

# Cálculo de las expansiones, recompresiones y compresiones generadas en el suelo de apoyo por las cargas de un edificio y su cimentación

C. Zea-Constantino, G. López-Rincón & R. Rivera-Constantino  
*Departamento de Geotecnia, F. I, UNAM, México, D.F., México*



## ABSTRACT

A Procedure of calculus of expansions, re-compressions and compressions generated in the support subsoil by loads transmitted by some levels building, which could be constructed on soft subsoil of Mexico City, is presented. The foundation behaviour is analyzed with the methodology developed by the authors based on Zeevaert's point of view about deformability and compressibility modules, as expansion as re-load phenomena which are generated in the subsoil when a partially compensated foundation is constructed, which are related each other. The load phenomenon is studied with the Zeevaert's methodology. The results interpretation of laboratory tests mean adjust of curves with the proposed models and the methodology of analysis of the foundation is presented, in order to this be of utility for designers of this type of foundations in professional practice.

## RESUMEN

Se presentan el procedimiento de cálculo de las expansiones, recompresiones y compresiones generadas en el suelo de apoyo por las cargas que le transmitirá un edificio de varios niveles que podría ser construido sobre el suelo blando de la Ciudad de México. El comportamiento de la cimentación se analiza con una metodología ideada por los autores con base en los criterios de Zeevaert sobre los módulos de deformabilidad y compresibilidad tanto para el fenómeno de expansión como para el de recarga, respectivamente, que tienen lugar en campo cuando se construye una cimentación parcialmente compensada y que se relacionan entre sí. El Fenómeno de carga se estudia con la metodología propuesta por Zeevaert. Se presenta la de interpretación de los resultados de los ensayos de laboratorio mediante el ajuste de curvas con los modelos propuestos y la metodología de análisis de la cimentación con el fin de que sea de utilidad a los diseñadores de este tipo de cimentaciones en la práctica profesional.

## 1 INTRODUCCIÓN

Una solución al problema de las cimentaciones de edificios desplantados sobre el subsuelo de la Ciudad de México, caracterizado por la presencia de arcillas (CH) y limos arcillosos de muy alta compresibilidad (MH), es el uso de Cajones de Cimentación que requieren una excavación previa a una cierta profundidad donde se alojarán. La idea es tratar de compensar todo a parte del peso del edificio y su cimentación con el peso del suelo excavado para reducir el incremento de esfuerzos sobre el suelo de apoyo a valores que permitan limitar los asentamientos de la obra a valores permisibles. Se ha observado sin embargo, que el proceso no es tan simple como parece; esto es, no se trata sólo de quitar peso de suelo para compensar todo o parte del peso del edificio (lo que nos llevaría al concepto de carga neta), sino que depende de múltiples factores algunos de los cuales se derivan del Proceso Constructivo, el cuál en general obedece a acciones tendientes a limitar las posibles expansiones de los estratos de suelo por debajo del nivel máximo de excavación, entre los que se pueden contar:

- a) El abatimiento previo del nivel de aguas freáticas y como consecuencia la red de flujo.
- b) La profundidad de excavación.
- c) La superficie del terreno por excavar y consecuentemente la conveniencia de excavar por etapas.

- d) El uso de precargas.
- e) El uso de pilotes de tensión.
- f) Etc.

## 2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS

Actualmente existen muchos modelos de comportamiento que se pueden usar para interpretar los resultados de las pruebas de laboratorio tendientes a conocer las propiedades de deformabilidad y compresibilidad de suelos, desde los más simples a los más complejos se pueden mencionar:

- a) El modelo elástico (Elasticidad)
- b) Terzaghi (Consolidación Primaria)
- c) Terzaghi y Fröhlich (Primeras etapas de consolidación primaria).
- d) Zeevaert (Deformabilidad de suelos gruesos, expansibilidad de suelos finos y consolidación secundaria)
- e) Cam Clay de estado crítico (Elasto-plasticidad)
- f) Juárez Badillo (Consolidación a largo plazo después que se ha disipado la presión de poro)
- g) Fractales (Creep)
- h) Etc.

En el caso de la "Arcilla de la Ciudad de México", la propuesta de Zeevaert para la determinación de

parámetros de respuesta elástica se menciona en estas Memorias en el artículo denominado “Una investigación sobre los módulos de deformabilidad y compresibilidad de los fenómenos de expansión y recompresión en suelos finos saturados (Zea C.C., Rivera C.R., López R.G., Umaña R.J.L. y Elizalde R. E.)” en donde aparece un procedimiento que los autores proponen se debe seguir para el estudio de este fenómeno con resultados de una prueba de compresión sin confinar o en pruebas triaxiales; adicionalmente la relación expansión-recompresión se puede estudiar en función del tiempo con Zeevaert mediante su modelo de viscosidad intergranular (1984). Por otro lado para el estudio de los parámetros de compresión, se pueden seguir los lineamientos dictados por Zeevaert (1984) para las pruebas de consolidación unidimensional.

### 3 PARÁMETROS DE ANÁLISIS

Debido a que es relativamente sencillo usar programas de computadora que hacen la hipótesis de que el suelo tiene un comportamiento elástico lineal pero tomando en cuenta que en realidad un suelo arcilloso no presenta tal comportamiento, habrá que buscar (quizás por aproximaciones sucesivas) los parámetros supuestamente elásticos que representen con suficiente aproximación el comportamiento “real” del suelo. En este análisis se tienen que derivar las trayectorias de esfuerzos seguidas durante la Construcción de la Obra, ya que los Parámetros de Análisis pueden darse en función del esfuerzo vertical medio o del esfuerzo de confinamiento medio.

### 4 ANÁLISIS DE INTERACCIÓN

En el artículo denominado “Una solución directa al problema de interacción suelo-estructura (G. López-Rincón, C. Zea-Constantino Y R. Rivera-Constantino)” de estas Memorias, se propone un procedimiento para tomar en cuenta la influencia de la rigidez de la cimentación en las deformaciones del suelo de apoyo.

### 5 EJEMPLO

Supóngase un edificio de 3 niveles para uso comercial ubicado en la zona centro, Delegación Cuauhtemoc, que ocupará una superficie rectangular de 1083 m<sup>2</sup>, con 57 m de largo y 19 m de ancho.

El perfil estratigráfico del sitio se muestra en la figura 5.1 y es típico de la Zona Lacustre de la Ciudad de México caracterizada por potentes estratos de arcilla limosa intercalados por lentes de arena fina a diferentes profundidades (3.5, 9.2, 19.8 m, etc.). Existe un relleno superficial hasta las 2.4 m de profundidad. El nivel de aguas freáticas se encontró a la profundidad de 2.0 m. Los valores de los módulos de expansión (obtenidos de los resultados de las pruebas de compresión simple con un ciclo de carga y descarga) y de los pesos volumétricos a diferentes profundidades se muestran en

el mismo perfil. Los parámetros de consolidación de viscosidad intergranular de Zeevaert fueron graficados contra el esfuerzo medio, en la figura 5.2 se muestra, por razones de espacio, únicamente los de las profundidades 2.4 a 3.4 (dentro de lo que llamaremos el estrato 1).

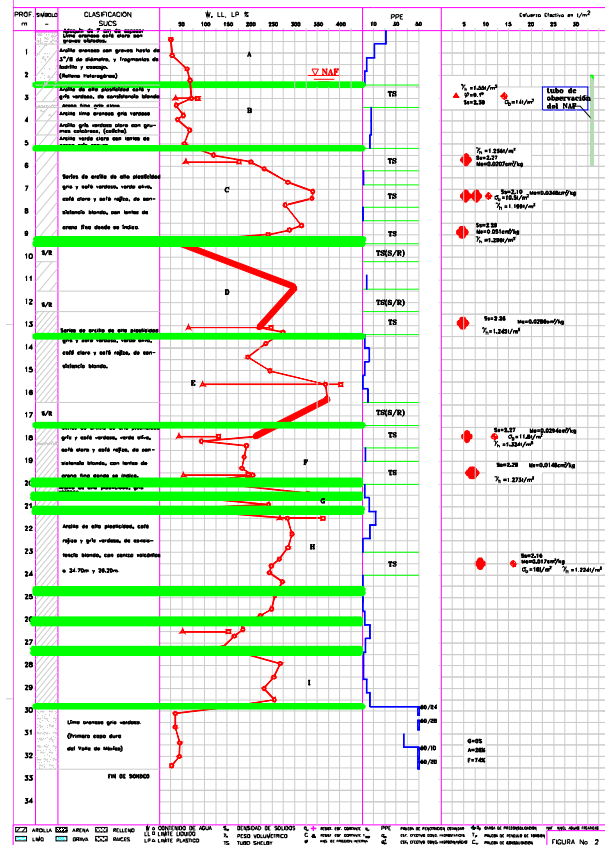
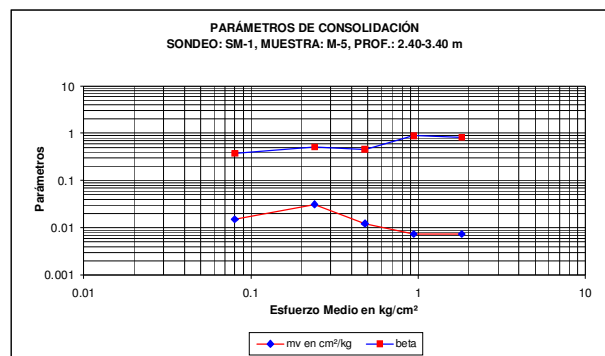


Fig. 5.1 Perfil estratigráfico típico de la Zona Centro de la Ciudad de México



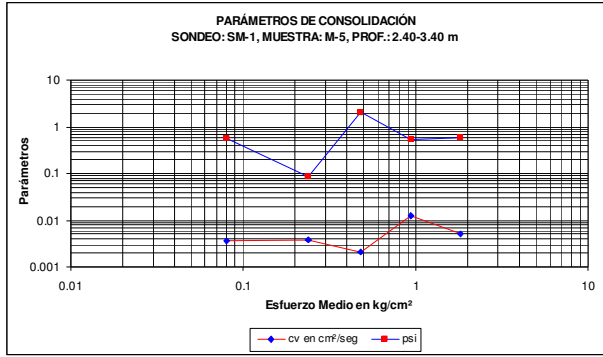


Fig. 5.2 Parámetros de Zeevaert

Para realizar el análisis se dividió la planta de cimentación en 50 placas (10 en sentido largo y 5 en sentido corto) de 5.7 m de largo y 3.8 de ancho cada una. El desplante de la cimentación fue propuesto por el Geotecnista a 2.5 m de profundidad, a partir de la cual se consideraron para el análisis 8 estratos. Con lo anterior, la descarga del edificio más su cimentación se estimó en  $4.74 \text{ t/m}^2$ .

Para determinar los parámetros de análisis, se obtuvieron las Matrices de Influencias de cada placa (Zeevaert 1980). Suponiendo una carga unitaria en cada placa se obtuvieron las influencias medias,  $I_q$ , para cada estrato de suelo. Se trazaron los diagramas de esfuerzos efectivo y se obtuvieron los parámetros para los tres casos (expansión, recompresión y compresión); se hace notar que como en el Estudio Geotecnico no se llevaron a cabo pruebas de expansión-recompresión se adoptaron los obtenidos por Zea et Al descritos en el artículo "Una investigación sobre los módulos de deformabilidad y compresibilidad de los fenómenos de expansión y recompresión en suelos finos saturados" de estas Memorias, (Figura 6); El análisis de recompresión también se efectuó con lo señalado por Zeevaert (1973) para su comparación. Los resultados de esta parte del análisis, señalados en la siguiente tabla, muestran que se tendrá una expansión media del suelo de apoyo del orden de 6.0 cm, en tanto que las recompresiones serán del orden de 12 cm y el asentamiento total será de 27 cm.

Tabla 5.1 Determinación de los Parámetros de análisis

ESFUERZOS EFECTIVOS									
D <sub>1</sub> = 2.50 m									
NAF 2.00 m									
ESTRATO #	DE (m)	A. (m)	H (m)	T <sub>90</sub> (min)	σ <sub>v0</sub> (t/m²)	u (t/m²)	σ <sub>v0</sub> (t/m²)	σ <sub>v0</sub> (t/m²)	σ <sub>v0</sub> (t/m²)
1	2.50	2.50	2.70	1.50	8.96	0.00	2.50	2.50	2.50
2	5.20	9.20	4.00	1.28	13.18	0.00	5.20	5.20	5.20
3	9.20	13.50	4.30	1.25	18.56	0.00	9.20	9.20	9.20
4	13.50	17.40	3.90	1.25	23.43	0.00	13.50	13.50	13.50
5	17.40	19.80	2.40	1.32	26.60	0.00	17.40	17.40	17.40
6	19.80	21.00	1.20	1.27	28.12	0.00	19.80	19.80	19.80
7	21.00	24.60	3.60	1.22	32.51	0.00	21.00	21.00	21.00
8	24.60	29.80	5.20	1.22	38.85	0.00	24.60	24.60	24.60

EXPANSIONES - RECOMPRESIONES (recompresiones con Zea et Al)															
Método de Zea et Al															
σ <sub>v0</sub> = 3.88 t/m²    σ <sub>v0</sub> = 3.50 t/m²    I <sub>q</sub> = 0.90															
ESTRATO #	H (cm)	σ <sub>v0</sub> (t/m²)	I <sub>q</sub> (t/m²)	Δσ <sub>exp</sub> (t/m²)	M <sub>exp</sub> (cm²/kg)	c	P <sub>exp</sub>	M <sub>exp</sub> (m³/t)	σ <sub>exp</sub> (m³/t)	expansión (m)	Alivio (%)	r <sub>exp</sub>	m <sub>1</sub> (%)	σ <sub>exp</sub> (m³/t)	recompresión (m)
1	270	4.300	0.84500	3.308	0.02070	1.5	0.877	0.0015	0.00398	0.015	75.9	1.4	0.0021	0.019	0.019
2	400	6.050	0.74370	2.920	0.04000	1.5	0.656	0.0063	0.00917	0.026	43.0	1.8	0.0041	0.043	0.043
3	410	8.000	0.57080	1.998	0.02860	1.5	0.500	0.0012	0.00476	0.011	25.0	2.2	0.0028	0.021	0.021
4	390	9.900	0.44820	1.572	0.02860	1.5	0.389	0.0009	0.00361	0.006	15.9	2.7	0.0025	0.015	0.015
5	240	11.400	0.37850	1.225	0.02210	1.5	0.341	0.0066	0.00147	0.002	11.6	3.0	0.0019	0.006	0.006
6	100	12.300	0.34480	1.207	0.01480	1.5	0.313	0.0004	0.00038	0.001	9.8	3.2	0.0012	0.001	0.001
7	340	13.350	0.30610	1.071	0.01700	1.5	0.283	0.0003	0.00133	0.002	8.0	3.5	0.0014	0.005	0.005
8	300	15.250	0.24840	0.873	0.01700	1.5	0.239	0.0003	0.00099	0.001	5.7	4.0	0.0013	0.003	0.003

RECOMPRESIONES (Zeevaert)															
W <sub>exp</sub> = 4.74 t/m²    tiempo = 15.0 años															
W <sub>rec</sub> = 3.50 t/m²															
ESTRATO #	L <sub>q</sub> (cm)	Δσ <sub>rec</sub> (t/m²)	σ	m <sub>1</sub> (kg/cm²)	c <sub>u</sub> (cm²/kg)	β	ξ	T <sub>v</sub>	K <sub>exp</sub>	Δσ <sub>rec</sub> (t/m²)	P <sub>rec</sub>	F(T <sub>v</sub> )	σ <sub>rec</sub> (m³/t)	σ <sub>rec</sub> (m³/t)	recompresión (m)
1	200	3.308	0.285	0.0270	0.02070	0.4500	0.1400	31.93	0.3221	0.7892	0.8266	1.000	0.0072	0.024	0.024
2	220	2.603	0.475	0.0550	0.02000	0.3000	5.0000	19.55	0.5983	0.4302	0.5160	1.000	0.0183	0.043	0.043
3	250	1.998	0.700	0.0920	0.02070	1.0000	2.0000	5.30	1.0543	0.2497	0.3354	1.000	0.0140	0.028	0.028
4	220	1.572	0.911	0.1100	0.00224	0.6000	1.8000	2.35	0.4507	0.1588	0.2976	0.998	0.0164	0.028	0.028
5	210	1.325	1.074	0.0480	0.00080	0.8000	5.0000	8.58	1.3140	0.1162	0.1688	1.000	0.0041	0.005	0.005
6	305	1.207	1.170	0.0500	0.00070	0.5000	1.3000	3.56	0.3752	0.0981	0.2362	1.000	0.0015	0.002	0.002
7	305	1.071	1.281	0.0260	0.00000	0.8000	0.8000	20.21	1.1112	0.0803	0.1461	1.000	0.0025	0.003	0.003
8	400	0.873	1.481	0.0250	0.00000	1.8000	0.3500	8.87	1.1038	0.0572	0.1209	1.000	0.0017	0.001	0.001

COMPRESIONES															
W <sub>com</sub> = 1.24 t/m²															
ESTRATO #	I <sub>q</sub> (t/m²)	Δσ <sub>com</sub> (t/m²)	σ	m <sub>1</sub> (kg/cm²)	c <sub>u</sub> (cm²/kg)	β	ξ	T <sub>v</sub>	K <sub>exp</sub>	F(T <sub>v</sub> )	σ <sub>com</sub> (m³/t)	σ <sub>com</sub> (m³/t)	σ <sub>com</sub> (m³/t)	σ <sub>com</sub> (m³/t)	σ <sub>com</sub> (m³/t)
1	0.84500	1.17	0.489	0.0125	0.02010	0.4200	2.0000	24.83	0.7100	1.00	0.05000	0.0559	0.0684	0.030	0.030
2	0.74370	0.92	0.651	0.0700	0.00980	0.6000	5.0000	8.80	0.9818	1.00	0.05019	0.0463	0.0239	0.089	0.089
3	0.57080	0.71	0.835	0.0850	0.00330	0.6500	1.9000	2.27	0.4715	1.00	0.04806	0.0328	0.02239	0.061	0.061
4	0.44820	0.56	1.018	0.1000	0.00118	0.5000	1.7000	1.76	0.3005	0.99	0.04528	0.0252	0.02396	0.051	0.051
5	0.37850	0.47	1.163	0.0520	0.00070	0.7000	5.0000	7.51	1.1102	1.00	0.02270	0.0111	0.00951	0.017	0.017
6	0.34480	0.43	1.251	0.0500	0.00035	0.5000	1.3000	1.78	0.2862	0.99	0.00574	0.0025	0.00258	0.004	0.004
7	0.30610	0.38	1.354	0.0250	0.00000	1.1000	0.4500	20.21	1.1045	1.00	0.01010	0.0051	0.00602	0.009	0.009
8	0.24840	0.31	1.540	0.0250	0.00000	1.8000	0.3500	8.87	1.1038	1.00	0.01420	0.0044	0.00498	0.006	0.006

Con estos resultados ya se puede iniciar el análisis de interacción suelo-estructura el cual puede ser efectuado como se señala en el artículo "Una solución directa al problema de interacción suelo-estructura (G. López-Rincón, C. Zea-Constantino y R. Rivera-Constantino)" de estas memorias.

## 6 CONCLUSIONES

Se propuso un procedimiento de cálculo de las expansiones, recompresiones y compresiones generadas en el suelo de apoyo por las cargas que le transmitirá un edificio de varios niveles que podría ser construido sobre el suelo blando de la Ciudad de México. La propuesta fue ideada por los Autores con ligeras modificaciones a lo establecido por Zeevaert. Se presentó un ejemplo de calculo donde el comportamiento de la cimentación se analizó a partir de los módulos de deformabilidad y compresibilidad tanto para los fenómenos de expansión como para el de recarga, respectivamente, que tienen lugar en campo cuando se construye una cimentación parcialmente compensada y que se relacionan entre sí. El Fenómeno de recarga también se estudió con la metodología propuesta por Zeevaert que arrojó en este caso resultados muy parecidos concluyéndose que puede ser usada cualquiera de las dos. El fenómeno de compresión sigue los mismos lineamientos establecidos por Zeevaert.

Los autores esperan que esta propuesta sea de utilidad a los diseñadores de este tipo de cimentaciones en la práctica profesional.

## 7 AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la División de las Ingenierías Civil y Geomática de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por las facilidades brindadas para el desarrollo de esta investigación. Un agradecimiento especial a todo el personal del laboratorio de Geotecnia por su apoyo.

## 8 REFERENCIAS

- Zeevaert, L. (1973). *Foundation engineering for difficult subsoil conditions*. Ed. Van Nostrand Reinhol Co.
- Zeevaert, L. (1980). *Interacción suelo-estructura de cimentación*. Ed. Limusa.
- Zeevaert, L. (1984). *Viscosidad Intergranular en Suelos Finos Saturados*. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Zea, C. Rivera R. y Umaña, R. 1998. Metodología para la Determinación de la Compresión Volumétrica de un Suelo Fino Saturado con Ayuda de Programas de Computadora. *Memorias de la XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Puebla, Puebla, SMMS.