

SENSIBILIDAD DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES EN EL DEPÓSITO LACUSTRE DE BOGOTÁ CON VARIACIONES EN FACTORES RELACIONADOS CON LA EDIFICACIÓN, EL SUBSUELO Y LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS

ÍNDICE

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN
2. MOTIVACIÓN
3. OBJETIVOS
4. ALCANCE
5. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO
 - 5.1 Altura y geometría de los edificios
 - 5.2 Tipos de cimentación seleccionados
 - 5.3 Condiciones de carga
 - 5.4 Condiciones del subsuelo
 - 5.5 Criterios y métodos de análisis
6. CASOS ESTUDIADOS: COMBINACIÓN DE VARIABLES
7. RESULTADOS
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS
 - 8.1 Grados de compensación
 - 8.2 Factor de seguridad, FS
 - 8.3 Asentamientos inmediatos o elásticos, Si
 - 8.4 Asentamientos de consolidación primaria

8.5 Factor de seguridad y asentamientos totales

8.6 Sensibilidad del cálculo de asentamientos de consolidación con el método de análisis de los esfuerzos inducidos por grupos de pilotes

8.7 Sensibilidad de los estimativos de asentamientos por consolidación primaria, S_{cp} , con variantes en el perfil de sobreconsolidación.

9. CONCLUSIONES

10. RECOMENDACIONES

11. BIBLIOGRAFÍA

FIGURAS

1. Alturas de las edificaciones estudiadas.
2. Esquemas de los tres tipos de cimentación estudiados para el edificio de seis pisos y un sótano.
3. Esquemas de los tres tipos de cimentación estudiados para el edificio de doce pisos y dos sótanos.
4. Mapa de localización de los diez sitios estudiados.
5. Perfil de resistencia, de preconsolidación y de otros índices de compresibilidad, para el sitio considerado más favorable.
6. Perfil de resistencia, de preconsolidación y otros índices de compresibilidad, para el sitio considerado más desfavorable.
7. Variantes consideradas del perfil de sobreconsolidación.
8. Resultados - Edificio de seis pisos y un sótano: Factores de seguridad para la cimentación de placa corrida.
9. Resultados - Edificio de seis pisos y un sótano: Factores de seguridad para cimentaciones de placa corrida y de placa-pilotes.
10. Resultados - Edificio de seis pisos y un sótano: Asentamientos inmediatos o elásticos.
11. Resultados - Edificio de seis pisos y un sótano: Asentamientos de consolidación primaria.
12. Resultados - Edificio de seis pisos y un sótano: Asentamientos totales.
13. Resultados - Edificio de seis pisos y un sótano: Asentamientos de consolidación primaria según el método de análisis.

14. Resultados - Edificio de seis pisos y un sótano: Asentamientos de consolidación primaria según las variantes consideradas del perfil de sobreconsolidación.
15. Resultados - Edificio de doce pisos y dos sótanos: Factores de seguridad para la cimentación de placa corrida.
16. Resultados - Edificio de doce pisos y dos sótanos: Factores de seguridad para cimentaciones de placa corrida y de placa-pilotes.
17. Resultados - Edificio de doce pisos y dos sótanos: Asentamientos inmediatos o elásticos.
18. Resultados - Edificio de doce pisos y dos sótanos: Asentamientos de consolidación primaria.
19. Resultados - Edificio de doce pisos y dos sótanos: Asentamientos totales.
20. Resultados - Edificio de doce pisos y dos sótanos: Asentamientos de consolidación primaria según el método de análisis.
21. Resultados - Edificio de doce pisos y dos sótanos: Asentamientos de consolidación primaria según las variantes consideradas del perfil de sobreconsolidación.

TABLAS

1. Condiciones de cargas transmitidas al suelo de fundación por el edificio de seis pisos y un sótano.
2. Condiciones de cargas transmitidas al suelo de fundación por el edificio de doce pisos y dos sótanos.
3. Sitios estudiados.
4. Características del subsuelo para el sitio considerado más favorable.
5. Características del subsuelo para el sitio considerado más desfavorable.
6. Casos estudiados: combinación de variables.
7. Grados de compensación para los casos estudiados.
8. Resultados para el edificio de seis pisos y un sótano
9. Resultados para el edificio de doce pisos y dos sótanos.

SENSIBILIDAD DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES EN EL DEPÓSITO LACUSTRE DE BOGOTÁ CON VARIACIONES EN FACTORES RELACIONADOS CON LA EDIFICACIÓN, EL SUBSUELO Y LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS

Ings. Jorge Enrique Durán G.¹, Bernd Castellar H.² y Héctor Mojica L.³

RESUMEN

Este artículo describe un estudio de sensibilidad del comportamiento de tres tipos de cimentación, placa corrida, placa-pilotes y pilotes largos de fricción, en el depósito lacustre de Bogotá, con variaciones en factores tales como: altura, tipo y cargas del edificio, perfiles de resistencia, preconsolidación y grado de sobreconsolidación del suelo, definición del factor de seguridad y método de análisis de los esfuerzos inducidos por grupos de pilotes.

El estudio resalta la importancia de la precisión necesaria en la evaluación de las cargas transmitidas al suelo por un edificio en particular y su diferenciación en cargas extremas, normales y permanentes, y en la determinación de los perfiles de resistencia, preconsolidación y grado de sobreconsolidación del suelo, que incluye una localización confiable del nivel freático. El estudio también discute la importancia de determinar con buen grado de precisión los esfuerzos inducidos por grupos de pilotes.

Los tres tipos de cimentación estudiados son sensibles a pequeñas variaciones en los factores arriba descritos, lo cual afecta significativamente el proceso de comparación de alternativas y de selección de la más adecuada.

Palabras claves: Cimentaciones, placa corrida, placa-pilotes, pilotes de fricción, depósito lacustre, Bogotá, resistencia al corte no drenado, sobreconsolidación, preconsolidación aparente, nivel freático, cargas, factor de seguridad, esfuerzos, asentamientos.

1

Ingeniero civil, M.Sc., Director de la Especialización en Ingeniería de Fundaciones, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Ingeniero civil, consultor en geotecnia, estudiante de la Especialización en Ingeniería de Fundaciones, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Ingeniero civil, consultor en geotecnia y asesor de obras civiles, estudiante de la Especialización en Ingeniería de Fundaciones, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta el primero de una serie de ejercicios prácticos desarrollados dentro del programa de la Especialización en Ingeniería de Fundaciones de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito a través de sus proyectos de grado, encaminados a profundizar en el conocimiento de las características geotécnicas del grueso depósito lacustre de arcillas blandas de Bogotá, a comparar las cimentaciones que se han venido empleando en los últimos años para edificaciones típicas de alturas variadas, y a estudiar y revisar los criterios y métodos de análisis más comúnmente empleados por los ingenieros geotecnistas (ingenieros de suelos) de la ciudad, como consultores de cimentaciones.

Este trabajo busca identificar los factores y sus variaciones que más inciden en el comportamiento de la fundación con el fin de resaltar la importancia de poner un mayor esfuerzo en la precisión de su determinación. Este propósito se enfoca a través de un análisis de sensibilidad del comportamiento anticipado de varios tipos de cimentación, a saber: placa corrida, placa-pilotes, y pilotes largos de fricción, para dos alturas de edificios, seis pisos y un sótano, y doce pisos y dos sótanos, como representativos de un porcentaje significativo de las construcciones de la ciudad, con variaciones en el peso de la edificación y en los perfiles de resistencia al corte y de grado de sobreconsolidación del subsuelo, así como con diferencias en los criterios de diseño y en el empleo de distintos métodos de cálculo.

Este estudio pretende ser el comienzo de una cadena de trabajos que contribuya a fortalecer el ejercicio profesional del ingeniero de suelos, inspirando e impulsando un mayor rigor en la determinación de los factores que más inciden en la toma de decisiones sobre cimentaciones de edificios en nuestro entorno local.

2. MOTIVACIÓN

El presente trabajo está motivado por hechos y condiciones de diversa índole, entre los que se destacan los siguientes:

- El depósito lacustre de la Sabana de Bogotá, que cubre una vasta área de la ciudad, es de un gran espesor (más de 200 metros en algunos puntos dentro del perímetro urbano de la ciudad) y está formado por estratos de arcillas y limos arcillosos de baja resistencia y alta compresibilidad. Esto constituye una condición claramente desfavorable para la fundación de edificaciones de todo tipo, especialmente las de mayores alturas, cargas y concentraciones de éstas. Tal hecho exige un trabajo de mayor precisión a la hora de caracterizar geotécnicamente el perfil del subsuelo en lo referente a la resistencia al corte y a los parámetros de deformabilidad y compresibilidad del subsuelo.
- Las prácticas actuales de exploración de campo y de ensayos de laboratorio en suelos blandos sensitivos como los bogotanos no son lo suficientemente cuidadosas para obtener los parámetros de resistencia y de compresibilidad con la precisión que se requiere en los análisis de diferentes opciones de cimentación.
- La evaluación de las cargas de las edificaciones que son transmitidas al suelo de apoyo por los elementos de la cimentación se hace de forma muy aproximada y rara vez se discrimina según la condición de carga máxima, normal o permanente. Es palpable la falta de comunicación en muchos casos entre el ingeniero calculista estructural y el ingeniero de suelos a la hora de fijar las condiciones de carga requeridas a la hora de plantear opciones de cimentación, analizarlas con suficiente precisión y seleccionar aquélla que se considere mejor considerando criterios técnicos, económicos y constructivos. En nuestro medio no se ha dado la suficiente inducción a los ingenieros estructurales para refinar el trabajo de evaluación de cargas, diferenciadas según las instancias de análisis de la cimentación, tales como: la capacidad portante y el margen de seguridad contra una falla por corte, los asentamientos inmediatos, los asentamientos de consolidación, etc.
- Muchas veces se desarrolla el estudio de suelos y se dan las recomendaciones de cimentación de un proyecto de edificaciones, con base en la geometría de éstas, pero sin conocer aún el tipo estructural y de acabados, y, por ende, sus pesos reales.
- En muchas ocasiones los estudios de suelos evalúan y establecen factores de seguridad definidos equivocadamente, dando una falsa impresión de amplio margen de seguridad contra una falla por corte.

- Los métodos de análisis de asentamientos son muchas veces demasiado aproximados con respecto a los factores determinantes del resultado.

Estos hechos y condiciones, entre otros, han motivado el presente estudio de sensibilidad con el ánimo de detectar factores cruciales que deban ser determinados con mayor precisión y confiabilidad para plantear, analizar, comparar y seleccionar alternativas de cimentación basadas en condiciones de carga y condiciones y parámetros del subsuelo más reales, y en criterios y métodos de análisis más claramente establecidos, respaldados y aprobados.

3. OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo consiste en establecer la sensibilidad del comportamiento anticipado de varios tipos de cimentación para edificios típicos de seis y doce pisos localizados en el depósito lacustre de suelos blandos de Bogotá, ante variaciones en el tipo y peso de la edificación, en el perfil de la resistencia al corte y del grado de sobreconsolidación del subsuelo y ante diferencias en criterios de diseño y en métodos de análisis.

Se piensa ratificar la necesidad de trabajar con una mayor precisión y una mejor confiabilidad en la determinación de las cargas transmitidas al subsuelo, y en la caracterización geotécnica de éste, así como discutir criterios de diseño y algunos métodos de análisis, con el fin de aumentar el rigor del trabajo con el que se seleccionan cimentaciones de edificios típicos en el grueso depósito de suelos blandos de Bogotá.

Los objetivos específicos del trabajo pueden resumirse en:

- Establecer la influencia que tienen el uso, el tipo estructural, el tipo de mampostería y de fachadas, el tipo de acabados arquitectónicos, en resumen, las cargas transmitidas al suelo de fundación, sobre el comportamiento anticipado de tres soluciones diferentes de cimentación, para dos alturas típicas de edificios en Bogotá.
- Establecer la importancia de la discriminación de cargas máximas, normales y permanentes para analizar adecuadamente las diferentes soluciones planteadas de cimentación.
- Analizar la sensibilidad de la respuesta del comportamiento de diferentes soluciones de cimentación a variaciones de los perfiles de resistencia, preconsolidación y grado de sobreconsolidación que se dan de un punto a otro del depósito lacustre de Bogotá, para establecer la necesidad o no de precisar más tales condiciones y parámetros del suelo.
- Discutir algunos criterios de análisis y métodos de cálculo comúnmente empleados en el ejercicio de la ingeniería de suelos en Bogotá, con el fin de establecer su validez, confiabilidad y precisión, y su influencia a la hora de comparar alternativas de cimentación y de seleccionar la más adecuada.

4. ALCANCE

El presente trabajo tiene un alcance caracterizado por los siguientes aspectos:

1. Considera edificios de seis pisos y un sótano, y doce pisos y dos sótanos, con una planta de 20 metros de ancho por 35 metros de largo en todos los pisos y sótanos.
2. Tiene en cuenta variaciones de carga como función de diferencias de uso, estructura, mampostería y acabados de las edificaciones.
3. Considera la variación del perfil de resistencia al corte no drenado, de preconsolidación y del grado de sobreconsolidación, detectada con la recopilación de información de diez sitios estudiados.
4. Considera las eventuales variaciones en el nivel freático que puedan marcar diferencias significativas en la evaluación de asentamientos por consolidación primaria.
5. Tiene en cuenta la posibilidad de interpretar la presión de preconsolidación de los estratos inferiores del perfil como una presión de preconsolidación aparente, de suelos normalmente consolidados de origen antiguo.
6. Se limita a estudiar el comportamiento de cada solución de cimentación para la condición de edificación suficientemente aislada o separada de las vecinas para que no haya interferencia o superposición de efectos con ellas.
7. La comparación de criterios de estudio se concentra en la diferencia de la definición y determinación del factor de seguridad de cimentaciones superficiales.
8. La comparación de métodos de diseño se concentra en las diferencias entre los resultados obtenidos por el método aproximado de disipación "trapezoidal" de esfuerzos inducidos y los obtenidos por un método más preciso de esta evaluación, recomendado por León y Reséndiz (1969).
9. El presente trabajo solamente compara comportamientos en términos de factor de seguridad contra falla por capacidad portante, asentamientos elásticos inmediatos y asentamientos de consolidación primaria en cada caso, sin incluir fenómenos de compresión secundaria ni subsidencia regional.

5. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

5.1 Altura y geometría de los edificios

Para desarrollar el presente estudio de sensibilidad se seleccionaron dos alturas de edificio, a saber: seis pisos y un sótano, y doce pisos y dos sótanos. Se consideran estas dos alturas como representativas de un gran porcentaje de edificaciones habitacionales, institucionales y de oficinas construidas en los últimos años en la ciudad, y de las que se seguirán construyendo en el próximo futuro.

Se adoptaron dimensiones en planta de 20 metros de ancho y 35 metros de largo para todos los pisos y sótanos de las dos alturas de edificios consideradas, como representativas de dimensiones muy comunes en la ciudad.

En la Figura No. 1 se presentan las alturas de las edificaciones estudiadas: seis pisos y un sótano, y doce pisos y dos sótanos.

5.2 Tipos de cimentación seleccionados

De acuerdo con la práctica actual de la ingeniería de suelos en la ciudad se escogieron, para su análisis y comparación, las soluciones de cimentación tipo placa corrida, placa-pilotes y pilotes largos de fricción, tanto para el edificio de seis pisos y un sótano como para el edificio de doce pisos y dos sótanos.

En el caso del edificio de seis pisos y un sótano se adoptó una profundidad de fundación, D_f , de 4,0 metros con una losa corrida de cimentación probablemente aligerada de un metro de altura total, y en el caso del edificio de doce pisos y dos sótanos se fijó un D_f de 6,5 metros, previendo que en este último caso la losa de cimentación fuera compuesta por una placa maciza superior y vigas descolgadas de gran rigidez, con una altura global de 1,6 metros.

Para la alternativa de cimentación del tipo placa-pilotes en cada uno de los casos se estableció un número de pilotes que hiciera que éstos, trabajando a la falla, tomaran el 150% de la carga no compensada del edificio por el alivio de la excavación de los sótanos, para la condición de carga normal, es decir, de carga muerta más carga viva normal acumulada. Esta hipótesis de trabajo se deriva de las conclusiones obtenidas en la investigación presentada por el ingeniero Jorge Enrique Durán en el Tercer Encuentro Nacional de Ingenieros de Suelos y Estructuras de septiembre de 2003, sobre “optimización de un sistema de cimentación placa-pilotes en el depósito lacustre de Bogotá”. En el presente trabajo se seleccionaron pilotes hincados de concreto reforzado, de 0,30 metros de lado de la sección transversal cuadrada, de 20 metros de longitud para el caso del edificio de seis pisos y un sótano, y de 30 metros de longitud para el caso del edificio de doce pisos y dos sótanos.

Para la alternativa de cimentación con pilotes largos de fricción se supuso una losa a manera de cabezal de amarre de todos los pilotes, además de servir para resistir la

subpresión correspondiente en cada caso. En esta alternativa se consideró que los pilotes serían los únicos responsables de la capacidad portante de la cimentación y se seleccionaron pilotes hincados de concreto reforzado, de 0,40 metros de lado de la sección transversal cuadrada, de 30 metros de longitud para el edificio de seis pisos y de 40 metros para el de doce pisos.

En las Figuras Nos. 2 y 3 se presentan los esquemas de los tres tipos de cimentación estudiados para el edificio de seis pisos y un sótano, y para el edificio de doce pisos y dos sótanos, respectivamente.

5.3 Condiciones de carga

El estudio contempló una actividad de consulta a firmas y oficinas de ingenieros consultores de la ciudad de Bogotá, entre las que estuvieron Proyectistas Civiles Asociados (PCA), Proyectos y Diseños Ltda. (PYD) y la oficina del ingeniero Alejandro Angulo, entre otras.

En estas consultas se estudiaron las evaluaciones de cargas transmitidas al suelo de fundación por edificios típicos de seis pisos y un sótano, y doce pisos y dos sótanos respectivamente. Se consideraron sistemas de estructura metálica, mampostería estructural, muros portantes de concreto reforzado y pórticos de vigas y columnas en concreto reforzado. Para cada sistema estructural se obtuvo el valor de la carga muerta considerando cubiertas, pisos y cimentación en losa maciza o aligerada.

Se obtuvieron las cargas muertas por metro cuadrado de los elementos permanentes no estructurales de la edificación que incluyen: muros divisorios, acabados, redes y equipos, para diferentes usos y presupuestos, con el objeto de totalizar la carga muerta de la edificación.

Además, se obtuvieron las cargas vivas (las debidas al uso u ocupación de la edificación, sin incluir la carga muerta, ni las fuerzas de viento o sismo), aplicando 180 kg/m^2 para placas en vivienda, 200 kg/m^2 para áreas de oficinas, y de 250 kg/m^2 para áreas de estacionamiento, de acuerdo con la norma vigente, NSR-98. No se consideraron cargas vivas mayores, como las recomendadas para comercio, colegios, depósitos o bibliotecas, por corresponder éstas a edificaciones especiales de uso y carga, no representativas de un alto porcentaje de las construcciones.

En este estudio no se incluyeron sobrecargas en la cimentación por efectos del viento o de sismos.

En las Tablas Nos. 1 y 2 se presentan las condiciones de cargas transmitidas al suelo de fundación por el edificio de seis pisos y un sótano y por el de doce pisos y dos

sótanos, respectivamente. Para las dos alturas de edificio se hicieron las combinaciones necesarias para llegar a establecer un intervalo de variación de las cargas transmitidas al suelo, denominando sus dos extremos como edificio liviano y edificio pesado.

En cada caso se han establecido y diferenciado tres tipos de carga, a saber:

- **Carga total acumulada sin reducciones:**

Esta condición corresponde a toda la carga muerta más el 100% de la carga viva en todas las áreas del edificio. Esta situación hipotética no es realista, pues es muy poco probable que en un momento dado de la vida del edificio estén aplicadas simultáneamente las cargas vivas definidas en los códigos en todos y cada uno de los metros cuadrados de cubierta, pisos y losa del sótano inferior. Sin embargo, esta carga es la que evalúan y reportan los ingenieros calculistas en los edificios de cinco pisos o menos como la transmitida al suelo de fundación.

- **Carga normal acumulada con reducciones:**

Esta definición corresponde a la que le interesa al ingeniero de suelos como la verdadera carga del edificio transmitida normalmente al suelo de fundación por la cimentación. Esta es la carga para la cual se establece como referencia de aceptabilidad el contar con un factor de seguridad de por lo menos 3,0 (Norma NSR-98) con relación a una eventual falla al corte por capacidad portante. Esta carga es también aquella con la que se evalúan o se estiman los asentamientos inmediatos o “elásticos”.

Se pudo establecer que, en general, los ingenieros calculistas sólo aplican reducciones de carga viva en edificios que tengan más de cinco niveles y que en tales casos se acogen al procedimiento recomendado por la norma NSR-98, por medio de la cual se permite reducir la carga viva en un 10% a la del sexto nivel contado de arriba hacia abajo, 20% a la del siguiente inferior, 30% a la de un nivel más abajo, hasta un máximo de 50% de reducción de la carga viva en el décimo nivel medido de arriba hacia abajo y demás pisos inferiores. Esta reducción reglamentada por la norma vigente es muy lógica y razonable desde el punto de vista del análisis estructural de las columnas y de los elementos de la cimentación, pero no parece incorporar la precisión suficiente para llegar a un valor probable de la carga total acumulada normalmente aplicada al suelo de fundación.

A pesar de esto y a falta de una metodología más precisa, se adoptó dicho procedimiento para evaluar la carga muerta más la viva normal acumulada transmitida al suelo de apoyo en los casos aquí estudiados.

- **Carga acumulada permanente:**

Este concepto no es manejado por los ingenieros calculistas. Sin embargo, es un parámetro muy importante para el ingeniero de suelos a la hora de estimar los asentamientos de consolidación primaria, los cuales responden a cargas permanentemente aplicadas y no a cargas transitorias. No hay establecido en nuestro medio un método para evaluar la carga acumulada permanente transmitida al suelo de fundación. Dicho parámetro corresponde a todo el peso muerto de la edificación más aquella fracción de la carga viva que se pueda considerar constante durante un tiempo suficientemente prolongado, compatible con el necesario para que se desarrolle un alto porcentaje del proceso de consolidación primaria. Esta fracción “permanente” de la carga viva no está referida a áreas específicas del edificio sino a un valor constante de la carga acumulada.

Considerando la información de referencia de algunos casos reportados en la literatura internacional se adoptó como criterio para evaluar la carga acumulada permanente transmitida al suelo de apoyo la resultante de considerar toda la carga muerta, carga viva nula en la cubierta y en las áreas de parqueo vehicular, y un 40% de la carga viva de diseño (según NSR-98) en todas las áreas de los demás niveles.

Como resultado de este ejercicio se llegó a los siguientes valores:

Cargas Acumuladas Transmitidas al Suelo de Fundación

Altura del Edificio	Tipo de Edificio	Carga Total Acumulada Sin Reducciones CTASR, q_1 , t/m ²	Carga Normal Acumulada Con Reducciones CNACR, q_2 , t/m ²	Carga Acumulada Permanente CAP, q_3 , t/m ²
6 pisos y 1 sótano	Liviano	5,3	5,2	4,2
6 pisos y 1 sótano	Pesado	8,1	7,9	7,0
12 pisos y 2 sótanos	Liviano	10,1	9,3	8,1
12 pisos y 2 sótanos	Pesado	15,8	15,0	13,8

5.4 Condiciones del subsuelo

Una de las principales actividades de este trabajo consistió en recopilar información disponible en artículos técnicos de congresos o encuentros, o a través de consultas directas hechas a ingenieros de suelos de la ciudad para conocer la caracterización geotécnica detallada del subsuelo en varios sitios, estudiarla, analizar las variaciones encontradas y seleccionar el intervalo de variación de los perfiles, denominando sus dos extremos como el perfil favorable y el perfil desfavorable de los aquí considerados.

Al recopilar y estudiar esta información se tuvieron en cuenta los siguientes criterios para validarla e incorporarla al conjunto de perfiles geotécnicos:

- El perfil del suelo del sitio debe corresponder claramente al depósito de origen lacustre de la Sabana de Bogotá, constituido por arcillas (CH) y limos arcillosos (MH) de muy alta plasticidad, consistencia que varía desde media, blanda, nuevamente media a firme con la profundidad, y de compresibilidad alta a muy alta en los 40 metros superiores del depósito.
- Se debe contar con información confiable de clasificación, resistencia y compresibilidad de los suelos desde la superficie del terreno hasta por lo menos 40 – 50 metros de profundidad, con el fin de poder desarrollar adecuadamente todos los análisis que se plantean en el presente estudio.
- La caracterización geotécnica de la resistencia de los suelos del sitio debe estar basada en ensayos in-situ de resistencia al corte no drenado de los suelos arcillosos del tipo de torsión con veleta de campo y/o de penetración estática de cono, complementados por ensayos de laboratorio de resistencia del tipo compresión confinada, U, o, preferiblemente, por ensayos triaxiales no consolidados no drenados, UU, o consolidados no drenados, CU.
- La caracterización geotécnica de la compresibilidad de los diferentes estratos y niveles de suelos arcillosos del sitio debe estar basada en ensayos de laboratorio de consolidación unidimensional, realizados sobre muestras de alta calidad obtenidas de un número suficiente de profundidades, complementada con el empleo de correlaciones debidamente probadas en nuestro medio entre parámetros de resistencia al corte no drenado y presiones de preconsolidación, y entre propiedades índice de clasificación y parámetros de compresibilidad.
- Se debe contar con información suficientemente confiable sobre la posición del nivel freático en el momento de la realización de la exploración de campo, y de eventuales niveles piezométricos altos o, incluso, artesianos, presentes en estratos acuíferos inferiores confinados.

Del proceso de recopilación de información y de la aplicación de los criterios de validación se llegó a un conjunto de diez sitios de estudio, distribuidos desde la zona centro-occidental, hasta las zonas nororiental y noroccidental de Bogotá. En la Figura No. 4 se presenta el mapa de localización de los diez sitios estudiados y en la Tabla No. 3 se listan estos sitios.

Una vez conformado el grupo de sitios de estudio se seleccionaron los perfiles de las características de resistencia y de compresibilidad del subsuelo que pudieran considerarse como el más favorable y el más desfavorable del grupo, para el comportamiento de cimentaciones de edificios. Para este análisis se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

- Los valores absolutos y la variación con la profundidad de la resistencia al corte no drenado del suelo.
- Los valores absolutos y la variación con la profundidad de la presión de preconsolidación del suelo.
- La posición probable del nivel freático.
- Los esfuerzos verticales efectivos originales y su variación con la profundidad.
- La diferencia y la relación (RSC) entre la presión de preconsolidación y el esfuerzo vertical efectivo original y su variación con la profundidad.

Considerando estos factores se seleccionó el sitio con el perfil más favorable y el de perfil más desfavorable. El más favorable sería el sitio que tuviera los mayores valores de resistencia al corte no drenado, S_u , los mayores valores de presión de preconsolidación y/o las mayores relaciones de sobreconsolidación (RSC), en conjunto a lo largo de los 50 metros superiores del suelo. Por el contrario, el más desfavorable sería el sitio con los menores valores de resistencia al corte, de presión de preconsolidación y de relación de sobreconsolidación, considerados en conjunto para los 50 metros superiores del depósito de suelos.

De este análisis resultó como sitio con el perfil más favorable el No. 10: Universidad Nacional, Edificio de Ciencia y Tecnología Luis Carlos Sarmiento Angulo, Ciudad Universitaria, y como sitio con el perfil más desfavorable el No. 1: Puente de Tercer Nivel, Intersección de la Autopista Norte por la Calle 92. Las condiciones muy adversas de este último sitio se pueden explicar en gran parte por su alto nivel freático y por el alto nivel piezométrico que tienen algunos estratos arenosos delgados presentes a más de 20 metros de profundidad, que causan unos niveles muy bajos de esfuerzos

efectivos, de resistencia al corte no drenado, de presión de preconsolidación y de relación de sobreconsolidación.

En las Figuras Nos. 5 y 6 se presentan el perfil de resistencia, preconsolidación y de otros índices de compresibilidad (relación de vacíos, índice de compresión e índice de recompresión) para el sitio considerado más favorable y para el considerado más desfavorable, respectivamente. En las Tablas Nos. 4 y 5 se presentan las características del subsuelo para dichos sitios, indicando sus propiedades índice, clasificación, resistencia al corte, nivel de esfuerzos efectivos, presión de preconsolidación, relación de sobreconsolidación y otros parámetros pertinentes de compresibilidad (contenido de humedad natural, peso unitario, relación de vacíos, índice de compresión e índice de recompresión).

Por otro lado, se plantearon cuatro opciones relacionadas con el perfil de sobreconsolidación del suelo para analizar la sensibilidad del comportamiento de las cimentaciones con diferencias en dicho perfil, originadas por posibles imprecisiones en la determinación de la posición del nivel freático, o con la incorporación del concepto de preconsolidación aparente de suelos normalmente consolidados de origen antiguo. Así, se establecieron cuatro opciones del perfil de sobreconsolidación como sigue:

- A. Caso básico, con la posición del nivel freático localizada a la profundidad reportada por el respectivo consultor.
- B. Caso con nivel freático situado 1,0 - 1,5 metros más alto que el reportado originalmente, de tal manera que la relación de sobreconsolidación, RSC, aumente lo suficiente para permitir que los asentamientos de consolidación causados por los edificios de seis o de doce pisos correspondan totalmente a procesos de recompresión, como función del índice Cr.
- C. Caso con nivel freático situado 1,5 – 2,0 metros más bajo que el reportado originalmente, de tal manera que la relación de sobreconsolidación, RSC, se reduzca a 1,0 para todos los suelos por debajo de una cierta profundidad, desde donde estarían normalmente consolidados.
- D. Caso que considera el fenómeno de preconsolidación aparente. Corresponde a la posición original del nivel freático reportada por el respectivo consultor (caso básico), pero incorpora el concepto de que a partir de una cierta profundidad en adelante, desde donde la RSC sea del orden de 1,15, el suelo está normalmente consolidado pero presenta una presión de preconsolidación aparente ligeramente mayor que el esfuerzo vertical efectivo original, por ser el depósito de origen antiguo donde, por el tiempo, se ha dado lugar a un buen porcentaje de compresión secundaria y a la formación de enlaces diagenéticos entre las partículas arcillosas.

En la Figura No. 7 se ilustra el concepto de las variantes consideradas del perfil de sobreconsolidación.

5.5 Criterios y métodos de análisis

- **Capacidad portante y factor de seguridad**

Para los análisis de capacidad portante de los casos de placa corrida se empleó la expresión general de Meyerhof (1963), aplicando los factores de corrección por forma y por profundidad de la fundación, D_f . El efecto benéfico de la subpresión contra la placa queda automáticamente considerado al trabajar con el peso unitario total del suelo en el término de sobrecarga en la expresión general de capacidad, siempre y cuando se tome el peso total del edificio, sin efecto de sumergencia, en la determinación de la presión promedio de contacto.

Para evaluar el margen de seguridad contra falla por capacidad portante de los casos estudiados con cimentaciones de placa corrida se empleó el criterio de Factor de Seguridad, FS, definido como la relación entre la capacidad portante última unitaria y la presión promedio de contacto. El valor mínimo de aceptabilidad vigente referido en la norma NSR-98 es de 3,0 para la condición de carga normal, que incluye la carga muerta más la viva normalmente aplicada. En estos mismos casos, paralelamente se determinó un factor de seguridad no convencional y, en opinión de los autores, claramente incorrecto y engañoso, FS^* , definido como la relación entre la capacidad portante neta última unitaria y la presión promedio neta de contacto. En el capítulo 8 de este documento se incluye la comparación de los valores encontrados de FS y FS^* para los casos de placa corrida.

Para los casos estudiados de cimentación tipo placa-pilotes se estableció como solución aquella con un número de pilotes tal que éstos, trabajando a la falla, tomaran el 150% de la carga no compensada del edificio para la condición de carga normal. Además, se consideró como la más acertada la definición de factor de seguridad de J. E. Durán (2003), denominado Factor de Seguridad Parcial de Placa, que corresponde a la relación entre la capacidad portante última total de la losa de cimentación y el peso total del edificio, reducido éste en el valor de las cargas que son tomadas a la falla por los pilotes. Para estos casos de placa-pilotes se consideró como nivel de aceptabilidad de referencia del factor de seguridad parcial de placa un valor de 3,0 para la condición de carga normal. Nuevamente se empleó la expresión general de Meyerhof (1963) para determinar la capacidad portante última unitaria de la placa.

Para los análisis de las opciones estudiadas de cimentación profunda con pilotes largos de fricción se evaluó en primer lugar la capacidad de carga de un pilote individual, donde se compararon resultados de la capacidad por fricción obtenida por tres métodos diferentes (método α y método λ , con parámetros de resistencia no drenados, y el método β , con parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos (Meyerhof, 1976). En todos los casos el diseño fue controlado por los resultados obtenidos por el método α . Obtenida la capacidad de carga de un pilote individual se encontró el número total de pilotes, necesario para lograr un factor de seguridad, FS, de por lo menos 3,0 para la condición de carga normal, teniendo en cuenta factores de reducción de eficiencia, η , según la separación entre pilotes en las dos direcciones.

- **Asentamientos inmediatos**

Para evaluar los asentamientos inmediatos o elásticos promedio de cada opción de cimentación se empleó el método de Janbu (1956) en función de la geometría de la cimentación, el espesor del estrato deformable de suelo, la presión promedio de contacto, y el módulo de elasticidad no drenado del suelo, E_u . Para determinar éste último se utilizaron correlaciones probadas y calibradas en nuestro medio en el depósito lacustre de Bogotá, como $E_u = (300 \text{ a } 600)S_u$, para las condiciones de RSC encontradas en él.

En los casos de placa-pilotes el asentamiento inmediato fue el resultado de una superposición de efectos del producido por la carga transmitida por la placa de cimentación directamente al suelo de apoyo y el producido por la carga tomada por los pilotes, simulada como una placa virtual cargada, localizada a una profundidad de dos tercios de la longitud de los pilotes, medida desde el fondo de la placa, y de una geometría ampliada 4V:1H desde la cabeza de los pilotes, según la recomendación de Terzaghi (1948).

En los casos de cimentación profunda con pilotes largos de fricción se determinó el asentamiento inmediato con el mismo criterio de “reemplazar” la acción de los pilotes por la de una placa localizada a una profundidad de dos tercios de la longitud de los pilotes, medida desde la cabeza de los pilotes, y de una geometría ampliada 4V:1H desde el nivel de su cabeza.

En todos los casos los asentamientos inmediatos fueron evaluados para la condición de carga normal acumulada.

- **Asentamientos de consolidación primaria**

Para todos los casos se analizaron y estimaron los asentamientos de consolidación primaria para la condición de carga acumulada permanente aplicada por el edificio, utilizando los parámetros de compresibilidad determinados en las pruebas de consolidación unidimensional.

En todos los casos se determinaron los esfuerzos verticales inducidos por las cargas por el método aproximado de geometría trapezoidal 2V:1H de disipación con la profundidad. Se ha probado que este método es suficientemente preciso para obtener los esfuerzos inducidos promedio a diferentes profundidades por la acción de placas corridas de cimentación en el depósito grueso lacustre de Bogotá.

Para los casos de placa-pilotes y de pilotes largos de fricción, al aplicar el método aproximado, se acudió a simular la acción de los pilotes por medio de la placa virtual equivalente ya descrita para el caso de los asentamientos inmediatos.

En cuatro casos, Nos. 11, 12, 23 y 24, placa-pilotes y pilotes largos de fricción para los edificios de seis y doce pisos respectivamente, considerando edificios pesados en sitios con perfil desfavorable del subsuelo, se hizo una comparación entre dos métodos de análisis para determinar los esfuerzos verticales inducidos por las cargas transmitidas por los pilotes al suelo: el método aproximado ya descrito, y un método numérico más preciso, conocido como el Método de León y Reséndiz (1979). Esto dio lugar a los casos Nos. 11*, 12*, 23* y 24*. En el capítulo 8 se analizan y comparan los resultados de los asentamientos de consolidación primaria según el método empleado de determinación de esfuerzos inducidos para los cuatro casos citados.

Finalmente, no se hizo corrección alguna por efectos tridimensionales sobre el valor de los asentamientos de consolidación primaria evaluados con parámetros obtenidos de ensayos de consolidación unidimensional, porque el gran porcentaje de los suelos afectados tiene una relación de sobreconsolidación, RSC muy baja o marginal cercana a 1,0, resultando una corrección por tridimensionalidad de 0,9 a 1,0 para las dimensiones de la cimentación y del depósito de suelos aquí consideradas.

- **Criterios de aceptabilidad de asentamientos**

Este es un tema complejo que depende de las condiciones específicas de arquitectura, estructura, aislamientos, acabados, conexiones e instalaciones del edificio en consideración. Para edificios aislados, sin vecinos inmediatos, es decir,

con vecinos suficientemente retirados, la norma vigente NSR-98 permite un asentamiento total del edificio de hasta 30 cm al término de la vida útil del edificio, siempre y cuando se verifique que dicho valor no causará daños arquitectónicos, estructurales o funcionales de importancia al edificio y a su vecindad.

Por la experiencia adquirida en nuestro medio al observar por más de 30 – 40 años el comportamiento de edificaciones medianas y pesadas cimentadas en el depósito lacustre de Bogotá, y considerando el tipo de estructuras de concreto reforzado y de placas semi-rígidas de cimentación empleadas en nuestro medio, para edificios aislados como los que aquí se han analizado se pueden aceptar asentamientos totales del orden de 30 centímetros a largo plazo, al cabo de 30 – 40 años, siempre y cuando la rigidez estructural, incluida la de la cimentación, limite las distorsiones angulares a valores menores de $1/300$, y por otro lado, no se generen inclinaciones globales de más de $1/250$, por eventuales excentricidades de carga o de alivios, o por variaciones en las condiciones del suelo en el área del edificio.

6. CASOS ESTUDIADOS: COMBINACIÓN DE VARIABLES

Con el fin de estudiar la sensibilidad del comportamiento de cimentaciones en el depósito lacustre de Bogotá ante variaciones en el tipo de edificación, en las condiciones del subsuelo, en los criterios de diseño y en los métodos de análisis, tal como fueron descritos en el capítulo 5, Metodología del Estudio, se configuraron 24 casos combinando las siguientes variables:

- Alturas de los edificios: Dos: Seis pisos y un sótano y doce pisos y dos sótanos.
- Tipo y peso del edificio: Dos: Liviano y pesado.
- Tipos de cimentación: Tres: Placa corrida, placa-pilotes, y pilotes largos de fricción.
- Condiciones del perfil del suelo: Dos: Favorable y desfavorable.

En la Tabla No. 6 se presenta el listado de los casos estudiados: combinación de variables.

Además, cada uno de los 24 casos planteados consideró cuatro variantes del perfil de sobreconsolidación, tal como fueron descritas en el numeral 5.4 de este documento.

- Caso básico, con la posición del nivel freático localizada a la profundidad reportada por el respectivo consultor.
- Caso con nivel freático situado 1,0 - 1,5 metros más alto que el reportado originalmente, de tal manera que la relación de sobreconsolidación, RSC, aumente lo suficiente para permitir que los asentamientos de consolidación causados por los edificios de seis o de doce pisos correspondan totalmente a procesos de recompresión, como función del índice Cr.
- Caso con nivel freático situado 1,5 – 2,0 metros más bajo que el reportado originalmente, de tal manera que la relación de sobreconsolidación, RSC, se reduzca a 1,0 para todos los suelos por debajo de una cierta profundidad, desde donde estarían normalmente consolidados.
- Caso que considera el fenómeno de preconsolidación aparente. Corresponde a la posición original del nivel freático reportada por el respectivo consultor (caso básico), pero incorpora el concepto de que a partir de una cierta profundidad en adelante, desde donde la RSC sea del orden de 1,15, el suelo está normalmente

consolidado pero presenta una presión de preconsolidación aparente ligeramente mayor que el esfuerzo vertical efectivo original, por ser el depósito de origen antiguo donde, por el tiempo, se ha dado lugar a un buen porcentaje de compresión secundaria y a la formación de enlaces diagenéticos entre las partículas arcillosas.

Finalmente, como ya se indicó en el numeral No. 5.5, en cuatro casos, Nos. 11, 12, 23 y 24, placa-pilotes y pilotes largos de fricción para los edificios de seis y doce pisos respectivamente, considerando edificios pesados en sitios con perfil desfavorable del subsuelo, se hizo una comparación entre dos métodos de análisis para determinar los esfuerzos verticales inducidos por las cargas transmitidas por los pilotes al suelo: el método aproximado "2V:1H", y un método numérico más preciso, conocido como el Método de León y Reséndiz (1979). Esto dio lugar a los casos Nos. 11*, 12*, 23* y 24*.

7. RESULTADOS

La Tabla No. 7 presenta los resultados sobre los grados de compensación resultantes en los casos planteados, referidos a la condición de carga normal acumulada y a la de carga acumulada permanente.

Las Tablas Nos. 8 y 9 presentan los resultados obtenidos para el edificio de seis pisos y un sótano y para el edificio de doce pisos y dos sótanos, respectivamente.

Las Figuras Nos. 8 – 14 presentan gráficamente los resultados obtenidos para el edificio de seis pisos y un sótano, en cuanto a sensibilidad del factor de seguridad, los asentamientos inmediatos, los asentamientos de consolidación primaria y los asentamientos totales, con los factores de tipo o peso del edificio, perfil del subsuelo y tipo de cimentación. Además, se presentan los resultados de la sensibilidad de los asentamientos de consolidación primaria con las variantes planteadas del perfil de sobreconsolidación para las diferentes combinaciones de peso de edificio, perfil de suelo y tipo de cimentación.

Similarmente, las Figuras Nos. 15 – 21 presentan gráficamente los resultados correspondientes al edificio de doce pisos y dos sótanos.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 Grados de compensación

Referidos a la Tabla No. 7 de Grados de compensación resultantes se puede establecer que:

- **Edificio de seis pisos y un sótano**

- El edificio liviano de seis pisos y un sótano está sobrecompensado (% de compensación > 100), ya sea que esté situado en un perfil favorable o desfavorable. La compensación mayor se tiene (152%) cuando es en un perfil favorable y se refiere a la condición de carga permanente, que es la que causaría asentamientos de consolidación. La compensación menor del edificio liviano de seis pisos y un sótano se tiene (108%) para el perfil desfavorable del suelo cuando se refiere a la condición de carga normal.
- El edificio pesado de seis pisos y un sótano tiene compensaciones de 81 – 91% en perfil favorable y de tan sólo 71 – 80% en perfil desfavorable. Sin embargo, considerando solamente la referencia a las cargas permanentes, los porcentajes son de 91 y 80% para perfiles favorable y desfavorable, respectivamente, que son suficientemente altos para permitir que la solución de placa corrida tenga asentamientos totales a largo plazo aceptables, menores de 30 cm.

- **Edificio de doce pisos y dos sótanos**

- El edificio liviano de doce pisos y dos sótanos está completamente compensado o ligeramente sobrecompensado, tanto para el perfil desfavorable como para el favorable. La compensación mayor se da (121%) en el perfil favorable de suelo y está referida a la carga permanente. La compensación menor se tiene (98%) en el perfil desfavorable y está referida a la carga normal. Esto lleva al hecho de que este edificio liviano no tendrá nominalmente asentamientos por consolidación primaria y cumpliría con tener asentamientos totales mucho menores de 30 cm, y menores de 8 cm con cimentación de placa corrida.
- El edificio pesado de doce pisos y dos sótanos tiene compensaciones de 65 – 71% en perfil favorable, y de 61 – 66% en perfil desfavorable, según se

refiera a carga normal o a carga permanente, respectivamente. Esta condición hace que la solución de cimentación de placa corrida tenga asentamientos totales de largo plazo del orden de 20 – 50 cm para el perfil favorable y de 100 – 140 cm para el perfil desfavorable de suelo, con un desempeño cuestionable en el primer caso y totalmente inaceptable en el segundo.

o

8.2 Factor de seguridad, FS

Referidos a las Tablas Nos. 8 y 9, y a las Figuras Nos. 8, 9, 15 y 16, en lo relativo a los resultados de factores de seguridad de soluciones de placa corrida y de placa-pilotes se puede establecer que:

- **Edificio de seis pisos y un sótano**

- El factor de seguridad, FS, de la cimentación de placa corrida tiene valores muy aceptables para el caso de edificio liviano en perfil favorable (6,1), liviano en perfil desfavorable (3,9) y pesado en perfil favorable (4,0), y un valor algo por debajo de lo aceptable (2,6) para el pesado en perfil desfavorable.
- El factor de seguridad, FS*, definido en términos de presión neta, da valores engañosos muy altos, desde infinito hasta 6,4, cuando se varía desde el caso de edificio liviano en perfil favorable de suelo hasta el caso de edificio pesado en perfil desfavorable. Se reitera que esta definición de factor de seguridad no guarda una verdadera relación inversa con la carga aplicada, como se tiene en un factor de seguridad bien definido.
- En el caso de edificio de seis pisos y un sótano sólo hubo necesidad de plantear la opción de cimentación de placa-pilotes para la condición pesada de edificio. En tal condición el factor de seguridad parcial de placa de la placa-pilotes se incrementó satisfactoriamente de 4,0 a 6,0 en el caso pesado en suelo de perfil favorable, y de 2,6 a 5,0 en el caso pesado en suelo de perfil desfavorable, al pasar de placa corrida a placa-pilotes. Esto muestra uno de los objetivos alcanzados al pasar de placa corrida simple al sistema placa-pilotes, de incrementar significativamente el factor de seguridad contra una falla de capacidad portante de la placa.

- **Edificio de doce pisos y dos sótanos**

- El factor de seguridad, FS, de la cimentación de placa corrida tiene un valor claramente aceptable (4,0) para el caso de edificio liviano en suelo de perfil favorable, un valor algo por debajo de lo aceptable para el caso liviano en perfil desfavorable (2,6) y para el caso pesado en perfil favorable (2,5), mientras que se obtiene un valor completamente inaceptable en el caso pesado en perfil desfavorable (1,6). Esto muestra claramente la sensibilidad que tiene en esta altura de edificio el factor de seguridad contra una falla de capacidad portante de una placa corrida al tipo y peso del edificio y a variaciones del perfil del suelo, aún dentro del mismo depósito lacustre de Bogotá.
- El factor de seguridad, FS*, definido en términos de presión neta, da valores engañosamente altos, desde infinito hasta 2,6, cuando se varía desde el caso de edificio liviano en perfil favorable de suelo hasta el caso de edificio pesado en perfil desfavorable. Nuevamente, se reitera que la definición de FS* en términos de presión neta lleva a dar una falsa idea del margen de seguridad contra la falla por capacidad portante.
- En el caso de edificio de doce pisos y dos sótanos sólo hubo necesidad de plantear la opción de cimentación de placa-pilotes para la condición pesada de edificio. En tal condición el factor de seguridad parcial de placa de la placa-pilotes se incrementó de 2,5 a 6,3 en el caso pesado en suelo de perfil favorable, y de 1,6 a 4,1 en el caso pesado en suelo de perfil desfavorable, al pasar de placa corrida a placa-pilotes. Esto muestra una de las bondades de incorporar pilotes complementarios al trabajo de la placa corrida para generar un sistema placa-pilotes, lográndose un factor de seguridad parcial de placa claramente satisfactorio.

8.3 Asentamientos inmediatos o elásticos, Si

Referidos a las Tablas Nos. 8 y 9, y a las Figuras Nos. 10 y 17 en lo relativo a los resultados de las determinaciones de los asentamientos inmediatos o elásticos, Si, para los diferentes casos de alturas de edificio, condición de peso del edificio, condición del perfil del suelo y tipo de cimentación, se puede establecer que:

- **Edificio de seis pisos y un sótano**

- Los valores determinados de los asentamientos inmediatos, Si, para todos los casos estudiados de edificios de seis pisos y un sótano son valores

aceptables que van desde 12 cm para el caso de edificio pesado en perfil desfavorable de suelo con cimentación de placa corrida, hasta 3 cm para el caso de edificio liviano en perfil favorable de suelo con cimentación profunda de pilotes largos de fricción. Los demás casos dan resultados intermedios.

- Se observa que los asentamientos inmediatos se reducen prácticamente a la mitad cuando se pasa de una solución de placa corrida a una de pilotes largos de fricción para una determinada condición de peso del edificio y perfil del suelo.
 - Por otro lado, se puede observar que los asentamientos inmediatos para las tres soluciones de cimentación estudiadas prácticamente se duplican cuando se pasa de la condición de edificio liviano en perfil favorable del suelo a la condición de edificio pesado en perfil desfavorable: de 5, 5, y 3 cm pasan a 12, 10 y 6 cm, para placa corrida, placa-pilotes y pilotes largos de fricción, respectivamente. Esto confirma la sensibilidad de la respuesta del asentamiento inmediato a las variaciones en peso del edificio y en el perfil del suelo, manteniendo la altura y la geometría del edificio.
- **Edificio de doce pisos y dos sótanos**
 - Para esta altura de edificio los asentamientos inmediatos estimados van desde 22 cm para el edificio pesado en perfil desfavorable de suelo hasta 4 cm para el edificio liviano en perfil favorable. Los demás casos dan valores intermedios. En conjunto, son valores 40 – 80 % más altos que los estimados para el edificio de seis pisos y un sótano, mientras la carga normal aplicada al suelo es 80 – 90 % más alta en el edificio de 12 pisos y dos sótanos que en el de seis pisos y un sótano.
 - Similar a lo observado en el caso del edificio de seis pisos, para el de doce pisos con cualquier combinación de peso de edificio (liviano o pesado) y de perfil de suelo (favorable o desfavorable), los asentamientos inmediatos se reducen a la mitad cuando se pasa de la cimentación de placa corrida a la de pilotes largos de fricción.
 - Para cada una de las tres soluciones de cimentación los asentamientos inmediatos aumentan a un poco más del doble cuando se pasa de la condición de edificio liviano en perfil favorable del suelo a la condición de edificio pesado en perfil desfavorable: de 8, 8 y 4 cm pasan a 22, 15, y 9 cm para placa corrida, placa-pilotes y pilotes largos de fricción, respectivamente.

Se ratifica la sensibilidad del asentamiento inmediato con el peso del edificio y con las variaciones en el perfil de suelo, dejando fijas la altura de doce pisos y dos sótanos del edificio y su geometría en planta.

- Valores de asentamientos inmediatos o elásticos superiores a 15 cm son inaceptables por su forma rápida de presentación. Es así como la opción de placa corrida, con un asentamiento inmediato estimado en 22 cm es inaceptable para la combinación de edificio pesado y perfil desfavorable del suelo.

8.4 Asentamientos de consolidación primaria

Referidos a las Tablas Nos. 8 y 9, y a las Figuras Nos. 11 y 18 en lo relativo a los estimativos de los asentamientos de consolidación primaria para los diferentes casos de combinación de factores, se puede establecer que:

- **Edificio de seis pisos y un sótano:**

- Debido a la clara sobrecompensación dada en los casos de edificio liviano los asentamientos de consolidación primaria, S_{cp} , son prácticamente nulos (0 – 1 cm) para las tres soluciones de cimentación tanto en perfil favorable como en perfil desfavorable de suelo. Desde este punto de vista no se justifica el empleo de soluciones de placa-pilotes ni de pilotes largos de fricción en los casos de edificio liviano.
- Para la combinación de edificio pesado con perfil favorable del suelo, gracias al alto grado de compensación (91%) y a las buenas características del suelo, los asentamientos de consolidación son insignificantes (1 – 2 cm) para las tres opciones de cimentación. En este caso específico tampoco se justifica el empleo de cimentación del tipo placa-pilotes ni cimentación profunda con pilotes largos de fricción.
- Para la combinación de edificio pesado con perfil desfavorable del suelo, el grado de compensación es alta (80%) pero menor que con perfil favorable. Esto genera asentamientos lentos por consolidación del orden de 8 – 18 cm, muy similares para las tres opciones de cimentación. Lo que sí resulta

diferente es su desarrollo en el tiempo: las soluciones de placa-pilotes y de pilotes largos de fricción retardan el desarrollo de los asentamientos de consolidación con relación a los de la cimentación de placa corrida porque aquéllos se dan en estratos más profundos donde el coeficiente de consolidación, c_v , es mucho menor por corresponder a suelos marginalmente sobreconsolidados o normalmente consolidados. Este retardo haría que los asentamientos de consolidación al final de la vida útil del edificio (40 – 50 años) todavía estén lejos de completarse y en ese momento sean valores más aceptables.

- Si se quisiera reducir los asentamientos de consolidación para la combinación de edificio pesado con perfil desfavorable del suelo, habría que emplear longitudes mayores de los pilotes de la solución de placa- pilotes (30 m es vez de 20 m) y los de la solución de pilotes largos de fricción (35 m o más en vez de 30 m).

- **Edificio de doce pisos y dos sótanos**

- Los casos de edificio liviano en perfiles favorable o desfavorable de suelo presentan un leve grado de sobrecompensación que hace que la solución de placa corrida en ambos casos tenga asentamientos de consolidación prácticamente nulos. De esa manera, la placa corrida tendría un comportamiento satisfactorio de asentamientos a largo plazo. No habría necesidad de emplear soluciones del tipo placa-pilotes o de pilotes largos de fricción.
- Para el caso de edificio liviano en perfil desfavorable del suelo con cimentación exclusivamente de pilotes largos de fricción debe tenerse cuidado de seleccionar una longitud suficientemente grande de los pilotes para que no transmitan directamente la carga del edificio a unos estratos muy blandos y compresibles localizados a mediana profundidad porque generarían asentamientos de consolidación no despreciables (10-25 cm), aunque lentos y retardados.
- Para la combinación de edificio pesado y perfil favorable del suelo se encuentra que los asentamientos estimados de consolidación para la cimentación de placa corrida serían del orden de 10 – 30 cm, que la pondrían en el límite de la no aceptabilidad. En este caso las soluciones de placa-pilotes y de pilotes largos de fricción dan unos asentamientos por consolidación muy bajos (3 cm). Puede decirse que en este caso una cimentación de placa-pilotes sería ideal y no se justificaría plantear y emplear

una solución profunda de pilotes largos de fricción. Puede ser necesario el empleo de esta última solución por otros motivos, tales como la excentricidad de cargas, o dificultades en los procesos y en las secuencias constructivas.

- Para la combinación de edificio pesado y perfil desfavorable del suelo se tiene que la cimentación de placa corrida generaría unos asentamientos de consolidación muy altos e inaceptables, del orden de un metro (82 -118 cm). La solución de placa-pilotes daría resultados mucho menores (19 – 36 cm), que se podrán reducir más si se emplean pilotes de mayor longitud (por ejemplo, 40 m en vez de 30 m). La opción de cimentación profunda con pilotes largos de fricción dio un estimativo de asentamientos por consolidación alto (35 – 57 cm). Aunque estos asentamientos sucederían muy lentamente, son valores claramente inaceptables que se podrían reducir si se emplearan pilotes más largos (45 – 50 m en vez de 40 m)

8.5 Factor de seguridad y asentamientos totales

Referidos a las Tablas Nos. 8 y 9, y a las Figuras Nos. 8 – 12 y 15 – 19, analizados en conjunto los resultados de factor de seguridad y de asentamientos totales (en este caso, inmediatos más de consolidación primaria) se puede establecer que:

- **Edificio de seis pisos y un sótano**

- Tipo liviano en perfil favorable de suelo: La cimentación de placa corrida da unos resultados plenamente satisfactorios, con un factor de seguridad, FS, de 6,1 y unos asentamientos totales del orden de 5 cm, que ocurrirán durante la construcción y ocupación inicial del edificio. No se justifica emplear una solución de placa-corrida. Tampoco se justifica emplear una cimentación profunda de pilotes largos de fricción para reducir a 4 cm el asentamiento final estimado.
- Tipo liviano en perfil desfavorable de suelo: La cimentación de placa corrida da unos resultados satisfactorios, con un factor de seguridad, FS, de 3,9 y unos asentamientos totales del orden de 8 cm, que ocurrirán durante la construcción y ocupación inicial de la edificación. No se justifica emplear una solución de placa corrida. Tampoco se justifica emplear una cimentación profunda de pilotes largos de fricción para reducir a 6 cm el asentamiento final estimado (5 cm durante construcción), a no ser que se tengan excentricidades o consideraciones constructivas que requieran esta última solución.

- Tipo pesado en perfil favorable de suelo: La cimentación de placa corrida da resultados satisfactorios, con un FS de 4,0 y unos asentamientos totales estimados en 8 cm, de los cuales 7 cm se presentarían durante la construcción y la ocupación inicial del edificio. Una solución de placa-pilotes, con pilotes de 20 metros de longitud subiría a 6,0 el factor de seguridad y los asentamientos resultantes serían del orden de 7 cm. No se justifica, entonces, el empleo de un sistema placa-pilotes, a no ser que algunas excentricidades menores presentes en el proyecto lo requieran para controlar la inclinación global. La solución de cimentación profunda con pilotes de fricción de 30 m de longitud tendría asentamientos totales finales del orden de 6 cm, de los cuales 4 serían durante construcción y el resto se presentarían muy lentamente. Se considera que estas reducciones no justifican plenamente el empleo de esta última solución, a no ser que haya otras razones adicionales como excentricidades importantes en el proyecto de cargas, o en consideraciones constructivas particulares.
- Tipo pesado en perfil desfavorable de suelo: La cimentación de placa corrida tiene un factor de seguridad algo bajo (2,6) con respecto a la referencia de aceptabilidad (3,0) y los asentamientos totales estimados son del orden de 17 – 27 cm, de los cuales unos 12 cm se presentarían durante la construcción y la ocupación inicial. Aunque estos son resultados muy cercanos a los límites de aceptabilidad, se puede plantear y emplear alternativamente la solución de placa-pilotes, que aumenta el factor de seguridad a 5,0. Esta solución con pilotes de 20 metros de longitud daría unos asentamientos totales del orden de 19 – 28 cm, siendo unos 10 cm inmediatos. No habría una reducción significativa de asentamientos. Por lo tanto, se podría aumentar la longitud de los pilotes a 30 -35 m para reducir los asentamientos totales a valores no mayores de 20 cm. Por otro lado, la solución planteada de cimentación profunda con pilotes de 30 metros, con FS de 3,0 daría asentamientos totales del orden de 16 -24 cm, de los cuales sólo 6 cm serían inmediatos durante la construcción. Los restantes se presentarían muy lentamente, retardando el proceso de consolidación. Estos resultados de asentamientos no son mucho menores de los obtenidos con la placa corrida o con la placa-pilotes. La diferencia radicaría en el fenómeno de retardo de los asentamientos de consolidación con los pilotes largos de fricción con relación a los resultantes con la placa corrida o con la placa-pilotes, lo cual puede ser muy benéfico durante la vida útil de la edificación. Si se determinara reducir significativamente los asentamientos con la solución de cimentación profunda de pilotes, tendría que pensarse en pilotes más largos que los aquí planteados (35 – 40 m en vez de 30 m).

- **Edificio de doce pisos y dos sótanos**

- Tipo liviano en perfil favorable de suelo: Este edificio está completamente compensado. La placa corrida tiene un FS satisfactorio de 4,0, asentamientos inmediatos del orden de 8 cm y asentamientos nulos de consolidación. Estos valores hacen la placa corrida una solución factible técnicamente. No se justificaría la alternativa de placa-pilotes. Con una cimentación profunda de pilotes de 30 m de longitud con FS de 3,2 se reducirían los asentamientos totales a 4 cm. Por esta razón, no es clara la necesidad de emplear una cimentación profunda con pilotes largos de fricción, a no ser que hubiera razones de excentricidades importantes o consideraciones constructivas serias a favor de esta alternativa.
- Tipo liviano en perfil desfavorable de suelo: Este edificio alcanza a estar completamente compensado. La cimentación de placa corrida tiene un FS de 2,6, algo bajo con respecto al 3,0 de referencia de aceptabilidad, asentamientos inmediatos del orden de 14 cm y asentamientos nulos de consolidación. No se justifica el empleo de soluciones tipo placa-pilotes o pilotes largos de fricción para reducir asentamientos. Podría pensarse en una solución tipo placa-pilotes para incrementar el FS hasta un valor superior a 3,0. Una cimentación de pilotes de fricción de 40 m de longitud daría asentamientos totales del orden de 18 – 30 cm, 7 cm inmediatos y el resto muy lento en el tiempo. Esta opción podría necesitarse si hubiera excentricidades importantes y/o consideraciones constructivas a favor de ella.
- Tipo pesado en perfil favorable de suelo: La cimentación de placa corrida es inaceptable por presentar un FS de 2,5, asentamientos inmediatos de 12 cm y totales a largo plazo de 20 - 50 cm. La opción de placa-pilotes de 30 metros de longitud incrementaría el FS a 6,3 y tendría asentamientos inmediatos de unos 8 cm y totales del orden de 11 cm. Dicha solución de placa-pilotes sería aceptable. Por otro lado, una cimentación profunda de pilotes de 40 metros de longitud efectiva, con un FS de 3,0, tendría asentamientos inmediatos de unos 6 cm y totales del orden de 9 cm. Dicha solución de cimentación profunda sería claramente aceptable y conveniente para satisfacer los requerimientos de FS, reducir los asentamientos inmediatos y de consolidación y retardar significativamente éstos, controlar excentricidades importantes que tenga el proyecto y así evitar la inclinación global, y para aprovechar alguna ventaja en los aspectos de la ejecución de la excavación de los dos sótanos y de la construcción de la subestructura.

- Tipo pesado en perfil desfavorable de suelo: La opción de placa corrida para este edificio es inaceptable por tener un FS muy bajo de 1,6, asentamientos inmediatos del orden de 22 cm y asentamiento totales a largo plazo muy altos, de 104 – 140 cm. Una alternativa de placa-pilotes con pilotes de 30 metros de longitud incrementaría el FS a 4,1, reduciría los asentamientos inmediatos a unos 15 cm, pero tendría todavía valores altos de asentamientos totales a largo plazo, de 34 – 51 cm. Esta situación se podría mejorar empleando pilotes más largos (de 40 m en vez de 30 m) que permitan reducir los asentamientos totales a largo plazo a valores menores de 30 cm. La opción de cimentación profunda con pilotes de 40 m de longitud y FS de 3,0, tendría asentamientos inmediatos aceptables del orden de 9 cm, pero los asentamientos totales finales seguirían siendo altos (44 – 66 cm), aunque se presentarían en forma muy lenta, lo cual convendría favorablemente durante la vida útil del proyecto. Para reducir a valores menores de 30 cm los asentamientos totales de la cimentación profunda deberían emplearse, entonces, pilotes de mayor longitud (45 – 50 m en vez de 40 m).

8.6 Sensibilidad del cálculo de asentamientos de consolidación con el método de análisis de los esfuerzos inducidos por grupos de pilotes

Como se describió en el capítulo de metodología del estudio se seleccionaron cuatro casos, Nos. 11, 12, 23 y 24, para analizar las variaciones en la estimación de asentamientos de consolidación al emplear dos métodos diferentes de disipación de esfuerzos inducidos con la profundidad cuando se tienen grupos de pilotes de fricción. Los casos Nos. 11 y 23 corresponden a cimentaciones tipo placa-pilotes, mientras que los casos Nos. 12 y 24 corresponden a cimentaciones profundas de pilotes largos de fricción. Los casos Nos. 11 y 12 son para el edificio de seis pisos y un sótano en condición pesada en el perfil desfavorable del suelo. Los casos Nos. 23 y 24 son para el edificio de doce pisos y dos sótanos en condición pesada en el perfil desfavorable. Referidos a las Tablas Nos. 8 y 9 y a las Figuras Nos. 13 y 20, donde se presentan los resultados, se pudo establecer que:

- **Edificio de seis pisos y un sótano**

- Para la opción de placa-pilotes del edificio pesado en perfil desfavorable de suelo, los estimativos de asentamientos de consolidación primaria, Sc_p , se reducen de 12 – 26 cm a 9 – 18 cm, es decir, una reducción del 25 – 30% al pasar de emplear el método aproximado de Terzaghi (imaginar una placa virtual equivalente a una profundidad de 2/3 de la longitud de los pilotes) a emplear el método numérico de León y Reséndiz (1979), que se ajusta más a la solución de Mindlin. (Casos Nos. 11 y 11*)

- Para la opción de cimentación profunda con pilotes largos de fricción del edificio pesado en perfil desfavorable de suelo, los estimativos de S_{cp} se reducen en un 59% aproximadamente, de 24 – 44 cm a 10 – 18 cm, al pasar del método aproximado de Terzaghi al método numérico de León y Reséndiz. (Casos Nos. 12 y 12*)
 - Estos resultados muestran la alta sensibilidad del estimativo de asentamientos de consolidación primaria con el método empleado de cálculo de los esfuerzos inducidos por grupos de pilotes de fricción en el grueso depósito lacustre de Bogotá, y motivan un llamado para precisar los análisis respectivos con las herramientas numéricas disponibles como el método de León y Reséndiz.
- **Edificio de doce pisos y un sótano**
 - Para la opción de placa-pilotes del edificio pesado en perfil desfavorable de suelo, los estimativos de asentamientos de consolidación primaria, S_{cp} , se reducen de 51 - 77 cm a 19 – 36 cm, es decir, una reducción del 63 - 53% al pasar de emplear el método aproximado de Terzaghi a emplear el método numérico de León y Reséndiz. (Casos Nos. 23 y 23*)
 - Para la opción de cimentación profunda con pilotes largos de fricción del edificio pesado en perfil desfavorable de suelo, los estimativos de S_{cp} se reducen de 65 - 87 cm a 35 - 57 cm, una reducción del 46 – 34%, al pasar del método aproximado de Terzaghi al método numérico de León y Reséndiz. (Casos Nos. 24 y 24*)
 - Nuevamente se demuestra la alta sensibilidad del estimativo de asentamientos de consolidación primaria con el método empleado de cálculo de los esfuerzos inducidos por grupos de pilotes de fricción en el grueso depósito lacustre de Bogotá.

8.7 Sensibilidad de los estimativos de asentamientos por consolidación primaria, S_{cp} , con variantes en el perfil de sobreconsolidación.

Como se describió detalladamente en el capítulo No. 5, Metodología del Estudio, se establecieron variantes en el perfil de sobreconsolidación originadas por posibles imprecisiones en la determinación de la posición del nivel freático o por la incorporación del concepto de preconsolidación aparente en suelos normalmente consolidados de

origen antiguo. De tal manera que para cada uno de los 24 casos planteados en este estudio se obtuvieron los estimativos de los Scp según la hipótesis de perfil de consolidación. Tales resultados se observan en las Tablas Nos. 8 y 9 y en las Figuras Nos. 14 y 21. De estos resultados se puede establecer que:

- **Edificio de seis pisos y un sótano**

- En los casos de edificio liviano en cualquier perfil, favorable o desfavorable, de suelo las cargas están sobrecompensadas por la excavación del sótano que no da lugar a un análisis de asentamientos por consolidación primaria para ninguna variante de perfil de sobreconsolidación.
- Para el edificio pesado y perfil favorable de suelo ya las cargas no están totalmente compensadas por la excavación, aunque el grado de compensación es muy alto. Los resultados de Scp son muy bajos y satisfactorios y oscilan entre 1 – 3 cm, 1 – 14 cm, y 2 – 7 cm, según sea placa corrida, placa-pilotes o pilotes largos de fricción, respectivamente, con el valor menor para la hipótesis No. 2 (todos los Scp son de recompresión), y el mayor para la hipótesis No. 3 (desde una cierta profundidad hacia abajo el suelo está normalmente consolidado, RSC = 1). En este caso los valores absolutos son todos relativamente bajos, pero la relación entre los valores extremos obtenidos es muy alta (3 – 14), reflejando que hay una gran dispersión entre los valores obtenidos para las cuatro hipótesis.
- Para el edificio pesado y perfil desfavorable de suelo el grado de compensación es menor y los estimativos de asentamientos Scp son más altos. Aquí los valores oscilan entre 4 – 35 cm, 3 – 36 cm, y 3 – 29 cm, según la cimentación, y con el valor menor en cada intervalo para la hipótesis No. 2, y el mayor para la hipótesis No. 3. Ya en estos casos los valores son importantes y la relación entre resultados extremos obtenidos según las cuatro hipótesis está entre 9 y 12. Hay, por lo tanto, gran sensibilidad del resultado de Scp con respecto a la hipótesis adoptada sobre el perfil de sobreconsolidación, lo cual deberá exigir una mayor precisión en la determinación del nivel freático, de presiones piezométricas de estratos acuíferos confinados, y, por ende, de los esfuerzos efectivos iniciales.

- **Edificio de doce pisos y dos sótanos**

- Tipo pesado en perfil favorable de suelo: Este caso está sólo parcialmente compensado y da lugar a asentamientos de cierta magnitud. Sus resultados

oscilan entre 8 - 51 cm, 3 - 42 cm, y 3 - 11 cm, según sea placa corrida, placa-pilotes o pilotes largos de fricción, respectivamente, con el valor menor en la hipótesis No. 2 (todos los S_{cp} son de recompresión), y el mayor en la hipótesis No. 3 (desde una cierta profundidad hacia abajo el suelo está normalmente consolidado, $RSC = 1$). Los valores absolutos ya pueden ser apreciables y la relación entre valores extremos obtenidos según las cuatro diferentes hipótesis de perfil de sobreconsolidación varía entre 4 y 14, reflejando una gran dispersión en los valores obtenidos.

- Tipo pesado y perfil desfavorable de suelo: Este caso es el de menor porcentaje de compensación de todos los planteados. Por lo tanto, los asentamientos estimados de consolidación primaria, S_{cp} , son de magnitudes importantes. Aquí los resultados oscilan entre 15 – 120 cm, 4 – 43 cm, y 7 – 58 cm, según sea la cimentación de placa corrida, placa-pilotes o profunda de pilotes largos de fricción, con el valor menor en cada intervalo el correspondiente a la hipótesis No. 2 de grado de sobreconsolidación, y el mayor el correspondiente a la hipótesis No. 3. En estos resultados la relación entre los valores extremos obtenidos según las cuatro diferentes hipótesis varía entre 8 y 11, indicando que hay una sensibilidad muy alta del resultado obtenido de S_{cp} con la hipótesis de perfil de sobreconsolidación que se adopte.

9. CONCLUSIONES

A través del presente estudio de sensibilidad del comportamiento de cimentaciones en el depósito lacustre de Bogotá se ha podido verificar y resaltar la importancia que tienen ciertos factores relacionados con el edificio, con el suelo de fundación y con los criterios y los métodos de análisis.

Del desarrollo de todo el trabajo y del análisis de resultados acabado de presentar en el capítulo No. 8 se pueden derivar las siguientes conclusiones generales del estudio:

- Se debe mejorar la comunicación entre el ingeniero calculista y el ingeniero de suelos de un determinado proyecto de edificio para evaluar de forma lo más precisa posible las cargas realmente transmitidas al suelo de fundación en diferentes instancias, tales como la carga extrema, la carga normal y la carga permanente. La carga normal dará el nivel de referencia para establecer un factor de seguridad aceptable de 3,0 (NSR-98) contra una falla por capacidad portante, y para determinar los asentamientos inmediatos o elásticos de la cimentación. Con la carga extrema se verificará que el factor de seguridad correspondiente sea de por lo menos 2,0 (NSR-98). Con la carga permanente se determinarán los asentamientos por consolidación primaria de los gruesos estratos arcillosos blandos que conforman el suelo de origen lacustre de Bogotá.
- La determinación de las cargas normales y permanentes transmitidas por la cimentación del edificio al suelo de fundación exige un trabajo más detallado y más preciso que la simple aplicación de los factores de reducción contenidos en la norma colombiana vigente (NSR-98).
- En la mayoría de los proyectos corrientes de construcción de edificios en Bogotá no se hace la suficiente diferenciación entre cargas extremas, normales y permanentes, en el momento de suministrarlas al ingeniero de suelos.
- En edificios localizados en el depósito lacustre de Bogotá, con uno o varios sótanos, el concepto de compensación parcial o total es muchas veces vital para el correcto desempeño del proyecto en lo relacionado con el margen de seguridad contra una falla por capacidad portante y en lo relacionado con asentamientos por consolidación. La falta de precisión en la evaluación de las cargas influye significativamente en el factor de seguridad y en los asentamientos por consolidación por cuanto el factor clave tiene que ver con diferencias entre la carga aplicada y el alivio de la excavación. Así, un pequeño grado de imprecisión en las cargas, como el que resulta de estimar los asentamientos de consolidación con las cargas normales aplicadas y no con las permanentes, se magnifica en el momento de establecer las cargas netas.

- Por otro lado, el tipo de edificio, su estructura, tipo de fachada, tipo y densidad de muros divisorios por unidad de área, tipo de fachada, acabados de pisos, muros y cielo-rasos, etc., y uso o destinación marcan diferencias en las cargas transmitidas al suelo de fundación por diferentes edificios aunque tengan la misma geometría global de número de pisos y área en planta.
- Las diferencias establecidas entre edificios livianos y pesados en el presente estudio son del orden de 40 - 70%, lo que explica cómo las soluciones de cimentación pueden ser claramente diferentes para edificios livianos y edificios pesados de la misma configuración geométrica.
- El depósito lacustre de Bogotá presenta diferencias importantes en resistencia y en compresibilidad según el sitio que se considere. En el presente estudio, con un número realmente limitado de perfiles de suelo considerados, se pudo establecer un intervalo de variación importante en los perfiles de resistencia al corte, de preconsolidación y de grado de sobreconsolidación del suelo.
- El perfil de resistencia al corte no drenado considerado más desfavorable en el presente estudio representa valores del orden del 60% de los valores correspondiente al perfil considerado más favorable.
- El perfil de preconsolidación y el grado de sobreconsolidación de los sitios considerados favorable y desfavorable presentan diferencias suficientes para explicar comportamientos disímiles de cimentaciones iguales en los dos sitios.
- Es vital para el análisis de cimentaciones de todo tipo en un determinado sitio del depósito lacustre de Bogotá contar con un perfil suficientemente preciso de resistencia al corte no drenado, S_u , obtenido por más de un método, combinando ensayos de campo del tipo torsión con veleta de campo (VST), penetración estática de cono (CPT), y otros (presurómetro de Menard, dilatómetro de Marchetti), con ensayos de laboratorio tipo triaxial UU o CU sobre muestras de muy buena calidad, representativas de los distintos niveles del perfil de suelo.
- Es vital para el análisis y la comparación de cimentaciones contar con información precisa y confiable del perfil de presión de preconsolidación y demás parámetros de compresibilidad del suelo, obtenidos de ensayos de consolidación unidimensional en el laboratorio sobre muestras de alta calidad, representativas de las diferentes profundidades del depósito de suelo. Se puede acudir al empleo de correlaciones calibradas en nuestro medio para verificar y complementar, nunca para reemplazar, la información que dan los ensayos de consolidación de laboratorio.

- Como se observó en los análisis de resultados, en todos los casos los asentamientos de consolidación estimados son muy sensibles al perfil del grado de sobreconsolidación. A su vez éste depende mucho de la correcta ubicación del nivel freático y de la identificación y cuantificación de presiones piezométricas altas de algún acuífero inferior confinado. Es, por lo tanto, muy importante que en el sitio del proyecto se instalen y monitoreen periódicamente piezómetros, preferiblemente de hilo vibrátil, de rápida respuesta, idealmente más de uno, a diferente profundidad, con el fin de precisar el régimen de presiones de poros existente en el sitio.
- Como se observó en los análisis de resultados, es importante en los diferentes sitios del depósito lacustre de Bogotá desarrollar una investigación cuidadosa sobre la existencia del fenómeno de preconsolidación aparente, por medio de ensayos especiales de consolidación unidimensional en el laboratorio sobre muestras de alta calidad, obtenida preferiblemente con muestreador de pistón de diámetro grande, para identificar si la presión de preconsolidación obtenida es real o aparente, y si se está ante unos niveles de suelo normalmente consolidados de origen antiguo. Esto influye significativamente en la cuantificación de los asentamientos de consolidación para todas las opciones de cimentación.
- Es importante determinar cuándo se está ante un fenómeno de subconsolidación, es decir, ante un depósito de suelo que esté en pleno proceso de consolidación causada por factores que actuaron recientemente, tales como la colocación de rellenos extensos, o el descenso local o regional del nivel freático. Esta detección es importante porque modifica el modelo de análisis y las conclusiones que de él se deriven.
- En cuanto a la definición del factor de seguridad se ratifica el concepto de que la expresión correcta de éste, FS , para cimentaciones superficiales corresponde a $= (\text{capacidad portante última})/(\text{presión promedio de contacto})$. Esto significa que se consideran todas las componentes de la capacidad portante, incluida la presión de sobrecarga vecina a la profundidad de fundación. Definir el factor de seguridad en términos netos, FS^* , como $= (\text{capacidad portante neta última})/(\text{presión promedio neta de contacto})$, incrementa el valor y da una idea engañosa de alto margen de seguridad cuando, en realidad está manteniendo un factor de seguridad igual a uno a la sobrecarga lateral existente al nivel de la fundación.
- Con relación al método de análisis de los esfuerzos inducidos por un grupo de pilotes en las soluciones de placa-pilotes o en las cimentaciones profundas de pilotes largos de fricción los resultados obtenidos dejaron muy en claro sobre la necesidad de avanzar en la aplicación de métodos numéricos más precisos que la solución aproximada propuesta por Terzaghi, pues la respuesta del cálculo de

asentamientos de consolidación es muy sensible al método de determinación de los dichos esfuerzos.

10. RECOMENDACIONES

Con base en el trabajo desarrollado en este estudio y de los resultados obtenidos se pueden formular las siguientes recomendaciones generales:

- Fomentar la investigación continuada sobre las características geotécnicas del depósito lacustre de Bogotá y de sus variaciones espaciales, particularmente en cuanto a resistencia al corte, compresibilidad y condiciones de presión de poros y de esfuerzos efectivos.
- Fomentar el intercambio ágil de información acerca del avance de nuevas investigaciones sobre la caracterización de los suelos del depósito lacustre de Bogotá entre los investigadores universitarios y los consultores geotécnicos de la ciudad, que permita unir esfuerzos en la misma dirección hacia un propósito común de mejor y más preciso conocimiento de tales suelos y de su incidencia en las soluciones de cimentación que se dan en la ciudad.
- Continuar la línea de investigación del presente trabajo en futuros estudios que incluyan edificios de otras alturas (p.ej. 8, 16, 24 pisos) consultando la metodología seguida en el presente trabajo, e introduciendo las modificaciones que la mejore.
- Incluir en nuevas investigaciones el estudio sistemático de la influencia de tener edificios de tipología continua (sin aislamiento lateral) del mismo número de pisos. El presente trabajo se limitó al estudio del comportamiento de edificios suficientemente aislados.
- Fomentar y promover una mejor comunicación entre los ingenieros calculistas y geotecnistas de la ciudad con el fin de desarrollar un trabajo conjunto que conduzca a determinar las diferentes condiciones de carga y el grado de precisión que se requiere para que el geotecnista pueda realizar su estudio de cimentaciones en forma apropiada.
- Promover la divulgación y el avance de métodos más precisos de determinación de los esfuerzos inducidos al suelo por grupos de pilotes.
- Promover entre los ingenieros geotecnistas e investigadores universitarios el avance en los métodos racionales de análisis de cimentaciones del tipo placa-pilotes, aplicados a las condiciones locales del depósito lacustre de Bogotá.

11. BIBLIOGRAFÍA

- **HOLTZ, Robert D. and KOVACS, William D.**, “An Introduction to Geotechnical Engineering”, Prentice Hall, Inc., Primera Edición, New Jersey, 1981.
- **DELGADO, Manuel**, “Ingeniería de Fundaciones”, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Santafé de Bogotá, 1996.
- **DAS, Braja M.**, “Principios de Ingeniería de Cimentaciones”, International Thomson Editores, Cuarta Edición, México, 2001.
- **WINTERKORN, Hans and FANG, Hsai**, Editores, “Foundation Engineering Handbook”, Editorial Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1975.
- **ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA**, “Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente – NSR-98”, Santafé de Bogotá, D.C., 2000.
- **PECK, Ralph, HANSON, Walter y THORNBURN, Thomas**, “Ingeniería de Cimentaciones”, Editorial Limusa, México, 1987.
- **TERZAGHI, PECK y MESRI**, “Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica”, Tercera Edición, 1994.
- **TOMLINSON, M. J.**, “Cimentaciones, diseño y construcción”, Editorial Trillas, México, 1996.
- **LEONARDS, Gerald**, “Foundation Engineering”, Editorial McGraw-Hill, 1962.
- **ZEEVAERT, Leonardo**, “Foundation Engineering in Difficult Subsoil Conditions”.
- **BOWLES, Joseph E.**, “Foundation Analysis and Design”, Editorial McGraw-Hill.
- **MEYERHOF, George**, “Bearing capacity and Settlement of pile foundations”, Eleventh Terzaghi Lecture, Journal of Geotechnical Engineering Division, march, 1976.
- **VESIC, Aleksandar**, “Design of pile foundations”, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 1977.

- **RESÉNDIZ, Daniel, y AUVINET, Gabriel**, “Analysis of pile foundations in consolidating soil”, Proceedings of the Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, 1973.
- **LEÓN, José Luis y RESÉNDIZ, Daniel**, “Cálculo de asentamientos de cimentaciones sobre pilotes de fricción”, Memorias del VI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Lima, diciembre, 1979.
- **DURÁN G., Jorge Enrique**, “Optimización de un sistema de cimentación placa-pilotes en el depósito lacustre de Bogotá”, Tercer Encuentro Nacional de Ingenieros de Suelos y Estructuras, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C., septiembre, 2003.

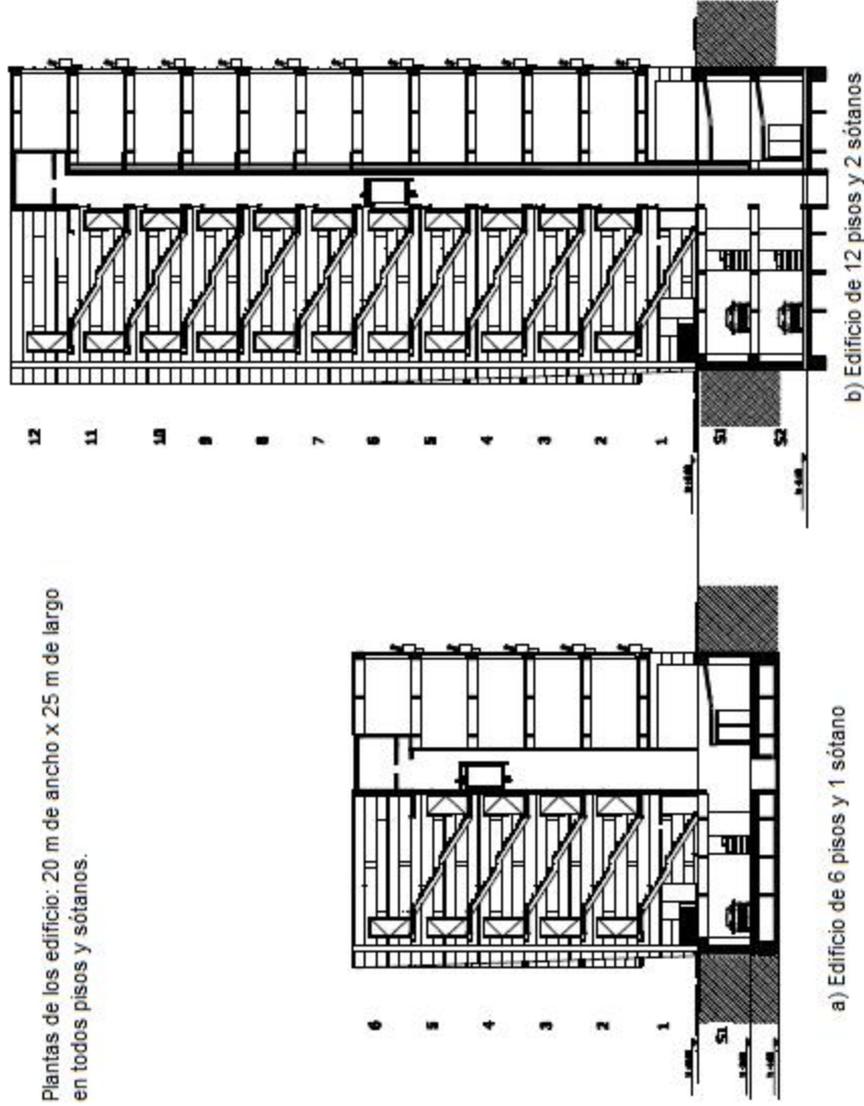
Bogotá, D.C., mayo de 2009

FIGURAS

TABLAS

FIGURAS

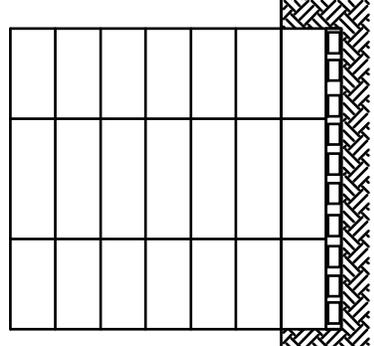
Plantas de los edificios: 20 m de ancho x 25 m de largo en todos los pisos y sótanos.



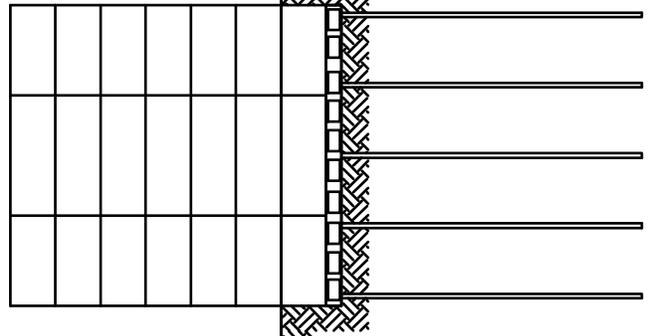
a) Edificio de 6 pisos y 1 sótano

b) Edificio de 12 pisos y 2 sótanos

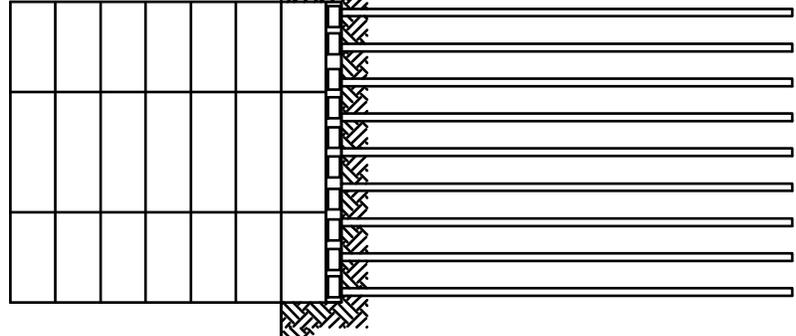
FIGURA No.1: ALTURAS DE LAS EDIFICACIONES ESTUDIADAS



a) Placa corrida



b) Placa - pilotes



c) Pilotes largos de fijación con losa cabezal

FIGURA No.2 ESQUEMAS DE LOS TRES TIPOS DE ESTUDIADOS PARA EL EDIFICIO DE 6 PISOS Y 1 SÓTANO.

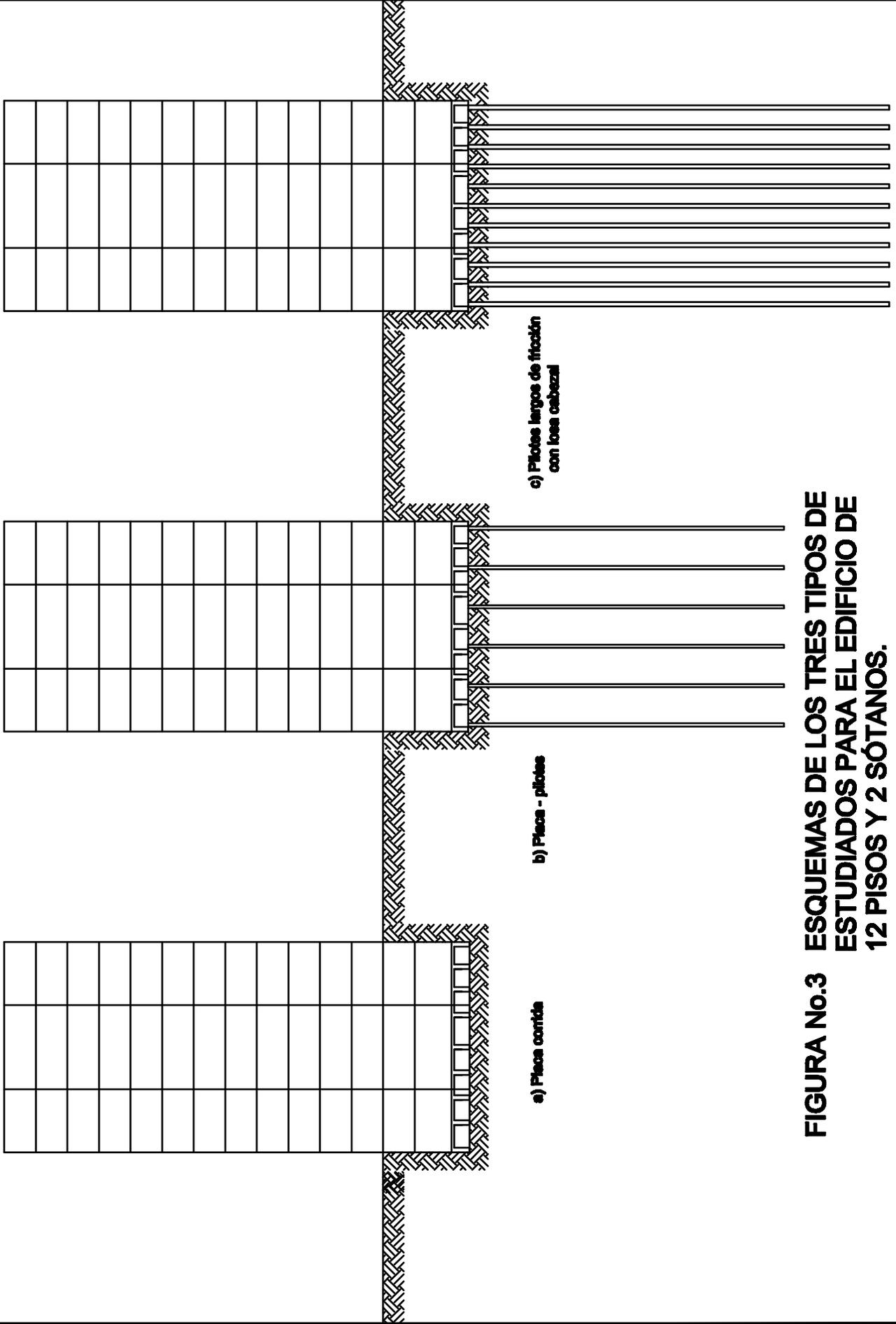
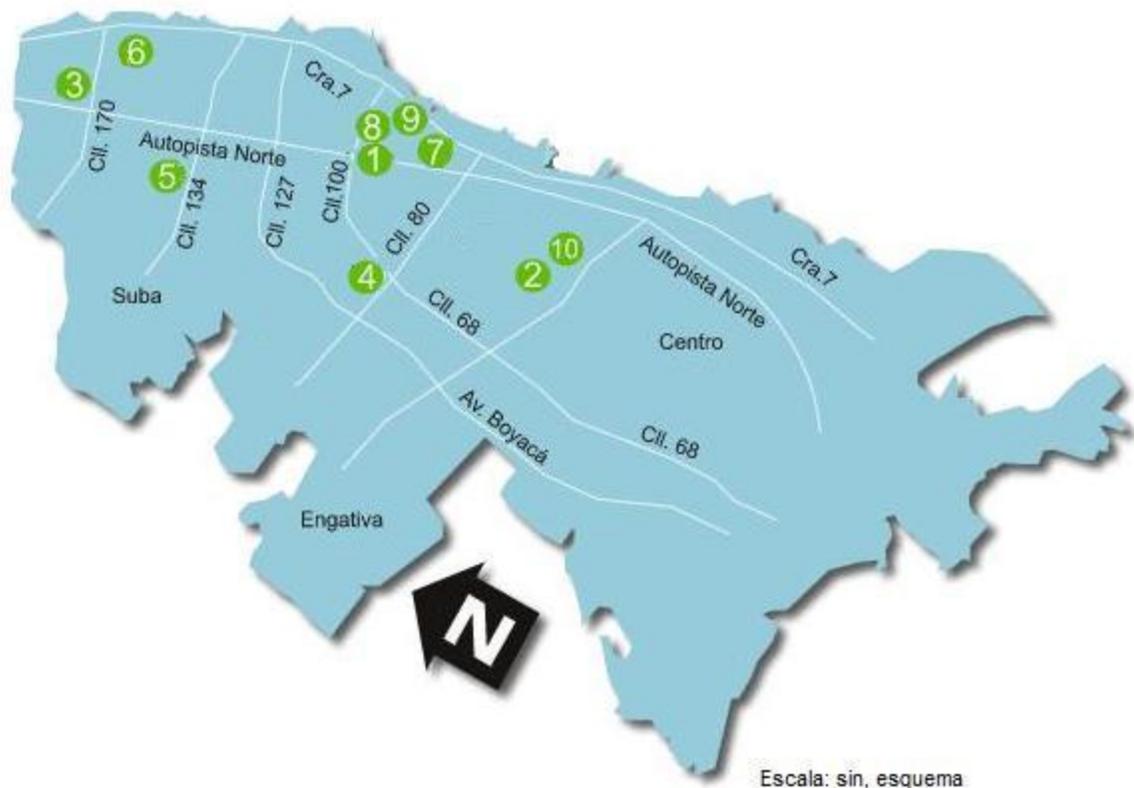


FIGURA No.3 ESQUEMAS DE LOS TRES TIPOS DE ESTUDIADOS PARA EL EDIFICIO DE 12 PISOS Y 2 SÓTANOS.

MAPA DE BOGOTÁ



Escala: sin, esquema

CONVENCIÓN:

- | | | | |
|---|--|----|--|
| 1 | Puente Tercer Nivel - Autopista Norte x Calle 92 | 6 | Edificio Parque de la Emilia Cra. 25 A x calle 152 |
| 2 | Conjunto Residencial Rafael Nuñez - Trv. 39 x Calle 45 | 7 | Edificio Atocha del Lago Cra. 14 x calle 80 |
| 3 | Canal Río El Cedro - Calle 170 x Cra. 31 | 8 | Hotel Suites Cosmos 100 - Calle 100 x trv. 21 |
| 4 | Canal Río Salitre - Calle 80 x Cra. 66 | 9 | Edificio carrera 13 No. 93 - 11 |
| 5 | Edificio Parque de la Colina III - Cra. 53 x calle 135 | 10 | Edificio de Ciencia y Tecnología Universidad Nacional - Av. Cra. 30 x calle 45 |

Fuente: mapa

www.consucasaltda.com/obras/imagenes/bog_map2.gif

FIGURA No. 4 MAPA DE LOCALIZACIÓN DE LOS 10 SITIOS ESTUDIADOS

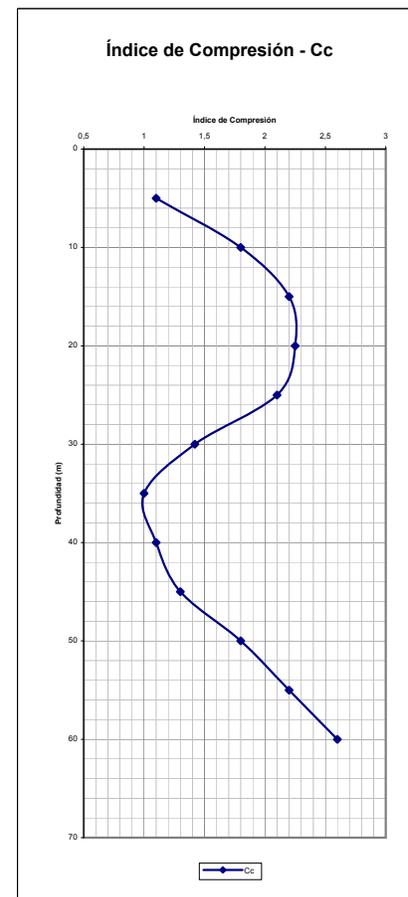
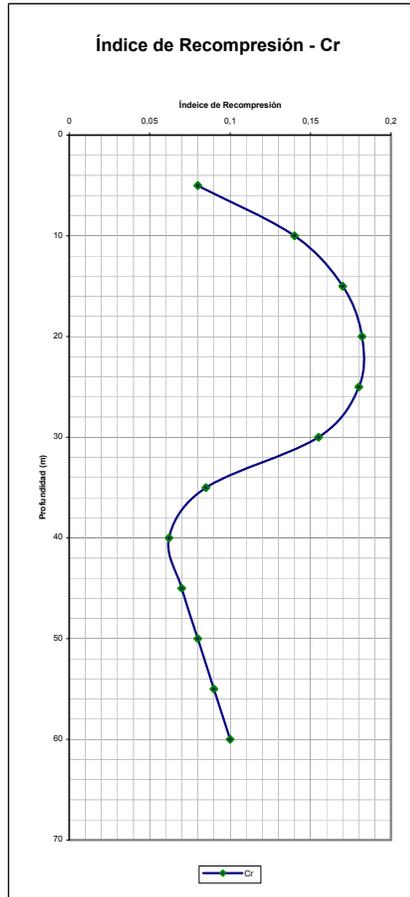
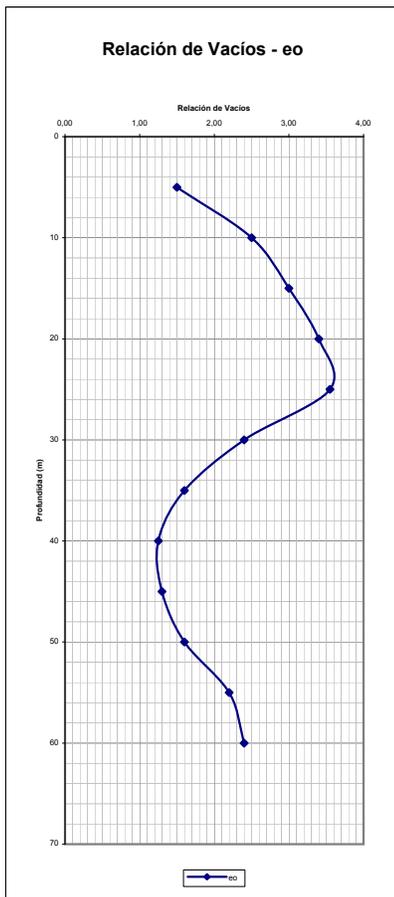
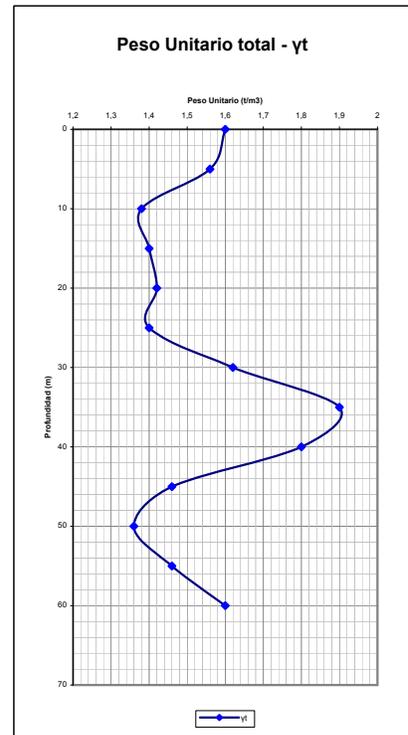
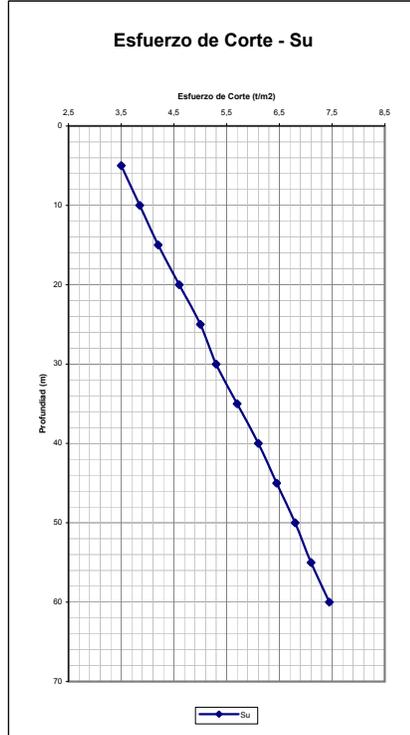
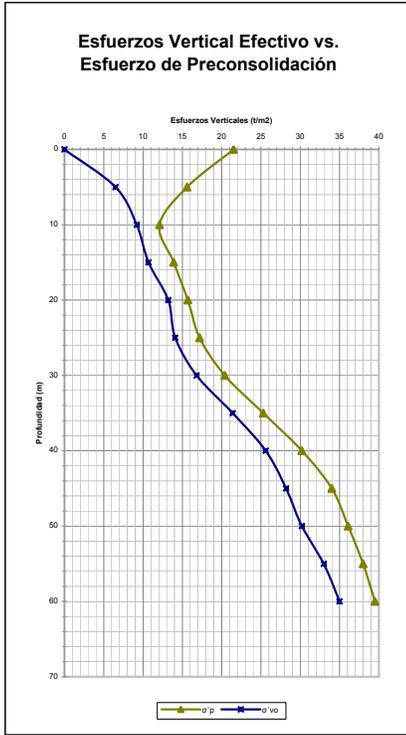


FIGURA No.5: PERFIL DE RESISTENCIA, DE PRECONSOLIDACIÓN Y DE OTROS ÍNDICES DE COMPRESIBILIDAD, PARA EL SITIO CONSIDERADO MÁS FAVORABLE

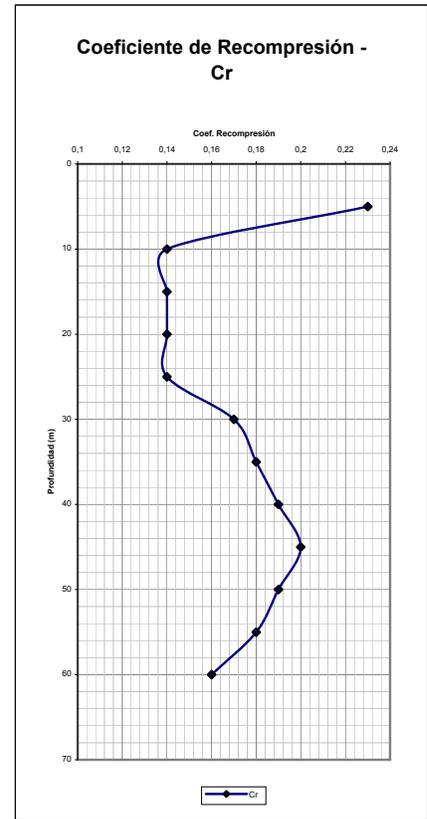
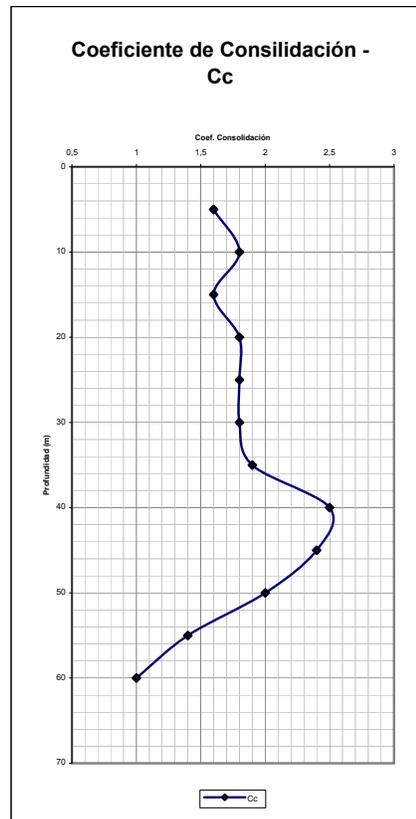
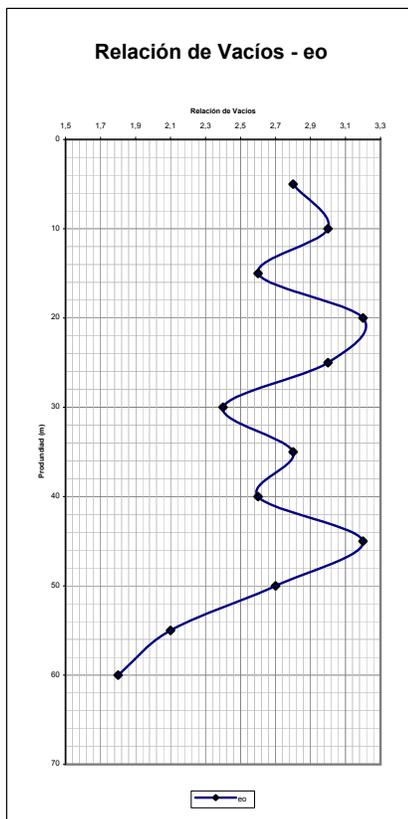
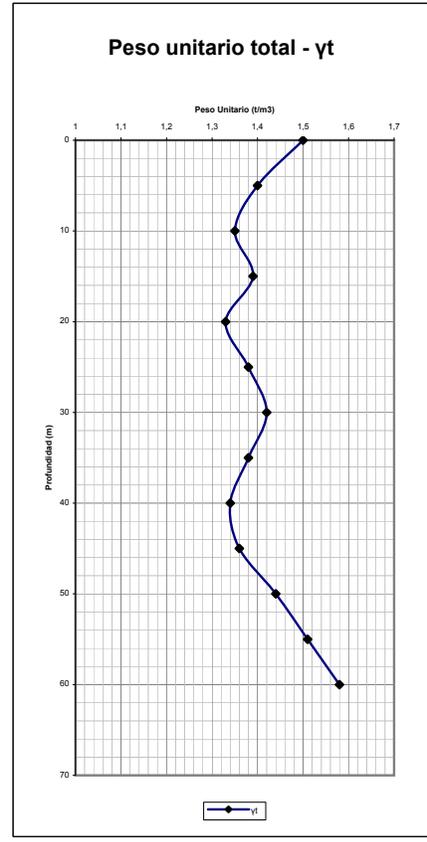
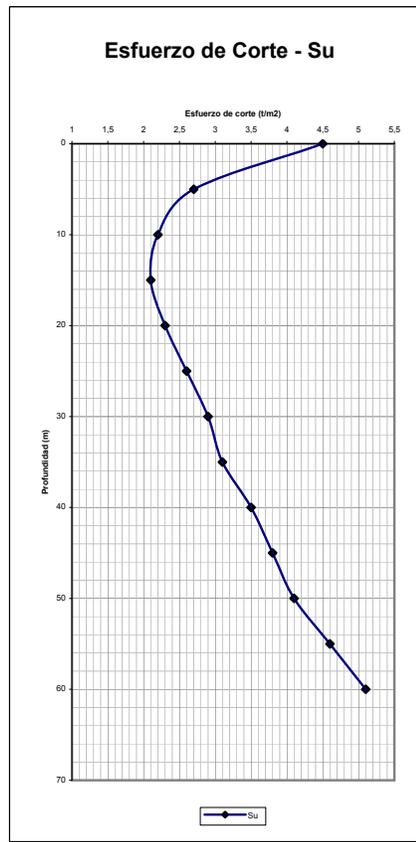
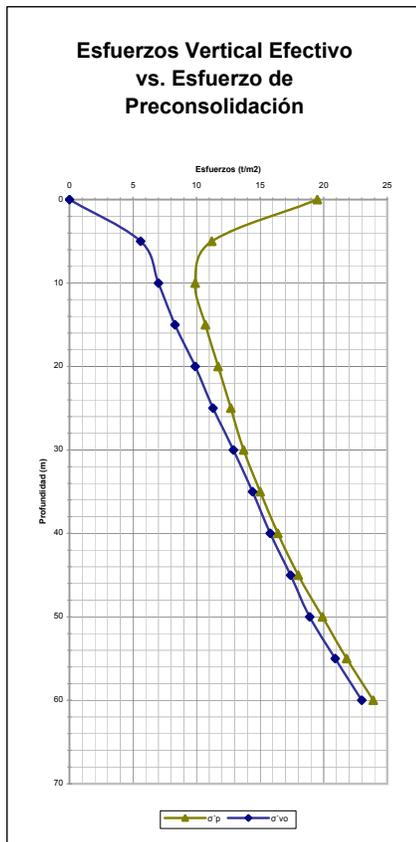
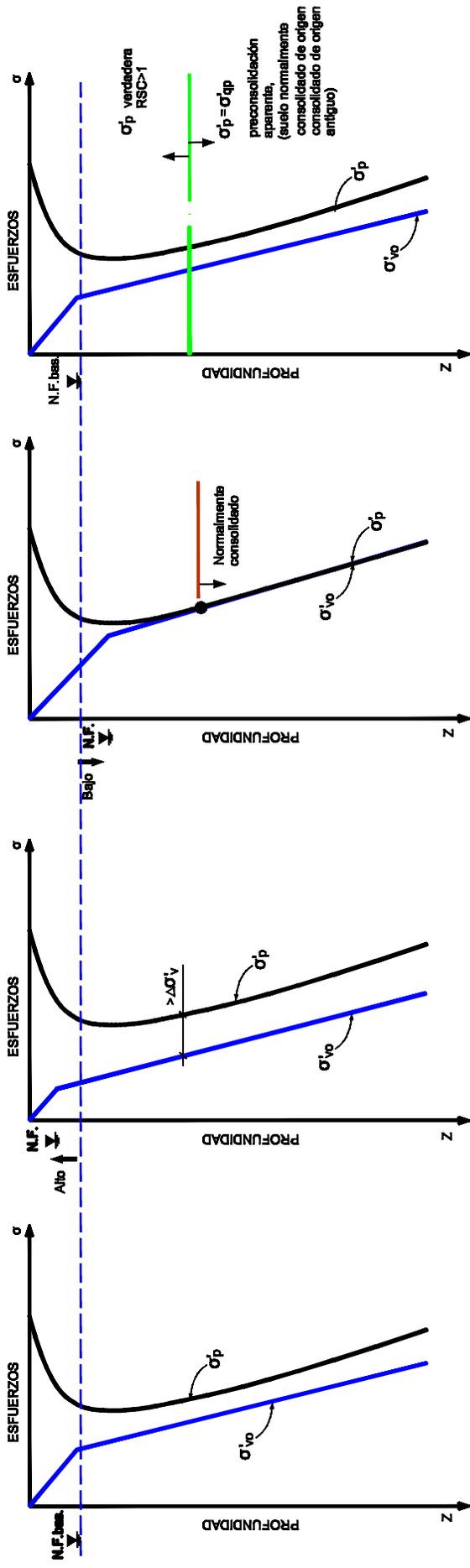


FIGURA No.6: PERFIL DE RESISTENCIA, DE PRECONSOLIDACIÓN Y DE OTROS ÍNDICES DE COMPRESIBILIDAD, PARA EL SITIO CONSIDERADO MÁS DESFAVORABLE

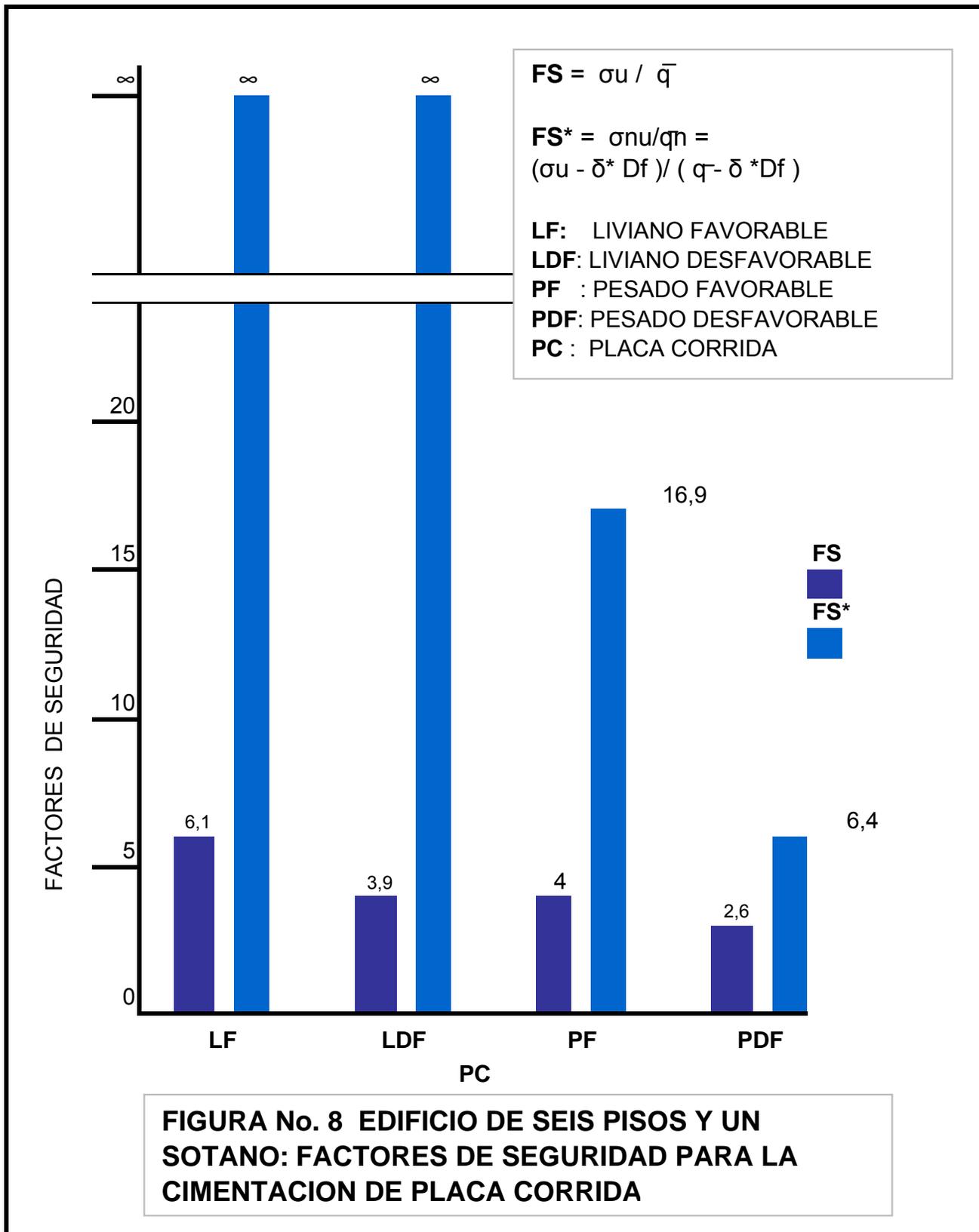


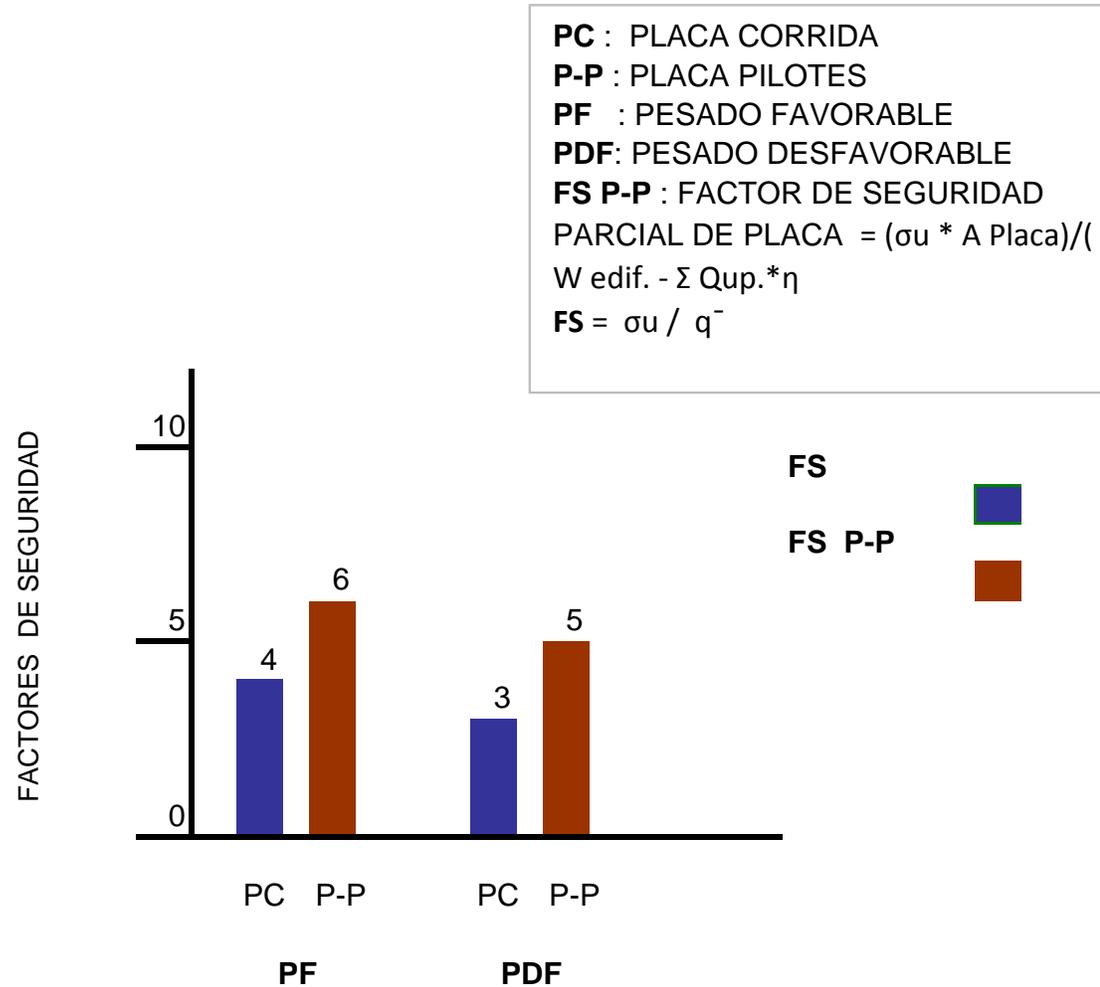
- a) Nivel freático según lo reportado por el consultor. Nivel básico.
- b) Nivel freático más alto hasta el punto que el esfuerzo aplicado siempre produzca asentamientos por recompresión. Nivel alto.
- c) Nivel freático más bajo, para que las curvas se toquen debajo de la cota preconsolidada y analizar el suelo como normalmente consolidado. Nivel bajo.
- c) Concepto de preconsolidación aparente. Nivel freático básico.

CONVENCIONES:

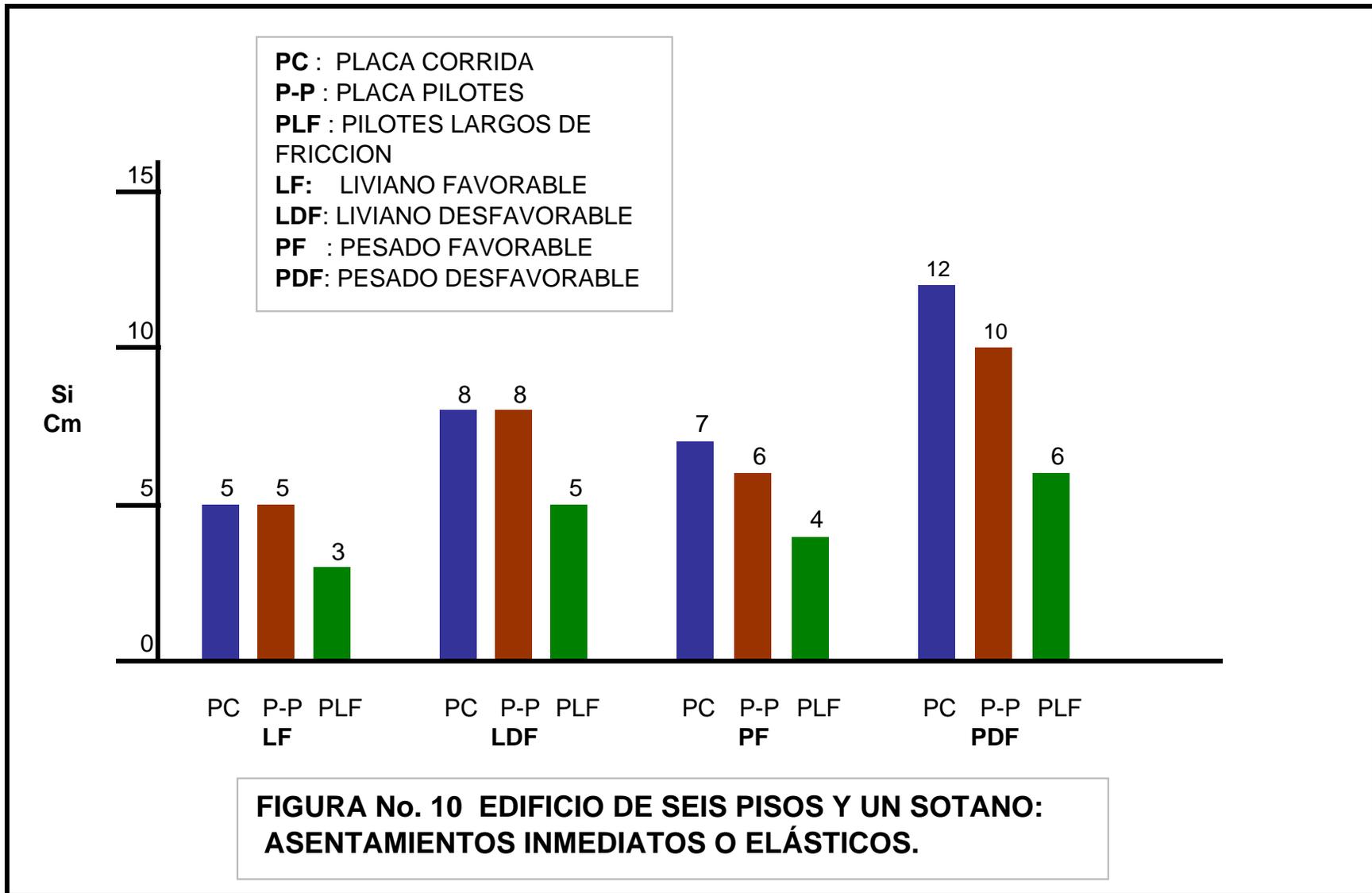
σ'_{vo}	Esfuerzo vertical efectivo
σ'_p	Esfuerzo de preconsolidación
σ'_{qp}	Esfuerzo de preconsolidación aparente
$>\Delta\sigma'_v$	Diferencia de esfuerzos verticales
N.F. bas.	Nivel freático reportado por el consultor.
N.F.	Nivel freático del caso evaluado.

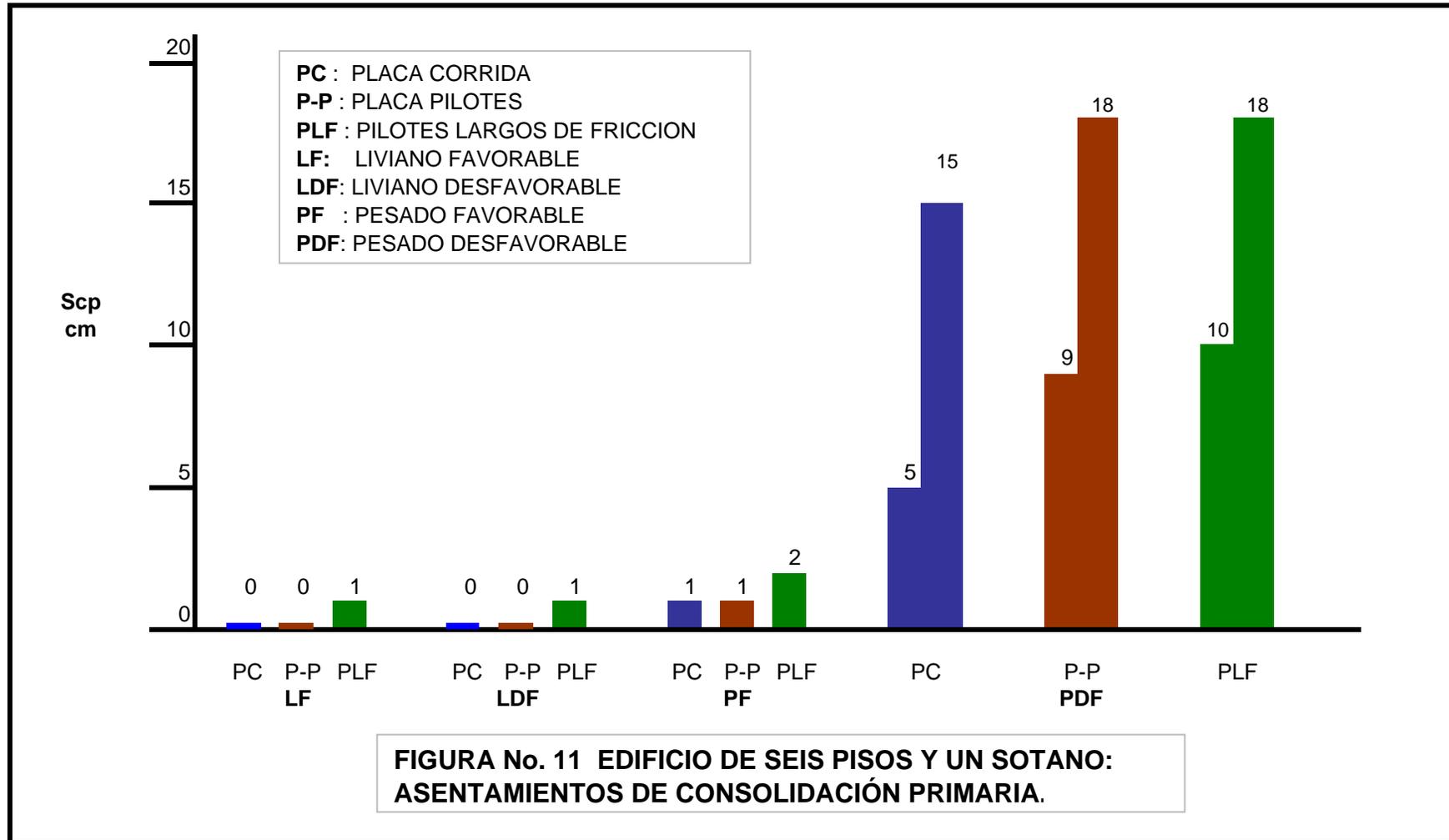
FIGURA No.7 VARIANTES CONSIDERADAS DEL PERFIL DE SOBRECONSOLIDACIÓN





**FIGURA No. 9 EDIFICIO DE SEIS PISOS Y UN SOTANO:
FACTORES DE SEGURIDAD PARA CIMENTACIONES DE
PLACA CORRIDA Y DE PLACA-PILOTES.**





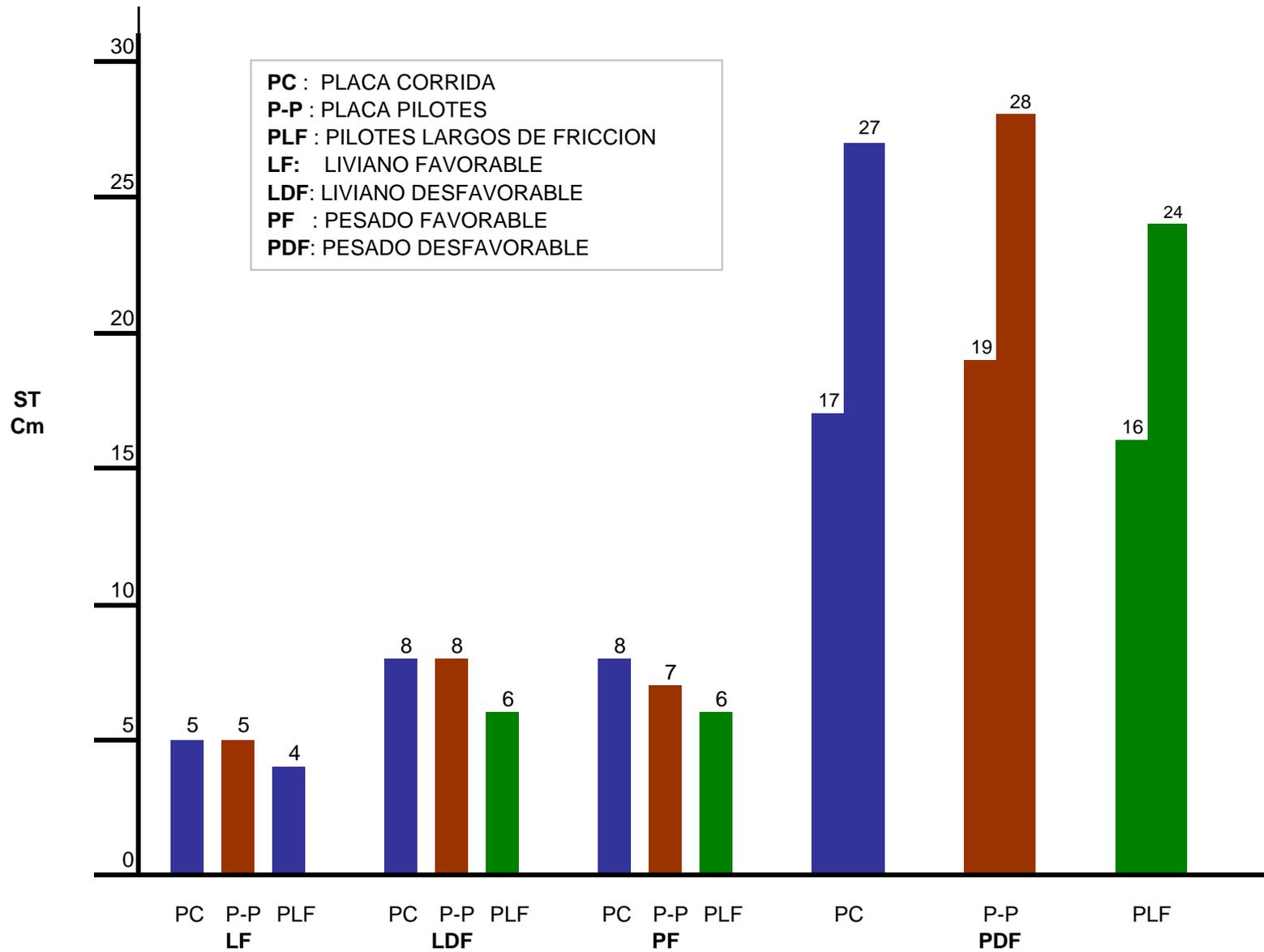
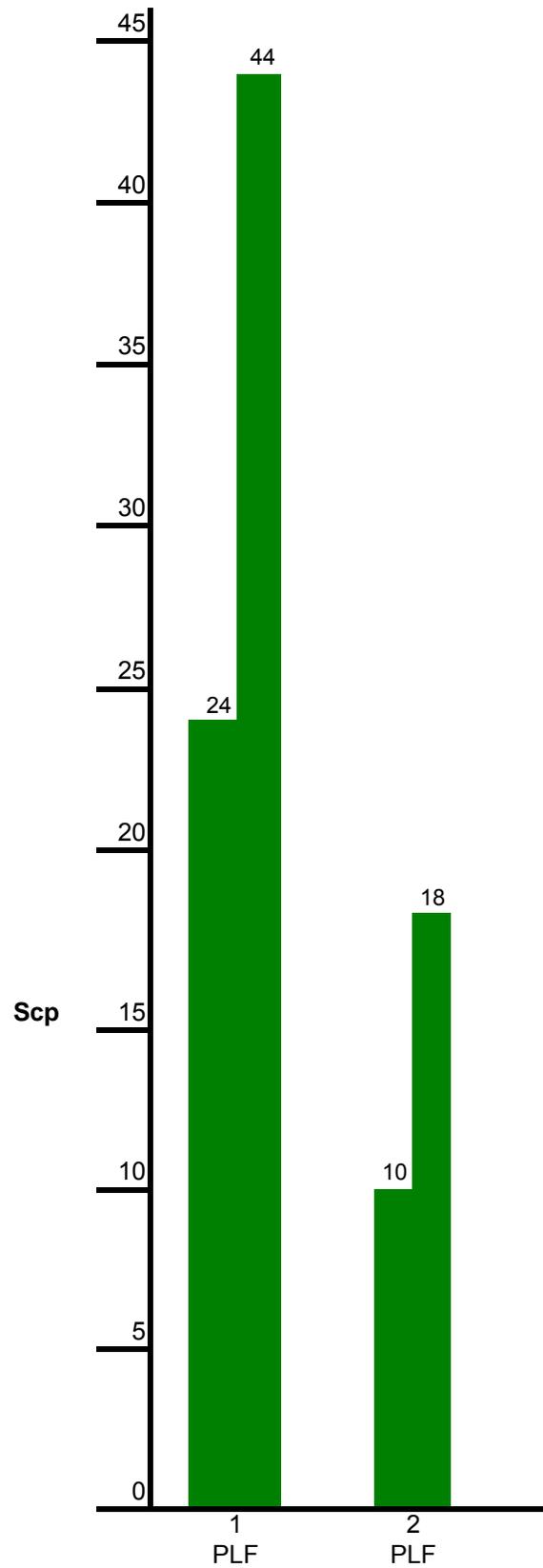
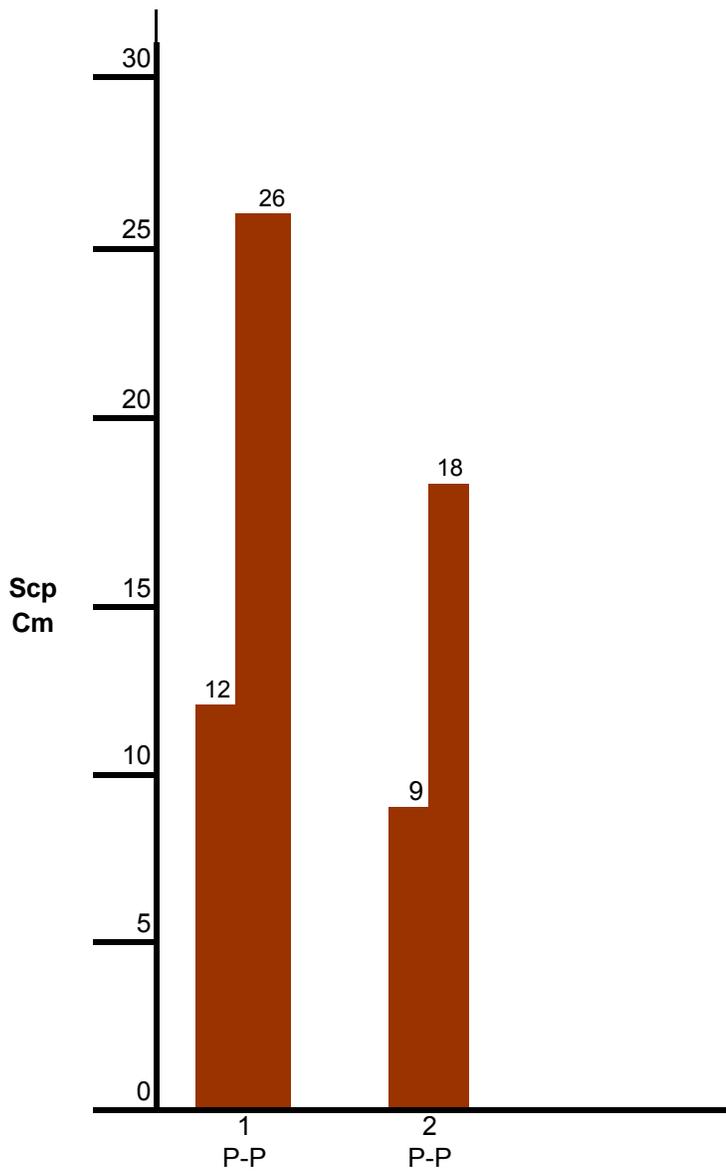
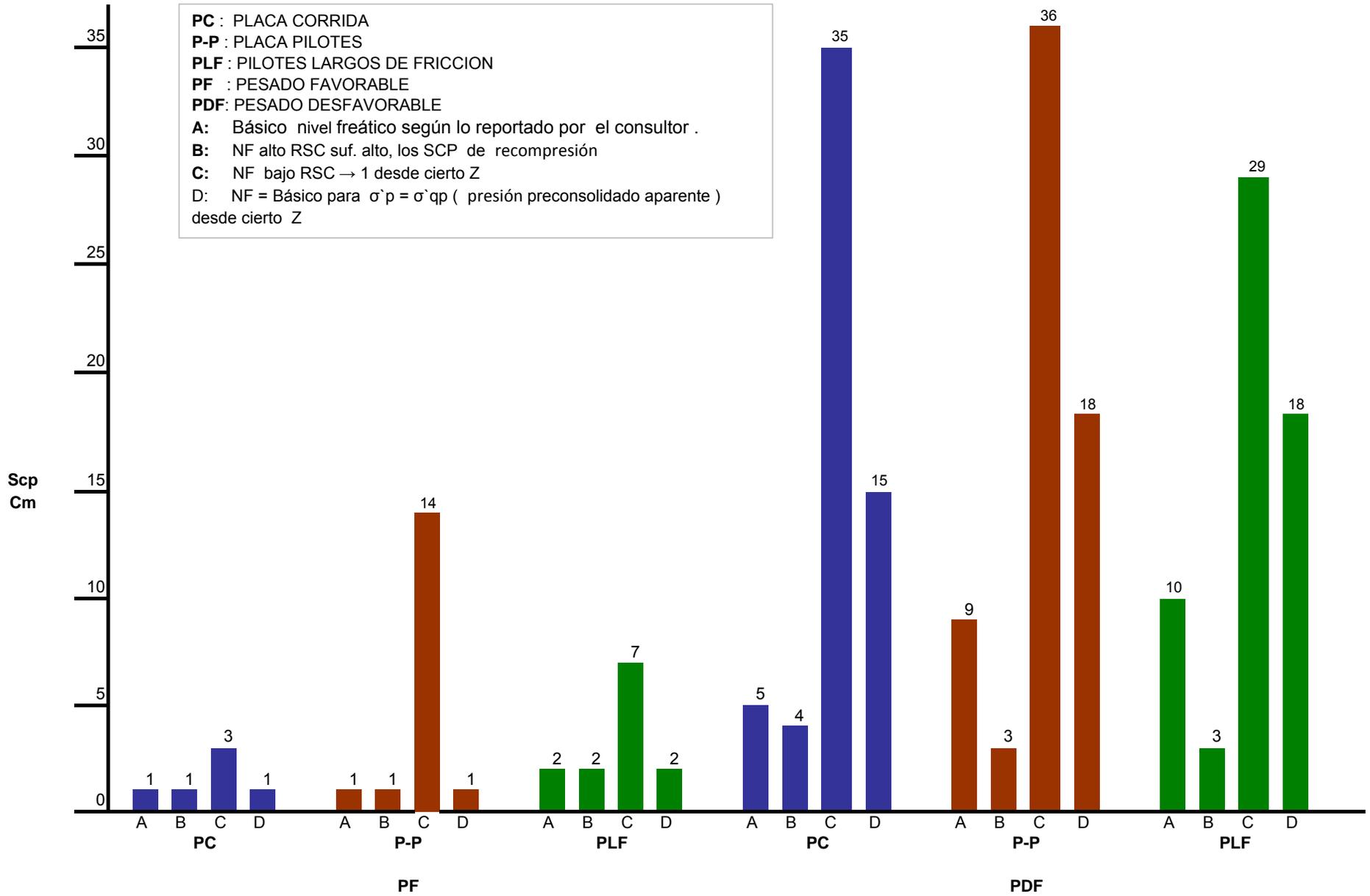


FIGURA No. 12 EDIFICIO DE SEIS PISOS Y UN SOTANO: ASENTAMIENTOS TOTALES

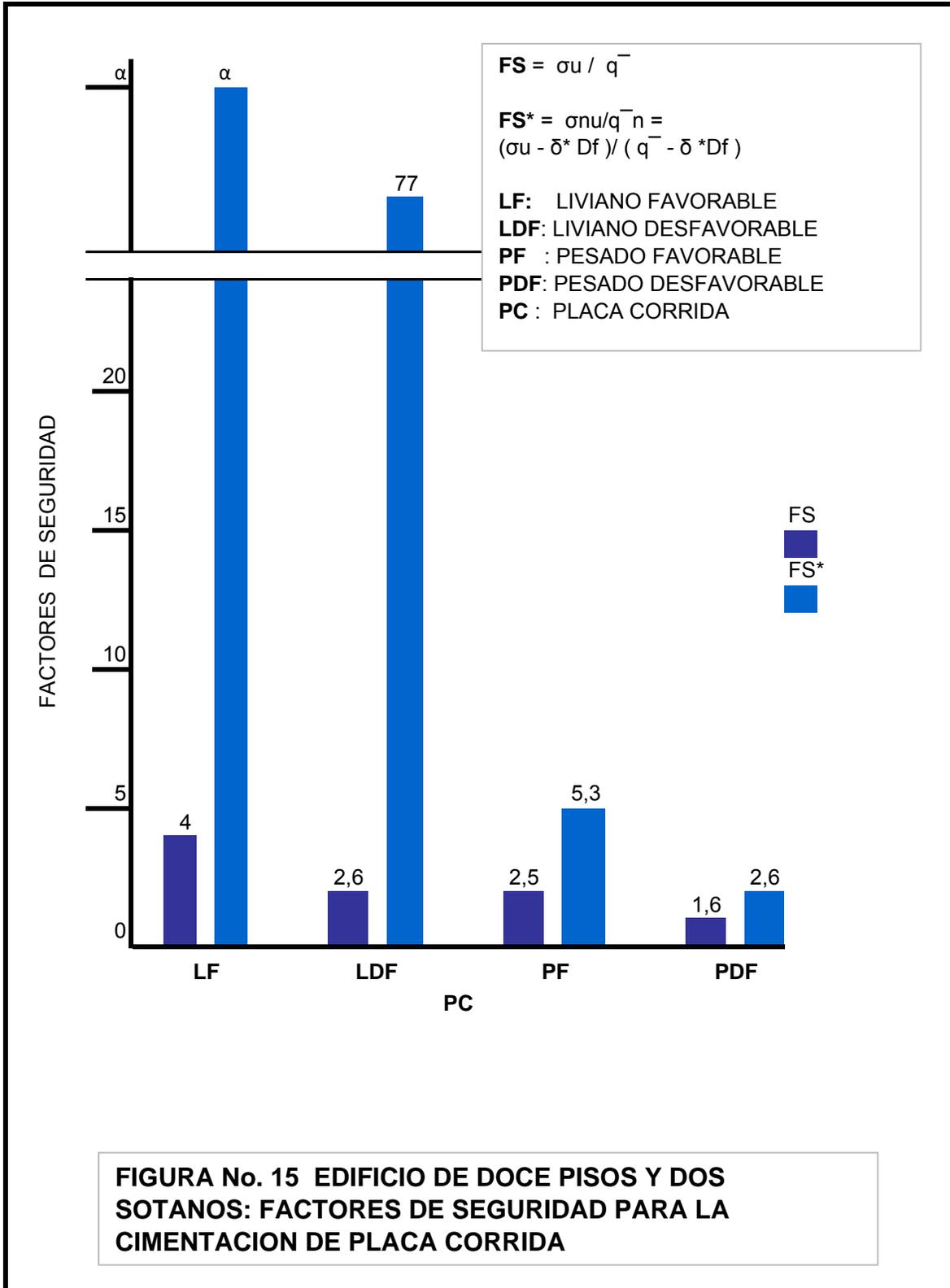
- 1. Método aproximado de disipación $\Delta\sigma' = 2V : 1 H$
- 2. Método León y Resendiz $\Delta\sigma' - Z$

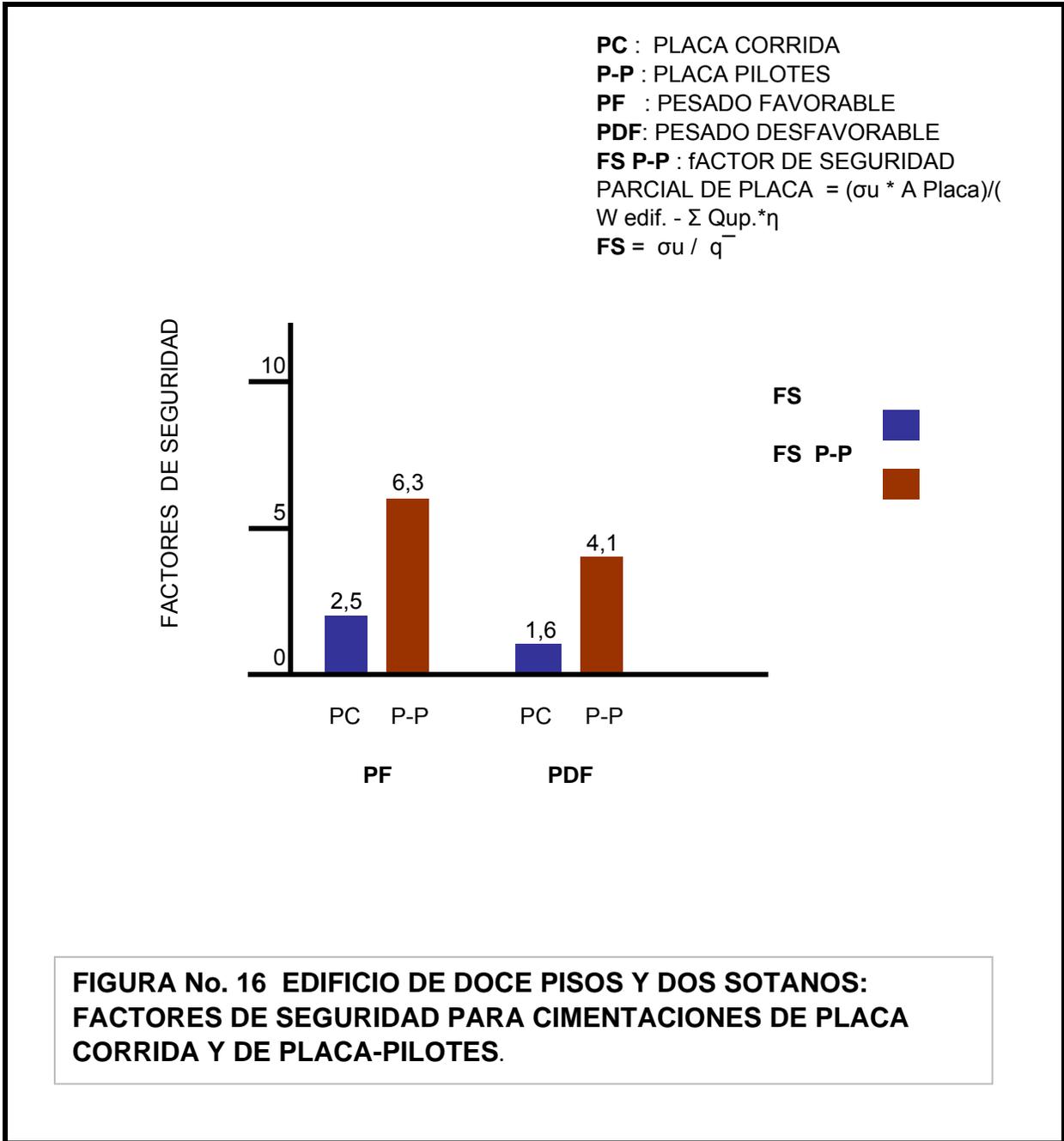


**FIGURA No. 13 EDIFICIO DE SEIS PISOS Y UN SOTANO:
ASENTAMIENTOS DE CONSOLIDACIÓN PRIMARIA SEGÚN EL MÉTODO DE ANÁLISIS.**

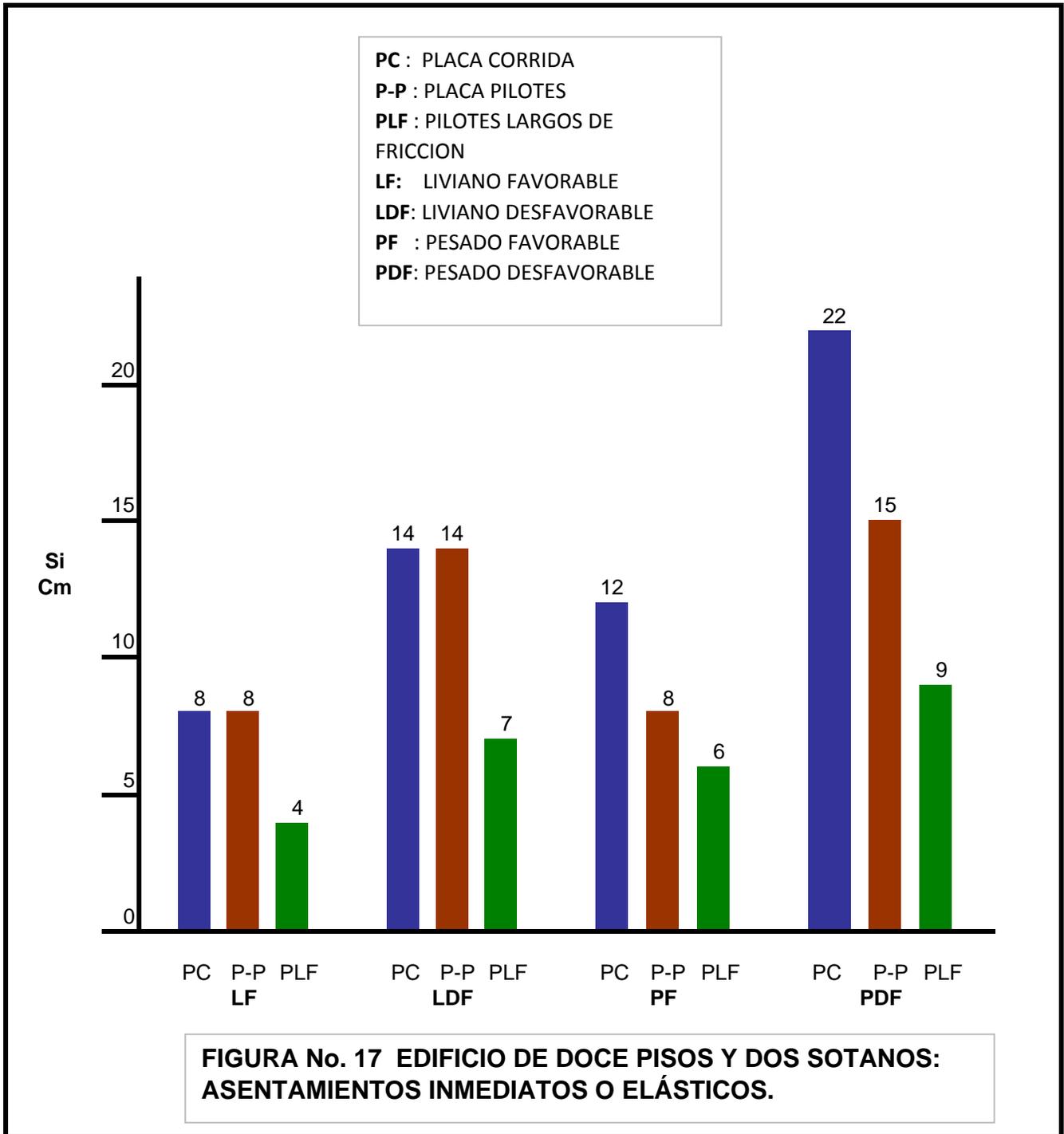


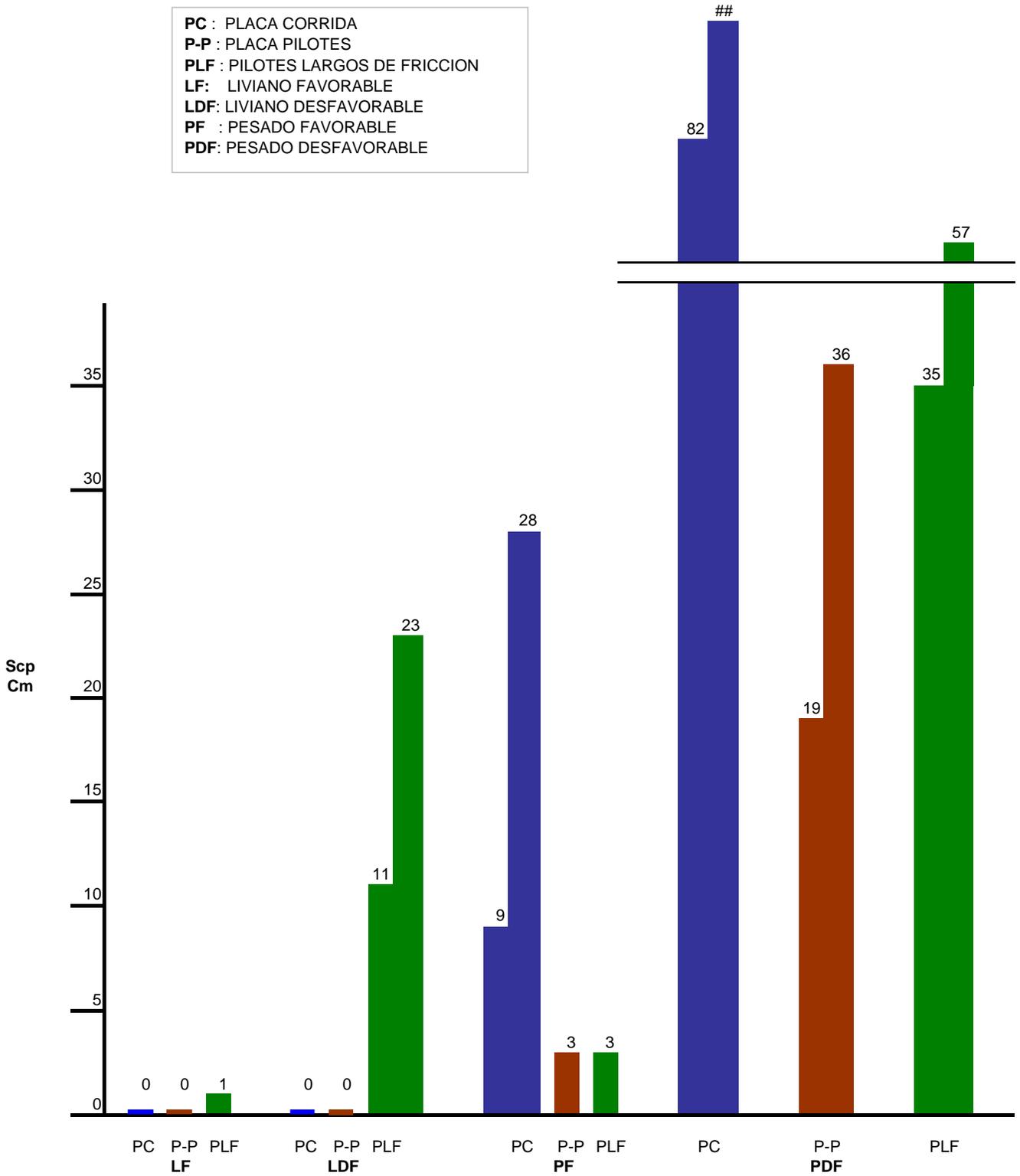
**FIGURA No. 14 EDIFICIO DE SEIS PISOS Y UN SOTANO:
 ASENTAMIENTOS DE CONSOLIDACIÓN PRIMARIA SEGÚN LAS VARIANTES CONSIDERADAS DEL PERFIL DE SOBRECONSOLIDACIÓN.**





**FIGURA No. 16 EDIFICIO DE DOCE PISOS Y DOS SOTANOS:
FACTORES DE SEGURIDAD PARA CIMENTACIONES DE PLACA
CORRIDA Y DE PLACA-PILOTES.**





**FIGURA No. 18 EDIFICIO DE DOCE PISOS Y DOS SOTANOS:
 ASENTAMIENTOS DE CONSOLIDACIÓN PRIMARIA.**

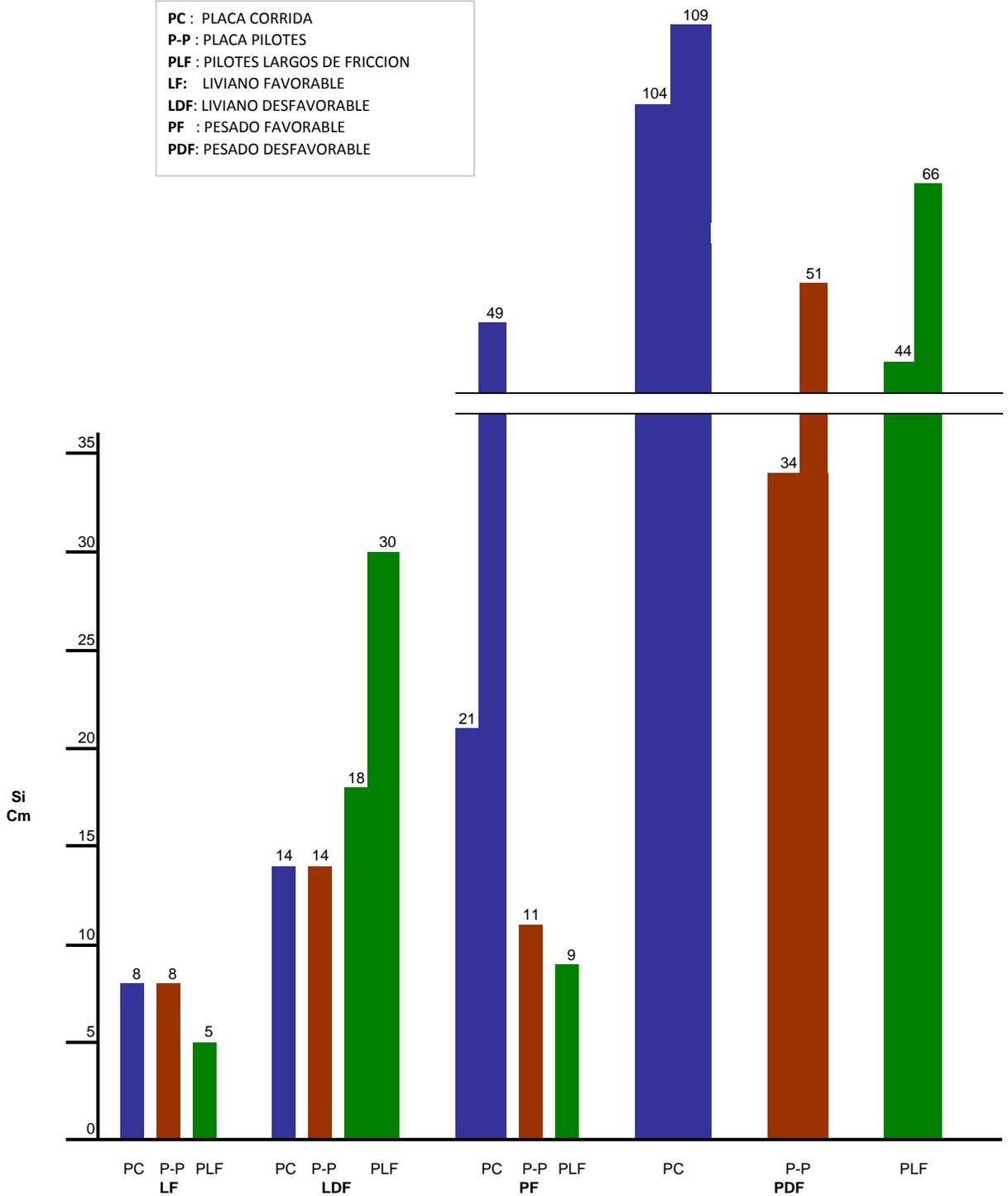


FIGURA No. 19 EDIFICIO DE DOCE PISOS Y DOS SOTANOS: ASENTAMIENTOS TOTALES

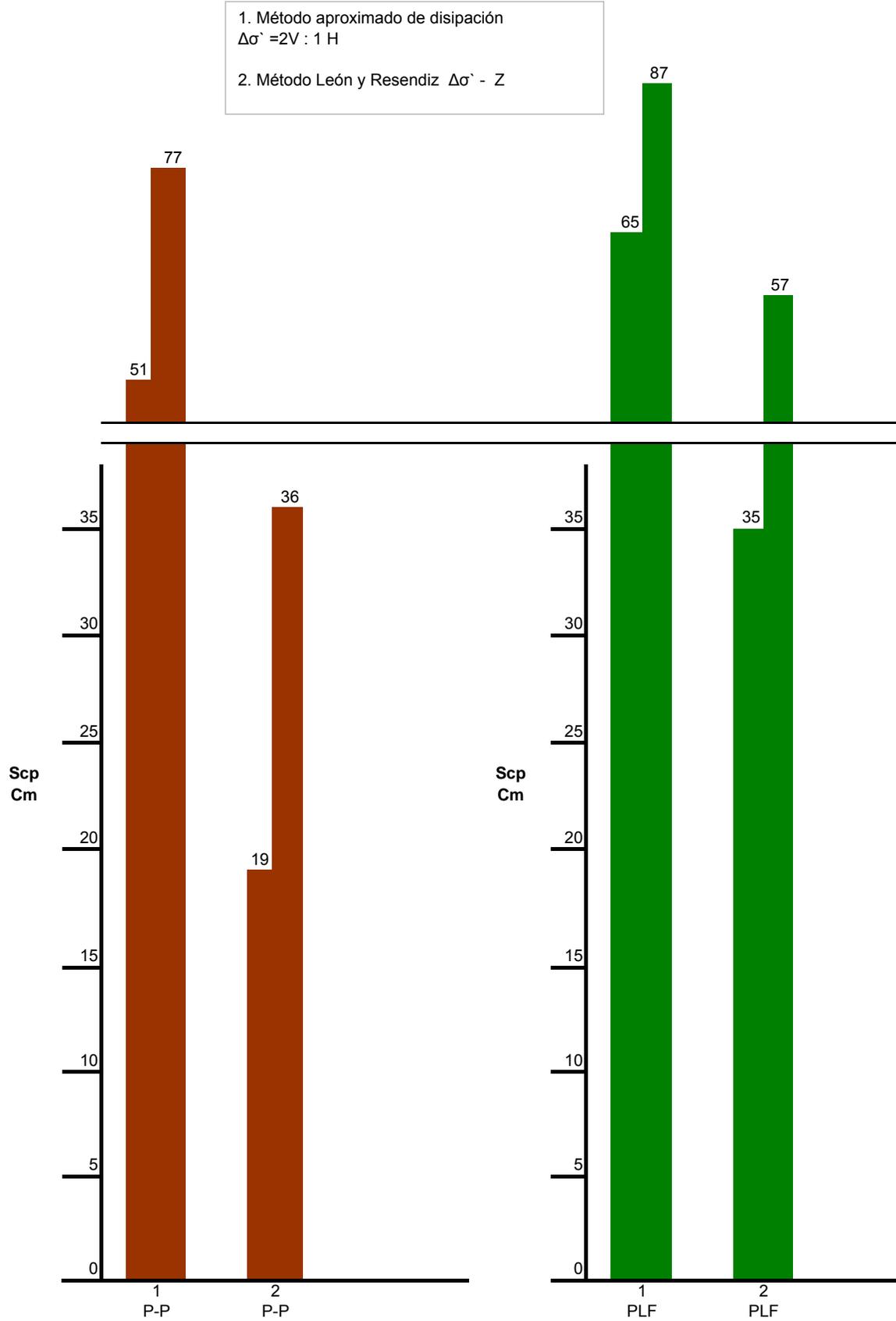
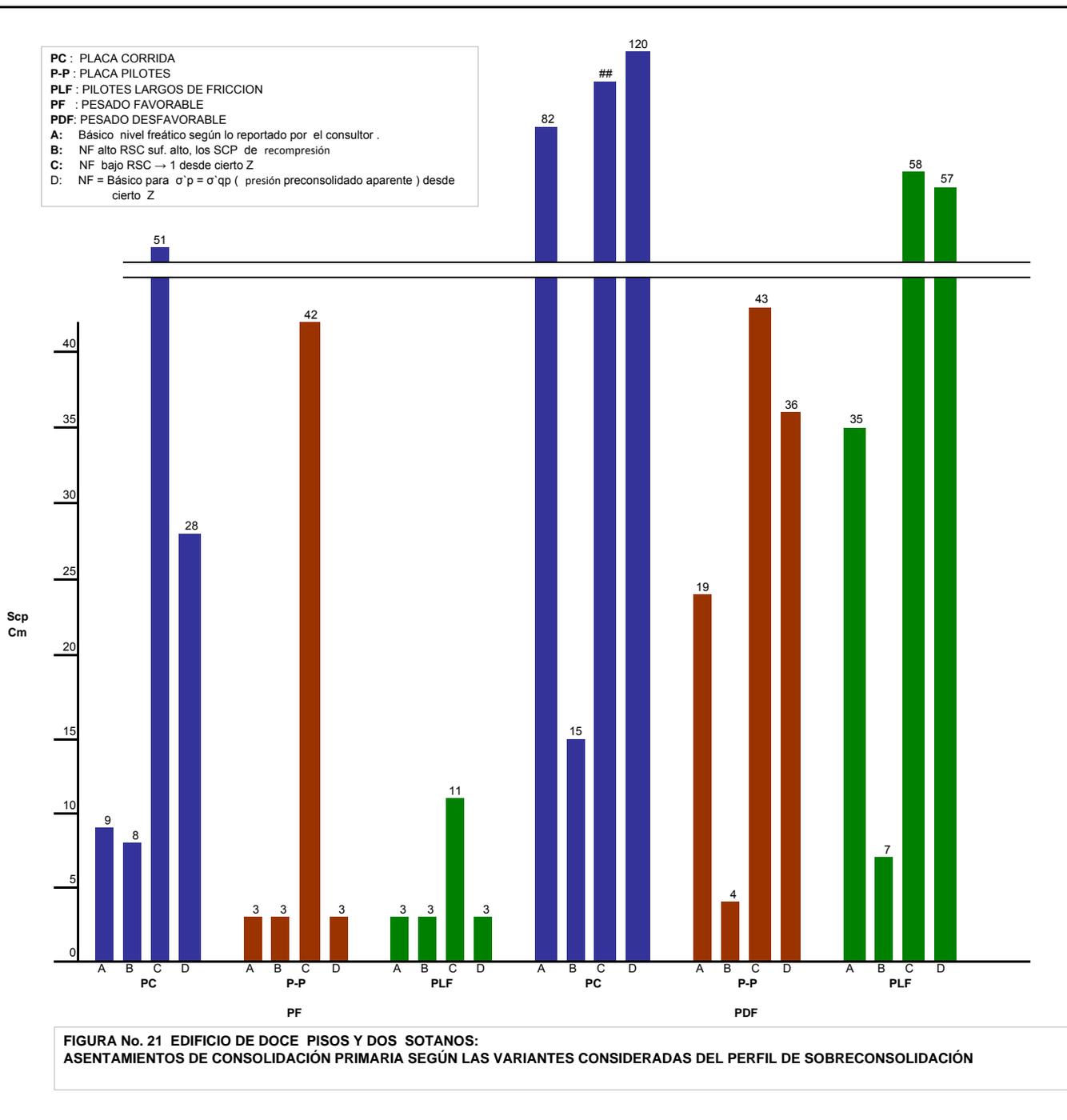


FIGURA No. 20 EDIFICIO DE DOCE PISOS Y DOS SOTANOS:
ASENTAMIENTOS DE CONSOLIDACIÓN PRIMARIA SEGÚN EL MÉTODO DE
ANÁLISIS.



TABLAS

				Nivel								Esfuerzo Transmitido
				Cubierta	Piso 6	Piso 5	Piso 4	Piso 3	Piso 2	Piso 1	S1/Cim.	
Carga Muerta* [t/m ²]	Estructura aporticada convencional en concreto	Vivienda	Entrepiso	0,36	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	1,00	6,55
			Muros, acabados, ..	0,05	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,10	
		Oficina	Entrepiso	0,36	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	1,00	6,25
			Muros, acabados, ..	0,05	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,10	
	Estructura muros portantes mampostería	Vivienda	Entrepiso	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	1,00	5,59
			Muros, acabados, ..	0,05	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,10	
		Oficina	Entrepiso	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	1,00	5,23
			Muros, acabados, ..	0,05	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,10	
	Estructura muros portantes de concreto	Vivienda	Entrepiso	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	1,00	5,59
			Muros, acabados, ..	0,05	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,10	
		Oficina	Entrepiso	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	1,00	5,47
			Muros, acabados, ..	0,05	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,10	
Estructura aporticada en perfiles metálicos	Vivienda	Entrepiso	0,20	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00	4,05	
		Muros, acabados, ..	0,05	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,10		
	Oficina	Entrepiso	0,20	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00	3,69	
		Muros, acabados, ..	0,05	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,10		
Carga viva** [t/m ²]	CTASR	Vivienda	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,25	1,51	
		Oficina	0,18	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,25	1,63	
	CNACR	Vivienda	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,16	0,14	0,18	1,38	
		Oficina	0,18	0,20	0,20	0,20	0,20	0,18	0,16	0,18	1,50	
	CAP	Vivienda	0,00	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,00	0,43	
		Oficina	0,00	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,48	

Nota: CTASR = CARGA TOTALACUMULADA SIN REDUCCIONES
CNACR = CARGA NORMAL ACUMULADA CON REDUCCIONES
CAP = CARGA ACUMULADA PERMANENTE

*La carga muerta incluye columnas, losa, muros y acabados.
**La carga viva (NSR-98) considera 180 kg/m² para vivienda, 200 kg/m² en oficinas y 250 kg/m² en parqueaderos.

Cuadro resumen cargas según estructura y uso		Combinaciones de Carga		
Tipo de estructura	Uso	CTAS R	CNACR [t/m ²]	CAP [t/m ²]
Estructura aporticada convencional en concreto reforzado	Vivienda	8,1	7,9	7,0
	Oficina	7,9	7,8	6,7
Estructura muros portantes mampostería estructural	Vivienda	7,1	7,0	6,0
	Oficina	6,9	6,7	5,7
Estructura muros portantes de concreto refrozado	Vivienda	7,1	7,0	5,9
	Oficina	7,2	7,1	6,0
Estructura aporticada en perfil metálico	Vivienda	5,6	5,4	4,5
	Oficina	5,3	5,2	4,2

Máximo ←

Mínimo ←

TABLA No. 1: CONDICIONES DE CARGAS TRANSMITIDAS AL SUELO DE FUNDACIÓN POR EL EDIFICIO DE 6 PISOS Y 1 SÓTANO

			Nivel						Esfuerzo Transmitido	
			Cubierta	Piso 12 a 9 (4 losas)	Piso 8 al 4 (5 losas)	Piso 3 al 1 (3 losas)	Sótano 1	S2/Cim.		
Carga Muerta* [t/m ²]	Estructura aportricada convencional en concreto	Vivienda	Entrepiso	0,36	1,64	2,05	1,23	0,41	1,50	12,93
			Muros, acabados, ...	0,05	1,72	2,15	1,29	0,43	0,10	
		Oficina	Entrepiso	0,36	1,64	2,05	1,23	0,41	1,50	12,28
			Muros, acabados, ...	0,05	1,52	1,90	1,14	0,38	0,10	
	Estructura muros portantes mampostería	Vivienda	No aplica por la						0,00	
		Oficina	altura (> 8 pisos)						0,00	
	Estructura muros portantes de concreto	Vivienda	Entrepiso	0,24	0,96	1,20	0,72	0,24	1,50	10,99
			Muros, acabados, ...	0,05	1,84	2,30	1,38	0,46	0,10	
		Oficina	Entrepiso	0,24	0,96	1,20	0,72	0,24	1,50	10,73
			Muros, acabados, ...	0,05	1,76	2,20	1,32	0,44	0,10	
Estructura aportricada en perfiles metálicos	Vivienda	Entrepiso	0,20	1,00	1,25	0,75	0,25	1,50	7,70	
		Muros, acabados, ...	0,05	0,80	1,00	0,60	0,20	0,10		
	Oficina	Entrepiso	0,25	1,04	1,30	0,78	0,26	1,50	7,10	
		Muros, acabados, ...	0,05	0,56	0,70	0,42	0,14	0,10		
Carga viva** [t/m ²]	CTASR	Vivienda	0,18	0,72	0,90	0,54	0,25	0,25	2,84	
		Oficina	0,18	0,80	1,00	0,60	0,25	0,25	3,08	
	CNACR	Vivienda	0,18	0,72	0,63	0,27	0,13	0,13	2,05	
		Oficina	0,18	0,80	0,70	0,30	0,13	0,13	2,23	
	CAP	Vivienda	0,00	0,29	0,36	0,22	0,00	0,00	0,86	
		Oficina	0,00	0,32	0,40	0,24	0,00	0,00	0,96	

Nota: CTASR = CARGA TOTAL ACUMULADA SIN REDUCCIONES
CNACR = CARGA NORMAL ACUMULADA CON REDUCCIONES
CAP = CARGA ACUMULADA PERMANENTE

*La carga muerta incluye columnas, losa, muros y acabados.
**La carga viva (NSR-98) considera 180 kg/m² para vivienda,
200 kg/m² en oficinas y 250 kg/m² en parqueaderos.

Cuadro resumen cargas según estructura y uso		Combinaciones de Carga		
Tipo de estructura	Uso	CTASR	CNACR	CAP
		[t/m ²]	[t/m ²]	[t/m ²]
Estructura aportricada convencional en concreto reforzado	Vivienda	15,8	15,0	13,8
	Oficina	15,4	14,5	13,2
Estructura muros portantes mampostería estructural	Vivienda	No aplica		
	Oficina	No aplica		
Estructura muros portantes de concreto refrozado	Vivienda	13,8	13,0	11,6
	Oficina	14,1	13,8	11,7
Estructura aportricada en perfil metálico	Vivienda	10,5	9,8	8,6
	Oficina	10,2	9,3	8,10

Máximo ←

Mínimo ←

**TABLA No. 2: CONDICIONES DE CARGAS TRANSMITIDAS AL SUELO DE FUNDACIÓN
POR EL EDIFICIO DE 12 PISOS Y 2 SÓTANOS**

SITIO	LUGAR	DIRECCIÓN
1	PUENTE DE TERCER NIVEL	INTERSECCIÓN AUTOPISTA NORTE POR CALLE 92
2	CONJUNTO RESIDENCIAL RAFAEL NUÑEZ	TRANSVERSAL 39 ENTRE CALLES 53 Y DIAGONAL 40
3	CANAL RÍO EL CEDRO	CALLE 170 POR CARRERA 31
4	CANAL RÍO SALITRE	CALLE 80 POR CARRERA 66
5	EDIFICIO PARQUE DE LA COLINA III	CARRERA 53 A POR CALLE 135
6	EDIFICIO PARQUE DE LA EMILIA	CARRERA 25 A POR CALLE 152
7	EDIFICIO ATOCHA DEL LAGO	CARRERA 14 POR CALLE 80
8	HOTEL SUITES COSMOS 100	CALLE 100 POR TRANSVERSAL 21
9	EDIFICIO EN BARRIO CHICÓ	CARRERA 13 No. 93 - 11
10	EDIFICIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA UNIVERSIDAD NACIONEL DE COLOMBIA	AVENIDA 30 POR CALLE 45

TABLA No. 3: SITIOS ESTUDIADOS

PERFIL DEL SUELO Edificio de Ciencia y Tecnología Univeridad Nacional (Bogotá)

z	USC	w _n	LL	LP	IP	γ _t	s _u	σ' vo	σ' p	RSC	e _o	C _c	C _r
[m]		[%]	[%]	[%]	[%]	[t/m ³]	[t/m ²]	[t/m ²]	[t/m ²]				
0	CL	25	40	22	18	1,6		0,0	21,5	7,0			
5	CH	70	110	51	59	1,6	3,5	6,5	15,6	2,4	1,5	1,1	0,08
10	CH	118	82	35	47	1,4	3,9	9,2	12,1	1,3	2,5	1,8	0,14
15	CH	100	120	49	71	1,4	4,2	10,7	13,9	1,3	3,0	2,2	0,17
20	MH-OH	98	195	165	30	1,4	4,6	13,2	15,7	1,2	3,4	2,3	0,18
25	MH	150	145	105	40	1,4	5,0	14,1	17,2	1,2	3,6	2,1	0,18
30	CH	90	95	37	58	1,6	5,3	16,8	20,4	1,2	2,4	1,4	0,16
35	CL-ML	30	27	20	7	1,9	5,7	21,4	25,3	1,2	1,6	1,0	0,09
40	MH	50	85	45	40	1,8	6,1	25,6	30,2	1,2	1,3	1,1	0,06
45	CH	80	150	39	111	1,5	6,5	28,2	34,0	1,2	1,3	1,3	0,07
50	MH	100	125	53	72	1,4	6,8	30,2	36,1	1,2	1,6	1,8	0,08
55	CH	90	103	42	61	1,5	7,1	33,0	38,0	1,2	2,2	2,2	0,09
60	CH	70	80	31	49	1,6	7,5	35,0	39,5	1,1	2,4	2,6	0,10

N.F.básico: D_w = 2,5 m como fue reportado por el respectivo consultor

TABLA No.4: CARACTERÍSTICAS DEL SUBSUELO PARA EL SITIO CONSIDERADO MÁS FAVORABLE

PERFIL DEL SUELO Autopista Norte x calle 92 (Bogotá)

z	USC	w _n	LL	LP	IP	γ _t	s _u	σ'vo	σ'p	RSC	e _o	C _c	C _r
[m]		[%]	[%]	[%]	[%]	[t/m ³]	[t/m ²]	[t/m ²]	[t/m ²]				
0						1,5	4,5	0	19,5	4,0			
5	CH	108	214	66	148	1,4	2,7	5,6	11,2	2,0	2,8	1,6	0,23
10	CH	140	195	55	140	1,35	2,2	7	9,9	1,4	3	1,8	0,14
15	CH	90	120	35	85	1,39	2,1	8,3	10,7	1,3	2,6	1,6	0,14
20	CH	122	160	51	109	1,33	2,3	9,9	11,7	1,2	3,2	1,8	0,14
25	CH	105	142	46	96	1,38	2,6	11,3	12,7	1,1	3	1,8	0,14
30	CH	94	130	42	88	1,42	2,9	12,9	13,7	1,1	2,4	1,8	0,17
35	MH	46	75	35	40	1,38	3,1	14,4	15	1,0	2,8	1,9	0,18
40	CH	125	195	55	140	1,34	3,5	15,8	16,4	1,0	2,6	2,5	0,19
45	CH	116	167	48	119	1,36	3,8	17,4	18	1,0	3,2	2,4	0,2
50	MH	95	138	45	93	1,44	4,1	18,9	19,9	1,1	2,7	2	0,19
55	CH	80	115	44	71	1,51	4,6	20,9	21,8	1,0	2,1	1,4	0,18
60	MH	63	67	22	45	1,58	5,1	23	23,9	1,0	1,8	1	0,16

N.F.básico: D_w = 3,0 m como fue reportado por el respectivo consultor

TABLA No.5: CARACTERÍSTICAS DEL SUBSUELO PARA EL SITIO CONSIDERADO MÁS DESFAVORABLE

Caso	Altura de la edificación	Tipo de estructura	Tipo de suelo	Tipo de Cimentación
1	6 pisos y 1 sótano	Liviano, L	Favorable, F	Placa Corrida
2				Placa-Pilotes
3				Pilotes Largos de fricción
4			Desfavorable, DF	Placa Corrida
5				Placa-Pilotes
6				Pilotes Largos de fricción
7		Pesado, P	Favorable, F	Placa Corrida
8				Placa-Pilotes
9				Pilotes Largos de fricción
10			Desfavorable, DF	Placa Corrida
11				Placa-Pilotes
11*				Placa-Pilotes
12	Pilotes Largos de fricción			
12*	Pilotes Largos de fricción			
13	12 pisos y 2 sótanos	Liviano, L	Favorable, F	Placa Corrida
14				Placa-Pilotes
15				Pilotes Largos de fricción
16			Desfavorable, DF	Placa Corrida
17				Placa-Pilotes
18				Pilotes Largos de fricción
19		Pesado, P	Favorable, F	Placa Corrida
20				Placa-Pilotes
21				Pilotes Largos de fricción
22			Desfavorable, DF	Placa Corrida
23				Placa-Pilotes
23*				Placa-Pilotes
24	Pilotes Largos de fricción			
24*	Pilotes Largos de fricción			

Convención:

L o P= Edificio liviano o pesado

F o DF= Perfil de suelo favorable o desfavorable

* = Análisis adelantado con la metodología numérica de León & Reséndiz (1979)

Todos los casos incluyen además el análisis con las variantes de sobreconsolidación indicadas en la figura No.7.

TABLA No. 6: CASOS ESTUDIADOS: COMBINACIÓN DE VARIABLES

H	Clasificación de Peso W	q ₂	q ₃	Suelo	γD _f	%C/q ₂	% C/q ₃
Pisos		[t/m ²]	[t/m ²]		[t/m ²]	[%]	[%]
6	L	5,2	4,2	F	6,4	123	152
6	L	5,2	4,2	DF	5,6	108	133
6	P	7,9	7,0	F	6,4	81	91
6	P	7,9	7,0	DF	5,6	71	80
12	L	9,3	8,1	F	9,8	105	121
12	L	9,3	8,1	DF	9,1	98	112
12	P	15,0	13,8	F	9,8	65	71
12	P	15,0	13,8	DF	9,1	61	66

Convención:

- L o P= Edificio liviano o pesado
- F o DF= Perfil de suelo favorable o desfavorable
- q₂ = Carga normal acumulada con reducciones CNACR
- q₃ = Carga permanente acumulada CAP
- %C/q₂= Porcentaje de compensación ante carga normal
- %C/q₃= Porcentaje de compensación ante carga permanente

TABLA No. 7: GRADOS DE COMPENSACIÓN

CASO No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	11* (L&R)	12	12* (L&R)
Peso Edificio		Liviano						Pesado							
Subsuelo		Favorable			Desfavorable			Favorable			Desfavorable				
Cimentación		Placa Corrida	Placa-Pilotes	Pilotes Largos de Fricción	Placa Corrida	Placa-Pilotes	Pilotes Largos de Fricción	Placa Corrida	Placa-Pilotes	Pilotes Largos de Fricción	Placa Corrida	Placa-Pilotes	Placa-Pilotes	Pilotes Largos de Fricción	Pilotes Largos de Fricción
FS		6,1	6,1	3,1	3,9	3,9	3,1	4,0	6,0	3,1	2,6	5,0	5,0	3,0	3,0
FS*		∞			∞			16,9			6,4				
Si, cm		5	5	3	8	8	5	7	6	4	12	10	10	6	6
S _{cp} , cm	RSC básica	0	0	1	0	0	1	1	1	2	5	12	9	24	10
	RSC + alta	0	0	1	0	0	1	1	1	2	4	3	3	5	3
	RSC + baja	0	0	1	0	0	9	3	14	7	35	37	36	48	29
	Fenóm. σ _{qp}	0	0	1	0	0	1	1	1	2	15	26	18	44	18
S _t , cm	RSC Básica	5	5	4	8	8	6	8	7	6	17	22	19	30	16
	RSC + alta	5	5	4	8	8	6	8	7	6	16	13	13	11	9
	RSC + baja	5	5	4	8	8	14	10	20	11	47	47	46	54	35
	Fenóm. σ _{qp}	5	5	4	8	8	6	8	7	6	27	36	28	50	24
PILOTES	B _p , m	0	0,30	0,40	0	0,30	0,40	0	0,30	0,40	0	0,30	0,30	0,40	0,40
	L _p , m	0	20	30	0	20	30	0	20	30	0	20	20	30	30
	Q _{ui} , t.	0	101	208	0	60	129	0	101	208	0	60	60	129	129
	Cantidad	0	0	55	0	0	91	0	18	84	0	45	45	153	153

Convenciones:

FS= Factor de Seguridad convencional por capacidad portante con base en presiones totales (σ_v/q).

FS*= Factor de Seguridad definido en términos de presiones netas (σ_v-γD_v)/(q_v-γD_v).

S_v= asentamiento inmediato o elástico

S_{cp}= asentamiento de consolidación primaria

S_t= asentamiento total (S_v+S_{cp})

* (L&R)= Analizado por la metodología numérica León y Reséndiz (1979)

TABLA No.8: RESULTADOS PARA EL EDIFICIO DE SEIS PISOS Y UN SÓTANO

CASO No.		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	23* (L&R)	24	24* (L&R)
Peso Edificio		Liviano						Pesado							
Suelo		Favorable			Desfavorable			Favorable			Desfavorable				
Cimentación		Placa Corrida	Placa- Pilotes	Pilotes Largos de Fricción	Placa Corrida	Placa- Pilotes	Pilotes Largos de Fricción	Placa Corrida	Placa- Pilotes	Pilotes Largos de Fricción	Placa Corrida	Placa- Pilotes	Placa- Pilotes	Pilotes Largos de Fricción	Pilotes Largos de Fricción
FS		4,0	4,0	3,2	2,6	2,6	3,0	2,5	6,3	3,0	1,6	4,1	4,1	3,0	3,0
FS*		∞			77,0			5,3			2,6				
S _i , cm		8	8	4	14	14	7	12	8	6	22	15	15	9	9
S _{cp} , cm	RSC básica	0	0	1	0	0	11	9	3	3	82	51	19	65	35
	RSC + alta	0	0	1	0	0	3	8	3	3	15	7	4	14	7
	RSC + baja	0	0	1	0	0	25	51	42	11	120	76	43	90	58
	Fenóm. σ_{qp}	0	0	1	0	0	23	28	3	3	118	77	36	87	57
S _t , cm	RSC Básica	8	8	5	14	14	18	21	11	9	104	66	34	74	44
	RSC + alta	8	8	5	14	14	10	20	11	9	37	22	19	23	16
	RSC + baja	8	8	5	14	14	32	63	50	17	142	91	58	99	67
	Fenóm. σ_{qp}	8	8	5	14	14	30	49	11	9	140	92	51	96	66
PILOTES	B _p , m	0	0,30	0,40	0	0,30	0,40	0	0,30	0,40	0	0,30	0,30	0,40	0,40
	L _p , m	0	30	40	0	30	40	0	30	40	0	30	30	40	40
	Q _{ui} , t.	0	158	289	0	96	185	0	158	289	0	96	96	185	185
	Cantidad	0	0	72	0	0	120	0	40	126	0	66	66	220	220

Convenciones:

FS= Factor de Seguridad convencional por capacidad portante con base en presiones totales (σ_v/q).

FS*= Factor de Seguridad definido en términos de presiones netas ($(\sigma_v - \gamma D_v) / (q_u - \gamma D_u)$).

S_i= asentamiento inmediato o elástico

S_{cp}= asentamiento de consolidación primaria

S_t= asentamiento total (S_i+S_{cp})

* (L&R)= Analizado por la metodología numérica León y Reséndiz (1979)

TABLA No.9: RESULTADOS PARA EL EDIFICIO DE DOCE PISOS Y DOS SÓTANOS