

ANALISIS SIMPLIFICADO DE DESPLAZAMIENTOS POR CARGAS CICLICAS EN FUNDACIONES

Pedro ORTIGOSA de P.*

RESUMEN

Se determinan asentamientos de fundaciones superficiales inducidos por cargas cíclicas a base de resultados de ensayos de placa en depósitos naturales y rellenos compactados de suelos granulares. Para cargas cíclicas, provenientes de solicitaciones sísmicas, se supone que el suelo de apoyo no experimenta cambios de volumen de importancia debidos al historial de solicitaciones de corte asociado a las ondas sísmicas, quedando restringido el problema a las tensiones cíclicas provenientes de la interacción suelo-estructura. Los resultados obtenidos se ilustran vía la determinación de momentos flectores en un marco espacial de hormigón armado.

INTRODUCCION

Generalmente el diseño y dimensionamiento del sistema de fundación de una estructura apoyada sobre zapatas superficiales quedan controlados por asentamientos. Estos pueden provenir de cargas estáticas, peso propio más sobrecarga, y de solicitaciones dinámicas que inducen en la masa de suelo deformaciones cíclicas. Las solicitaciones dinámicas (solicitaciones cíclicas) pueden provenir de elementos vibratorios soportados por la estructura, o bien ser causadas por solicitaciones externas tales como la acción de olas o la componente pulsante del viento, todas las cuales producen tensiones normales o de corte, variables en el tiempo, en el sello de fundación de las zapatas. La otra causal de este tipo de solicitaciones la constituyen los eventos sísmicos, los que se caracterizan por superponer las tensiones normales y de corte cíclicas asociadas con la interacción

* Investigador del IDIEM.

tensiones bajo una fundación sometida a solicitaciones cíclicas, conjuntamente con los factores que inciden en el desarrollo del desplazamiento cíclico de la zapata, ρ_c . Cabe señalar que no se considera desarrollo de sobrepresiones de poros asociadas al cambio de volumen $\Delta\epsilon_v$ del esqueleto de suelo, es decir, sólo se contemplan suelos secos, parcialmente saturados, o bien suelos saturados en los que dichas sobrepresiones sean de poca importancia.

ESTIMACION DEL DESPLAZAMIENTO CICLICO ρ_c

El problema fundamental respecto a esta estimación lo constituye contar con relaciones constitutivas representativas del comportamiento carga deformación cíclica del suelo, además de disponer de un modelo matemático en el cual dichas relaciones puedan incorporarse¹. La situación se torna más dramática cuando las características granulométricas del suelo hacen difícil extraer muestras representativas para posteriormente ser ensayadas en el laboratorio. Este es el caso típico de suelos granulares gruesos tales como depósitos naturales de gravas con bolones, el de rellenos compactados materializados con ese tipo de suelos, o el caso de depósitos arenosos con baja cohesión o cementación en los que resulta difícil la obtención de muestras inalteradas.

Para obviar en alguna medida estos problemas es posible recurrir al empleo de ensayos de placa que incluyan la aplicación de cargas cíclicas. En la Fig. 2

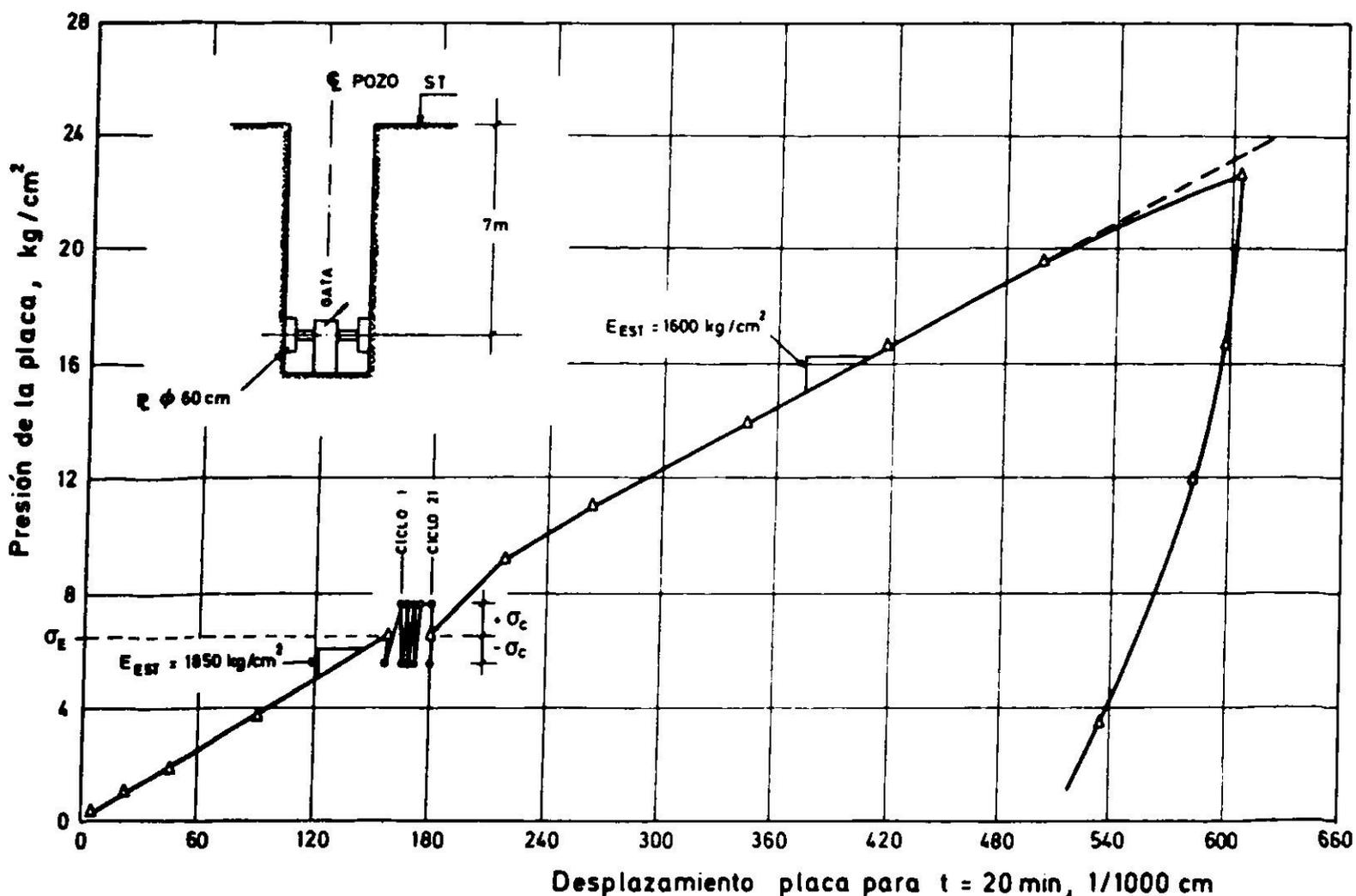


Fig. 2. Resultado típico de ensayo de placa horizontal a 7.0 m de profundidad en la grava típica de Santiago.

suelo estructura, con aquellas asociadas al tren de ondas que se propaga en la masa de suelo. Finalmente es preciso señalar que el suelo puede estar saturado, por lo que los cambios de volumen producidos por las sollicitaciones cíclicas darían origen al desarrollo de incrementos de presión de poros. Dependiendo de su magnitud, estos incrementos pueden deteriorar en gran medida la capacidad resistente del suelo, lo cual se puede traducir en fuertes desplazamientos acumulados que pueden llevar al colapso total de la estructura o a deslizamientos generalizados en una obra de tierra.

En este trabajo se pretende exponer una metodología simplificada para estimar desplazamientos asociados a sollicitaciones cíclicas en fundaciones superficiales, considerando sólo aquellas que corresponden a la interacción suelo estructura de una estructura recién construída. Esta metodología puede hacerse extensiva al caso de sismos en tanto que el tren de ondas asociado a dicho evento no produzca deformaciones cíclicas de interés que den origen a compactaciones adicionales del esqueleto de suelo. En otras palabras, se supone que el suelo de apoyo ya ha sido compactado por eventos sísmicos previos a la construcción y que, los que pudieran ocurrir en el futuro, no inducirán deformaciones cíclicas, tanto en magnitud como en número de ciclos, muy superiores a las ya experimentadas por el suelo. En esta forma, la única sollicitación cíclica que actuaría sobre el suelo en el rango *virgen* sería la asociada a las tensiones de interacción suelo estructura. En la Fig. 1 se ilustran esquemáticamente las

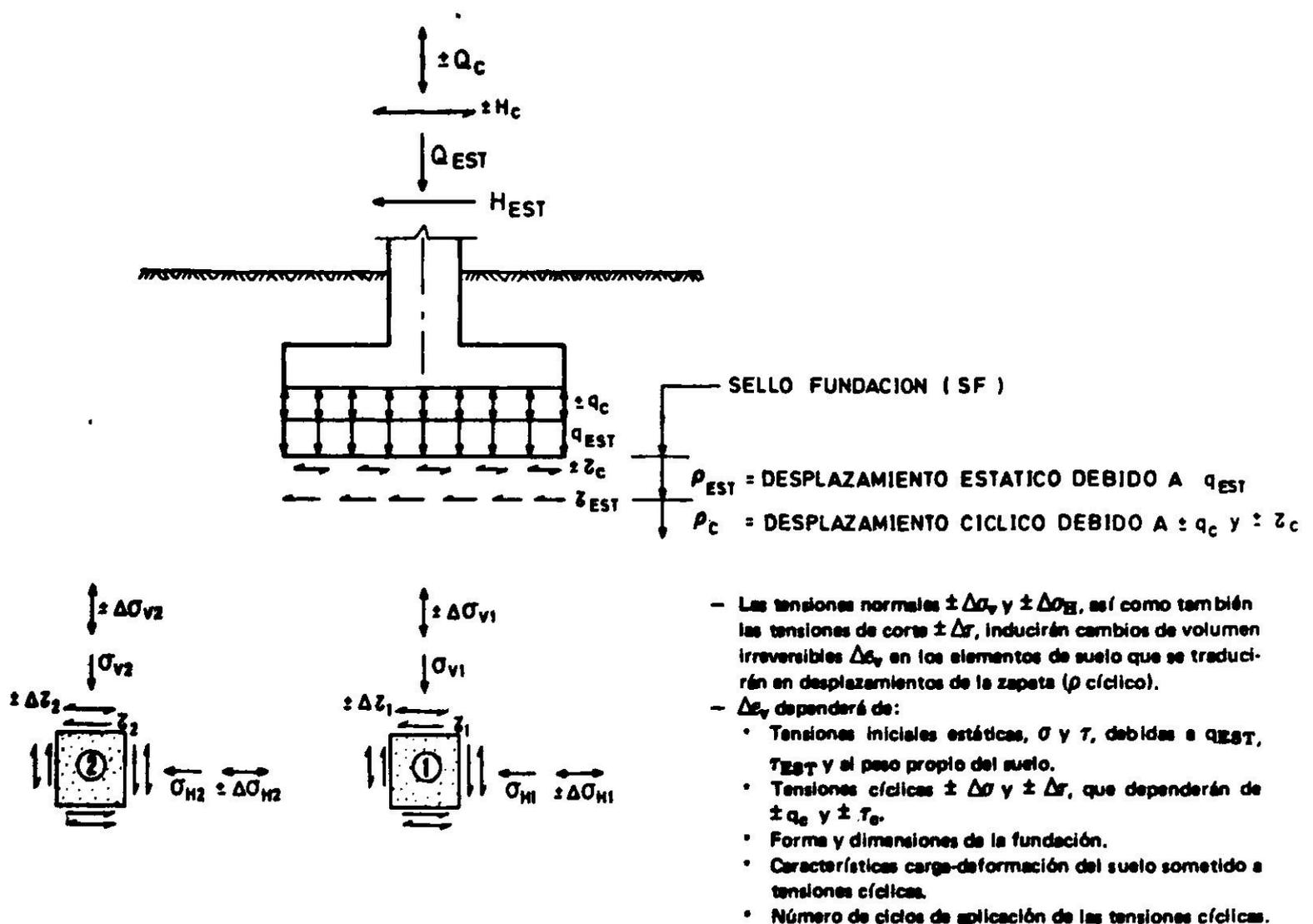


Fig. 1. Esquema de tensiones bajo una fundación sometida a sollicitaciones cíclicas.

se presenta un resultado obtenido con dicho tipo de ensayo en la grava típica de la ciudad de Santiago, el que se efectuó mediante una prueba de carga horizontal con aplicación de sólo una secuencia de ciclaje*. En la Fig. 3 se ilustra la analogía entre la situación correspondiente a la zapata real y el ensayo de placa, definiéndose el término razón de presión cíclica R_c como la razón entre la presión cíclica normal al sello de fundación σ_c y la presión normal estática σ_E .

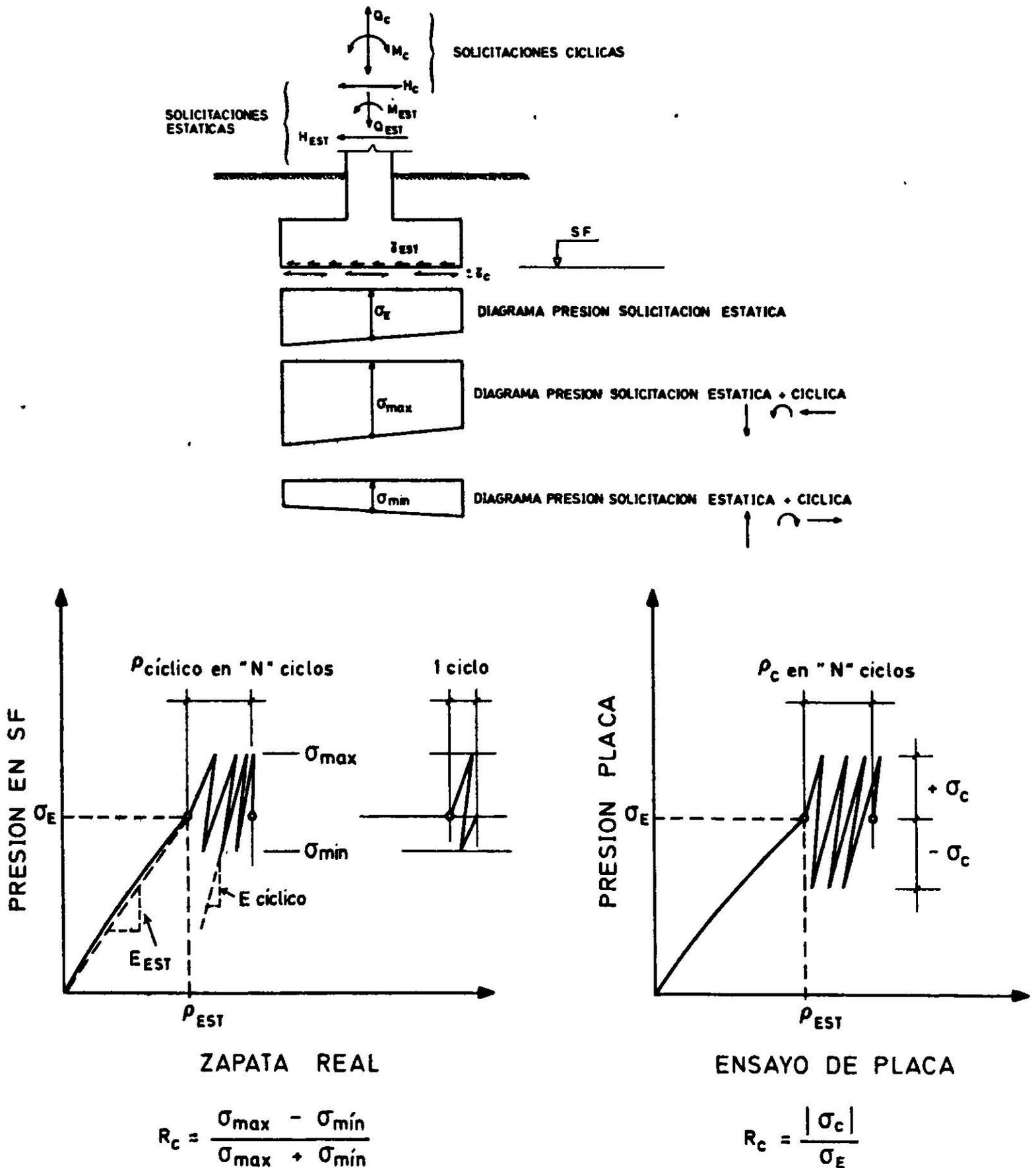


Fig. 3. Definición de la razón de presión cíclica R_c .

* Los resultados obtenidos en suelos tipo grava con ensayos de placa verticales y horizontales no presentaron diferencias de importancia práctica, siendo estos últimos más fáciles de efectuar. Así mismo, en un mismo ensayo, es posible aplicar más de una secuencia de ciclaje en torno a presiones estáticas σ_E convenientemente alejadas entre sí.

Debido a que en la zapata la presión cíclica no necesariamente es simétrica con respecto a σ_E , se define una componente cíclica simétrica con respecto a una presión estática equivalente:

$$\text{componente cíclica simétrica} \quad \sigma_c = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad 1$$

$$\text{presión estática equivalente} \quad \sigma_E = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad 2$$

Este criterio ha sido verificado en ensayos de placa con aplicación simétrica y asimétrica de la componente cíclica, obteniéndose resultados con diferencias irrelevantes desde un punto de vista ingenieril.

En relación a la representatividad de la analogía presentada en la Fig. 3 es necesario puntualizar los siguientes aspectos:

- a) La acción del momento volcante produce diagramas de presión del tipo trapezoidal que no se presentan en el ensayo de placa; esta situación se simplifica adoptando presiones promedio a nivel de sello de fundación para los efectos de definir el término R_c en la zapata real. Estas presiones promedio, exista o no tracción en el sello de fundación, se definen en el centro de la zapata.
- b) La acción de la carga horizontal introduce tensiones de corte iniciales τ_{EST} y cíclicas $\pm \tau_c$ que tampoco están presentes en el ensayo de placa; para tener en cuenta las tensiones $\pm \tau_c$, que inducen en la masa de suelo tensiones de corte cíclicas que originan cambios de volumen adicionales, el criterio simplificado se traduce en incrementar en 50% el valor de ρ_c obtenido en el ensayo de placa. En lo relativo al τ_{EST} dicha tensión es muy pequeña en la mayoría de las estructuras, por lo que puede ignorarse su efecto.
- c) Debido a que la aplicación de carga cíclica normalmente se materializa mediante el accionamiento manual de un gato hidráulico con pequeños tiempos de espera para efectuar las lecturas de desplazamiento en los diales, el período de dichas sollicitaciones es de por lo menos 4 seg, el cual es varias veces superior al período propio del sistema placa-suelo, incluidas las partes móviles del gato. Esto hace que se trate de un ensayo con aplicación de carga cíclica en *régimen estático*. Por tal motivo, los resultados obtenidos tendrán mayor representatividad en casos de la práctica en los que se verifique dicho régimen de carga.
- d) Cuando existan sollicitaciones cíclicas con desarrollo errático en el tiempo (por ej. caso de sismos) puede recurrirse a una metodología similar a la propuesta por Martin et al² y que ha sido detallada por Astorga³; en este procedimiento se superponen los desplazamientos cíclicos de magnitud variable utilizando los resultados del ensayo de placa que corresponden a

desplazamientos para solicitaciones cíclicas de amplitud constante. Sin embargo, es preciso reconocer que normalmente el análisis de estructuras sometidas a sismos emplea un coeficiente sísmico que multiplica los pesos

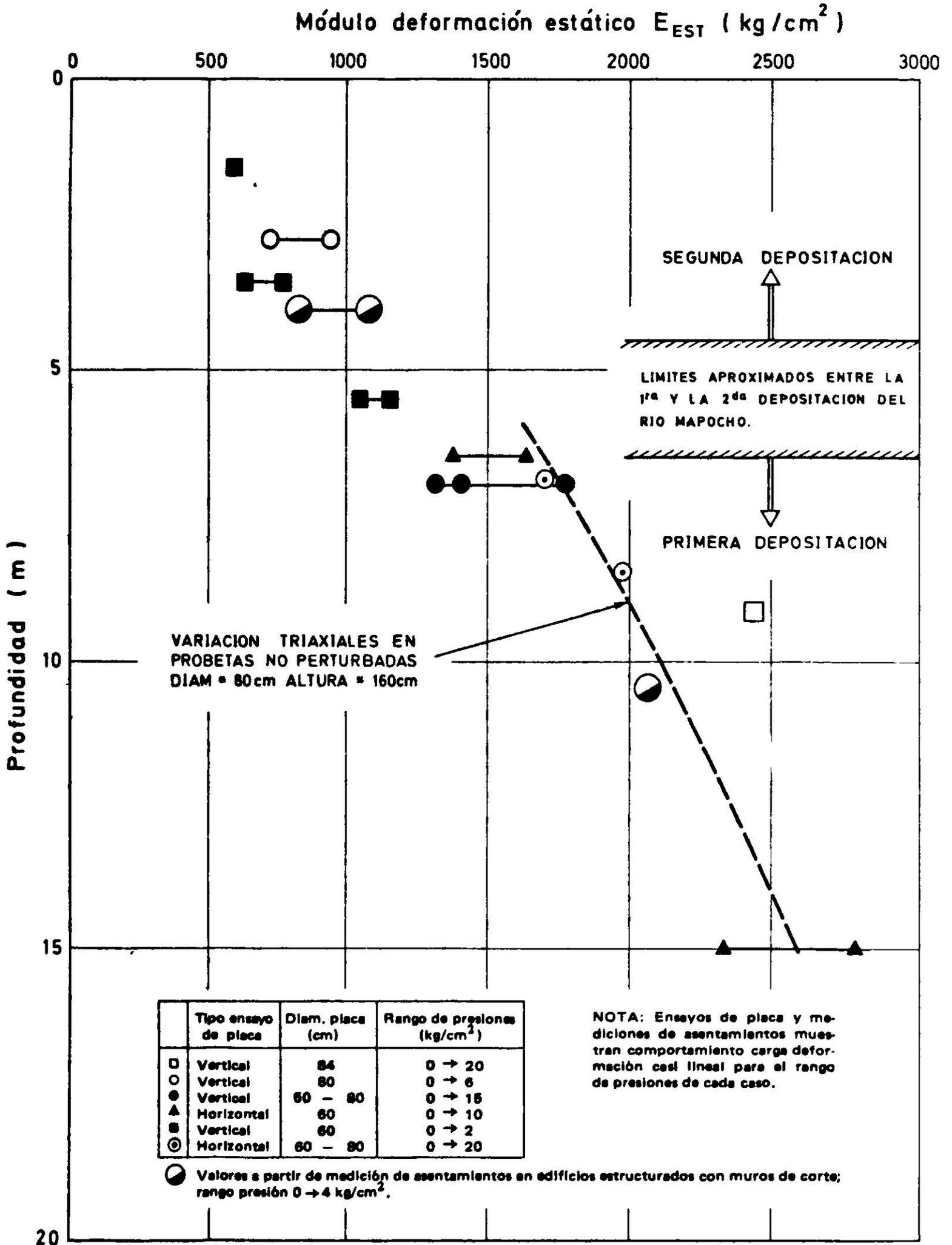


Fig. 4. Módulos de deformación para cargas estáticas en la grava típica de Santiago.

estáticos, obteniéndose solicitaciones horizontales de diseño de amplitud constante en el tiempo. Con ellas el ingeniero estructural evalúa las reacciones en los apoyos lo que se traduce en valores de Q_c , H_c y M_c de amplitud constante.

- e) La representatividad de los ensayos de placa sólo será posible en aquellos casos en los que el suelo presente un razonable grado de homogeneidad en profundidad. Para situaciones en las cuales su rigidez varía en forma más o menos continua en profundidad los resultados también se consideran representativos, ya que el ρ_c obtenido de ellos se expresará en términos del asentamiento estático de la fundación, ρ_{EST} . Este último parámetro, cuando se calcula para una fundación dada, engloba el efecto de dicho cambio de rigidez, así como también la influencia de las tensiones estáticas iniciales y de la geometría de la zapata.
- f) Debido a que la metodología propuesta se aplica a suelos granulares en los cuales el comportamiento carga deformación obtenido en los ensayos de placa es cuasi-lineal, no interesa mayormente establecer una equivalencia entre la zapata real y la placa del ensayo con el fin de utilizar resultados a niveles de deformación similares (por ej. utilizar los resultados del ensayo con un σ_g asociado a un factor de seguridad por falla al corte del suelo similar al que se tendrá en la zapata real).

La Fig. 4 presenta la variación en profundidad del módulo de deformación para solicitaciones estáticas en la grava típica de Santiago, cuyas características granulométricas se exponen en la Fig. 5. Los valores graficados para E_{EST} corresponden a los obtenidos con ensayos de placa verticales y horizontales efectuados a di-

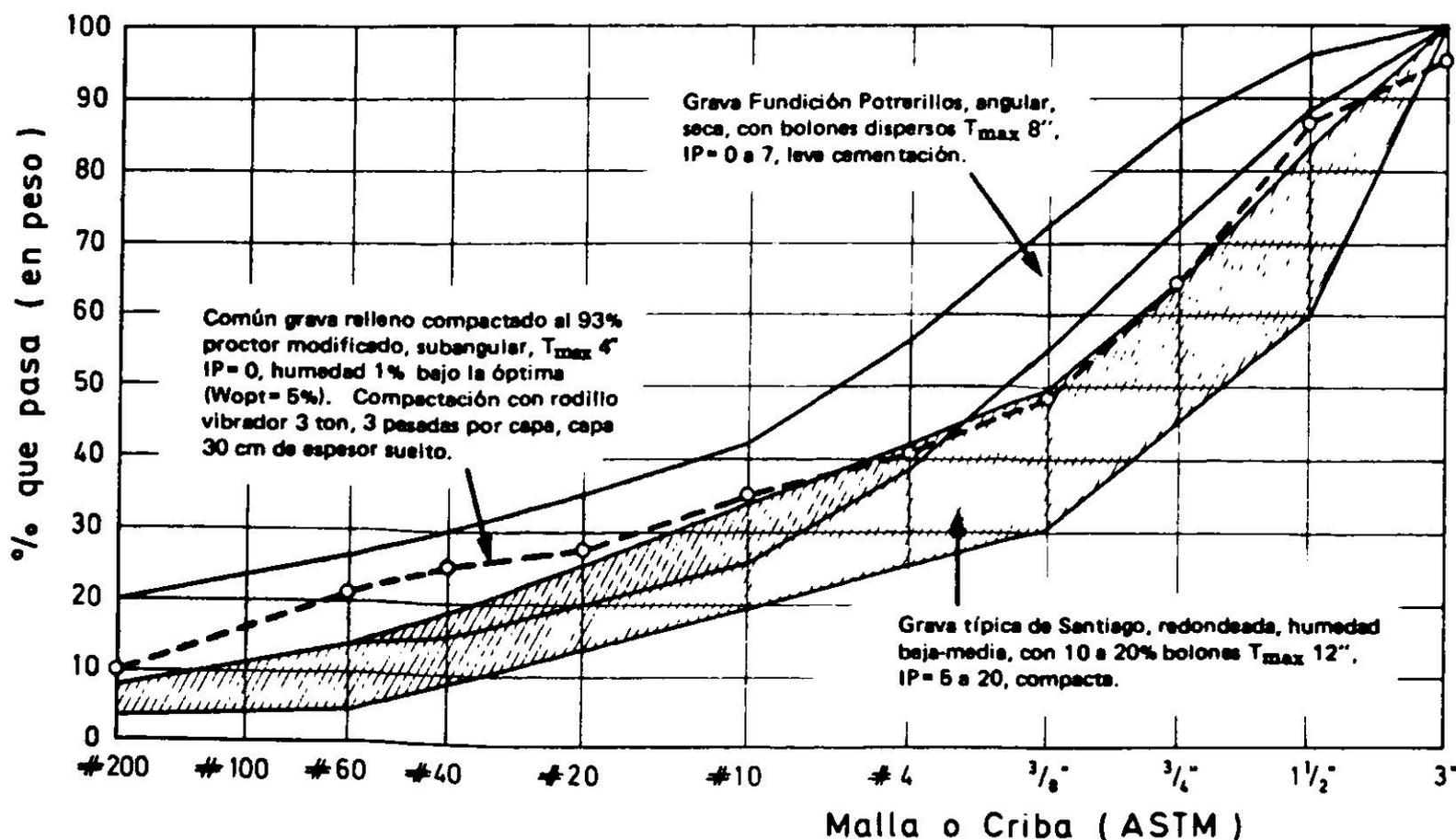


Fig. 5. Características de los suelos granulares gruesos ensayados.

ferentes profundidades. Como comparación se incluyen valores del E_{EST} obtenidos con ensayos triaxiales de terreno en muestras no perturbadas realizados por Kort el al⁴ y valores calculados por Caiozzi y Scholz⁵ a partir de mediciones de asentamientos en edificios. Dicha comparación pone de manifiesto una adecuada concordancia de valores concluyéndose que los ensayos de placa arrojan resultados representativos, por lo menos en lo que se refiere a determinaciones de desplazamientos estáticos, aun para un suelo cuya rigidez varía con la profundidad.

RESULTADOS

Se seleccionaron ensayos de placa efectuados en dos depósitos naturales de suelos granulares gruesos y en un relleno compactado de grava arenosa, cuyas características se ilustran en la Fig. 5. En la Fig. 6 se presentan los resultados obtenidos vía la variación con el número de ciclos de un coeficiente m_c . Este coeficiente liga el desplazamiento cíclico ρ_c experimentado por la placa con el desplazamiento estático inicial ρ_{EST} a través de la siguiente relación:

$$\rho_c = m_c \rho_{EST} \frac{|\sigma_c|}{\sigma_E} \quad 3$$

en que ρ_c = desplazamiento cíclico acumulado al cabo de N ciclos de aplicación de la carga; ρ_{EST} = desplazamiento de la placa debido a la presión estática σ_E existente entre ella y el suelo; $|\sigma_c|$ = presión cíclica aplicada al suelo por la placa ($\pm \sigma_c$); m_c = coeficiente de desplazamiento cíclico obtenido de los ensayos cuyo valor varía con el número de ciclos N . Mediante la relación anterior es posible estimar el ρ_c de una fundación si se conoce el asentamiento estático experimentado por ella, el valor del coeficiente m_c del suelo para el número de ciclos de diseño y la razón de presión cíclica R_c definida en la Fig. 3.

Los resultados de la Fig. 6 ponen de manifiesto los siguientes aspectos:

- Se obtiene una variación m_c vs N que es función del tipo de suelo granular ensayado y que puede considerarse independiente del diámetro de la placa, de la presión estática inicial σ_E y de la razón de presión cíclica R_c . Este resultado experimental corrobora lo expuesto en (e) y (f) del acápite anterior.
- Los valores del coeficiente m_c obtenidos para las gravas ensayadas convergen a un valor común que para efectos de diseño se pueden estimar igual a $1.0 \pm 0.1^*$.
- La variación de m_c con N o, si se quiere, la de ρ_c con N es de tipo exponencial lo cual significa que, para una estructura dada, sólo tendrán importan-

* Este valor corresponde a un número de ciclos significativos comprendido entre 20 y 30, que es el rango habitual de diseño para eventos sísmicos. Para situaciones en que N es muy grande (por ej. solicitaciones en las fundaciones de un puente de grúa), los resultados de la Fig. 6 se pueden graficar como m_c vs $\log N$, obteniéndose una variación lineal, la que puede extrapolarse para un N mucho mayor que 30.

cia los primeros ciclos de carga. Así por ej, en el caso de eventos sísmicos, una vez que ha ocurrido el primer sismo, los restantes no tendrán una importancia significativa en el desarrollo de ρ_c , a menos que los futuros eventos induzcan sollicitaciones que definan razones R_c mayores.

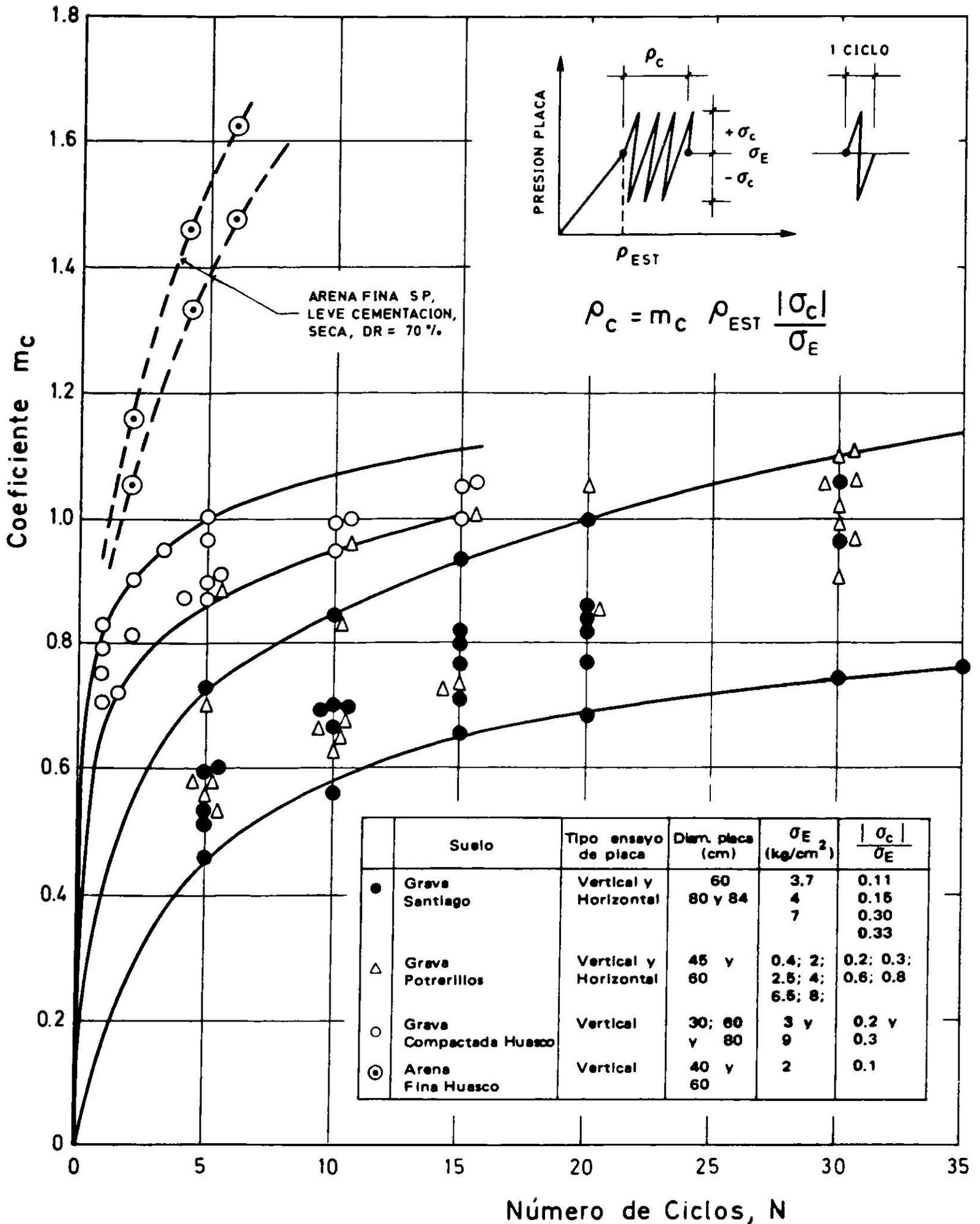


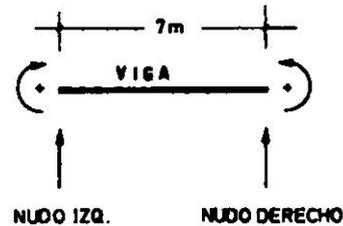
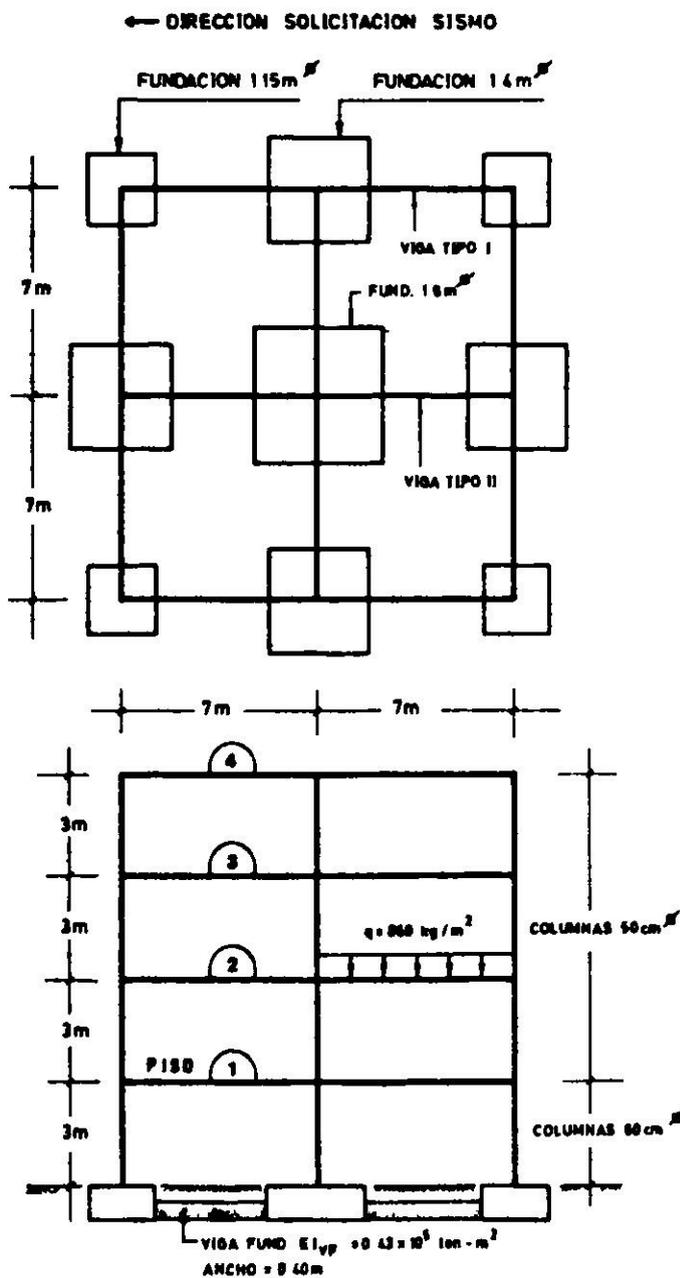
Fig. 6. Coeficiente de desplazamiento para sollicitaciones cíclicas m_c obtenido de ensayos de placa.

— Mediante el empleo de las curvas de la Fig. 6 y con la relación (3) es posible aplicar una metodología similar a la propuesta por Martin et al² y Astorga³ para cargas cíclicas erráticas (variación errática de R_c).

A modo de referencia, en la Fig. 6 se presenta la variación m_c vs N para una arena fina, seca, mal graduada y levemente cementada, observándose que este tipo de suelo presenta una susceptibilidad a compactarse por cargas cíclicas mayor que las gravas. El m_c de la arena ensayada resulta 2 a 2.5 veces mayor que el m_c de las gravas.

EJEMPLO DE APLICACION

Se seleccionó un marco de hormigón armado apoyado sobre grava según se ilustra en la Fig. 7, cuyas dimensiones se mantuvieron idénticas a las empleadas en estudios anteriores realizados por Fernández et al⁶ y por Binder y Ortigosa⁷.



Dimensión fundaciones verificadas para no sobrepasar presión admisible y evitar zonas traccionadas en sello fundación; no se pretendió hacer un dimensionamiento compensado para uniformar asentamientos.

Todas las vigas del marco son de 60 x 70 cm de altura. Losas son rígidas en su plano.

Grava: $E_{gr} = 1500 \text{ kg/cm}^2$; $E_{cicl} = 3E_{gr}$.
 Coeficiente Poisson = 0.30
 Presión admisible = $6/7.5 \text{ kg/cm}^2$ [EST/(EST + Sismo)].
 Solicitación sísmica 10% sobre PP + SC a 2/3 altura con 30 ciclos significativos, PP + SC de 880 kg/m^2 actuando sobre las losas.
 Velocidad construcción = 25 días por piso; colocación sobrecarga 6 meses después de construido último piso.
 Módulo de elasticidad del hormigón = 300.000 kg/cm^2 ; creep del hormigón según Comité Europeo del Hormigón 1973.
 Vigas de fundación (cuando existan) con EI igual al de las vigas del marco.
 Coeficiente de desplazamiento cíclico $m_c = 1.50$ (considera aumento de 50%).

Fig. 7. Marco de hormigón armado analizado apoyado sobre grava.

El análisis de este marco se efectuó mediante la determinación de los momentos flectores en el nudo derecho de la viga tipo I cuyos valores en función del número del piso aparecen graficados en la Fig. 8 para las condiciones de apoyo y combinaciones de carga señaladas en la Tabla I. La variación de los momentos flectores para el nudo izquierdo de la viga tipo I y la correspondiente variación para los nudos derechos e izquierdo de la viga tipo II presenta un patrón similar

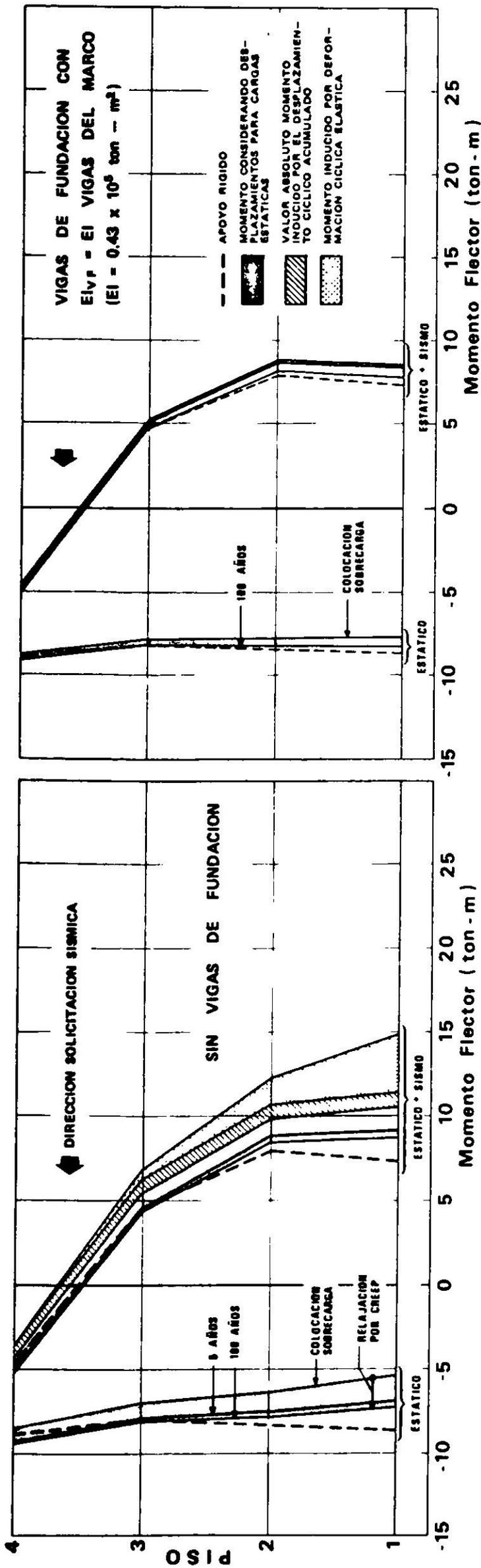


Fig. 8. Momentos flectores en nudo derecho viga tipo I - apoyo en grava con $E_{gST} = 1500 \text{ kg/cm}^2$.

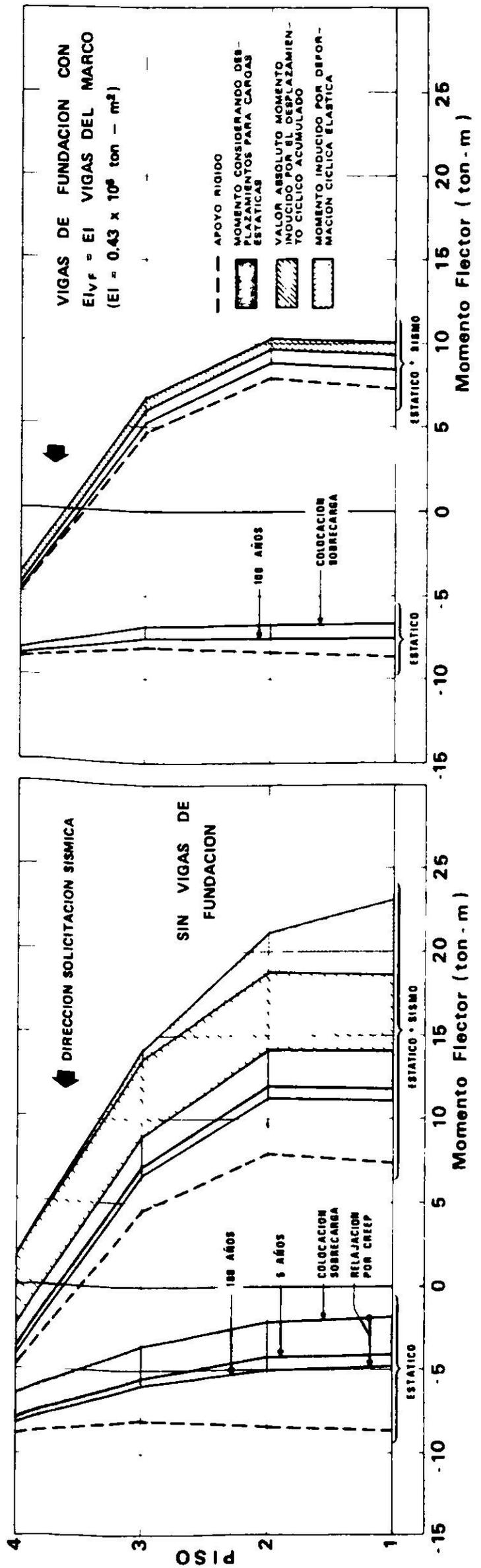


Fig. 9. Momentos flectores en nudo derecho viga tipo I - apoyo en arena con $E_{gST} = 300 \text{ kg/cm}^2$.

al indicado por los resultados de la Fig. 8. Dichos resultados ponen de manifiesto los siguientes aspectos:

- El dimensionamiento de la estructura para cargas estáticas + sismo, aunque éste suponga apoyo sobre suelo indeformable, cubre con creces las variaciones de momentos flectores inducidos por los desplazamientos de las fundaciones para cargas estáticas.
- Cuando se consideran solicitaciones estáticas más sismo, las deformaciones del suelo introducen momentos adicionales que son especialmente importantes en las vigas del primer piso. Esta situación se puede amortiguar considerablemente mediante la incorporación de vigas de fundación con una rigidez EI (E = módulo de deformación del hormigón e I = momento de inercia de la viga) igual o superior a la de las vigas del marco.

TABLA I

CONDICIONES DE APOYO Y COMBINACIONES DE CARGA PARA EL MARCO DE HORMIGON ARMADO ANALIZADO

CARGA ESTÁTICA	CARGA ESTÁTICA + SISMO
Marco sometido a solicitación de peso propio + sobrecarga, con secuencia constructiva y apoyado sobre suelo infinitamente rígido.	Idem al caso estático, pero se adiciona la solicitación debida al sismo actuando una vez construido el marco.
Marco sometido a solicitación de peso propio + sobrecarga apoyado sobre grava considerando la redistribución de momentos flectores con cargo a asentamientos diferenciales y giros de fundación. Se incluye el creep del hormigón y la secuencia constructiva.	Idem al caso estático, pero se adiciona la solicitación debida al sismo actuando una vez construido el marco. Se indica el aporte de momentos debido a la deformación cíclica elástica de la grava calculada con $E_c = 3 E_{EST}$ y el aporte producido por los desplazamientos cíclicos acumulados, ρ_c .
<p>NOTA</p> <p>Todas las deformaciones indicadas en esta tabla tienen el carácter de permanentes, salvo la correspondiente a la deformación cíclica elástica que se anula una vez que deja de actuar la solicitación cíclica.</p> <p>El aporte de momentos debido a los desplazamientos cíclicos acumulados se determina una vez que deja de actuar el sismo. Estos momentos tenderán a disminuir con el tiempo debido al creep en el hormigón.</p>	

Con el fin de analizar el mismo marco apoyado en arena se mantuvieron las bases de cálculo estipuladas en la Fig. 7 salvo que se adoptó un E_{EST} del suelo igual a 300 kgf/cm^2 , presiones admisibles de $2.5/3.8 \text{ kgf/cm}^2$ (estático/estático + sismo) y un coeficiente de desplazamiento cíclico m_c igual a 3.50 (considera aumento de 50% por efecto del corte cíclico $\pm \tau_c$ a nivel de sello de fundación). Al igual que para apoyo en grava, las fundaciones del marco se dimensionaron para no sobrepasar las presiones admisibles y evitar zonas traccionadas en el sello de fundación, pero sin pretender hacer un dimensionamiento compensado para uniformar asentamientos. Las dimensiones obtenidas fueron $1.55 \times 1.55 \text{ m}$ para las zapatas vértices, $1.95 \times 1.95 \text{ m}$ para las zapatas de borde y $2.55 \times 2.55 \text{ m}$ para la zapata central.

Los resultados correspondientes a los momentos flectores se ilustran en en la Fig. 9 observándose un comportamiento similar al obtenido con apoyo en grava, salvo que ahora los momentos inducidos por los asentamientos diferenciales y giros de fundación son mayores debido a la menor rigidez del suelo y a su mayor susceptibilidad a compactarse por cargas cíclicas.

Cabe señalar finalmente que el análisis del marco se efectuó suponiendo un comportamiento carga-deformación lineal del hormigón armado. En estricto rigor, la plastificación de las uniones viga-columna puede reducir los momentos inducidos por los asentamientos diferenciales o giros de fundación, en cuyo caso debe asegurarse una adecuada ductilidad en dichas uniones.

CONCLUSIONES

Los asentamientos acumulados por cargas cíclicas en fundaciones superficiales pueden ser estimados a través de una relación simple del tipo $\rho_c = m_c \rho_{EST} R_c$ en la que m_c es un parámetro que depende del tipo de suelo, que puede ser obtenido fácilmente utilizando ensayos de placa convencionales con aplicación de carga cíclica. Como una primera aproximación pueden utilizarse valores de m_c iguales a 1.5 y 3.5 para suelos tipo gravas y para arenas con baja cohesión, respectivamente. Estos valores incluyen un incremento de 50% para tener en cuenta el efecto de la tensión de corte cíclica en el sello de fundación y corresponden a la aplicación de 30 ciclos de sollicitación cíclica. Para un número de ciclos N diferente al planteado pueden extrapolarse los resultados expuestos en la Fig. 6 a partir de un gráfico m_c vs $\log N$. El término ρ_{EST} representa el asentamiento experimentado por la fundación para cargas estáticas y R_c el cuociente entre $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ y $\sigma_{\max} + \sigma_{\min}$. Los términos σ_{\max} y σ_{\min} corresponden a las presiones máximas y mínimas en el centro de la fundación cuando ésta se encuentra sometida a sollicitaciones estáticas + cíclicas.

Los asentamientos acumulados por carga cíclica pueden ser importantes en la generación de momentos flectores parásitos en una estructura aporricada, especialmente cuando el suelo de apoyo es arenoso y presenta baja cohesión o cementación.

La incorporación de vigas de fundación con rigideces por lo menos iguales a las de las vigas del marco es una medida de diseño altamente beneficiosa para disminuir las sobretensiones inducidas por asentamientos diferenciales y giros de fundación. Su incorporación es incluso aconsejable en suelos tipo grava, ya que con ello se permite dimensionar las fundaciones utilizando presiones de contacto admisibles elevadas. Su incorporación también es aconsejable en casos en los que sea necesario ponerse a cubierto de erraticidades en las características de deformación del suelo producto de estratigrafías heterogeneas. Paralelamente con lo anterior es importante suministrar una adecuada ductilidad a las uniones viga-columna.

REFERENCIAS

1. WHITMAN, R.V. Dynamic behavior of soils and its application to Civil Engineering Projects, General Report Main Sesion II. *Proceedings VI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones*, vol. 1, Lima, Perú, 1979.
2. MARTIN, G.R., FINN, W.D.L. y SEED, H.B. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 101, n° GT5, 1975.
3. ASTORGA, D. *Modelo matemático para el análisis de licuación de arenas*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 1980.
4. KORT, I., MUSANTE, H. y FAHRENKROG, C. Mediciones en sitio de propiedades mecánicas de la grava para modelo de interacción y cimentación del Metro de Santiago. *Proceedings VI CPMSIF*, vol. II, Lima, Perú, 1979.
5. CAIOZZI, P. y SCHOLZ, A. *Metodología para el control de asentamientos en estructuras*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 1978.
6. FERNANDEZ, A., GUENDELMAN, T. y ORTIGOSA, P. Influencia de asentamientos diferenciales en un marco espacial: Parte I. *Revista del IDIEM*, vol. 13, n° 3, 1974.
7. BINDER, R. y ORTIGOSA, P. Influencia de asentamientos diferenciales en un marco espacial: Parte III. *Revista del IDIEM*, vol. 14, n° 2, 1975.

**SIMPLIFIED ANALYSIS FOR PREDICTING DISPLACEMENTS ON FOUNDATIONS
SUBJECTED TO CYCLIC LOADS**

SUMMARY

Displacements on shallow foundations induced by cyclic loads are predicted by using plate bearing tests performed upon natural and compacted granular soil deposits. When cyclic loads are induced by earthquakes it is assumed that no soil compaction occurs due to cyclic shear stresses associated with the quake waves. The problem is therefore constrained to cyclic stresses from soil structure interaction. Results are illustrated through the evaluation of bending moments in a spatial reinforced concrete frame.