

# COMPACTACION DE ARENA SECA EN UNA MESA DE VIBRACION VERTICAL<sup>1</sup>

Ricardo DOBRY F.\*  
Robert V. WHITMAN\*\*

## RESUMEN

*Se presentan los resultados de un estudio detallado de los factores que contribuyen a la densificación de la arena seca en una mesa vibradora. Las variables consideradas son la frecuencia y amplitud de las vibraciones y el tamaño y forma del molde. Todos los ensayos fueron realizados sin sobrecarga.*

*Se concluye que los procesos que determinan el valor de la densidad final son: 1) cambios cíclicos en los esfuerzos verticales debidos a las fuerzas de inercia, cuando la aceleración máxima es menor que la aceleración de gravedad (1g); 2) reacomodación de las partículas durante la caída libre, cuando la aceleración es igual a 1g; 3) acción del impacto entre la arena y la base del molde cuando la aceleración de éste es mayor que 1g; y 4) aflojamiento de la capa superficial por las reflexiones de la onda de impacto, cuando la aceleración es varias veces superior a la gravedad.*

## INTRODUCCION

El método que más se usa para determinar la densidad máxima de una arena consiste en vibrarla verticalmente dentro de un molde colocado sobre una plataforma oscilante. El ensayo incluido en la Norma ASTM D2049-69 es de ese tipo. Hasta hace pocos años, los resultados de estos ensayos obtenidos por diferentes autores se contradecían con frecuencia entre sí<sup>1</sup>, y sólo recientemente

---

<sup>1</sup> Este artículo fue presentado al ASTM Symposium on Evaluation of Relative Density and its role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils, Los Angeles, EE. UU., junio de 1972.

\*Ingeniero investigador y Coordinador del Area de Mecánica de Suelos de IDIEM.

\*\*Profesor de Ingeniería Civil, Jefe de las Divisiones de Mecánica de Suelos y de Estructuras, Massachusetts Institute of Technology, EE. UU.

ha comenzado a aclararse la influencia de los diferentes mecanismos que intervienen<sup>2-6</sup>. Esta mejor comprensión es vital para seleccionar sobre una base racional la combinación correcta de aceleración y frecuencia de oscilación, tipo y tamaño del molde, humedad del suelo, uso de sobrecarga y tiempo de vibración.

La mayor parte de los autores ha concluido que el factor principal que controla el valor de la densidad final del ensayo es la aceleración. Barkan<sup>7</sup> pensó que esta variable era la única importante, pero las experiencias de Selig<sup>8</sup> demostraron que tanto la aceleración como la frecuencia influyen, Fig. 1. El descubrimiento de que la aceleración de gravedad constituye un umbral que

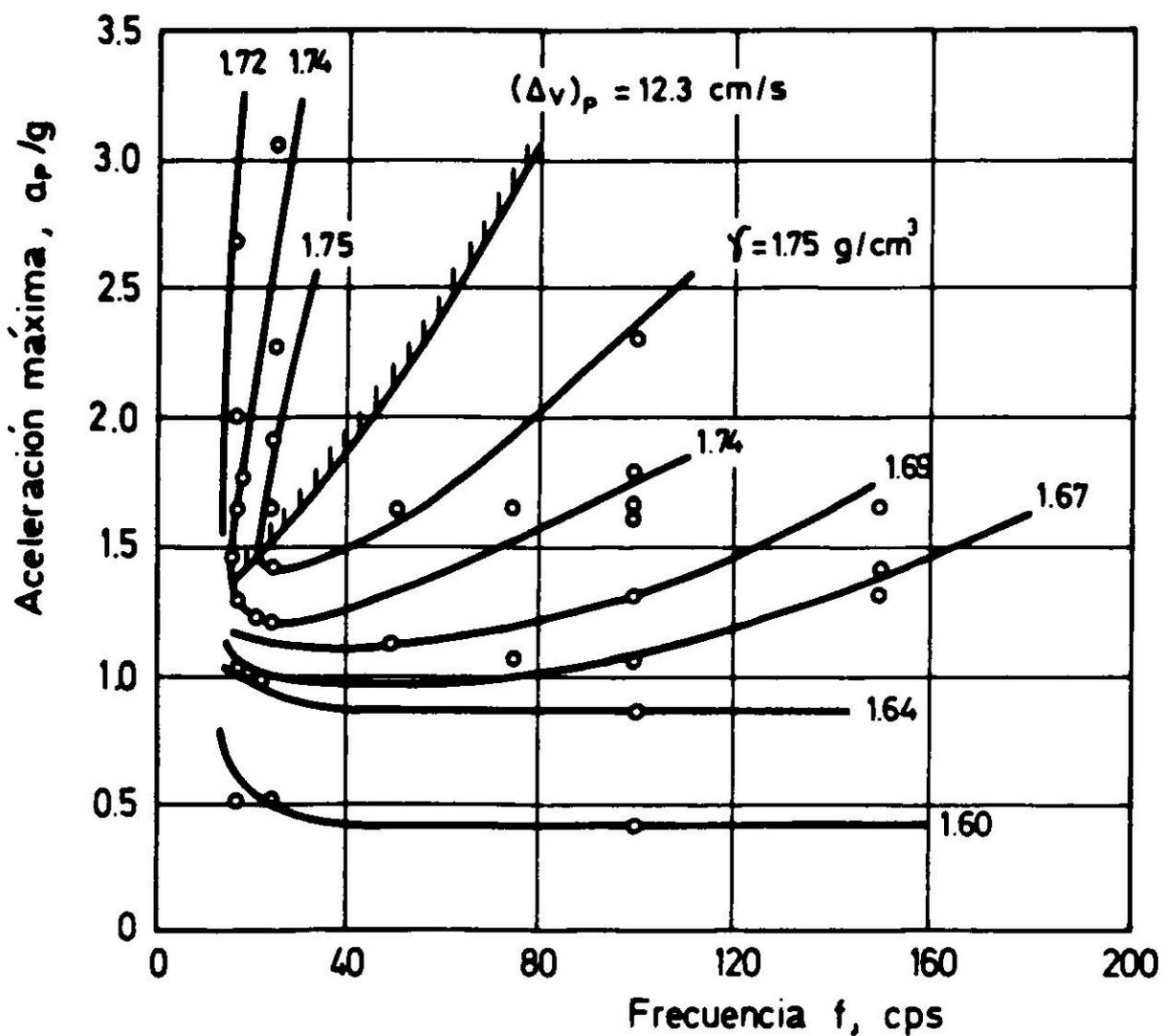


Fig. 1. Resultados de compactación de Selig (Ref. 8).

separa dos tipos de comportamiento, fue un gran paso adelante. Este hecho, que no se había detectado antes debido a imperfecciones en las técnicas experimentales, apareció claramente en 1967 en los datos presentados por D'Appolonia *et al*<sup>9</sup>. Desde entonces se ha acumulado una impresionante cantidad de evidencia que muestra que la densificación comienza en  $1g$ , no existiendo o siendo muy pequeña para aceleraciones menores que la gravedad. Esto sucede con arenas secas y húmedas ensayadas sin sobrecarga estática, y sugiere que los impactos entre el suelo y la base del molde son la causa principal de la compactación<sup>2,5,6</sup>.

Este artículo presenta los resultados de un estudio detallado de la densificación de una arena seca en una mesa vibradora. Se ensayó un suelo solamente, y sobre él se midió la influencia de todos los factores considerados

importantes, con excepción de la sobrecarga. Los ensayos realizados en muestras húmedas y saturadas no se incluyen en este artículo. Parte de la investigación consistió en el estudio de modelos teóricos, los que ayudaron a interpretar los resultados experimentales encontrados por los autores y por otros investigadores. En el informe original<sup>5</sup> pueden encontrarse detalles adicionales del trabajo realizado.

### TECNICA EXPERIMENTAL

En la Fig. 2 se muestra el equipo en operación durante un ensayo con arena

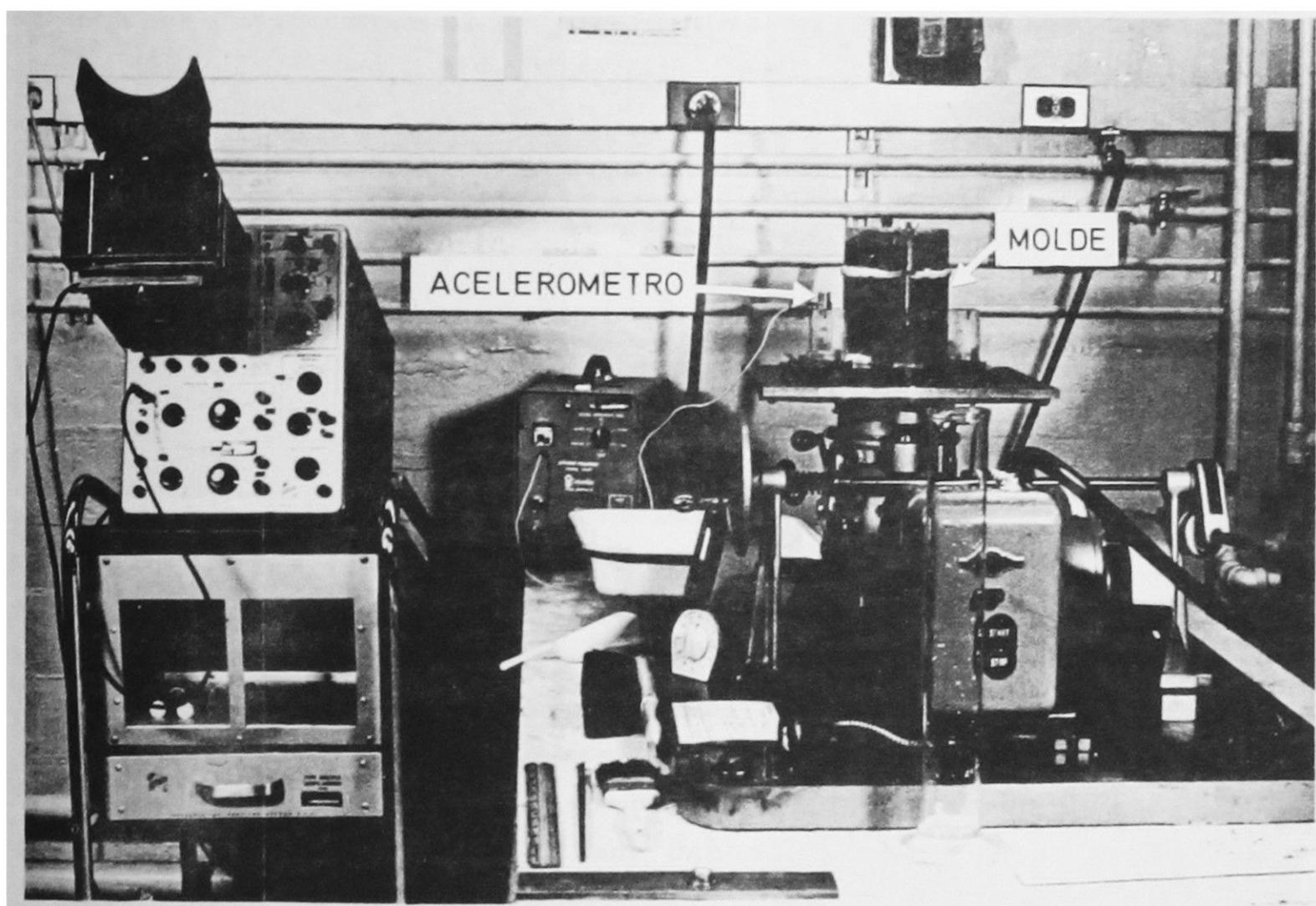


Fig. 2. Equipo e instrumentos de medición durante un ensayo.

húmeda. La mesa vibradora produce oscilaciones verticales de forma aproximadamente sinusoidal, de doble amplitud  $2y_p$  con un máximo de 0.15" y un rango de frecuencias  $f = 10$  a 60 cps. La amplitud tiene un valor fijo para cada ensayo, pero  $f$  puede cambiarse durante la operación. En todos los casos la máquina debió partir operando a 10 cps, frecuencia que se aumentaba manualmente hasta el valor deseado.

La aceleración máxima nominal es:

$$a_p = 0.0511 (2 y_p) f^2 \quad (1)$$

donde  $a_p$  está en g,  $2 y_p$  en pulgadas y  $f$  en cps. Se realizaron también mediciones directas de  $a_p$  mediante un acelerómetro colocado a un costado del molde, como se indica en la Fig. 2. Los valores así obtenidos coincidieron con la Ec (1) dentro de

un margen de error del 10%. Todas las aceleraciones ( $a_p$ ) que aparecen en este artículo son nominales y fueron calculadas con la Ec (1).

Para las experiencias se contó con tres moldes cilíndricos: a) un Molde Proctor de acero, de 6" de diámetro y 6" de altura; b) un Molde de Anillos constituido por un número variable de anillos de acero (hasta 12), cada uno de 1" de alto y 1/8" de espesor, los que podían ponerse uno arriba de otro formando un molde de 6.25" de diámetro y altura variable; y c) un Molde de Lucita de 5" de diámetro y 4.5/8" de altura, el que se muestra en la Fig. 2. El hecho de que los tres moldes fueran de dimensiones comparables permitió estudiar el efecto del material del molde sobre los resultados. El Molde de Anillos se usó para verificar la influencia de la altura de la muestra.

En la Fig. 2 aparecen todos los instrumentos de medida usados durante los ensayos: un acelerómetro, un amplificador (cathode follower) y un osciloscopio de doble haz.

Durante un ensayo típico, se colocaba primero el dial de control de amplitud de la mesa vibradora al valor deseado de  $2y_p$  y enseguida se fijaba el molde a la plataforma de la mesa y el acelerómetro al molde. Después se vibraba el molde vacío a la frecuencia del ensayo con el fin de fotografiar el gráfico de aceleración versus tiempo en la pantalla del osciloscopio. A continuación se detenía el motor y se llenaba el molde con arena seca al horno, mediante una cuchara: este procedimiento de colocación dejaba al suelo con una densidad inicial de alrededor de  $1,39 \text{ g/cm}^3$ , algo superior a la densidad mínima del material.

Finalmente se echaba a andar de nuevo el vibrador, aumentando la frecuencia lo más rápidamente posible hasta alcanzar el valor deseado. Durante el ensayo se tomaba una segunda foto de la pantalla del osciloscopio, ver Fig. 3. La vibración se detenía abriendo el interruptor respectivo, usualmente a los 10 minutos de comenzada. Se retiraba entonces el recipiente de la plataforma, se le sacaba el collar o anillos superiores, se enrasaba la superficie de la arena y se pesaba el molde con suelo para calcular la densidad final.

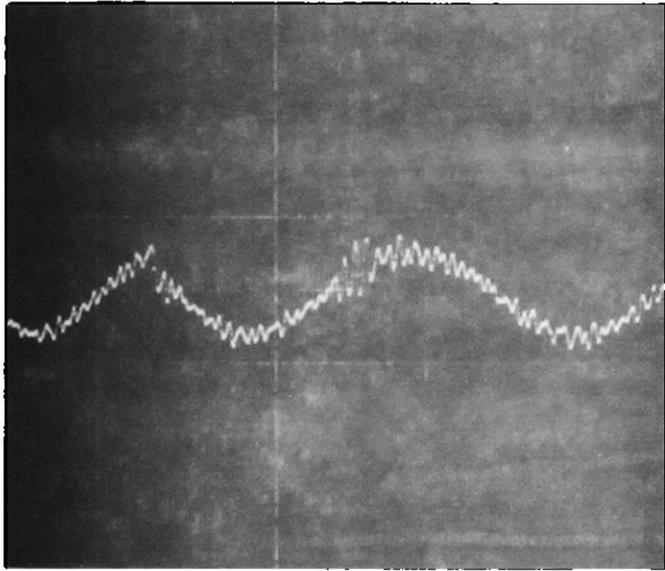
Se realizó un total de unos 200 ensayos, lo que permitió estudiar la influencia de los factores que se indican en la Tabla 1.

TABLA I  
FACTORES ESTUDIADOS

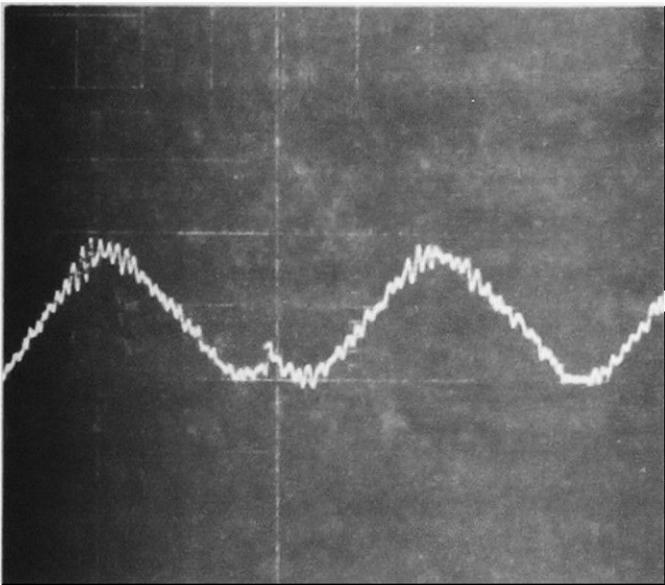
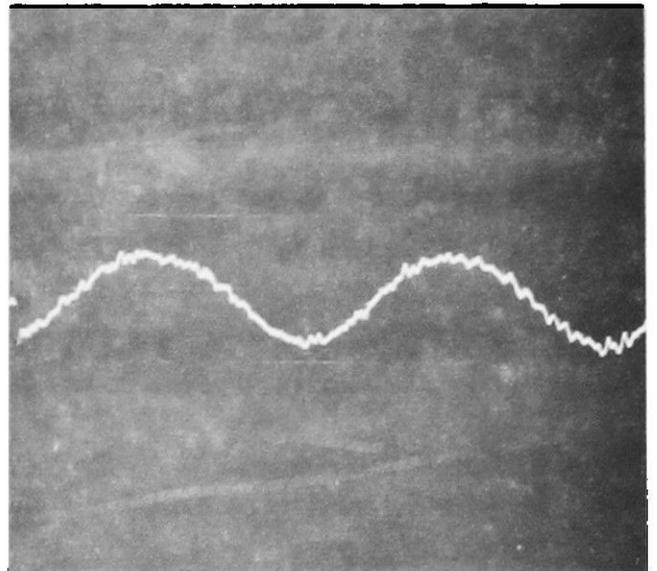
Factor estudiado	Valor
Aceleración máxima $a_p$	0 to 3 g
Doble amplitud $2y_p$	0.025 - 0.050 - 0.150"
Tipo de molde	Lucita - Proctor - Anillos
Altura muestra	3 - 6 - 10"

SIN ARENA

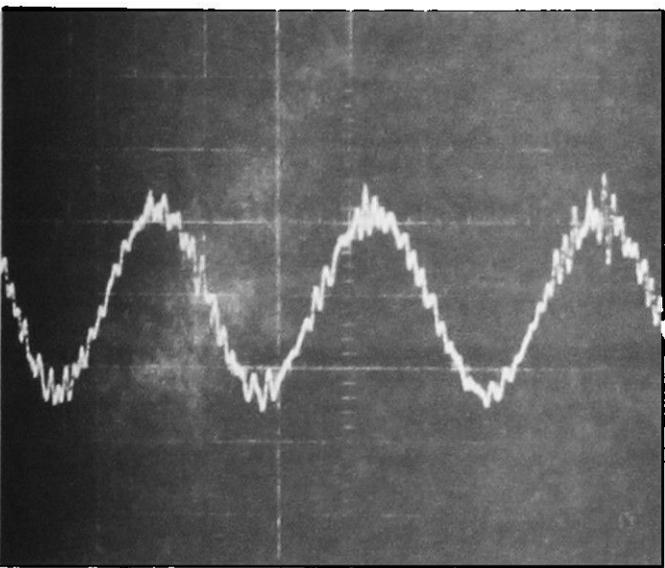
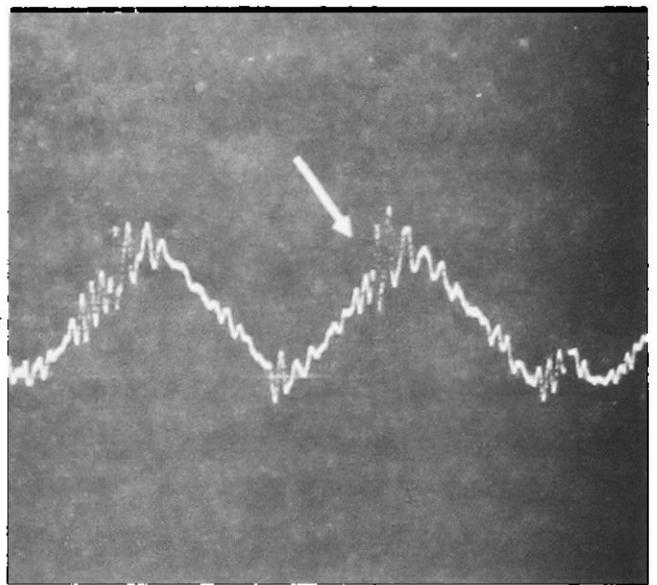
CON ARENA



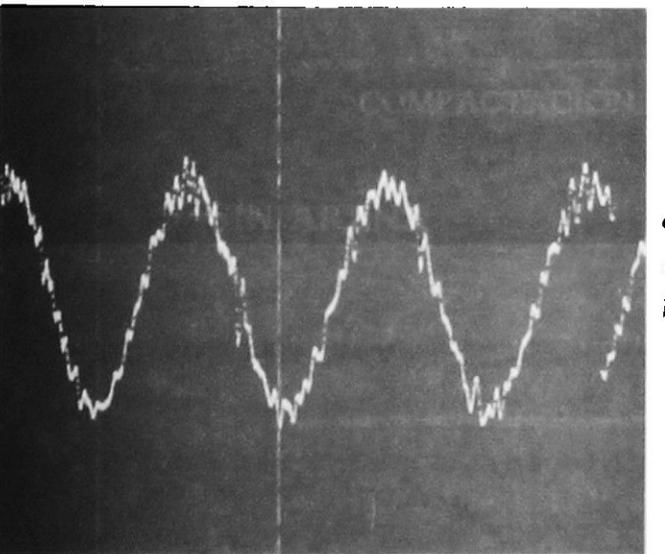
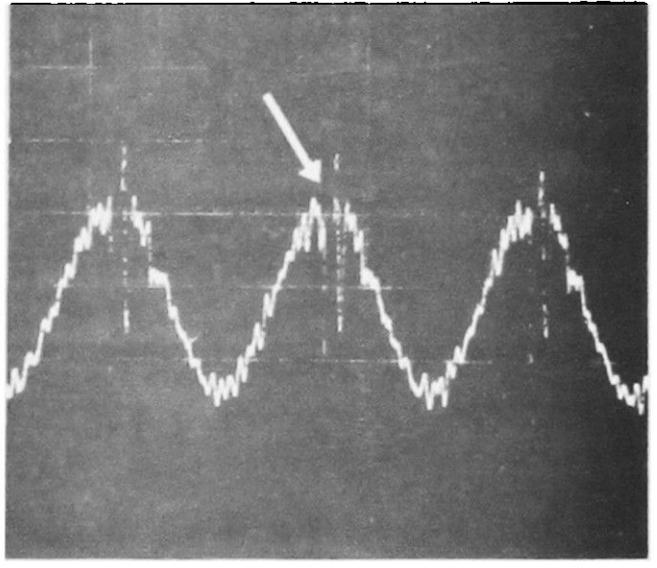
a)  
 $a_p \approx 0.9 \text{ g's}$   
 $2y_p = 0.150 \text{ g's}$   
 $f = 11 \text{ cps}$



b)  
 $a_p \approx 1.3 \text{ g's}$   
 $2y_p = 0.150 \text{ g's}$   
 $f = 13 \text{ cps}$



c)  
 $a_p \approx 1.9 \text{ g's}$   
 $2y_p = 0.150 \text{ g's}$   
 $f = 16 \text{ cps}$



d)  
 $a_p \approx 2.5 \text{ g's}$   
 $2y_p = 0.150 \text{ g's}$   
 $f = 18 \text{ cps}$

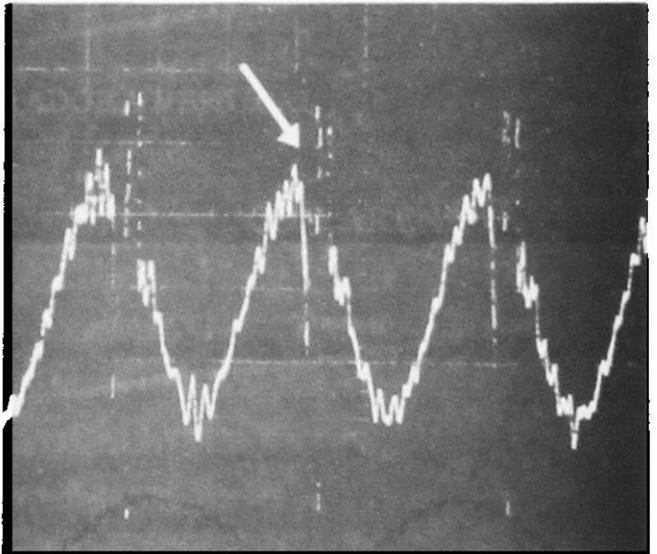


Fig. 3. Registros de aceleración en la pantalla del osciloscopio, con y sin arena en el molde, entre  $a_p = 0.9$  y  $2.5 \text{ g}$ .

## PROPIEDADES DE LA ARENA

El suelo usado en el estudio era una arena cuarzosa de granos de forma subangular. Los tamaños de las partículas estaban comprendidos en el rango 0.25–2 mm con un coeficiente de uniformidad de 1.7. El peso específico de los granos era 2.64 y la densidad mínima de la arena 1.388 g/cm<sup>3</sup>.

Se hicieron varios ensayos especiales con un Molde Miniatura de Harvard, usando diferentes técnicas de compactación, a fin de obtener información independiente sobre la densidad máxima de la arena; el valor estimado de estos resultados fue 1.64 g/cm<sup>3</sup>.

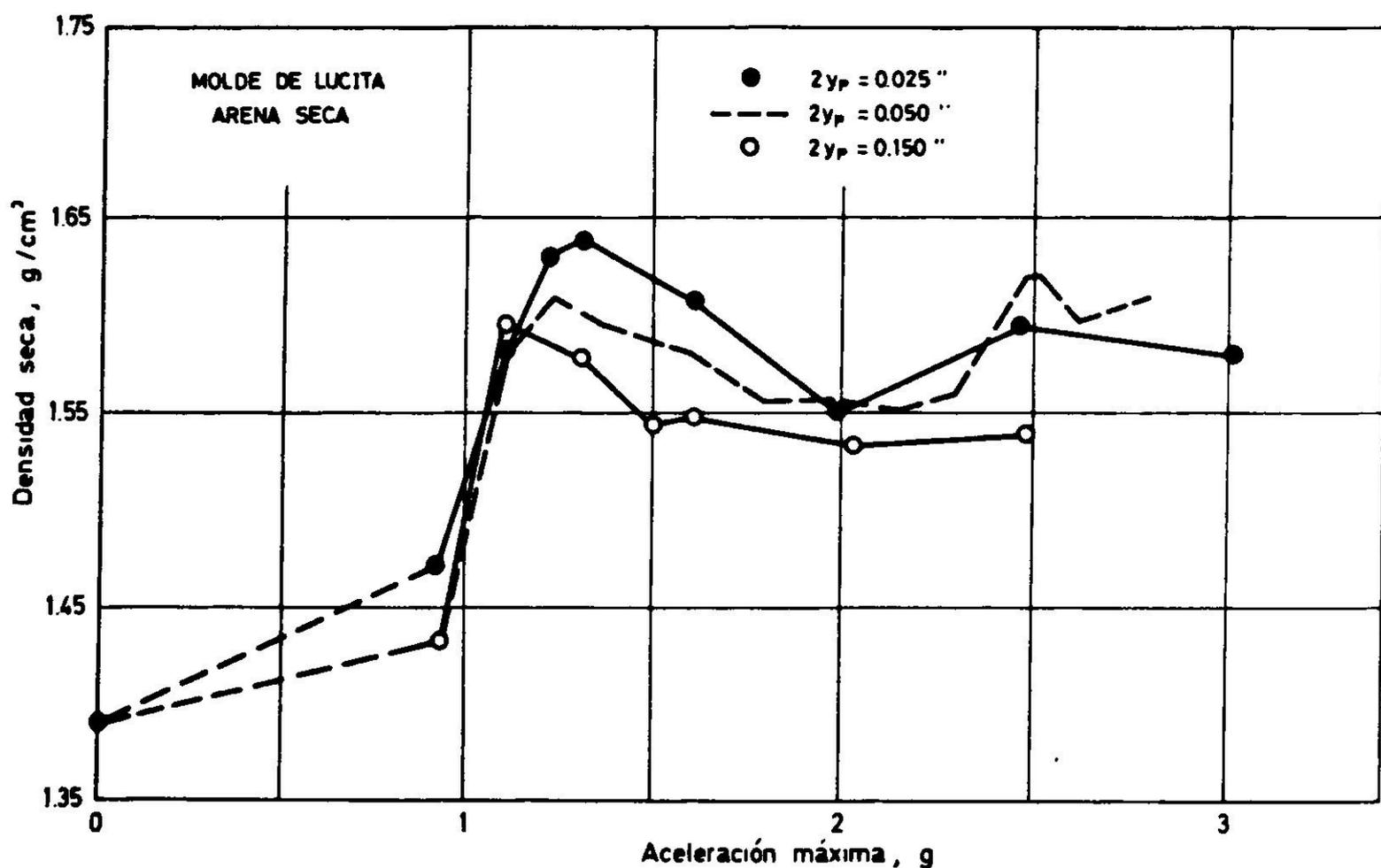


Fig. 4. Resultados típicos de series de ensayos de compactación.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una de las primeras conclusiones de la investigación fue que el material del molde influía poco en los resultados para  $a_p > 1 g$ , en comparación con la importancia de la amplitud. Esto significa que los datos obtenidos con cualquiera de los tres moldes son representativos del conjunto. En la Fig. 4 se muestran gráficos de la densidad final  $\gamma$  con respecto a  $a_p$  versus  $a_p$ , obtenidos todos con el Molde de Lucita. Las características comunes a los tres gráficos son:

a) Bajo 0,9 g hay poca densificación, y la mayor parte de la compactación se produce en el rango 0.9–1.1g;

b) En todos los casos hay un valor máximo de la densidad,  $\gamma_p$ , que se produce a la aceleración óptima  $(a_p)_{opt} > 1 g$   $(a_p)_{opt}$  se encuentra en los tres casos entre 1.1 y 1.3 g. Después de este máximo la arena se suelta pero no mucho, permaneciendo en estado denso.

c) Para algún valor de  $a_p$  entre 1.3 y 2 g, la curva se hace horizontal o sube de nuevo.

Hubo otras observaciones que confirmaron que el comportamiento de la arena sufre un cambio cualitativo al pasar por 1g. En casi todos los ensayos, el valor deseado de  $a_p$  se alcanzó incrementando la frecuencia una vez que la vibración ya había comenzado. Al observar la arena durante este aumento de la aceleración, no se notaba ningún cambio hasta que  $a_p \approx 1 g$ ; entonces, en unos pocos segundos la superficie del suelo se asentaba en forma apreciable. La segunda observación fue que, para  $a_p \geq 1 g$ , se podía escuchar claramente el sonido de los impactos. Estos impactos, que se discuten en detalle en la sección siguiente, se producen debido a que la masa de arena se separa primero de la base del molde para chocar posteriormente con ella. Al usar el Molde de Lucita se obtuvo una prueba decisiva de la existencia de los impactos, ya que se detectaron éstos por el acelerómetro y aparecieron en la pantalla del osciloscopio; eso se produjo sólo en la lucita debido a la gran flexibilidad del material. En la Fig. 3 se muestran fotos típicas de los impactos, tal como se veían en la pantalla. Los impactos aparecían en el osciloscopio exactamente cuando  $a_p = 1g$ , y no había traza de ellos cuando el molde se vibraba vacío.

La densificación producida bajo 1g variaba mucho entre una y otra serie de ensayos, dependiendo principalmente de la importancia de las vibraciones de alta frecuencia ("ruido") superpuestas a la oscilación principal. En la Fig. 5 se han

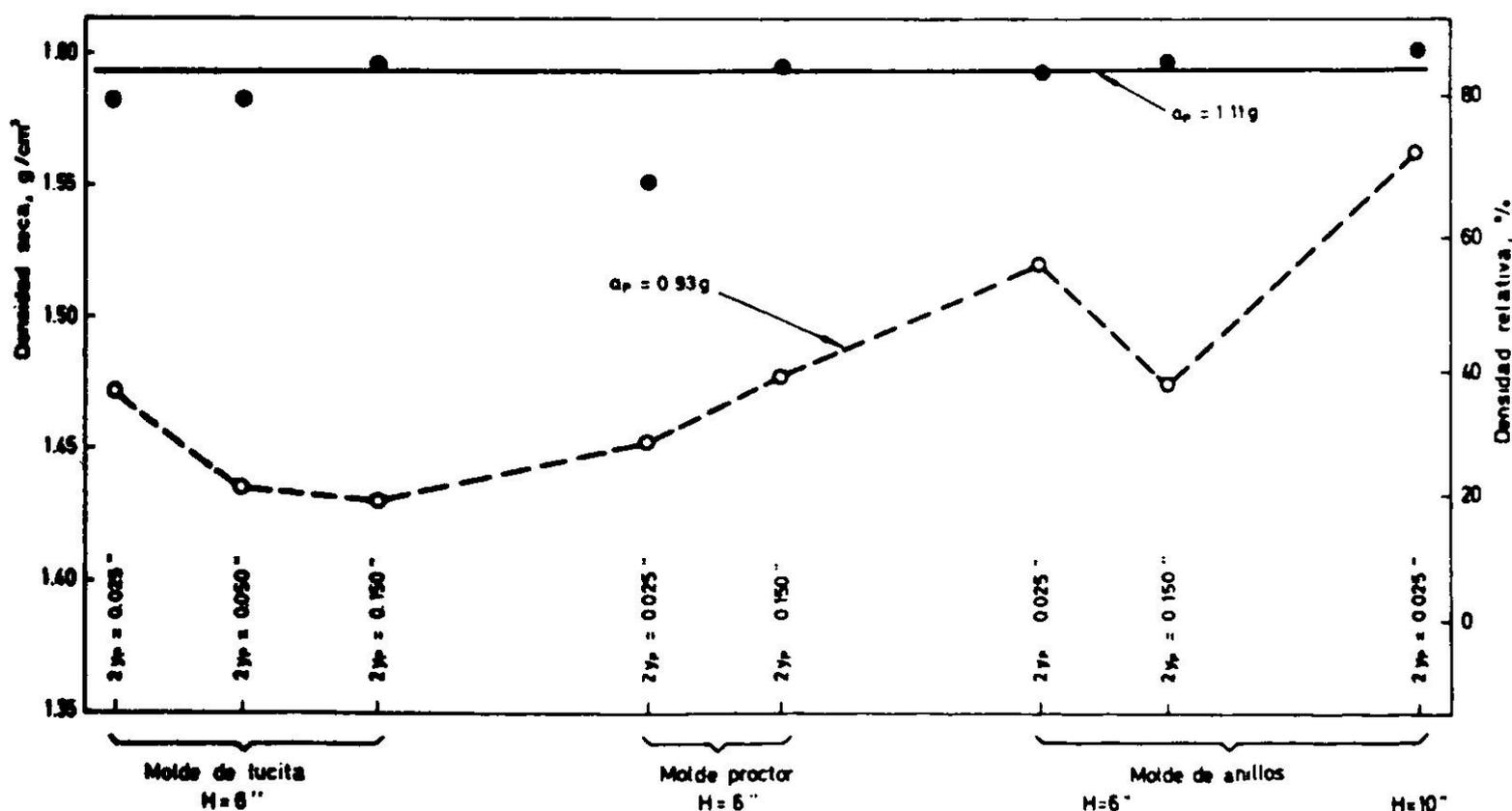


Fig. 5. Densidad de equilibrio para  $a_p = 1.1 g$ .

graficado todas las densidades obtenidas para  $a_p = 0.93 g$ , las que definen un amplio rango de densidades relativas, de 20 a 70%. Por otra parte, la densidad relativa para  $a_p = 1.11 g$  fue en todos los casos de  $83 \pm 3$ , con la excepción de un punto, Fig. 5. Esto significa que la densidad se produce al aparecer recién los impactos es notablemente constante, siendo independiente del material del molde, de la altura de la muestra y de la amplitud de vibración. A este valor constante, que para la arena de este estudio corresponde a  $1.593 g/cm^3$ , se le ha llamado *densidad de equilibrio*.

### MODELOS TEORICOS

El modelo más simple que explica el comportamiento observado reemplaza a la arena por un bloque rígido que descansa sobre una plataforma también rígida<sup>3,4,5</sup>, tal como se muestra en la Fig. 6. La plataforma, que simula a la base

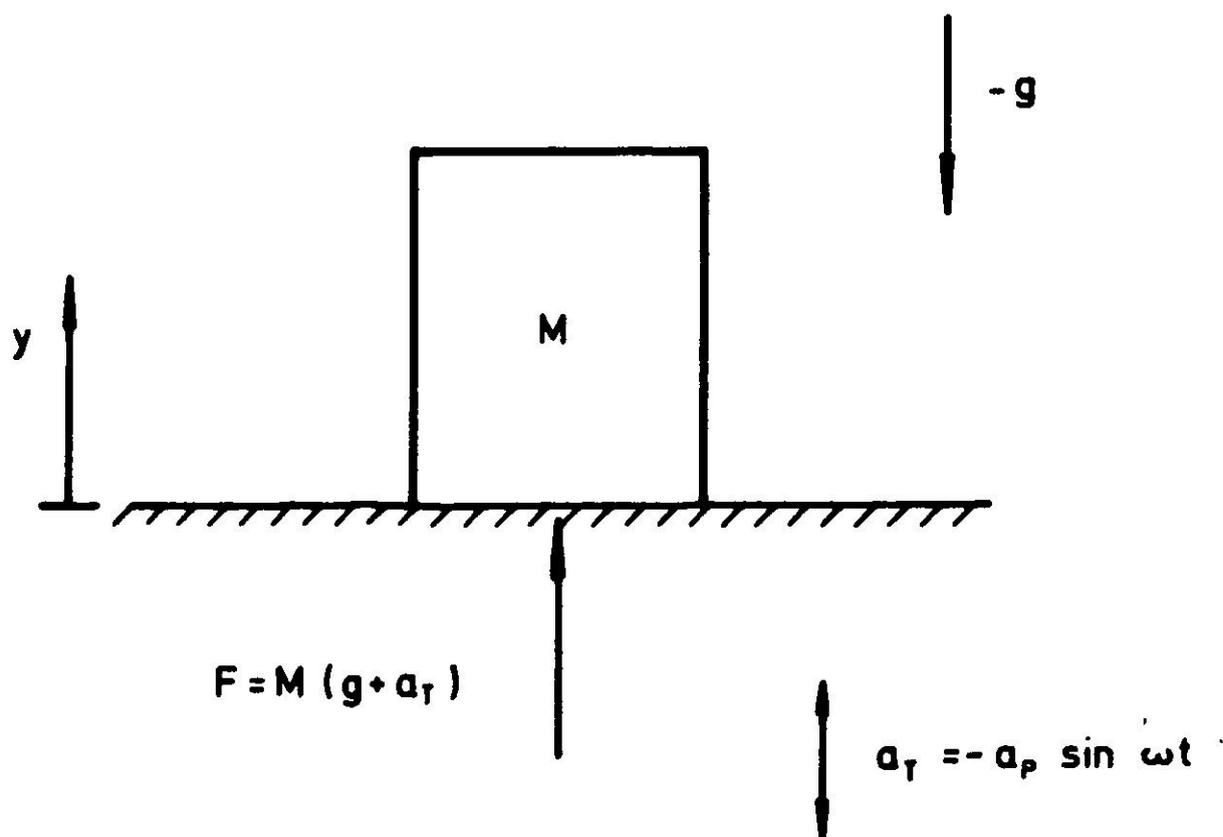


Fig. 6. Modelo de cuerpo rígido.

del molde, oscila verticalmente con movimiento sinusoidal. Según cuál sea el valor de  $a_p$  pueden producirse dos situaciones para el bloque:

a) Si  $a_p < 1g$ , el bloque se mueve con la plataforma durante todo el ciclo de vibración.

b) Si  $a_p > 1g$ , el bloque se mueve con la plataforma durante parte del ciclo. En el resto del ciclo hay un período de caída libre seguido de un impacto.

En ambos casos, si se conocen los parámetros de vibración de la plataforma  $a_p$  y  $\omega = 2\pi f$ , es posible calcular las historias completas de desplazamientos, velocidades y aceleraciones del bloque durante todo el ciclo. En el informe original<sup>5</sup> se incluye un estudio completo de este modelo, del que se presentan aquí algunos resultados.

Hay dos instantes durante el ciclo,  $T_1$  y  $T_2$ , que corresponden, respectivamente, al despegue del bloque y al impacto del mismo contra la plataforma. Si  $T_1$  y  $T_2$  se especifican en radianes ( $T = \omega t = 2\pi ft$ , en que  $t$  está en segundos), y se miden a partir del comienzo del ciclo, su valor depende sólo de  $a_p$ :

$$\text{sen } T_1 = \frac{g}{a_p} \tag{2}$$

$$\frac{a_p}{g} [\text{sen } T_1 - \text{sen } T_2 + (T_2 - T_1) \cos T_1] - \frac{1}{2} (T_2 - T_1)^2 = 0 \tag{3}$$

En la Fig. 7 se han graficado  $T_1$  y  $T_2$  versus  $a_p/g$ . Para verificar el modelo se

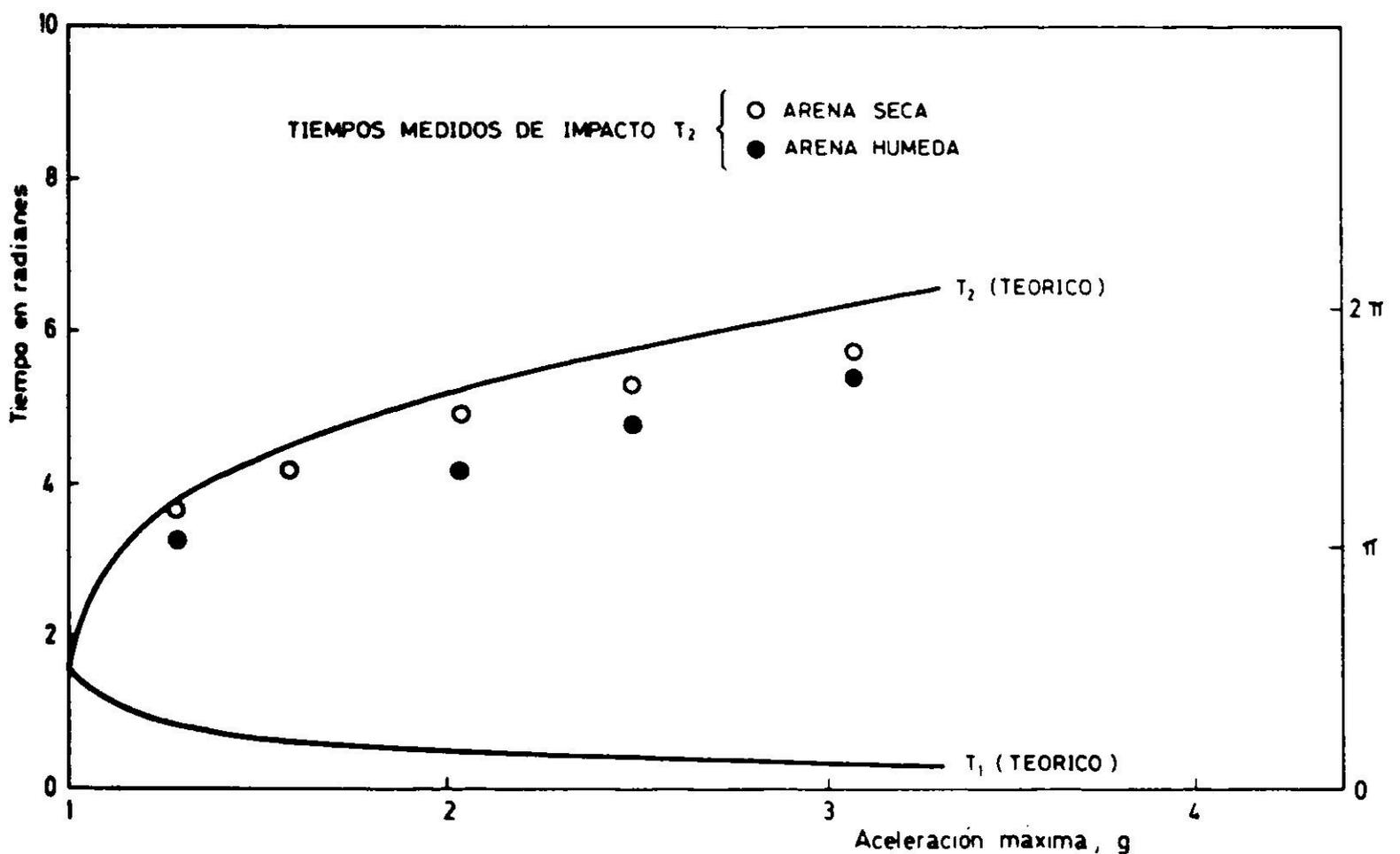


Fig. 7. Tiempo  $T_1$  y  $T_2$  versus  $a_p/g$ : teoría y mediciones de  $T_2$ .

realizó una serie de ensayos especiales con arena seca y húmeda, en los que se midió cuidadosamente  $T_2$  en fotos como las de la Fig. 3. Con tal fin,  $T_2$  fue definido como la distancia entre el comienzo del ciclo y la primera traza del impacto. En la Fig. 7 se han superpuesto estos datos experimentales, los que muestran la misma tendencia que la curva teórica. Los valores medidos son algo menores a los teóricos, especialmente para aceleraciones altas.

Otro parámetro importante que este modelo permite calcular, es la velocidad de impacto  $\Delta v$ , que es la diferencia algebraica de velocidades entre el bloque y la plataforma en el momento  $T_2$ :

$$\Delta v = \frac{a_p}{\omega} (\cos T_2 - \cos T_1) + \frac{g}{\omega} (T_2 - T_1) \tag{4}$$

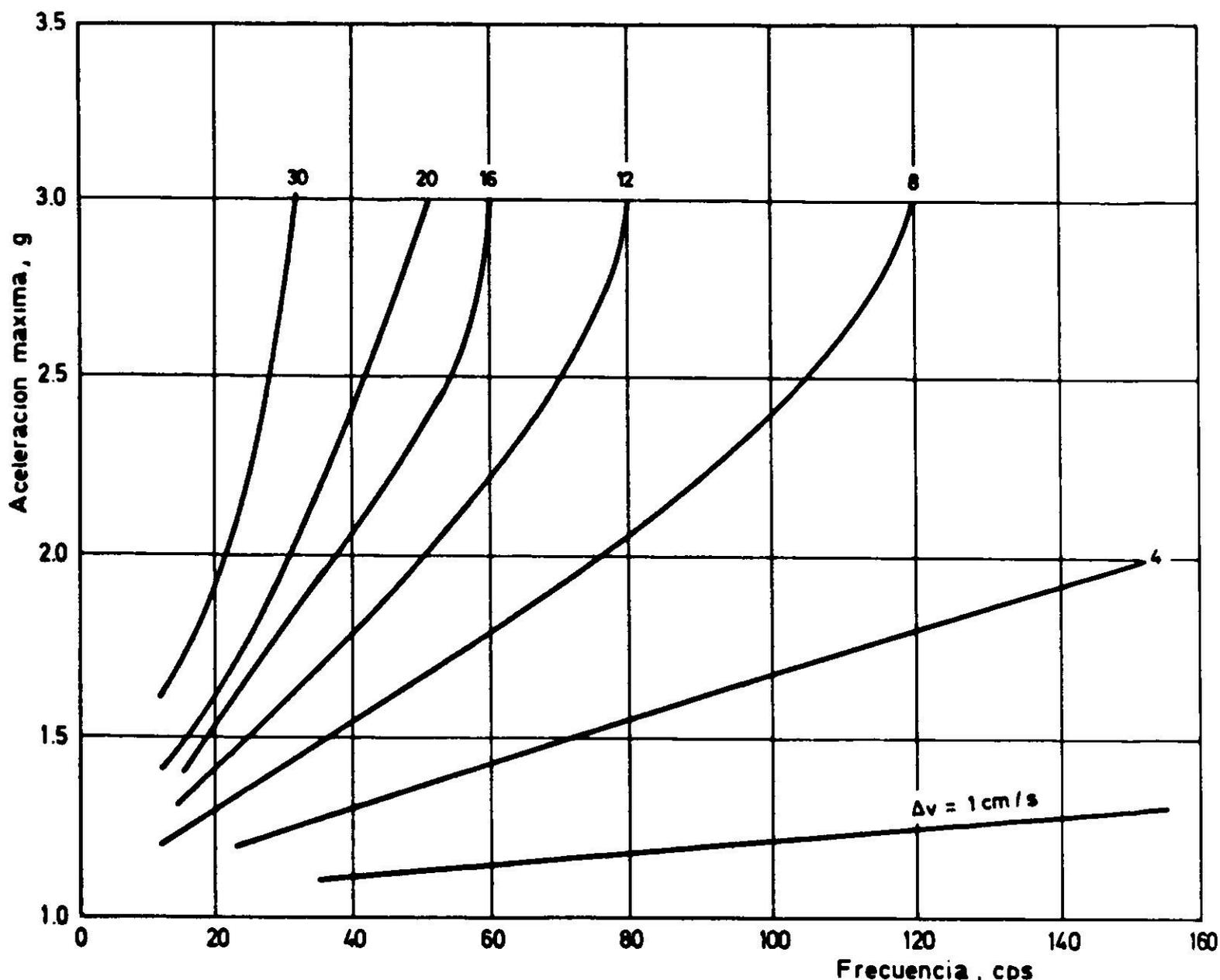


Fig. 8. Relación entre aceleración, frecuencia y velocidad de impacto.

$T_1$  y  $T_2$  dependen sólo de  $a_p$ , pero  $\Delta v$  es función de dos variables: frecuencia y aceleración. El gráfico correspondiente se incluye en la Fig. 8, como una familia de curvas en el espacio aceleración-frecuencia.

El modelo del bloque rígido entrega información cinemática útil, pero no dice lo que ocurre dentro de la masa de arena. Una mejor comprensión se logra suponiendo que el bloque puede deformarse. De acuerdo a la teoría de elasticidad, el esfuerzo máximo que el impacto produce en el bloque es proporcional a  $\Delta v$ :

$$\sigma_i = \rho C \Delta v \quad (5)$$

en que  $\sigma_i$  = esfuerzo de impacto,  $\rho$  = densidad del material del bloque, y  $C$  = velocidad de propagación de ondas longitudinales en el material del bloque. Este esfuerzo  $\sigma_i$  se transmite hacia arriba como una onda de compresión y se refleja en la superficie como una onda de tracción del mismo valor. Teóricamente las reflexiones continúan en forma indefinida, pero en la realidad se hacen cada vez menores y desaparecen finalmente debido a las propiedades de amortiguación de la arena.

Lo que interesa aquí es que el impacto produce esfuerzos de tracción dinámicos proporcionales a  $\rho.C.\Delta v$ . Por otro lado, a cualquier profundidad,  $z$ , de la columna hay un esfuerzo de compresión  $\sigma_g = \rho g z$ , debido al peso del mate-

rial. La arena seca no tiene resistencia a la tracción, y si dentro de su masa aparecen tracciones los granos se separan. Parece razonable suponer que la disminución de densidad después del máximo ( $a_p > (a_p)_{opt}$ ) se debe a la aparición de tracciones en la mayor parte de la profundidad total  $H$ . Entonces, si se toma  $H/2$  como profundidad representativa, los impactos comenzarán a soltar la arena cuando el esfuerzo neto sea nulo para  $z = H/2$ :

$$\sigma_g - \sigma_i = \frac{1}{2} \rho g H - B \rho C (\Delta v)_p = 0 \tag{6}$$

de donde:

$$(\Delta v)_p = \frac{g}{2BC} H \tag{7}$$

en que  $B < 1$  es un coeficiente que incorpora una multitud de factores que tienden a reducir  $\sigma_i$  respecto del valor teórico (rigidez imperfecta de la base, amortiguamiento de la onda de tensiones, etc.).  $(\Delta v)_p$  sería entonces el valor crítico de la velocidad de impacto, el que debería asociarse con  $(a_p)_{opt}$ ; es decir,  $\Delta v = (\Delta v)_p$  cuando  $a_p = (a_p)_{opt}$ . De acuerdo a esta interpretación,  $(\Delta v)_p$  sería el límite entre dos situaciones: si  $\Delta v < (\Delta v)_p$  al aumentar la intensidad de los impactos se compacta la arena, y si  $\Delta v > (\Delta v)_p$  al aumentar la intensidad de los impactos se suelta la arena.

Si se combinan las Ecs (2), (3), (4) y (7), es posible calcular la aceleración óptima en función de  $y_p$  y  $H$ , siempre que se conozca el valor de  $g/2BC$ .

Para verificar la teoría expuesta más arriba se adoptó el siguiente procedimiento. Primero se usaron los valores de  $(a_p)_{opt}$  medidos en las primeras ocho series de ensayos de la Tabla II, y los ocho valores de  $(\Delta v)_p$  teóricos corres-

TABLA II  
ACELERACION OPTIMA ( $a_p$ ) OPTIMA MEDIDA Y CALCULADA  
USANDO LA ECUACION  $(\Delta v)_p = 0.241H$

Tipo de molde	Altura muestra (pulgadas)	$2y_p$ (pulgadas)	Aceleración óptima $g$	
			Teórica	Medida
Lucita	6	0.025	1.24	1.31
Proctor	6	0.025	1.24	1.23-1.31
Anillos	6	0.025	1.24	1.23
Lucita	6	0.050	1.18	1.24
Lucita	6	0.150	1.13	1.10
Proctor	6	0.150	1.13	1.10
Anillos	6	0.150	1.13	1.10
Anillos	3	0.025	1.12	1.10
Anillos	3	0.150	1.06	< 1.10
Anillos	10	0.025	1.37	Curva aplanada*

\*Parece haber un pequeño máximo para  $a_p \approx 1.40 g$ .

pondientes calculados con la Ec(4), para obtener  $g/2BC$  con la Ec(7). El promedio de estos ocho valores de  $g/2BC$  dio el valor 0.241. Entonces, para la arena usada, la Ec(7) se transforma en:

$$(\Delta_v)_p = 0.241 H \quad (8)$$

en que  $H$  está en cm y  $(\Delta_v)_p$  en cm/s. Finalmente la Ec(8) se usó para calcular de nuevo el  $(a_p)_{opt}$  de cada serie, dando los resultados que aparecen en la penúltima columna de la Tabla 2. Se puede apreciar que la teoría predice correctamente las tendencias observadas.

Los datos experimentales de Selig, (8) confirman también la validez de esta teoría. A partir del  $(a_p)_{opt}$  de una de las curvas densidad versus aceleración de Selig, se obtuvo su  $(\Delta_v)_p = 12.3$  cm/s (con un valor correspondiente  $g/2BC = 0.44$ ). Como  $H$  fue el mismo para todos los ensayos de este autor (11 pulgadas),  $(\Delta_v)_p$  debería ser igual en todos los casos. Este valor de  $(\Delta_v)_p$  es el que se ha superpuesto en la Fig. 1, y si se compara la curva con los resultados experimentales se ve que, efectivamente, ella define las combinaciones de frecuencia y aceleración que da los valores máximos de la densidad.

## INTERPRETACION

La densificación de una arena en una masa de vibración vertical parece deberse a dos procesos principales.

Primero, cuando  $a_p \approx 1$  g hay una compactación rápida y la densidad final resultante (*densidad de equilibrio*, o  $\approx 80$  % densidad relativa para el material de este estudio), es independiente de la densidad inicial, de la frecuencia de vibración y de la altura de la muestra. Esta densificación se produce, aparentemente, debido a que las fuerzas intergranulares desaparecen durante parte de cada ciclo, permitiendo así a las partículas acomodarse en un arreglo más denso. Parece razonable suponer que la *densidad de equilibrio* corresponde a la estructura más compacta que los granos pueden lograr al liberar sus energías potenciales. Los autores han llamado a este proceso *compactación con  $\sigma = 0$*  y sus rasgos principales se ilustran en la Fig. 9a.

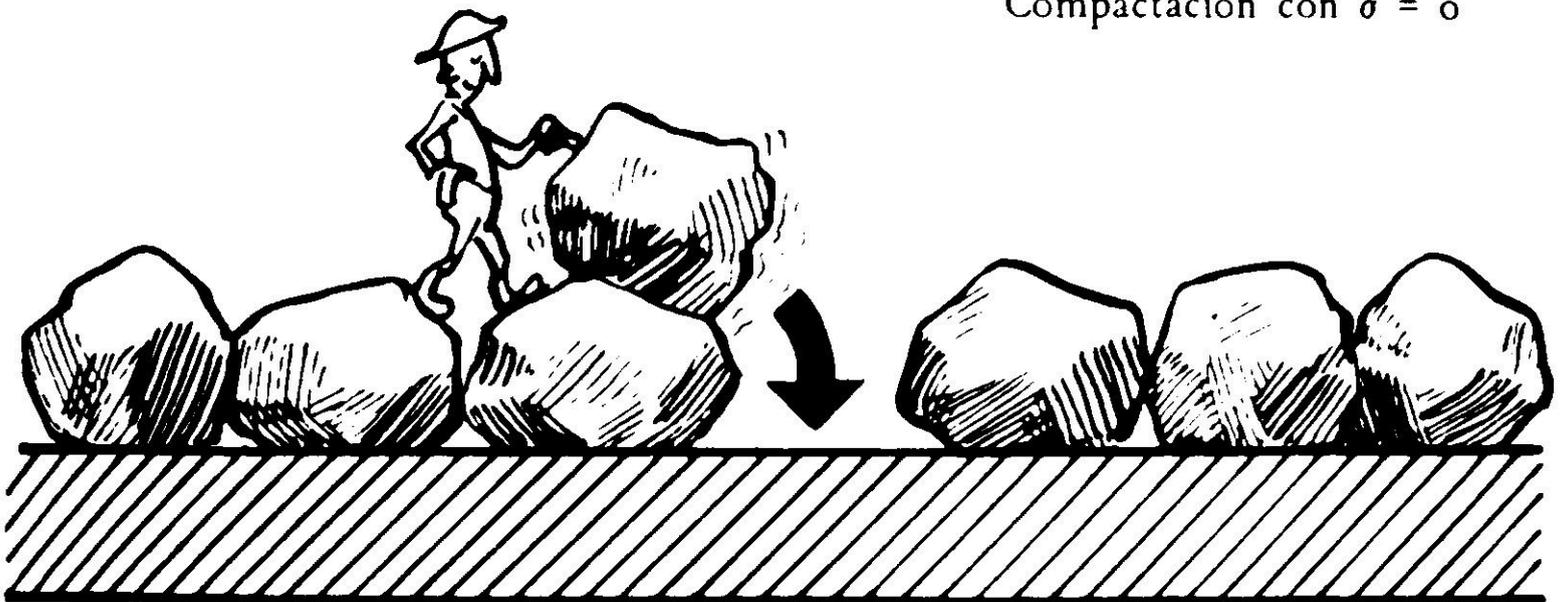
La continuación evidente de este cuadro para  $a_p > 1.1$  g es que la densificación progresa debido a la intensidad creciente de los impactos, los que proveen las fuerzas necesarias para que cada partícula venza la resistencia de roce de los granos vecinos. La compactación es ahora más lenta, con las partículas avanzando un poco en cada ciclo. A este proceso se le ha llamado *compactación por impacto*, y se ilustra en la Fig. 9b.

La *compactación por impacto* continuará mientras crezca  $\Delta_v$ , hasta que se alcance la densidad máxima del suelo o hasta que  $\Delta_v = (\Delta_v)_p$ .

Durante la *compactación por impacto* podría esperarse que la densidad final,  $\gamma$ , del ensayo dependiera sólo del esfuerzo de impacto, el que a su vez es

a)

Compactación con  $\sigma = 0$

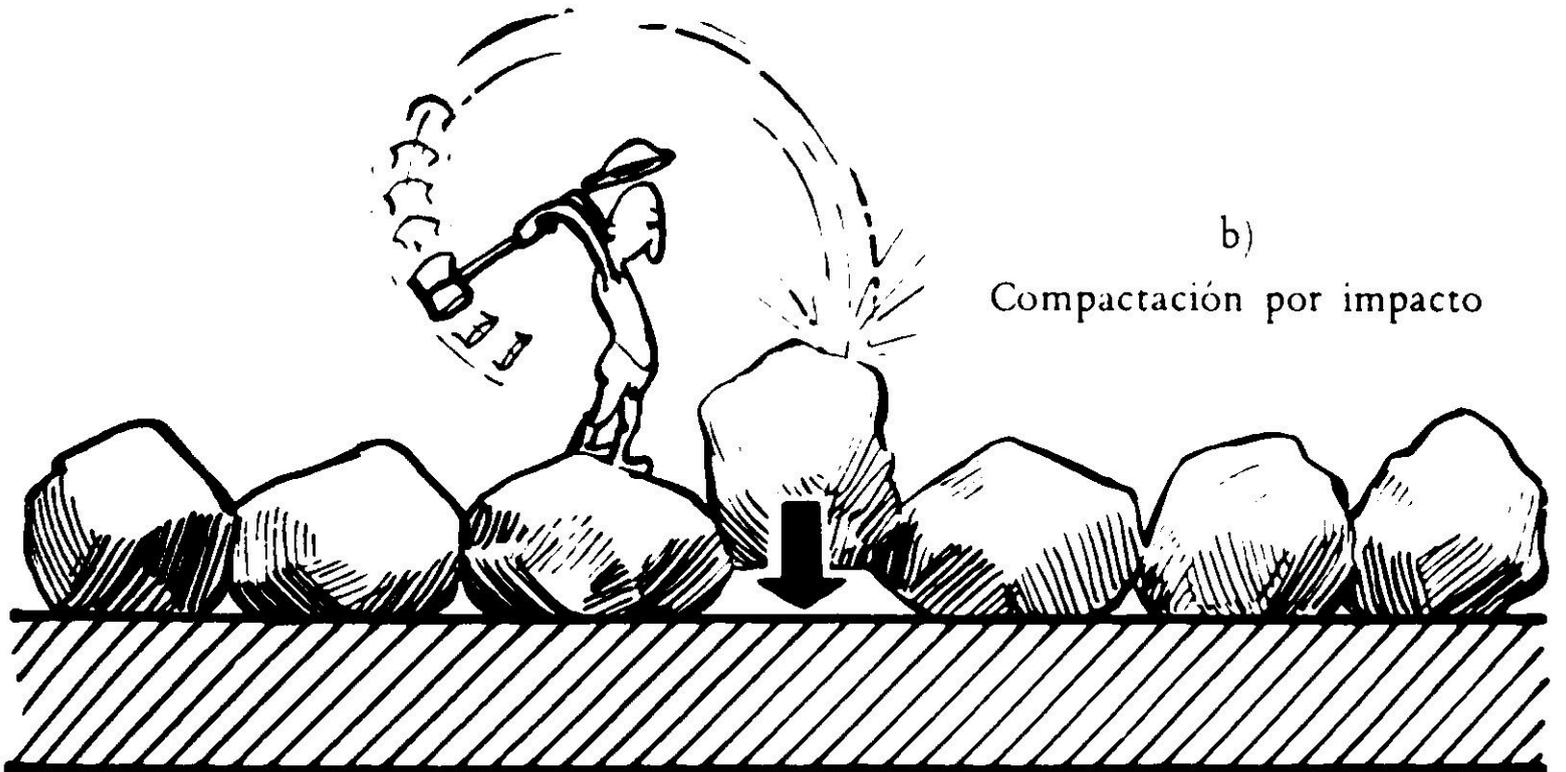


Arena inicialmente suelta  
 Poca energía necesaria  
 Proceso de compactación rápido (pocos ciclos)

DENSIDAD FINAL INDEPENDIENTE DE LA ENERGIA ENTREGADA

b)

Compactación por impacto



Arena inicialmente densa  
 Mucha energía necesaria  
 Proceso de compactación lento (muchos ciclos)

DENSIDAD FINAL DEPENDE DE LA ENERGIA ENTREGADA

Fig. 9. Compactación con  $\sigma = 0$  y compactación por impacto.

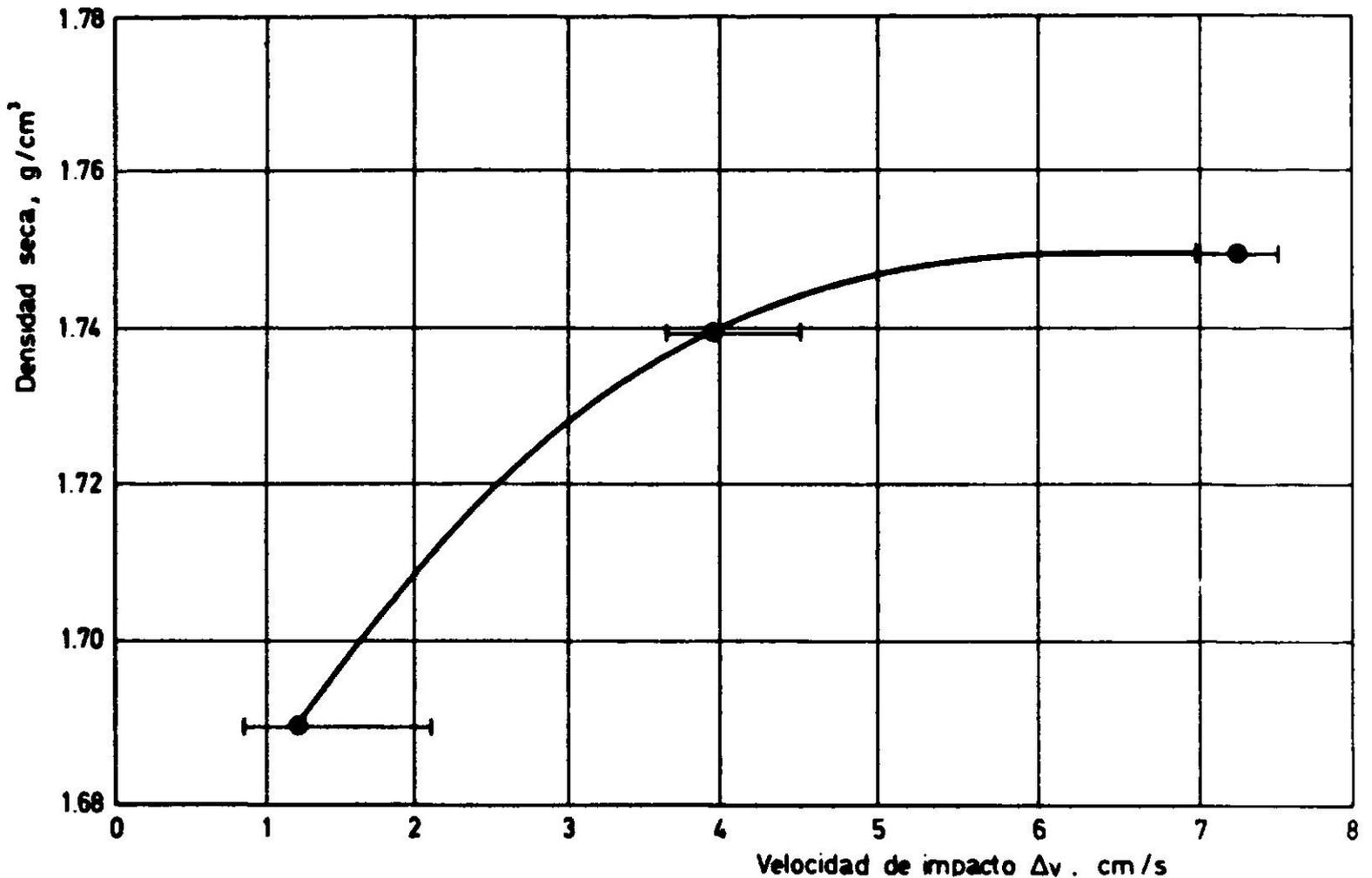


Fig. 10. Curva  $\gamma_d$  versus  $\Delta v$ , según los resultados de Selig.

función de  $\Delta v$ . Las curvas experimentales para  $\gamma = 1.69; 1.74$  y  $1.75 \text{ g/cm}^3$  de la Fig. 1 se parecen mucho a las curvas teóricas de la Fig. 8. Se calcularon los valores de  $\Delta v$  correspondientes a las coordenadas  $(a_p, f)$  a lo largo de la curva experimental, y se encontró que, efectivamente,  $\Delta v$  es constante a lo largo de la curva. La correlación correspondiente  $\gamma$  versus  $\Delta v$  se ha graficado en la Fig. 10.

La Fig. 11 es un resumen que integra lo expuesto hasta ahora, y describe el

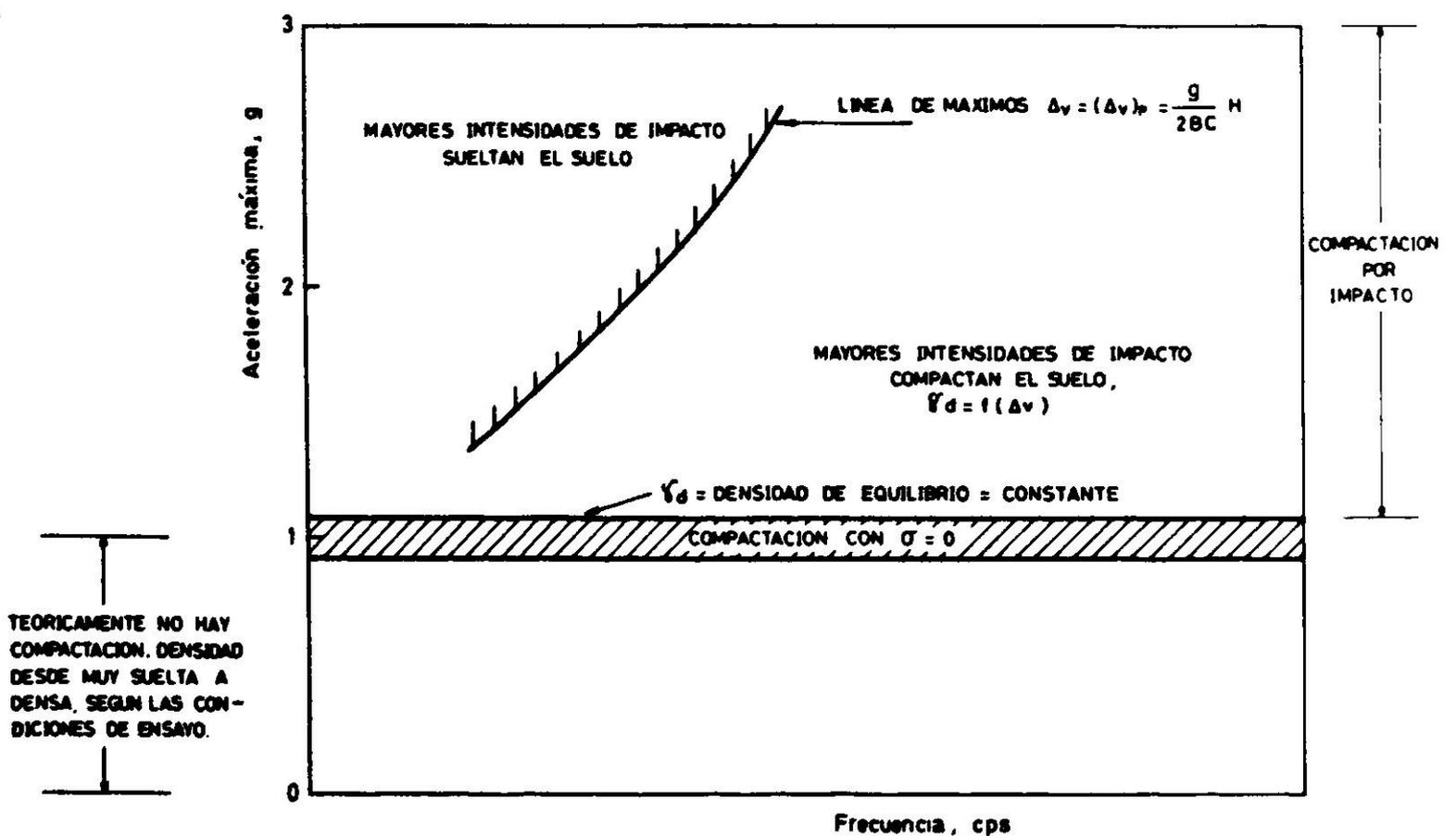


Fig. 11. Comportamiento general de compactación de arena seca.

comportamiento de densificación de una arena seca, sin sobrecarga y sometida a vibración vertical. En este gráfico, cada ensayo queda representado por un punto del plano. El efecto de variar un parámetro, tal como la frecuencia o la amplitud del ensayo, puede predecirse calculando la trayectoria correspondiente con la  $E_c(1)$  y superponiéndola en la Fig. 11. Por ejemplo, una serie de ensayos de frecuencia constante será una recta vertical y una serie de amplitud constante será una parábola. El máximo de densidad de la serie se producirá en el ensayo correspondiente a la intersección de esta trayectoria con la *línea de máximos*, que puede calcularse con la  $E_c(7)$ , si se conoce  $g/2BC$ . Para arenas cuarzosas uniformes, medias a gruesas, se recomienda el valor  $g/2BC = 0.30 \text{ s}^{-1}$  para estimaciones preliminares.

## CONCLUSIONES

1) Se ha desarrollado un modelo teórico para explicar la compactación de una arena seca en un molde, sin sobrecarga y sujeta a vibración vertical. El modelo propuesto se resume en la Fig. 11, y concuerda razonablemente bien con los resultados de los ensayos. El factor principal que controla la densidad final de la arena es la intensidad de los impactos que aparecen cuando la aceleración es mayor que  $1g$ .

2) Para una serie de ensayos con arena seca, el valor máximo de la densidad aparecerá en la *línea de máximos* calculada con la  $E_c(7)$ . En arenas cuarzosas medias se puede usar el valor de  $g/2BC = 0.30 \text{ s}^{-1}$  para estimaciones preliminares.

3) El máximo de la densidad obtenida durante una serie de ensayos puede coincidir con la densidad máxima del material o puede ser menor que ésta. El cuadro teórico sugiere que saturar la arena y ponerle un peso arriba aumentarían la eficiencia del ensayo, al reducir las tracciones debidas al impacto. Estas conclusiones coinciden con las recomendaciones de la Norma ASTM 2049-69.

## REFERENCIAS

1. LUSCHER, V., ORTIGOSA, P., ROCKER, K., and WHITMAN, R.V. Repeated Load and Vibration Tests upon Sand, Progress Report N° 1, Research Report R67-29 of the Dept. of Civil Engineering, M.I.T., 1967.
2. ORTIGOSA DE PABLO, P. *Densification of Sand by Vertical Vibrations with Almost Constant Stresses*, Master Thesis, Dept. of Civil Engineering, M.I.T., 1968.
3. WHITMAN, R.V., and ORTIGOSA, P. *Densification of Sand by Vertical Vibrations*, Technical Paper T68-5, Soils Publication 222, Dept. of Civil Engineering, M.I.T., 1968.
4. LAMBE, T.W., and WHITMAN, R.V. *Soil Mechanics*, Wiley, 1969.
5. DOBRY, R., and WHITMAN, R.V. *Densification of Sand by Vertical Vibrations in "Standard" Molds*, Research Report R70-05, Soils Publication 251, Dept. of Civil Engineering, M.I.T., 1969.

6. KRISEK, R.J., and FERNANDEZ, J.I. Vibrating Densification of Damp Clayey Sands, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations, American Society of Civil Engineers*, vol. 97, N° SM8, August 1971, pp. 1069–1079.
7. BARKAN, D.D. *Dynamics of Bases and Foundations*, McGraw-Hill, 1948.
8. SELIG, E.T. Effect of Vibration on Density of Sand, *Proceedings 2nd Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 1, pp. 129–144, 1963.
9. D'APPOLONIA, D.J., and D'APPOLONIA, E. Determination of Maximum Density of Cohesionless Soils, *Proceedings 3d. Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 266–268, 1967.

### COMPACTION OF SAND ON A VERTICALLY VIBRATING TABLE

#### SUMMARY:

*A detailed study has been made of the factors contributing to densification of dry sand on a shaking table. The variables considered were the frequency of vibrations, amplitude of vibrations, size and shape of container. No surcharge was used in any test. The different processes affecting the achieved density were found to be:*

1. *repeated change in vertical stress owing to inertia forces within the sand when the peak acceleration is less than 1 g.*
2. *rearrangement of particles during free fall, when the peak acceleration just reaches 1 g*
3. *impact action at the end of free fall, when the peak acceleration exceeds 1 g*
4. *spalling of the surface layer by stress wave reflections, when the peak accelerations reach several g's.*