION DE LA CARGA EN UN GRUPO DE PILOTES DEPENDE DE LA RIGIDEZ DE LA PLACA (FRANKE, 1.991)

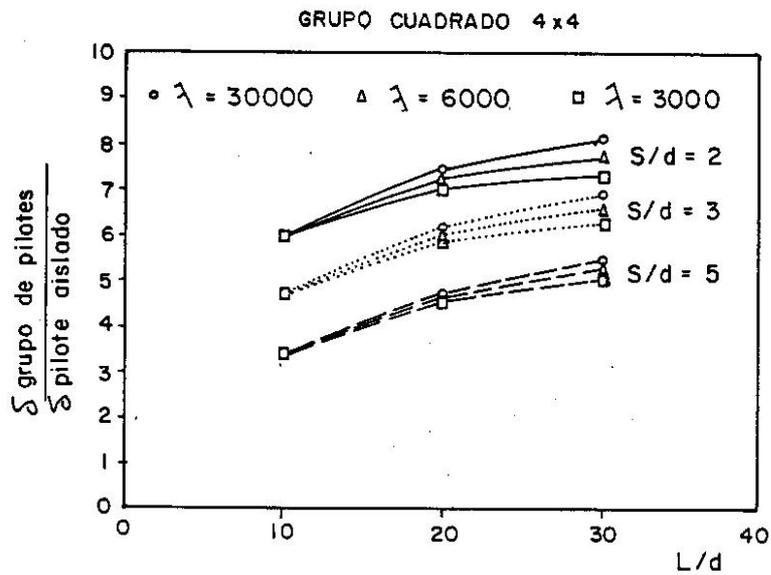


FIGURA 7 ASENTAMIENTO DEL GRUPO COMPACTADO CON EL ASENTAMIENTO DE UN PILOTE

(FRANKE, 1.991)

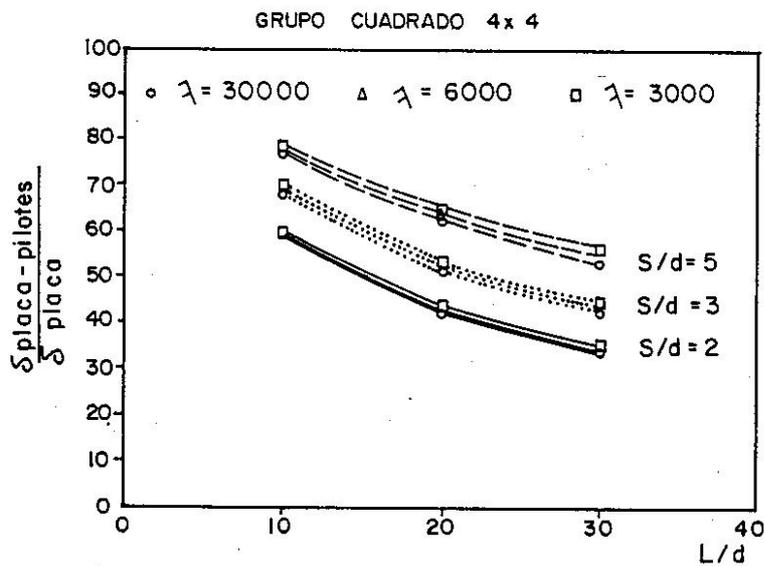


FIGURA 8 ASENTAMIENTO DE LA PLACA-PILOTES COMPARADO CON EL DE SOLO PLACA

(FRANKE, 1.991)

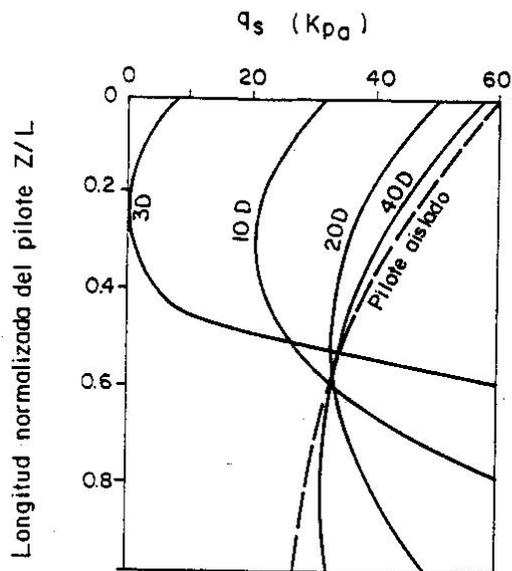


FIGURA 9 DEPENDENCIA ENTRE DESPLAZAMIENTO DEL DEL PILOTE Y RESISTENCIA LATERAL

(FRANKE, 1.991)

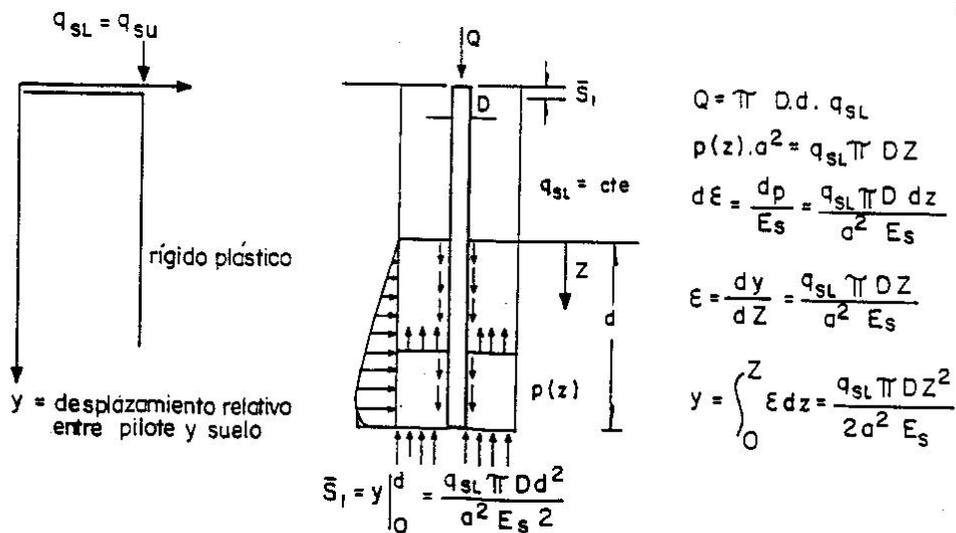
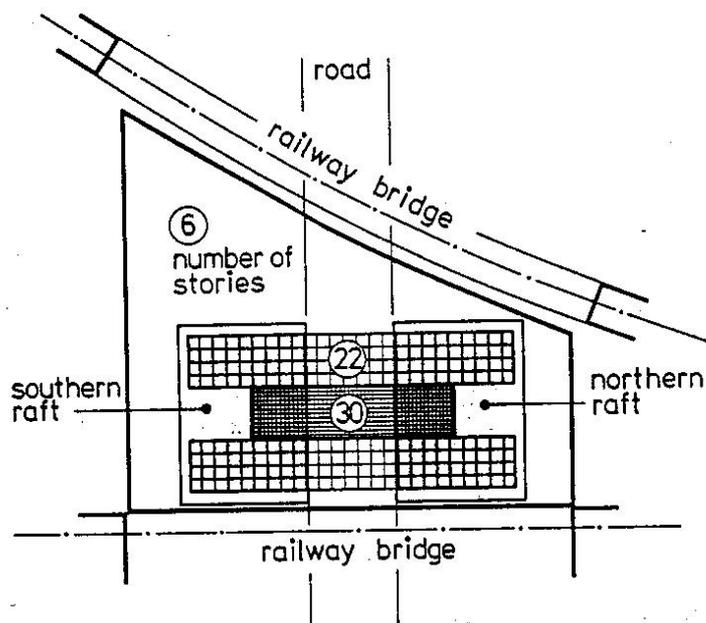


FIGURA 10 MODELO DE CALCULO SIMPLE PARA PILOTES RIGIDOS Y COMPORTAMIENTO RIGIDO PLASTICO DE LA RESISTENCIA DEL VASTAGO

(FRANKE, 1.991)



Planta general del edificio.

(SOMMER, WITTMANN, RIPPER, 1.985)

- Celdas de presión bajo placa
- TPI-3 Extensómetros
- GW 1 Piezómetros
- ⊕ P1- P3 Celdas de presión en pilotes
- ⊕ P.4- P6 Deformímetros eléctricos

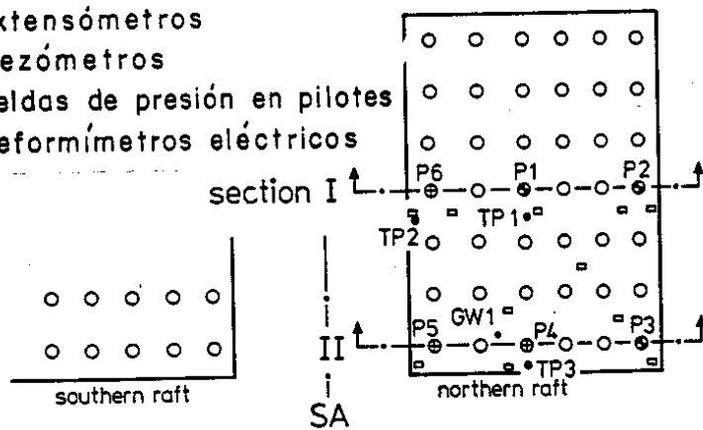


Figura 11 - Distribución de pilotes e instrumentación.

(SOMMER, WITTMANN, RIPPER, 1.985)

TABLA 1 PROPIEDADES DE LA ARCILLA DE FRANKFURT

PARAMETROS	MAX.	MIN.	PROMEDIO
WL	110	50	70
Wp	81	32	45
W	45	16	32
Ic	1.03	0.76	0.90
n	0.59	0.30	0.48
S	1.00	0.80	0.94
Ac	1.30	0.70	1.00
γ (t/m ³)	2.05	1.65	1.85
Cu (K/cm ²)	3.00	0.50	1.50
ϕ' (°)	19	25	20
C' (K/cm ²)	0.1	0.65	0.20

(SOMMER, WITTMANN, RIPPER, 1.985)

Fundación placa pilotes

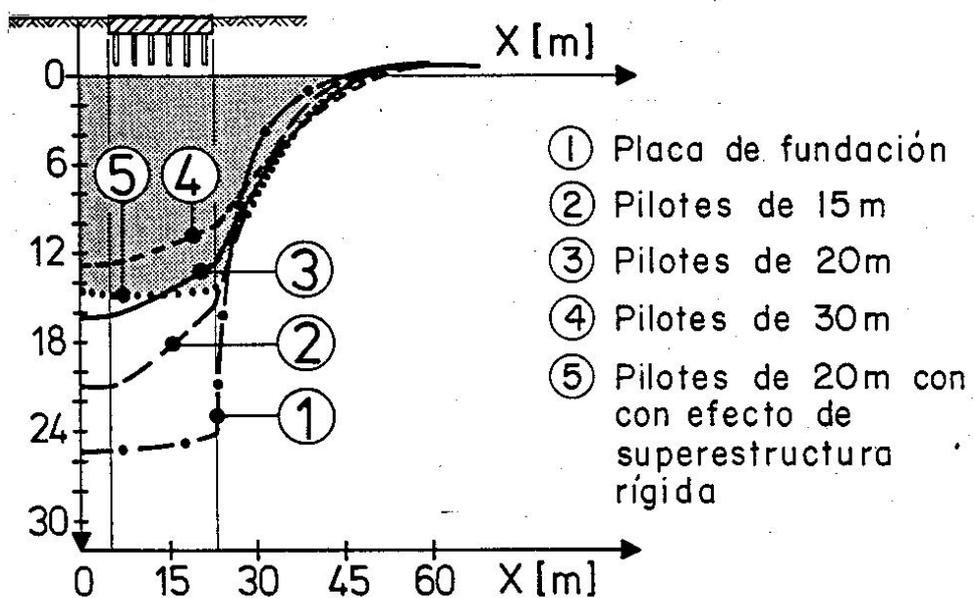


Figura 12 - Asentamientos calculados -
Sección norte - sur.

(SOMMER, WITTMANN, RIPPER , 1.985)

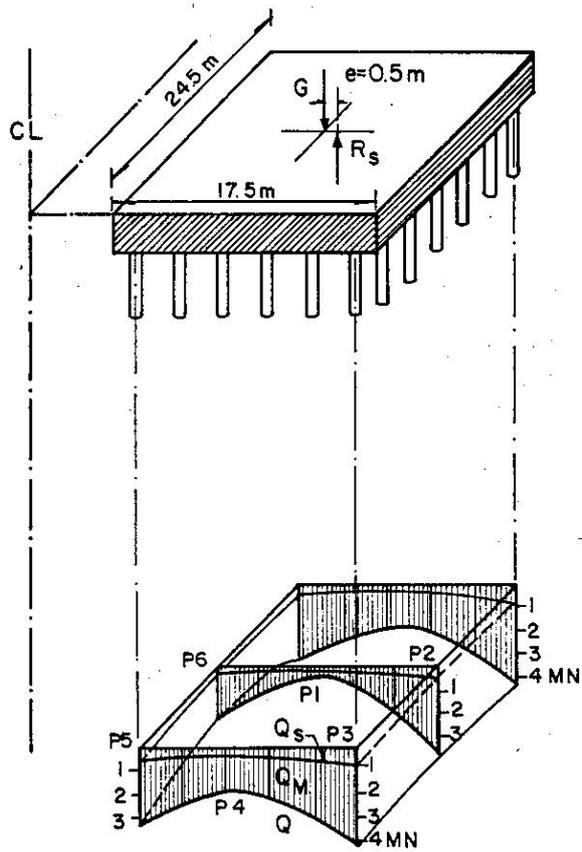
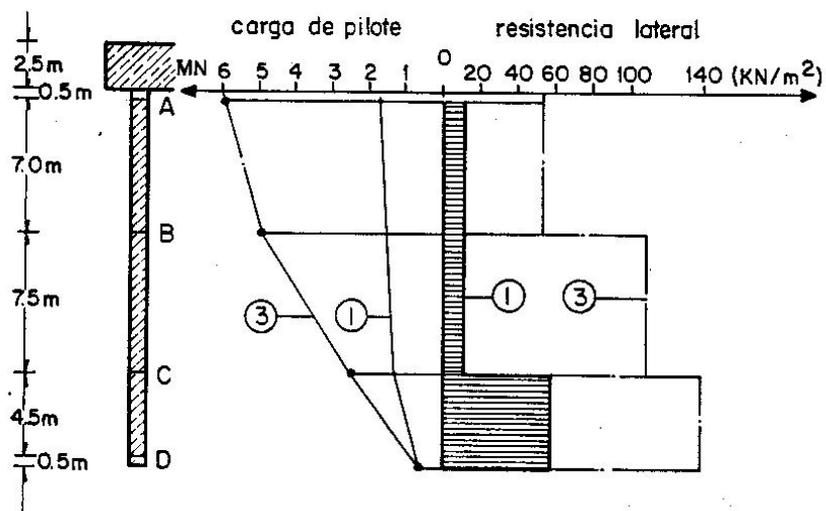


FIGURA 13 CARGA SOBRE LOS PILOTES DEPENDIENDO DE LA POSICION

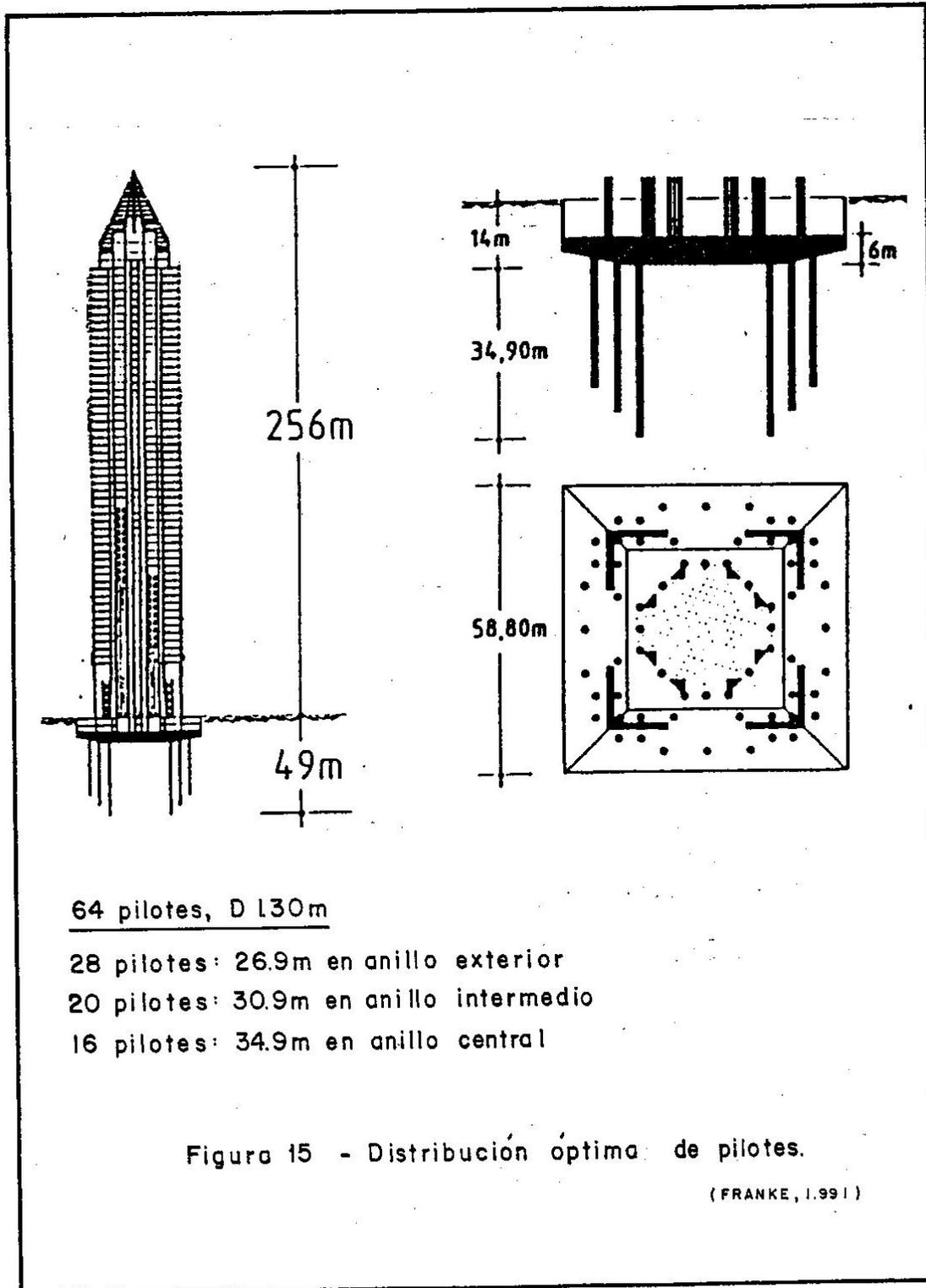
(SOMMER, WITTMANN, RIPPER, 1985)



- ① Pilote central P1
- ③ Pilote de esquina P3

FIGURA 14 RESISTENCIA LATERAL Y CARGA DE PILOTE

(SOMMER, WITTMANN, RIPPER, 1.985)



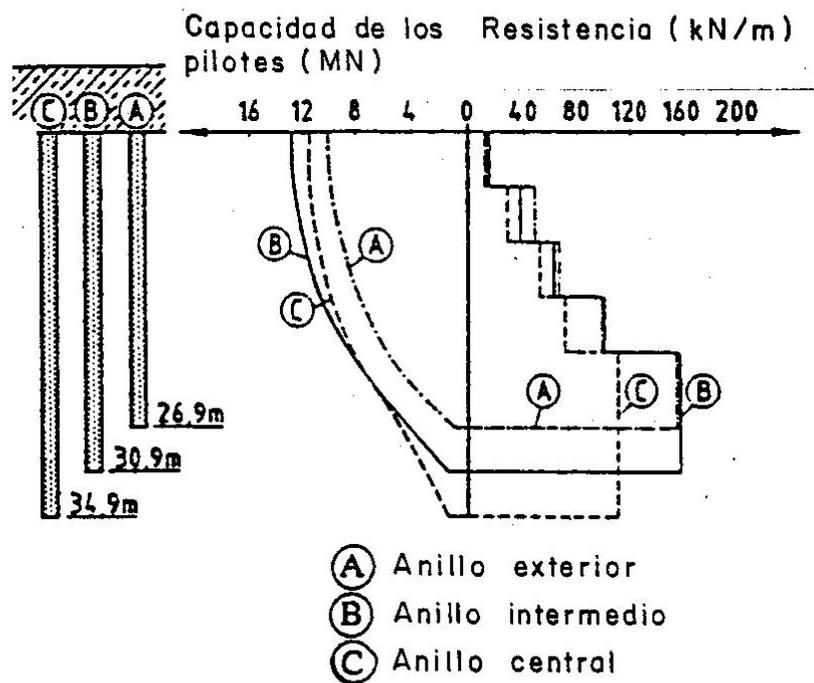


Figura 16 - Resistencia y capacidad de los pilotes con la profundidad.

(FRANKE, 1.991)

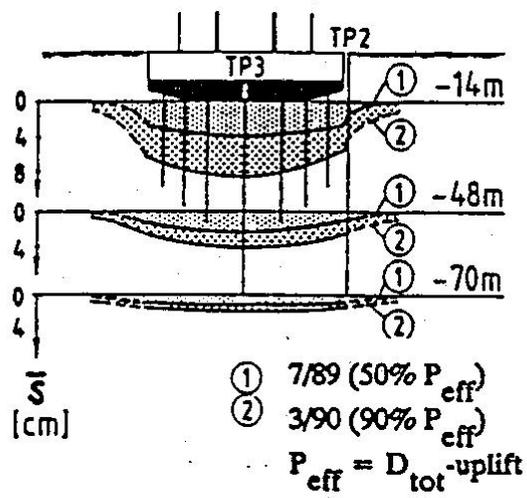


Figura 17 - Variación del asentamiento con la profundidad.

(FRANKE, 1.991)

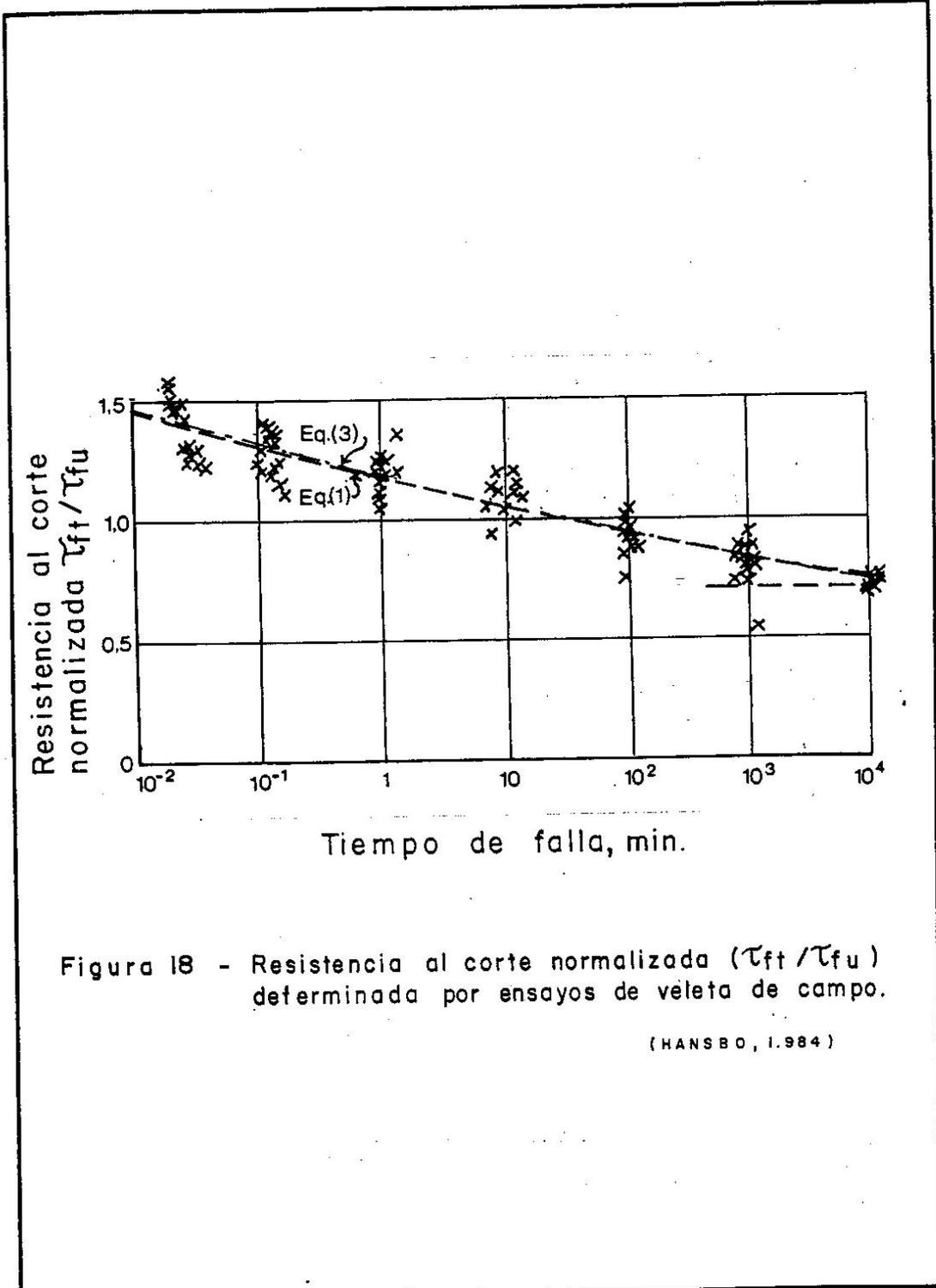


Figura 18 - Resistencia al corte normalizada (τ_{ft}/τ_{fu}) determinada por ensayos de veleta de campo.

(HANSBO, 1.984)

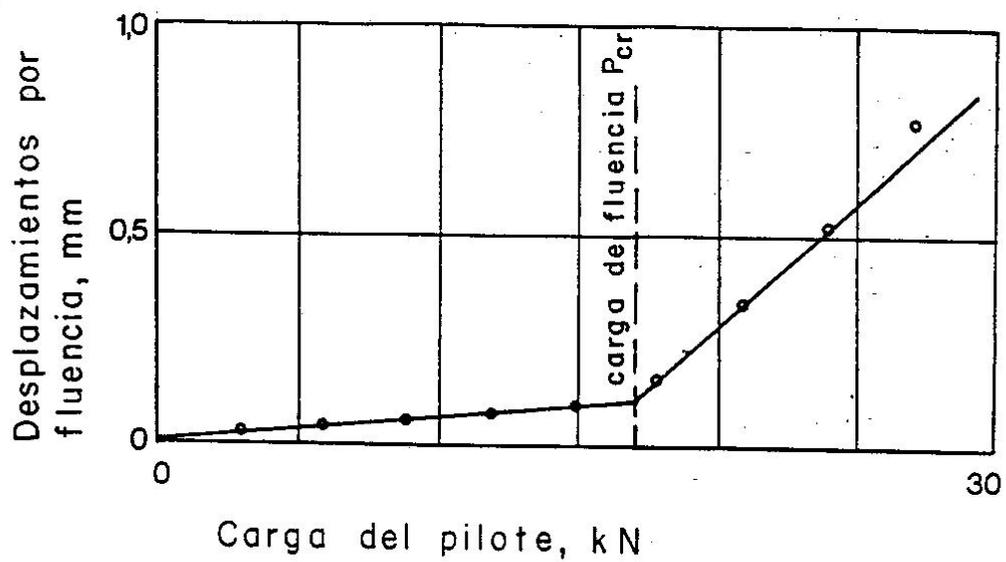
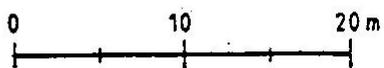
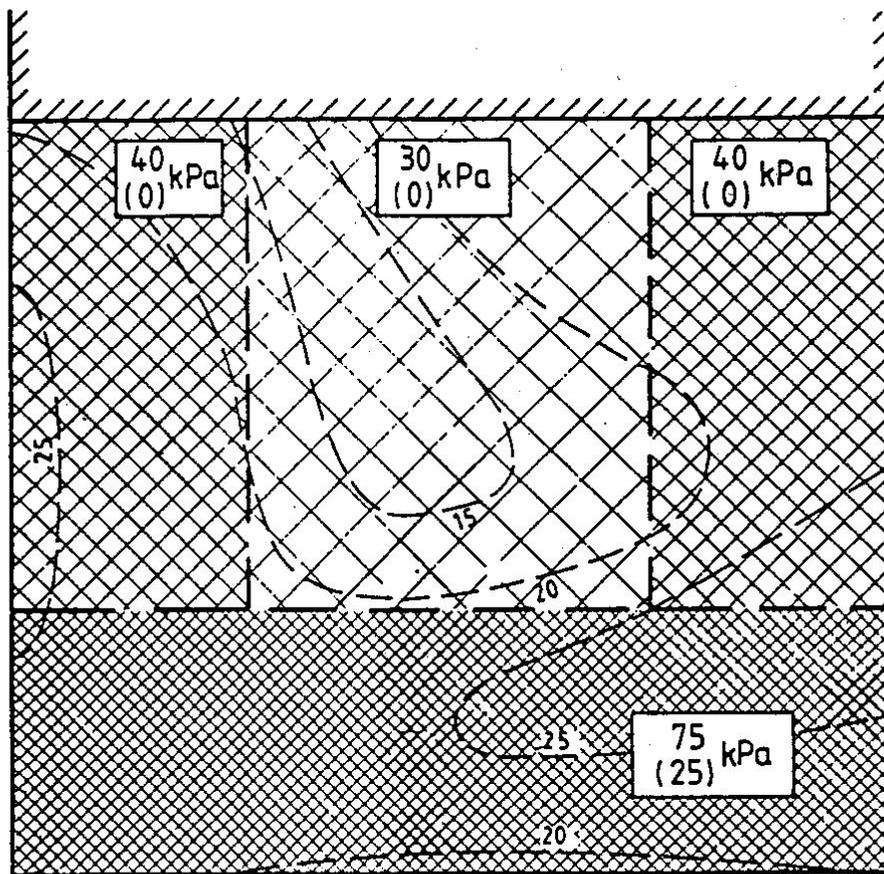


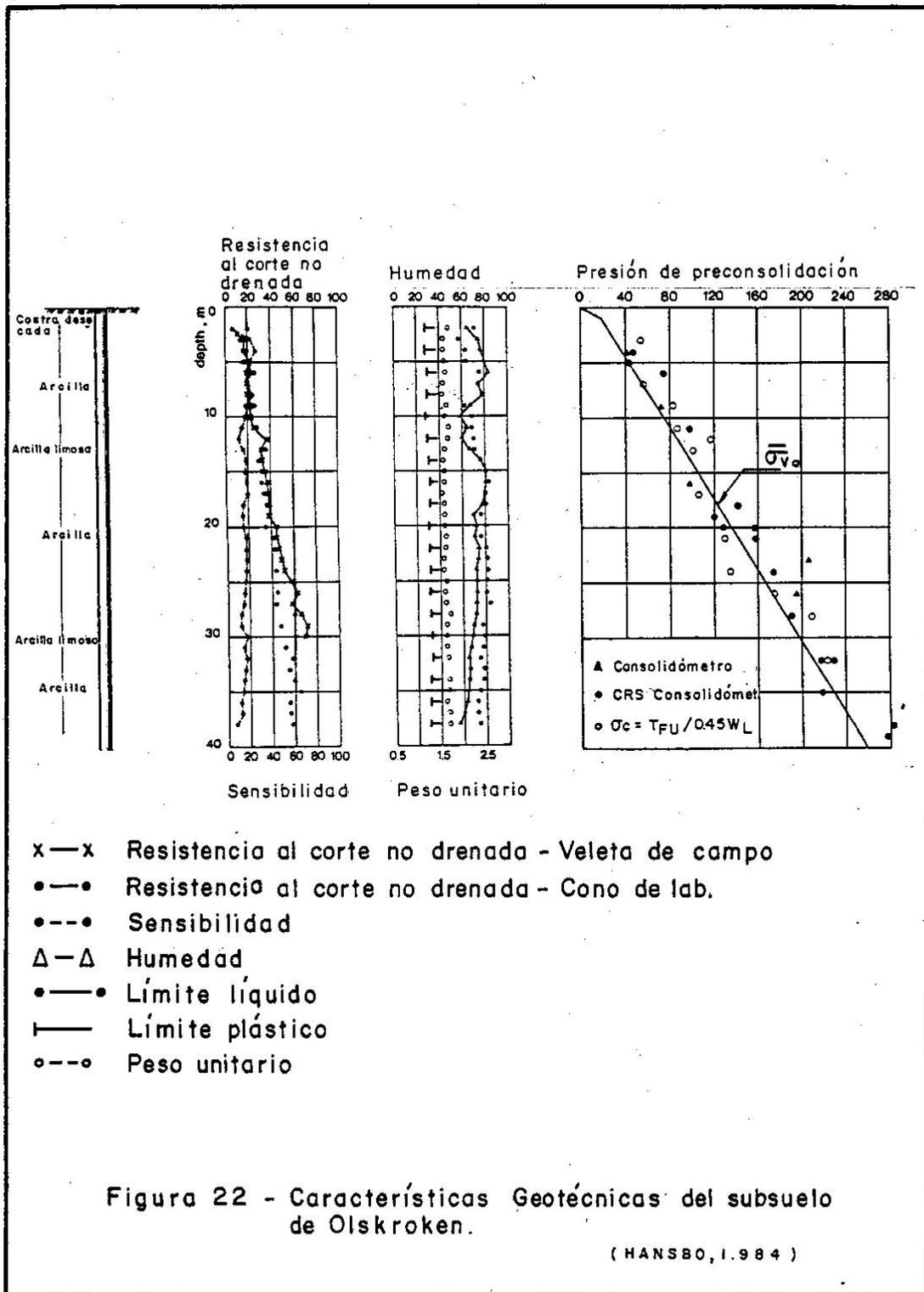
Figura 19 - Determinación de la carga de fluencia en un ensayo de carga de pilote.

(HANSBO, 1.984)



-  7 Pisos + sotano; placa de fluencia
-  3 " " ; sin pilotes
-  1 " " ; sin pilotes

Figura 21 - Condiciones de carga y distribución de asentamientos después de ocho años de funcionamiento. (HANSBO, 1.984).



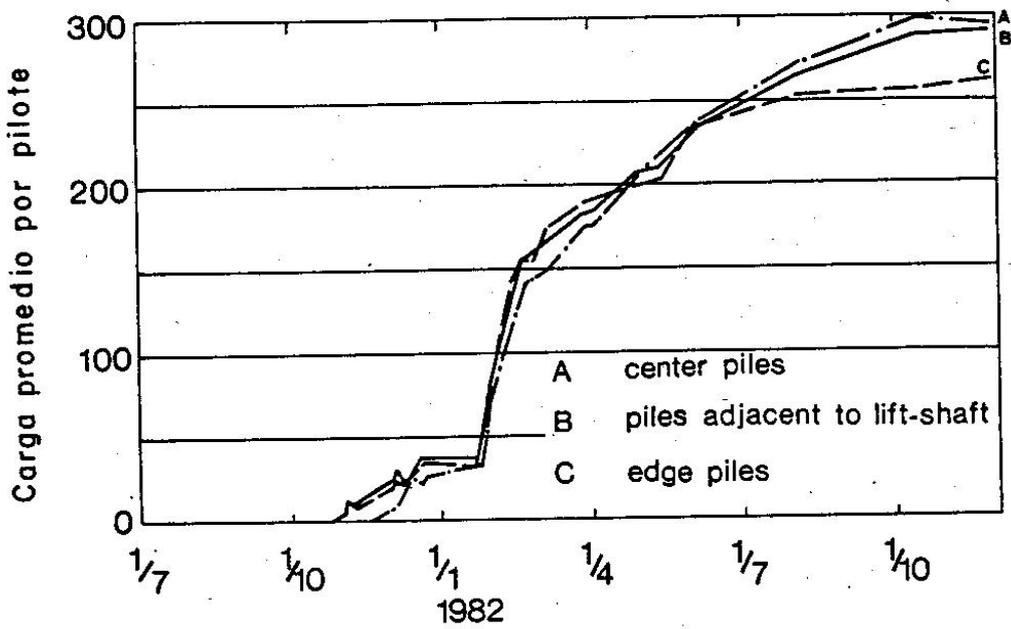


Figura 23 - Carga medida en los pilotes de fluencia.

(HANSBO, 1.984)

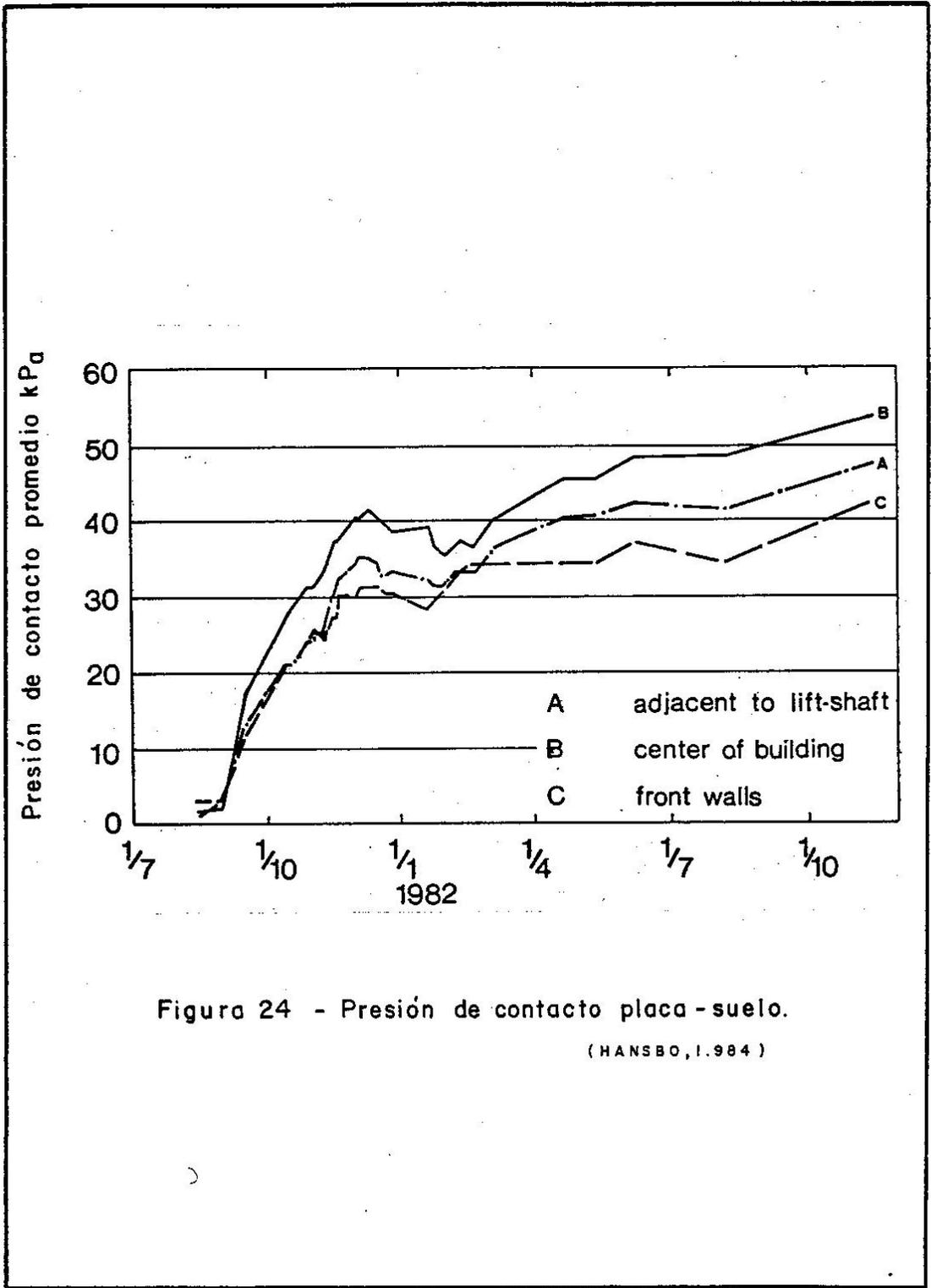


Figura 24 - Presión de contacto placa - suelo.

(HANSBO, I. 984)

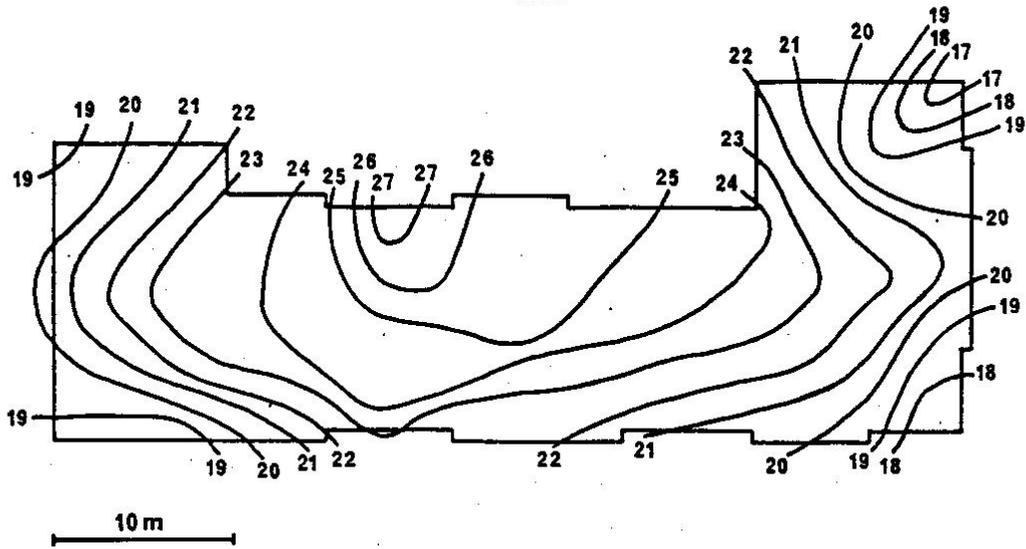


Figura 25 - Distribución de asentamientos 1.5 años después de completada la estructura sobre pilotes convencionales. Pilotes convencionales.

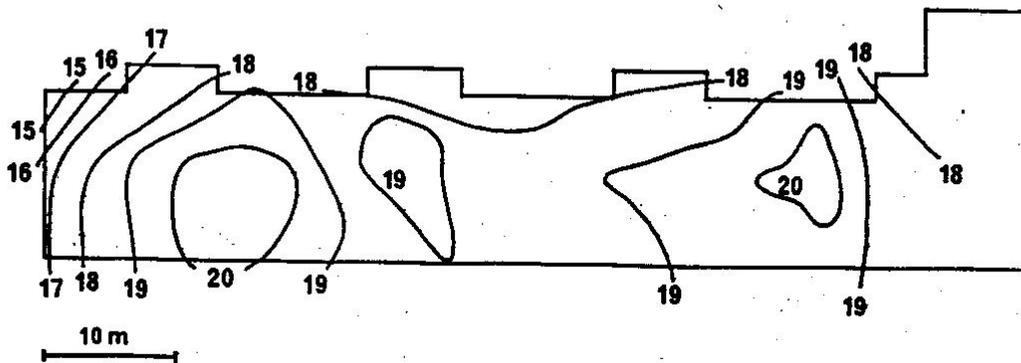
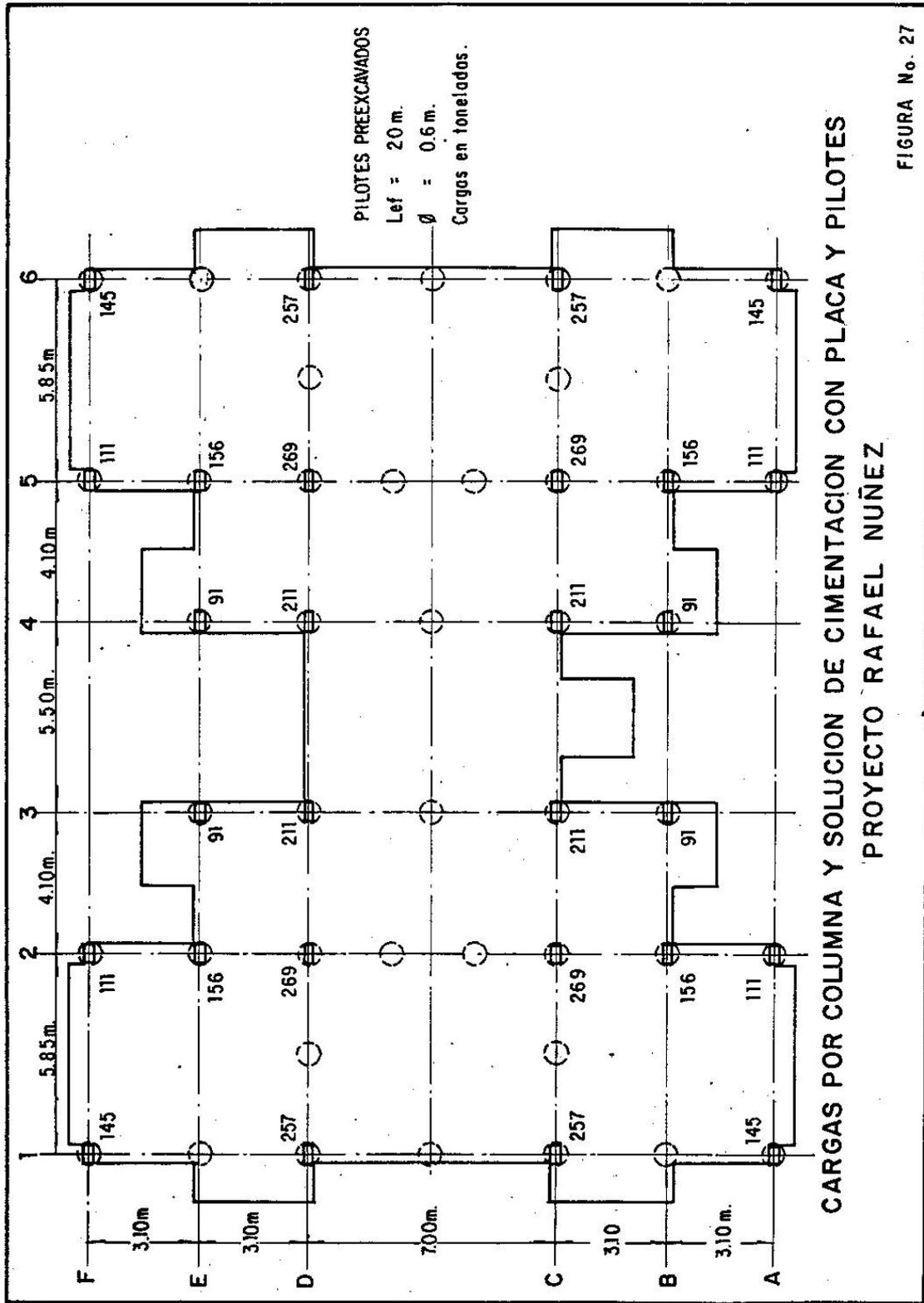


Figura 26 - Distribución de asentamientos 1.5 años después de completada la estructura sobre pilotes de fluencia. Placa - Pilotes de fluencia. (HANSBO, 1.984)



CARGAS POR COLUMNA Y SOLUCION DE CIMENTACION CON PLACA Y PILOTES
PROYECTO RAFAEL NUÑEZ

RESUMEN DE ENSAYOS DE PENETRACION

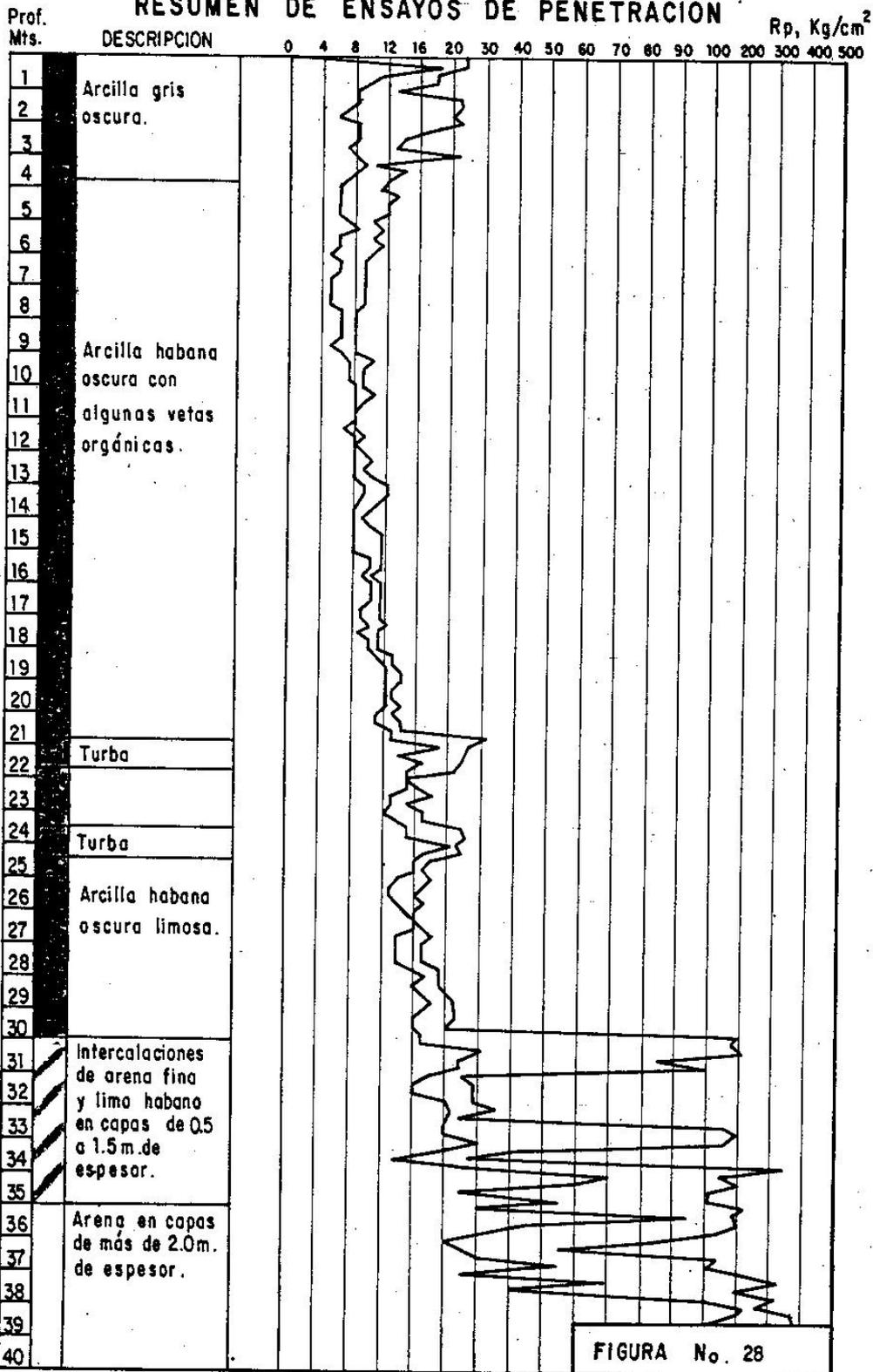
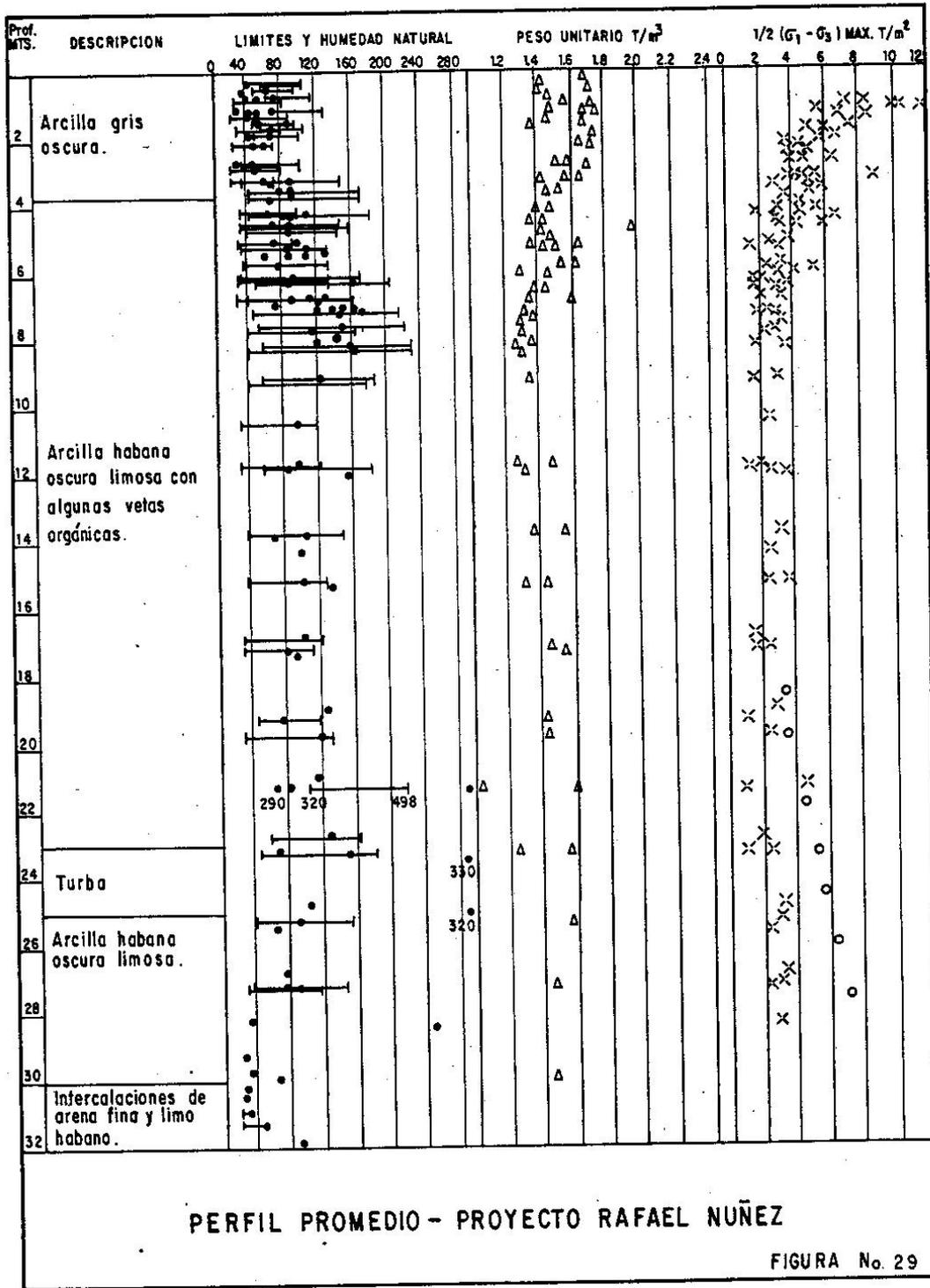
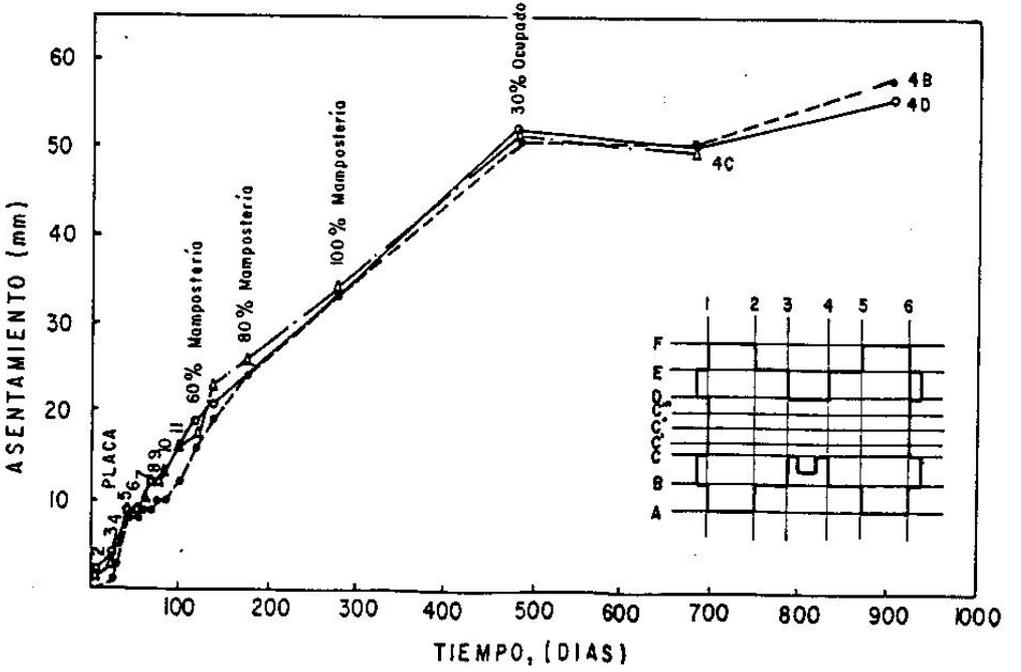
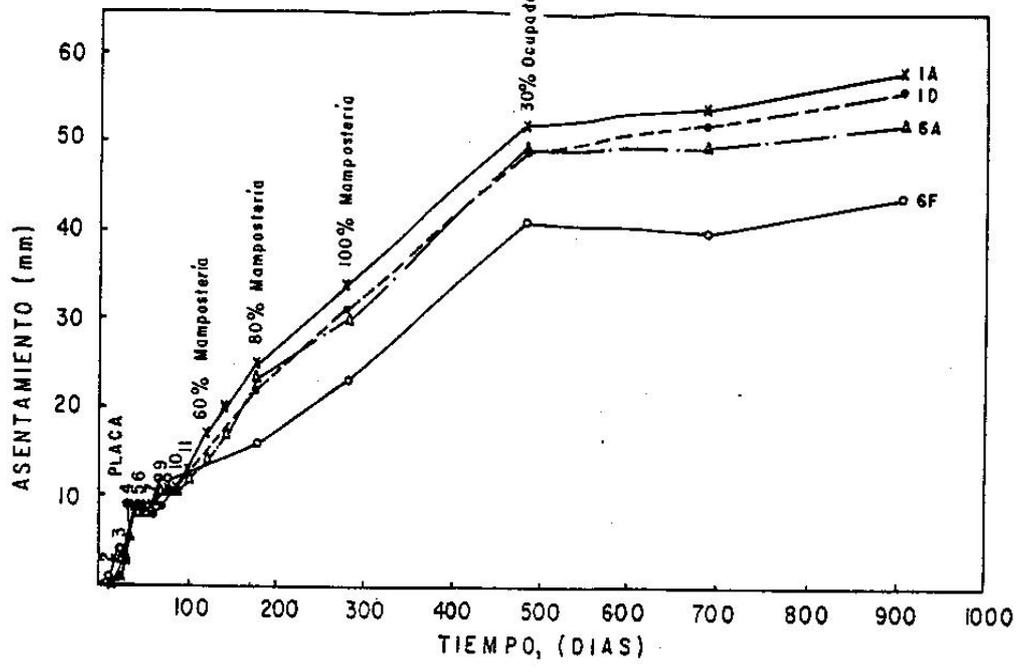


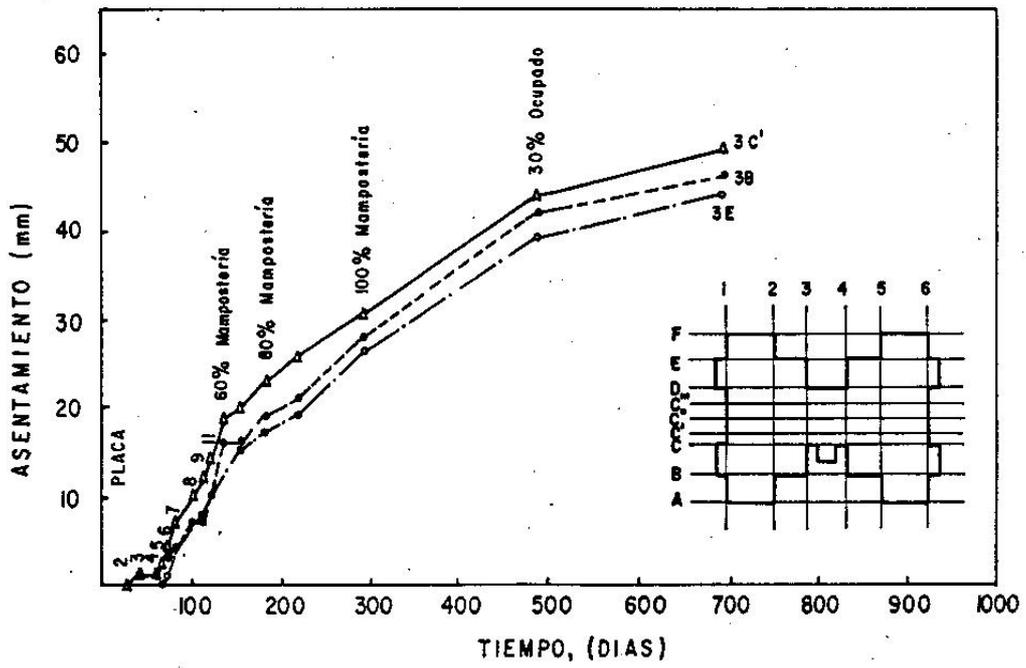
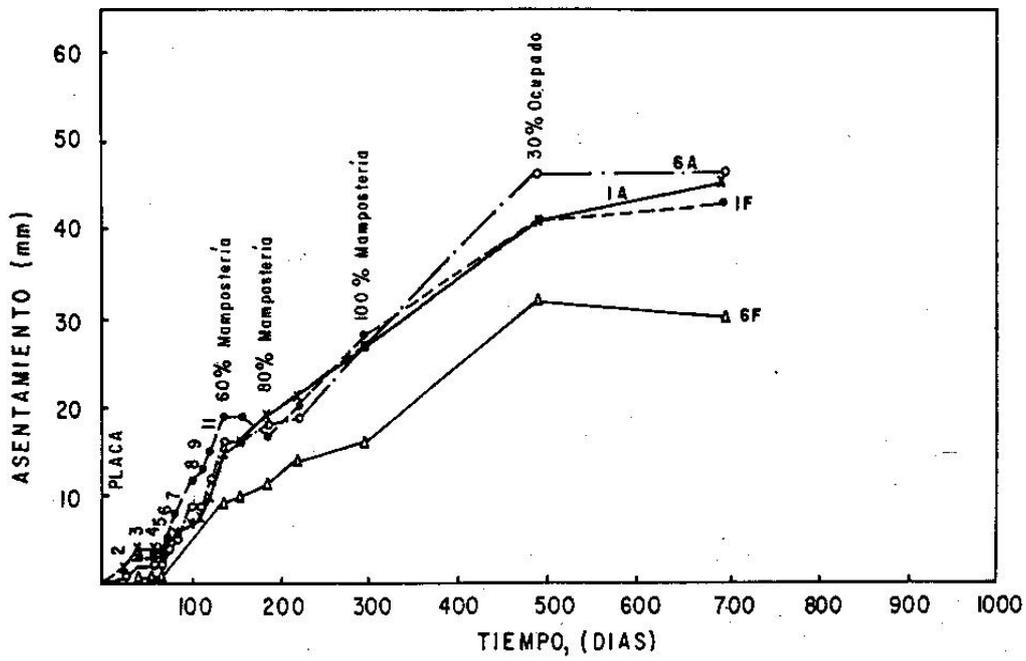
FIGURA No. 28





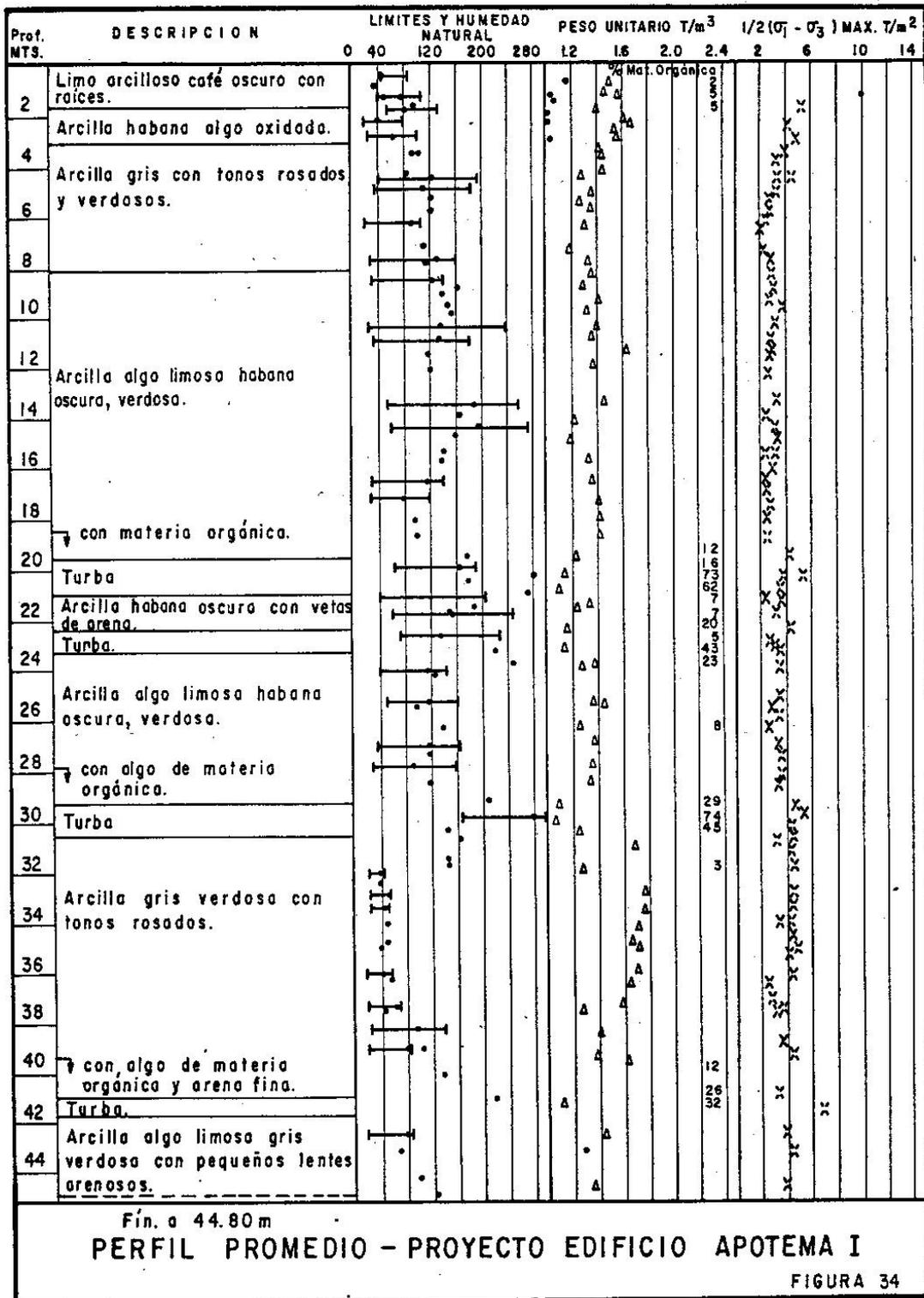
PROYECTO RAFAEL NUÑEZ — CONTROL DE ASENTAMIENTOS
BLOQUE A4

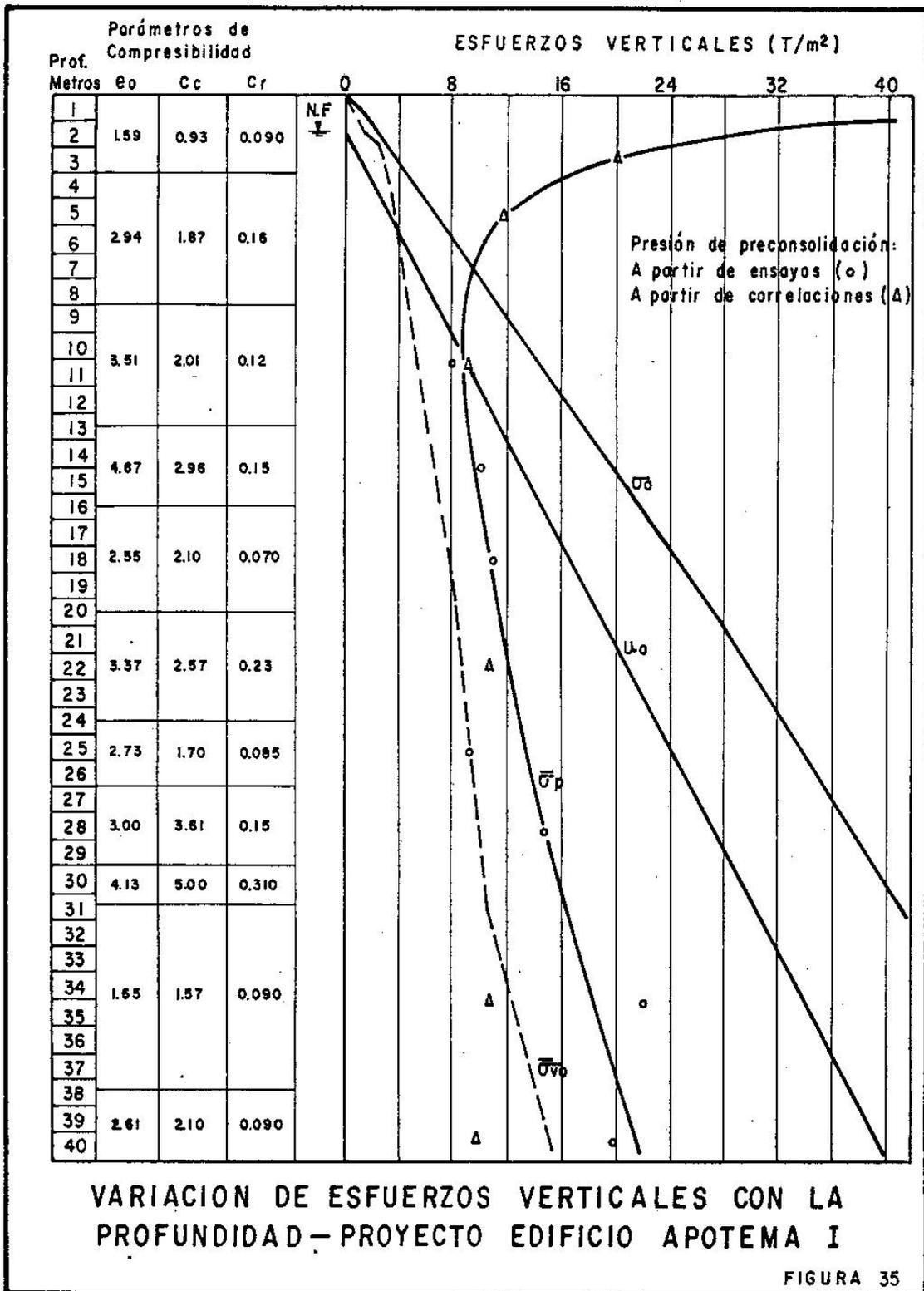
FIGURA 31



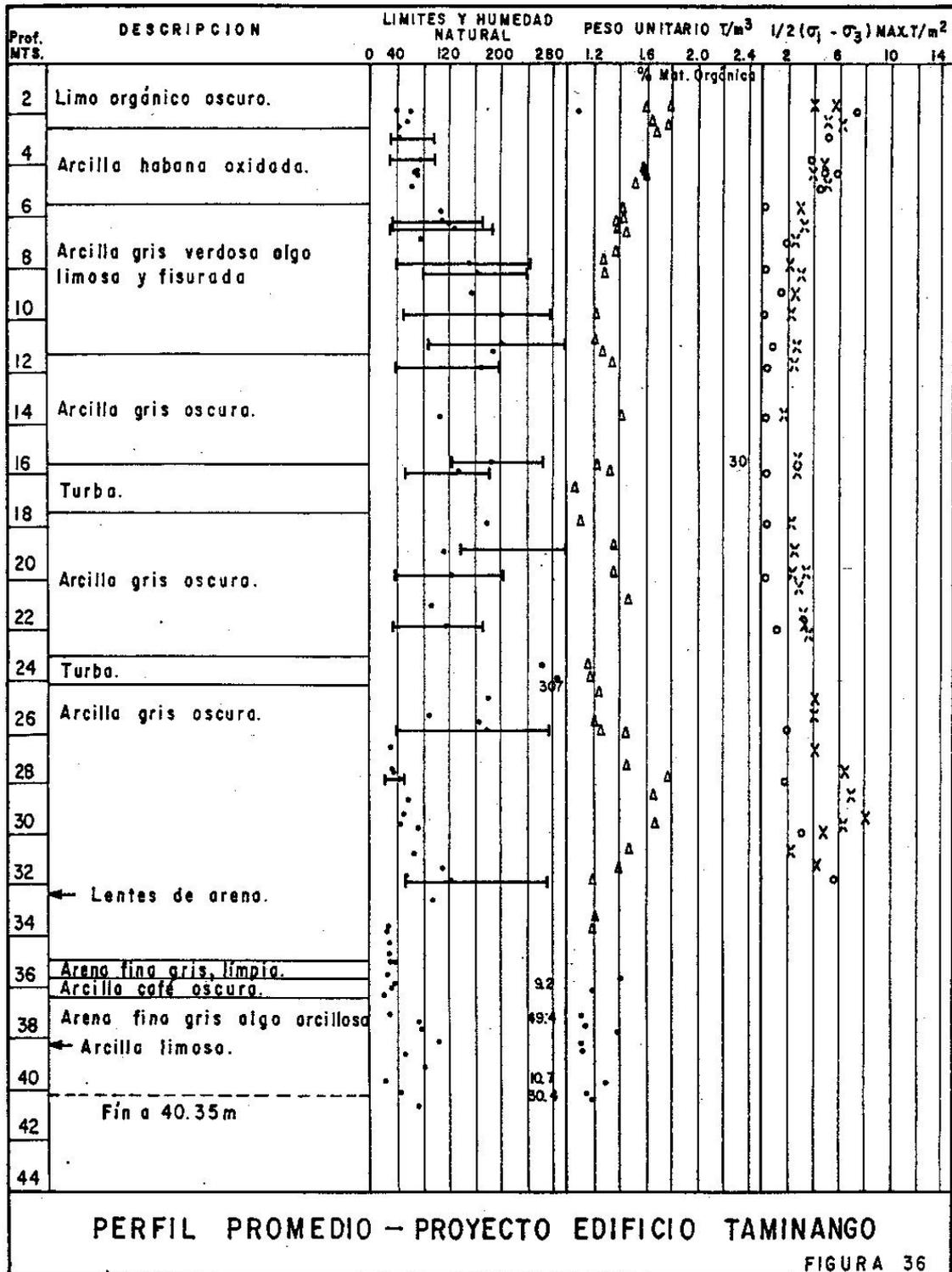
PROYECTO RAFAEL NUÑEZ — CONTROL DE ASENTAMIENTOS
BLOQUE B2

FIGURA 32



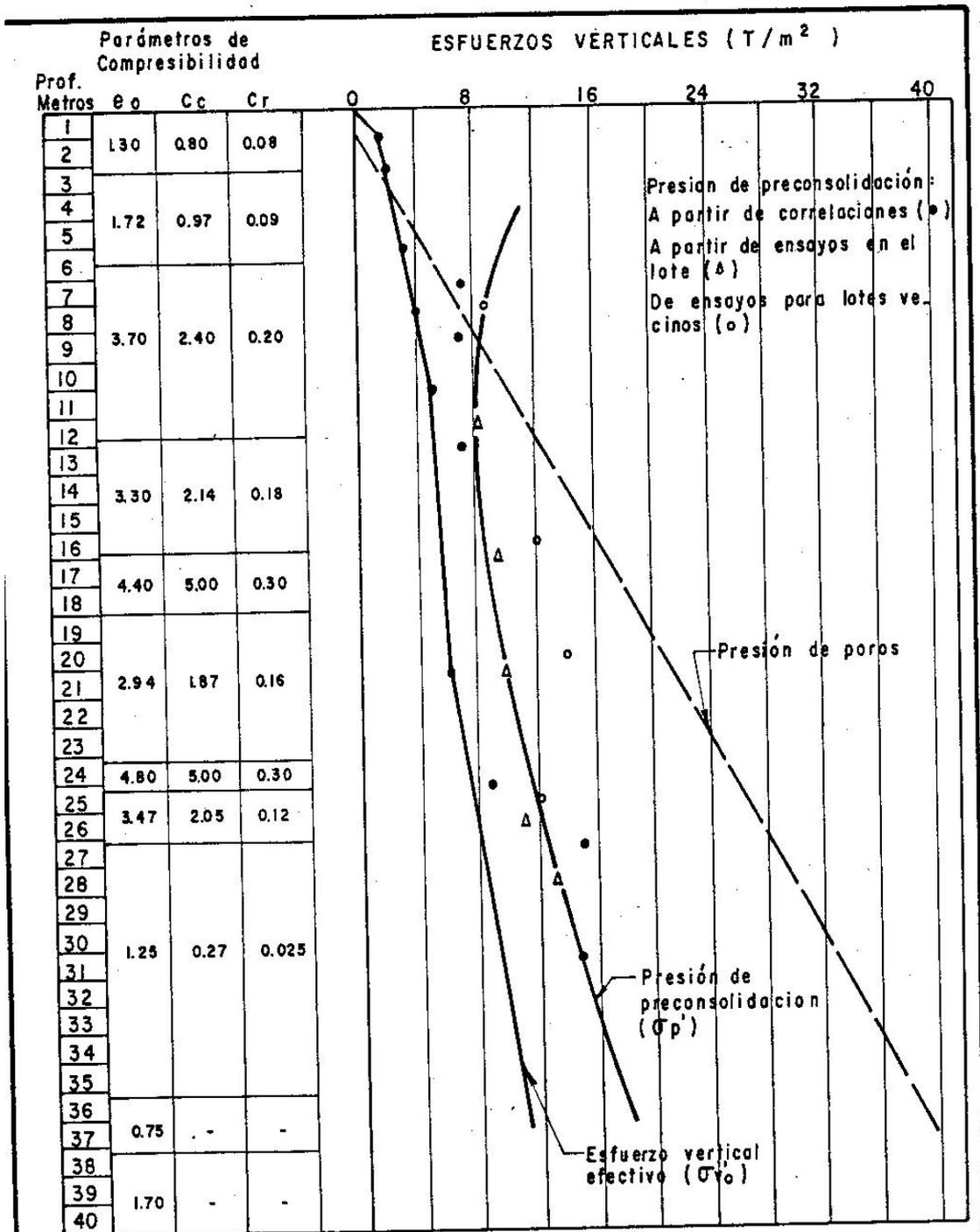


VARIACION DE ESFUERZOS VERTICALES CON LA PROFUNDIDAD - PROYECTO EDIFICIO APOTEMA I



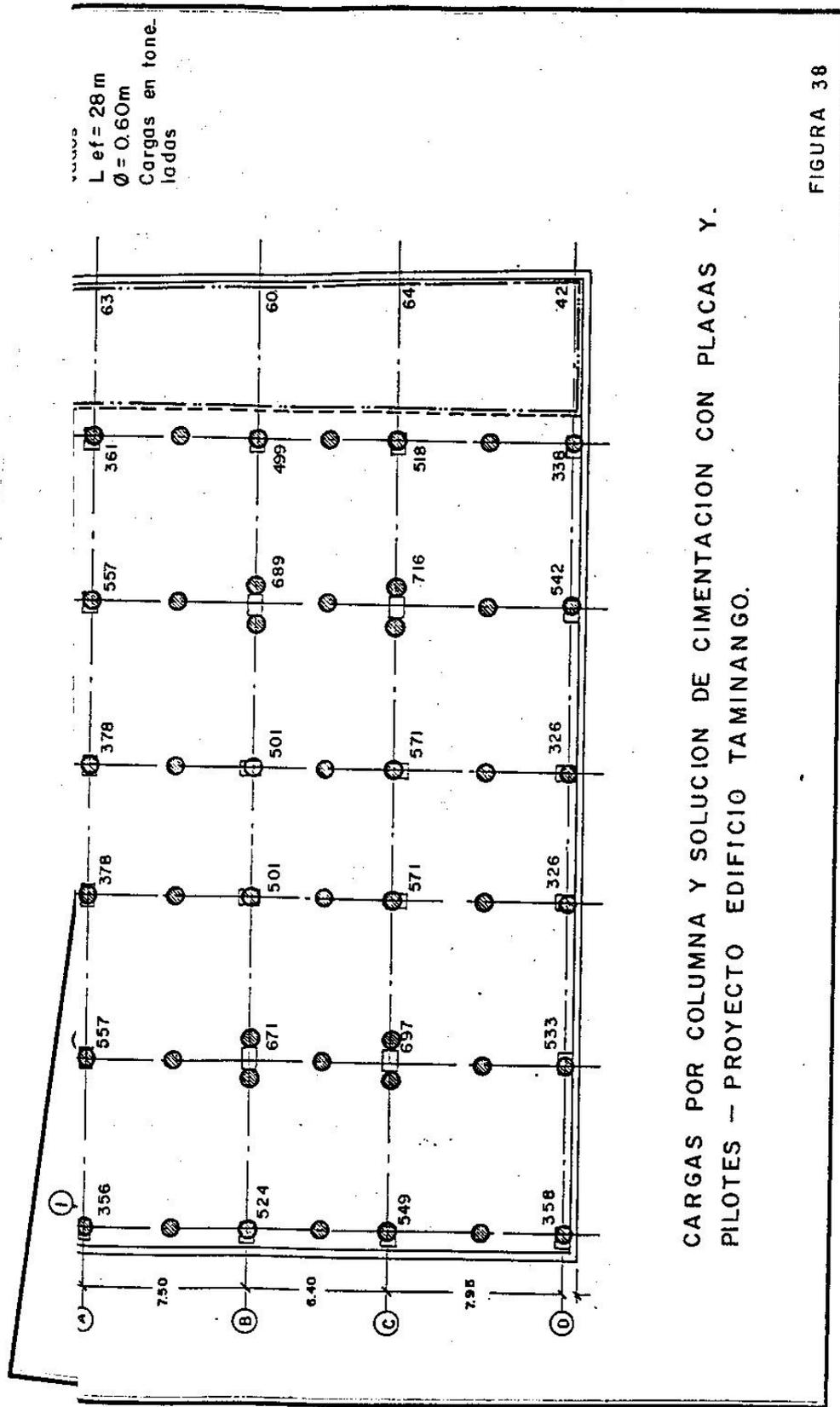
PERFIL PROMEDIO - PROYECTO EDIFICIO TAMINANGO

FIGURA 36

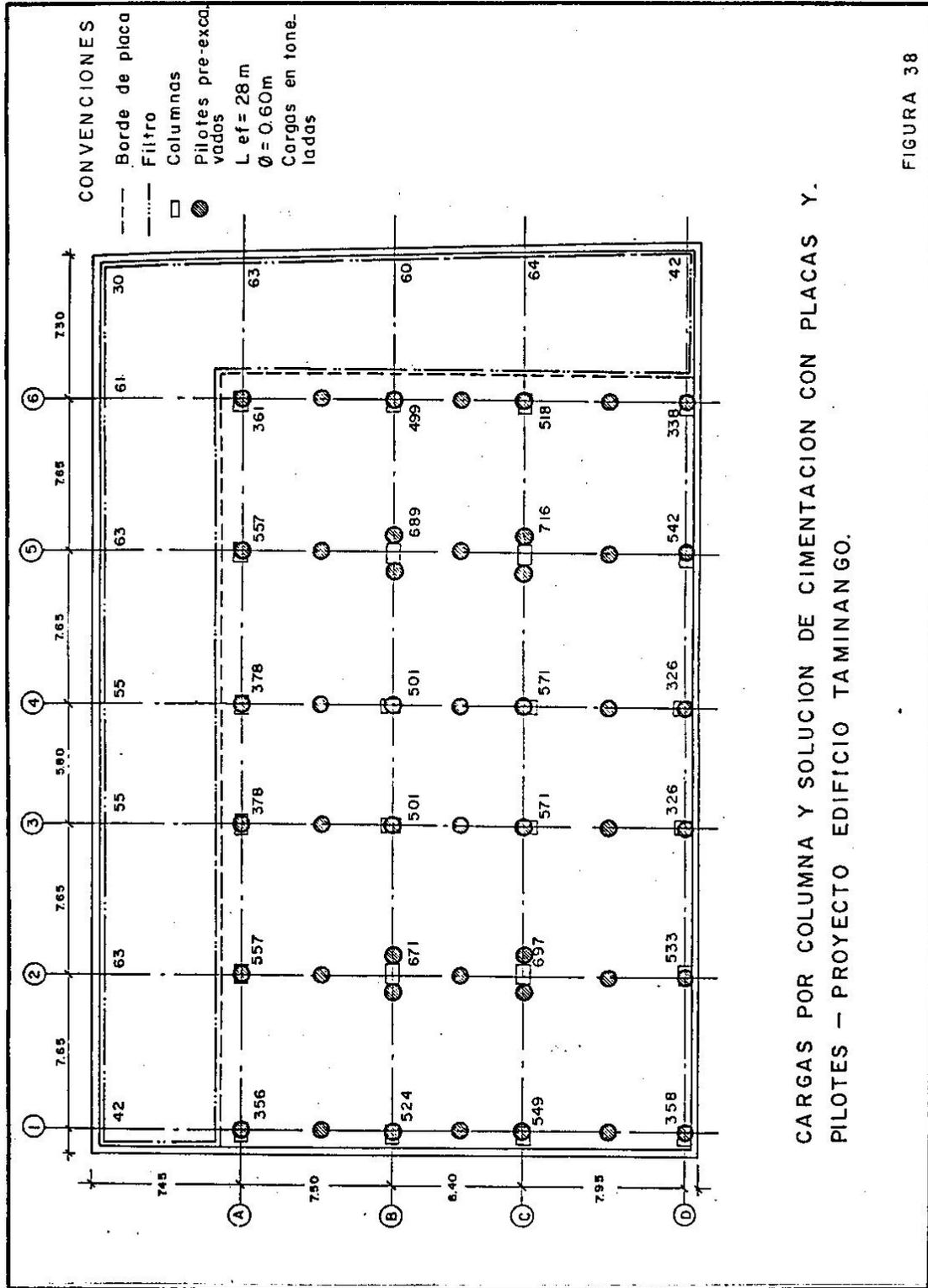


VARIACION DE ESFUERZOS VERTICALES CON LA PROFUNDIDAD.— PROYECTO EDIFICIO TAMINANGO

FIGURA 37



CARGAS POR COLUMNA Y SOLUCION DE CIMENTACION CON PLACAS Y PILOTES -- PROYECTO EDIFICIO TAMINANGO.



CARGAS POR COLUMNA Y SOLUCION DE CIMENTACION CON PLACAS Y PILOTES - PROYECTO EDIFICIO TAMINANGO.