

MEDICIONES DE ASENTAMIENTOS DE EDIFICIOS EN LA ARENA FLUVIAL SATURADA DE CONCEPCION Y VIÑA DEL MAR, CHILE

Mauricio POBLETE*

Patricio CAIOZZI y Alberto SCHOLZ**

RESUMEN

El presente trabajo es el resultado de mediciones de asentamientos en dos edificios de 12 y 14 pisos de altura, con subterráneo, apoyados sobre losas rígidas de fundación. Los edificios están ubicados en las ciudades de Viña del Mar y Concepción, Chile, sobre un subsuelo de arena fluvial saturada, con napa de agua por sobre el nivel de fundación. Las mediciones comprendieron un lapso de 15 meses y fueron realizadas utilizando nivelaciones topográficas que garantizan una exactitud de $\pm 0.1 \text{ mm}^1$.

Los asentamientos medidos se utilizaron para estimar valores del módulo de deformación a una cierta profundidad equivalente. A partir de estos valores se proponen leyes de variación del módulo con la profundidad para ser usadas en la estimación de asentamientos mediante métodos basados en la teoría de elasticidad.

ESTRUCTURAS INSTRUMENTADAS Y RESULTADOS

Las estructuras estudiadas fueron seleccionadas por sus características de edificios altos, simétricos y fundados sobre suelo homogéneo y relativamente bien explorado.

* Ingeniero Civil, Investigador de IDIEM.

** Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

1. Edificio en arena - Concepción

Es una torre de base aproximadamente cuadrada, de 14 pisos de altura más un subterráneo y un piso zócalo. La fundación es una losa rígida de hormigón armado, de 24 x 24 m fundada a la profundidad de 5.70 m bajo el nivel del terreno circundante. Adyacente a la torre existe una placa de 2 pisos más un piso zócalo, que se proyectó estructuralmente independiente de la torre y además se construyó cuando ésta estuvo muy avanzada en su construcción. Hasta la última medición efectuada no se detecta efecto alguno de la posible influencia de la placa en el asentamiento de la torre y por tal razón no se hacen más referencias a ella en este trabajo.

El suelo de fundación es un grueso depósito fluvial de arenas basálticas que se extiende hasta más de 90-100 m de profundidad. Como lo muestra la Fig. 1

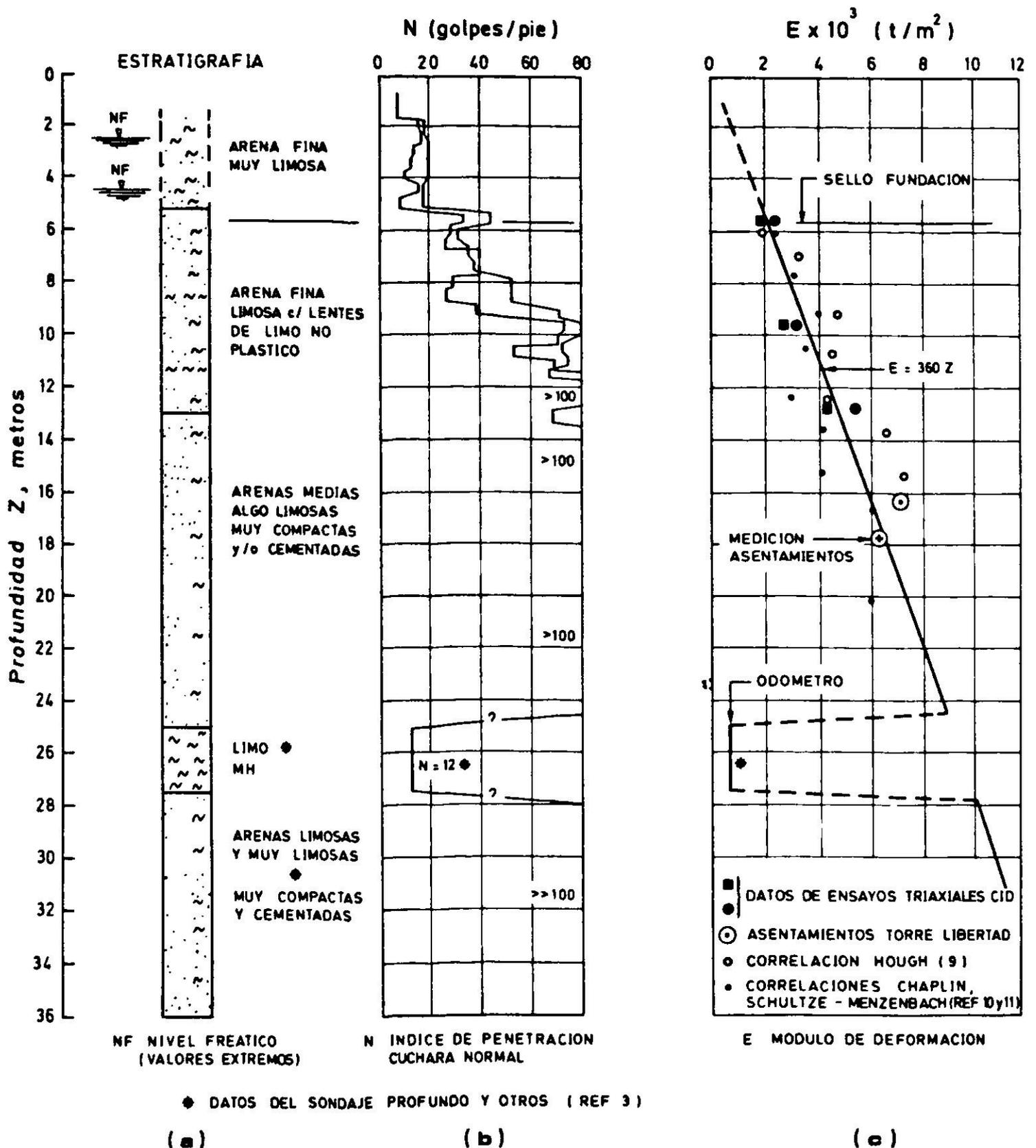


Fig. 1. Propiedades del suelo de fundación edificio en arena, Concepción

está constituido por arenas limosas compactas de tamaño medio y fino, con ocasionales interestratificaciones delgadas de limo relativamente compresible². Existe además una capa de limo MH normalmente consolidado que se detecta entre los 25.0 y 27.5 m de profundidad, seguido de capas arenosas muy compactas y con indicios de cementación³.

La napa freática en el lugar del edificio varía según la época del año entre 4.5 y 2.5 m de profundidad. Esta napa presenta normalmente sus niveles mínimos en la época de verano-otoño y los máximos hacia los meses de junio-julio; se alimenta directamente de las precipitaciones que caen anualmente en la ciudad y drena hacia los ríos Bío-Bío y Andalién³.

En este edificio la losa de fundación está siempre bajo la napa y, habiéndose tomado precauciones especiales para su impermeabilización, el cálculo de las presiones de contacto efectivas al nivel del sello de fundación ha descontado la subpresión hidráulica actuante al momento de cada medición.

Los detalles de ubicación del edificio y sus respectivos puntos de control, PC, y de referencia, PR, se presentan en la Fig. 2. En este caso los PC están

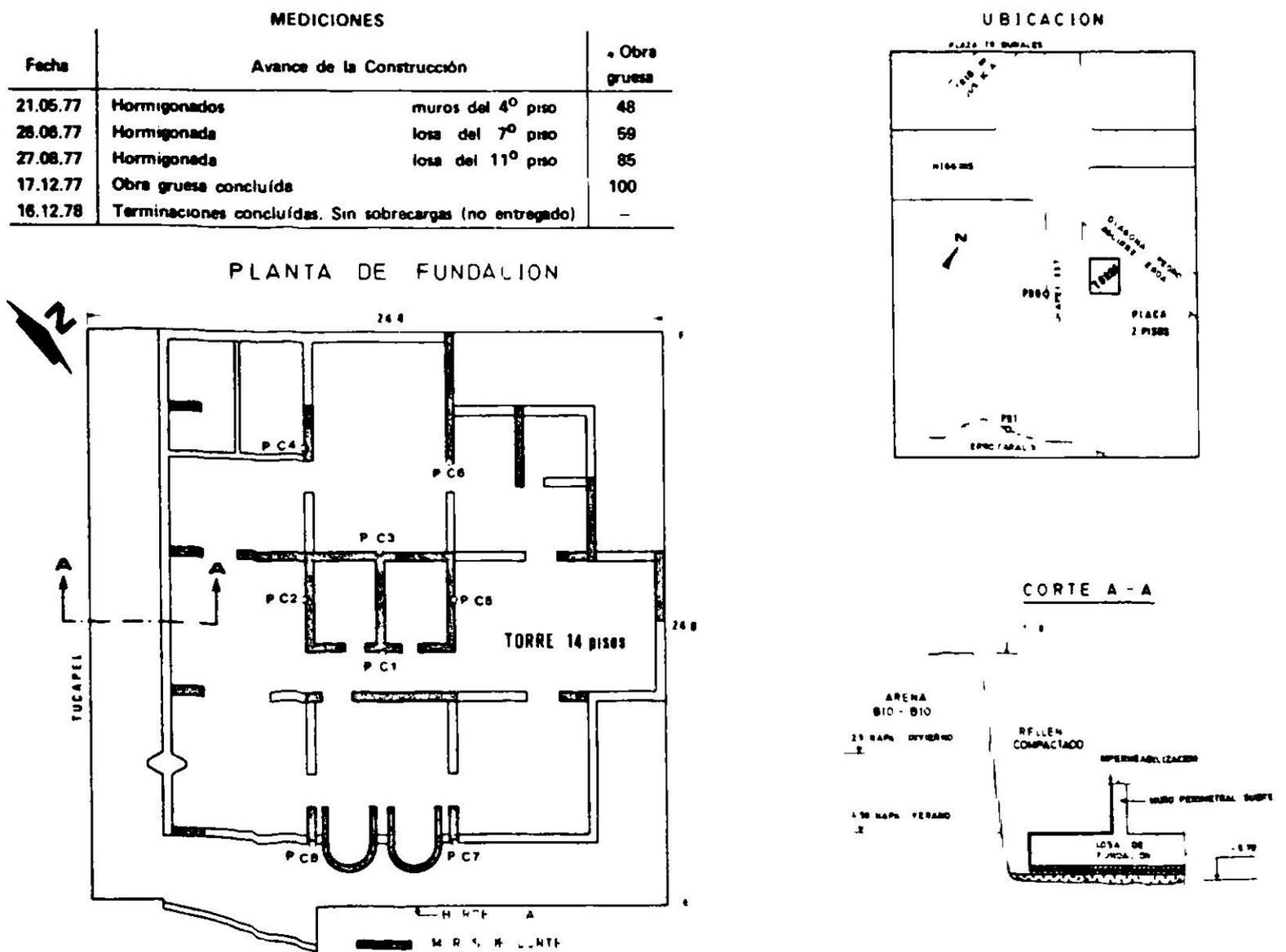


Fig. 2. Edificio Caja de Compensación, Concepción.

ubicados en los muros estructurales pero a nivel de primer piso, de manera de facilitar un acceso permanente a ellos. Los resultados de 5 mediciones se presentan en la Fig. 3 y corresponden a los asentamientos parciales, ρ' en función de la carga bruta efectiva P aplicada al nivel del sello de fundación; esto

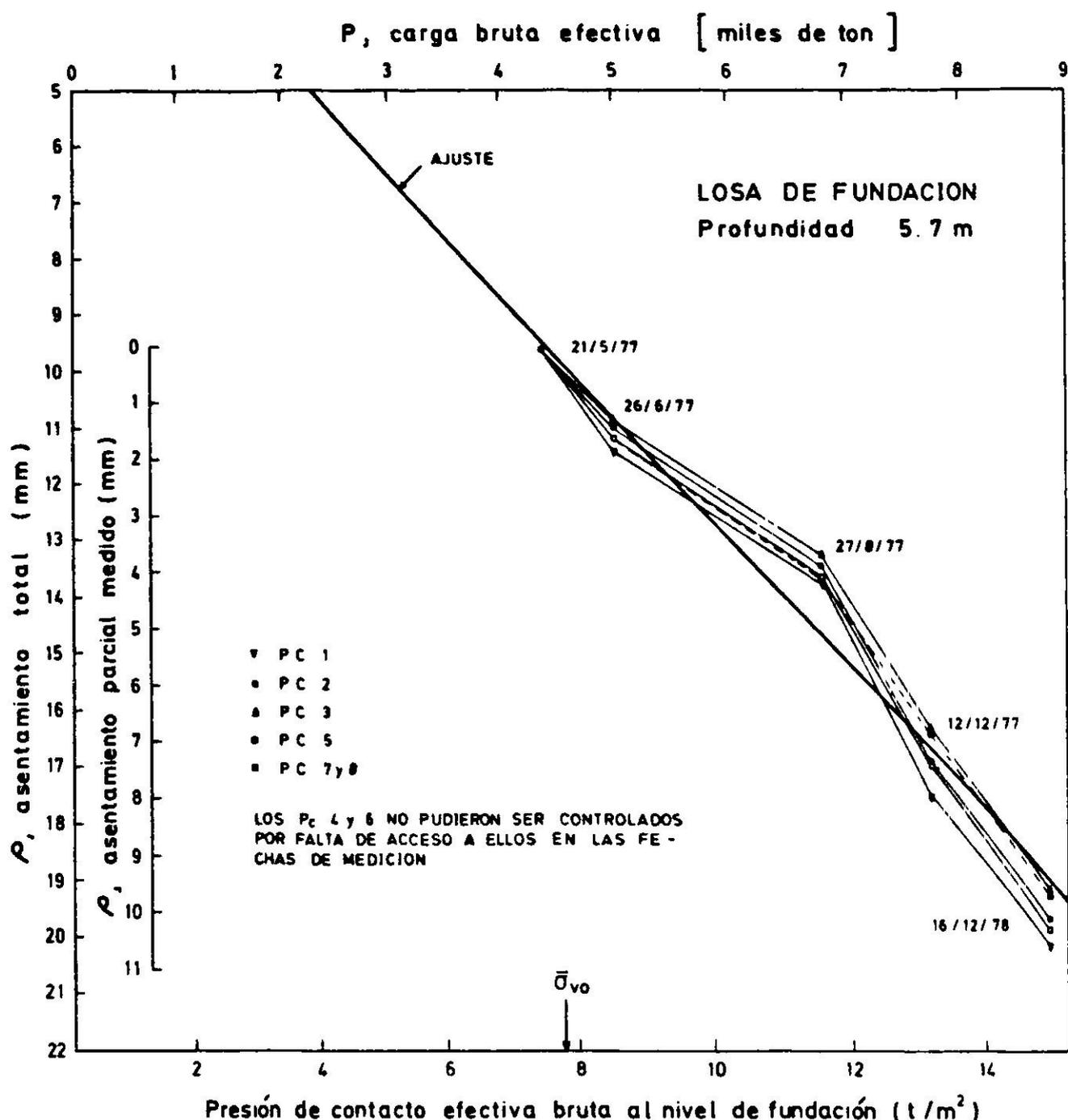


Fig. 3. Asentamientos edificio Caja de Compensación, Concepción.

es, el peso propio de los elementos estructurales según planos, más sobrecargas diversas y menos la subpresión hidráulica actuante. Debido a que los asentamientos se comenzaron a medir cuando el edificio ya llevaba cierto avance en la construcción, el asentamiento total, ρ , se ha obtenido por extrapolación lineal al origen de la escala de cargas, lo que supone que el comportamiento carga-deformación del suelo en la zona de recompresión es igual al de la zona virgen existente más allá del nivel de esfuerzos geostáticos iniciales, $\bar{\sigma}_{vo}$, presentes en el suelo al nivel del sello de fundación antes de efectuar la excavación.

De la Fig. 3 puede verse que en cada medición todos los puntos de control acusan la misma tendencia de asentamiento, indicando que la losa de fundación con el conjunto de muros atiesadores se comporta efectivamente como un cuerpo rígido y que, además, se asienta en forma uniforme sin acusar giros significativos. Cabe señalar por otra parte que estos asentamientos representan el com-

portamiento drenado de la arena subyacente, aunque se reconoce que los valores obtenidos en las últimas mediciones están afectados, en alguna medida no determinada, por una componente de consolidación originada en la capa de limo MH a 25 m de profundidad. Esta capa debe contribuir, al cabo de varios años, con un asiento estimado de 15-20 mm adicionales por este solo concepto.

Utilizando los valores promedios obtenidos del ajuste presentado en la Fig. 3 se ha estimado el módulo de deformación del subsuelo de arena Bío-Bío, mediante la conocida expresión de la teoría de la elasticidad.

$$\rho = \Delta q \frac{B(1 - \nu^2)}{E} I_\rho \quad (1)$$

en que

ρ = asentamiento vertical de una fundación

B = ancho menor del área de contacto

E, ν = módulo de deformación y de Poisson, respectivamente. Lleva implícito que el comportamiento carga-deformación del suelo es lineal en el rango de presiones de trabajo.

I_ρ = coeficiente de influencia que depende de numerosos factores, entre ellos la forma y dimensiones del área cargada, rigidez de la fundación, espesor del estrato compresible sobre la roca, etc. Su valor, obtenido de la teoría de la elasticidad para diversas situaciones usuales, se encuentra en numerosos textos^{4,5}.

Δq = incremento neto de presión efectiva al nivel del sello de fundación, (D_f), de la zapata:

$$\Delta q = \frac{P}{\Omega} - \bar{\sigma}_{vo}$$

P = carga bruta efectiva del edificio, definida en párrafo precedente

Ω = área de contacto suelo-fundación

$\bar{\sigma}_{vo}$ = presión vertical efectiva al nivel de la fundación D_f , existente antes de efectuar la excavación.

El módulo de deformación estimado de acuerdo a la expresión (1) utilizando el asentamiento promedio ajustado resulta $E = 6010 \text{ t/m}^2$; valor que representa el módulo E equivalente a lo largo de la profundidad del bulbo significativo de las presiones inducidas por el edificio. El valor de I_ρ usado en este caso fue de 0.82, que corresponde al de una fundación cuadrada rígida. La profundidad estimada como representativa del bulbo de presiones es $Z_{eq} = D_f + B/2 = 17.7 \text{ m}$.

Tal valor de E concuerda aproximadamente con el que resulta de estimar el módulo E en profundidad según una expresión propuesta anteriormente⁶ y que se reproduce en la Fig. 1c. Dicha variación fue obtenida sobre la base de datos de ensayos triaxiales, de correlaciones empíricas y de una medición de asenta-

mientos en la torre Libertad, ubicada a unos 500 m del presente edificio.

2. Edificio en arena - Viña del Mar

Es un edificio de 12 pisos y un subterráneo fundado mediante una losa rígida de hormigón armado de aproximadamente 18 x 22 m, la que se ha rigidizado mediante muros dispuestos según se señala en la Fig. 4. El nivel de fundación se encuentra a 6.10 m de profundidad bajo la superficie del terreno circundante. A sus costados existen 2 edificios, también altos, ya construídos y en funcionamiento al momento de efectuar las excavaciones.

MEDICIONES			
Fecha	Avance de la Construcción		% Obra gruesa
11.08.77	Hormigonados	2º piso y losa 3º	39
05.08.77	Hormigonado	7º piso	57
08.08.77	Hormigonados	9º piso y losa 10º	88
21.11.77	Obra gruesa concluída, c/tabiques		100
05.11.78	100% obra gruesa y 85% terminaciones e instalaciones		-

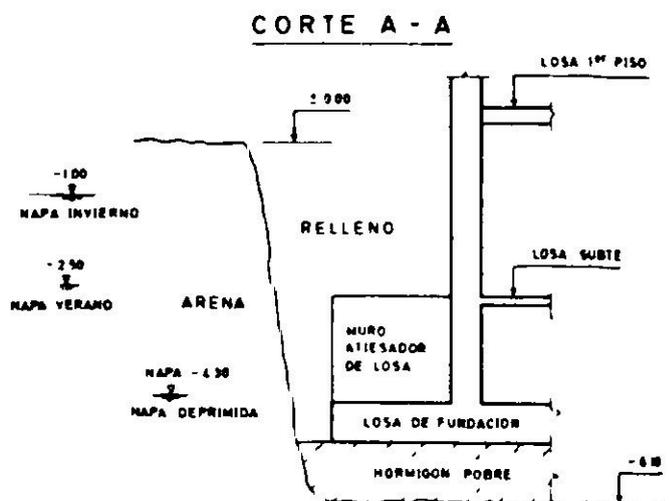
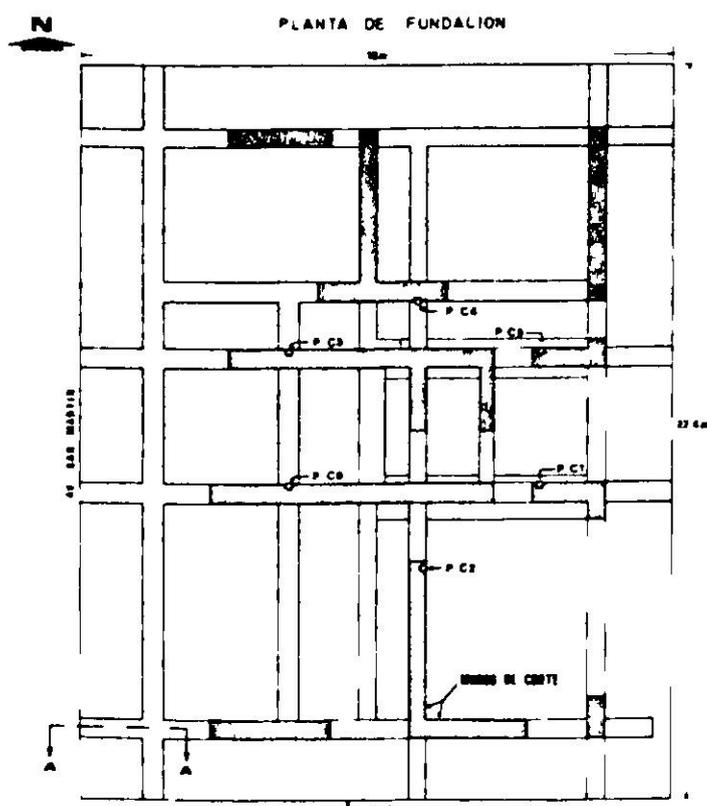
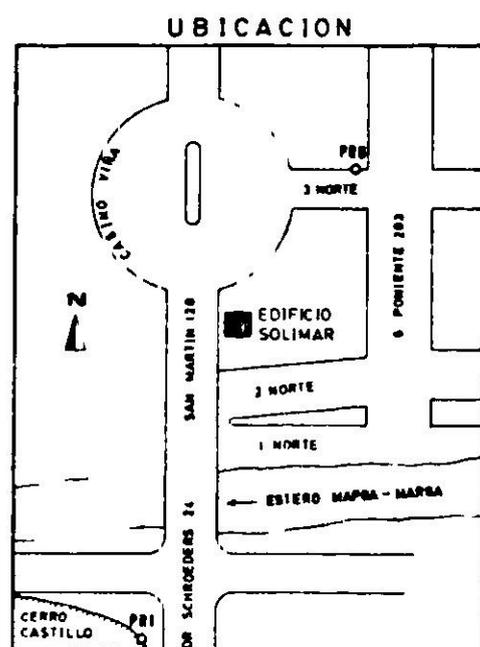


Fig. 4. Edificio Solimar, Viña del Mar.

El suelo de fundación es un grueso depósito de arena cuarzosa, fluvial del estero Marga-Marga, bastante homogénea en su composición, que se extiende hasta una profundidad de 20-25 m. Bajo el estrato de arena predominarían capas limosas de origen marino, hasta la roca que se supone a una profundidad mayor de 50 m⁷.

La estratigrafía del subsuelo obtenida de sondajes en la misma área de este edificio⁸ se muestra en la Fig. 5.

La profundidad de la napa de agua fluctúa normalmente entre 2.50 m en épocas de verano y 1.0 m en invierno; por lo que la fundación del edificio queda permanente bajo agua y es de esperar que actúa también una subpresión hidráulica significativa. Sin embargo, no existen seguridades de que tanto la

losa como los muros subterráneos estén debidamente impermeabilizados y, por lo tanto, el valor real de la subpresión actuante al momento de las mediciones tiene algún grado de imprecisión.

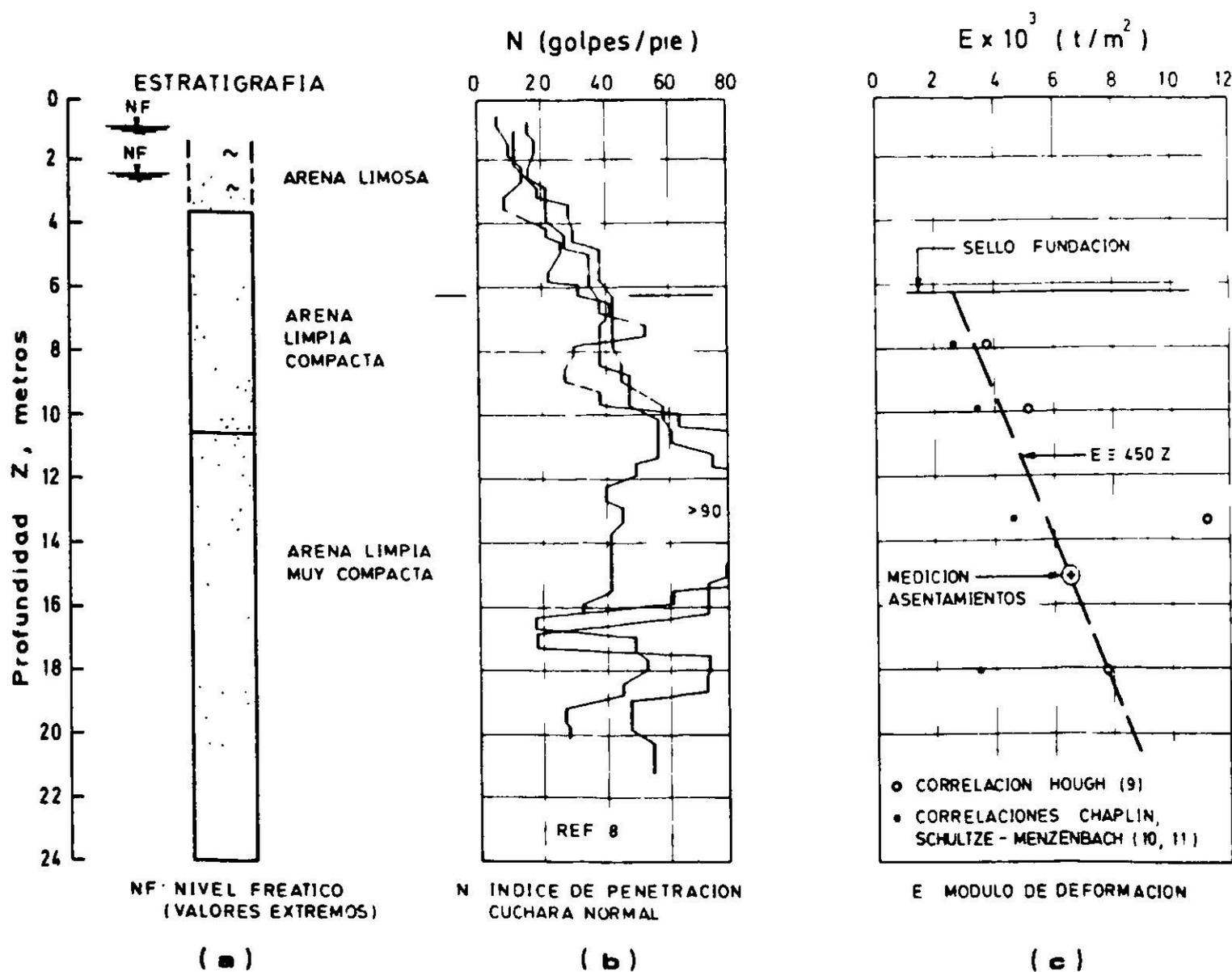


Fig. 5. Propiedades del suelo de fundación, edificio en arena, Viña del Mar.

Al igual que en el caso anterior, los puntos de control están ubicados en muros estructurales a nivel del terreno, en posiciones que se muestran en la planta de fundación de la Fig. 4. La misma figura indica la ubicación del edificio y de los puntos de referencia, uno de ellos instalado en roca, PR1.

Los resultados de 5 mediciones realizadas en distintas etapas de la construcción se entregan en la Fig. 6, que muestra los asentamientos graficados con la carga bruta efectiva P al nivel de fundación, estimada en forma análoga al caso anterior. Se ha efectuado también una extrapolación al origen de las cargas con objeto de obtener el asiento total.

De la Fig. 6 puede verse que en este edificio todos los puntos de control tienen la misma tendencia de asentamientos, a excepción del muro del PC4 que acusa un asiento diferencial del orden de 3-4 mm respecto del muro vecino donde se ubican los PC3 y PC5. No obstante, en global, la losa se asienta en forma uniforme, sin que sea posible deducir algún giro significativo. Cabe advertir que también en este edificio se espera una componente de asentamientos por consolidación que deben estar afectando en algún grado no determinado los

asentamientos de las últimas mediciones. Sin embargo, para el propósito de evaluar el comportamiento del subsuelo en el corto plazo, la recta de ajuste que se indica en la Fig. 6 se estima adecuadamente representativa.

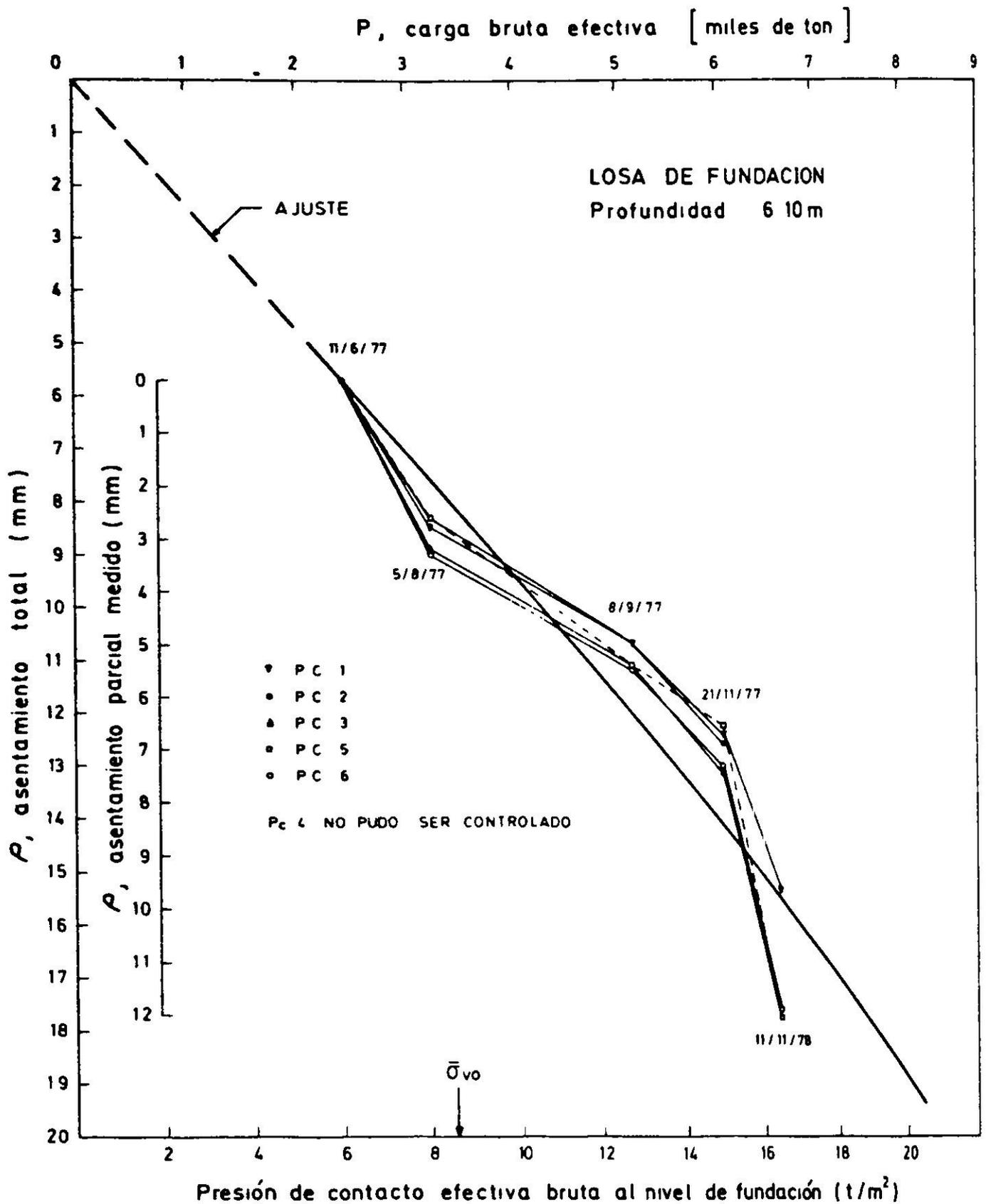


Fig. 6. Asentamientos edificios Solimar, Viña del Mar.

El módulo de deformación de la arena de Viña del Mar, estimado según la expresión (1) con los valores de incremento neto de presión efectiva y asentamiento promedio ajustado, resulta de valor $E = 6.640 t/m^2$, en la suposición que la losa es estanca y actúa por tanto la totalidad de la subpresión hidráulica

calculada. Si esto no se cumpliera el valor calculado de E sería un 10-15% mayor. La profundidad estimada como representativa del bulbo de presiones es en este caso $Z_{eq} = D_f + B/2 = 15$ m, lo que da lugar al punto señalado con una cruz en la Fig. 5c.

Similarmente al caso de Concepción, se han aplicado a las arenas de Viña del Mar las correlaciones empíricas de Hough⁹, Chaplin¹⁰ y Mengerbach¹¹, que estiman el valor del módulo de deformación E en función del índice N de penetración standard. Los resultados, obtenidos con valores medios de N en cada substrato, concuerdan en el orden de magnitud con el valor del módulo deducido de la medición de asentamientos, según puede apreciarse en la Fig. 5c, permitiendo insinuar la probable variación de E con la profundidad, que se ha trazado con línea de segmentos y cuya validez se estima hasta una profundidad de 20 m.

COMENTARIOS

La metodología utilizada en las mediciones de asentamientos mostró ser adecuada, al haberse logrado materializar niveles de precisión que garantizan la décima de milímetro y permiten estimar la centésima; lo cual parece suficiente para los propósitos de cualquier control de deformaciones verticales del suelo.

Con relación a los errores habitualmente considerados en nivelaciones topográficas de alta precisión, se ha demostrado que en estos y otros edificios instrumentados tales errores pueden minimizarse hasta hacerlos en su mayoría irrelevantes, salvo posiblemente aquellos derivados de variaciones térmicas que pudieran afectar la longitud de los elementos estructurales entre el sello de fundación y la ubicación de los puntos de control PC . Para ellos, sin embargo, no se han encontrado formas prácticas de evaluación, si bien es cierto que estos fenómenos afectarían tanto a la estructura como a los puntos de referencia PR , sufriendo así una cierta compensación.

Conjuntamente con el valor absoluto de los asentamientos, es interesante establecer su relación con las cargas actuantes al momento de cada medición. A este respecto se aprecian niveles relativamente altos de imprecisión en la estimación de tales cargas, lo que ocurre por la dificultad de determinar, además de las cargas permanentes (peso de los elementos estructurales según planos), las cargas vivas provenientes de sobrecargas de la construcción; (peso de moldajes, de stock de materiales, de herramientas y equipos, personal, agua en sus diversas fuentes y finalidades, elementos inconclusos, rellenos provisorios, etc). Así mismo y como principal imprecisión en los casos de edificios con losa de fundación bajo la napa, se aprecian también ocasionales dificultades prácticas para conocer las posiciones reales del nivel del agua, tanto por el exterior del edificio como eventuales acumulaciones por el interior debidas a filtraciones.

Al graficar los asentamientos medidos versus las cargas brutas actuantes, se tienen puntos experimentales que cubren un rango que va desde aproximadamente el 40-48% de la obra gruesa hasta prácticamente el total de las terminaciones concluídas (sin sobrecargas), quedando un margen de incertidumbre en los tramos iniciales de la construcción. Lo anterior se debe a que para medir asentamientos y ligarlos adecuadamente a los PR_s , fue necesario esperar que el edificio saliese por lo menos del nivel de primer piso. Esto, si bien no tiene una gran importancia práctica para la ingeniería, ha significado una fuente de imprecisión al momento de fijar el origen absoluto de las deformaciones. Al respecto, se ha utilizado un procedimiento de extrapolación al origen basado en la hipótesis de que las deformaciones deben ser proporcionales a las cargas brutas, al menos durante la construcción. En realidad y como puede apreciarse en las Figs. 3 y 6, las curvas carga-deformación en los 2 edificios en arena, con mediciones en etapas de carga inferiores al nivel $\bar{\sigma}_{v0}$, aparecen con una tendencia bastante lineal y única sin que sea posible distinguir efectos significativos de descarga-recarga por los procesos constructivos. A este respecto es importante señalar que en estos edificios con losas de fundación los asentamientos medidos reflejan el comportamiento promedio de todo el subsuelo comprendido en el bulbo significativo de presiones y no sólo el de las capas superficiales cercanas al sello, donde ese efecto sería más notorio. En todo caso la extrapolación realizada se interpreta como un límite superior de los asentamientos en el corto plazo.

CONCLUSIONES

En ambos edificios en arena el límite superior de los asentamientos totales producidos en un lapso aproximado de 15 meses, hasta poco antes del término de la construcción, presenta valores del orden de 18 a 20 mm, no apreciándose valores significativos de asientos diferenciales ni giros en las respectivas losas de fundación.

La tendencia de los asentamientos medidos respecto de la carga bruta efectiva estimada al nivel del sello de fundación presenta tendencias aproximadamente lineales, no obstante las imprecisiones implícitas en el cálculo de las cargas.

Con los asientos totales extrapolados al origen de la escala de cargas ($P = 0$) se han efectuado cálculos retrospectivos del módulo de deformación E , en las arenas de Concepción y Viña del Mar, los cuales se estiman representativos de la compresión de todo el bulbo de presiones inducidos por el edificio, a una profundidad equivalente $Z_{eq} = D_f + B/2$ (m), medida desde la superficie del terreno.

Los valores calculados del módulo E confirman para la arena limosa

de Concepción la ley de variación en profundidad $E = 360 z (\text{t/m}^2)$ actualmente en uso para el cálculo de los asentamientos de corto plazo. No se consideran los efectos de consolidación en el largo plazo que afectarían a estratos limo arcillosos que subyacen a 25 m de profundidad.

Para la arena limpia de Viña del Mar el valor estimado del módulo E , deducido de los asentamientos y complementado con estimaciones basadas en correlaciones empíricas a partir del índice de penetración standard N , permite proponer una ley de variación $E = 450 z (\text{t/m}^2)$, en que z (m) es la profundidad medida desde la superficie del terreno. Esta ley no considera tampoco los posibles asentamientos por consolidación debido a estratos limosos bajo los 20 m de profundidad.

Las proposiciones anteriores para la estimación de E a cualquier profundidad sugieren que el cálculo de los asentamientos de fundaciones con otras geometrías y dimensiones sea efectuada mediante la teoría de la elasticidad, la cual ofrece ventajas de simplicidad y precisión respecto de otros métodos empíricos. Se hace notar, sin embargo, que en la utilización de las leyes de variación propuesta la presión de contacto al nivel del sello de fundación es una presión efectiva neta, debiendo descontarse el valor $\bar{\sigma}_{v0}$ de los esfuerzos geostáticos efectivos presentes a ese nivel. Así mismo la estimación de E debe hacerse a la profundidad $z = D_f + B/2$.

REFERENCIAS

1. POBLETE, M.; CAIOZZI, P.; SCHOLZ, A. y FAHRENKROG, C. Metodología propuesta para el control de asentamientos de estructuras. Nota Técnica, *Revista del IDIEM* vol. 19, n° 3, diciembre 1980.
2. PETRUS INGENIEROS. *Informe de mecánica de suelos para el edificio Caja de Compensación, Cámara Chilena de la Construcción - Concepción*, junio 1976.
3. POBLETE, M. *El subsuelo del centro de Concepción en relación con el diseño antisísmico*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago 1967.
4. LYSMER, J.; DUNCAN, J. *Stresses and deflections in foundations and pavements*. University of California, Berkeley, Dept. of Civil Engineering. 1969.
5. POULOS, H.G. y DAVIS, E.H. *Elastic solutions for soil and rock mechanics*, J. Wiley & Sons. Inc. 1974.
6. POBLETE, M. y SALGADO, R. Estimaciones y mediciones de asentamientos en edificios. *Revista del IDIEM*, vol. 15, n° 2, septiembre 1976.
7. GRIMNE, K. y ALVAREZ, L. El suelo de fundación de Valparaíso y Viña del Mar. *Boletín n° 16 del Instituto de Investigaciones Geológicas*. 1964.
8. PETRUS INGENIEROS. *Informe de mecánica de suelos para el Centro Cívico Comunal de Viña del Mar*. junio 1976.
9. HOUGH, B.K. Compressibility as the basis for soil bearing value. *Journal ASCE, Soil Mechanics and Foundation Engineering*. agosto 1959.
10. CHAPLIN, T. The compressibility of granular soils with some applications to foundation engineering. *Proceeding of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation*

Engineering. Wiesbaden 1963.

11. SCHULTZE, E. y MENZENBACH, E. Standard penetration test and compressibility of soils. *5th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering. Paris, 1961.*

SETTLEMENTS MEASUREMENTS OF BUILDINGS FOUNDED ON FLUVIAL SATURATED SANDS

SUMMARY

This paper presents the results of settlement measurements in two 12 and 14 stories buildings, with one basement, supported on rigid mat foundations. They are located in the cities of Viña del Mar and Concepción, Chile, upon a subsoil of saturated fluvial sand with the water table above the foundation level. Measurements were made during 15 months by topographic leveling giving a precision of ± 0.1 mm.

Estimations of deformation modulus at a certain equivalent depth are made by using the measured settlements. From these values variation laws of modulus with depth are proposed in order to be used in foundations settlements estimations using theory of elasticity.