

## INDICES DE PENETRACION DE CUCHARA NORMAL Y DE CONO DINAMICO EN LAS ARENAS LIMOSAS BÍO BÍO

Ricardo DOBRY\*  
Mauricio POBLETE\*\*  
Marcel OPPLIGER\*\*\*

### RESUMEN

*Se presenta el estudio de la correlación entre los índices de penetración de la cuchara normal y del cono dinámico, en las arenas limosas Bío Bío. Se desarrolla una fórmula teórica cuyos coeficientes se ajustan a los datos de sondajes y penetraciones de cono efectuadas en 22 puntos entre Concepción y Talcahuano. Se entrega un método práctico que permite calcular el índice de penetración de cuchara, conociendo el índice de penetración de cono y la posición de la napa freática. Se discuten los resultados obtenidos.*

### INTRODUCCION

Una de las formas más difundidas de muestreo de suelos es el sondaje con cuchara normal.

En suelos arenosos bajo agua, es el método más práctico de obtener muestras representativas y de estimar la densidad relativa.

La cuchara normal es un tubo muestreador de pared gruesa, de 2" de diámetro, el que se clava a golpes 45 cm en el fondo de una perforación previamente hecha. Se usa para ello un martinete de 63,5 kg, el que cae libremente desde una altura de 75 cm (Norma ASTM D 1586-63 T). Se llama índice de penetración de cuchara ( $N_1$ ) al número de golpes necesarios para hincar los 30 cm finales. Además de existir una correlación bien establecida entre  $N_1$  y la densidad relativa de los suelos arenosos, hay métodos de diseño de fundaciones que trabajan directamente con  $N_1$  como medida de la resistencia del terreno.

---

\*Jefe Sección Mecánica de Suelos del Laboratorio Zonal de IDIEM en Concepción, Ingeniero Civil, Maestro en Ingeniería (Mecánica de Suelos).

\*\*Egresado de Ingeniería Civil.

\*\*\*Alumno de V año de la Escuela de Ingeniería.

El muestreo con cuchara normal es un procedimiento relativamente costoso, y requiere de un equipo de sondajes.

El cono dinámico es un cono de acero de 2" de diámetro y 60° de conicidad, que se clava a golpes en el suelo, con el mismo martinete y altura de caída que la cuchara; no requiere perforación previa. Se llama índice de penetración de cono ( $N_c$ ) al número de golpes necesarios para hincarlo 30 cm.

El equipo necesario para una penetración de cono es más simple que el de cuchara. No requiere bomba ni revestimiento, y sólo usa barras, martinete, trípode y huinche (incluso este último no es indispensable); además, la operación es más rápida. Por todo esto, la relación de precios cono: cuchara es de aproximadamente 1:5.

Estas ventajas han hecho que en Chile se use bastante el cono como método alternativo de obtener el índice de penetración.

Sin embargo, el cono tiene las siguientes limitaciones:

- no permite la obtención de muestras, por lo que en general se usa como parte de un estudio en que se hacen además pozos o sondajes.
- debido a la fricción del suelo sobre las barras, la relación entre el índice de penetración de cono y las propiedades del suelo es menos precisa que en el caso de la cuchara. Este hecho ha dificultado también los intentos realizados para correlacionar ambos índices.

El presente trabajo tiene como objeto establecer una correlación entre los índices de penetración de cono y cuchara, válida para las arenas Bío Bío.

El subsuelo de la planicie existente entre la ciudad de Concepción y la Bahía de San Vicente, está formado principalmente por arenas limosas tipo Bío Bío, intercaladas con lentes de limo y arcilla de origen aluvial, (Fig. 1). La napa aparece en general a pocos metros bajo la superficie.

Las arenas Bío Bío son sedimentos cuaternarios de origen volcánico basáltico, transportados por el río Bío Bío desde la Cordillera de los Andes y depositados cerca de su desembocadura. Tienen color gris oscuro y granos semiangulosos.

En la zona indicada se han realizado gran cantidad de estudios de suelos; usándose en ellos extensamente tanto la cuchara como el cono.

La correlación buscada será útil en futuros estudios, dentro del área urbana de Concepción o fuera de ella. En particular, puede facilitar los estudios de suelos relacionados con proyectos en marcha que abarcan áreas extensas (Sector H-7; Industria Petroquímica).

Además, este estudio forma parte del Plan Concepción<sup>1</sup>, y la fórmula propuesta será utilizada para estimar los valores de  $N_1$  en aquellos puntos del centro de la ciudad en que se han hecho penetraciones de cono.

La mayor parte de los cálculos fueron realizados por el computador IBM-1620, del Centro de Cómputos de la Universidad de Concepción.

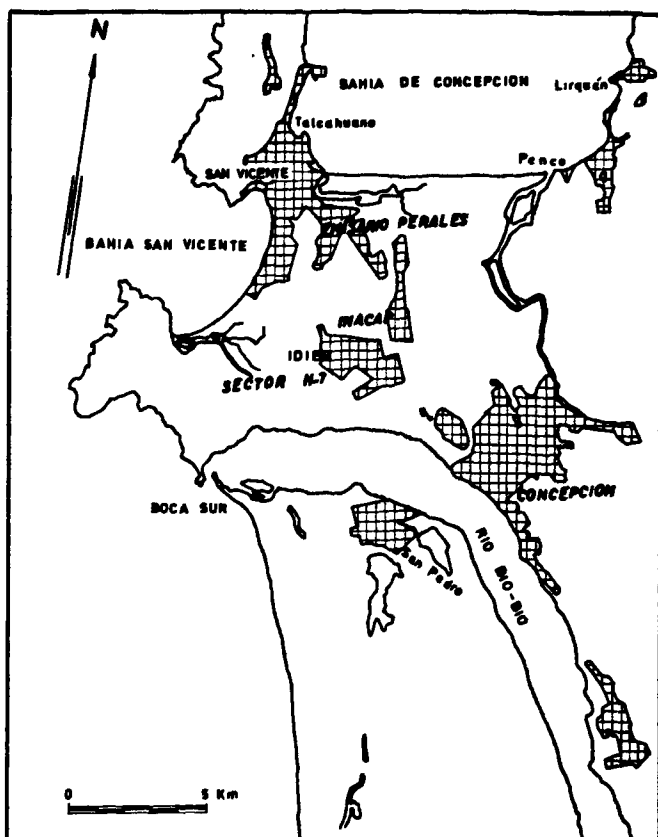


Fig. 1. Croquis de localización de sondajes.

### DATOS DE TERRENO

La zona estudiada es la indicada en la Fig. 1. En ella IDIEM realizó durante los años 1965 y 1966, 24 sondajes con cuchara normal, hasta profundidades variables entre 7 y 20 metros. Estos trabajos fueron solicitados por diversos clientes, y se informaron en los certificados respectivos. Para los fines de esta investigación, al lado de cada sondaje se efectuó una penetración con cono por cuenta de IDIEM. La cercanía de ambas penetraciones (2 metros) y la brevedad del tiempo transcurrido entre una y otra (no más de 2 días) garantizan la similitud de condiciones.

Cada par de ensayos cuchara - cono fue realizado por una misma sonda. Sin embargo, en los 24 puntos participaron 3 condas y 4 grupos de sondeadores, lo que elimina la influencia de factores particulares sobre los resultados.

En general se usaron barras de perforación N y A con la cuchara normal, y A con el cono.

Los 24 puntos se distribuyen así: 13 en el Sector H-7 (Corvi); 3 en el Emisario Perales (colector Talcahuano); 2 en terrenos de Inacap; 2 en San Vicente (Estanques MOP y Planta Esso), y 4 en Concepción (Hotel Panamericano; Población Carabineros y Edificio Ñielol).

Las áreas achuradas de la Fig. 1 indican la localización de los sondajes.

En las Figuras 2 a 4 se han esquematizado los datos de algunos sondajes: estratigrafía, posición de la napa de agua, variación del contenido de finos y de los índices de penetración de cuchara y de cono con la profundidad.

En las mismas figuras se han graficado las diferencias entre ambos índices:

$$\Delta N = N_c - N_1 \quad (1)$$

con la profundidad.

Cada valor de  $N_c$  es representativo de un tramo de 30 cm, y lo mismo sucede con  $N_1$ . Como en general ambos tramos no coinciden, no es posible calcular  $\Delta N$  en forma inmediata. Para salvar este inconveniente se recurrió al procedimiento de cálculo indicado en el Apéndice I.

## INTERPRETACION DE LOS DATOS

El índice de penetración de cuchara depende de la resistencia del suelo que se encuentra inmediatamente debajo de la herramienta; no hay fricción lateral. El índice de cono, en cambio, depende de dos efectos que actúan simultáneamente: la resistencia de punta y la fricción lateral.

Un examen de los gráficos  $\Delta N - h$  (Figs. 2 a 4), muestra que cerca de la superficie  $\Delta N \approx 0$ . En 19 de los 24 sondajes hay una profundidad límite  $h_0$ , a partir de la cual  $\Delta N$  comienza a aumentar\*. La explicación de este hecho, confirmado por observaciones de terreno, es la siguiente: el cono tiene un diámetro mayor que la barra, por lo tanto abre un orificio en el que ésta cabe holgadamente. Sobre la napa de agua y cerca de la superficie, la cohesión aparente estabiliza las paredes verticales, y no hay fricción lateral. A una mayor profundidad la tendencia al derrumbe aumenta; bajo la napa, que destruye las fuerzas capilares, la arena se comporta como un material totalmente no cohesivo, y la fricción lateral crece rápidamente con la profundidad. El que en muchos casos  $h_0$  sea sólo algo mayor que  $h_n$  (profundidad de la napa), confirma esta explicación.

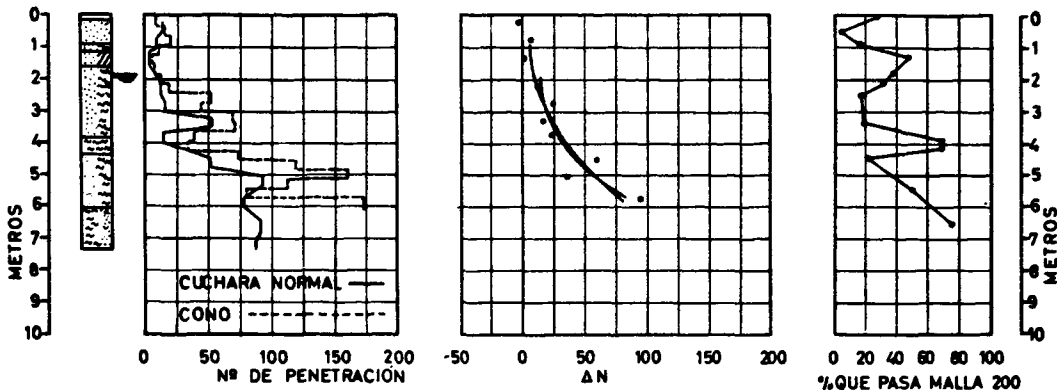
En la Figura 5 se han llevado a un gráfico los 19 valores de  $h_0$  versus  $h_n$ . La recta ajustada (trazada por el origen y por el centro de gravedad de los puntos), tiene la ecuación:

$$h_0 = 1,2 h_n \quad (2)$$

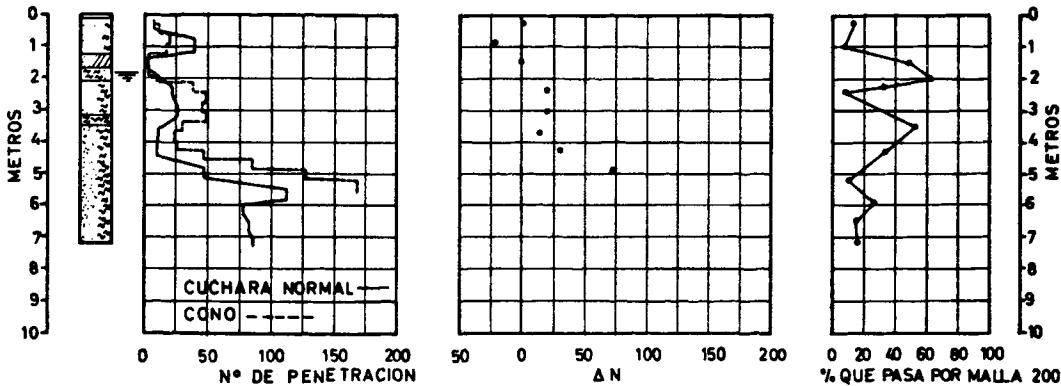
El ajuste es bueno en el Sector H-7, Emisario Perales e Inacap; no así en Concepción.

\*De las cinco excepciones, dos corresponden a San Vicente. Ambas penetraciones se hicieron en arenas limpias, y en ellas  $\Delta N$  tiende a disminuir con la profundidad.

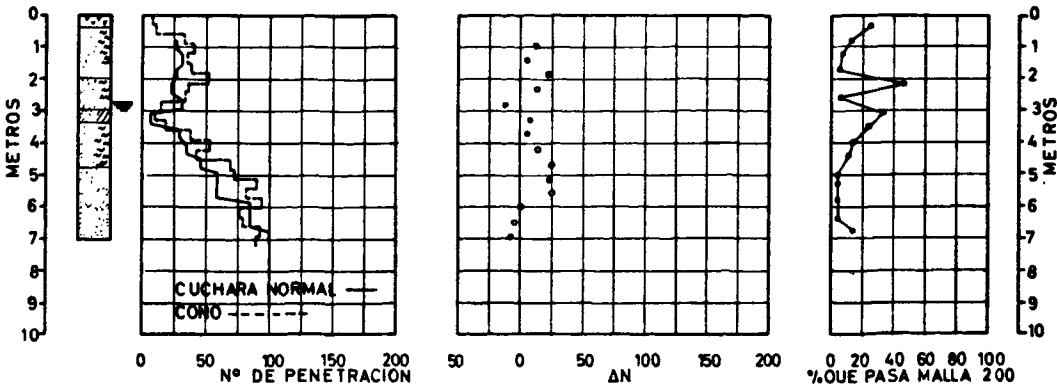
SECTOR H-7 SONDAJE N° 7



SECTOR H7 SONDAJE N° 11



SECTOR H7 SONDAJE N° 13

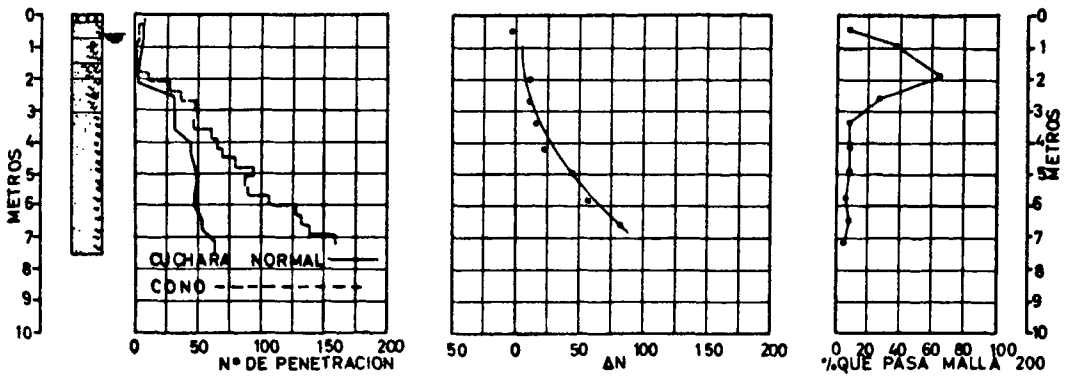


Signos convencionales:

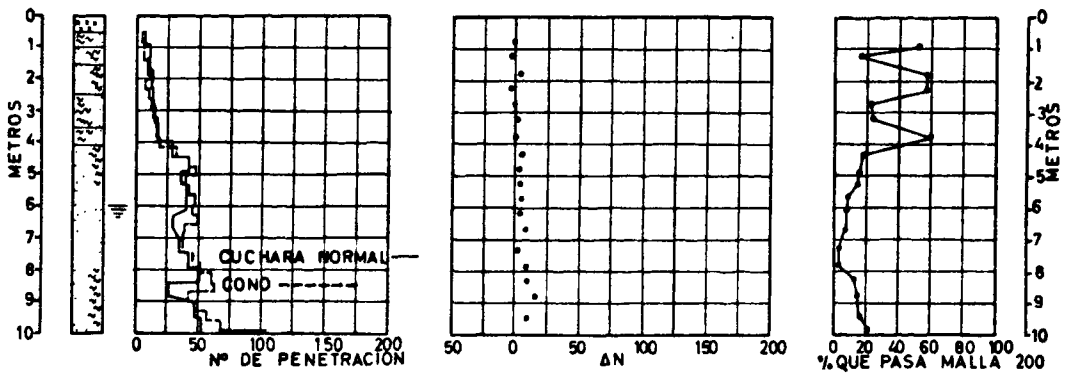


Fig. 2. Datos de sondajes.

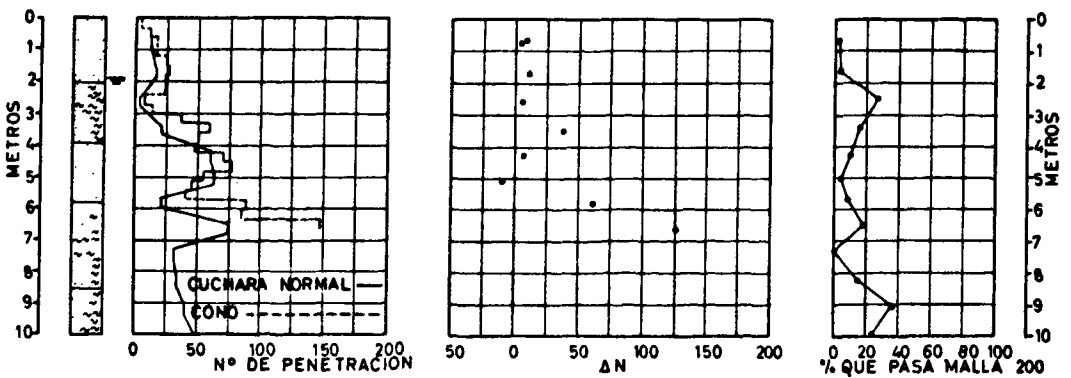
EMISARIO PERALES SONDAJE Nº 3



HOTEL PANAMERICANO SONDAJE Nº 2



INACAP SONDAJE Nº 2



Signos convencionales :



Fig. 3. Datos de sondajes.

POBLACION CARABINEROS SONDAJE N° 1

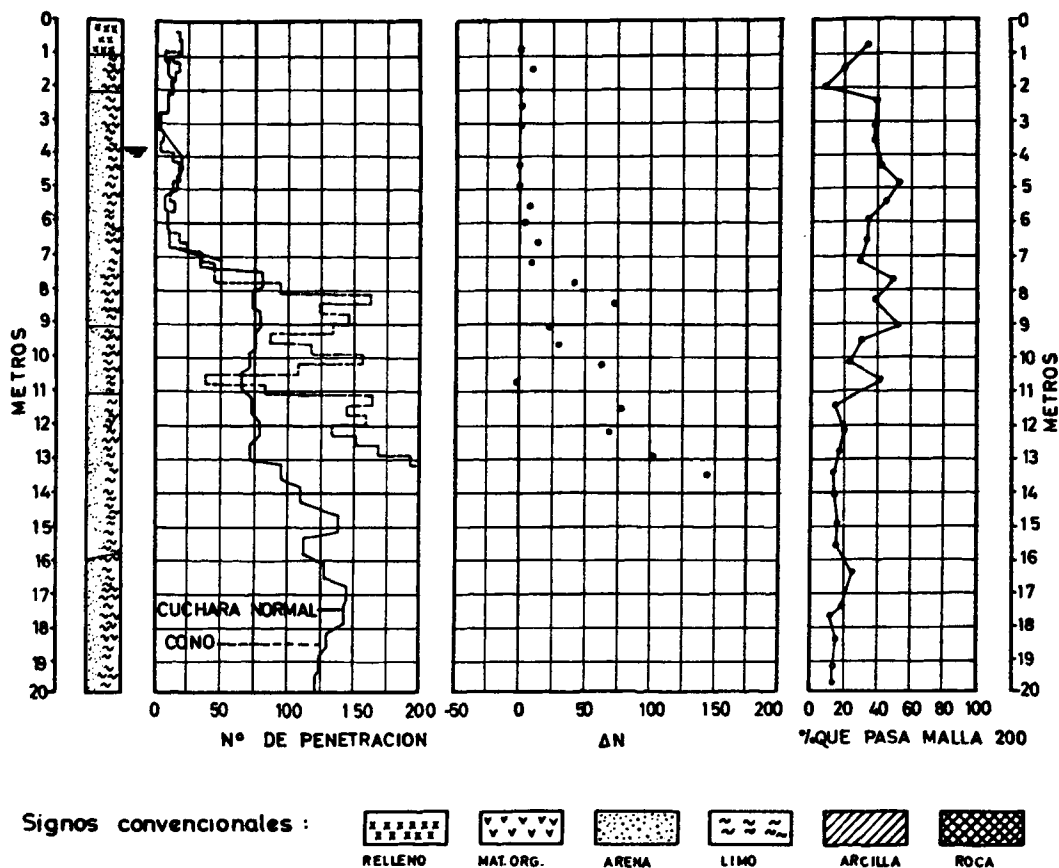


Fig. 4. Datos de sondajes.

En la Figura 6 se ha dibujado el histograma de frecuencias de  $\Delta N$  para  $h < h_0$ . El promedio de todos los valores es de 4,44 golpes, y la moda es algo mayor que cero. Considerando estos valores, y la elevada dispersión, se puede aceptar como razonable la hipótesis  $\Delta N = 0$  para  $h$  comprendido entre 0 y  $h_0$ .

Ello significa que, en ausencia de fricción lateral, los índices de penetración de cono y cuchara en las arenas limosas Bío Bío son iguales. La diferencia  $\Delta N$  para  $h > h_0$  es atribuible íntegramente al roce entre el suelo y la barra durante la penetra-

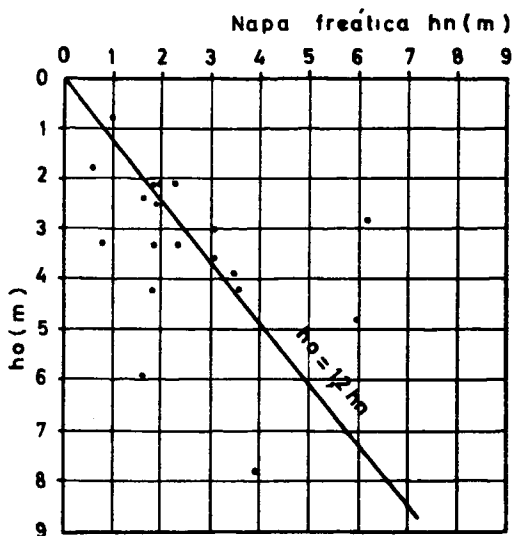


Fig. 5. Relación entre  $h_0$  y la napa freática.

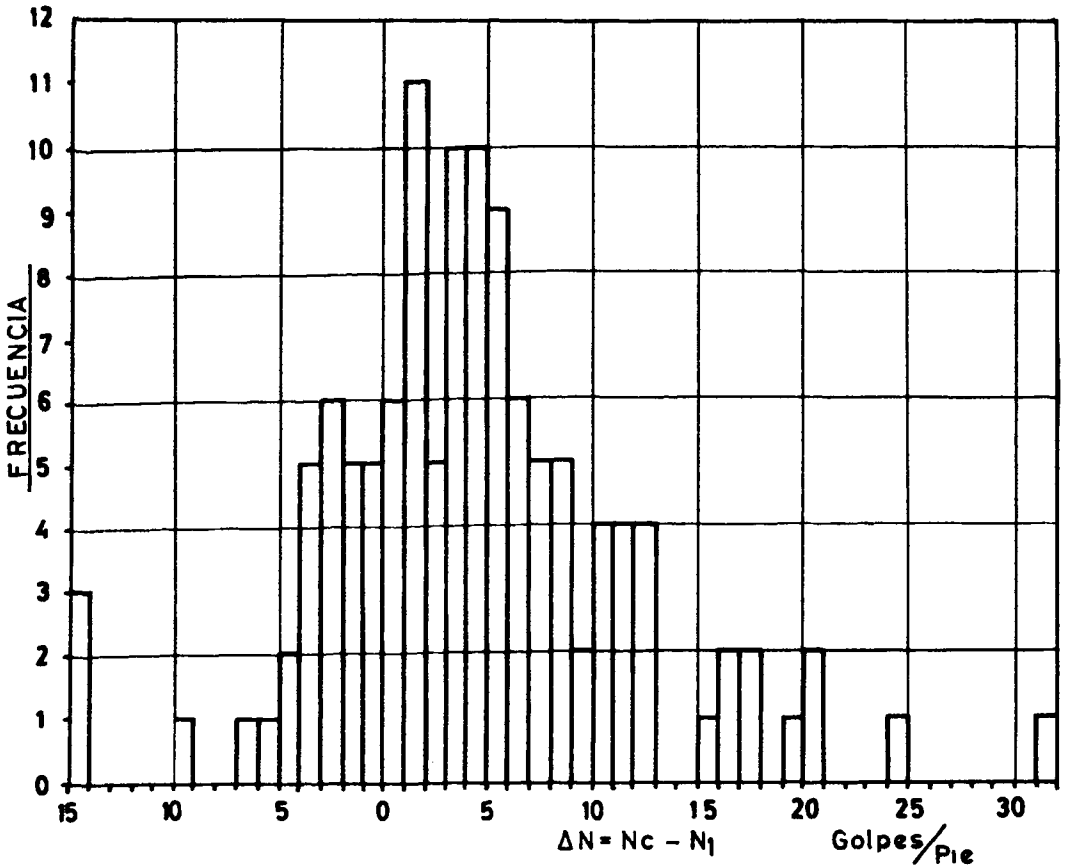


Fig. 6. Histograma de frecuencias de  $\Delta N$  para  $h < h_0$ . Total de valores 120. Media aritmética 4,44. Desviación típica 8,58.

ción con cono\*.

Correlacionar ambos índices para profundidades mayores que  $h_0$  significa evaluar la magnitud de esta fricción expresada en número de golpes; es lo que se hace a continuación.

En una penetración de cono, consideraremos el estado de tensiones de un prisma elemental de suelo adyacente a la barra de perforación, a la profundidad  $h > h_0$  (Fig. 7).

Usaremos la siguiente nomenclatura:

- $\gamma$  : peso unitario sumergido del suelo
- $\sigma_z$  : presión normal vertical efectiva
- $\sigma_x$  : presión normal horizontal efectiva
- $r_z$  : fatiga tangencial vertical entre barras y suelo
- $f$  : coeficiente de fricción entre barra y suelo

\*La igualdad de ambos índices en ausencia de fricción lateral cerca de la superficie, no implica necesariamente que esta igualdad se mantenga a profundidades mayores. Sin embargo, aunque se trate de una extrapolación, los gráficos N-h de las Figs. 3 y 4 tienden a confirmarla.



- $K$  : factor de empuje de tierras
- $D$  : diámetro de la barra
- $F$  : fuerza de fricción lateral
- $R$  : resistencia de punta
- $\Delta T$  : parte de la energía entregada en un golpe que se gasta en vencer la resistencia del suelo al avance.
- $S$  : avance de la herramienta en un golpe.

La presión vertical efectiva por efecto del peso de suelo derrumbado es:

$$\sigma_z = \gamma'(z - h_0) + \delta h_0$$

y la presión horizontal:

$$\sigma_x = K\sigma_z = K\gamma'(z - h_0)$$

La fatiga tangencial vertical que se opone al avance de la barra es:

$$\tau_z = f\sigma_x = fK\gamma'(z - h_0) \tag{3}$$

La fuerza de fricción que actúa sobre todo el perímetro de la barra y una altura  $dz$  es:

$$\begin{aligned} dF &= \pi D \tau_z dz \\ &= \pi D f K \gamma'(z - h_0) dz \\ &= 2A (z - h_0) dz \\ A &= \frac{1}{2} \pi D K f \gamma' \end{aligned}$$

La fricción lateral total será:

$$\begin{aligned} F &= 2A \int_{h_0}^h (z - h_0) dz \\ F &= A (h - h_0)^2 \end{aligned} \tag{4}$$

Por otra parte, la energía nominal entregada por el martinete en cada golpe es constante e igual a  $63,5 \times 0,75 = 47,63$  kgm. De esta energía, una parte se pierde y el resto se gasta en vencer la resistencia del suelo. En el Apéndice II se evalúan las pérdidas, y se demuestra que la energía  $\Delta T$  absorbida por el suelo en un golpe es también una constante (ec. II 3).

En una penetración de cono,  $\Delta T$  se reparte así:

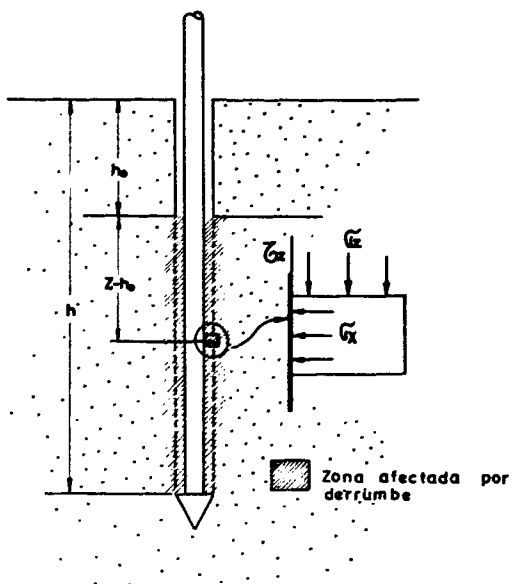


Fig. 7. Penetración de cono. Esquema de cálculo de la fricción lateral.

$$\begin{aligned}
 \Delta T &= (\Delta T)_{\text{punta}} + (\Delta T)_{\text{fricción}} \\
 &= (\Delta T)_p + F.S \\
 &= (\Delta T)_p + F \frac{0,30}{N_c}
 \end{aligned} \tag{5}$$

En  $N_c$  golpes, y si se supone que el tramo de 30 cm está incluido dentro de una capa homogénea:

$$\begin{aligned}
 N_c \Delta T &= N_c (\Delta T)_p + 0,30 F \\
 N_c &= \frac{(\Delta T)_p}{\Delta T} N_c + \frac{0,30}{\Delta T} F \\
 N_c &= (N_c)_p + \frac{0,30}{\Delta T} F
 \end{aligned}$$

Esta última ecuación descompone el número total de golpes  $N_c$  en una suma de dos términos: de punta y de fricción. Pero se había concluido anteriormente que, en ausencia de fricción,  $N_c = N_i$ . Por lo tanto:

$$\begin{aligned}
 N_i &= (N_c)_p, \text{ y} \\
 \Delta N &= \frac{0,30}{\Delta T} F
 \end{aligned} \tag{6}$$

Reemplazando  $F$  por su valor de (4)

$$\begin{aligned}
 \Delta N &= \frac{0,30}{\Delta T} A (h - h_0)^2 \\
 \Delta N &= B (h - h_0)^2
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$B = \frac{0,15}{\Delta T} \pi DKf \gamma' \tag{7'}$$

$$N_c = N_i + B (h - h_0)^2 \tag{8}$$

Las ecuaciones (7) y (8) son equivalentes y válidas para  $h > h_0$ .

(7) es la ecuación de una parábola. Esta forma parabólica de los gráficos  $\Delta N - h$  es especialmente nítida en la Fig. 2 (sondaje nº 7) y en la Fig. 3 (sondaje nº 3).

Según la ecuación (7),  $\Delta N = 0$  para  $h = h_0$ . Sin embargo, las tentativas hechas para ajustar esta ecuación a los datos experimentales demostraron la necesidad de agregar un término de fricción constante. Así, la ecuación queda:

$$\Delta N = B (h - h_0)^2 + C \tag{9}$$

para  $h > h_0$ .

C puede deberse a alguna de las siguientes causas:

- Como se vio al comienzo de este capítulo, no es seguro que

$$\Delta N = 0 \text{ para } h < h_0. \text{ En tal caso, } (N_c)_p > N_i \text{ y } C = (N_c)_p - N_i$$

- El derrumbe inicial que se produce cuando el cono llega a la profundidad  $h_0$ , puede alcanzar las capas superiores, creando una fricción constante.
- La posibilidad de cometer errores en la determinación de  $h_0$ .

En la Figura 2 (sondaje nº 7) se ha ajustado la ecuación (9) a los datos experimentales; se usó el método de los mínimos cuadrados y valores de  $h_0$  definidos arbitrariamente.

$h_0 = 1$	$B = 3,21$	$C = 5,00$	$r = 0,878^*$
$h_0 = 2$	$B = 4,73$	$C = 12,84$	$r = 0,885^*$

Como se puede apreciar en la figura, ambas curvas son prácticamente iguales dentro del rango considerado.

Lo anterior nos revela dos hechos:

- la calidad del ajuste es independiente del valor asignado a  $h_0$ , y
- los valores  $B$  y  $C$  dependen del  $h_0$  elegido.

De la información disponible no se desprende un método exacto para el cálculo del  $h_0$ . Se elige la ecuación (2), que tiene la ventaja de ser práctica\*\*.

En la Figura 3 (sondaje nº 3) se ha ajustado la ecuación (9) usando el valor de  $h_0$  dado por (2).

Resultado: 
$$\Delta N = 2,23 (h - 0,72)^2 + 1,89 \text{ con } r = 0,986$$

### AJUSTE DE LA ECUACION Y METODO PROPUESTO

Para cada uno de los 22 sondajes considerados se definió  $h_0 = 1,2 h_p$ . Para todo  $h > h_0$ , se formó el par de valores:

$$y = \Delta N$$

$$x = (h - h_0)^2$$

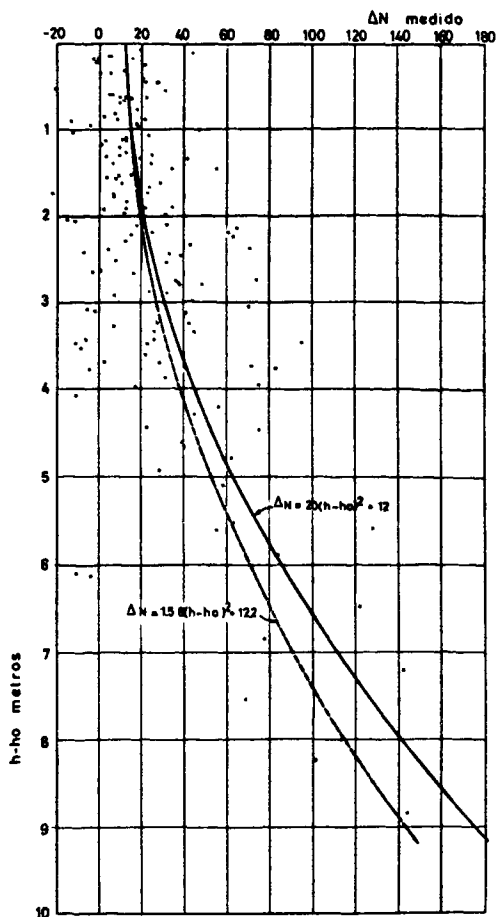
y se ajustó por el método de los mínimos cuadrados la ecuación  $y = Bx + C$ . El resultado, que aparece en la Figura 8, es la parábola de ecuación:

$$\Delta N = 1,58 (h - h_0)^2 + 12,24 \quad (10)$$

El coeficiente de correlación  $r = 0,575$ , con 157 grados de libertad, es

\*r: coeficiente de correlación

\*\*En estas condiciones, no se puede tampoco aclarar si el valor de C que se determina tiene realidad física o es sólo una constante de ajuste.



significativo con una probabilidad mayor que 99,9%\*.

Para trabajar por el lado de la seguridad, se aumentó el coeficiente B y se dejó así la ecuación final:

$$\Delta N = 2(h - h_0)^2 + 12 \quad (11)$$

La curva correspondiente aparece en la Fig. 8 dibujada con línea llena.

Como resultado de todo lo anterior, se propone para las arenas limosas Bío Bío el siguiente método de cálculo del índice de penetración de cuchara:

$$N_2 = N_c - \Delta N$$

$$\Delta N = 0 \quad \text{para} \quad h < 1,2 h_n$$

$$\Delta N = 2(h - 1,2 h_n)^2 + 12, \text{ para } h > 1,2 h_n$$

DISCUSION

Fig. 8. Curvas de correlación entre diferencias de golpe (ΔN) y profundidad (h-h₀).

El método propuesto se aplicó a 282 valores de N<sub>c</sub> correspondientes a 22 son-

dajes\*\*. La comparación entre el número de golpes de cuchara así calculados (N<sub>2</sub>) y los medidos en terreno (N<sub>1</sub>), se indica en la Figura 9. Los N<sub>2</sub> negativos se han igualado a cero.

El rango limitado por las rectas N<sub>2</sub> = 1,3 N<sub>1</sub> y N<sub>2</sub> = 0,7 N<sub>1</sub> corresponde a los puntos calculados que resultaron con menos del 30% de error, rango que se ha considerado aceptable si se usan estos valores con fines de diseño.

La distribución porcentual de los puntos es:

- error menor que 30% (0,7N<sub>1</sub> < N<sub>2</sub> < 1,3N<sub>1</sub>) 52,1% de los casos
  - error mayor que 30% por el lado de la seguridad (N<sub>2</sub> < 0,7N<sub>1</sub>): 22,7%
- Total : 74,8%

\*Para determinar qué parte de la dispersión se debe al error propio del ensayo, se hicieron varios pares de penetraciones de cono en diferentes puntos. El resultado indicó que sólo una pequeña parte del error se debe a la falta de repetitividad del cono. Los autores piensan que el resto puede atribuirse a fluctuaciones en la fuerza de fricción lateral producidas por diferentes configuraciones estratigráficas.

\*\*No se consideraron los dos de San Vicente.

o sea que el método propuesto comete errores grandes por el lado de la inseguridad en sólo el 25% de los valores.

Una práctica usual es la de suponer  $N_c = N_1$  para todo  $h$ . En los puntos de la Figura 9, la explicación de este criterio habría producido un error medio de:

$$\frac{100}{282} \sum_1^{282} \frac{N}{N} = 102,4\%$$

En cambio, con el método propuesto, el error medio resultó ser de:

$$\frac{100}{282} \sum_1^{282} \sqrt{\frac{N_2 - N_1}{N_1}} = 59,3\%$$

Finalmente, en las Figuras 10 a 12 se comparan los valores de  $N_2$  y  $N_1$ , en cada sondaje: el resultado es bueno, y demuestra que el método propuesto puede usarse en la práctica.

El cálculo resulta ser especialmente útil y seguro en la detección de las capas blandas, cuya determinación es normalmente el objetivo principal de la penetración de cono.

Para usar el método propuesto es necesario conocer  $h_n$ . Si se hacen sondajes o pozos en las cercanías, ello no ofrecerá inconvenientes; si no, habrá que determinarla especialmente. No se recomienda suponer  $h_n$ ; ya que un error de un metro puede inducir variaciones hasta del 40% en los  $N$  calculados.

De acuerdo a la ecuación (7'),  $B$  se puede calcular si se conoce la energía entregada por golpe, las constantes del suelo y el coeficiente de fricción suelo-barra. En el Apéndice II se ha calculado este  $B$  teórico, aprovechando la fórmula de hincado de pilotes "Engineering News Modificada". De acuerdo al  $K$  elegido, el valor de  $B$  quedaría comprendido entre estos dos límites:

$$B \text{ mínimo} = 0,11 \quad (K \text{ activo})$$

$$B \text{ máximo} = 1,91 \quad (K \text{ pasivo})$$

El  $B = 2$  propuesto es casi idéntico al  $B$  máximo. Ello sugiere la posibilidad de calcular teóricamente el  $B$  para otras arenas; se usaría el método del Apéndice II con el  $K$  pasivo.

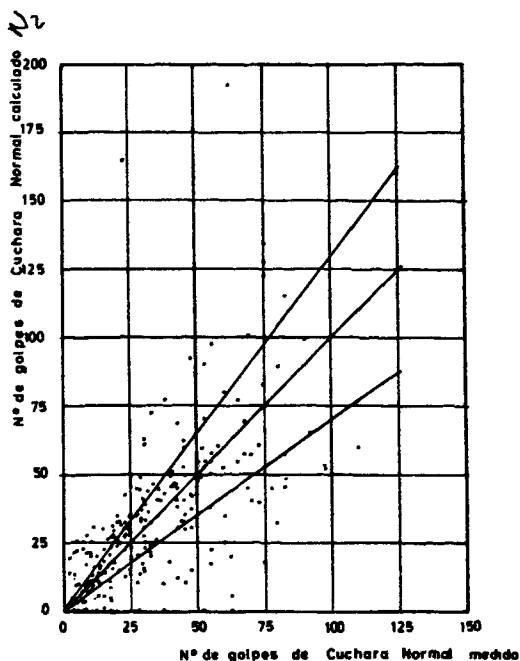
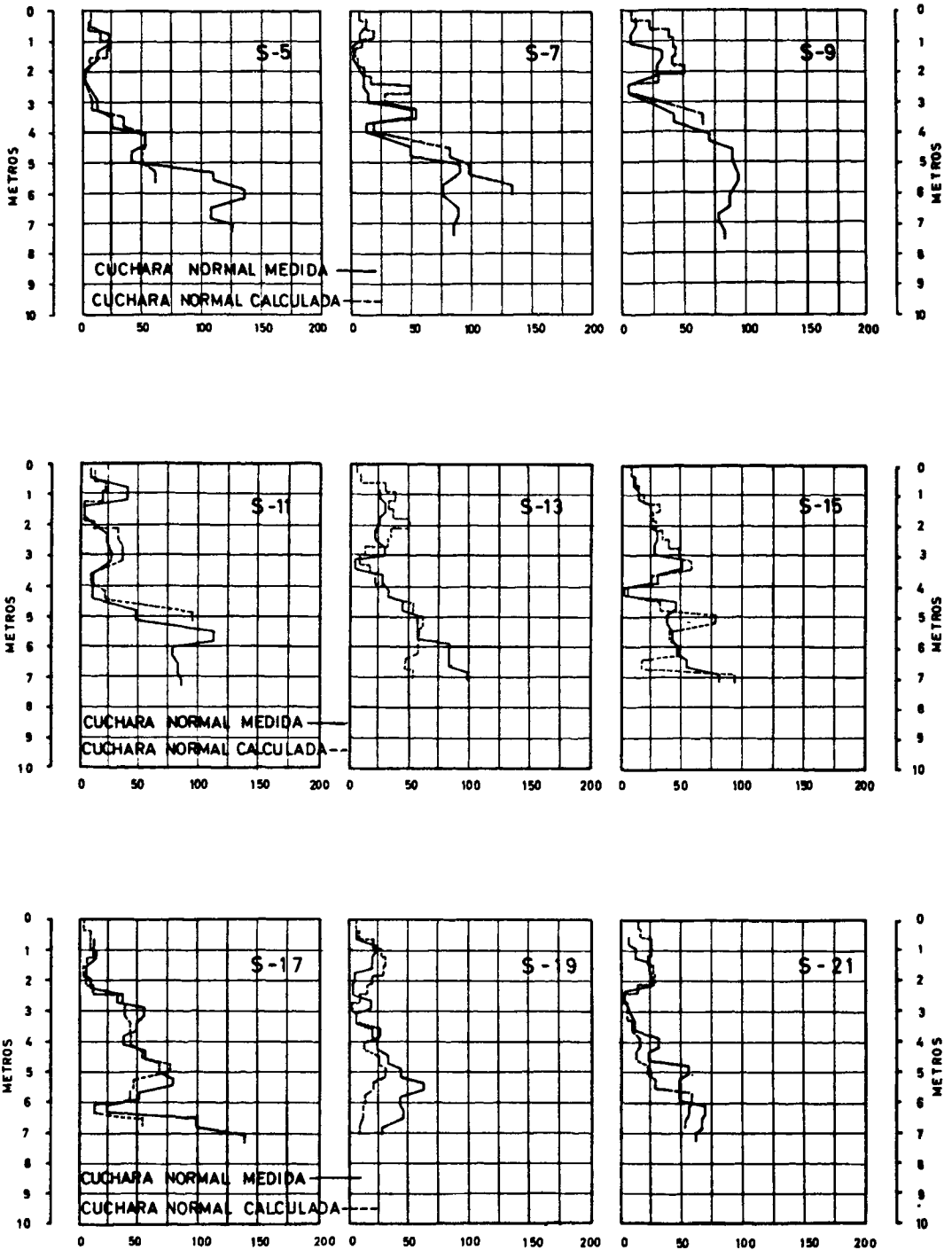


Fig. 9. Comparación entre el número de golpes medido y el calculado, para todos los sondajes.

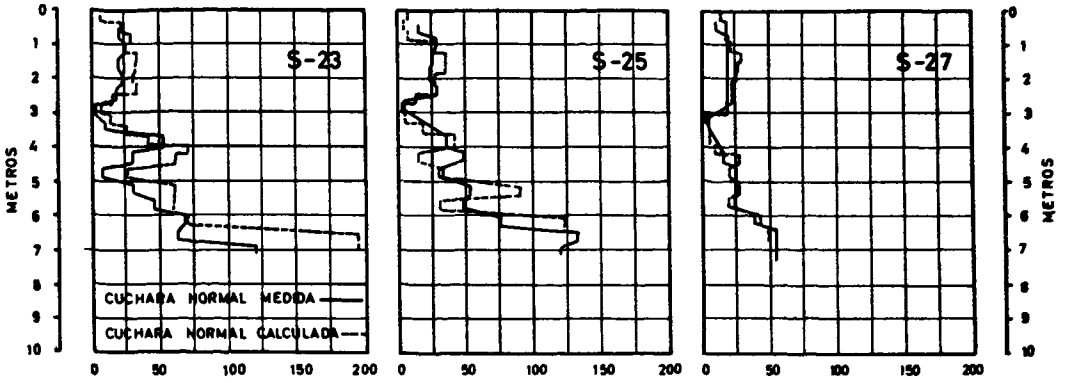
SECTOR H-7



Valores Calculados Según :  $N_2 = N_c - 2,0(h-h_0)^2 - 12$

Fig. 10. Comparación entre el número de golpes de cuchara calculado y el medido en terreno.

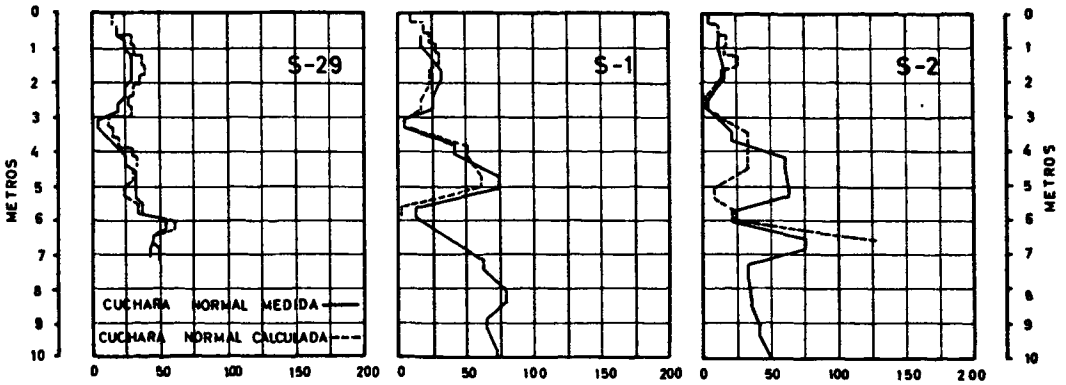
SECTOR H-7



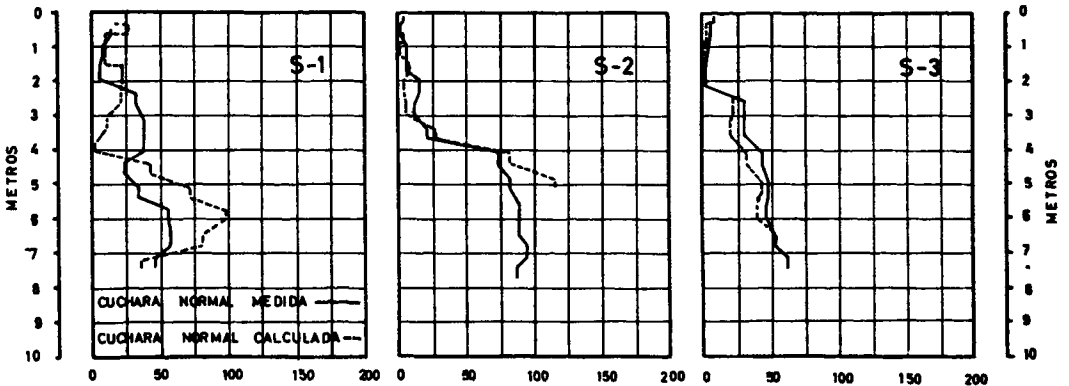
SECTOR H-7.

INACAP.

INACAP.



EMISARIO PERALES.

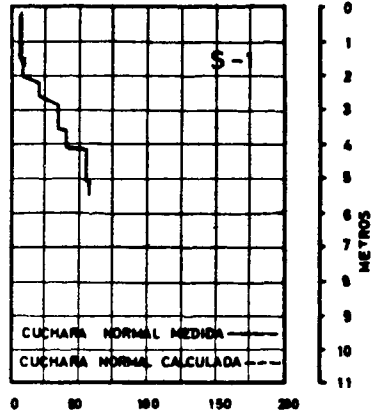
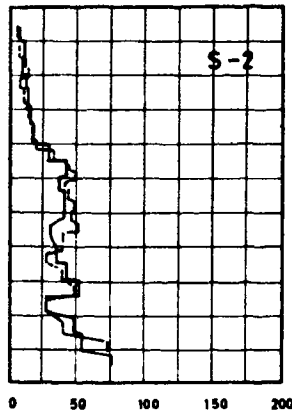
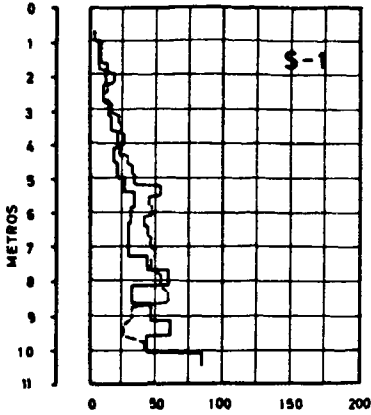


Valores Calculados Segun  $N_2 = N_c - 20(h - h_0)^2 - 12$

Fig. 11. Comparación entre el número de golpes de cuchara calculado y el medido en terreno.

HOTEL PANAMERICANO

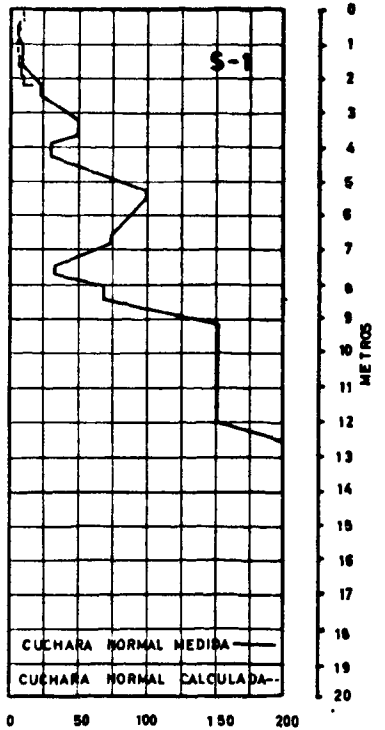
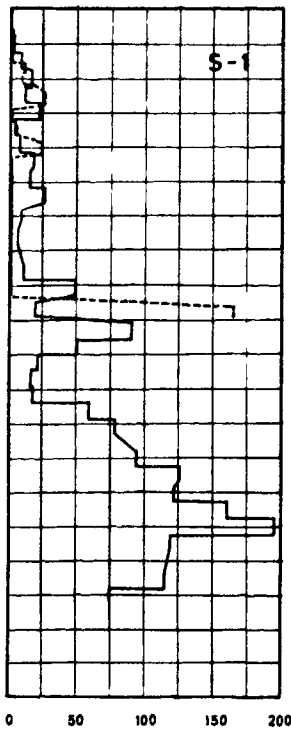
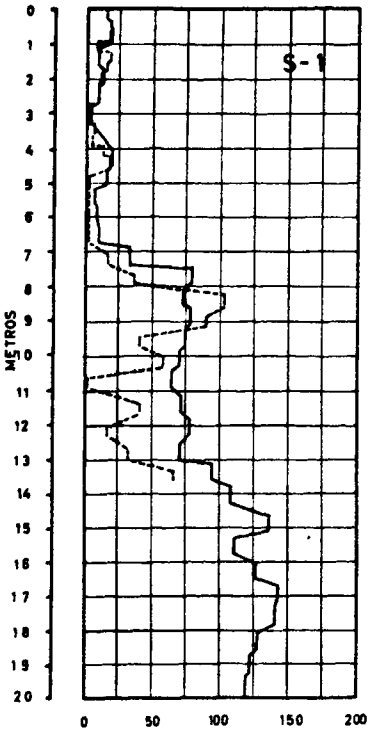
ESSO SAN VICENTE



POB. CARABINEROS

EDIFICIO NIELOL

ESTANQUES M.O.P.



Valores Calculados Según :  $N_2 = N_c - 2,0(h - h_0)^2 - 12$

Fig. 12. Comparación entre el número de golpes de cuchara calculado y el medio en terreno.



## CONCLUSIONES

Se ha hecho un estudio de las penetraciones de cuchara y cono en las arenas limosas Bío Bío, que demuestra que los índices de penetración son estadísticamente iguales cerca de la superficie y sobre la napa de agua. Bajo la napa, el número de golpes de cono es mayor que el de cuchara, y crece en forma cuadrática con la profundidad.

Se ha concluido que el número de golpes necesario para vencer la resistencia de punta del suelo es igual en ambos casos. La diferencia bajo la napa debe atribuirse a la aparición de fricción lateral en la penetración de cono, producida por el derrumbe de las paredes del orificio.

Se propone para estos suelos el método de cálculo siguiente:

$$N_1 = N_c - \Delta N$$

en que:

$$\begin{aligned} \Delta N &= 0 && \text{para } h < 1,2 h_n \\ \Delta N &= 2(h - 1,2 h_n)^2 + 12 && \text{para } h > 1,2 h_n \end{aligned}$$

$h_n$  = profundidad de la napa freática.

Estas ecuaciones son válidas para arenas limosas Bío Bío, con napa de agua a no más de 7 metros de profundidad.

El método propuesto estima el índice de cuchara con un error menor que 30% en la mitad de los casos, y con un error grande por el lado de la inseguridad en solo una cuarta parte de los casos. El error medio del método es del orden de la mitad del que se obtiene por la simple igualación de ambos índices; esto último además produce errores por el lado de la inseguridad.

El método propuesto se muestra especialmente útil para detectar las capas blandas y estimar su índice de penetración.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen particularmente al personal de IDIEM que colaboró en diversas formas en este trabajo, y al Centro de Cómputos de la Universidad de Concepción por su eficiente colaboración.

## REFERENCIAS

1. MARTINEZ, F. "Informe sobre el subsuelo de la ciudad de Concepción" para la I. Municipalidad de Concepción, Santiago, 1961. (no publicado)

2. FLETCHER, GORDON F.A. "Standard penetration Test its uses and abuses", Proceedings of the A.S.C.E., vol. 91 nº S.M. 4 (julio 1965).
3. DAVIES, O. "Métodos estadísticos aplicados a la investigación y a la producción", Madrid, 1960.
4. CHEW, V. "Experimental design in industry" (a Symposium). John Wiley and Sons, 1958.
5. TENG, W.C. "Foundation design", Prentice-Hall, New Jersey, 1962.
6. CHELLIS, R.D. "Pile foundations", Mc Graw-Hill, New York, 1961.
7. HOUSEL, W.S. "Pile load capacity: estimates and test results", Proceedings of the A.S.C.E., vol. 92, nº SM 4, (julio, 1966).
8. DOBRY, E. y POBLETE, M. "Densidades máximas y mínimas de las arenas Bío Bío". Revista del IDIEM, vol 5, nº 3 (diciembre 1966).
9. HOUGH, B. K. "Basic soils engineering", The Ronald Press Company, New York, 1957.

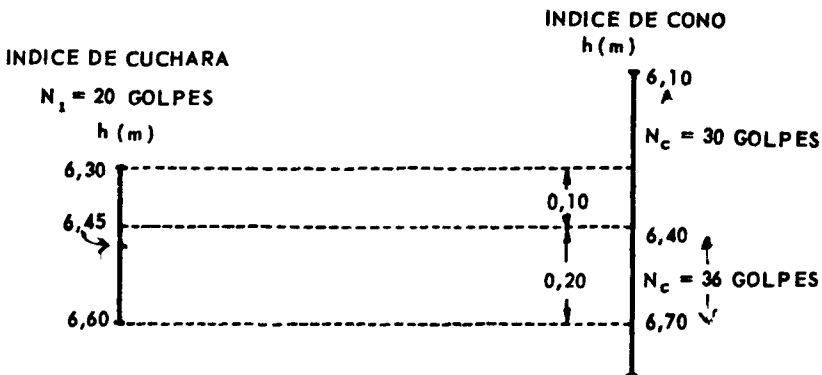
## APENDICE I

### METODO DE CALCULO DE $N_c$

Para lograr, en cada sondaje, pares de valores  $N_c, N_1$  correspondientes a un mismo  $h$ , se procedió en la forma siguiente:

- a) Se tomaron todos los valores de  $N_1$  y se definió para cada uno de ellos el valor de  $h$  correspondiente al centro del tramo de 30 cm.
- b) Se tomaron los valores de penetración de cono cuyos tramos de 30 cm traslapaban con el tramo respectivo de  $N_1$ , y se promediaron en forma ponderada, de acuerdo a las longitudes interceptadas. El valor así calculado es  $N_c$ .

El ejemplo de la Fig. I.1 ilustra el método.



$$N_1 = 20 \text{ golpes}$$

$$h = 6,45 \text{ m}$$

$$N_c = \frac{0,10 \times 30 + 0,20 \times 36}{0,30} = 34 \text{ golpes}$$

$$\Delta N = 34 - 20 = 14 \text{ golpes}$$

Fig. I.1. Ejemplo de cálculo de  $\Delta N$

## APENDICE II

### CALCULO DEL B TEORICO

Housel<sup>7</sup> indica que ha empleado con éxito la siguiente fórmula del Engineering News modificada, para predecir la resistencia última total de pilotes de varios materiales, incluso acero liso:

$$R_u = \frac{e_f E}{S + S_e} \cdot \frac{W_r + e^2 W_p}{W_r + W_p} \quad (\text{II. 1})$$

$R_u$  = resistencia última, en libras

$E$  = energía nominal, en libras x pulgadas

$e_f$  = coeficiente de aprovechamiento de la energía nominal

$S$  = avance en pulgadas por golpe

$S_e$  = deformación elástica del pilote en pulgadas por golpe

$W_r$  = peso del martinete

$W_p$  = peso del pilote

$e$  = coeficiente de restitución elástica del sistema martinete-pilote.

Para el caso de una penetración de cuchara en arenas Bío Bío,  $S_e$  es mucho menor que  $S$  y por lo tanto se puede despreciar. En ese caso, la ecuación (II.1) puede colocarse en la forma:

$$R = \frac{\Delta T}{S} \quad (\text{II. 2})$$

en que los términos tienen el significado usado en el texto, y la energía  $\Delta T$  absorbida en un golpe vale

$$\Delta T = e_f W_r \frac{H(W_r + e^2 W_p)}{W_r + W_p} \quad (\text{II. 3})$$

$e_f = 0,75$  (cable manila con huinche de fricción<sup>8</sup>)

$W_r = 63,5$  kg.

$H = 75$  cm (altura de caída del martinete)

$e = 0,55$  (coeficiente de restitución elástica acero-acero<sup>8</sup>)

$W_p =$  peso del conjunto cuchara-barras-barra guía = 35 kg para 5 metros de profundidad.

Resulta:

$$\Delta T = 2686 \text{ kg} \times \text{cm}$$

$$R = \frac{2686}{S} = \frac{2686}{30} N_1 = 89,44 N_1 \text{ kg}$$

Similarmente, para el caso de la penetración de cono



$$R + F = 89,44 N_c \text{ kg}$$

$$F = 89,44 \Delta N \text{ kg} \quad (\text{II. 4})$$

Por otra parte,  $F$  se puede estimar de la ecuación (4) del texto:

$$F = \frac{1}{2} \pi DKf \gamma' (h - h_0)^2$$

$$\gamma' = 800 \text{ kg/m}^3$$

$$D = 1\frac{5}{8}'' = 0,0413 \text{ m}$$

$$N_s = 40 \text{ golpes (Ref. 5)}$$

$$\phi = .38^\circ \text{ (Ref. 7)}$$

$$f = \text{tg } \phi = 0,78$$

$$K_a < K < K_p$$

$$K_a = \text{tg}^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) = 0,239$$

$$K_p = \text{tg}^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) = 4,2$$

De reemplazar en la ecuación (4) estos valores, resulta:

$$F = 40,48 K (h - h_0)^2 \text{ kg}$$

Igualando con (II. 4),

$$89,44 \Delta N = 40,48 K (h - h_0)^2$$

$$\Delta N = 0,452 K (h - h_0)^2$$

Se pueden calcular los valores máximo y mínimo de  $\Delta N$ , según se use el  $K$  pasivo y el  $K$  activo

$$\text{Caso activo } \Delta N = 0,11 (h - h_0)^2$$

$$\text{Caso pasivo } \Delta N = 1,91 (h - h_0)^2$$

( $h$ ,  $h_0$  en metros).

#### STANDARD PENETRATION AND CONICAL DYNAMICAL PENETRATION INDEX FOR BÍO BÍO SILTY SANDS.

##### SUMMARY:

*The study of the correlation between the number of blows obtained from standard penetration tests and from a dynamical conical penetrometer for the Bío Bío silty sands are presented. A theoretical formula is derived representing the correlation, and its numerical coefficients are adjusted to the penetration data of 22 borings located between Concepción and Talcahuano. A practical method is proposed for computing the standard penetration index when the number of blows from a dynamic conical penetrometer and the water table level are known. The results obtained are discussed.*