

COMPRESIBILIDAD DE LOS SUELOS DE LA FORMACIÓN PAMPEANO

Por Arnoldo J. L. Bolognesi ⁽¹⁾

INTRODUCCIÓN.

Los sedimentos de la formación Pampeano, en la margen derecha de los ríos Paraná y de la Plata constituyen un caso importante de suelos consolidados por desecación.

En la figura N°1 se muestra un corte de esta formación, aproximadamente 100 km al Norte de Buenos Aires. Aquí se analizará la terraza alta que se levanta aproximadamente 20 metros sobre el nivel del mar (en el ejemplo 25,16) y cuya cota de base se encuentra aproximadamente entre 20 y 30 metros bajo el nivel del mar (en el ejemplo 30,00 metros). Bajo la formación Pampeano (Pleistoceno) se encuentran las Arenas Puelches (Plioceno) las cuales constituyen la fase regresiva de una trasgresión marina que ha formado el complejo arenas-arcillas verdes-arenas, que se encuentra entre la formación Arcilla Parda y el Pampeano.

En la actualidad la temperatura media anual en la zona es del orden de los 17°C y la precipitación pluvial media anual es del orden de 1.000 mm. El índice de humedad de Thornthwaite es del orden del 15 al 20 %.

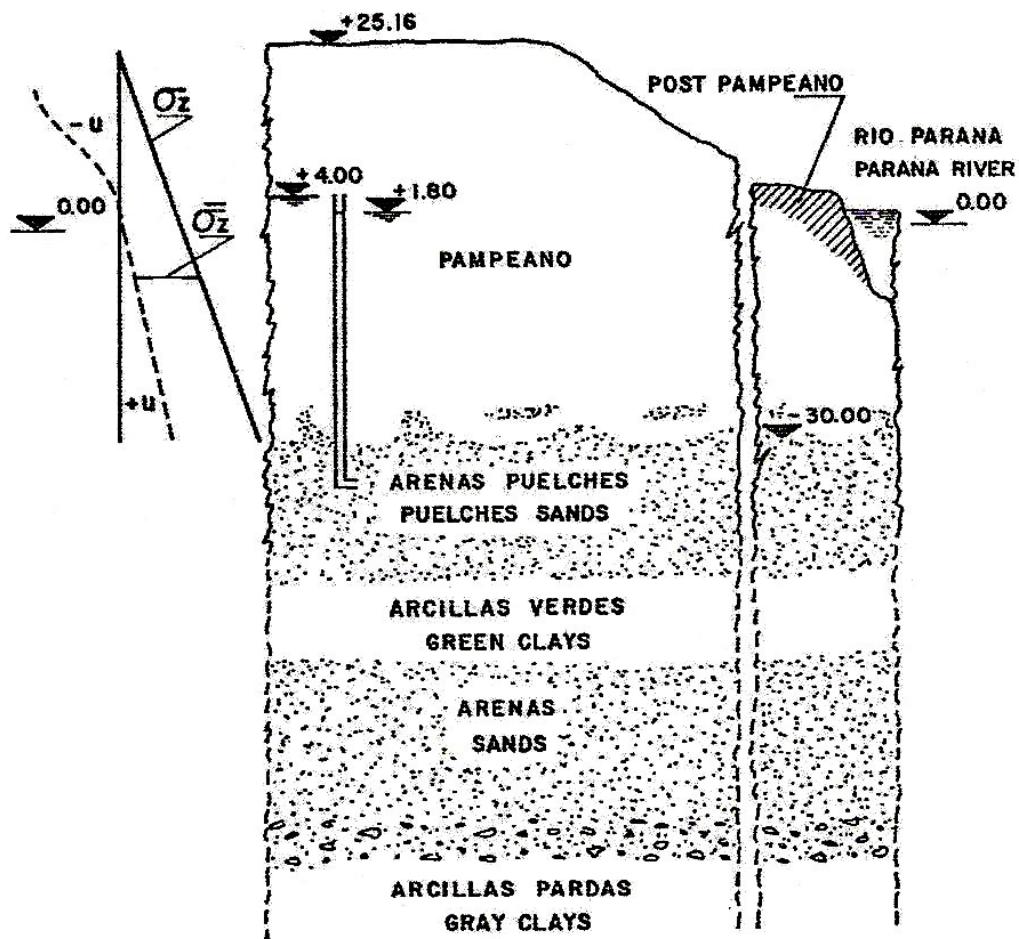
En las arenas Puelches se encuentra un acuífero importante que desemboca en el río Paraná. En el Pampeano también existe un nivel freático que está muy influenciado por el bombeo del acuífero de las arenas Puelches. En la figura 1 el primero se encuentra a cota + 1,80 y el segundo a cota + 4,00.

En el lado izquierdo de la figura 1 se muestran las presiones verticales en el Pampeano correspondiente a los niveles freáticos indicados durante los meses de máxima succión que son Enero y Febrero. Por encima del nivel freático del suelo se encuentra sometido a la tensión capilar y la desecación y consecuentemente a presiones de poros negativas. Hay consenso entre todos los geólogos en el sentido de que no ha existido nunca una sobrecarga que produzca una preconsolidación. Por consiguiente, cuando actúa la máxima succión, el suelo está consolidado por desecación y en caso contrario preconsolidado. Como se explica en el título siguiente el suelo bajo el nivel freático también se encuentra preconsolidado por desecación.

En este trabajo se presentan propiedades geotécnicas de los suelos que constituyen la formación Pampeano, así como el comportamiento de las fundaciones en la misma de una obra particularmente importante, como un ejemplo de las peculiaridades de los suelos consolidados por desecación.

⁽¹⁾Académico Titular, Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, República Argentina.

Profesor Titular de Geotecnia, Universidad de Buenos Aires.
Bolognesi-Moretto. Ingenieros Consultores. Buenos Aires.



0.00 NIVEL DEL MAR - SEA LEVEL

σ_z : PRESION VERTICAL TOTAL - TOTAL VERTICAL PRESSURE

u : PRESION DE POROS - PORE WATER PRESSURE

$\bar{\sigma}_z$: PRESION EFECTIVA VERTICAL - EFFECTIVE VERTICAL PRESSURE

FIGURA 1

DIVISIÓN ESTRATIGRAFICA - DEPÓSITOS CONSOLIDADOS Y PRECONSOLIDADOS

González Bonorino⁽¹⁾ ha efectuado un estudio mineralógico del Pampeano y presentado una interpretación de la sedimentación cuaternaria en el área que se considera de una gran importancia desde el punto de vista de sus aplicaciones a la Geotecnia. La división estratigráfica resultante de dicho estudio mineralógico es la siguiente:

Zona I (eólica en Fig.2), con ilita y plagioclasa abundantes

Zona II (fluvial en Fig.2), con montmorillonita, caolinita y cuarzo abundantes

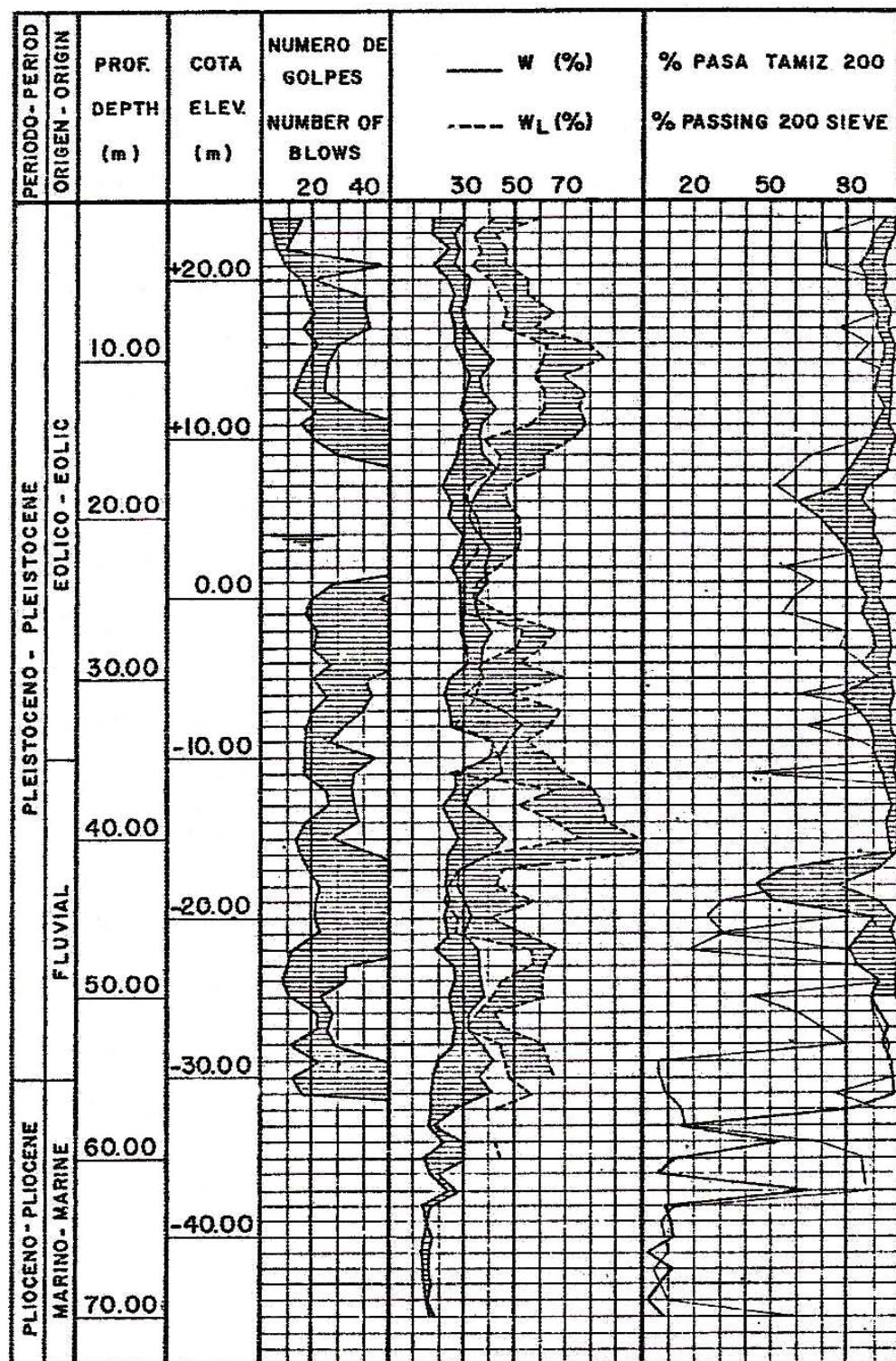


FIGURA 2

Según González Bonorino, al depositarse aproximadamente un tercio del Pampeano se produce un desplazamiento del drenaje, a causa de la facturación del basamento. Previa a dicha facturación, el área estaba cruzada por drenaje procedente del escudo brasileño caracterizado por la asociación cuarzo montmorillonita. Con posterioridad a la misma se establece el drenaje pampeano (asociación plagioclasa ilita). La tendencia isostática es ligeramente negativa a través de todas las etapas. Recién después del desplazamiento al final del período glacial parece haber revertido a ligeramente positiva.

Como el Pampeano comienza a depositarse directamente sobre el Plioceno, cada glaciaciación con su correspondiente descenso del nivel del mar produce la consolidación por desecación de los depósitos fluviales. Cuando quedan nuevamente sumergidos al final de la misma, el suelo queda preconsolidado. Lo mismo sucede con los depósitos eólicos, previamente consolidados por desecación cuando quedan sumergidos. Aún con la hipótesis de deposición fluvial de la parte inferior del Pampeano, puede así explicarse la preconsolidación que muestran los estratos que la constituyen.

CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

La figura 1 ha sido compuesta usando los datos de la Fig. 2 (líneas llenas en los cortes de la Fig. 1) completando la parte inferior (líneas punteadas en los cortes) con información procedente del conocimiento geológico general de la zona.

En la figura 2 se encuentra el perfil completo del Pampeano, el cual se extiende desde la superficie hasta cota -30,00. Se han elegido y representado algunas propiedades físicas significativas: número de golpes para penetrar el sacamuestras ⁽²⁾, ω , ω_L y porcentaje que pasa el tamiz 200, para mostrar las variaciones que se producen en el perfil. Los límites indicados para dichas propiedades corresponden a 5 perforaciones efectuadas en un área de 2.000 m². El perfil está constituido por suelos saturados, excepto en los 3 metros superiores sometido a variaciones estacionales, de gran magnitud, del contenido de humedad.

En la Fig. 3, se muestran en el diagrama de Casagrande las características de los suelos del Pampeano agrupados en zonas y subzonas según la división estratigráfica propuesta por González Bonorino.⁽¹⁾

Zona I (Eólica en Fig. 2)

Subzonas:

- a) Vidrio volcánico relativamente escaso, variable. Desde la superficie a cota +10,00. Con muy pocas excepciones los suelos son arcillas (CL 0 CH).
- b) Vidrio volcánico abundante. Cota +10,00 a cota - 5,00.
El suelo predominante es ML, que posee además cementación calcárea y una estructura con cavidades y poros abundantes. Consta de una parte neta que se encuentra entre cotas + 7,00 y + 1,00 y dos zonas mezcladas, entre cotas + 10,00 y + 7,00 y entre + 1,00 y - 5,00.
- c) Vidrio volcánico escaso, excepto en horizontes aislados.
Plagioclasa más abundante que en a). Cota - 5,00 a cota - 10,00.

Entre - 5,00 y - 8,00 predominan las arcillas CL. Entre - 8,00 y -10.,00 el suelo tiene las mismas características de la subzona b) y constituye el manto de limo cinerítico que separa las zonas I y II propuestas por González Bonorino.

Zona II (Fluvial, en Fig. 2)

Vidrio volcánico escaso o ausente. Casi sin excepción todos los suelos son arcillas (CL o CH).

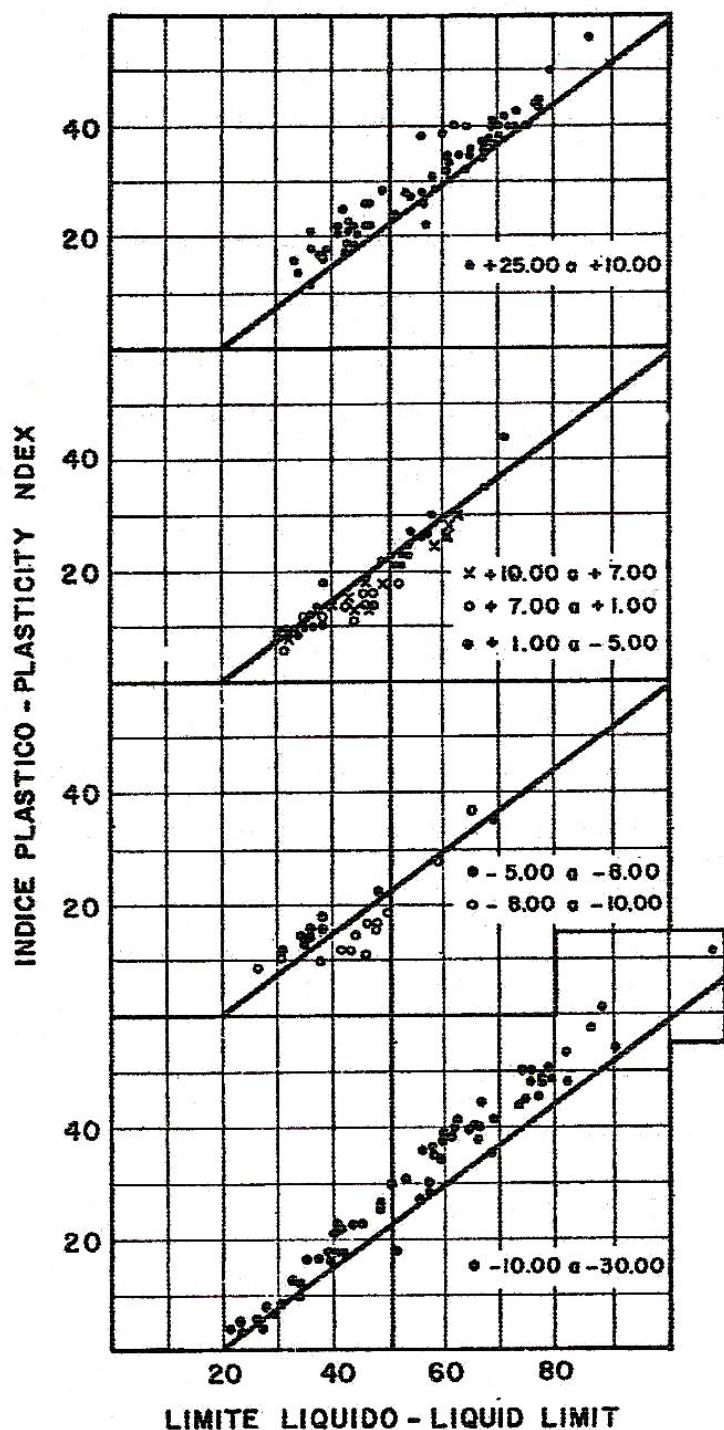
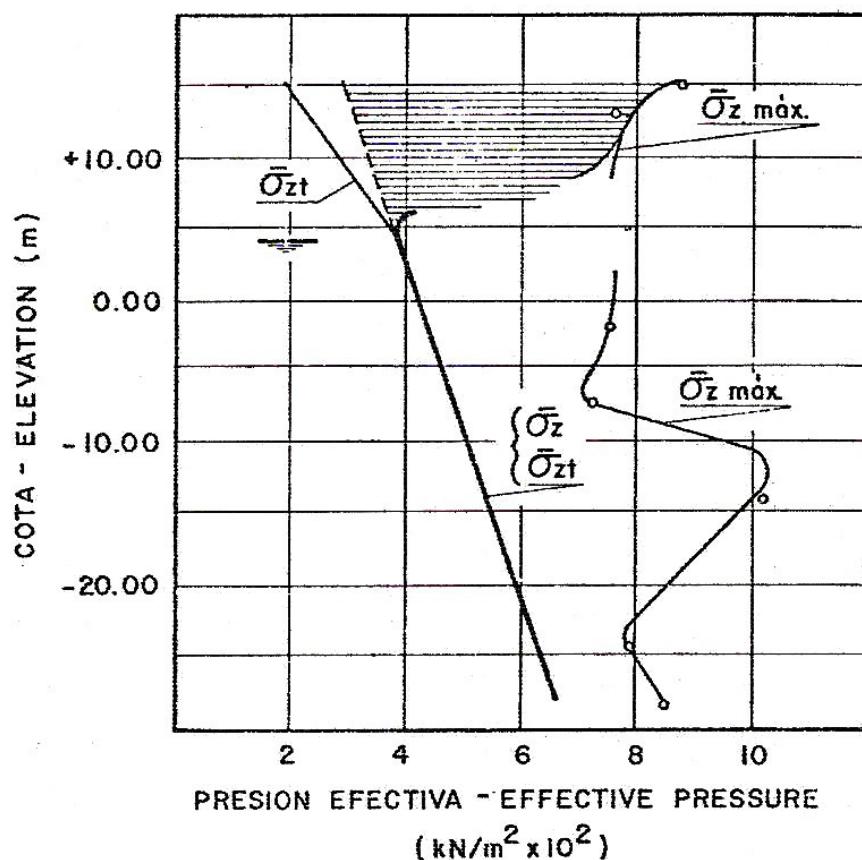


FIGURA 3

ESTADO DE TENSIONES

En la Figura 4 se representa el valor de las tensiones efectivas verticales máximas, σ'_z máx., a que fue sometido el suelo (en todos los casos por las tensiones creadas por succión, capaces de modificar su volumen), la tensión efectiva vertical creada por la tapada (overburden), σ_{zt} , que es el valor que se remueve al efectuar las excavaciones y la tensión vertical, σ'_z , a que está sometido el suelo a cada profundidad. Por encima del nivel freático, la succión varía con las condiciones climáticas.



σ'_z : Presión vertical - Vertical pressure

σ_{zt} : Presión de tapada - Overburden pressure

σ'_z máx. : Máxima presión vertical - Maximum vertical pressure

TODAS LAS PRESIONES SON EFECTIVAS

ALL PRESSURES ARE EFFECTIVE

FIGURA 4

En los meses de Enero y Febrero en que existe generalmente déficit de agua, la succión alcanza los valores mayores. En un invierno lluvioso, por el contrario no existe succión y la presión de poros negativa está limitada a la tensión capilar. La zona rayada en la Fig. 4 cubre

los valores posibles de σ'_z por encima del nivel freático. Los mayores pueden obtenerse después de una larga sequía. Bajo las superficies cubiertas se tiende a los valores menores.

En la hipótesis de una deposición fluvial en el tercio inferior y de una deposición eólica en los dos tercios superiores del Pampeano, la máxima succión en el suelo se ha producido por dos procesos diferentes.

En los suelos depositados fluvialmente, la consolidación por desecación se ha producido por descenso de las aguas, más probablemente durante las glaciaciones.

En la Fig. 5-c se muestra este caso. A una profundidad dada la presión de tapada correspondía al peso de suelo sumergido por encima de la profundidad en consideración, punto 1. Al producirse el descenso de las aguas la presión pasa primero a la de suelo saturado, punto 2 y es la que se ha denominado σ'_{zt1} . Luego se produce la desecación que origina la máxima succión, punto 3 (y punto A). Al ascender nuevamente las aguas disminuye la succión hasta que se elimina totalmente al alcanzar el nivel de la profundidad en consideración, punto 4 coincidente con el punto 2.

Cuando las aguas alcanzan su nivel original antes de que comenzara el descenso, se pasa al punto 5 aproximadamente coincidente con el punto 1. Los depósitos que se han producido con posterioridad a la evolución explicada conducen al estado actual de tensiones, representado por el punto 6.

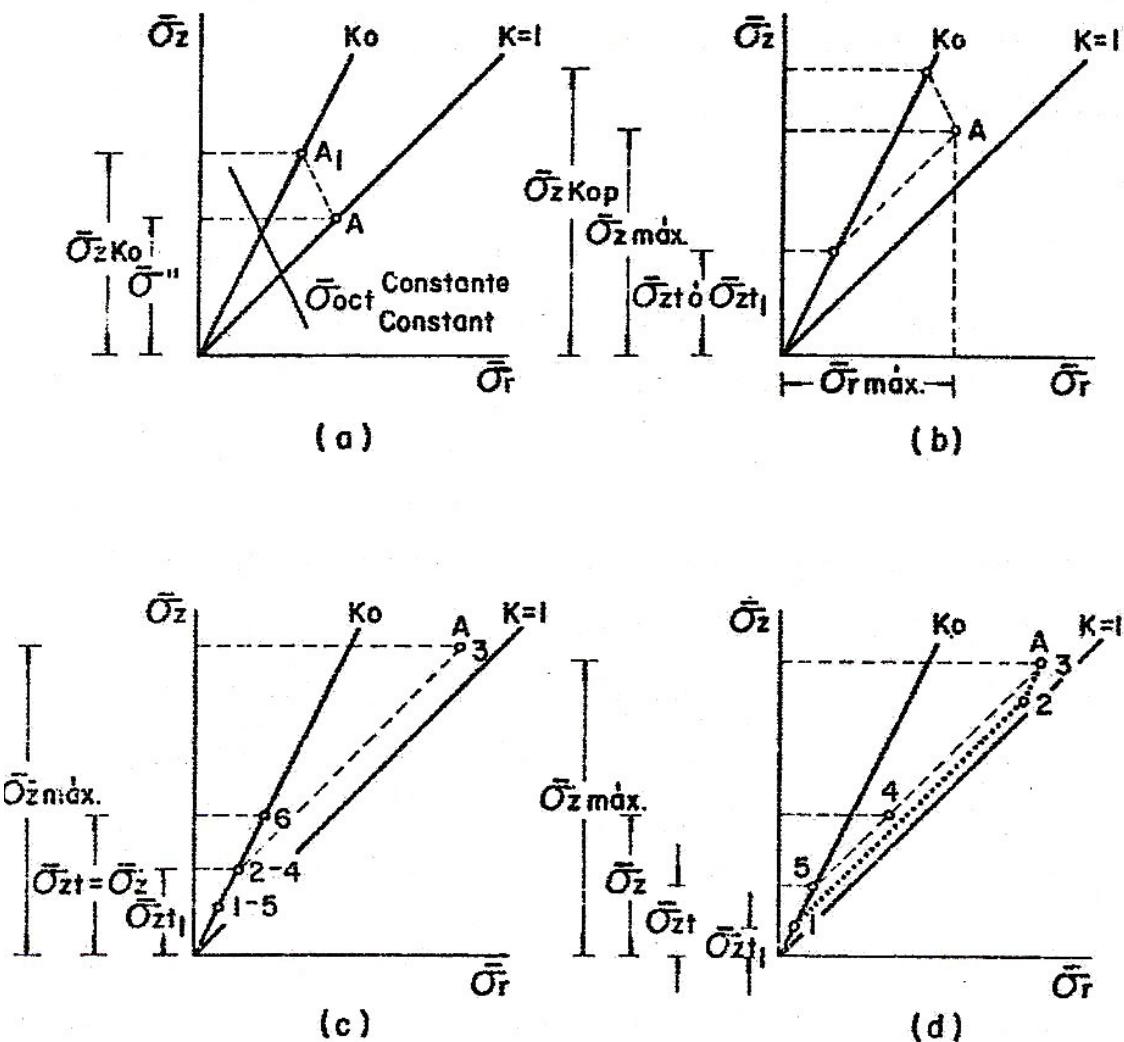
En los suelos transportados eólicamente, la consolidación por desecación se ha producido, en general, con una pequeña tapada.

En la Fig. 5-d se muestra este caso. El agua transporta el loess redepositándolo en depresiones propias del relieve del suelo o producidas por el viento. Estos transportes pueden ser a cortas distancias pero suficientes para que el loess transportado hidráulicamente inicie su transformación en loess redepositado. El punto 1 corresponde a la situación antes de que comience la desecación. El valor de σ'_{zt1} puede ser muy pequeño. La succión producida por desecación lleva el material al punto 2, no necesariamente en un solo período seco, sino que puede ser alcanzado en varios procesos. Mientras tanto continúa la formación del depósito.

Para determinar $\sigma'_{z \max}$ se utilizaron ensayos edométricos, teniendo en cuenta que para suelos arcillosos saturados la relación succión-contenido de humedad puede obtenerse de dicho ensayo, con una aproximación, en general, aceptable. Si no existiera la dilatancia esta determinación sería exacta y la succión igual a la tensión media en el ensayo. La dilatancia positiva o negativa introduce un error variable con cada suelo.

En la Fig. 5.a se indica como puede obtenerse el valor de la succión, σ'' , para cada relación de vacíos o contenido de humedad, en función de la correspondiente presión vertical. σ'_{zKo} en el ensayo edométrico.

En la Fig. 5.b, se indica como se ha determinado el valor $\sigma'_{z \max}$ que aparece en la tabla II y en la Fig. 4. En el diagrama σ'_z σ'_r el estado de tensiones que produce este punto $\sigma'_{z \max}$ se representa por la letra A en las Figs. 5-a, -b, -c y -d. Según como se haya producido el proceso de consolidación por desecación se emplea el valor de la presión de tapada actual, σ'_{zt} , o la presión de tapada en el momento en que se produjo la máxima succión en el suelo, σ'_{zt1} .



$\bar{\sigma}_z$: Presión vertical - Vertical pressure

$\bar{\sigma}_z Ko$: Presión vertical en el edómetro - Oedometer vertical pressure

$\bar{\sigma}_z max$: Máxima presión vertical - Maximum vertical pressure

$\bar{\sigma}_{zt}$: Presión de tapada - Overburden pressure

$\bar{\sigma}_{zt Kop}$: Presión de preconsolidación en el edómetro
Oedometer preconsolidation pressure

$\bar{\sigma}_{zt1}$: Presión de tapada correspondiente a máxima succión en el suelo
Overburden pressure corresponding to maximum soil suction

$\bar{\sigma}''$: Presión negativa del agua en los poros ó succión en el suelo (-u)
Negative pressure in the pore water or soil suction (-u)

FIGURA 5

El viento erode todas las áreas donde existe loess, originando zonas de deposición que son llenadas en períodos de lluvias por material arrastrado por la misma; este material sufre el proceso que lo transforma en loess redepositado, después de lo cual es más resistente a la

erosión, la cual opera entonces en otras áreas. De esta manera se forma una masa uniforme de material compacto que va incrementando su espesor y agregando una carga vertical, igual a la diferencia entre σ'_{zt} y σ'_{zt1} , punto 3 (y punto A).

La situación de máxima succión se produce solo bajo condiciones climáticas adecuadas y, en el momento actual., en general, el estado de tensiones corresponderá a una succión que puede ser menor, punto 4, que la máxima, o aún nula para la parte de depósito eólico que ha quedado bajo el nivel freático, punto 5.

Influencia de la contracción por secado y de la restricción a la expansión durante la humectación

Los caminos de tensiones de las figuras 5-c y 5-d pueden quedar modificados por la influencia de la contracción por secado y de la restricción lateral a la expansión durante la humectación. Por ejemplo Aitchison y Woodburn⁽²⁾ y Moretto⁽³⁾ han considerado el efecto de la existencia de discontinuidades creadas por el incremento de la succión en el suelo en dos procesos diferentes entre sí y de los que se describen a continuación.

Depósitos fluviales.- En el caso de los suelos depositados fluvialmente, Fig.. 5-c la máxima succión capaz de producir cambios de volumen corresponde al estado de tensiones representado por el punto 3, estado que da lugar a las máximas discontinuidades, las cuales son, sin embargo, un fenómeno relativamente superficial que afecta solamente pocos metros superiores de una capa de más de 20 metros de espesor. Komornik y Zeitlen⁽⁴⁾ han determinado el valor de las presiones laterales de expansión en función de la presión vertical y del contenido de humedad inicial de una arcilla a la que se le permite saturarse bajo una presión vertical menor que la que produjo consolidación. Cuando la presión vertical es sensiblemente menor a la de consolidación la relación entre σ'_r y σ'_z es grande (considerablemente mayor que 1) y viceversa, cuando la presión vertical se acerca a la de consolidación, dicha relación se acerca a la existente cuando comienza el proceso de expansión, produciendo, en general, como es de esperar, los estados de tensiones similares a las que se originan durante la descarga de un ensayo de consolidación, con diferencias que surgen cuando se opera con suelos no saturados.

En la Fig. 6-a se reproduce el camino de tensiones representado en la Fig. 5-c, para el suelo ubicado en la cota -20,00 en la Fig. 2, sometido al $\sigma'_{z \max}$ indicado en la Fig. 4, teniendo en cuenta la influencia de la restricción lateral a la expansión. Obsérvese el desplazamiento, desde la línea K_o , del punto 6, representativo del estado de tensiones de dicha cota, antes que se ejecuten trabajos de ingeniería en el lugar.

La línea gruesa a rayas es la curva de descarga en la prueba edométrica. La línea gruesa llena es la curva de expansión estimada en el terreno. La relación de vacíos es menor a la que correspondería a un suelo normalmente consolidado bajo la presión de tapada actual como consecuencia de la evolución 2-3-4-5-6, que deja al suelo preconsolidado, como lo demuestran los resultados de los ensayos edométricos.

Depósitos eólicos.- En los suelos transportados eólicamente, Fig. 5-d, la máxima succión capaz de producir cambios de volumen corresponde al estado de tensiones representado por el punto 2. Por el proceso ya explicado, una vez que la acción eólica y la redeposición hidráulica han transformado el loess original en una masa de material compacto, puede considerarse una situación en que no existan ni se originen discontinuidades dignas de consideración.

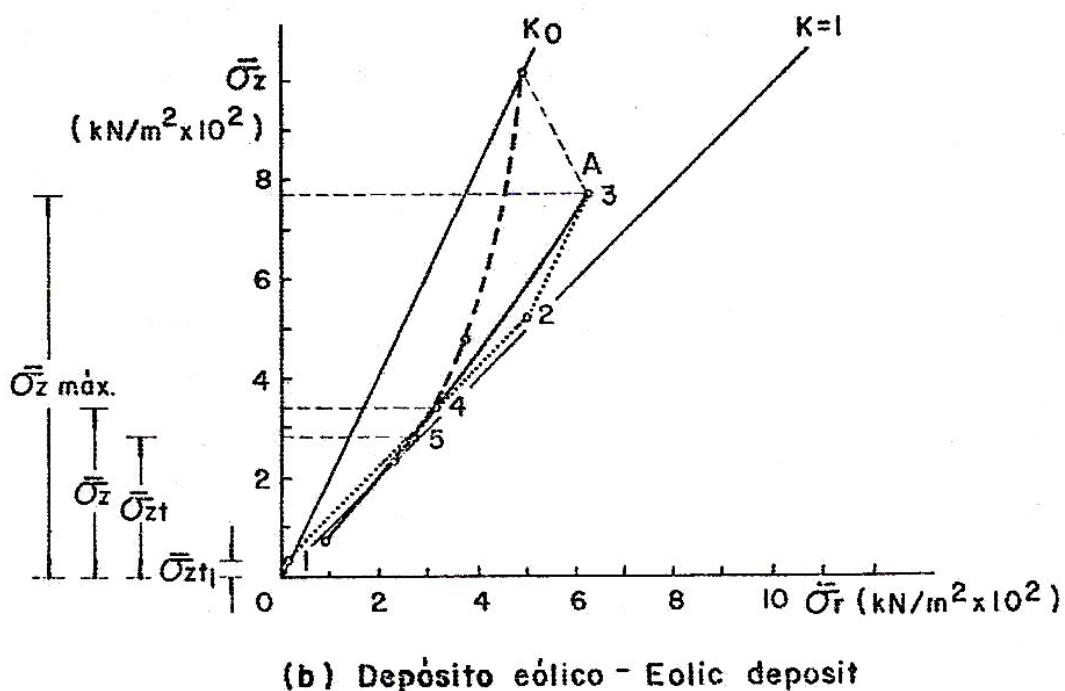
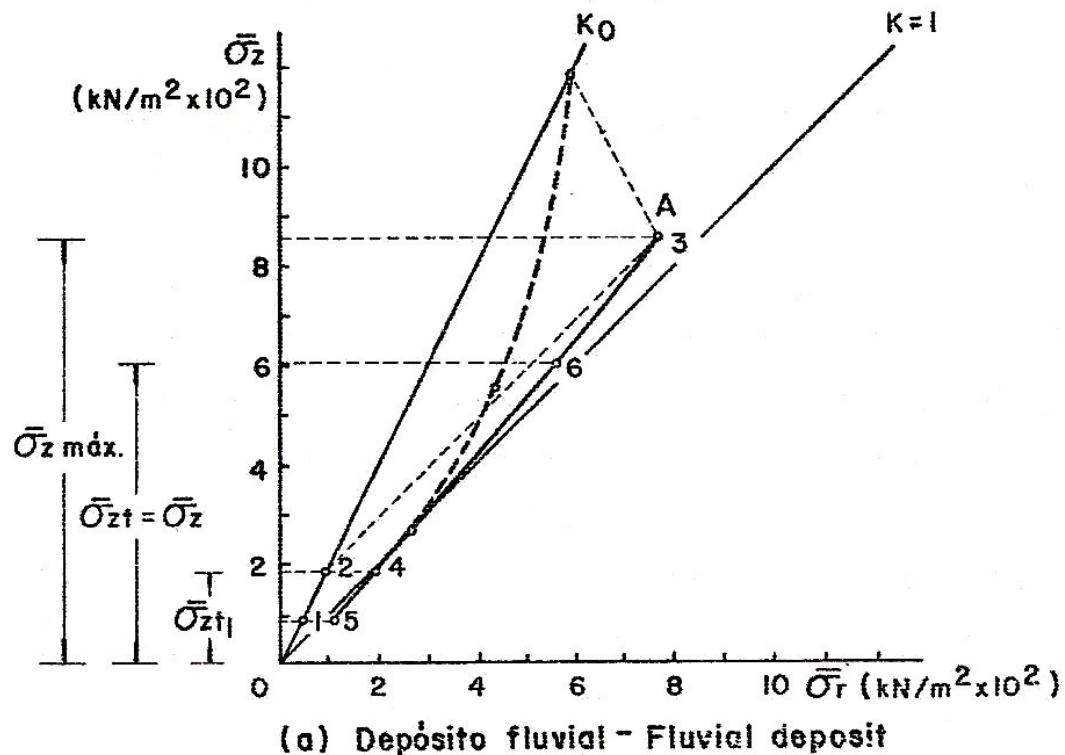


FIGURA 6

Cuando eventualmente, una fuerte desecación da origen a la formación de fisuras verticales, las mismas son rellenadas finalmente por carbonato de calcio o magnesio. Por consiguiente, en general, cuando la succión disminuye y el suelo tiende a expandirse, evolución 3-5, se origina una restricción lateral similar a la explicada para depósitos fluviales y, consecuentemente, en lugar de la evolución 3-5 de la Fig.5-d se debe tender a una situada a la

derecha de la misma. Sin embargo, debe señalarse que, como es el proceso se produce por primera vez en áreas limitadas, es posible que se originen desplazamientos laterales que reduzcan en algo el valor de la reacción que se crea cuando se lo restringe totalmente.

En la Fig. 6-b se reproduce el camino de tensiones representado en la Fig.5-d, para el suelo ubicado en la cota +10,00 en la Fig.2, sometido al σ'_z _{max} indicado en la Fig.4, teniendo en cuenta la influencia de la reducción lateral a la expansión durante la humectación. Como consecuencia de la misma, el punto 4, representativo del estado de tensiones o dicha cota antes de que se efectúen trabajos de ingeniería, se desplaza de la línea K_o hasta casi la línea $K=1$. El nivel freático a la cota +4,00 origina una succión igual a σ'_z menos σ'_{zt} .

En este caso, igual que para los depósitos fluviales, la relación de vacíos es menor que la que corresponde a un suelo normalmente consolidado bajo la presión de tapada actual y el suelo está preconsolidado como consecuencia de la evolución 1-2-3-4.

Necesidad de mediciones sistemáticas.- Mediciones sistemáticamente realizadas podrían dar una respuesta al problema del estado inicial de tensiones aunque, particularmente en los depósitos eólicos, deben esperarse resultados erráticos.

Son muchas las situaciones que pueden considerarse posibles y probables en la formación del suelo.

Se debe repetir, que por medio del ensayo de consolidación solo se pueden medir los valores de succión capaces de producir cambios de volumen. Del punto de vista práctico son los que interesan; pero, cuando el suelo deja de estar saturado, las presiones de succión son mayores que aquellas. Los diagramas de las Figs. 4, 5 y 6 no las consideran.

INFLUENCIA DEL CALCIO Y DEL MAGNESIO

El carbonato de calcio no tiene mayor influencia en las propiedades del suelo. Aparece como nódulos y eventualmente como planchas de poco espesor constituyendo un inerte en la masa del mismo.

Los análisis químicos, representados en la Tabla I, revelan un exceso de CaO o MgO con respecto al CO₂ necesario para transformarlo en carbonato de calcio y magnesio; corresponden a un perfil de la Ciudad de Buenos Aires ⁽¹⁾, e ilustran al respecto.

TABLA I

CaO, MgO, CO₂ en las subzonas Ia), Ib), Ic) del Pampeano
CaO, MgO, CO₂ in the subzones Ia), Ib), Ic) of Pampeano

Zona Zone	Cotas Elevation	CaO(%)	MgO(%)	CO ₂ (%)
Ia)	17.50	2.18	1.00	0.11
Ia)	12.50	1.60	1.00	-
Ib)	6.50	2.79	1.72	0.36
Ib)	5.00	1.78	1.90	-
Ib)	4.00	2.06	1.50	0.16
Ib)	-2.00	1.70	1.70	0.40

Dicho exceso podría indicar que parte de estos óxidos han producido modificaciones en el suelo similares a las que se originan en la estabilización con cal. De aceptarse esta interpretación, se constata un efecto notable en el horizonte entre las cotas +7,00 y +1,00, donde la sola acción de las tensiones producidas por la desecación no es suficiente para justificar la magnitud de la preconsolidación que muestran los ensayos edométricos. P.E.Fossberg ⁽⁵⁾ ha demostrado que las arcillas estabilizadas con cal se comportan como un material preconsolidado. Puede considerarse probable que durante la deposición de las cineritas ubicadas entre dichas cotas + 7,00 y + 1,00, las condiciones climáticas hayan sido favorables para el proceso de estabilización.

En el resto del perfil eólico el calcio y el magnesio se presentan en menores proporciones y modifican en forma moderada las, propiedades mecánicas de las arcillas (CL ó CH) que lo constituyen. En las arcillas (CL ó CH) que constituyen el perfil fluvial dichas propiedades mecánicas se aproximan más a las que se corresponden con sus constantes físicas.

COMPRESIBILIDAD

Para medir la compresibilidad de los distintos suelos del perfil se ha utilizado el edómetro, ensayándose muestras de 10 cm de diámetro extraídas con sacamuestras Denison. En la Tabla II se presentan para distintas zonas del mismo, juntamente con otros valores necesarios para el cálculo de los asientos, los que se obtienen para el índice de compresión C_c , de la curva virgen, y los que se obtienen para la curva promedio de la descarga y recarga, columna $(C_s + C_r)/2$, donde C_s es el índice de hinchamiento y C_r el índice de recompresión.

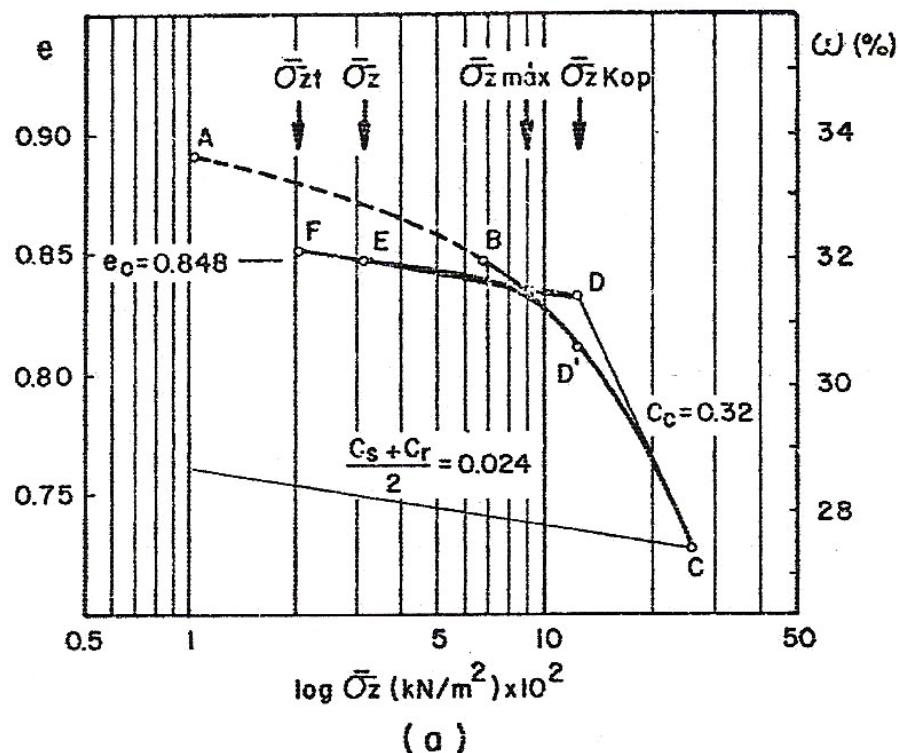
TABLA II
DATOS SOBRE COMPRESIBILIDAD DE LAS DISTINTAS ZONAS DEL PAMPEANO
DATA ON COMPRESSIBILITY FROM DIFFERENT ZONES OF THE PAMPEANO

Zona Zone	Prof. Depth (m)	Cota Elev. (m)	e_o	ω (%)	ω_L (%)	ω_P (%)	IP (%)	C_c	$\frac{C_s+C_r}{2}$ (kN/m ³)	γ_s	γ	σ'_{zt}	σ'_{zkop}	$\sigma'_{z max}$
Ia)	10.16	15.00	0.848	320	67.0	30.0	37.0	0.32	0.024	25.98	18.53	2.00	12.20	8.80
Ia)	12.16	13.00	0.888	33.5	67.0	31.5	35.5	0.33	0.025	25.98	18.33	2.25	10.29	7.65
Ib)	20.00	5.16	0.826	31.4	41.3	27.8	13.5	0.15	0.010	25.78	18.53	3.70	--	10.0*
Ib)	27.20	-2.04	0.848	32.0	51.0	30.0	21.0	0.18	0.012	25.98	18.53	4.42	10.78	7.55
Ic)	32.70	-7.54	1.180	44.5	69.0	33.5	35.5	0.28	0.020	25.98	17.25	4.90	9.80	7.25
II	39.05	-13.89	0.860	32.5	88.0	27.0	61.0	0.55	0.053	26.47	18.63	5.39	13.73	10.20
II	49.70	-24.54	0.888	33.5	48.5	22.0	26.5	0.31	0.027	25.98	18.33	6.31	9.31	7.94
II	53.75	-28.59	1.000	37.0	64.5	24.5	40.0	0.62	0.060	26.47	18.09	6.66	9.80	8.53

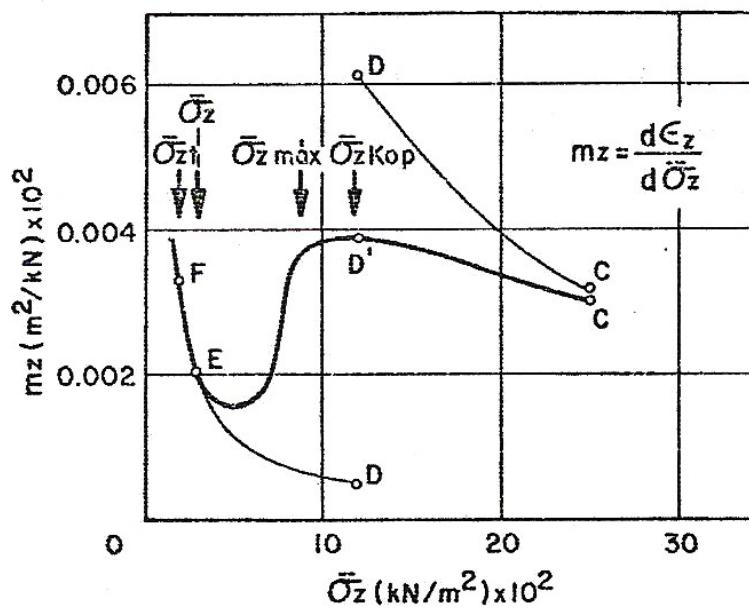
* De ensayos de consolidación isotrópico - From isotropic consolidation tests

En la figura 7(a) se muestra el resultado de un ensayo edométrico de una arcilla de la subzona Ia), muestra N°1 de la Tabla II. La expansión del suelo y la imperfección del extractor hacen que la muestra, que está saturada en el suelo, deje de estarlo al iniciarse el ensayo, punto A, y que recién vuelva a la condición de saturación en el punto B. A la presión que corresponde a

este punto o a alguna algo menor debe sumergírsela durante la ejecución del ensayo edométrico.



(a)



(b)

FIGURA 7

La parte de la curva representada con rayas corresponde a la condición de muestra no saturada, y la de línea llena a la de muestra saturada. Hasta la sumersión de la muestra deben tomarse precauciones para evitar la evaporación.

En general las curvas asiento-tiempo definen un asiento tipo Terzaghi. Establecidos los valores R_0 y R_{100} lecturas del dial correspondientes a 0 por ciento y 100 por ciento de la consolidación, respectivamente, en el ensayo edométrico se puede dibujar, para cada intervalo, la curva $\varepsilon_z \sigma'_z$ y determinar la presión de preconsolidación σ'_{zKop} (punto D).

Se ha encontrado satisfactoria, en general, la construcción de Casagrande. Se señala que en la Fig.7(a), la máxima presión σ' utilizada en el ensayo, punto C, apenas permite dibujar la curva virgen; si es posible, conviene llegar hasta el valor, recomendado en general, de 8 σ'_{zKop} , aunque prácticamente todos los análisis requieren fundamentalmente el conocimiento de la curva de descarga y recarga. Conviene precisar la posición de la curva virgen para ubicar lo más correctamente posible el punto C, y consecuentemente la presión de preconsolidación, σ'_{zKop} . Igualmente conviene realizar una descarga y recarga al llegar aproximadamente a una presión vertical intermedia entre las que corresponden a los puntos B y C. Naturalmente que esto requiere un conocimiento previo aproximado de σ'_{zKop} .

Determinado el peso inicial, el final total y seco de toda la muestra, la humedad inicial y final y el peso específico absoluto, los diagramas $\varepsilon_z \sigma'_z$ pueden ser transformados en diagramas $e \sigma'_z$ ó $\omega \sigma'_z$.

El punto que representa la situación en el terreno, punto E, se halla en la intersección de la curva de hinchamiento con el valor $e_0 = \omega \gamma_s$, correspondiente a la relación de vacíos que queda saturada con la humedad inicial de la muestra ensayada.

En los suelos fuertemente preconsolidados, particularmente cuando sobre los mismos apoyan cimentaciones flotantes, los asientos se calculan esencialmente utilizando las curvas de descarga y recarga. Cuando dichas curvas se reemplazan por una única recta se pueden cometer errores importantes, como puede observarse en la Fig. 7(b), donde se presenta el diagrama $m_z \sigma'_{zKop}$, correspondiente al ensayo de consolidación de la Fig. 7(a).

El símbolo m_z ⁽⁶⁾ es la relación entre el incremento de la deformación específica lineal, $d\varepsilon_z$, en la dirección vertical, z, y el incremento de la tensión efectiva, $d\sigma'_z$, en la misma dirección. A lo largo de la curva virgen en el ensayo edométrico,

$$m_z = m_v$$

En la Fig. 7(b) se representa con una linea delgada los valores de m_z a lo largo del camino de tensiones FDC. Puede observarse que en el punto D existen 2 valores de m_z , uno correspondiente a la curva de recompresión y otro a la curva virgen. La línea gruesa representa los mismos valores para el camino de tensiones, más cercano a la realidad, FD'C. Los valores de m_z coinciden para ambos caminos de tensiones para

$$\sigma'_z \leq \frac{1}{2} \sigma'_{z \max}$$

$$\sigma'_z > 2 \sigma'_{zKop}$$

En el intervalo comprendido entre $\frac{1}{2} \sigma'_{z \max}$ y $2 \sigma'_{z \text{Kop}}$, los valores de m_z obtenidos utilizando el camino de tensiones FDC son menores que los que corresponden al camino FD'C en el rango de la recompresión y mayores en el rango de presiones correspondientes a la curva virgen. Se señala que los asientos son directamente proporcionales a m_z y, por lo tanto, de usarse indiscriminadamente el camino FDC, en el primer caso serían calculados en defecto y en el segundo en exceso. Naturalmente que los límites de coincidencia de ambos caminos de tensiones son una función de las características del suelo.

Cuando se debe resolver un problema práctico con distintos tipos de suelos y numerosos ensayos a realizar, todos los cálculos pueden realizarse trabajando con deformaciones específicas en lugar de relaciones de vacíos. Esto ha sido preconizado por numerosos autores⁽⁷⁾ ya que introduce una simplificación considerable.

Como las deformaciones específicas son valores relativos, durante la ejecución de los ensayos deben efectuarse todas las determinaciones para poder calcular las relaciones de vacíos, pues son necesarios controles y comparaciones que requieren su conocimiento.

Hecha esta advertencia, es frecuentemente posible, en la práctica, trabajar exclusivamente con el diagrama 7(b), que permite elegir para cada rango de tensiones el valor apropiado de m_z , y, consecuentemente, calcular el asiento específico promedio del estrato, que multiplicado por su altura da el asiento del mismo.

En la elección de m_z se debe proceder con criterio. Por ejemplo una buena práctica es retocar la curva FED'C de manera que el tramo DC sustituya al D'C, corrigiendo así solamente los valores en defecto.

PERMEABILIDAD

La subzona Ib), particularmente entre aproximadamente las cotas + 10,00 y 0,00, es una capa drenante. Su coeficiente de permeabilidad, medido por ensayos de bombeo en zonas similares, es del orden de 10^{-6} m/s.

Como dato ilustrativo aplicable a las arcillas de la subzona Ia), se señala que para suelos con ω_L entre 60% y 75% el coeficiente de permeabilidad, computado en base al tiempo para lograr el 95% de la consolidación en el terreno, es del orden de 5×10^{-10} m/s.

La zona II, a los efectos del cálculo de asientos se comporta como una capa impermeable que drena hacia arriba en la subzona Ib) y hacia abajo en las arenas Puelches. El coeficiente de permeabilidad del conjunto, computado en base al tiempo para lograr el 95 % de la consolidación en el terreno es del orden de 5×10^{-11} m/s. El coeficiente de permeabilidad de las capas más impermeables, con ω_L del orden del 90 %, determinado mediante el ensayo de consolidación es del orden de 5×10^{-12} m/s.

LA CARGA NETA Y LOS ASIENTOS EN LOS SUELOS PRECONSOLIDADOS.

Cuando las cargas actúan sobre suelos normalmente consolidados y se efectúan excavaciones, es corriente y normalmente satisfactorio utilizar en el cálculo de los asientos la llamada carga neta⁽⁸⁾, que se obtiene restando de las cargas y sobrecargas que se transmiten al terreno de fundación el peso efectivo del suelo excavado hasta llegar a la cota de fundación.

Como es de conocimiento general, durante las excavaciones se produce una expansión a volumen constante, instantánea, y otra por cambio de volumen, cuya magnitud depende no sólo de la carga y de la altura del estrato removido sino del tiempo, del coeficiente de permeabilidad y del coeficiente de cambio volumétrico.

Tanto en las arcillas blandas como en las preconsolidadas, se conoce por experiencia que la expansión con contenido de humedad constante es pequeña y calculable, cuando así se desea, en igual forma para ambos tipos de suelos.

Por lo contrario, los movimientos originados por cambios de volumen durante la descarga, consecuencia de las excavaciones y durante las subsiguientes recargas y cargas, aunque se determinan aplicando los mismos métodos de cálculo, requieren para los suelos preconsolidados el análisis de ciertos preconceptos originados en las características peculiares de los suelos normalmente consolidados.

Al excavar en un depósito normalmente consolidado el suelo se expande como consecuencia de la descarga y al recargarlo hasta restituir el estado inicial de tensiones los asientos se producen siguiendo las curvas de recarga. Como por una parte durante la expansión no siempre la diferencia de presiones totales se transforma en diferencia de presiones efectivas y como siempre el índice de recompresión, C_r , es considerablemente menor que el índice de compresión, C_c , los asientos se computan generalmente introduciendo la diferencia de presiones sobre la curva virgen, la cual es producida por la carga neta, es decir, se desprecian las deformaciones por cambio de volumen producidas durante la descarga por excavación y la recarga durante la construcción hasta igualar el peso efectivo del suelo removido.

En los suelos preconsolidados, puede darse el caso de que todas las deformaciones por cambio volumétrico se produzcan sobre la curva de descarga y recarga y, en ese caso, no es de aplicación el criterio de la carga neta.

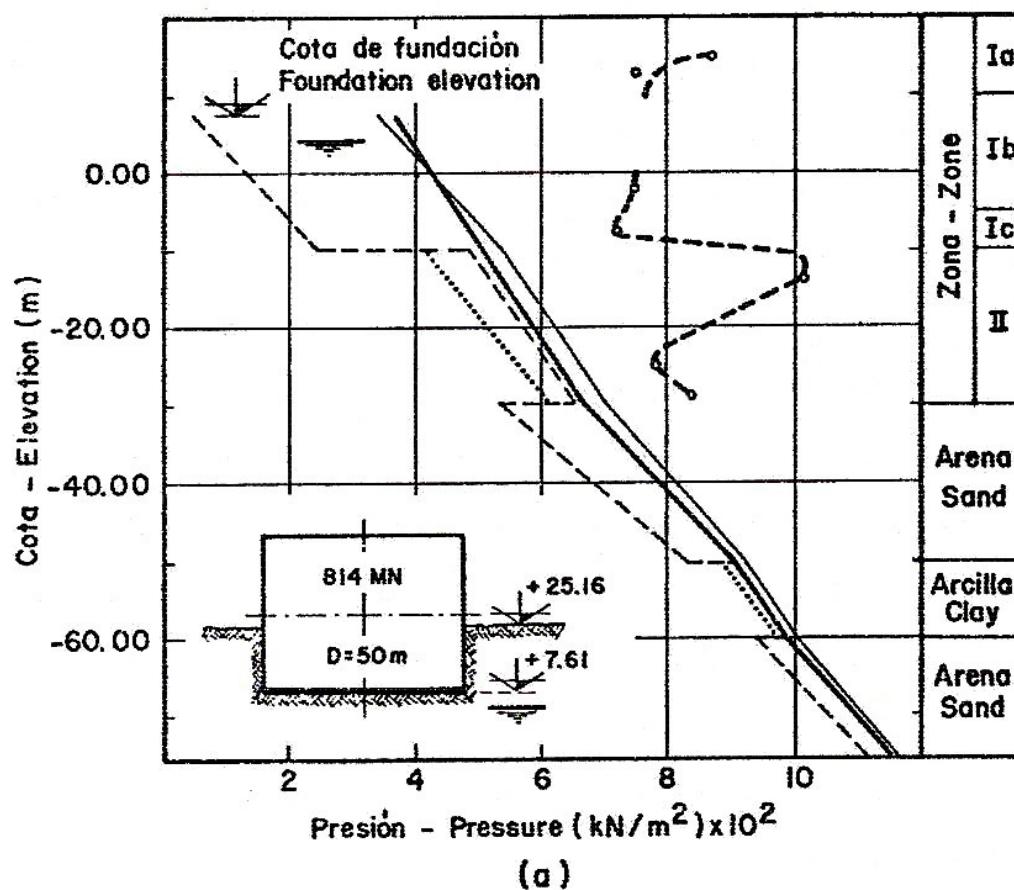
Como se ha indicado más arriba la magnitud de estos cambios volumétricos depende no sólo de la carga y de la altura del estrato sino del tiempo, del coeficiente de permeabilidad y del coeficiente de cambio volumétrico.

En la formación Pampeano, algunas subzonas, como la I(b) son suficientemente permeables como para que el total de los cambios volumétricos correspondientes sigan casi instantáneamente la remoción y aplicación de las cargas; en otras, como la I(a), el total de dichos cambios volumétricos correspondientes se producen cuando las excavaciones se concluyen en algunos meses o, una vez efectuadas, no se recarga el suelo durante algunos meses. Por el contrario, hay zonas, como la II, cuya permeabilidad es tan baja, que el proceso de expansión por cambios volumétricos requiere años para completarse.

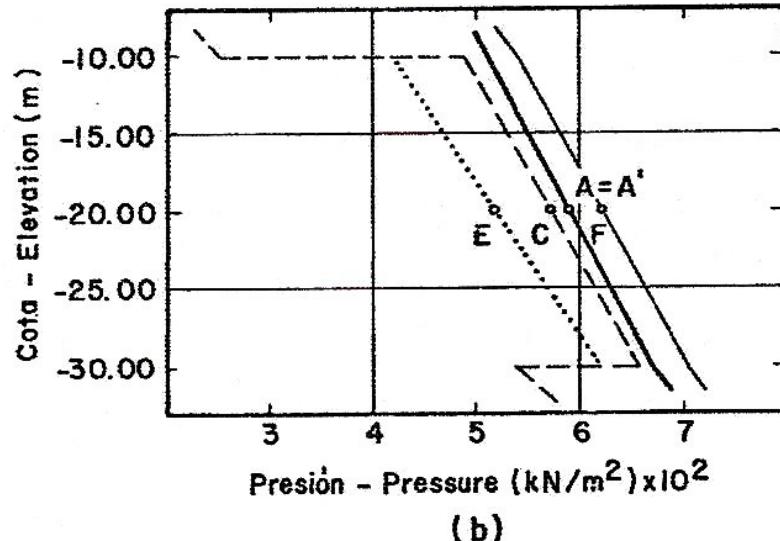
DESARROLLO DE LOS ASIENTOS EN LA FORMACIÓN PAMPEANO

Se presenta un ejemplo que ilustra sobre la forma en que se producen los asientos en la formación Pampeano. Se ha elegido el caso de un área de carga grande de manera que interese zonas y subzonas con distinta compresibilidad.

La estructura está apoyada sobre los terrenos descriptos en esta publicación. Está fundada sobre una platea rígida de 50 metros de diámetro.



(a)



(b)

- $\bar{\sigma}_{zt}$
- $\bar{\sigma}_{z \text{ máx.}}$
- $\bar{\sigma}_z$ al comienzo de la construcción - at beginning of construction
- $\bar{\sigma}_z$ al final de la consolidación - at end of consolidation

FIGURA 8

La carga total aplicada es de 814 MN. La fundación está ubicada en el fondo de una excavación de 17,35 metros de profundidad, con lo cual de acuerdo con los pesos efectivos de los suelos removidos se ha provocado una descarga de 631 MN. La carga neta es por consiguiente de 183 MN, lo que equivale a una reacción promedio contra la platea de 93,2 kN/m².

En la parte inferior izquierda de la Fig. 8(a) se muestra un croquis del ejemplo descripto en el párrafo anterior.

La Figura 8(a) muestra la distribución de presiones verticales en un eje que pasa por el centro de la platea, calculadas con la fórmula de Boussinesq⁽⁹⁾, adoptando para la descarga producida por la excavación los valores correspondientes a la fundación flexible (la carga o descarga total se distribuye uniformemente sobre el área cargada o descargada) y para el peso transmitido a través de la platea rígida los valores correspondientes a este caso (la carga total se distribuye en forma parabólica con un mínimo en el centro).

La línea de trazo lleno gruesa representa el valor σ'_{zt} antes de iniciarse las excavaciones; la línea de rayas gruesas, reproduce los valores de $\sigma'_{z \max}$ de la Fig. 4; la línea de rayas finas, los valores de las presiones verticales efectivas al final de la excavación; las líneas punteadas, existentes solamente en la Zona II y en las arcillas verdes (depósito terciario no perteneciente a la formación Pampeano) los valores de las presiones verticales efectivas al final de la expansión de estas arcillas.

En la figura 8(b) se amplia el diagrama 8(a) entre las cotas -10,00 y -30,00, límites de la Zona II.

En la Fig. 9(a) se muestra la aplicación de la carga en función del tiempo. El diagrama presenta valores a partir del año 0,6 en el cual se inicia la construcción de la estructura sobre el terreno expuesto por las excavaciones, cuyo comienzo es el origen de los tiempos.

En la Fig. 9(b) se muestra la marcha de los asientos (línea gruesa), medidos desde el momento en que se inicia la construcción de la estructura, en función del tiempo. El valor de los asientos se lee en la escala de ordenadas de la derecha. La línea gruesa rayada es una estimación, basada en el diagrama de distribución de presiones de la Fig. 8, del asiento que producirá la carga neta. La línea fina muestra el valor de los asientos que se originan en los suelos cuya permeabilidad permite que los cambios volumétricos sigan la aplicación de las cargas (Suelos de Zonas Ib, Ic y arenas).

En la Fig. 9(c) se muestra la expansión por cambio volumétrico de las arcillas con bajo coeficiente de permeabilidad (Suelos de la Zona II del Pampeano y arcillas verdes) y la posterior recuperación de la misma, ambas en función del tiempo.

Mediante el análisis de los gráficos de las Fig. 8 y 9 es posible comprender como se desarrollan los asientos en el ejemplo en consideración. Estos gráficos representan, respectivamente, los estados de tensiones efectivas en un eje que pasa por el centro de la platea y los movimientos de esta última, teóricamente iguales en todos sus puntos por ser rígida, en función del tiempo.

En el origen de los tiempos el estado de tensiones efectivas está representado por la línea llena gruesa de la Fig. 8(a). La superficie original donde posteriormente se apoyará la platea está representada por el eje de abscisas que pasa por el punto A en la Fig. 9(b).

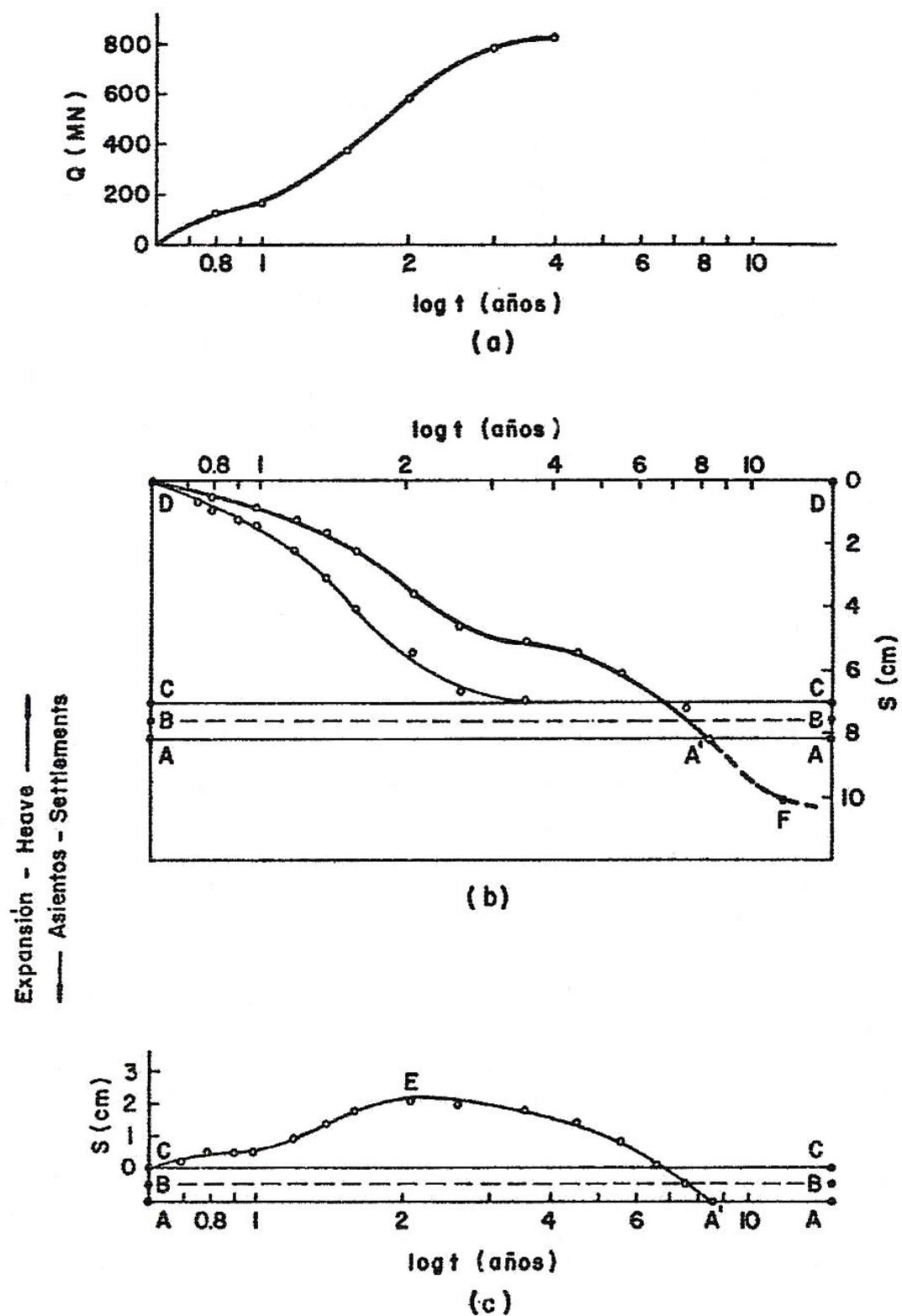


FIGURA 9

En el momento de iniciarse la construcción de la platea el estado de tensiones efectivas está representado por la línea de rayas delgadas de la Fig. 8(a) y el eje de abscisas correspondiente es el que pasa por el punto D. Se ha producido la expansión total (sin cambio de volumen más volumétrica) de los estratos correspondientes a las zonas Ib y Ic y a las arenas de las formaciones ubicadas por debajo de la formación Pampeano, que en el eje de ordenadas está representada por el segmento CD; una pequeña parte de la expansión volumétrica de los suelos de la Zona II y de las arcillas verdes, representada por el segmento BC; como la expansión volumétrica es, en este último caso, muy pequeña, se agrega la expansión sin cambio de volumen, que en este caso no es despreciable y esta representada por el segmento AB del eje de ordenadas.

En la Fig. 9(a) se presenta el aumento de carga sobre la platea en función del tiempo, como consecuencia de la construcción de la estructura que se apoya sobre la misma y de las instalaciones que alberga esta última. El eje de ordenadas a la derecha de la Fig. 9(b) registra el hundimiento de la platea, representada por la línea gruesa de dicha figura, a partir del momento en que se inicia la construcción de la misma y, consecuentemente, comienza la aplicación de las cargas representadas por la Fig. 9(a).

Al proceso de expansión de los suelos de la Zona II y de las arcillas verdes, se suma ahora la consolidación que se inicia en el año 0,6, como consecuencias de los incrementos de carga que se aplican hasta el año 4. El resultado neto de estos dos procesos puede observarse en la Fig. 9(c).

La Zona II y las arcillas verdes continúan expandiéndose hasta que los sucesivos incrementos de carga revierten el proceso (aproximadamente en el año 2, punto E) y comienza la consolidación. En el diagrama 8(b), los puntos A y A', C y E representan las tensiones verticales correspondientes a los mismos puntos en los diagramas 9(b) y/o 9(c); el punto F corresponde a la tensión vertical efectiva al terminar los procesos de expansión provocado por las excavaciones y de consolidación provocados por todos los incrementos de carga.

Los puntos A' de las Fig. 9(b) y 9(c), indican el tiempo transcurrido para que el punto ubicado bajo el centro de la platea recuperen su cota original (algo más de 8 años). A partir de dicho punto A' comienza el asiento originado por la carga neta. Si lo que interesa son los asientos que se producen desde que se inicia la construcción de la estructura, puede observarse que, en este ejemplo, la carga neta solo produce aproximadamente la quinta parte del asiento total por deformación sin cambio de volumen y consolidación primaria (AF dividido por FD en la Fig. 9(b)). Si se predicen los asientos exclusivamente en base a la carga neta, se cometería, obviamente, una subestimación inadmisible.

CONCLUSIONES

El propósito de este trabajo es presentar información y análisis que permitan comprender y predecir la compresibilidad de los suelos de la formación PAMPEANO, particularizada en el caso de los sedimentos de la margen derecha de los ríos Paraná y de la Plata.

Se ha comenzado con una consideración de la división estratigráfica, para la cual se ha adoptado la propuesta por González Bonorino. Aunque este autor no establece la importante diferencia que, en Geotecnia, existe entre el loess y el loess redepositado, la circunstancia que, en la Zona en consideración, solo existe este último a las profundidades que interesan para las cimentaciones, permite disponer de toda la precisión que agregan sus estudios mineralógicos para diferenciar correctamente los distintos estratos. Particularmente en la que González Bonorino denomina Zona eólica existe una buena correspondencia en la división en subzonas propuestas por este autor y las diferentes propiedades geotécnicas de las mismas.

En la zona que denomina fluvial (aproximadamente el tercio inferior en la formación Pampeano) las propiedades geotécnicas de los suelos que la constituyen muestran variaciones que, probablemente, requieren un análisis geológico más particularizado para lograr una correlación satisfactoria. En general, puede decirse que el trabajo de González Bonorino es un aporte muy importante desde el punto de vista de sus aplicaciones a la Geotecnia.

En la clasificación unificada, los suelos de la formación Pampeano son, en general, arcillas, tanto en los depósitos eólicos como fluviales, con un amplio rango de variación del límite líquido, la mayoría de cuyos valores se encuentra entre 30 y 80. En la mitad superior de la formación, en espesores y profundidades variables entre distintos lugares, pero en general, constituyendo estratos de varios metros de espesor aproximadamente horizontales, se encuentran depósitos que en 1a clasificación unificada son, en general, limos, la mayoría de cuyos límites líquidos se encuentra entre 35 y 55, con cementación calcárea y una estructura con cavidades y poros abundantes, y que el estudio mineralógico de González Bonorino señala que contienen abundante vidrio volcánico.

Toda la formación Pampeano se encuentra preconsolidada por desecación, excepto cuando actúa la máxima succión, en cuyo caso se encuentra consolidada. Mediante el ensayo en el edómetro es posible tener una razonable estimación de la máxima succión capaz de producir cambio de volumen a que fue sometido el suelo y consecuentemente la máxima presión vertical correspondiente a dicha succión. En este trabajo se presentan valores obtenidos siguiendo este procedimiento. En general, la preconsolidación ha creado suelos muy compactos, pero, precisamente por ser consecuencia de la succión en períodos de sequía, puede ser variable, y, particularmente en las arcillas del tercio superior, aparecen muchas veces, gruesas capas y en cualquier profundidad de la formación capas delgadas, de consistencia media y muy excepcionalmente, blandas. Los depósitos con abundante vidrio volcánico, denominados corrientemente "toscas" con cementación calcárea son, en general muy duros.

No existe una investigación sistemática que permita definir el estado inicial de tensiones. En este trabajo se analizan estados probables que conducen, en general, a la conclusión de que en la parte preconsolidada, pueden esperarse estados de tensiones similares a las que corresponden a la zona preconsolidada de un ensayo edométrico. Cuando actúa la máxima succión el estado de tensiones es, aproximadamente, isotrópico.

El suelo, a todas las profundidades, está saturado o aproximadamente saturado, excepto en los pocos metros superiores, donde, cuando la superficie no está cubierta, está sometido a cambios provocados por las variaciones climáticas. En este trabajo no se analiza este último caso, sobre el que existe amplia bibliografía.

Esencialmente se estudian las posibilidades del ensayo en el edómetro para predecir la magnitud y el desarrollo de los asientos. En principio puede decirse que los resultados son positivos, pero debe señalarse que cada problema debe analizarse cuidadosamente, dejando de lado preconceptos adquiridos cuando se trabaja con suelos normalmente consolidados o preconsolidados muy impermeables; uno de los más peligrosos es el de la carga neta.

El edómetro es un aparato para medir cambios de volumen por caminos de tensiones perfectamente definidos, los cuales coinciden con los reales para condiciones de carga perfectamente definidas, por lo cual, como regla general, siempre debe verificarse si los resultados obtenidos del mismo son aplicables sin errores inaceptables al problema en consideración. Si, además, el suelo está consolidado por desecación, los estratos afectados tienen permeabilidades considerablemente diferentes y, casi sin excepción, todas las deformaciones son resultantes de procesos de descarga, y recarga en un rango de presiones menores que la de preconsolidación, se comprende que la utilización exitosa del edómetro exige el análisis cuidadoso mencionado anteriormente.

Por otro lado la propia complejidad del problema requiere simplificarlo a límites manejables tanto teórica como económicamente; además deben adoptarse técnicas que permitan resolverlo en plazos de tiempo razonables, por lo cual en el momento de las decisiones se encontrará, muy frecuentemente, que la opción más ventajosa es la investigación con ensayos en el edómetro ejecutados sobre nuestras adecuadas, por ejemplo, las que se obtienen con el sacamuestras Denison, aún cuando el análisis se efectúe posteriormente por métodos numéricos, como el de los elementos finitos.

Los edómetros deben ser capaces de operar a presiones elevadas; para definir satisfactoriamente la presión de preconsolidación de la mayoría de los suelos de la formación Pampeano es aconsejable utilizar presiones máximas comprendidas entre 50 y 100 Kg/cm². Deben estudiarse muy cuidadosamente las curvas de descarga y recarga que parten de aproximadamente el valor de la presión de preconsolidación, pues todos los cálculos se efectúan, en la mayoría de los casos, con datos obtenidos de las mismas.

Igual que para los suelos normalmente consolidados, se puede considerar que es posible predecir con razonable precisión la magnitud de los asientos. La exactitud de la predicción de las relaciones expansión - tiempo y asiento - tiempo, como en los suelos normalmente consolidados, no es mayor que la que permite la de los valores de los coeficientes de consolidación introducido en los cálculos, comparados con los reales de los estratos en consideración, es decir, en general, no es muy confiable.

Debido a la baja compresibilidad de la formación Pampeano no es frecuente disponer de casos bien documentados que permitan correlacionar las propiedades de los suelos con los resultados obtenidos. Este trabajo presenta una cantidad apreciable de parámetros importantes usados en Geotecnia de manera que en cada oportunidad en que ello sea posible en el futuro se pueda utilizarlos como referencia y mediante nuevas determinaciones ir ajustando el conocimiento de los mismos de manera que se pueda aumentar la precisión de las

predicciones obtenidas por cálculo. Estos parámetros serán también de utilidad para hacer estimaciones previas.

Todos los ensayos presentados han sido realizados en los laboratorios de Bolognesi-Moretto, Ingenieros Consultores, como parte de trabajos profesionales realizados por los ingenieros A.J.L.Bolognesi y O.Moretto. Los datos sobre el incremento de las cargas y de los asientos con el tiempo fueron suministrados por la empresa Siemens Bauunion hasta la finalización de la Construcción de las obras y posteriormente por la Comisión Nacional que las opera después de ejecutadas. Las hipótesis presentadas en este trabajo han sido elaboradas de manera que los resultados obtenidos se concilien con las propiedades de los suelos. Las estimaciones efectuadas previamente a la construcción basadas en un balance entre cálculos y experiencias previas se cumplieran con remarcable precisión.

APÉNDICE 1

REFERENCIAS

- 1- González Bonorino F., "Mineralogía de las fracciones arcilla y limo del Pampeano en el área de la Ciudad de Buenos Aires y su significado estratigráfico y sedimentológico". *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Tomo XX Núm. 1, Enero - Marzo de 1965; pp. 67-148.
- 2- Aitchison G. D. y Woodburn M. E., "Soil Suction in Foundation Design", *Proceedings of the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico 1969, Volumen 2, pp. 1-8.
- 3- Moretto O., Contribución a la Sesión plenaria del tema Deep excavations and tunneling in soft ground, *Proceedings of the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico 1969, Volumen 3, pp. 357-359.
- 4- Komornik A. y Zeitlen J. G., "An Apparatus for Measuring Lateral Soil Swelling Pressure in the Laboratory" *Proceedings of the Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal 1965, Volumen 1, pp. 278-286.
- 5- Fossberg P. E., "Some Fundamental Engineering Properties of limo-stabilized Clay", *Proceedings of the Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal 1965, Volumen 1, pp. 221-225.
- 6- Bolognesi A. J. L. "Extended Use of Oedometer Test Data", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, GT9, September 1974, pp. 1075-1080.

- 7- Brumund W. F., Jonas E. y Ladd C. C., "Estimating in Situ Maximum Past (Preconsolidation) Pressure of Saturated clays from Results of Laboratory Consolidometer Tests". *Special Report 163, Transportation Research Board, National Research Council*, Washington D. C., 1976.
- 8- Terzaghi K. y Peck R. B. "Soil Mechanics in Engineering Practice" *Second Edition. John Wiley and Sons. Inc. Edición en español Editorial EL ATENEO*. Buenos Aires.