

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA
"JULIO GARAVITO"**

III ENCUENTRO NACIONAL DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS
Bogotá D.C., 4 a 6 septiembre de 2003

**OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CIMENTACION
PLACA – PILOTES EN EL DEPOSITO LACUSTRE DE BOGOTÁ**

JORGE ENRIQUE DURÁN G.
Ingeniero Civil, M.Sc.
Profesor e Investigador del Área de Geotecnia,
Escuela Colombiana de Ingeniería

RESUMEN

Este trabajo presenta, a través de un caso histórico, la metodología de análisis y el proceso de optimización de una solución de cimentación placa-pilotes en un perfil de suelos blandos del depósito lacustre de Bogotá. Se discuten los criterios usualmente empleados para estimar la cantidad apropiada de pilotes que complementen el trabajo de la placa. Se describen los criterios y la metodología empleados en el estudio de la interacción placa – pilotes – suelo para encontrar racionalmente, por aproximaciones sucesivas, la capacidad utilizada de los pilotes, la repartición de la carga del edificio entre la placa y los pilotes, el factor de seguridad de la cimentación, y los asentamientos resultantes que, a su vez, expliquen y sean compatibles con las transferencias de carga encontradas, tanto para el corto como para el largo plazo.

Los varios esquemas analizados de placa – pilotes se comparan entre sí y con las alternativas de cimentación de losa corrida y de cimentación profunda con pilotes largos de fricción, discutiendo las ventajas relativas correspondientes para llegar, en el caso particular estudiado, a seleccionar la longitud adecuada de los pilotes y el porcentaje más conveniente de la carga no compensada del edificio tomado por los pilotes, con el fin de lograr los resultados más satisfactorios. Finalmente, se presenta la modelación simplificada de las cargas y reacciones en la cimentación placa – pilotes para su diseño estructural.

1 INTRODUCCIÓN

El presente artículo técnico muestra la metodología y los resultados del análisis de una solución de cimentación del tipo placa – pilotes para un edificio apoyado en el grueso depósito lacustre de la zona norte de la ciudad de Bogotá, comparando diferentes esquemas de este tipo de solución y contrastándolo con soluciones de cimentación directa superficial o profunda con pilotes largos de fricción.

En este trabajo se describen las características de los edificios involucrados y las del suelo, enfatizando las condiciones particularmente desfavorables del depósito lacustre en el sitio, y los factores y las circunstancias particulares que incidieron marcadamente en el proceso de comparación de alternativas y de selección de la solución adoptada.

Se presentan los criterios empleados en el planteamiento de las diferentes alternativas estudiadas de sistemas placa – pilotes, se discuten los resultados de la interacción suelo – placa – pilotes en cada caso y se comentan las ventajas y desventajas relativas de todas las soluciones analizadas.

Se presentan en forma simplificada los esquemas de cargas y reacciones tenidas en cuenta para el cálculo estructural de la solución adoptada de cimentación.

También se presentan los resultados de los asentamientos observados durante el año de construcción y durante los once años siguientes, verificando las hipótesis de análisis y confirmando las ventajas de la solución.

Finalmente, se presentan conclusiones generales y particulares sobre los mecanismos de interacción suelo – placa – pilotes y sobre los diferentes esquemas planteados y estudiados y se formulan recomendaciones para avanzar en el entendimiento del funcionamiento de soluciones de cimentación placa – pilotes y en la optimización de su aplicación.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto en consideración corresponde al diseño y construcción de las Etapas I y II del Hotel Cosmos 100, situado en el costado sur de la calle 100 con transversal 21, al norte de la ciudad de Bogotá.

En 1981 se construyó la Etapa I (la oriental) del Hotel Cosmos 100, consistente en una torre cilíndrica de diez pisos, un sótano de garajes y una zona periférica liviana de un piso en su costado sur. Como se describe detalladamente más adelante, la torre cilíndrica o Etapa I se cimentó sobre una losa corrida bajo la totalidad del área de proyección del sótano y el edificio entró en operación a mediados de 1982, hace ya veintiún años.

En 1989 la firma Inversiones Libra Ltda, propietaria del Hotel Cosmos 100, contrató al ingeniero consultor Jorge Enrique Durán para desarrollar el estudio de suelos y formular las recomendaciones para el diseño y la construcción de la cimentación de la Etapa II del hotel, consistente en una torre de forma rectángulo – trapezoidal de diez pisos y un sótano, así como de algunas áreas menores perimetrales de uno a dos pisos y sótano. La nueva torre se desarrollaría en el lote contiguo hacia el occidente de la primera.

El compromiso del consultor incluía el análisis detallado de la historia de asentamientos experimentados por la torre cilíndrica hasta ese momento y el pronóstico de la continuación de su desarrollo con el tiempo, así como el planteamiento y análisis de soluciones de cimentación para la nueva torre, y la selección y optimización de la solución que permitiera garantizar un comportamiento ampliamente satisfactorio no sólo de la torre II sino también de los pasillos de comunicación entre las dos torres, teniendo en consideración criterios de estabilidad global, seguridad, movimientos totales y diferenciales, funcionalidad, costos y aspectos constructivos.

En síntesis, el reto consistía en que la nueva torre tuviera una cimentación que experimentara asentamientos en el tiempo muy similares a los que se pronosticaban para la primera torre desde el momento en que efectivamente se “conectarán” los dos edificios, a mediados de 1992, diez años después de puesta en operación la Etapa I.

En las Figuras 1 y 2 se presentan la planta general y una vista tridimensional de los dos edificios. En las Fotografías 1, 2 y 3 se muestran los dos edificios en agosto de 2003.

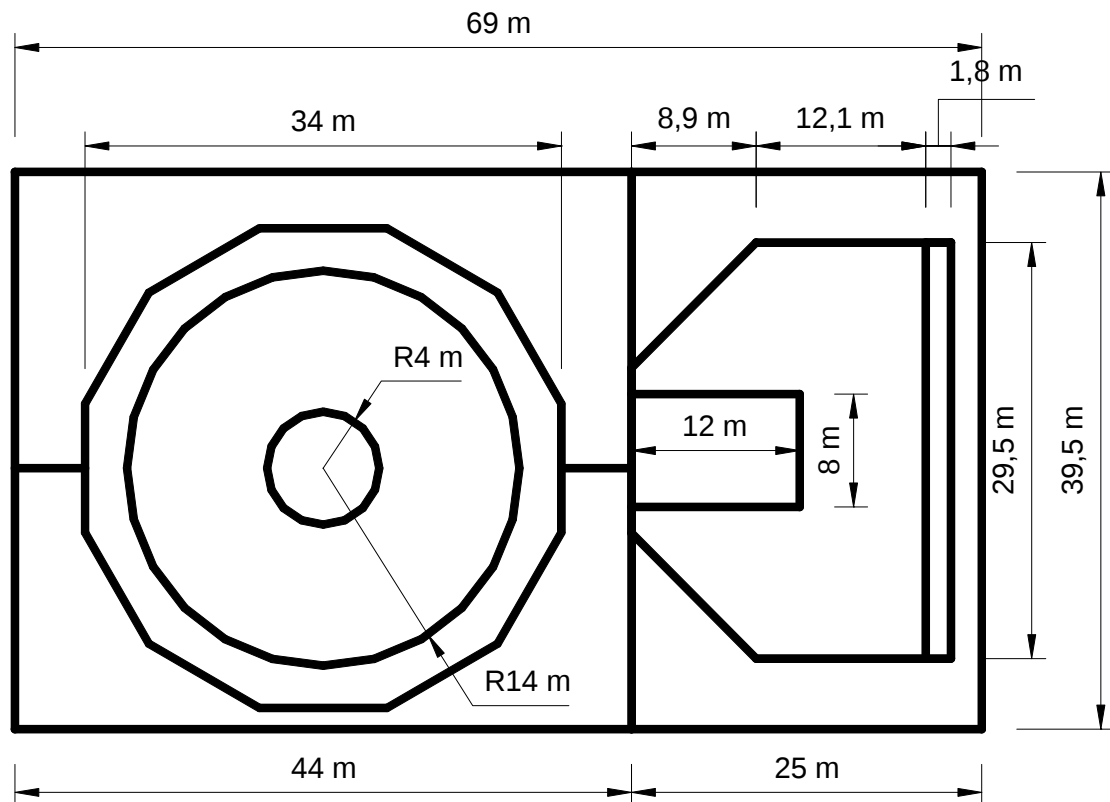
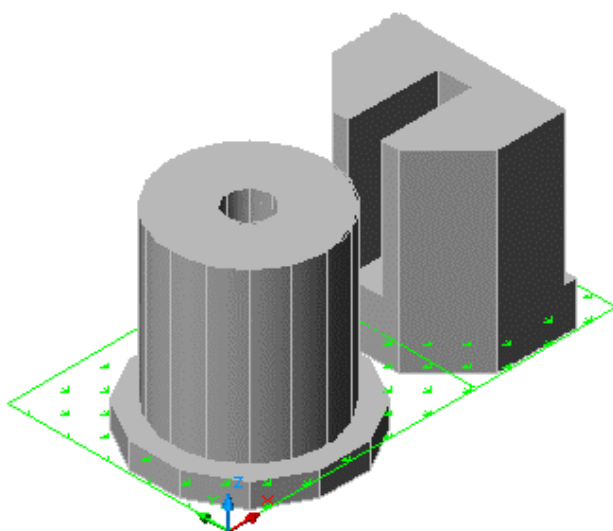


FIGURA 1. HOTEL COSMOS 100 – ETAPAS I Y II
PLANTA GENERAL



**FIGURA 2. HOTEL COSMOS 100 – TORRES DE LAS ETAPAS I Y II
VISTA TRIDIMENSIONAL**



**FOTOGRAFÍA 1 HOTEL COSMOS 100 – TORRE CILINDRICA DE LA ETAPA I
VISTA DE FRENTE**



**FOTOGRAFÍA 2 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
VISTA DE FRENTE**



**FOTOGRAFIA 3 HOTEL COMOS 100 – TORRES DE LAS ETAPAS I Y II
VISTA DESDE EL NOR – OCCIDENTE**

3 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

3.1 Investigación del Suelo

El suelo de los lotes para las Etapas I y II del Hotel Cosmos 100 fue estudiado por medio de perforaciones realizadas en 1980 para la primera torre en 1989 para la segunda, con profundidades que variaron entre 7 y 50 metros. Durante el avance de las perforaciones se ejecutaron ensayos de torsión con veleta de campo a espaciamientos verticales pequeños para tener un registro lo más continuo posible de la resistencia al corte no drenada con la profundidad, ensayo muy aplicable y confiable en perfiles de suelos arcillosos de consistencia baja. También se realizaron algunos ensayos de penetración estándar (SPT) aunque su información es muy limitada y su precisión es muy baja en este tipo de suelos blandos y sensitivos.

Se tomaron muestras inalteradas representativas de los diferentes estratos y niveles de los suelos arcillosos con tomamuestras de pared delgada (tubos Shelby) y se desarrolló un programa muy completo de ensayos de laboratorio de clasificación, resistencia y compresibilidad.

3.2 Estratigrafía

El suelo del terreno donde se construyeron las Etapas I y II del Hotel Cosmos 100 corresponde a un grueso depósito de origen lacustre constituido por limos arcillosos (hasta 1 – 2m de profundidad), arcillas (hasta 3 – 4m de profundidad) y arcillas limosas (hasta por lo menos 50m de profundidad, la máxima explorada para estos estudios).

En general la plasticidad, la humedad y la compresibilidad son altas a muy altas y la consistencia es firme a media muy cerca de la superficie (1 – 2m de profundidad), disminuye de media a blanda entre los 2 y los 7m de profundidad, se muestra francamente blanda y con muy alta compresibilidad entre 7 y 20m de profundidad, y la resistencia aumenta linealmente con la profundidad, de blanda a media, desde 20m hasta 50m.

Desde los 5m de profundidad hacia abajo el perfil de presión de preconsolidación manifiesta un grado muy bajo de sobreconsolidación, entre ligero y marginal. Entre 1 y 5m de profundidad el grado de sobreconsolidación es fuerte a ligero, manifestando en perfil de desecación moderado que no alcanzó profundidades mayores. Entre los 20 y los 50m de profundidad el grado de sobreconsolidación es marginal (relación de sobreconsolidación, RSC, menor que 1.2) que muestra la influencia de la presencia de capas delgadas arenosas entre 27 y 29m y entre 39 y 41m, las cuales han servido de drenaje efectivo ante procesos temporales de descensos del nivel freático o del nivel piezométrico o ante procesos de carga externa.

Los 50m explorados del suelo muestran capas delgadas de turba intercaladas con las capas arenosas ya descritas, o intercaladas con capas de arcilla limosa, como es el caso entre 48 y 50 metros de profundidad.

Por información general, se conoce que en este sitio el depósito de arcillas limosas de origen lacustre se prolonga hasta una profundidad de 80 – 100 metros.

En las Tablas 1 y 2 y en las Figuras 3 y 4 se presenta la variación de las diferentes propiedades y parámetros del suelo con la profundidad, indicando los estratos, su clasificación y los valores representativos de humedad natural, límites de consistencia, índice de plasticidad, peso unitario, resistencia a la penetración estándar, resistencia al corte no drenado, parámetros de compresibilidad tales como: relación de vacíos, índice de compresión, índice de recompresión y coeficiente de consolidación, esfuerzo efectivo vertical inicial y presión de preconsolidación.

3.3 Niveles Freático y Piezométrico

De acuerdo con las exploraciones y monitoreos realizados en 1989, se detectó un nivel freático regional superior a una profundidad variable entre 3 y 5 metros. Además, las capas delgadas de arena fina presentes entre 27 y 29m y entre 39 y 41m de profundidad manifestaron un nivel piezométrico variable entre 1 metro por encima y 1 metro por debajo de la superficie original del terreno, indicando, en consecuencia, que los estratos arcillosos localizados entre 4 y 27m de profundidad están sometidos a un flujo ascendente permanente con cabezas hidráulicas que fluctúan entre 2 y 6m.

El artesianismo en las capas arenosas existentes dentro del perfil descrito ha contribuido para que no se hayan dado descensos temporales importantes del nivel

freático regional superior y, por ende, no se haya presentado un proceso significativo de desecación que hubiera elevado el perfil de la presión de preconsolidación en los 10 a 20 metros superiores del suelo.

3.4 Consideraciones Generales

El suelo del sitio del proyecto del Hotel Cosmos 100 se caracteriza por tener perfiles de consistencia muy baja y de compresibilidad muy alta, desde cerca de la superficie hasta más de 40 metros de profundidad que lo hacen más desfavorable como suelo de fundación que el de muchos otros sitios localizados también en el depósito lacustre de Bogotá.

TABLA 1 HOTEL COSMOS 100 – TORRES DE LAS ETAPAS I Y II
VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES Y DE LOS PARÁMETROS DEL SUELO CON LA PROFUNDIDAD (1)

<i>Z (m)</i>	<i>w_n (%)</i>	<i>LL (%)</i>	<i>LP (%)</i>	<i>IP (%)</i>	<i>γ (t/m²)</i>	<i>N (g/p)</i>	<i>Su (kg/cm²)</i>
0 – 1.5	85	106	71	35	1.45	3	0.6
1.5 – 3.5	70	100	48	52	1.58	2	0.34
3.5 – 5.0	112	155	48	107	1.40	2	0.22
5.0 – 10.0	148	172	57	115	1.34	1.5	0.2
10.0 – 15.0	153	176	64	112	1.30	2	0.21
15.0 – 20.0	154	191	80	111	1.29	1.5	0.2
20.0 – 27.0	127	141	58	83	1.30	2	0.29
27.0 – 29.5	134	153	53	100	1.30	2	0.32
29.5 – 39.0	121	156	58	98	1.33	3.5	0.35
39.0 – 41.0	160	190	80	110	1.25	5	0.36
41.0 – 47.0	85	135	50	85	1.45	3	0.47
47.0 – 50.0	113	140	50	90	1.42	3.5	0.5

Z: Profundidad (m)

w_n: Contenido de Humedad Natural (%)

LL: Limite Liquido (%)

LP: Limite Plástico (%)

IP: Índice de Plasticidad (%)

γ: Peso Unitario Total (t/m³)

N: Resistencia a la penetración estándar (golpes/pie)

Su: Resistencia al Corte no Drenada (kg/cm²)

TABLA 2 HOTEL COSMOS 100 – TORRES DE LAS ETAPAS I Y II
VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES Y DE LOS PARÁMETROS DEL SUELO CON LA
PROFUNDIDAD (2)

$Z \text{ (m)}$	$S_u \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	e	C_c	C_r	$C_v \text{ (10}^{-4} \text{ cm}^2/\text{s)}$	$\sigma_{vo} \text{ (t/m}^2\text{)}$	$u_o \text{ (t/m}^2\text{)}$	$\sigma'_{vo} \text{ (t/m}^2\text{)}$	$\sigma'_p \text{ (t/m}^2\text{)}$
0 – 1.5	0.6					2.18	0	2.18	17.00
1.5 – 3.5	0.34					6.04	0	6.04	8.09
3.5 – 5.0	0.22	3.4	2.2	0.22	5	7.44	1.13	6.31	6.80
5.0 – 10.0	0.2	4.4	2.8	0.28	10	14.14	6.78	7.36	7.80
10.0 – 15.0	0.21	4.0	2.4	0.24	10	20.64	12.43	8.21	8.80
15.0 – 20.0	0.2	3.6	2.4	0.24	8	27.09	18.08	9.01	10.30
20.0 – 27.0	0.29	3.4	2.1	0.21	4	36.19	26.00	10.19	11.80
27.0 – 29.5	0.32	3.3	1.9	0.19	3	39.44	28.50	10.94	12.30
29.5 – 39.0	0.35	2.7	2.0	0.20	6	52.08	38.00	14.08	14.80
39.0 – 41.0	0.36	2.7	2.0	0.20	6	54.58	40.00	14.58	15.30
41.0 – 47.0	0.47	2.6	1.9	0.19	8	63.28	46.00	17.28	17.80
47.0 – 50.0	0.5	2.5	1.9	0.19	9	67.54	49.00	18.54	18.80

e : Relación de vacíos C_c : Índice de Compresión

C_v : Coeficiente de Consolidación (cm^2/s)

u_o : Presión de Poros inicial (t/m^2)

σ'_p : Presión de Preconsolidación (t/m^2)

C_r : Índice de Recompresión

σ_{vo} : Esfuerzo Vertical Inicial (t/m^2)

σ'_{vo} : Esfuerzo Efectivo Vertical Inicial (t/m^2)

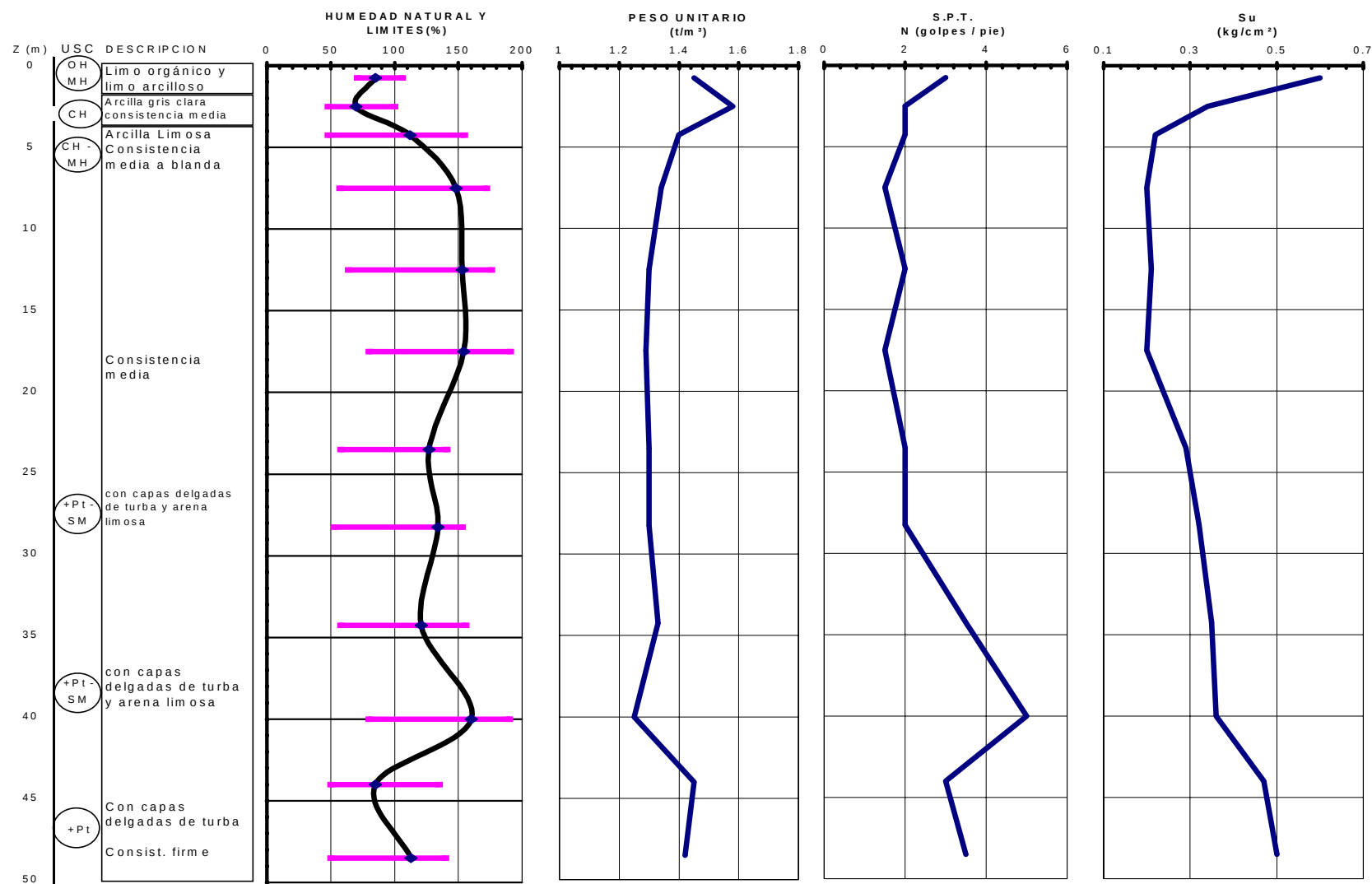


FIGURA 3 HOTEL COSMOS 100 – ETAPAS I Y II
VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES Y DE LOS PARÁMETROS DEL SUELO CON LA PROFUNDIDAD (1)

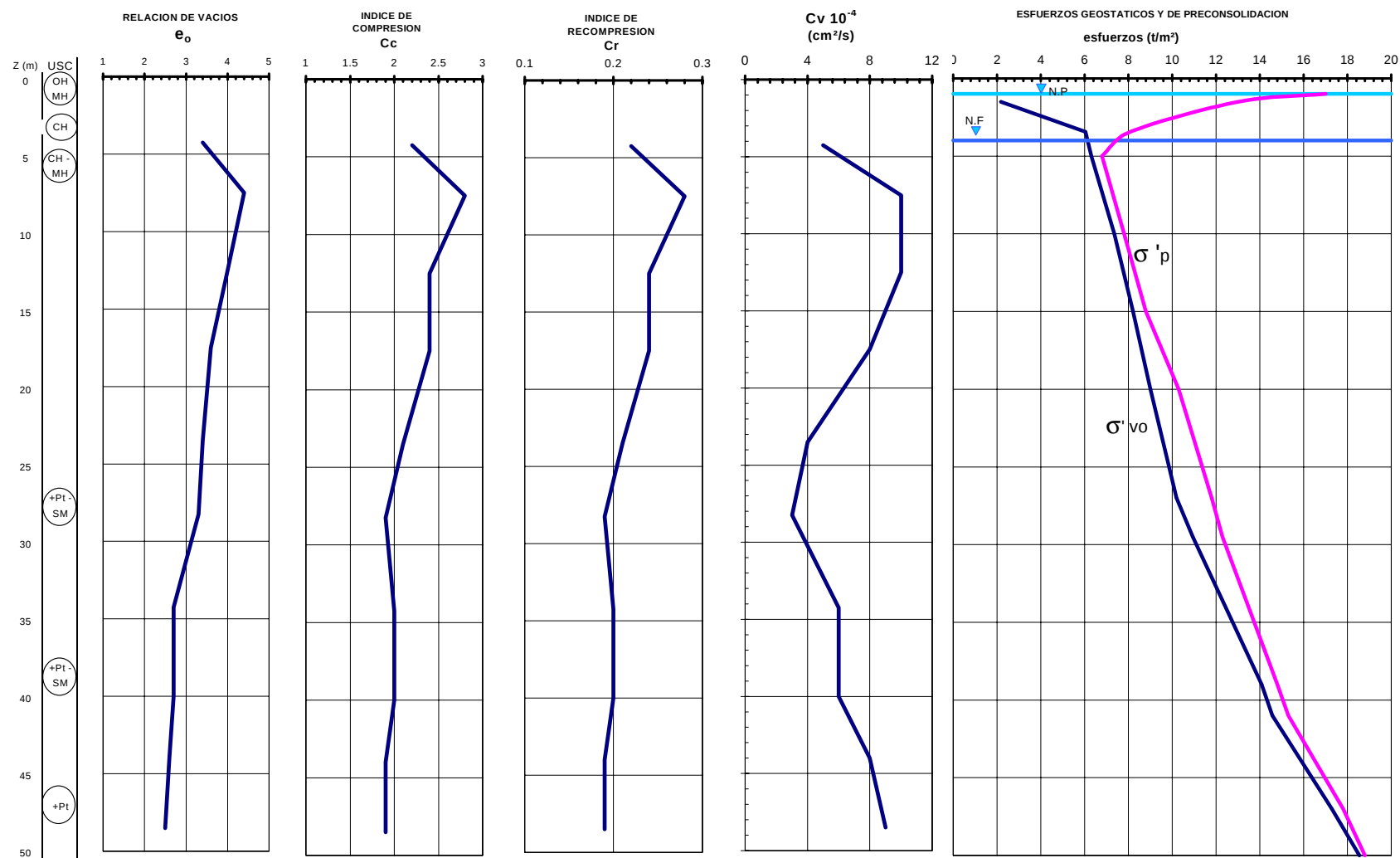


FIGURA 4 HOTEL COSMOS 100 – ETAPAS I Y II
VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES Y DE LOS PARÁMETROS DEL SUELO CON LA PROFUNDIDAD (1)

4 ETAPA I – TORRE CILÍNDRICA: DISEÑO Y COMPORTAMIENTO

4.1 Descripción del Edificio

La Etapa I del Hotel Cosmos 100 consiste en un edificio en forma cilíndrica de diez pisos y un sótano. El área del sótano tiene la forma de un dodecágono regular circunscrito en una circunferencia de 34 metros de diámetro, y sirve como piso de parqueo vehicular. Desde el nivel del primer piso hasta la cubierta del edificio el cilindro tiene un diámetro exterior de 28m. Desde el segundo piso hasta el décimo se tiene un vacío central de 8m de diámetro, con una marquesina traslúcida al nivel de la cubierta general.

4.2 Cimentación

La solución de cimentación adoptada para la construcción de la Etapa I del Hotel Cosmos 100 consistió en una losa corrida aligerada de concreto reforzado de 1.5m de espesor apoyada directamente sobre el suelo de fundación de arcillas limosas a una profundidad de 5m por debajo de la superficie original del terreno. El área de la losa de cimentación correspondió exactamente al área perimetral del sótano, un dodecágono circunscrito en una circunferencia de 34m de diámetro, con un área total de 940 m².

En la Figura 5 se muestra el esquema de la estructura de la Etapa I, torre cilíndrica, del Hotel Cosmos 100 y de la solución de cimentación adoptada.

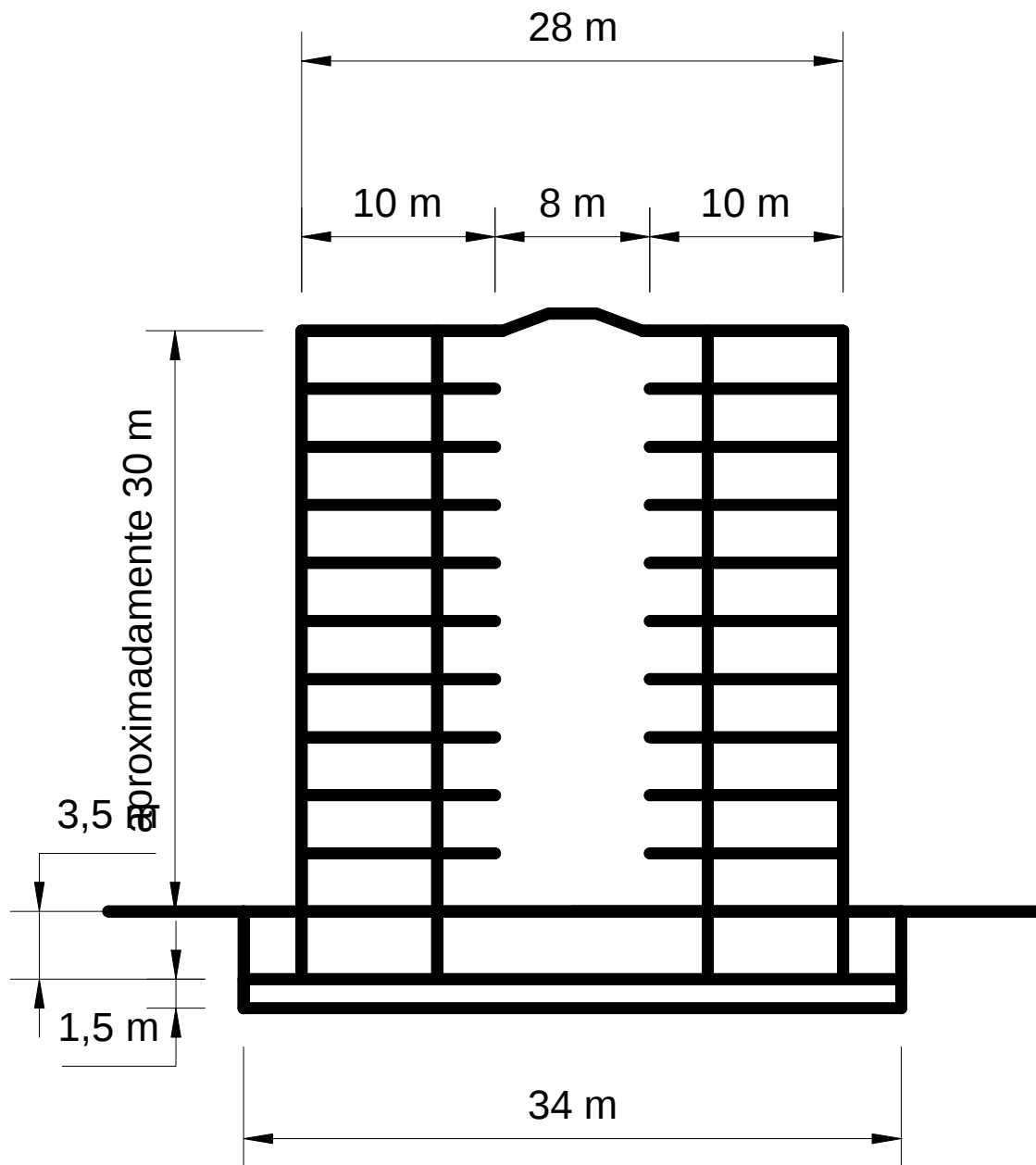


FIGURA 5 HOTEL COSMOS 100 – ETAPA I – TORRE CILINDRICA
ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA Y DE LA CIMENTACIÓN ADOPATADA

En la Tabla 3 se presentan a continuación los resultados de los análisis llevados a cabo en su momento (1980), incluido el pronóstico del desarrollo de los asentamientos con el tiempo:

TABLA 3 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA I
RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS
DE LA CIMENTACIÓN SELECCIONADA

Peso total edificio, considerado reducción de carga viva, t.	8850
Tipo de cimentación seleccionada	Losa Corrida
Profundidad de fundación, Df, m	5.0
Área de cimentación, Af, m ²	940
Presión promedio de contacto, $\bar{q}$, t/m ²	9.4
Presión neta promedio de contacto, $\bar{q}_n$, t/m ²	2.0
Factor de Seguridad contra falla por capacidad portante o contra falla profunda de fondo de excavación vecina, si su profundidad De.v. = 0 = 3m = 5m	2.2 1.7 1.3

Pronostico de asentamientos:

Asentamiento “elástico” o por distorsión, Sd, cm	6
Asentamiento por consolidación, Scp cm	45

Desarrollo del asentamiento por consolidación en el tiempo, Scp_t, cm.

Tiempo Años *	0	1	3	5	10	20	40	100	∞
Scp, cm	0	3	7	9	13	18	25	36	45

**(t = 0 = año 1982, comienza propiamente la consolidación)*

4.3 Comparación entre Pronóstico y Comportamiento

Desde el comienzo de la construcción de la torre cilíndrica a mediados de 1981 hasta mediados de 2003 se han tomado registros de asentamientos en varios puntos convenientes localizados en la placa y en las columnas del sótano, así como en puntos de la fachada.

En la Tabla 4 se comparan los asentamientos pronosticados en 1980 y los realmente observados durante 22 años de seguimiento.

**TABLA 4 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA I
ASENTAMIENTOS PRONOSTICADOS Y OBSERVADOS**

AÑO	TIEMPO AÑOS	ASENTAMIENTO PROMEDIO, $\bar{S}$, cm		COMENTARIO
		PRONOSTICADO	OBSERVADO	
1981	0	0	0	• Comienza la construcción
1982	1	6	10	• Comienzan los asentamientos por consolidación
1983	2	9	15	
1986	5	14	24	
1992	11	19	35	• Lleva una inclinación global acumulada de 1/120 ($\approx 1/2^\circ$) hacia SE
2003	22	24	47	• Se reduce la inclinación global a 1/240 ($\approx 1/4^\circ$) hacia el SE
2021	40	31		
2081	100	42		
∞	∞	51	56*	

* *Extrapolado con el Método de Asaoka*

En la Figura 6 se presentaron la curva del pronóstico de asentamientos hecho en 1980 y la curva de los asentamientos observados.

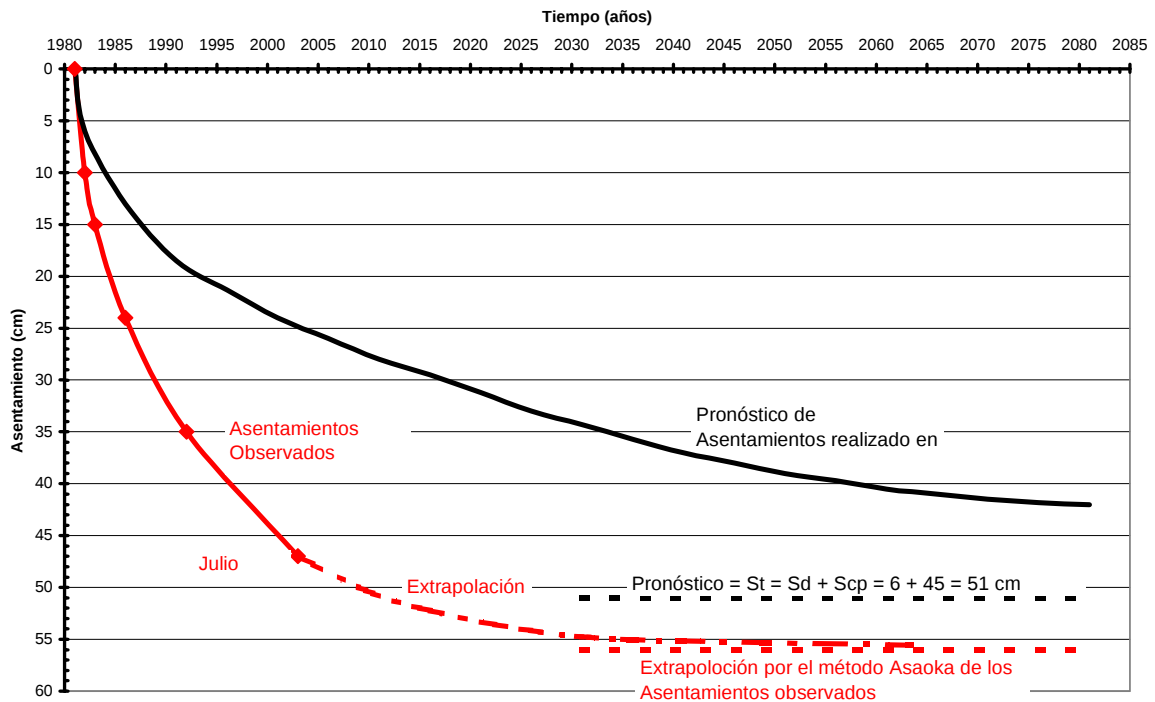


FIGURA 6 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA I
PRONÓSTICO DE ASENTAMIENTOS Vs ASENTAMIENTOS OBSERVADOS

De los resultados del análisis previo a la construcción y del seguimiento de los asentamiento durante 22 años, desde el comienzo de la construcción hasta hoy, se pueden derivar las siguientes conclusiones:

- El asentamiento “elástico” promedio realmente observado fue del orden de 10 cm, 67% mayor que el pronosticado de 6cm. Esto implica que el valor real del Módulo de elasticidad o de Young no drenado, E_u , de la masa de suelo involucrada en la deformación por distorsión durante la aplicación de cargas, entre las profundidades 5 y 40m aproximadamente, fue del orden de 1300 t/m^2 y no tan alto como el utilizado en el pronóstico, de 2100 t/m^2 .
- El asentamiento por consolidación a muy largo plazo pronosticado, 45cm, es prácticamente igual al asentamiento por consolidación que se puede obtener por

extrapolación con el método de Asaoka, basado en los asentamientos observados hasta hoy. Tal extrapolación apunta a un asentamiento final por consolidación del orden de 46cm.

- La gran diferencia presentada entre el pronóstico del desarrollo de los asentamientos con el tiempo y el realmente observado se debe a varios factores entre los que se destacan:
 - La participación como mantos de drenaje efectivo de las capas delgadas de arena fina intercaladas con turba que se encuentran entre 27 y 29.5m y entre 39 y 41m de profundidad y cuya presencia, extensión y continuidad no fueron reconocidas suficientemente en el estudio inicial.
 - La dificultad que se presenta en evaluar con precisión el coeficiente de consolidación, c_v .
- En resumen, los asentamientos por consolidación se están desarrollando aproximadamente cuatro veces más rápido que lo estimado originalmente antes de la construcción del edificio.
- El nuevo estimativo indica que en 21 años de tiempo de consolidación se ha presentado el 80% del asentamiento por consolidación esperado (37cm de 46cm) y faltan por producirse cerca de 9cm de asentamiento (el 20% restante), sin incluir otros efectos como los de compresión secundaria y los de subsistencia regional por descenso del nivel freático.
- A pesar de los altos valores de los asentamientos presentados por la torre cilíndrica, su estructura y sus elementos arquitectónicos se han comportado satisfactoriamente. Una leve rotación general hacia el suroriente que llegó a ser

de $0.5^{\circ}(1/120)$ en 1992, diez años después de construido, debida a la pequeña excentricidad de carga por el cerramiento de ladrillo de la zona de ascensores, se está reduciendo por la acción del peso de la Etapa II, al occidente, hasta el punto de que, hoy, en 2003, once años después de terminada la construcción de la Etapa II, la rotación general de la Etapa I es de tan sólo $0.25^{\circ}(1/240)$ hacia el SE.

- Los asentamientos diferenciales presentados entre la torre cilíndrica y las áreas perimetrales de un piso que se apoyan en cimientos superficiales por fuera de la proyección del sótano de la torre han obligado a la reparación y, en algunos casos, a la demolición y reconstrucción de muros divisores y acabados arquitectónicos en las zonas de conexión y a la materialización de detalles conectores que permitan tolerar sin daños importantes los movimientos diferenciales que aún faltan por presentarse.

5 TORRE DE LA ETAPA II: CIMENTACIÓN DE LOSA CORRIDA

5.1 Descripción del Edificio

La Etapa II del Hotel Cosmos 100 consiste en un edificio en forma rectángulo – trapezoidal de diez pisos y un sótano. El área envolvente del piso tipo es de 540 m^2 , éste tiene un vacío de 100 m^2 y un área neta de 440 m^2 para cada uno de los pisos típicos del segundo al décimo. El lote tiene 25m de ancho sobre la Calle 100 y 39.5 m de largo sobre la Transversal 21, y un área total de 987 m^2 .

Las áreas que quedan por fuera de la proyección de la torre tienen uno o dos pisos y un sótano y cuentan con estructuras y cimentaciones totalmente independientes y

“dilatadas” de aquéllas de la torre. El sótano de parqueo de vehículos cubre la totalidad del área del lote, comunicando el área bajo la torre con las áreas periféricas.

En las Figuras 1 y 2 se presentan la planta general y una vista tridimensional de las Etapas I y II del Hotel Cosmos 100, y en las Fotografías 1, 2 y 3 se muestran los dos edificios en agosto de 2003.

5.2 Análisis de la Solución de Cimentación Directa con Losa Corrida

Aprovechando el conocimiento adquirido con la observación del comportamiento de la torre cilíndrica de la Etapa I y, en particular, del desarrollo de sus asentamientos con el tiempo, y con los resultados de la exploración del suelo llevada a cabo en 1989, esta vez, hasta 50 metros de profundidad, se mejoró el modelo de caracterización del suelo para plantear, analizar y comparar diferentes alternativas de cimentación de la nueva torre, que permitiera seleccionar aquélla que satisficiera mejor los requerimientos del comportamiento como unidad independiente y como unidad integrada a las estructuras de la Etapa I, en particular, a la torre cilíndrica, construidas diez años antes.

Considerando la distribución de las cargas de la torre de la Etapa II se planteó, para el análisis comparativo, una solución de cimentación directa de losa corrida con un área total de apoyo de 593 m^2 con el fin de anular la excentricidad de las cargas aplicadas al suelo por la cimentación de la torre, y aprovechar la máxima área de

contacto disponible, a la vez que se respetaba la independencia estructural y de cimentación de las áreas periféricas livianas.

En la Figura 7 se muestra el esquema de la estructura de la torre de la Etapa II con la solución de cimentación directa de losa corrida inicialmente planteada.

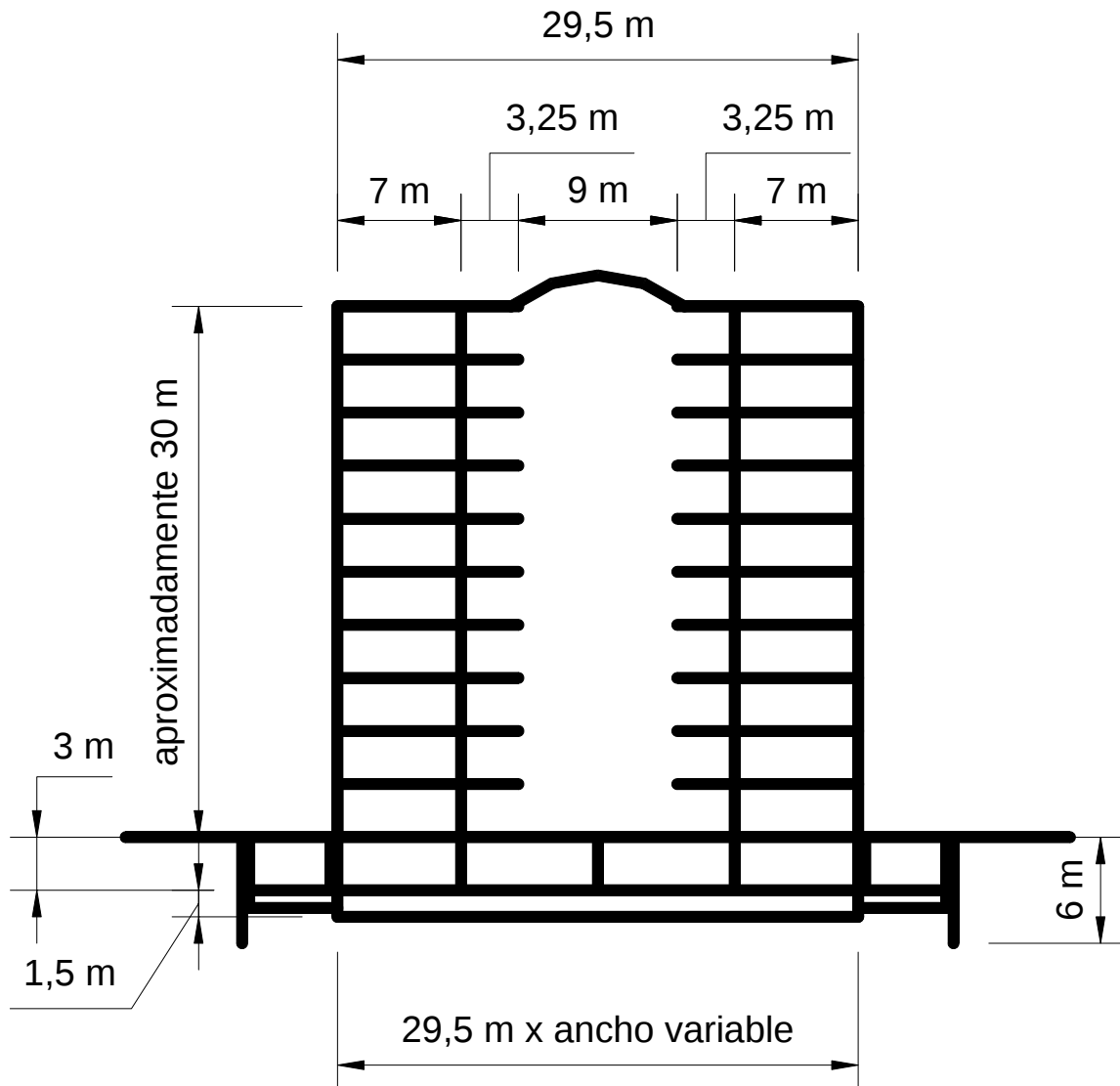


FIGURA 7
HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA CON CIMENTACIÓN DE LOSA CORRIDA

En la Tabla 5 se presentan a continuación los resultados de los análisis de la solución de cimentación de losa corrida directa, incluido el pronóstico del desarrollo de los asentamientos con el tiempo:

TABLA 5 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS SOLUCIÓN DE LOSA CORRIDA

Peso total del edificio considerando reducción de carga viva, t	6850
Profundidad de fundación, Df, m	4.5
Área de cimentación, Af, m ²	593
Presión promedio de contacto, q, t/m ²	11.5
Presión neta promedio de contacto, q _n , t/m ²	4.7
Factor de Seguridad, FS, contra falla por capacidad portante o contra falla profunda de fondo de excavación vecina, si su profundidad De.v.	
=0	1.6
=2m	1.4
=4m	1.1

Pronóstico de asentamientos:

Asentamiento "elástico" o por distorsión, S_d , cm	15
Asentamiento por consolidación, S_{cp} , cm	105

Desarrollo del asentamiento por consolidación en el tiempo, S_{cp} , cm.

Tiempo, años*	0	1	4	10	20	40	100	∞
Scpt, cm	0	11	32	57	82	98	105	105

*(t=0 años = año 1992, comienza propiamente la consolidación)

Estos resultados fueron considerados claramente inaceptables tanto en lo relacionado con el escaso margen de seguridad como con los altísimos

asentamientos esperados, y obligaron a plantear y analizar alternativas de cimentación del tipo placa – pilotes y del tipo profunda con pilotes largos de fricción.

6 TORRE DE LA ETAPA II: ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN CON SISTEMAS PLACA – PILOTES

6.1 Criterios Generales

Para plantear y analizar soluciones de cimentación con sistemas placa – pilotes que permitirán obtener factores de seguridad aceptables contra fallas globales y asentamientos moderados satisfactorios para la integridad estructural y la integración funcional con la Etapa I del hotel se empezó por considerar los criterios más divulgados sobre la cantidad y la capacidad de los pilotes que deben complementar el trabajo de la placa, para lograr que el sistema funcione exitosamente. La variedad de criterios es la siguiente:

- Para que se pueda establecer un sistema placa – pilotes, la sumatoria de las capacidades últimas de los pilotes debe ser menor que la carga aplicada por la estructura, incluido el peso propio de la losa de cimentación.
- En un sistema placa – pilotes las puntas de los pilotes no pueden alcanzar, ni mucho menos estar embebidas dentro de, un estrato altamente competente inferior que se encuentre debajo de una secuencia de suelos blandos compresibles, sino que, por el contrario, las puntas de los pilotes deben ir penetrando el suelo sin una restricción significativa.
- El número de pilotes será tal que, trabajando a la falla, tomen el 100% del peso muerto del edificio o estructura.

- Cuando hay sótanos y un importante porcentaje de compensación por excavación, el número de pilotes será tal que los pilotes, trabajando a la falla, tomen la carga no compensada del edificio ($A_{\text{placa}} \times q_n$).
- Alternativamente, el número de pilotes será tal que los pilotes tomen la carga no compensada del edificio ($A_{\text{placa}} \times q_n$) sin alcanzar la falla, sino trabajando con un margen de seguridad de 1.5 a 2.0.
- La aparición de fricción negativa en la parte superior de los pilotes es incompatible con el trabajo del sistema placa – pilotes, pues si se diera la fricción negativa, significaría que los pilotes solos, sin la participación de la placa, tendrían una capacidad última mayor que el peso del edificio o estructura y, por ende, la cimentación sería netamente profunda de pilotes, aunque estuvieran “amarrados” por una losa corrida.

De estos criterios se pueden hacer los siguientes comentarios particulares para el caso de la torre de la Etapa II del Hotel Cosmos 100:

- El perfil de suelos arcillosos blandos y compresibles hasta más de 50 metros de profundidad permite plantear varios esquemas de cimentación placa – pilotes con longitudes variables de pilotes.
- La posibilidad de ocurrencia de procesos regionales de subsistencia en el sector del proyecto por causa del descenso del nivel freático contribuye a que soluciones placa – pilotes compitan técnica y económicamente en forma favorable y ventajosa con cimentaciones profundas de pilotes largos de fricción, donde éstos tendrán en la fricción negativa simultáneamente un lastre y un factor de reducción

de su capacidad, exigiendo, entonces, un aumento importante en la cantidad de pilotes y en su costo.

6.2 Casos Planteados

La torre de la Etapa II del hotel tiene un grado de compensación de cerca del 60% con la losa corrida apoyada a 4.5m de profundidad.

Se plantearon varias alternativas de cimentación placa – pilotes con tres longitudes diferentes de pilotes, 10, 20 y 30m, para estudiar la sensibilidad del comportamiento del sistema a variaciones en la longitud de los pilotes. En la Figura 8 se presentan los esquemas planteados.

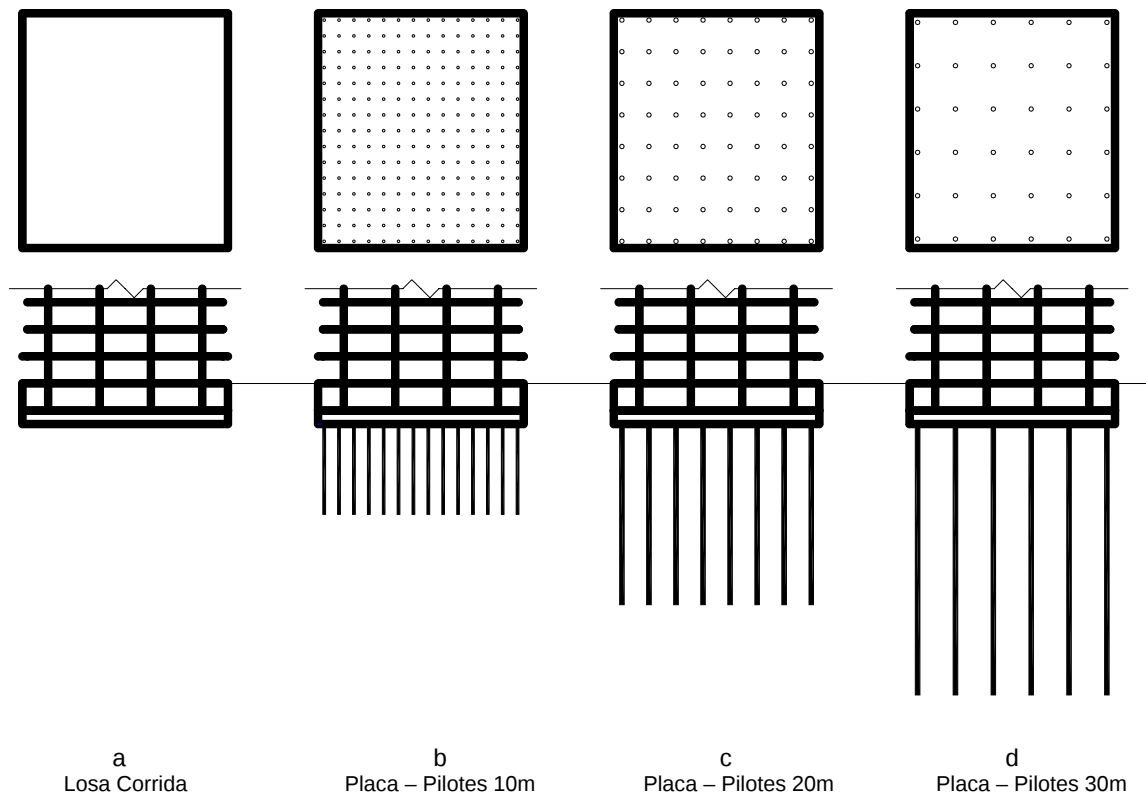


FIGURA 8 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
ESQUEMAS PLANTEADOS DE CIMENTACIÓN PLACA – PILOTES

Para cada longitud de pilotes se plantearon cuatro cantidades de pilotes de tal forma que, trabajando a la falla, tomaran 50%, 100%, 150% o 200% de la carga no compensada del edificio, siendo ésta igual a $A_{placa} \times q_n$, con el fin de analizar la sensibilidad del sistema a variaciones en la cantidad de pilotes y, por ende, a variaciones en el porcentaje de la carga no compensada que es tomada directamente por los pilotes.

6.3 Interacción placa – pilotes - suelo

6.3.1 General

Las preguntas que el análisis de cada uno de los casos debía responder eran, entre otras:

- ¿Durante la construcción del edificio e inmediatamente después de terminado, ($t=0$) qué porcentaje de la capacidad última de falla de cada pilote se está utilizando, es decir, qué carga toman los pilotes y qué carga toma la placa?
- ¿Qué asentamientos inmediatos o elásticos se presentan para la condición inicial después de construido el edificio?
- ¿Cómo evolucionarán las cargas tomadas por los pilotes y por la placa con el peso del tiempo?
- ¿Cuál sería el estimativo de los asentamientos promedio generados por consolidación a largo plazo del sistema placa – pilotes?

- ¿Cuál sería el factor de seguridad del sistema placa – pilotes contra una falla general por capacidad portante, comparado con la solución de placa corrida sin pilotes?

Las respuestas a estas preguntas requieren el análisis de la interacción pilote – suelo, placa – pilote y placa – suelo porque la carga tomada por cada pilote y el porcentaje utilizado de su capacidad última dependen de los desplazamientos relativos o efectivos pilote – suelo, pero éstos, a su vez, dependen de la forma como se distribuye la carga del edificio entre la placa y los pilotes. Tales cargas aplicada al suelo producen esfuerzos que generan deformaciones dentro de la masa de suelo y asentamientos del edificio que deben explicar la distribución de la carga entre la placa y los pilotes, tanto a corto como a largo plazo.

Los criterios aplicados en este análisis y la secuencia metodológica de verificación de las hipótesis fueron los siguientes:

- Para que un área delgada perimetral del pilote llegue a desarrollar su fricción última o de falla se requiere alcanzar un desplazamiento relativo hacia abajo de 5 a 8mm, de ese punto del fuste del pilote con respecto al suelo circundante, independientemente del diámetro y de la longitud del pilote. En la figura 9.a se ilustra esquemáticamente este criterio.
- Para desarrollar la capacidad de falla por punta de pilotes pre – excavados en arcillas blandas se requiere un asentamiento de la punta o penetración en el suelo del 15 – 20% del diámetro del pilote. En la Figura 9.b se ilustra este criterio.

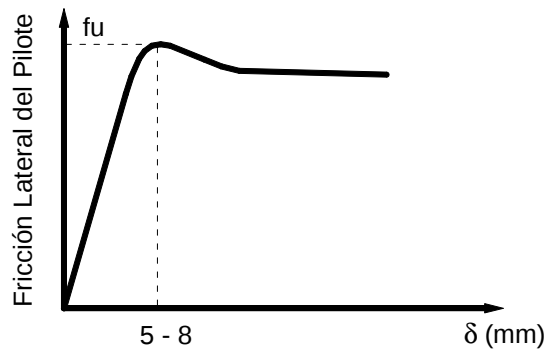


Figura 9.a

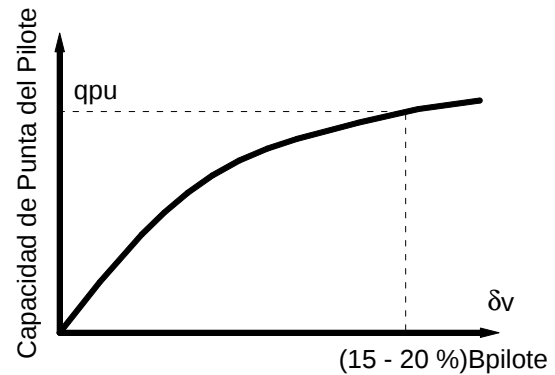


Figura 9.b

FIGURA 9

CRITERIOS DE DESPLAZAMIENTO Y DEFORMACIÓN PARA ALCANZAR LA FALLA POR FRICCIÓN Y POR PUNTA EN PILOTES

6.3.2 Condición a corto plazo

- Con base en soluciones obtenidas de la teoría de la elasticidad el asentamiento inmediato o “elástico” causado por la carga directa transmitida por la placa al suelo varía desde el 100% en el contacto placa – suelo hasta cero a una profundidad del orden de 1.5 veces el ancho representativo de la placa (para placas cuadradas o rectangulares con $L/B \leq 1.5$), aproximadamente en la forma ilustrada en la Figura 10.

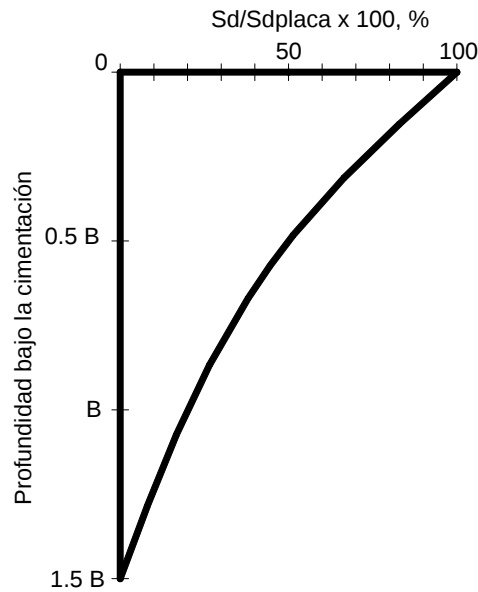


FIGURA 10
VARIACIÓN DEL ASENTAMIENTO ELÁSTICO CON LA PROFUNDIDAD BAJO UNA CIMENTACIÓN CUADRADA SOBRE SUELO HOMOGÉNEO

- Para una determinada hipótesis inicial de carga sobre los pilotes se puede obtener el asentamiento elástico causado por la carga tomada por la placa con soluciones derivadas de la teoría de la elasticidad (Janbu y otros, 1956), reduciéndolo por un factor de restricción que ofrece el conjunto de pilotes.
- Con el resultado del asentamiento elástico que sufre la placa a corto plazo y el acortamiento elástico de los pilotes calculado para la hipótesis específica de carga, y con la aplicación del criterio mostrado en la figura 10 sobre la variación de los asentamientos inmediatos en profundidad, se establecen los desplazamientos relativos pilote – suelo a lo largo de su fuste y en su punta.

- Con los resultados de desplazamientos relativos pilote – suelo se aplican los criterios ilustrados en las figuras 9.a y 9.b para confirmar la hipótesis inicial de carga tomada por el pilote, o corregirla (Fig. 11).

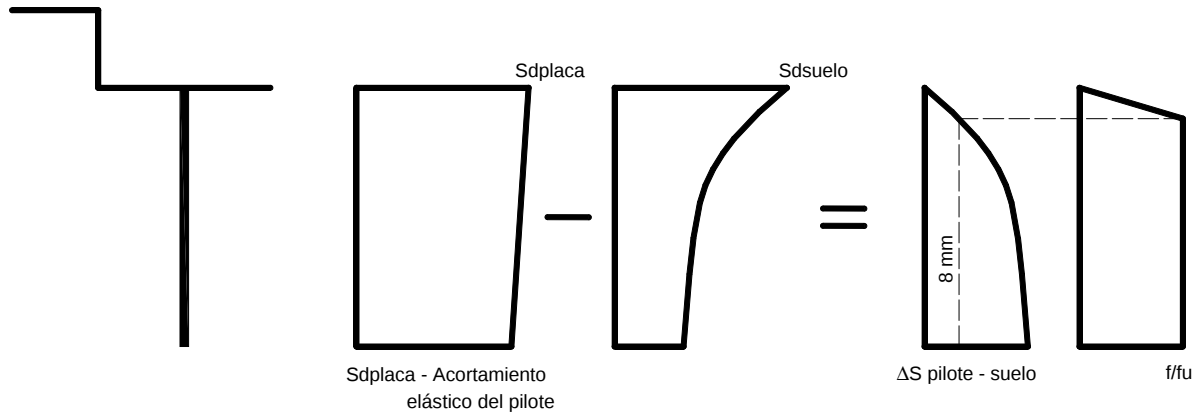


FIGURA 11
CRITERIO DE TRANSFERENCIA DE CARGA PILOTE – SUELO A LO LARGO DEL FUSTE COMO FUNCIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS

- Con el nuevo resultado obtenido de carga sobre cada pilote se inicia una nueva iteración hasta llegar a una rápida convergencia, y a los valores de carga tomada por los pilotes y por la placa, y al asentamiento elástico resultante. En la Figura 12 se muestra el sistema placa – pilotes después de ocurrido los asentamientos plásticos o inmediatos.

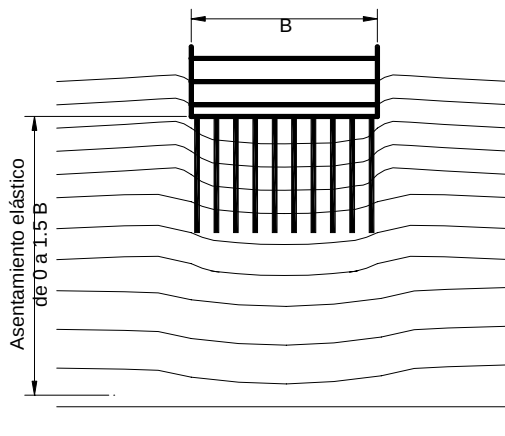


Figura 12.a

6.3.3 Condición a largo plazo

- Partiendo de la hipótesis de que a largo plazo los pilotes de un sistema placa - pilotes (donde la suma de las capacidades últimas de los pilotes es menor que el peso del edificio) están trabajando al 100% de su capacidad última (están a la falla), se establecen los esfuerzos verticales promedio inducidos a las diferentes profundidades del perfil de suelo aplicando la metodología de León y Reséndiz (1979), como alternativa aproximada pero simplificada a la solución rigurosa de Mindlin, incluyendo los decrementos de esfuerzos inducidos por el alivio de la excavación.
- Con los esfuerzos verticales inducidos y las características de compresibilidad del suelo en profundidad se evalúan los asentamiento por consolidación primaria de la placa y de los pilotes.
- Con el resultado del asentamiento promedio por consolidación de la placa sumado al asentamiento elástico, considerando el acortamiento elástico de los pilotes, y con los desplazamientos verticales del suelo como resultado de la distorsión inicial no drenada de la masa de suelo, y de la consolidación de las capas a largo plazo, se establecen los desplazamientos relativos pilote – suelo a lo largo del fuste y en su punta para la condición de largo plazo.
- Con los resultados obtenidos de desplazamientos relativos pilote – suelo a largo plazo se aplican nuevamente los criterios ilustrados en las Figuras 9.a y 9.b para confirmar la hipótesis inicial de carga tomadas por el pilote o corregirla para comenzar una nueva iteración hasta que la convergencia entre hipótesis y

resultado sea razonable. En la Figura 12.b se muestra el esquema de un sistema placa – pilotes después de ocurridos los asentamientos elásticos y de consolidación a largo plazo.

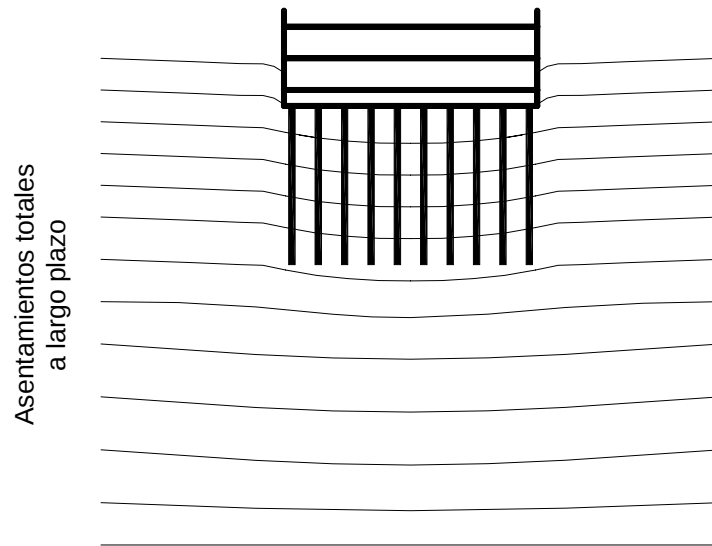


Figura 12.b

FIGURA 12 ESQUEMA ILUSTRATIVO DE LA ESTRUCTURA Y SU CIMENTACIÓN PLACA – PILOTES DESPUÉS DE OCURRIDOS LOS ASENTAMIENTOS a. ELÁSTICOS b. TOTALES A LARGO PLAZO

6.4 Resultados de los Sistemas Planteados Placa – Pilotes

En las Figuras 13 y 14 se presentan los esfuerzos verticales inducidos por los sistemas placa – pilotes estudiados para la torre de la Etapa II del Hotel Cosmos 100, con pilotes de 10m, 20m y 30m. Para cada longitud se estudiaron casos con cantidades de pilotes que, trabajando a la falla, tomaran 50%, 100%, 150% o 200% de la carga del edificio no compensada por el alivio de la excavación.

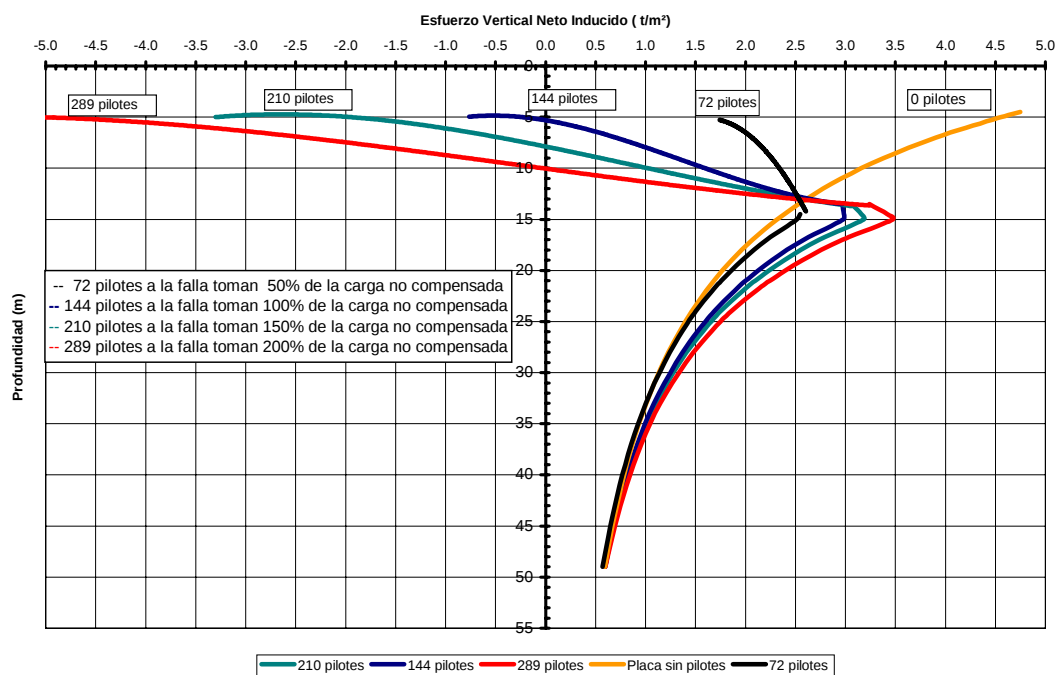


FIGURA 13. a

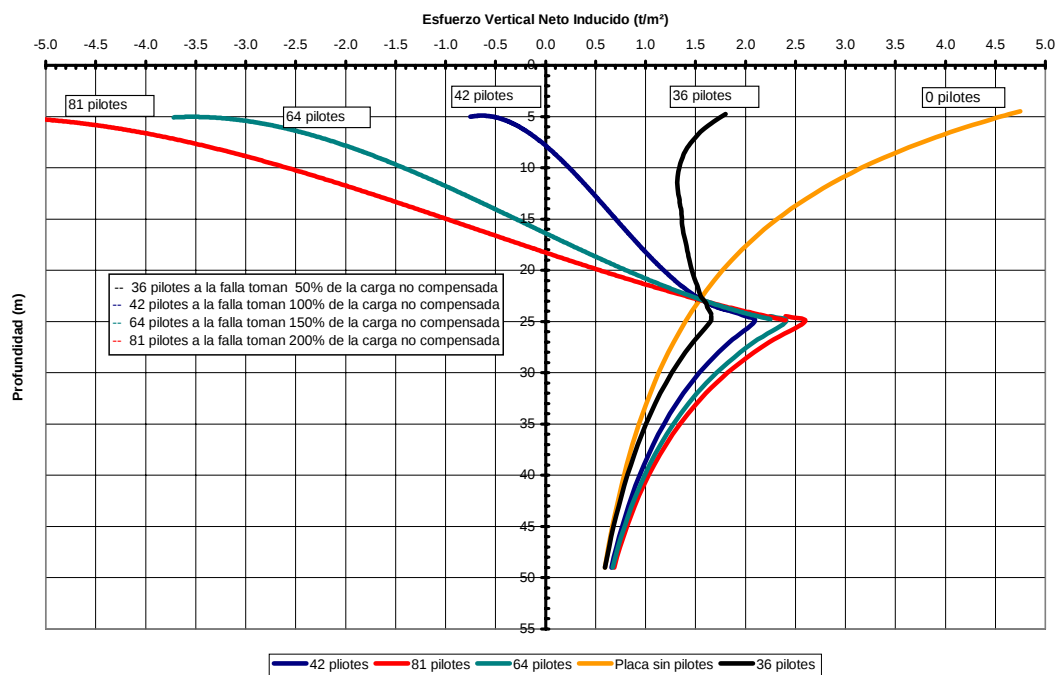


FIGURA 13. b

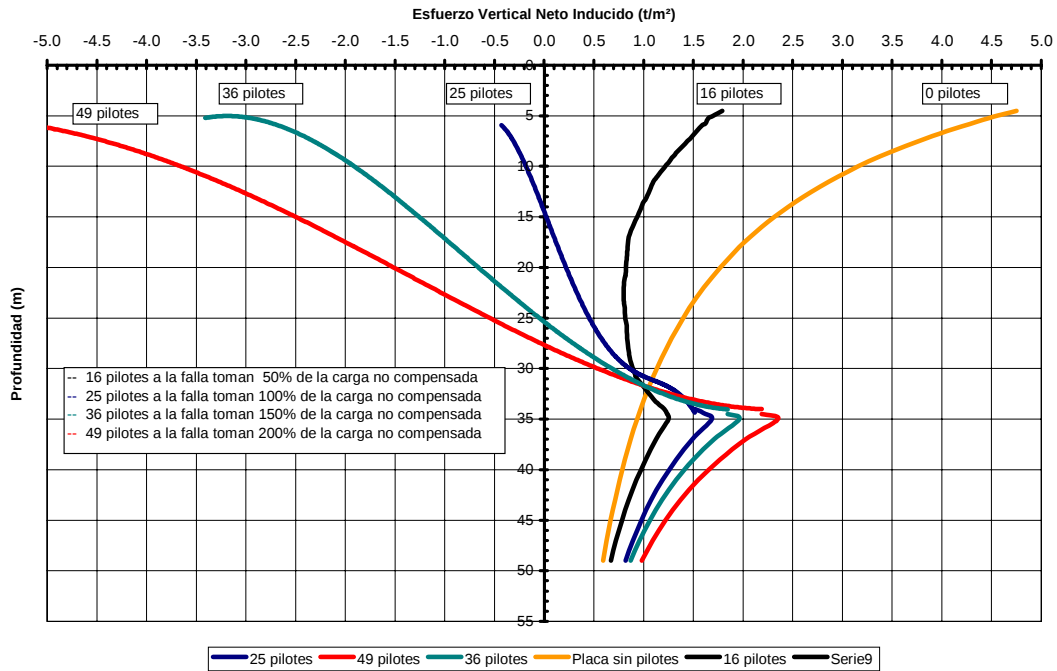


FIGURA 13.c

FIGURA 13. HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
a. $l_p=10$ m b. $l_p=20$ m c. $l_p=30$ m
RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ESFUERZOS VERTICALES INDUCIDOS
SISTEMAS DE CIMENTACIÓN PLACA – PILOTES, CON DIFERENTES PORCENTAJES DE LA CARGA NETA
NO COMPENSADA TOMADOS POR LOS PILOTES, PARA DIFERENTES LONGITUDES DE PILOTE

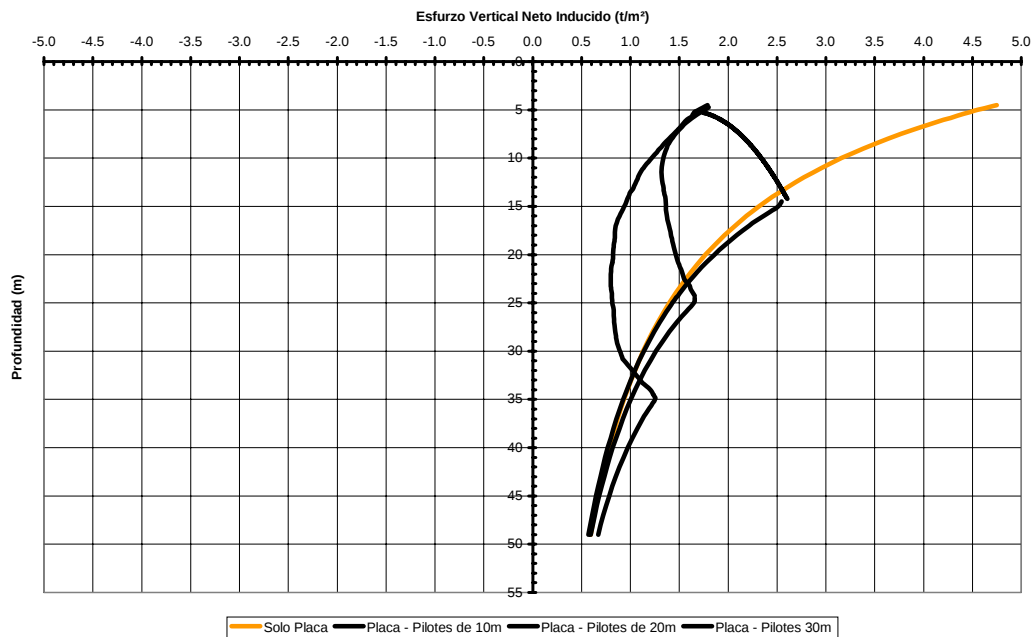


FIGURA 14.a

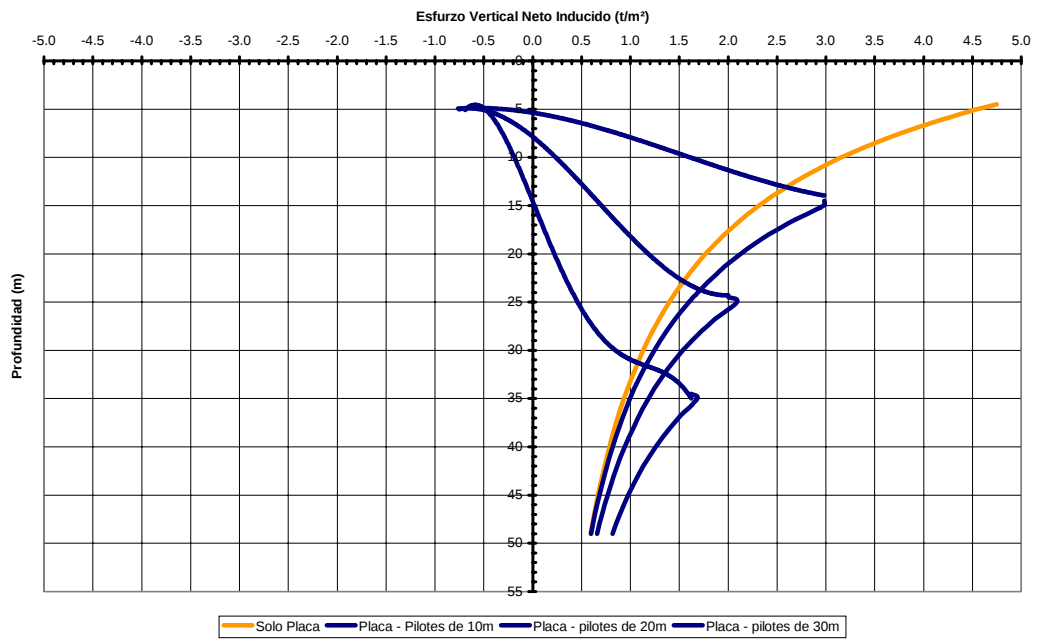


FIGURA 14.b

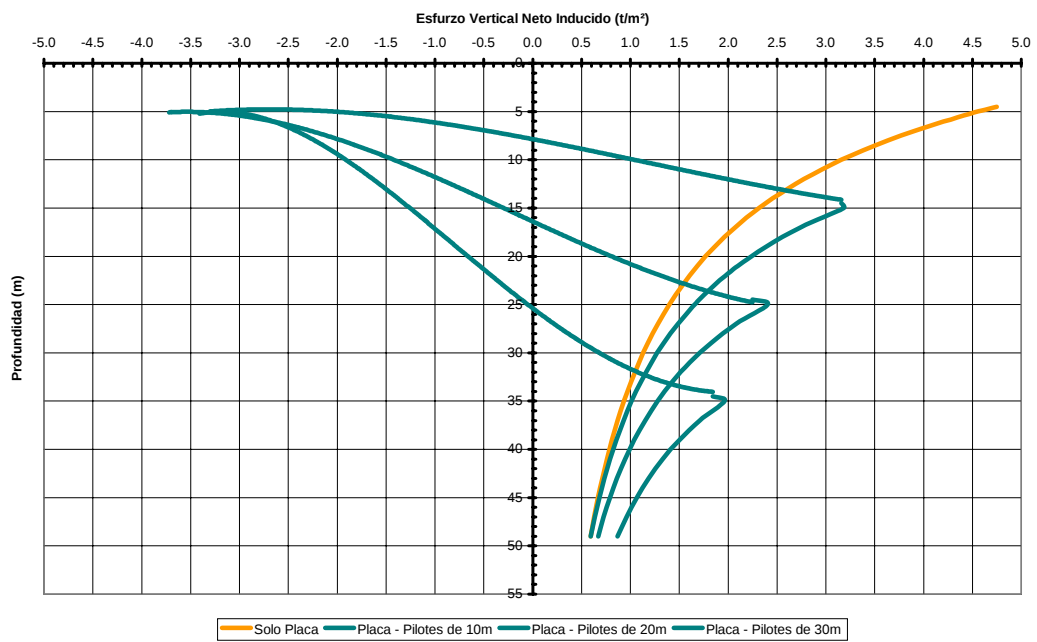


FIGURA 14.c

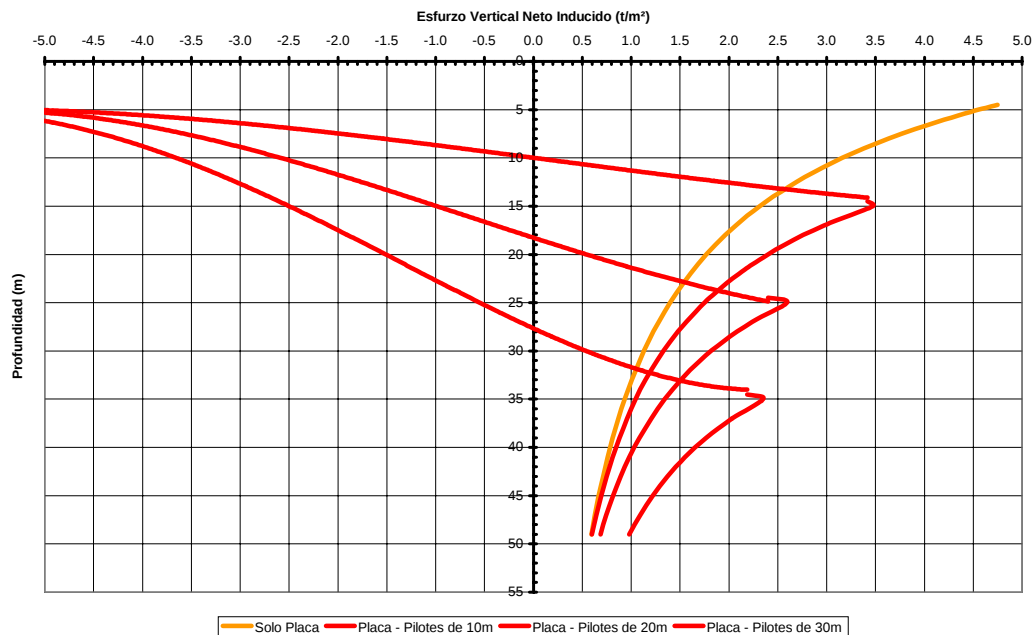


FIGURA 14.d

FIGURA 14 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
 $\Sigma Q_{\text{pilotes}} =$ a. $0.5 q_n A$ b. $1.0 q_n A$ c. $1.5 q_n A$ d. $2.0 q_n A$
RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ESFUERZOS VERTICALES INDUCIDOS
SISTEMAS DE CIMENTACIÓN PLACA – PILOTES, VARIANDO LA LONGITUD DE LOS PILOTES Y EL
PORCENTAJE DE CARGA NETA NO COMPENSADA TOMADO POR LOS PILOTES

La Tabla 6 presenta los resultados, para su comparación, indicando las características de los pilotes (diámetro, longitud, cantidad, número de filas, espaciamientos), porcentaje de la carga no compensada del edificio que toman los pilotes al trabajar a la falla, factor de seguridad global del sistema, parcial de la placa o de la pila equivalente, asentamiento promedio del sistema, porcentaje utilizado de capacidad última del pilote, distribución porcentual del peso del edificio tomado por la placa y por los pilotes, tanto para la condición a corto plazo como para la condición a largo plazo.

TABLA 6 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE INTERACCIÓN Y DE COMPORTAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS PLANTEADAS DE
CIMENTACIÓN PLACA – PILOTES

DESCRIPCIÓN	CASO												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
PILOTES													
* Diámetro, cm	--	30	30	30	30	30	50	50	50	40	50	50	50
* Longitud, m	--	10	10	10	10	20	20	20	20	30	30	30	30
* Cantidad	--	72	144	210	289	36	42	64	81	16	25	36	49
* Número de filas	--	6 x 7	12 x 12	14 x 15	17 x 17	6 x 6	6 x 7	8 x 8	9 x 9	4 x 4	5 x 5	6 x 6	7 x 7
* Espaciamiento promedio, m	--	--	2.05	1.7	1.45	4.6	4.1	3.3	2.9	7.7	5.7	4.5	3.8
* Capacidad última individual por pilote, t	--	20	20	20	20	40	71	71	71	94	120	120	120
ΣQ_u ptes/ qnA	0	0.5	1	1.5	2	0.5	1	1.5	2	0.5	1	1.5	2
FACTOR DE SEGURIDAD													
* Factor de seguridad global del sistema	1.6	1.8	2	2.1	2.3	1.8	2	2.2	2.3	1.8	2	2.2	2.4
* Factor de seguridad parcial de la placa	1.6	2	2.6	3.3	4.6	2	2.9	4	5.6	2.1	2.9	4.4	9.7
* Factor de seguridad como pila equivalente	--	2.2	2.2	2.2	2.2	2.9	2.9	2.9	2.9	4	4	4	4
CONDICIÓN CORTO PLAZO													
* Asentamiento elástico, S _d , cm	15	9	7	5	3	9	7	5	4	10	7	5	3
* Capacidad utilizada del pilote, %	--	90	90	83	75	96	95	90	90	97	97	97	90
* % (peso edificio) tomado por la placa	100	81	62	49	37	80	59	40	24	79	57	39	23
* % (peso edificio) tomado por los pilotes	0	19	38	51	63	20	41	60	76	21	43	61	77
CONDICIÓN LARGO PLAZO													
* Asentamiento por consolidación, S _c , cm	105	81	70	62	60	55	23	20	20	43	18	15	15
* Asentamiento total, S _T , cm	120	90	77	67	63	64	30	25	24	53	25	20	18
* Capacidad utilizada del pilote, %	--	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
* % (peso edificio) tomado por la placa	100	79	58	39	16	79	56	34	16	78	56	37	14
* % (peso edificio) tomado por los pilotes	0	21	42	61	84	21	44	66	84	22	44	63	86

6.5 Análisis de resultados

Del análisis de las Figuras 13 y 14 se concluye:

- Para una misma longitud de pilotes, a mayor cantidad de pilotes se generan mayores alivios de esfuerzos en los metros superiores del suelo pero se incrementan los esfuerzos inducidos en el suelo por debajo del nivel de la punta de los pilotes.
- Comparando entre sí los casos estudiados de igual porcentaje de carga no compensada tomado por los pilotes a la falla para longitudes variables de los pilotes, se tiene que a mayor longitud de los pilotes es mayor el tramo superior del depósito de suelo que experimenta alivios o decrementos de esfuerzos verticales inducidos por la cimentación y, a su vez, son menores los incrementos de esfuerzo inducidos cerca de la punta de los pilotes y a profundidades mayores.
- La ley de variación con la profundidad del incremento máximo de esfuerzos verticales inducidos (correspondiente al nivel de las puntas de los pilotes) es semejante a la correspondiente a la disipación de presiones para la cimentación de placa corrida sin pilotes, siendo el caso que más se ajusta el del número de pilotes que toman a la falla el 50% de la carga no compensada del edificio. Por otro lado, para cuando los pilotes forman porcentajes mayores, 100, 150 o 200% de dicha carga, los esfuerzos inducidos cerca de la punta superan cada vez más los correspondientes a la disipación de presiones del caso de placa corrida sin pilotes.
- Con la comparación de los resultados de esfuerzos verticales inducidos dentro de la masa de suelo en profundidad por los sistemas placa – pilotes variando la

longitud de los pilotes y/o el porcentaje de carga neta no compensada tomado por los pilotes, se pueden plantear y analizar casos de estudio de sensibilidad en una forma más racional y metodológica y, así, lograr la optimización de la solución.

Del análisis de los resultados de la interacción placa – pilotes – suelo y del comportamiento (factor de seguridad y asentamientos a corto y a largo plazo) presentados en la Tabla 6 se puede concluir que:

- El factor de seguridad global contra una falla por capacidad portante del sistema de cimentación crece entre 12.5 y 50% aproximadamente con respecto al de referencia para el caso de placa sin pilotes, cuando se aumenta la cantidad de pilotes que tomen desde 50% hasta el 200% de la carga neta no compensada del edificio.
- El factor de seguridad parcial de la placa se aumenta significativamente, llegando a valores entre 2 y 6 al aumentar la cantidad de pilotes y su longitud.
- El factor de seguridad del sistema placa – pilotes tratado como una pila equivalente se incrementa progresiva y significativamente con la longitud de los pilotes, con incrementos que van desde el 38% hasta el 150% con respecto al del sistema de placa sin pilotes, para longitudes de pilotes que van desde 10 hasta 30m, y es prácticamente independiente de la cantidad de pilotes.

Estos resultados se presentan gráficamente en la Figura 15.

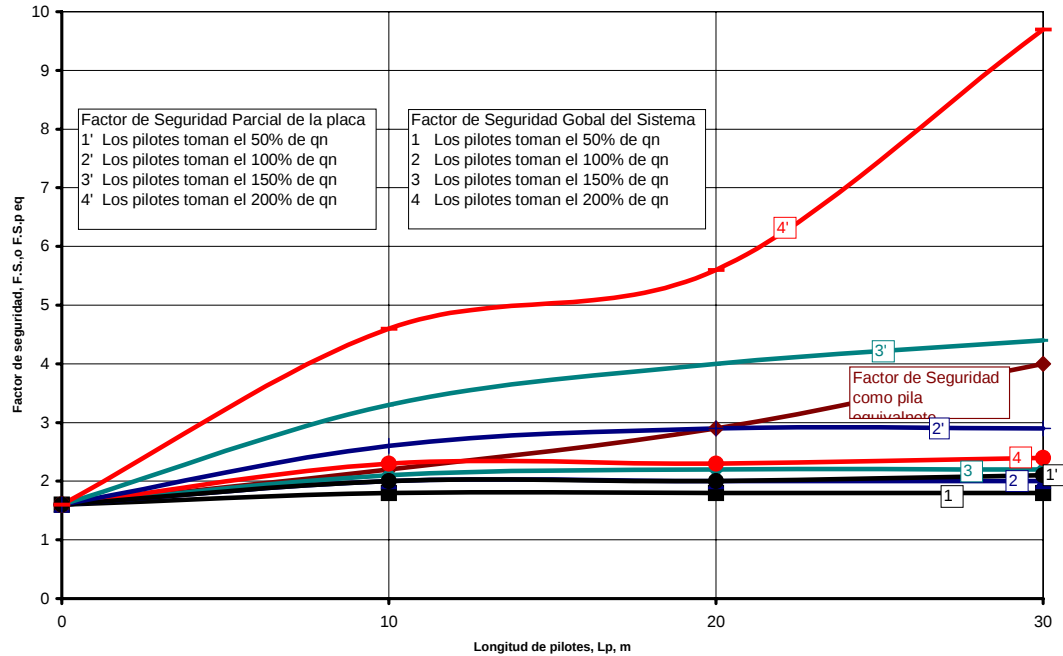


FIGURA 15 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
VARIACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD CONTRA FALLA POR CAPACIDAD PORTANTE CON LA LONGITUD Y LA CANTIDAD DE PILOTES DE LOS SISTEMAS PLACA – PILOTES

El asentamiento “elástico”, inmediato o por distorsión, S_d , de la cimentación decrece significativamente con la incorporación de los pilotes, y la reducción es mayor entre mayor sea la cantidad de pilotes, es decir, entre mayor sea el porcentaje de carga no compensada del edificio que toman los pilotes trabajando a la falla. Tales asentamientos elásticos reducidos son esencialmente independientes de la longitud de los pilotes si se comparan grupos de pilotes que toman igual porcentaje de carga neta no compensada.

- El campo de deformaciones y de asentamientos inmediatos dentro de la masa de suelo lleva a que a corto plazo la carga tomada por los pilotes esté entre el 75 y 97% de su capacidad última, dándose los valores menores para el caso de longitud corta de pilotes (10m) y cantidad muy alta de pilotes (tomen el 200% de la carga neta no compensada) y los valores mayores para el caso de gran

longitud de pilotes (30m) y moderada cantidad de pilotes (tomen el 50 al 100% de la carga neta no compensada).

- Para los casos estudiados de igual longitud de pilotes, el porcentaje de la carga última con que trabajan a corto plazo es mayor entre menor sea la cantidad de pilotes.
- La distribución porcentual del peso del edificio tomado por la placa y por los pilotes a corto plazo varía desde 81% - 19% con pilotes cortos (10m) y poca cantidad (a la falla toman 50% de carga neta no compensada) hasta 23%-77% con pilotes largos (30m) y gran cantidad (a la falla toman 200% de carga no compensada).
- Cuando la cantidad de pilotes toma el 50% de la carga no compensada la distribución porcentual del peso del edificio tomado por la placa y por los pilotes se mantiene aproximadamente en 80% - 20% para las tres longitudes de pilotes estudiadas, 10, 20 y 30m.
- El asentamiento por consolidación a largo plazo, S_{cp} , decrece significativamente con la incorporación de pilotes, y la reducción es mayor con pilotes de mayor longitud y con mayor cantidad de pilotes, es decir, con mayor porcentaje de carga no compensada tomado por los pilotes. Sin embargo, se observa que la reducción del asentamiento es marginal o nulo cuando la cantidad de pilotes pasa de los que toman 150% a los que toman 200% de la carga no compensada.

- Los asentamientos de largo plazo, elásticos más de consolidación, producen una interacción entre pilote y suelo que hace que los pilotes lleguen a su condición de falla.
- A largo plazo la distribución porcentual del peso del edificio tomado por la placa y por los pilotes varía desde 79% - 21% para cantidades de pilotes que a la falla tomen el 50% de la carga no compensada, hasta 15% - 85% para cantidades de pilotes que a la falla tomen el 200% de la carga no compensada. Además se observa que dicha distribución porcentual a largo plazo es prácticamente independiente de la longitud de los pilotes en los casos estudiados (10 a 30m)

En las Figuras 16 y 17 se presentan gráficamente los resultados de la variación de los asentamientos de los sistemas placa – pilotes y de la capacidad utilizada de los pilotes, a corto y largo plazo, con la longitud y la cantidad de pilotes del sistema.

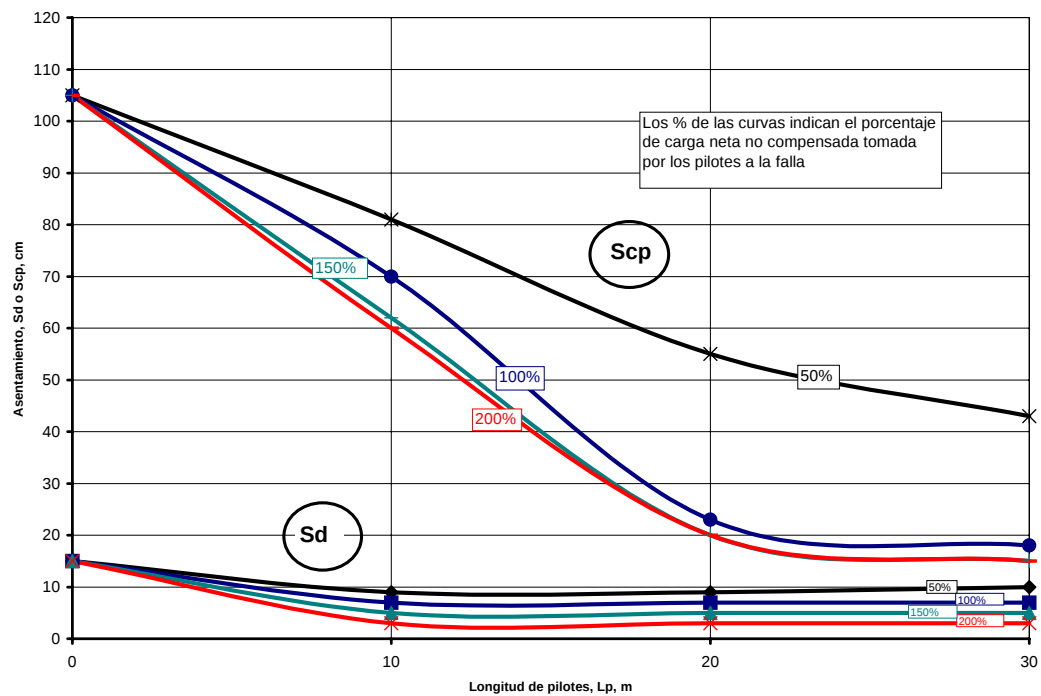


FIGURA 16 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
VARIACIÓN DEL ASENTAMIENTO ELÁSTICO, S_d , Y DEL ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN, Sc_p ,
CON LA LONGITUD Y LA CANTIDAD DE PILOTES DE LOS SISTEMAS PLACA PILOTES

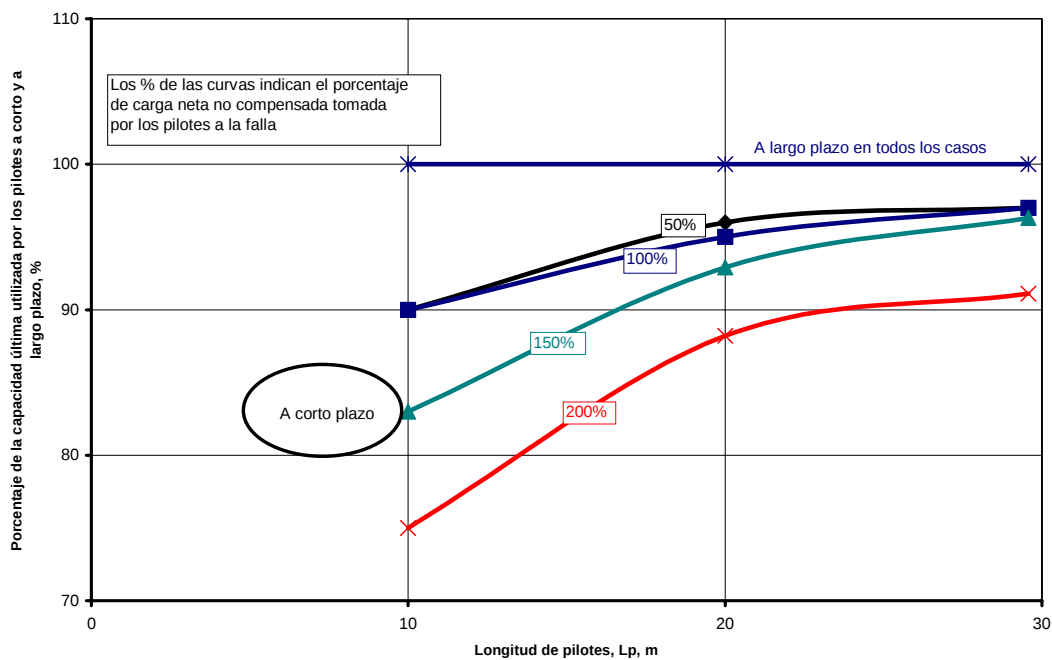


FIGURA 17 HOTEL COSMOS 100 - TORRE DE LA ETAPA II
VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE LA CAPACIDAD UTILIZADA POR LOS PILOTES A CORTO Y A LARGO PLAZO CON LA LONGITUD Y LA CANTIDAD DE PILOTES DE LOS SISTEMAS PLACA-PILOTE

En la Tabla 7 se presenta la distribución porcentual del peso del edificio tomado por la placa y por los pilotes en función de la longitud y de la cantidad de pilotes, tanto para corto como para largo plazo.

TABLA 7 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL PESO DEL EDIFICIO TOMADO POR LA PLACA Y POR LOS PILOTES EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD Y DE LA CANTIDAD DE PILOTES, TANTO PARA CORTO COMO PARA LARGO PLAZO

DESCRIPCIÓN	CASO						
	1	2	6	10	3	7	11
PILOTES							
* Longitud, m	--	10	20	30	10	20	30
$\Sigma Qu \text{ ptes/ } qnA \times 100, \%$	0	50	50	50	100	100	100
CONDICIÓN CORTO PLAZO							
* % (peso edificio) tomado por la placa	100	81	80	79	62	59	57
* % (peso edificio) tomado por los pilotes	0	19	20	21	38	41	43
CONDICIÓN LARGO PLAZO							
* % (peso edificio) tomado por la placa	100	79	79	78	58	56	56
* % (peso edificio) tomado por los pilotes	0	21	21	22	42	44	44

DESCRIPCIÓN	CASO					
	4	8	12	5	9	13
PILOTES						
* Longitud, m	10	20	30	10	20	30
$\Sigma Qu \text{ ptes/ } qnA \times 100, \%$	150	150	150	200	200	200
CONDICIÓN CORTO PLAZO						
* % (peso edificio) tomado por la placa	49	40	39	37	24	23
* % (peso edificio) tomado por los pilotes	51	60	61	63	76	77
CONDICIÓN LARGO PLAZO						
* % (peso edificio) tomado por la placa	39	34	37	16	16	14
* % (peso edificio) tomado por los pilotes	61	66	63	84	84	86

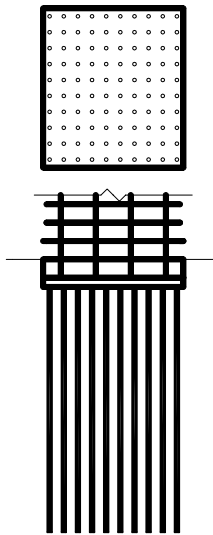
7 TORRE DE LA ETAPA II: ALTERNATIVA DE CIMENTACIÓN PROFUNDA CON PILOTES LARGOS DE FRICCIÓN

7.1 Resultados del Análisis

Con el fin de comparar su comportamiento (margen de seguridad y asentamientos esperados) con el de las soluciones de cimentación de losa corrida sin pilotes y de sistemas placa – pilotes descritas en los capítulos 5 y 6, se planteó y analizó la alternativa de cimentación profunda con pilotes largos de fricción para la torre de la Etapa II del Hotel Cosmos 100. Para pilotes pre-excavados y fundidos in-situ de 60cm de diámetro y 40m de longitud efectiva, los resultados encontrados se presentan en la Tabla 8:

**TABLA 8 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE CIMENTACIÓN PROFUNDA CON PILOTES LARGOS DE FRICCIÓN**

Diámetro de Pilotes, Bp,cm	60
Longitud Efectiva de pilotes, Lp, m	40
Capacidad Última Individual del Pilote, Qui, t	230
Peso de la torre, Wedif, t	6800
Factor de eficiencia del grupo, ef:	0.75
Número de pilotes en el grupo, Np:	100
Elemento de transmisión de carga y amarre de pilotes:	Losa Corrida
Número de filas:	10 x 10
Espaciamiento centro a centro entre pilotes, m	2.3 – 2.6
Factor de seguridad del grupo de pilotes, F.S.	2.5
Factor de seguridad como pila equivalente, F.S. p. eq.	5.3
Asentamiento inmediato, a corto plazo, Sd, cm	0.5
Asentamiento por consolidación a largo plazo, Scp, cm	10



En la Figura 18 se presenta en planta y en perfil la alternativa de cimentación profunda con 100 pilotes de 0.60m de diámetro y 40m de longitud uniformemente distribuidos, con un espaciamiento promedio de aproximadamente 2.5m, bajo una losa corrida aligerada de 1.2m de espesor.

FIGURA 18

HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
ALTERNATIVA DE CIMENTACIÓN PROFUNDA CON PILOTES LARGOS DE FRICCIÓN: PLANTA Y PERFIL

En la Figura 19 se presenta la variación del esfuerzo vertical neto inducido por el grupo de pilotes largos de fricción trabajando en grupo en un factor de seguridad de aproximadamente 2.5, evaluada por el método de León y Reséndiz (1979), y considerando que no se presenta el fenómeno de fricción negativa. En dicha figura también se muestra, para su comparación, la variación del esfuerzo vertical neto inducido para la solución de cimentación de losa corrida sin pilotes y para los casos estudiados de placa – pilotes, donde los pilotes, trabajando a la falla, toman el 150% de la carga no compensada del edificio.

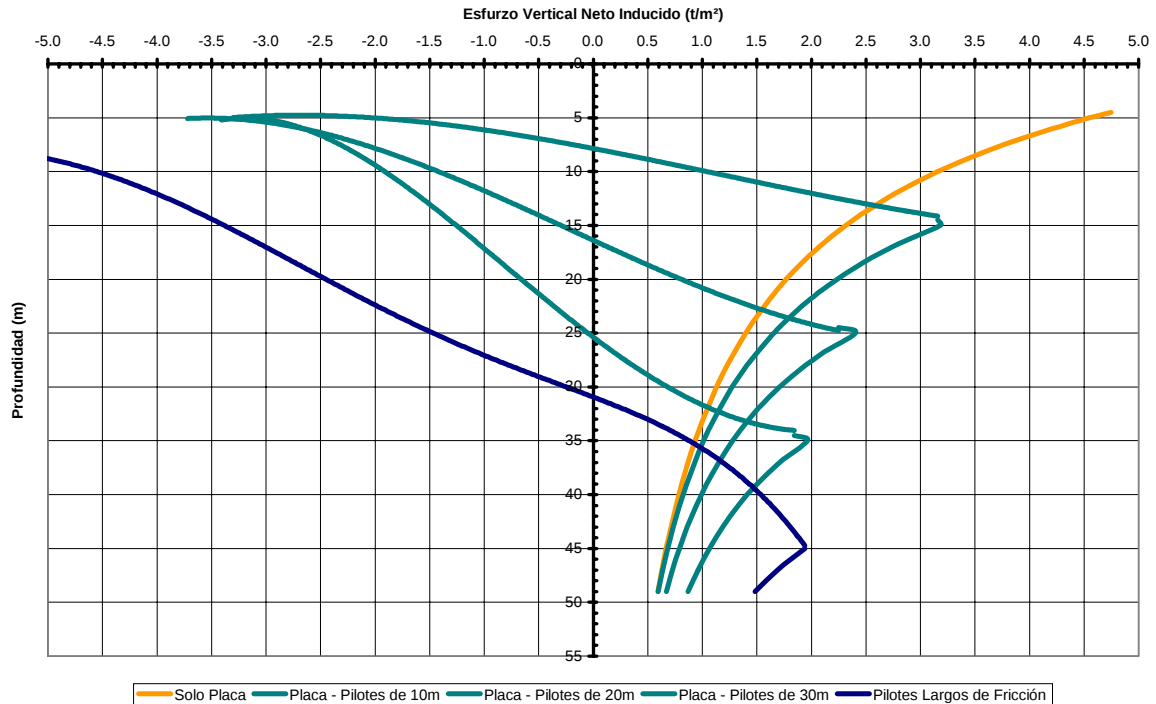


FIGURA 19 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
 VARIACIÓN DEL ESFUERZO VERTICAL NETO INDUCIDO
 ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN DE LOSA CORRIDA SIN PILOTES, SISTEMAS PLACA – PILOTES (CASO $\Sigma Q_{upilotes} = 1.5 q_n A_{placa}$), Y CIMENTACIÓN PROFUNDA CON PILOTES LARGOS DE FRICCIÓN

7.2 Aparición y efecto de la fricción negativa

Aunque una cimentación profunda de pilotes no alcance un estrato inferior significativamente más competente que los suelos superiores existe la posibilidad de que se genere fricción negativa en los tramos más superficiales de los fustes de los pilotes cuando rellenos recientes o abatimientos recientes o futuros del nivel freático induzcan procesos de consolidación superpuestos a los originados por las propias cargas del edificio.

Es así como los desplazamientos relativos hacia abajo del suelo con respecto a los pilotes en los metros superiores inducirían unas fuerzas de arrastre al sistema de

pilotes que aumentarían las cargas aplicadas y disminuirían las fuerzas resistentes, disminuyendo drásticamente el margen de seguridad de la cimentación.

Se desarrolló una simulación de esta eventualidad para la torre de la Etapa II del Hotel Cosmos 100 con la cimentación de 100 pilotes de 40m de longitud, estimando la generación de fricción negativa en los 10 metros superiores de los fustes de los pilotes, encontrándose que el factor de seguridad de 2.5 (sin fricción negativa) se reducía a 1.5 aproximadamente. En la Figura 20 se muestra esquemáticamente el concepto discutido sobre la fricción negativa.

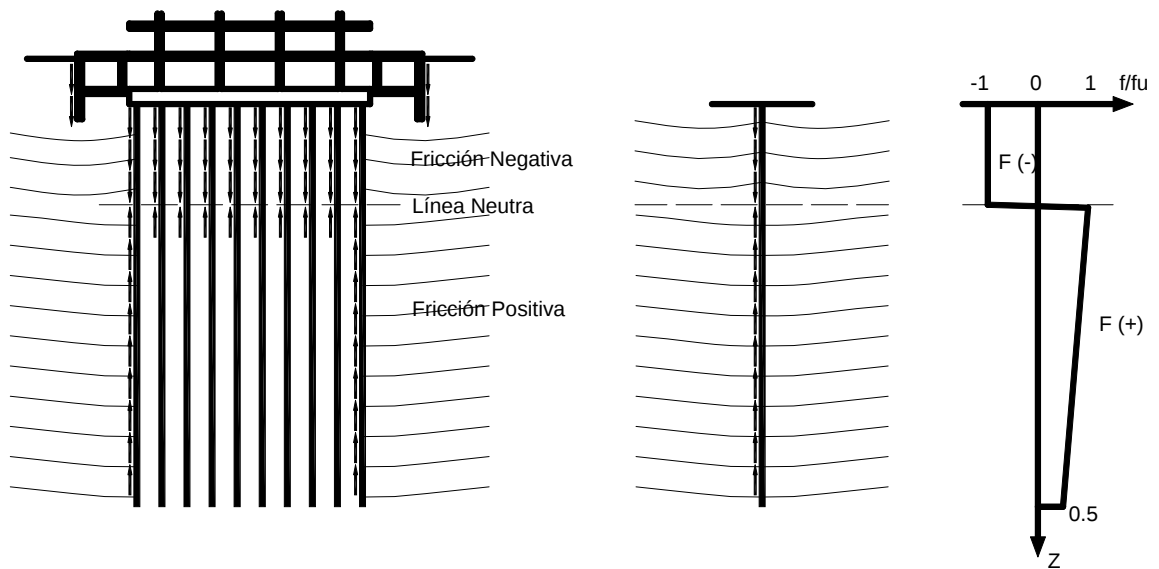


FIGURA 20 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
FENÓMENO DE FRICCIÓN NEGATIVA SOBRE LA CIMENTACIÓN PROFUNDA DE PILOTES LARGOS DE
FRICCIÓN

8 COMPARACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN

8.1 Comparación de alternativas de cimentación estudiadas

En la Figura 21 se muestran en planta y en perfil los diferentes esquemas de cimentación planteados y analizados cuyos resultados se presentan en los Capítulos 5, 6 y 7.

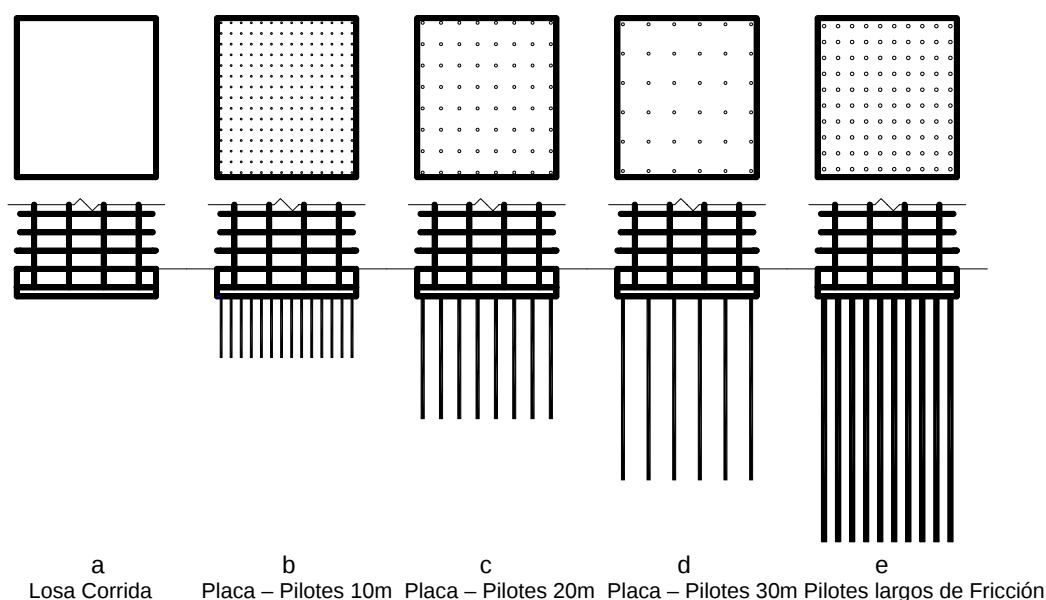


FIGURA 21 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
RESUMEN DE ESQUEMAS DE CIMENTACIÓN PLANTEADOS Y ANALIZADOS PLANTA Y PERFIL

Teniendo en cuenta criterios de márgenes aceptables de seguridad (FS) y los estimativos de los asentamientos esperados para cada una de las alternativas analizadas de cimentación, así como las consideraciones sobre la minimización de los movimientos efectivos relativos entre las torres de las Etapas I y II, y con base en los resultados presentados en los capítulos anteriores, se concluyó que:

- La solución de cimentación de losa corrida sin pilotes para la torre de la etapa II es totalmente inaceptable por su factor de seguridad muy bajo (1.6) y

asentamientos elásticos y por consolidación muy altos (15 y 105cm respectivamente).

- Las soluciones de placa – pilotes aumentan el factor de seguridad contra falla por capacidad portante (2.0 – 4.0). Para alcanzar un FS aceptable del orden de 2.5 se requiere que la cantidad de pilotes sea tal que los pilotes, trabajando a la falla, tomen, por lo menos, el 100% de la carga no compensada del edificio.
- Para las soluciones estudiadas placa – pilotes los asentamientos inmediatos, S_d , se reducen a valores entre 3 y 9cm, siendo los menores los correspondientes a los casos con un número de pilotes tal que tomen a la falla el 200% de la carga no compensada, y los mayores para los casos con un número de pilotes tal que tomen a la falla sólo el 50% de la carga no compensada.
- Para las soluciones placa – pilotes con pilotes de 10m de longitud los asentamientos por consolidación estimados siguen siendo muy altos e inadmisibles (60 – 80cm).
- Para las soluciones placa – pilotes con pilotes de 20m de longitud los asentamientos por consolidación se reducen a valores entre 20 y 55cm, y se reducen a 20 – 23cm cuando la cantidad de pilotes es la necesaria para tomar por lo menos el 100% de la carga neta no compensada del edificio.
- Para las soluciones placa – pilotes con pilotes de 30m de longitud los asentamientos por consolidación estimados varían entre 15 y 43cm, pero se limitan a 15 – 18cm si el número de pilotes es tal que tomen por lo menos el 100% de la carga no compensada del edificio.

- Comparando los casos placa – pilotes de una misma longitud ya no se logran reducciones significativas en los asentamientos elásticos, S_d , y por consolidación, S_{cp} , estimados al aumentar de 150 a 200% de porcentaje de carga no compensada que tomen los pilotes.
- La reducción de asentamientos por consolidación estimados es más significativa al aumentar de 10 a 20m de longitud de los pilotes que al aumentarla de 20m a 30m.
- Para la solución de cimentación profunda con pilotes de 40m de longitud los asentamientos por consolidación estimados para el largo plazo son del orden de 10cm. Sin embargo esta solución es mucho más costosa que la óptima de los sistemas placa – pilotes estudiados, para un beneficio comparativo de reducción de los asentamientos por consolidación de tan sólo 5 – 10cm.

Con base en estas conclusiones se seleccionó la solución de cimentación placa – pilotes con 64 pilotes de 50cm de diámetro y 20m de longitud efectiva como la solución adecuada para la torre de la Etapa II. Con esta cantidad, los pilotes a la falla toman aproximadamente 1.5 veces la carga neta no compensada del edificio. Para este caso el factor de seguridad es del orden de 3.0, los asentamientos elásticos estimados son de 5cm y los asentamientos por consolidación de largo plazo del orden de 20cm. Estos asentamientos por consolidación son muy similares a los estimados para la torre cilíndrica de la Etapa I desde el año 1992 en adelante, es decir, desde el momento de la conexión de las dos torres y la puesta en servicio de la torre de la Etapa II. En la Figura 22 se ilustra este concepto que sirvió para

seleccionar la solución de cimentación de la torre de la Etapa II que mejor “sincronizara” sus asentamientos de largo plazo con los que le faltaba por experimentar a la torre de la Etapa I, construida diez años antes.

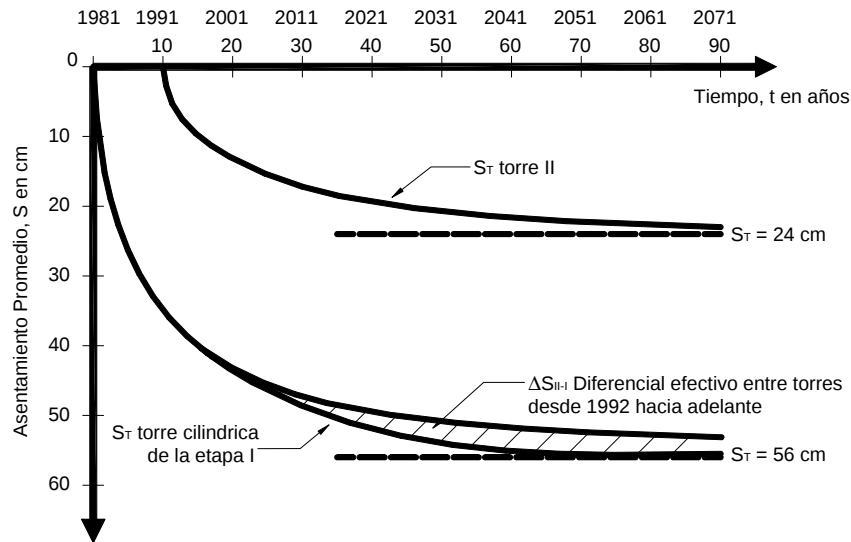


FIGURA 22 HOTEL COSMOS 100 – TORRES DE LAS ETAPAS I Y II
DESARROLLO DE LOS ASENTAMIENTOS CON EL TIEMPO

8.2 Optimización de la distribución espacial de los pilotes

Los esquemas de sistemas placa – pilotes planteados y analizados como alternativas de cimentación para la torre de la Etapa II del Hotel Cosmos 100, cuyos resultados se presentaron en el Capítulo 6, incluían pilotes uniformemente distribuidos debajo de la losa corrida. La alternativa de cimentación seleccionada consistió en un sistema placa – pilotes con 64 pilotes de 50cm diámetro y 20m de longitud, distribuidos en ocho filas en cada dirección, con espaciamientos centro a centro de 3.0m en una dirección y de 3.5m en la otra, cubriendo la mayor cantidad posible del área de la losa corrida.

En la Figura 23.a se muestra en planta y en perfil la distribución original de los 64 pilotes en 8 filas x 8 filas, para un esquema estructural simplificado de 16 columnas convenientemente espaciadas con el fin de que todas resultaran con cargas aproximadamente iguales (luces de 5.75m x 6.50m).

Se planteó y analizó una variante a la distribución original, consistente en agrupar en “racimos” de cuatro pilotes muy cerca de cada una de las columnas para reducir los momentos flectores y reducir las áreas de alto esfuerzo cortante dentro de la losa corrida. En la Figura 23.b se presenta en planta y en perfil una distribución con 16 grupos de 4 pilotes cada uno. Se estableció que los resultados del comportamiento general del sistema en cuanto a margen de seguridad contra una falla global de capacidad portante y en cuanto a asentamientos elásticos y por consolidación son muy similares a los obtenidos con la distribución uniforme original de los pilotes.

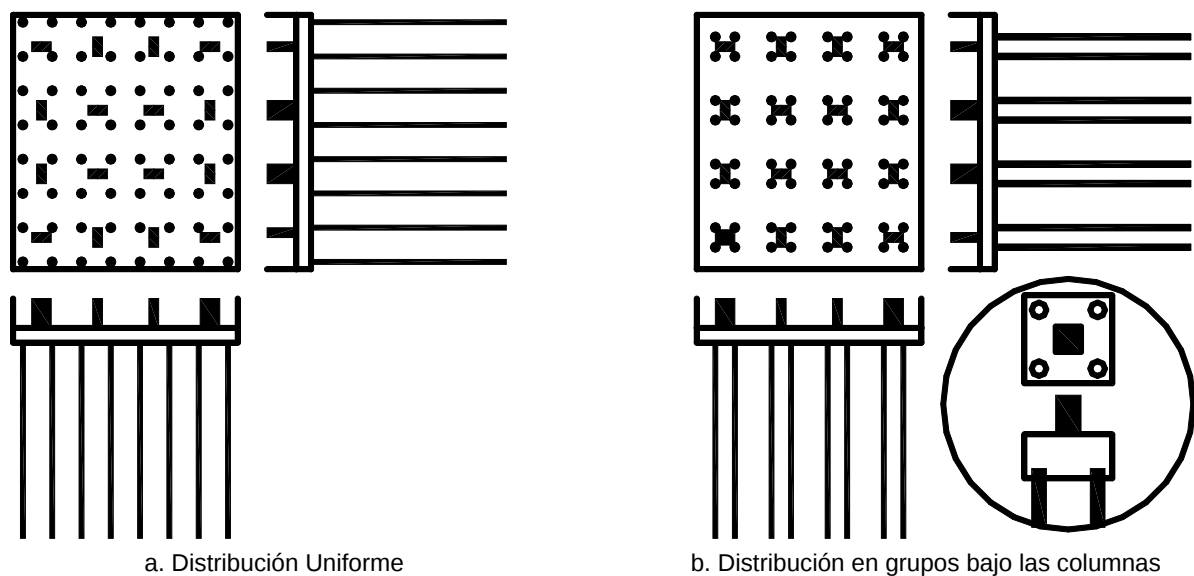


FIGURA 23 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
SOLUCIÓN SELECCIONADA DE CIMENTACIÓN PLACA PILOTES
COMPARACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN UNIFORME DE PILOTES CON LA DISTRIBUCIÓN EN PEQUEÑOS
GRUPOS DE PILOTES – PLANTAS Y PERFILES

Por esta razón se adoptó y se construyó la solución de cimentación de placa – pilotes, distribuyendo los pilotes en pequeños grupos, uno para cada columna.

8.3 Seguimiento entre 1991 y 2003

Entre mediados de 1991 y de 1992 se construyó la torre de la Etapa II y registró, al término de su construcción un asentamiento del orden de 4cm, muy similar a los 5cm estimados de asentamiento “elástico” estimados en los análisis. Entre 1992 y 2003, once años, ha presentado un asentamiento promedio del orden de 7cm, que corresponda al 35% de los asentamientos últimos por consolidación, estimados en 20cm aproximadamente. En la Figura 22 se muestra el desarrollo del asentamiento promedio realmente experimentado por la torre de la etapa II del Hotel Cosmos 100, así como el asentamiento diferencial efectivo registrado entre las torres de las Etapas I y II en el período 1992 – 2003 y el pronóstico para los siguientes 50 años.

En resumen, el comportamiento de la cimentación y de la estructura de la torre de la Etapa II del Hotel Cosmos 100 en Bogotá ha sido ampliamente satisfactorio desde su construcción 1991 hasta hoy y se espera que así continúe a lo largo de toda su vida útil. Además el desarrollo de sus asentamientos totales y de los asentamientos diferenciales con el tiempo ha sido similar al anticipado por los análisis previos a su construcción. Se ha cumplido hasta el momento en alto grado el objetivo de mantener reducidos los movimientos relativos entre las dos torres (Figura 22) y se han comprobado tanto el modelo de caracterización del suelo del sitio como las

herramientas analíticas que permitieron la comparación de alternativas de cimentación, y la selección y la optimización de la que se considero más adecuada.

9 MODELACIÓN DE LAS CARGAS Y REACCIONES EN LA CIMENTACIÓN

Para desarrollar los análisis y diseños estructurales de la cimentación se modelaron las cargas y reacciones teniendo en cuenta los resultados de interacción y de comportamiento obtenidos para la alternativa seleccionada.

9.1 Condición a corto plazo

A corto plazo los pilotes trabajan al 90% de su capacidad última, estimada en 71 toneladas, es decir, toman una carga de 64 toneladas cada uno, lo cual significa que la placa toma el 40% del peso total de la torre mientras los pilotes toman el 60%. La placa aplica al suelo una presión promedio de contacto, $\bar{q}$, de 4.6 t/m² y el asentamiento elástico promedio estimado es de 5cm.

Con estos resultados se modeló el sistema de cargas y de reacciones contra la placa a corto plazo, como se muestra en la Figura 24.a. La reacción del terreno se presenta tanto en términos de presión como en términos de módulo de reacción de la subrasante.

En ambos casos se adoptó una reacción variable con valores mayores en la mitad periférica del área de la placa y menores en la mitad central, con una relación dos a uno entre tales valores, siguiendo las consideraciones conceptuales que se ilustran

en la Figura 24, sobre la relación entre rigidez estructural y de la cimentación, la presión de contacto, los asentamientos y el módulo de reacción de la subrasante en suelos arcillosos blandos.

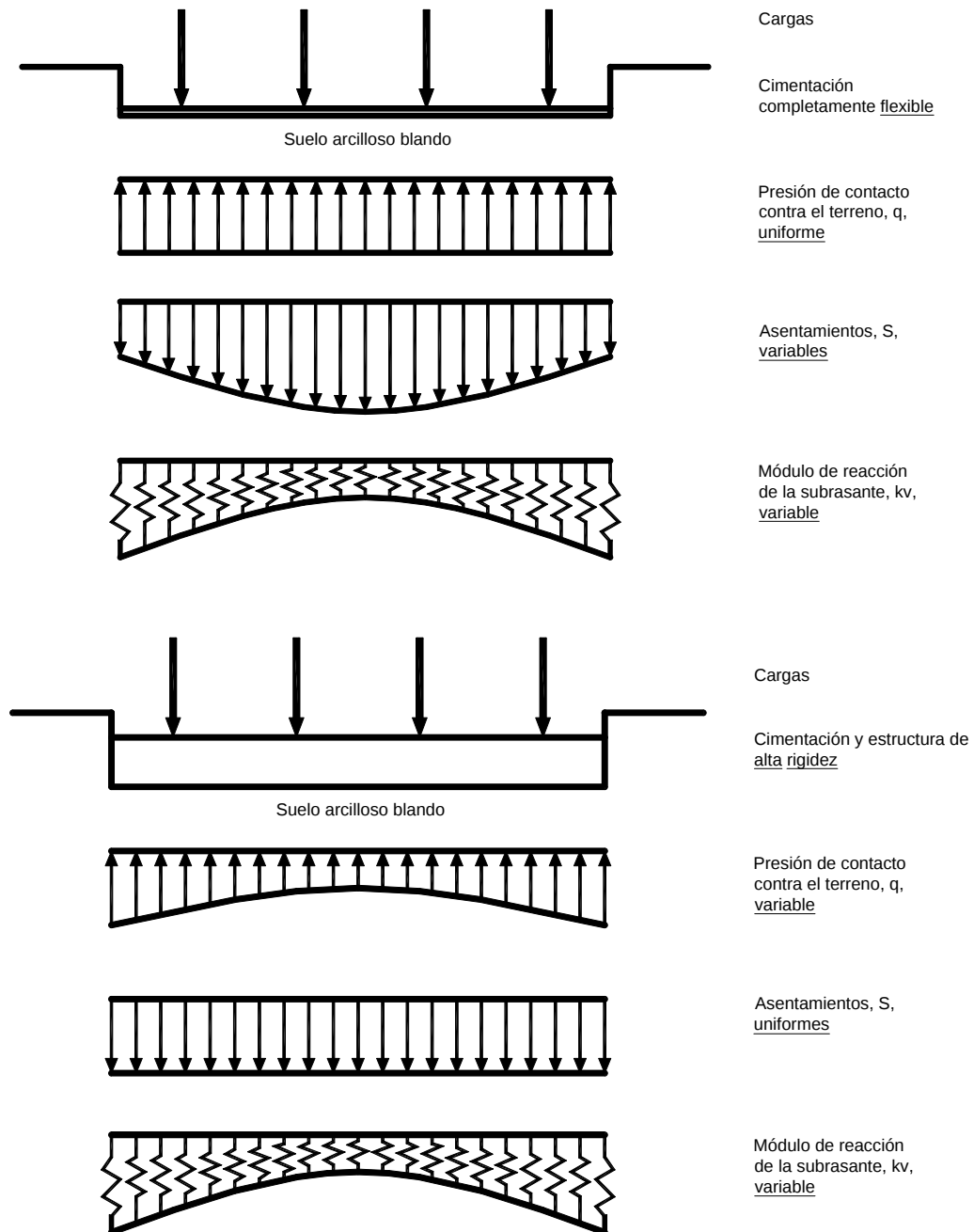
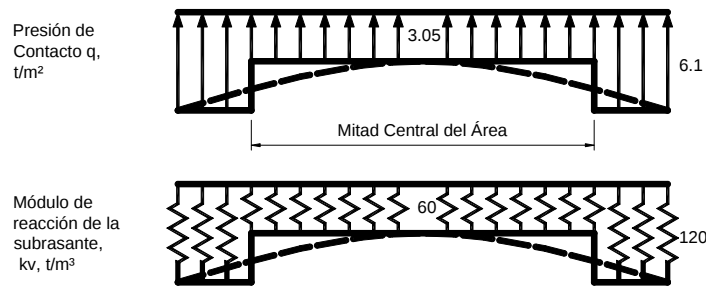
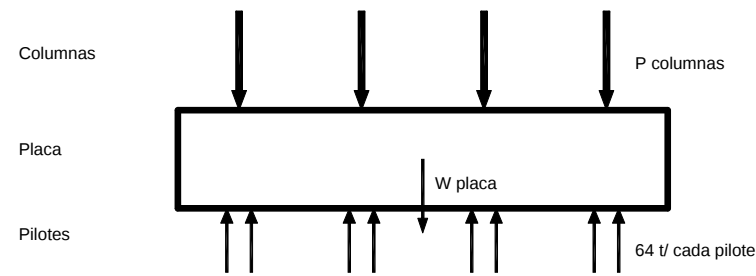
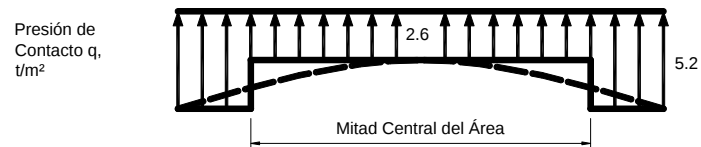
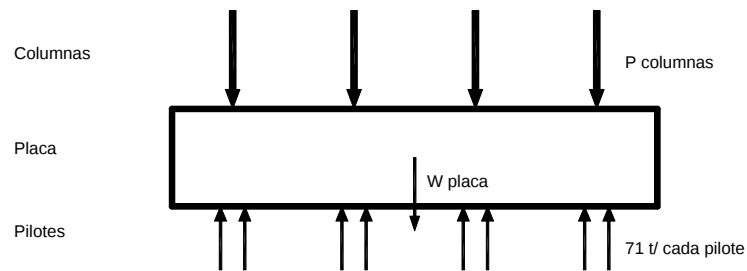


FIGURA 24
RELACIÓN ENTRE RIGIDEZ ESTRUCTURAL, PRESIÓN DE CONTACTO, ASENTAMIENTOS Y MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE EN SUELOS ARCILLOSOS BLANDOS



a. Corto Plazo



b. Largo Plazo

FIGURA 25 HOTEL COSMOS 100 – TORRE DE LA ETAPA II
MODELACIÓN DE LAS CARGAS Y REACCIONES EN LA CIMENTACIÓN

9.2 Condición a largo plazo

De acuerdo con los análisis del desarrollo de la interacción placa – pilotes – suelo descrita en el Capítulo 6, a largo plazo los pilotes trabajarán al 100% de su capacidad última estimada en 71 toneladas por pilote, lo cual significa que la placa tomará el 34% del peso total de la torre mientras los pilotes tomarán el 66%. La placa aplicará en promedio una presión de contacto de 3.9 t/m^2 al suelo de fundación, y el asentamiento de largo plazo estimado será del orden de 25cm. En la Figura 25.b se presenta la modelación del sistema de cargas y de reacciones contra la placa a largo plazo. Se consideró que el módulo de reacción de la subrasante se mantendría muy similar al establecido para el corto plazo porque los asentamientos de consolidación que se irán a producir, estimados en cerca de 20cm, no son causados por la presión de contacto de la placa con el suelo, pues la presión neta de contacto es negativa, sino por el campo de esfuerzos inducidos por las cargas tomadas por los pilotes.

Debe notarse que tanto para corto plazo como para largo plazo las cargas tomadas por los pilotes son conocidas, 64 y 71 toneladas por pilote respectivamente, obtenidas del análisis de interacción placa – pilotes – suelo que consideró los asentamientos elásticos y de consolidación que se irían presentando, y se incorporaron dichas cargas al análisis y al diseño estructurales de la placa como reacciones conocidas, independientes de la deformación misma que presente la losa corrida.

10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

El desarrollo del análisis comparativo de los diferentes sistemas de cimentación planteados para la torre de la Etapa II del Hotel Cosmos 100 y sus resultados presentados en los Capítulos 5 a 9 permiten concluir que:

- El sistema de cimentación del tipo placa – pilotes aumenta el margen de seguridad contra la falla por capacidad portante y reduce los asentamientos elásticos o inmediatos y, principalmente, los asentamientos por consolidación, con respecto a los correspondientes a una solución de losa corrida sin complemento de pilotes.
- La longitud y la cantidad adecuadas de los pilotes que complementan el trabajo de la placa dependen en un caso específico de factores tales como:
 - El perfil de la presión de preconsolidación y de la relación de sobreconsolidación del suelo y, en general, de la variación de la resistencia y de la compresibilidad del suelo con la profundidad.
 - La capacidad última individual de los pilotes.
 - El grado de compensación del peso del edificio por el alivio debido a la excavación y el valor mismo de la presión promedio no compensada.
 - Los valores de asentamientos a corto y a largo plazo que se consideren aceptables para la integridad estructural y arquitectónica del edificio y para el buen funcionamiento de sus instalaciones.
- Los criterios básicos de la interacción placa – pilotes – suelo y la metodología de análisis aquí presentados permiten obtener respuestas lógicas y racionales sobre la capacidad utilizada de los pilotes, la repartición de las cargas del edificio entre

la placa y los pilotes y los asentamientos esperados, a corto y a largo plazo, para un determinado esquema de solución.

- Para el caso particular del edificio aquí presentado se obtuvo que la solución más adecuada técnica y económicamente entre las estudiadas fue la cimentación del tipo placa – pilotes con pilotes de 20 – 30 metros de longitud y una capacidad y cantidad tales que, trabajando a la falla, tomarán entre el 100% y el 150% de la carga no compensada.
- La optimización de la cimentación placa – pilotes es muy sensible a los patrones de variación de la presión de preconsolidación y de los parámetros de compresibilidad con la profundidad. Por lo tanto, los resultados numéricos del caso presentado no son aplicables directamente a otros casos con perfiles diferentes de suelo, o con pesos del edificio y porcentajes de compensación diferentes a los aquí tratados.
- Finalmente, se puede concluir que los sistemas de cimentación placa – pilotes están mejor preparados que las soluciones de placa corrida sin pilotes o que las soluciones de pilotes largos de fricción. Para sobrellevar satisfactoriamente los procesos tardíos de compresión secundaria y los procesos de subsidencia regional por descenso continuado del nivel freático. En efecto, la subsidencia regional producirá excesivos asentamientos de las cimentaciones superficiales; por otro lado, producirá fenómenos de fricción negativa en la parte superior del fuste en la solución de cimentación profunda con pilotes largos de fricción, reduciendo drásticamente el factor de seguridad de la cimentación, mientras que sistemas placa – pilotes estarán exentos de la aparición de dicho fenómeno.

- Por otro lado, se recomienda aplicar sistemáticamente los criterios y la metodología aquí presentada a otros casos, reales o virtuales, con pesos de edificio y alivios diferentes y con perfiles de suelos lacustres diferentes al del caso particular de este trabajo, para incorporar tales variables al estudio de sensibilidad y al proceso de optimización de soluciones placa – pilotes en el depósito lacustre de Bogotá.
- Se recomienda que tales desarrollos adicionales para un mejor entendimiento y una mejor aplicación de sistemas placa – pilotes en Bogotá se respalden con más resultados de pruebas de carga de pilotes y con el monitoreo de otros casos reales.

11 AGRADECIMIENTOS

Doy mis sinceros agradecimientos a los directivos de la firma Inversiones Libra Limitada, propietaria del Hotel Cosmos 100, por haberme solicitado desarrollar el estudio de suelos y la asesoría geotécnica para la construcción de la segunda etapa del hotel, y por dar su autorización para divulgar los resultados de los análisis de cimentación y del monitoreo, a lo largo de 22 y 12 años respectivamente, del comportamiento de las Torres I y II.

Agradezco a los estudiantes de ingeniería civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería, Claudia Catalina Prieto y Diego Andrés Cerinza, por su colaboración en los análisis y en la graficación de resultados, y a Yasmith Pesca, secretaria del

Centro de Estudios Geotécnicos de la Escuela, por su invaluable ayuda en la edición de este documento.

12 BIBLIOGRAFIA

- TOMLINSON, M. J., "Cimentaciones, Diseño y Construcción", Primera edición, Editorial Trillas, México, 1996.
- WINTERKORN, HANS, Y FANG, Hsai – Yang, Editores, "Foundation engineering handbook", Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1975.
- DAS, Braja, "Principios de ingeniería de cimentaciones", International Thomson Editores, Cuarta Edición, México, 2001.
- MEYERHOF, George, "Bearing capacity and settlement of pile foundations", The eleventh Terzaghi lecture, Journal of the 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, "Calculo 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, Jorge Enrique, “Estudio de Suelos – Ampliación Hotel Cosmos 100”, Bogotá, Diciembre, 1991.

No Copiar