Anales Acad. Nac. de Cs. Ex., Fís. y Nat., tomo 57 (2017): 137-146.

MÉTODO SIMPLIFICADO PARA EL CÁLCULO DEL ASENTAMIENTO POR COLAPSO EN SUELOS LOÉSSICOS DE CÓRDOBA

Ricardo José Rocca

Universidad Nacional de Córdoba. Departamento de Construcciones Civiles.
Área Geotecnia Av. Vélez Sarsfield 1611. X5000GCA. Córdoba. Argentina
Correo Electrónico: rjrocca@efn.uncor.edu

Resumen

El cálculo de asentamientos por colapso en los suelos loéssicos, requiere conocer el perfil de colapsibilidad del suelo, el estado tensional en su masa, producido por su propio peso y por las cargas externas, y la forma como se ha saturado. Cuando en el perfil de colapsibilidad se conoce parcialmente, debido a la existencia de pocos valores de ensayos para determinar las presiones de fluencia, es necesario formular hipótesis sobre su variación en profundidad. Se presentan los resultados de un método simplificado de cálculo, basado en algunas hipótesis de distribución tensional y la experiencia estadística de los valores medidos de la presión de fluencia, en los ensayos realizados en la ciudad de Córdoba.

Palabras clave: loess, colapso por humedecimiento, asentamiento, Córdoba

Abstract

Simplified method for the calculation of settlement due to collapse in loessic soils of Cordoba. Computation of settlement due to collapse in loessic soils requires the collapsibility soil profile, the stress distribution in the soil mass, due its own weight and external loads, and the history of soil saturation. If the collapsibility is partially known, due to lack of enough tests for getting the yield pressure, it is necessary to formulate some hypothesis about its distribution in depth. A simplified method of computation is presented, based on some hypothesis of stress distribution and the statistical experience of yield pressure tests of Cordoba city.

Key words: loess, collapse due to wetting, settlement, Cordoba

1. Introducción

Los suelos colapsables constituyen un grupo de suelos macroporosos, cuya estructura interna se encuentra en equilibrio meta-estable. Ante variaciones en las condiciones externas, tales como en el grado de humedecimiento y/o en el estado tensional, se produce el colapso de la misma, con la manifestación macroscópica de grandes hundimientos en la masa del suelo que pueden alcanzar la superficie del terreno.

El colapso puede definirse como una rápida e irreversible disminución de volumen, correspondiendo a la destrucción de la estructura meta-estable de un suelo, causada por un aporte de energía fuera de proporción con la deformación producida. [14].

Las construcciones en las que no se haya tenido en cuenta este comportamiento, sufren graves daños ya que generalmente el fenómeno es muy rápido y se produce en superficies limitadas, por lo que los asentamientos diferenciales se acentúan.

Dentro de los suelos colapsables, los loess son el grupo más numeroso, en todo el mundo y también en la Argentina. La provincia de Córdoba es una de las regiones donde son más abundantes [9], [7].

Los métodos analíticos para determinación de la colapsibilidad en un terreno tienen algunas limitaciones y complejidades. Por una parte, requieren contar con las variaciones tensionales en la masa del suelo. A esto se suman los cambios debido al humedecimiento. Existen distintas hipótesis de propagación del frente del humedecimiento causante del colapso del suelo. Asimismo, puede haber fuentes generalizadas, como aumento del nivel freático, u otras puntuales, como pérdidas de cañerías y pozos absorbentes.

En este trabajo se presenta un método de cálculo de los asentamientos por colapso ba-sado en la interpretación de ensayos de labora-torio existentes en la Base Geotécnica de Córdoba, combinado con un modelo de cómputo parametrizado.

2. Caracterización del colapso

Para caracterizar el colapso se pueden emplear ensayos de laboratorio o ensayos en el terreno [15]. Los métodos basados en ensayos de laboratorio son similares, en cuanto a su aplicación, a los que se emplean en el cálculo de deformaciones por consolidación en arcillas [17]. Para ello es necesario conocer el comportamiento edométrico del suelo (compresión unidimensional).

El método clásico es el ensayo doble edométrico [6]. Requiere la ejecución de dos ensayos gemelos de compresión confinada en probetas extraídas de una misma muestra. Con ello se obtienen las curvas de compresibilidad con humedad natural y saturada y se puede computar la diferencia entre ambas para un determinado estado tensional (Figura 1).

En las curvas de compresibilidad o de compresión confinada, se puede determinar el valor de la presión de fluencia, que constituye el umbral de tensiones, a partir del cual se observan grandes deformaciones.

Existen además, numerosos métodos basados en el empleo de una sola curva, que simplifican la tarea en costo y tiempo. Así por ejemplo, se puede cargar la muestra a humedad natural hasta la tensión de trabajo, saturarla observando el colapso por humedecimiento y luego continuar la secuencia de cargas.

Los porcentajes de deformaciones medidos en un determinado rango, se emplean para clasificar los suelos [11].

Una vez que se cuantifica el colapso de una muestra, hace falta plantear el asentamiento de un estrato colapsable en el terreno.

El método más usado consiste en dividir al estrato colapsable en numerosas capas, de las que se extraen muestras y se realizan ensayos de laboratorio. Posteriormente se integran las deformaciones medidas en cada capa [5].

En el caso de que no se disponga de la curva de compresión confinada en estado de saturación, pero sí del valor de la presión de fluencia,

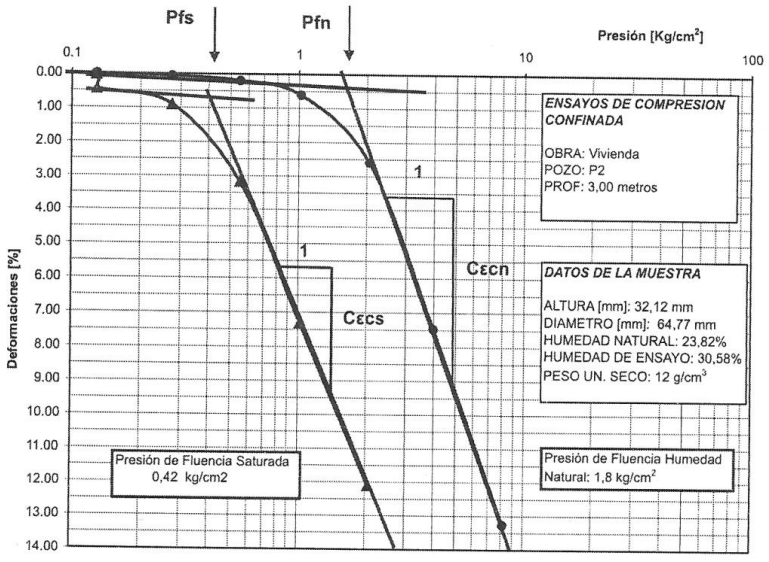

Fig. 1. Definiciones de parámetros de curvas edométricas

se pueden formular algunas hipótesis y modelar una curva sintética que las contenga [12].

En un estudio estadístico de unos 70 ensayos, las pendientes de los distintos tramos de las curvas de ensayos de compresión confinada, arrojaron los promedios mostrados en la Tabla I. En ésta, se han colocado los valores que corresponden a la relación de recompresión Cεrn, Cεrs (menor que la presión de fluencia) y la relación de compresibilidad Cεcn, Cεcs (mayor de la presión de fluencia), tanto para la curva a humedad natural como la saturada (Figura 1).

En función de los casos precedentes, como hipótesis de modelación, se le puede asignar a la curva del ensayo saturado, para el tramo de recompresión, el valor de Cεrs = 0,01 y para el tramo virgen, el de Cεcs = 0,16.

Las condiciones fijadas por los autores que siguen criterios tensionales, indican que un parámetro importante a tener en cuenta es el intervalo tensional entre la presión de tapada del terreno y la presión de fluencia [13].

Como primera aproximación, se pueden subdividir los suelos loéssicos en base a su comportamiento, en dos grandes grupos:

1. Loess autocolapsables: cuando la presión de tapada o cobertura del suelo es mayor que la presión de fluencia, al momento de producirse el humedecimiento. En este caso, la masa de suelo colapsará espontáneamente aun sin la presencia de carga exterior. Dentro de la masa del suelo, esto ocurrirá en aquellas zonas donde el límite es sobrepasado. La profundidad a la que ocurre el autocolapso depende de las características regionales, y en algunos casos pueden ser capas intermedias situadas, por ejemplo, entre 5 y 7 m.

2. Loess potencialmente colapsables: cuando la presión de tapada o cobertura de suelo superior es menor que la presión de fluencia luego de humedecimiento. En este caso, colapsará por influencia de alguna carga exterior, como por ejemplo, la producida por una fundación. Como dentro de este grupo se encuentran más del 80% de todos los loess, para clasificarlos de acuerdo a su comportamiento es necesario considerar una carga externa determinada.

Tabla I. Parámetros medidos en curvas de compresión confinada

Tipo de muestra	Cεrn	Cεrs	Cεcn	Cεcs
Inalterada	0,012	0,015	0,178	0,157
Adoptado		0,01		0,16

3. Estratigrafía geotécnica

Se han planteado tanto estratigrafías geológicas [1], [3], [4], [2] como geotécnicas [14]. Esta última se basa en analizar los suelos loéssicos de acuerdo con los asentamientos que producen cuando se humedecen bajo una fundación directa de una construcción.

La versión más sencilla tiene en cuenta la Relación de Colapsibilidad, RC = $\mathbf{P}_{fs}/\mathbf{P}_o$, donde se normaliza la presión de fluencia saturada $\mathbf{P}_{fs}$, con relación a la presión de tapada $\mathbf{P}_o$.

Para un mismo tipo de loess, importará la profundidad a la que se encuentre con relación al plano de fundación. En un estudio pormenorizado, se han diferenciado los comportamientos para las profundidades menores y mayores a 3 metros y mayores a 10 metros [14].

Así, se distinguen varios Tipos Geotécnicos Autocolapsables (TG A_s, TG A_i, TG D) y otros que son Potencialmente Colapsables (TG P, TG M, TG E). Las definiciones se encuentran resumidas en la Tabla IV.

4. Cálculo de asentamientos por colapso

4.1. *Asentamientos definidos paramétricamente en perfiles teóricos*

Para poder realizar una mejor estimación de los asentamientos por colapso, especialmente en las capas que puedan sufrir mayores deformaciones, se modelaron las curvas de compresión confinada con las simplificaciones planteadas en el Apartado 2.

El valor de la presión inicial debido al suelo $\mathbf{P}_o$ fue calculado empleando un valor de peso unitario γ = 15,5 kN/m^3.

Las curvas tienen un valor de $\mathbf{P}_{fs}$ que varían en profundidad. Se emplearon distintas relaciones lineales entre $\mathbf{P}_{fs}$ y $\mathbf{P}_o$, para cada Tipo Geotécnico, tal como se indica en la Tabla II.

Una vez definido el perfil teórico para cada profundidad, se calculó paramétricamente el

Tabla II. Casos estudiados paramétricamente

Tipos geotécnicos	P_{fs}/P_o
Autocolapsables	
(TG A_s, TG A_i)	0,4
	0,6
	0,8
	1,0
Potencialmente Colapsables	
(TG P, TG M)	1,0
	1,5
	2,0

asentamiento por colapso que se obtendría para cada caso considerando cargas externas de 1, 2 y 3 plantas y la total saturación del suelo.

A tal fin se tomaron capas de alrededor de 1 metro de espesor, en cuyo centro se colocó una curva tipo, cuya presión de fluencia siguiera las relaciones de la Tabla II.

En el caso límite de la Relación de Colapsibilidad con el valor de 1, se determinó en ambos modelos, Autocolapsable y Potencialmente Colapsable.

4.2. *Asentamientos inferidos estadísticamente para la ciudad de Córdoba*

A fin de determinar cuáles serían los valores más probables de la Relación de Colapsibilidad en los suelos de Córdoba, se extrajeron de la Base de Datos Geotécnica de la Universidad Nacional de Córdoba, los resultados de 830 ensayos de compresión confinada, tabulados de acuerdo con la profundidad.

Para tratar de determinar variaciones zonales, se dividió a la ciudad en tres grandes zonas: al N del río Suquía, al SW del río Suquía y al SE del río Suquía. Estas dos últimas están separadas por el Arroyo La Cañada. La Tabla III muestra los resultados obtenidos.

Debido a que las diferencias de los valores de las distintas zonas no son muy importantes, para los análisis zonales se optó por emplear los resultados de los promedios generales.

Combinando los valores obtenidos en los casos estudiados paramétricamente en el modelo de cálculo de asentamientos por colapso, con los observados en la Tabla III, se obtiene como resultado la Figura 2 [12].

La curva inferior, a rayas, corresponde al autocolapso, que se produce cuando se humedece el suelo loéssico sin cargas externas, es decir, aún antes de construir sobre el terreno.

Los dos grupos de curvas paramétricas representan al promedio de deformaciones de la

Tabla III. Relación de colapsibilidad en la ciudad de Córdoba

	Tipos geotécnicos autocolapsables					
	TG As		TG Ai		TG D	
	#	P_{fs}/P_o	#	P_{fs}/P_o	#	P_{fs}/P_o
Zona norte (del Río Suquía)						
Promedio	16	0,71	31	0,67	2	0,45
Cov		0,25		0,27		0,13
Zona oeste (SW del Río Suquía)						
Promedio	41	0,74	41	0,56	38	0,56
Cov		0,28		0,36		0,36
Zona este (SE del Río Suquía)						
Promedio	57	0,71	138	0,61	45	0,64
Cov		0,25		0,39		0,44
Total de ensayos	114		236		85	
Promedios generales		0,72		0,60		0,60

	Tipos geotécnicos potencialmente colapsables					
	TG P		TG M		TG E	
	#	P_{fs}/P_o	#	P_{fs}/P_o	#	P_{fs}/P_o
Zona norte (del Río Suquía)						
Promedio	26	1,57	34	1,45	5	1,70
Cov		0,27		0,21		0,12
Zona oeste (SW del Río Suquía)						
Promedio	52	1,50	49	1,37	28	1,46
Cov		0,18		0,18		0,21
Zona este (SE del Río Suquía)						
Promedio	72	1,46	85	1,39	43	1,39
Cov		0,19		0,20		0,20
Total de ensayos	150		168		71	
Promedios generales		1,49		1,40		1,44

#: Número de ensayos
TG: Tipo Geotécnico (ver definiciones en Tabla IV)

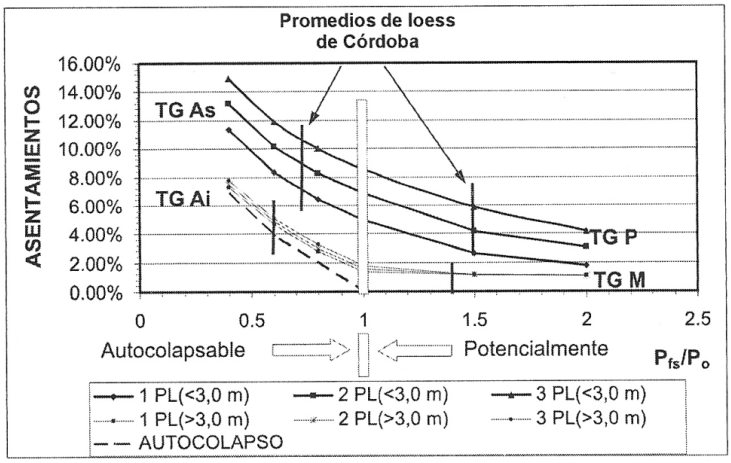

Fig. 2. Asentamientos por colapso de los suelos de Córdoba, de acuerdo con la Relación de Colapsibilidad medida en 830 muestras (según Rocca, 2002).

Tabla IV. Asentamientos promedios por colapso (leídos de Figura 2)

Tipo geotécnico	RC	Profundidad	1 Planta %	2 Plantas %	3 Plantas %
Autocolapso superior (TG As)	< 1	0 a 3 metros	7,08	8,96	10,67
Autocolapso inferior (TG Ai)	< 1	3 a 10 metros	4,63	4,85	5,09
Daño Potencial (TG P)	1 a 2	0 a 3 metros	2,66	4,23	5,93
Daño Marginal (TG M)	1 a 2	3 a 10 metros	1,12	1,12	1,12
Libre de Daños (TG L)	> 2		0,00	0,00	0,00
Autocolapso Profundo(TG D)	< 1	mayor a 10 m	4,56	4,56	4,56
Marginal Profundo (TG E)	1 a 2	mayor a 10 m	0,00	0,00	0,00
Inexistencia de daño (TG I)			0,00	0,00	0,00

RC: Relación de Colapsibilidad
Profundidad: entorno de validez del TG
1 Planta: construcción con zapatas cargadas con 7 T/m^2
2 Plantas: construcción con zapatas cargadas con 12 T/m^2
3 Plantas: construcción con zapatas cargadas con 18 T/m^2

modelación de perfiles de los distintos tipos de suelos colapsables, cuando se saturan totalmente bajo la carga externa de construcciones de 1, 2 y 3 plantas. El grupo de curvas superiores se aplica a los tres primeros metros y las inferiores a los subsiguientes siete metros (de 3 a 10 metros), analizados mediante un perfil teórico.

Los valores de los asentamientos para cada tipo geotécnico, expresados como porcentajes del espesor de cada estrato, se detallan en la Tabla IV.

Los resultados observados en los suelos de Córdoba representan promedios de los ensayos estudiados. Al haberse considerado una condición de saturación extrema, los valores de asentamiento que se alcanzan deben tomarse como los máximos asentamientos posibles.

Los valores leídos de la Figura 2 y tabulados en la Tabla IV, constituyen una estimación que permite computar en forma expeditiva los asentamientos por colapso y son la base del método de cálculo que se presenta en este trabajo.

5. Verificaciones mediante ensayos in situ

5.1. *Ensayos de Prototipos a Escala Natural*

Con el objeto de validar las magnitudes de asentamientos por colapso presentadas en la

Figura 2, se analizó el comportamiento de prototipos fundados sobre distintos clases de cimentaciones y sometidos a humedecimiento prolongado. El ensayo se ejecutó a principios de la década de 1970, en un predio de la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional de Córdoba. Las características del suelo y de las construcciones fueron las que se detallan seguidamente [7].

5.1.1. Perfil de Suelo

El perfil de suelo esquemático del predio donde se realizó el ensayo se presenta en la Figura 3, en donde se lo ha interpretado con la Tipología Geotécnica descripta.

Está formado por una sucesión de limos loéssicos, CL y CL-ML, con una zona cementada a partir de los 7,7 metros.

En el perfil del trabajo original, se han calculado los coeficientes de colapsibilidad frente a diferentes fluidos saturantes, como ser agua potable de red, agua de líquido cloacal y agua acidulada.

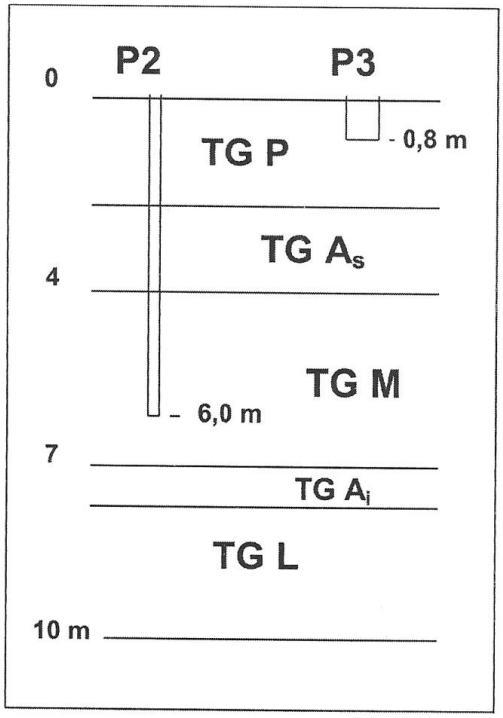

Fig. 3. Perfil de suelos loéssicos reinterpretado según la Estratigrafía Geotécnica. P2: Prototipo fundado en pilotes. P3: Prototipo fundado con zapatas corridas.

Una de las diferencias más significativas, entre ellos, es que el agua de red es la menos nociva para el colapso.

5.1.2. Tipología de Fundaciones en Prototipos

En el predio de ensayo se construyeron cinco prototipos de viviendas iguales, cuya planta estaba inscripta en un cuadrado de 3,40 m de lado. Constaban de muros de mampostería de ladrillos comunes con capa aisladora, techos de hormigón armado y cubiertas de bovedillas con carga común de tierra. Tenían pisos alisados y muros revocados y blanqueados para poder visualizar las grietas. Poseían además, vanos de puertas y ventanas.

Se plantearon cinco diferentes tipos de fundaciones, para cada casilla:

1) Pilotes de Hormigón preperforados y colados in situ de 20 cm de diámetro y 3 m de longitud, 1,5 m de separación, con viga de encadenado superior. Penetraron totalmente la capa de suelo autocolapsable superior.

2) Pilotes de Hormigón preperforados y colados in situ de 20 cm de diámetro y 6 m de longitud, 3 m de separación, con viga de encadenado superior. Penetraron totalmente la capa de suelos autocolapsables, se apoyan en suelos potencialmente colapsables, que tiene por debajo una capa de 1 metro de autocolapsable.

3) Cimiento superficial de hormigón ciclópeo a la cal, de 0,6 m de espesor y 0,8 m de profundidad.

4) Zapata de Hormigón Armado corrida de 0,8 m de ancho y 0,8 m de profundidad, con viga de encadenamiento (T invertida).

5) Cimiento superficial de hormigón ciclópeo a la cal, de 0,6 m de espesor y 0,8 m de profundidad, con viga de encadenamiento superior.

La Figura 4 muestra la disposición en planta de los prototipos y la zona afectada por el colapso del suelo luego de unos 100 días de saturación.

5.1.3. Procedimiento de ensayo

El predio se saturó y controló durante más de dos años, alrededor de 750 días. La saturación del terreno se obtenía simulando una tubería cloacal defectuosa, para lo cual se instalaron caños de hormigón de 65 mm de diámetro, con juntas mal tomadas, convergentes hacia un pozo absorbente común.

La conducción de agua se realizaba a partir de tanques sifónicos de mingitorios conectados a la red, con descarga cada varios minutos. De esta manera se introducía el agua al suelo, en forma continua y controlable.

5.1.4. Mediciones efectuadas

En cada prototipo se midieron los asentamientos de varios puntos, con relación a un punto fijo. Las nivelaciones finalizaron cuando se debieron demoler los prototipos por destinarse el predio a otra función. En el caso del prototipo con cimientos corridos, las deformaciones medidas se presentan en la Tabla V.

La Figura 5 muestra las deformaciones máximas alcanzadas del extremo más próximo a la zona de humedecimiento (Borde Noreste) del Prototipo 3 y la comparación con el Prototipo 2, con pilotes fundados a 6 metros de profundidad.

Una interpretación que se ajusta a las mediciones entre los dos tipos de fundaciones muestra que los cimientos corridos sufrieron grandes asentamientos cuando se humedeció el primer estrato autocolapsable en los primeros cien días, mientras que los pilotes se cargaron por acción del asentamiento del suelo por colapso.

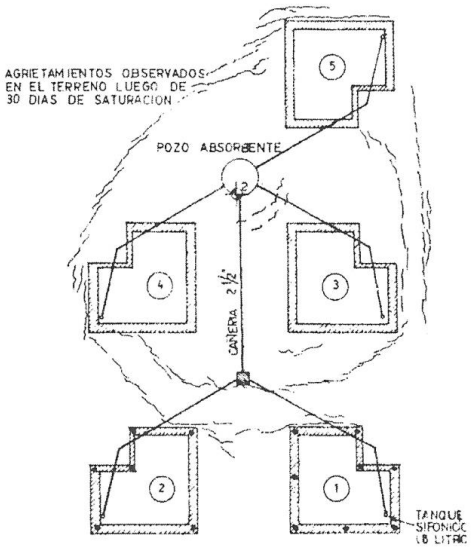

Fig. 4. Esquema de Ubicación de Prototipos de viviendas en el predio. (El lado mayor de cada Prototipo mide 3,40 m. El Norte está hacia la izquierda). Los Prototipos 1 y 2 tienen fundaciones sobre pilotines representados con círculos negros, mientras que 3, 4 y 5 están construidos sobre zapatas. (según Moll et al.1970).

Tabla V. Mediciones en prototipo 3

Día	Borde Noreste [metros]	Borde Sudeste [metros]	Borde Noroeste [metros]	Borde Sudoeste [metros]
0	0,000	0,000	0,000	0,000
12	-0,021	-0,020	-0,007	-0,008
19	-0,034	-0,032	-0,010	-0,010
28	-0,060	-0,048	-0,026	-0,018
37	-0,063	-0,053	-0,028	-0,0181
61	-0,069	-0,066	-0,036	-0,024
85	-0,070	-0,067	-0,039	-0,030
98	-0,071	-0,067	-0,0391	-0,030
117	-0,075	-0,067	-0,043	-0,031
134	-0,077	-0,067	-0,043	-0,031
167	-0,081	-0,070	-0,047	-0,031
195	-0,091	-0,075	-0,056	-0,037
218	-0,107	-0,093	-0,068	-0,050
343	-0,127	-0,113	-0,084	-0,060
423	-0,132	-0,115	-0,088	-0,069
741	-0,142	-0,131	-0,095	-0,074

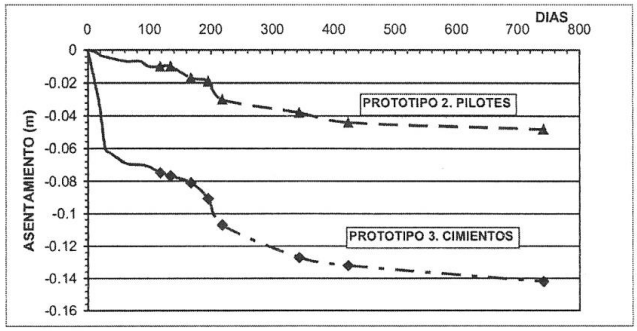

Figura 5. Asentamientos por colapso, medidos en Prototipos con Pilotes de 6 metros (P2) y de Cimientos superficiales (P3). (En el tramo inicial se han reemplazado las lecturas por una línea llena por razones de claridad) (Según Moll et al, 1970).

Tabla VI. Cálculo de los asentamientos usando diferentes procedimientos

		Curva general		Curva Ad-Hoc		Método Ruso		Cálculo directo
Estrato	Espesor [m]	B = 0,45 m Colapso [%]	Carga = 7 T/m² Asent. por Colapso [cm]	B = 0,6 m Colapso [%]	Carga = 4,6 T/m² Asent. por Colapso [cm]	B = 0,6 m Colapso [%]	Carga = 4,6 T/m² Asent. por Colapso [cm]	
TG P	1,7	2,66	4,52	1,98	3,37	1,98	3,37	
TG As	0,5	7,08	3,54	6,24	3,12	6,24	3,12	
TG Ai	1,0	4,63	4,63	4,60	4,60	4,60	4,60	
TG M	2,8	1,12	3,14	1,12	3,14	0,00	0,00	
TG Ai	0,5	4,63	2,31	4,60	2,30	4,60	2,30	
TG L	2,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Total	9,2	Cálculo	18,1		16,5		13,4	16.7 cm
		Medido	14,2		14,2		14,2	14,2 cm
		Medido/ Cálculo	0,78		0,86		1,06	0,85

Referencias:
Cεcs =0,16 (valor adoptado para los cálculos)
B: ancho de los cimientos
Colapso: % de asentamiento específico
Asent. por colapso: magnitud del asentamiento = % de asentamiento especifico x espesor
Cálculo: suma de los asentamientos de cada estrato
Medido: observado en las mediciones experimentales
Cálculo directo: cómputo realizado en forma convencional

Al llegar el frente de humedecimiento al estrato autocolapsable inferior, alrededor de los 200 días, los dos tipos de fundaciones sufrieron asentamientos y un quiebre en los gráficos de deformaciones.

A partir de ese momento, el suelo se comportó como si estuviera en un proceso de deformación correspondiente al de un suelo limoso.

5.1.5. Cálculo de los asentamientos

Los asentamientos por colapso se calcularon mediante varios procedimientos, los que se presentan en la Tabla VI.

5.1.5.1 Cálculo directo mediante el uso de las curvas propuestas (Figura 2)

La Figura 2 contiene una curva correspondiente a una fundación de 0,45 m de ancho y una tensión de 7 T/m². Esta tensión es muy superior a la de los prototipos. Por consiguiente, sus resultados son considerados como valores muy conservadores. En cuanto a las propiedades de los suelos, las curvas se han calculado para un valor de Cεcs = 0,16.

Para usar el procedimiento que se propone, es necesario emplear los valores correspondientes a construcciones de una planta de la Tabla II y multiplicarlos por el espesor de cada capa.

En la Tabla VI, columnas 3 y 4, está puesto el cómputo de los asentamientos mediante este procedimiento, siendo el asentamiento de 18,1 cm.

5.1.5.2. Cálculo Directo usando una curva específica del problema

Con el fin de considerar una curva ad hoc, correspondiente a las condiciones de los prototipos, se realizó un análisis de carga de cada casilla. El mismo arrojó una tensión efectiva en la base de la fundación de cimientos corridos, de 4,6 T/m². Para la representación de los suelos, se emplearon un valor de Cεcs = 0,16 y valores de pesos unitarios constantes, como en el caso anterior.

Recalculando la curva paramétrica correspondiente a una planta (Figura 2), con los valores de los prototipos, se obtienen los asentamientos específicos por colapso, los que multiplicados por el espesor de cada capa, da como resultado el asentamiento de 16,5 cm. Este cálculo se encuentra en la Tabla VI, columnas 5 y 6.

5.1.5.3. Ajuste usando las hipótesis del método ruso

En el método propuesto por ingenieros rusos, se descartan en la sumatoria aquellos estratos cuyas deformaciones por colapso son infe-

riores al 2% [16]. Este ajuste, para el caso del prototipo 3, se encuentra computado como 13,4 cm en la Tabla VI, columnas 7 y 8.

5.1.5.4. Cálculo en forma directa con los parámetros del suelo ensayado

Este procedimiento es posible hacerlo cuando se han ensayado todos los estratos, lo que brinda la oportunidad de aplicar la metodología presentada en el Apartado 2. Esta situación ideal se había cumplido para el ensayo de los prototipos, contándose con ensayos doble edométrico cada metro.

A tal fin, se analizó cada estrato con sus correspondientes propiedades mecánicas, arrojando el valor resultante expresado en la Tabla VI, columna 9, es decir 16,7 cm.

5.1.6. Comparación de Resultados

La Tabla VI en sus filas inferiores, muestra los resultados obtenidos por cada uno de los métodos descriptos precedentemente. De la comparación surge claramente, que los valores resultantes son bastante aproximados a lo esperable en caso de que se produzcan las condiciones hipotetizadas por el esquema de cálculo.

No existe mucha diferencia de resultados entre el cálculo directo (16,7 cm), el método empleando los valores de los ensayos del terreno (16,5 cm), y el método propuesto en base a los valores promedio de suelos de Córdoba (18,1 cm). Esto trae como consecuencia, una buena valoración del método simplificado propuesto, debido al esfuerzo que hay que realizar en el método de cálculo directo, tanto en costo de muestreo y ejecución de ensayos, como de aplicación del cómputo en sí.

Se puede observar que el Criterio Ruso subestima levemente lo medido (en un 6%).

5.2. *Verificaciones mediante observaciones in situ*

Una de las hipótesis más importantes del esquema de cálculo, es considerar que el suelo se satura totalmente. Esto se daría en caso de que aumentase el nivel freático.

En la ciudad de Córdoba esto se ha producido, en algunos sectores de la parte sur de la ciudad, afectando los barrios Comercial, Inaudi y sus inmediaciones. [10], [18].

El aumento del nivel freático se ha relacionado con el aporte de plumas de agua, provenientes de infiltración en pozos absorbentes de una zona muy densamente poblada (con cerca de 400.000 habitantes) y el aporte de aguas meteóricas.

Hasta hace algunos años, los habitantes cavaban sin problemas pozos absorbentes hasta unos 8 metros de profundidad. En el año 2001, el nivel freático subió hasta casi la superficie, debiéndose instalar un sistema de bombeo para deprimir la capa freática.

En general, los habitantes de este sector de la ciudad no han manifestado mayores quejas de agrietamiento de sus viviendas. Cabe acotar que esto no significa que no existan grietas, sino que no tienen nuevas grietas o no las han percibido.

En los prototipos de la Ciudad Universitaria, a pesar de el gran asentamiento máximo, del orden de 14 cm, no se produjo una gran distorsión, ya que el asentamiento mínimo fue de unos 8 cm (Tabla V). Asimismo, tenían una configuración relativamente rígida. Para esa circunstancia, aparecieron algunas grietas en los marcos de las aberturas.

Comparando el nivel de daño en los barrios del sur, con el observado en los prototipos de la Ciudad Universitaria, se presume que los asentamientos han sido muy generalizados, homogéneos y moderados. Como consecuencia de ello, las distorsiones que se producen por asentamiento diferencial, y que generan las grietas, son pequeñas.

6. Conclusiones

El cálculo de los asentamientos producidos por colapso del suelo requiere considerar algunas hipótesis relativas a la naturaleza del suelo y la forma de aplicación de las cargas externas y del humedecimiento.

El procedimiento propuesto se basa en asumir que sólo se cuenta como propiedad del suelo, al valor de la presión de fluencia saturada y que todo el perfil se saturará.

Se ha computado paramétricamente el asentamiento máximo de los perfiles teóricos para distintos tipos de suelo loéssico, bajo la carga externa de construcciones de 1, 2 y 3 plantas. No se han tomado mayores cargas externas, ya que para las construcciones más grandes, lo habitual es emplear fundaciones indirectas.

Para ubicar a los suelos presentes en la ciudad de Córdoba, se han tomado unos 830 ensayos de compresión confinada y se los ha cruzado con las curvas paramétricas calculadas siguiendo los criterios empleados en suelos colapsables.

Los valores resultantes tabulados en la Tabla IV constituyen la base del método, y representan las máximas deformaciones que puede alcanzar el perfil al saturarse totalmente.

El procedimiento permite un rápido cálculo, por un medio gráfico y directo.

La validación de este procedimiento se ha realizado analizando los resultados medidos en prototipos de viviendas, a escala natural, fundados con distintos tipos de cimentaciones. En un ensayo de larga duración, mayor a dos años, se han

observado asentamientos del orden del 78% de lo calculado por el método propuesto. Es de destacar que si se hubiera empleado el método riguroso, el resultado de lo medido hubiera sido el 85% de lo calculado.

Desde el punto de vista práctico, se lo considera satisfactorio, ya que cuando se producen asentamientos de estas magnitudes, las implicancias están relacionadas con la distorsión entre los distintos puntos de la construcción. Esto ha podido ser demostrado en un caso real de aumento de nivel freático en una zona loéssica del sur de la ciudad de Córdoba.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte de una investigación patrocinada por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba y la Agencia Córdoba Ciencia.

Se agradece la colaboración de los Ings. L.L. Moll, A. Reginatto y A. Rusculleda, quienes generosamente facilitaron el acceso a la información original de los ensayos de prototipos.

Referencias bibliográficas

[1] Bodenbender C. *Bol. Academia Nac. de Ciencias.* Tomo XII: 5 Córdoba, (1890).

[2] Castellanos A. *Bol. Academia Nac. de Ciencias.* XXIII. 2a entrega: 232. Córdoba, (1918).

[3] Doering A. *Rev. Museo de La Plata.* Tomo XIV: 172, (1907).

[4] Frenguelli J. "Neozoico. en Geografía de la República Argentina". *GAEA.* Tomo II, 3 parte: 1. Buenos Aires, (1957).

[5] Houston S.L., Houston W.N. and Spadola D.J. *A.S.C.E. J. of Geotechnical Engng.* Vol 114: 40, (1988).

[6] Jennings J. and Knight K. *Trans. South African of Inst. Civil Engng.* 6 N° 8: 225, (1956).

[7] Moll L.L. and Reginatto A. "Investigación de Fundaciones en Suelos Colapsables". *III RAMSIF.* Vol I.: 25, Bahía Blanca, 1970.

[8] Moll L.L. and Rocca R.J. "Properties of loess in the center of Argentina". *Proc. XI PanAm. C.S.M.F.E.* Viña del Mar. Chile. Vol I.: 1, 1991.

[9] Reginatto A. "Propiedades mecánicas de algunos suelos de la ciudad de Córdoba". *Memorias 2 R.A.M.S.I.F.* Vol. 1. Córdoba, 1970.

[10] Rinaldi V.A., Zeballos M, Rocca R., Abril E., Francisca F. "Ascenso del Nivel Freático en Suelos Colapsables de la Ciudad de Córdoba: Evaluación del Problema". *XVI CAMSIG.* Vol I, 351. Trelew, 2002.

[11] Rocca R.J. "Review of Collapsible Soils". *Report. U.C.Berkeley*, 1985.

[12 Rocca R.J. "Cálculo del Asentamiento por Colapso en Suelos Loéssicos de Córdoba". *XVI CAMSIG.* Vol I, 36, Trelew, 2002.

[13] Rocca R.J., Reginatto A. and Redolfi E. "Determination of collapse potential of soils". *Proc. 7th Intl. Conf. on Expansive Soils.* Vol I: 73, 1992.

[14] Rocca R.J. y Goio M.G. "La colapsibilidad de los suelos de la ciudad de Córdoba". *XV Congr. Arg. Mec. Suel. e Ing. Geot.* Vol 1: 31. Buenos Aires, 2000.

[15] Terzariol R.E. y Abbona P.V. "Determinación del Potencial de colapso mediante ensayos in-situ". *Proc. XI. PanAm. Cong. Soil Mech .Geot .Eng.* Vol. I: 201, 1999.

[16] Tsytovich N., Berezantsev V., Dalmatov B. and Abelev M. "*Foundation, Soils and Substructures*". 1st Edit. Mir Pub, Moscu, 1974.

[17] USA Corps of Engineers "Settlement Analysis". *EM 1110-1-1904*, 1990.

[18] Zeballos M., Rinaldi V., Rocca R. "Ascenso del Nivel Freático en Suelos Colapsables de la Ciudad de Córdoba: Proyecto de Remediación". *XVI CAMSIG.* Trelew Vol I: 364, 2002.

Manuscrito recibido y aceptado en agosto de 2005.