



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

**DETERMINACION IN SITU DE PROPIEDADES
INGENIERILES DE LOS SUELOS Y SU RELACION CON
EL ENSAYO NORMAL DE PENETRACION**

**R. E. López Menardi, Ingeniero Civil
(UBA)**

**Convenio entre las cátedra de Geotecnia de la Universidad Tecnológica
Nacional, Unidad Académica Concordia y Facultad Regional Buenos Aires.**

SEPTIEMBRE 2003

Agradecimiento:

Esta publicación ha sido posible en el marco de un convenio entre las cátedras de Geotecnia de la Universidad Tecnológica Nacional, Unidad Académica Concordia y la Facultad Regional Buenos Aires.

A los integrantes de las cátedras:

Profesor titular: Ing. C. A. Micucci

Jefe de Trabajos Prácticos U.A.C.: Ing. O. Rico.

Jefe de Laboratorio F.R.B.A. : Ing J. Converti

Jefe de Trabajos Prácticos F.R.B.A.: Ing. A. Sabelli.

Ayudantes Diplomados F.R.B.A.: Ing. E. Rodríguez.

Ing. W. Rago.

el autor les agradece cordialmente su intervención.

Se extiende el agradecimiento a la Ing. V. Sevilla Bär (Universidad Tecnológica Nacional).

Buenos Aires, Septiembre de 2003

R. E. López Menardi

INDICE

Introducción:.....	página 4
Evaluación histórica:.....	página 6
Normalización del método – Según Norma ASTM 1856:.....	página 10
Normalización del método – Según Norma IRAM 10517:.....	página 12
Influencia del método de ensayo en los resultados de N:.....	página 13
Aplicación de los resultados del SPT:.....	página 24
Relación entre el SPT y el ensayo de penetración con sacamuestras de zapatos intercambiables:.....	página 27
Sobre las fundaciones en arena:.....	página 28
Comentarios finales:.....	página 32
Sugerencias para la ejecución del SPT en Argentina:.....	página 33
Referencias:.....	página 35

DETERMINACION IN SITU DE LAS PROPIEDADES INGENIERILES DE LOS SUELOS REFERIDAS AL ENSAYO NORMAL DE PENETRACIÓN

R. E. López Menardi, Ingeniero Civil (UBA)

SUMARIO:

Este trabajo comprende un análisis actualizado de los puntos más importantes que se asocian con el Ensayo Normal de Penetración.(SPT).

La metodología por la cual se hinca un sacamuestras en el subsuelo ,entregándole una cierta energía es sin duda la más extendida en la disciplina geotécnica, para la determinación” in situ” de algunas propiedades ingenieriles de los suelos de fundación ó de construcción.

Se examinan en detalle las técnicas de ejecución del ensayo y del sacamuestras correspondiente, como también los apartamientos del método original.

Se evalúan los factores de corrección para comparar los resultados de la resistencia a penetración (N) con los valores supuestamente normalizados (N60) .

Al final del informe se hace referencia a un procedimiento de cálculo basado en N60 para estimar la capacidad de carga admisible y los asentos de cimentaciones en arenas.

Se ha consultado y evaluado, un número importante de referencias bibliográficas internacionales ,las que han sido utilizadas para la preparación de este artículo.

INTRODUCCIÓN:

Este trabajo examina la evolución del ensayo de penetración para la determinación de las propiedades ingenieriles de los suelos y su aplicación a los problemas geotécnicos.

En especial de las técnicas conocidas internacionalmente, se estudia en este trabajo la metodología que incluye la penetración dinámica de un elemento captor (cuchara partida), el cual normalizado y debidamente calibrado permite cuantificar algunas propiedades mecánicas de los suelos.

La aplicabilidad de los distintos métodos de ensayos in situ es relativa según los parámetros mecánicos que se pretendan obtener. Indudablemente las propiedades más apreciadas por los ingenieros son las que se exhiben en la tabla siguiente:

Tabla I
Propiedades ingenieriles de uso frecuente

Angulo de fricción interna	Φ
Resistencia al corte no drenada	S_u
Módulo de deformabilidad	E
Coefficiente de consolidación	c_v
Relación de preconsolidación	OCR
Relaciones tensión- deformación	σ - ϵ

Se estudia en detalle la metodología conocida internacionalmente como Ensayo Normal de Penetración o SPT que ciertamente no cubre en forma efectiva todos los parámetros del listado propuesto.

Este trabajo concluye con recomendaciones en base a la interpretación de los resultados del SPT para su empleo normalizado en la República Argentina.

SOBRE LAS TÉCNICAS DE ENSAYOS IN SITU.

Dentro de la numerosas técnicas existentes a la fecha se mencionan a continuación las de mayor difusión internacional.

- 1) Ensayo Normal de Penetración (SPT).
- 2) Ensayos dinámicos de conos.
- 3) Ensayos estáticos de cono (CPT, CPTU)
- 4) Presiómetros.
- 5) Dilatómetros.

ENSAYO NORMAL DE PENETRACION:

Evolución histórica:

En el año 1902 Charles R. Gow desarrolló la práctica de hincar en el suelo un tubo de 1 pulgada de diámetro exterior, para obtener muestras, marcando el inicio del muestreo dinámico de los suelos.

En 1922, su empresa se transformó en una subsidiaria de Raymond Concrete Pile, la que difundió esa nueva metodología de estimar la resistencia del material en base al trabajo de hincado del tubo.

La cuchara partida de 2 pulgadas de diámetro exterior según se muestra en la figura 1 fue diseñada en el año 1927, basándose en el trabajo de campo realizado en Philadelphia por G. A. Fletcher y el desarrollo de investigaciones realizadas por H. A. Mohr (gerente regional de Gow Company en Nueva Inglaterra, U.S.A.). En 1930 comenzó a reglamentarse el método de ensayo con la realización de mediciones de la resistencia a la penetración de una cuchara partida (de 2 pulgadas) bajo una carrera de 12 pulgadas, empleando una maza de 63,5 kg. que caía desde 76,2 cm. de altura.

En su trabajo titulado “Exploration of soil conditions and sampling operations” publicado por la Universidad de Harvard en el año 1937, H. A. Mohr (ref. 22) reporta que el método de exploración del suelo y su muestreo se estableció en febrero de 1929, fecha del primer informe del ensayo de penetración, realizado por la Gow, División de Raymond Concrete Pile.

Según Fletcher, en aquel momento la técnica de la perforación, era el principal obstáculo para la normalización del método. Ni Fletcher ni Mohr dieron muchos detalles del diseño de la cuchara partida de 2” de diámetro externo, pero si lo hizo Hvorslev en 1949 en su reporte clásico sobre exploración y muestreo del subsuelo (ref. 16)

En la 7ma. Conferencia de Texas sobre Mecánica de Suelos e ingeniería de las fundaciones, en el cual fue presentado el trabajo titulado “Nuevas tendencias en la exploración del Subsuelo” se citan las primeras referencias concretas sobre el método al que le dieron el nombre de Standard Penetration Test, (“Ensayo Normal de Penetración”). (ref. 5,6)

En el primer libro de texto donde se hace referencia al ensayo descrito es la edición de “Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica” de Terzaghi y Peck en 1948.

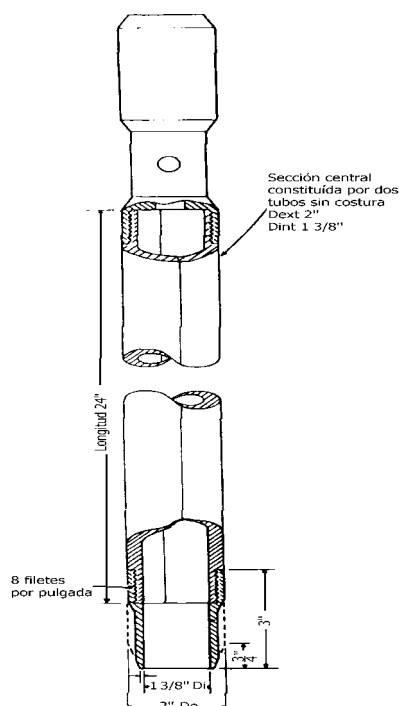


Figura 1: Cuchara partida (ref. 11)

METODOLOGÍA ORIGINAL DEL ENSAYO.

La metodología propuesta por Flechter exhibía las siguientes tareas:

Ejecutar una perforación en la zona donde se analizaba el subsuelo, la cual se limpiaba por medio de inyección de agua hasta la profundidad a la que se deseaba extraer la muestra, luego se bajaba la cuchara partida enroscada al extremo de las barras de sondeo. Una vez que la cuchara llegaba al fondo de la perforación, comenzaba el ensayo de penetración propiamente dicho, materializado por medio de un dispositivo que dejaba caer libremente una maza de 140 libras (63,5 kg), figura 2, desde una altura de 30" (762 mm) sobre la cabeza de golpeo de las barras de sondeo para que el sacamuestras penetrara primero 6" (15 cm). A continuación se lo hincaba 12" (30 cm) más. Se anotaba entonces el N° de golpes necesarios para cada 6" (15 cm) de carrera. Las primeras 6" de penetración, se denominaban "hinca de asiento", (ref 3, 15). El N° de golpes necesarios para la hinca de las restantes 12", se llamó **resistencia normal a penetración (N)**.

Una vez finalizada la hinca, se extraía la muestra, abriendo longitudinalmente la cuchara, se la colocaba en un recipiente hermético y se la etiquetaba indicando: Obra,

Nº de sondeo, Nº de muestra, profundidad y el valor (N). En todo momento las muestras debían estar al resguardo de heladas o el sol hasta su llegada al laboratorio para la determinación de los parámetros correspondientes.

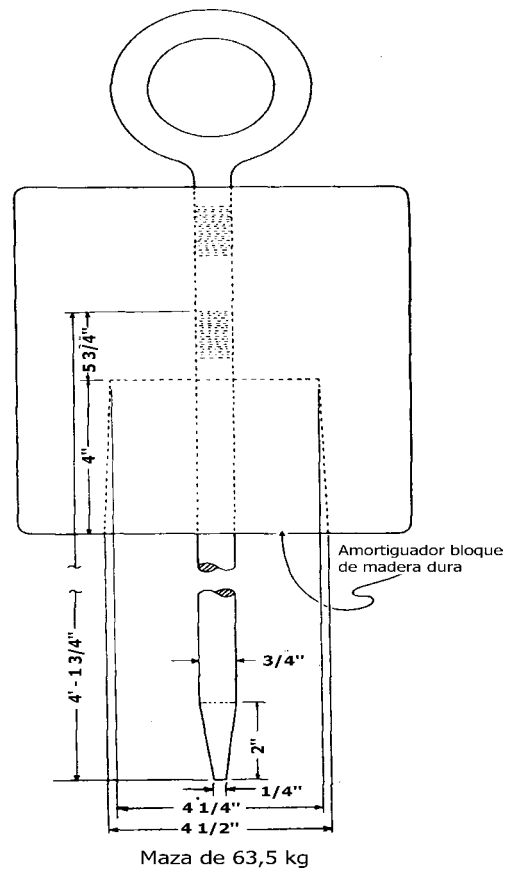
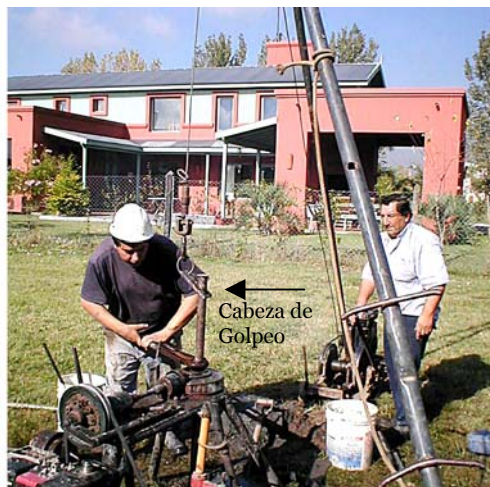


Figura 2: Maza (ref. 11)

La documentación fotográfica que se incorpora , ilustra sobre el método del ensayo.



Dispositivo de perforación



Cabeza de golpeo



Dispositivo para
ejecutar el SPT

SOBRE LA ALTERACIÓN DE LA MUESTRAS:

El sacamuestras tiene una estrecha relación con la alteración de la muestra durante su extracción. El SPT es un método dinámico de exploración del subsuelo, se hince un sacamuestras por golpes sucesivos de un martinete, que provocan una gran alteración del subsuelo. Es muy pertinente la expresión de Terzaghi **“Sería muy extraño que este brutal tratamiento del subsuelo, no tuviera influencia en la estructura del mismo”** (ref. 30)

La relación geométrica que mide la alteración de las muestras extraídas es el Índice de Areas (A_r) del sacamuestras que puede definirse como:

$$A_r (\%) = \frac{D_e^2 - D_i^2}{D_i^2}$$

D_e : Diámetro externo del sacamuestras.

D_i : Diámetro interno del sacamuestras.

La relación de área de la cuchara partida usada comúnmente en el Ensayo Normal de Penetración es de aproximadamente 112%. Para que una muestra se considere inalterada la relación de áreas descrita debe ser aproximadamente 10% a 15%; para lograrlo, las regulaciones internacionales indican el uso de un sacamuestras de pared delgada, hincado estáticamente. Los tubos tienen una longitud que varía entre 75 y 90

cm. y se bisela el extremo inferior de los mismos. Sin embargo este análisis escapa a los alcances del método SPT y por consiguiente al presente trabajo.

NORMALIZACIÓN DEL MÉTODO SEGÚN NORMA ASTM 1856 (ref. 2, 3)

La primera descripción de la ASTM sobre el SPT fue publicada en abril de 1958 y se denominó “Método tentativo de ensayo de penetración y toma de muestras del suelo con tubo testigo hendido longitudinalmente”. En 1967 la ASTM lo transformó en método normalizado. La normalización actual D 1586 – 84 (reaprobada 1992) no contiene grandes cambios desde sus ediciones originales.

Los elementos y las características relevantes del método propuesto por la ASTM son las siguientes:

1. Maza de 63,5 kg.
2. Altura de caída: 76 cm
3. Sacamuestras: de diámetro externo = (50 mm ó 2 pulgadas). Figura 3
4. Sacamuestras: de diámetro interno = (35 mm ó 1 3/8 pulgadas).
5. Variante con diámetro interno 38mm y tubo portamuestras (diámetro interno final 35mm)
6. Mecanismo de liberación del martinete mediante soga y malacate
7. Barras de sondeo.
8. Cabeza de golpeo.

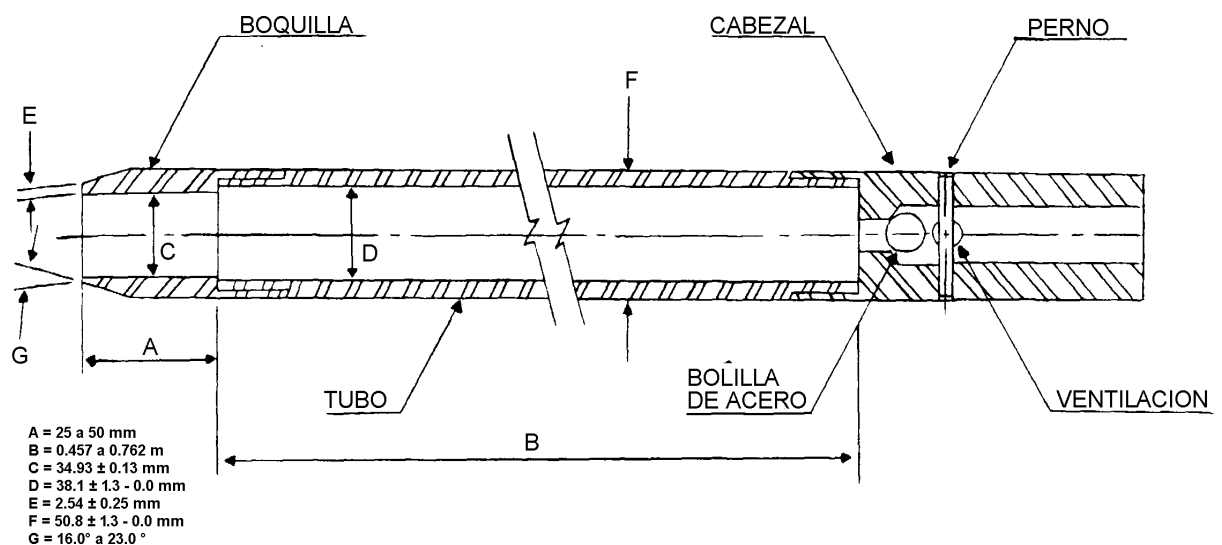


Figura 3, Sacamuestra partido ASTM D1586-84 (Ref. 2)

El rechazo se define de acuerdo a las siguientes alternativas: 1) total de 50 golpes aplicados en cualquiera de las tres carreras de 6" ; 2) cuando se han acumulado un total de 100 golpes ; 3) cuando no se observa ningún avance del sacamuestras durante la aplicación de 10 golpes sucesivos del martinete .

Aplicabilidad del método SPT:

De acuerdo a lo informado en (ref. 5, 13) sobre trabajos realizados in situ y las investigaciones llevadas a cabo en laboratorio, la aplicabilidad del método SPT en relación con los parámetros del subsuelo se describen en la tabla II:

Tabla II: Aplicabilidad del SPT (ref. 5)

Parámetros del subsuelo	Aplicabilidad del SPT
Tipo de suelo	B
Perfil estratigráfico	B
Densidad relativa (D_r)	B
Angulo de fricción (ϕ)	C
Resistencia al corte. UU	C
Presión neutra (U)	N
Relación de preconsolidación	N
Módulos E y G)	N
Compresibilidad (m_v & c_c)	C
Consolidación c_v)	N
Permeabilidad (k)	N
Curva-(σ - ϵ)	N
Resistencia a la liquefacción	A

Las referencias sobre la aplicabilidad son las siguientes:

A: Aplicabilidad alta.

B: Aplicabilidad moderada.

C: Aplicabilidad limitada.

N: Aplicabilidad nula.

Regulaciones en distintos países:

Con el objeto de ilustrar como fue adoptado el método SPT alrededor del mundo, se observa la Tabla A del Anexo I, la cual fue compilada con información de distintas fuentes y presentada en el Simposio Europeo del ensayo de penetración (ESOPT) 1988. (ref. 16)

En 1988 existían 11 países (integrantes del comité del Simposio Europeo del Ensayo de Penetración) que siguieron los principios establecidos como normas nacionales, que contienen la esencia de las regulaciones del método, tal como ejecutar una perforación limpia, minimizar las alteraciones del suelo, especificar la maza y su aparente caída libre, pudiendo existir variaciones en los detalles.

NORMALIZACION DEL MÉTODO SEGÚN NORMA IRAM: 10517 (ref. 14)

IRAM : Instituto Argentino de Racionalización de Materiales

Alcance de la norma

Establece el método de ensayo para determinar la resistencia a la penetración y obtener muestras de suelo mediante sacatestigo abierto longitudinalmente (cuchara partida).

El valor de N permite determinar en forma aproximada la resistencia a compresión simple en las arcillas (q_u) y la densidad relativa (D_r) en arenas. La muestra en el sacatestigo es enviada al laboratorio para la determinación de sus propiedades físico-mecánicas.

Los elementos y las características relevantes del método propuesto por el IRAM son las siguientes:

1. Sacatestigos partido longitudinalmente, de 50 mm. de diámetro exterior, la punta o boquilla de hincapié es de acero al cromo tungsteno y el cabezal con una válvula a bolilla. Variante sacatestigo de cuerpo entero, con tubo portamuestras con diámetro interno final 35mm.
2. Martinete de 63 kg.
3. Mecanismo de liberación del martinete en caída libre.

4. Altura de caída del martinete 76 cm.
5. Barras de sondeo de acero.
6. Cabeza de golpeo de acero al cromo tungsteno.

El rechazo se define como sigue: cuando bajo 50 golpes del martinete el sacamuestras no ha penetrado los 30 cm. finales se toma nota de la penetración real del mismo, y posteriormente se convierte el número de golpes equivalente al que correspondería a una penetración de 30cm.

INFLUENCIA DEL METODO DE ENSAYO EN LOS RESULTADOS DE N

Sobre el método original

El ensayo de penetración original, tal como fue descrito por Fletcher (ref. 11) ver figuras 2 y 3, informaba sobre la hinca de un tubo de 2" (pulgadas) de diámetro externo por 1 3/8" (pulgadas) de diámetro interno, que penetraba 12" (pulgadas) bajo la acción de una maza de 140 libras que caía libremente desde 30" (pulgadas) de altura. Es obvio que la maza, la cual puede observarse en la figura 2, no adquiriría una velocidad teórica de caída libre debido a los rozamientos del sistema.

El número de golpes para penetrar entre 6" y 18" del tubo partido sobre una longitud de 18" se denominó N, RESISTENCIA A PENETRACIÓN.

J. Parsons (1954) propuso que la penetración de 18" se dividiera en tres tramos de 6" cada uno y se definiera como N la suma de los golpes de dos hincas parciales cuyo resultado fuese el menor valor. Esta modificación no fue considerada satisfactoria debido a la falta de relación existente entre la primera carrera de asiento del sacamuestras y las dos que le siguen.

Las modificaciones posteriores

La enorme difusión que adquirió el método alrededor del mundo provocó sucesivas alteraciones con respecto al original, tales como cambios en la geometría de los martinetes, disparidad en la energía entregada a la cabeza de golpeo y diámetro del sacamuestras.

Es pertinente citar aquí el título de la ref. 15; “ENSAYO DINAMICO DE PENETRACIÓN: UNA NORMA QUE NO ESTA NORMALIZADA”. Se examina en consecuencia algunos factores que influyen sobre el valor de N y que han generado una gran vacilación en la interpretación de los resultados del ensayo.

Energía entregada al sacamuestras

Este aspecto es muy conflictivo a raíz de las prácticas locales.

Una cuestión es evidente: entre la supuesta energía potencial de un martinete preparado para ser liberado en caída libre (4200 lb-in) tal como se preconizaba en sus orígenes y la energía de la onda inicial de compresión que recibe el sacamuestras hay una importante diferencia. En principio resulta razonable suponer que diferentes tipos de liberación de energía, distintas barras de perforación y distintas cabezas de golpeo conduzcan a diferentes energías entregadas al sacamuestras propiamente dicho.

Un grupo de investigadores tales como B. Seed (ref. 26), Schmertmann y Palacios (ref. 25, 26), Kovacs (ref. 18, 19) y otros (ref. 1, 32) han llegado a conclusiones aceptables con respecto a la relación entre la energía que puede liberar un martinete de caída libre teórica y la que realmente llega al sacamuestras. Un ejemplo que da una idea de lo que sería una caída libre es el dispositivo con disparador de la figura 5

Relación de energía a la barra (ER)

En principio según Seed, debido a la costumbre adoptada en EEUU de *emplear un malacate para izar y liberar* el martinete con la ayuda de una sogas que envuelve el tambor, naturalmente genera una importante pérdida de energía respecto a la caída libre teórica. Estos dispositivos de malacate y sogas se observan en la figura 4

El rendimiento del impacto sobre la cabeza de golpeo se denomina ER (relación de energía a la barra). Dicho autor ha establecido que esta relación (o rendimiento) es en EEUU y otros países de América:

$$ER = E_i / E^* \sim 60 \%$$

Donde E_i = Energía real entregada a la cabeza de golpeo.

E^* = Energía desarrollada en caída libre teórica (4200 lb-in)

Las investigaciones de Kovacs y otro (ref. 18, 19) son muy didácticas y se resumen en la figura 6, las cuales confirman aproximadamente los valores de Seed. En efecto allí se muestra la velocidad teórica de caída del martinete, en función del rozamiento que genera la sogá sobre el tambor.

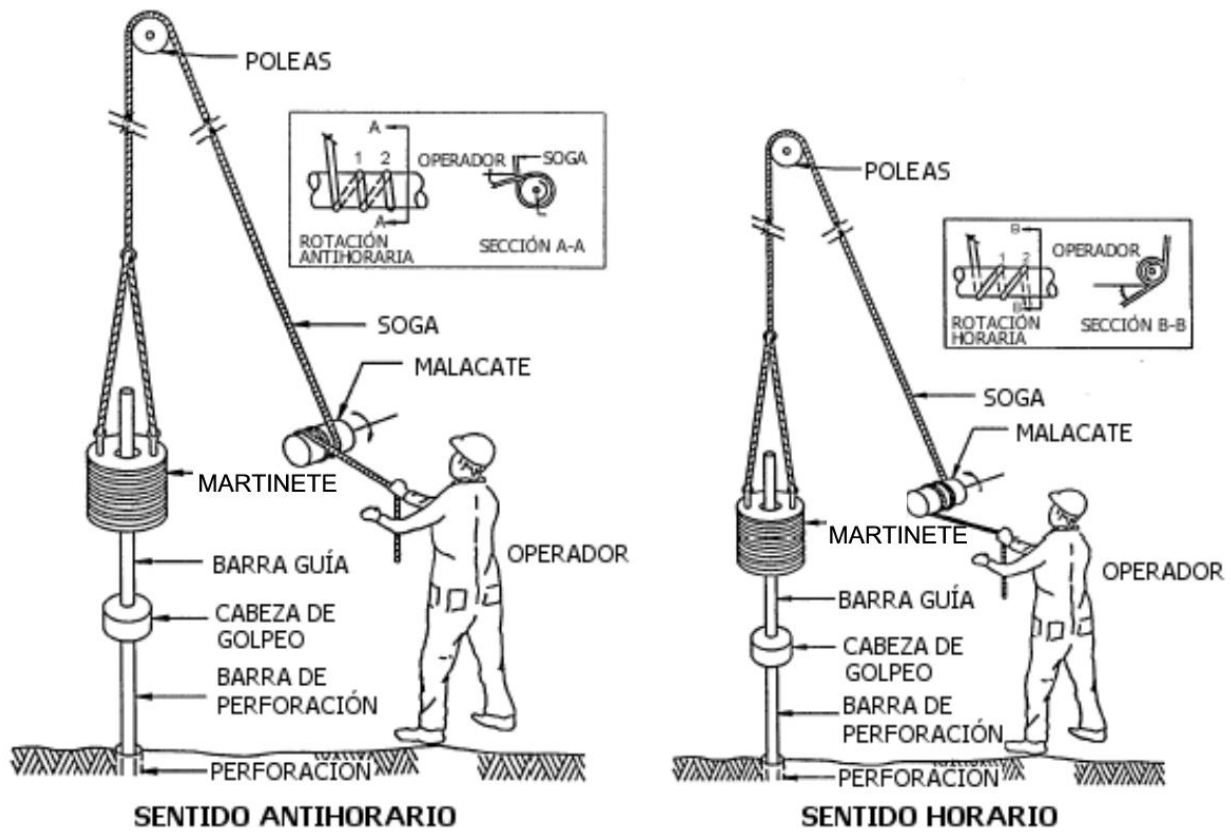


Figura 4: Sistema de sogá y malacate (Ref. 9)

El valor **ER** puede escribirse como una relación de energías cinéticas

$$ER = \frac{1}{2} m v_m^2 / \frac{1}{2} m v_t^2 = v_m^2 / v_t^2$$

Donde m = masa del martillo.

v_m = velocidad real medida sobre la cabeza de golpeo en el instante del choque.

v_t = velocidad teórica de caída libre.

Claramente el número de vueltas de sogá en el tambor del malacate influye sobre E_i .

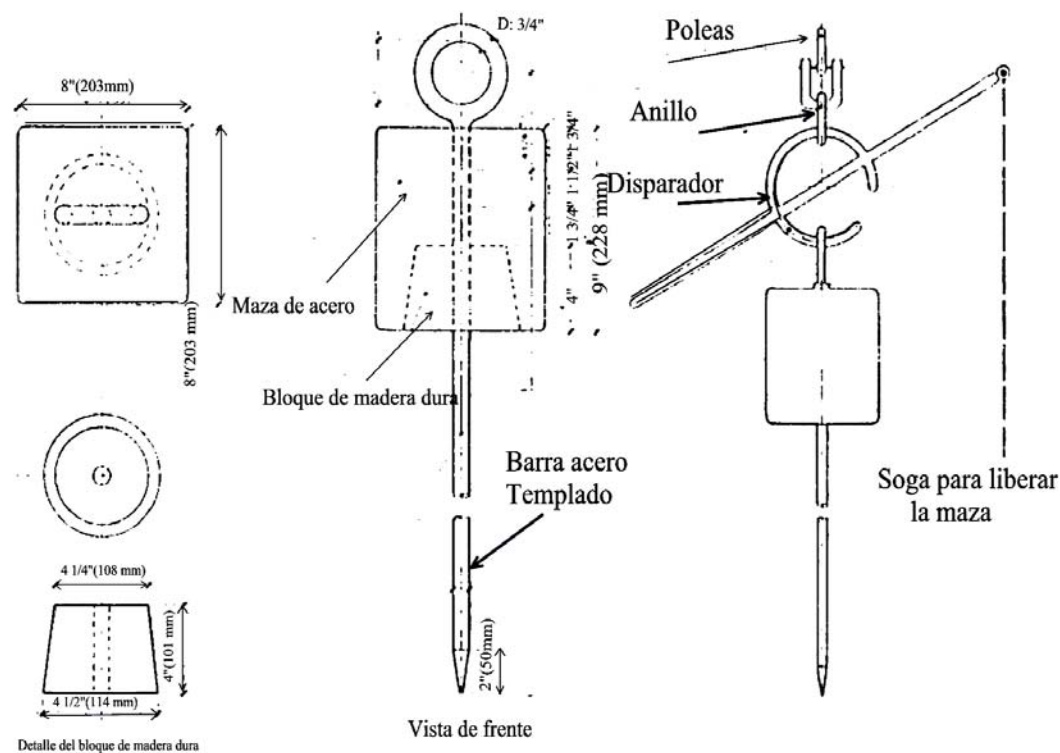


Figura 5: Maza con disparador (ref. 15)

Si en la figura 6, siguiendo la costumbre de EEUU, se eligen dos vueltas de soga, una altura de caída de 76 cm. (30") se obtiene:

$$v_m^2/v_t^2 = (290 \text{ cm/s})^2/(387 \text{ cm/s})^2 \sim 56\%$$

Solo por razones de uso y costumbre se adoptó en EEUU como ENERGÍA DE REFERENCIA

$$E_i = 60\% E^*$$

El número de golpes o Resistencia a penetración para la carrera usual de 12", con una energía $E_i = 60\% E_R$ se denomina internacionalmente como

$$N_{60}$$

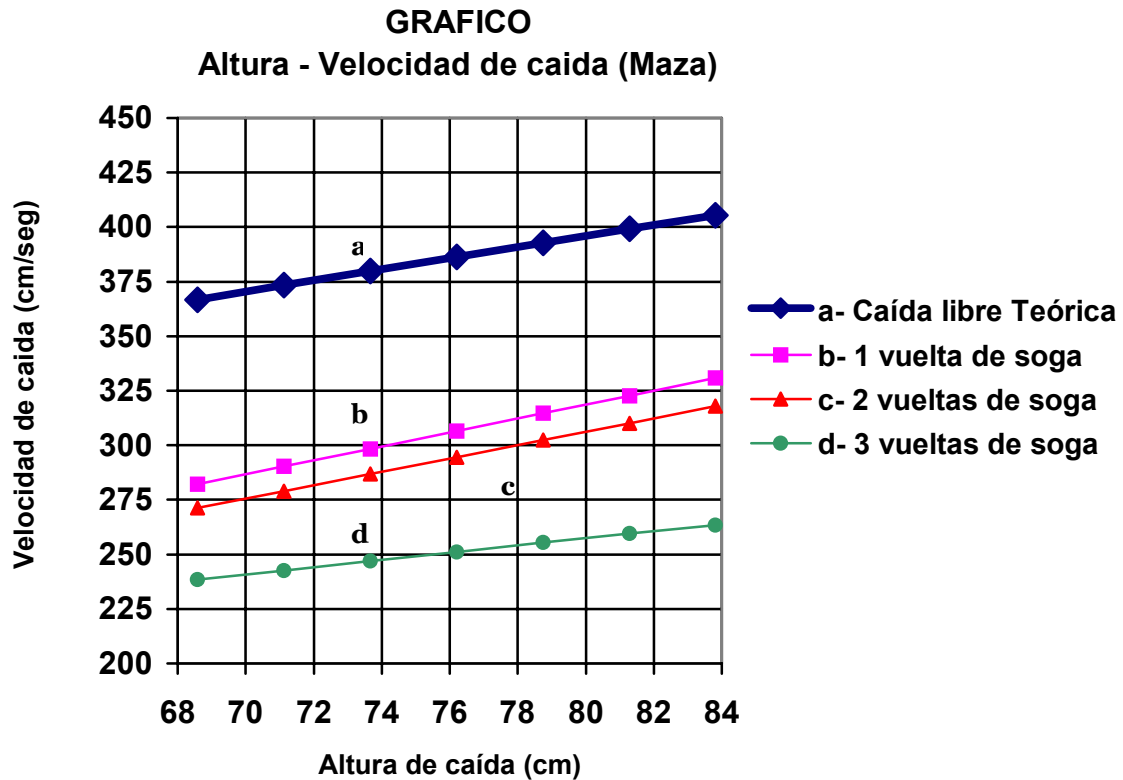


Figura 6: Relación entre el N° de vueltas de la sogá en el tambor y la velocidad de caída del martinete (ref. 18)

Obviamente, según se explicó, no todos los países emplean en sus ensayos SPT una energía $E_i = 60\% E^*$, pero si es cierto que la comparación de valores de N suele hacerse contra N_{60}

Hecha esta salvedad, la primera corrección de energía para un determinado sistema de golpeo podría escribirse nuevamente como

$$ER = E_i / E^*$$

En la figura 7 tomada de Skempton (ref. 27) se propone la corrección ER en función de la forma de liberación de energía del martinete.

Obsérvese que para disparadores manuales, la energía de liberación es muy cercana a la de caída libre teórica ($ER \sim (90-95)\%$).

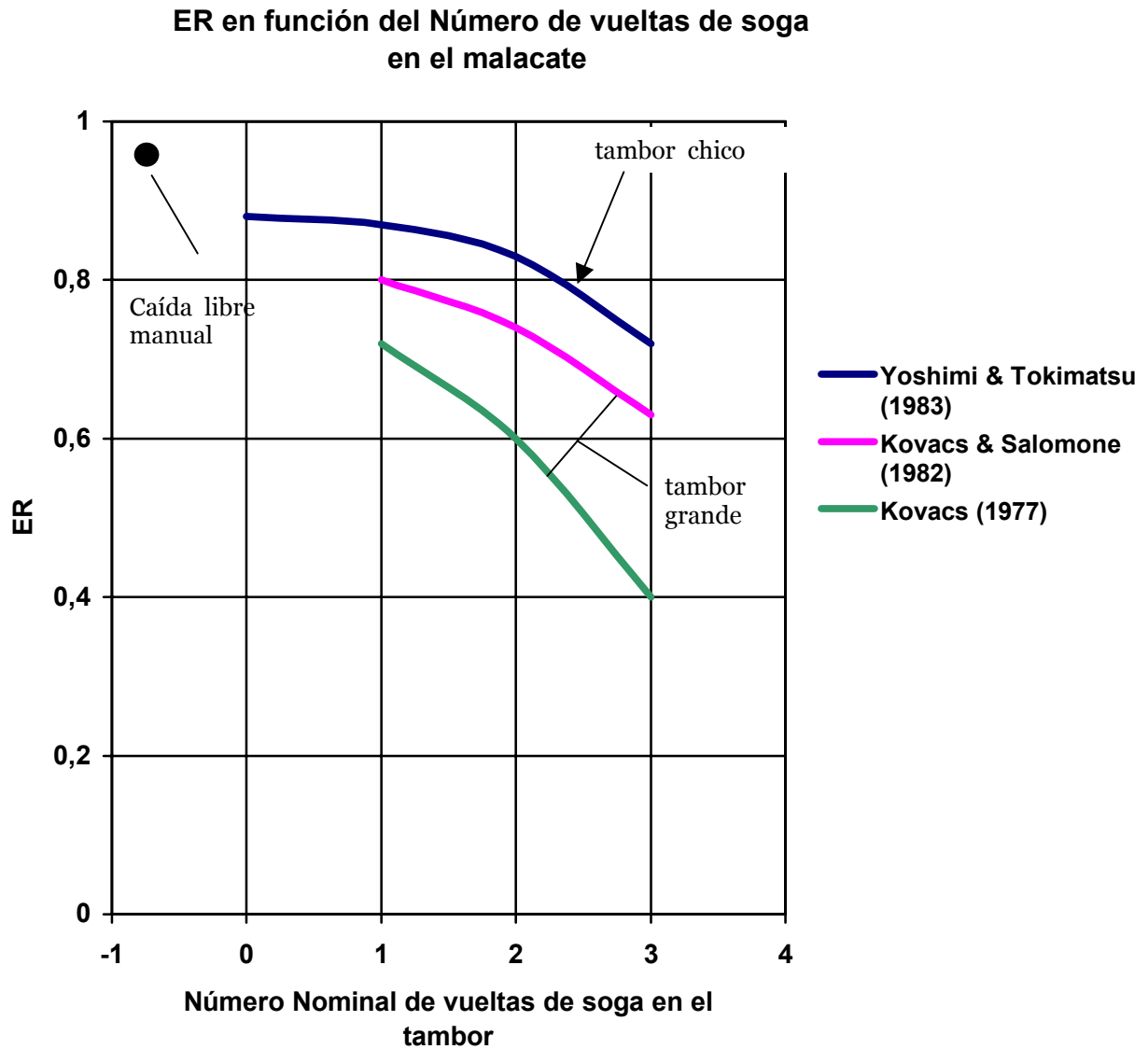


Figura 7: Relación entre ER y la forma de liberación de energía del martinete (ref. 27)

Pérdida de energía en la cabeza de golpeo (E_c)

Una segunda corrección se relaciona con la energía que se absorbe durante el impacto, en la cabeza de golpeo. En este sentido, la figura 8 tomada de L. Decourt (1989) (ref. 7) permite evaluar la corrección E_c , ligada al peso de la cabeza de golpeo utilizada.

Pérdida de energía en la cabeza de golpeo

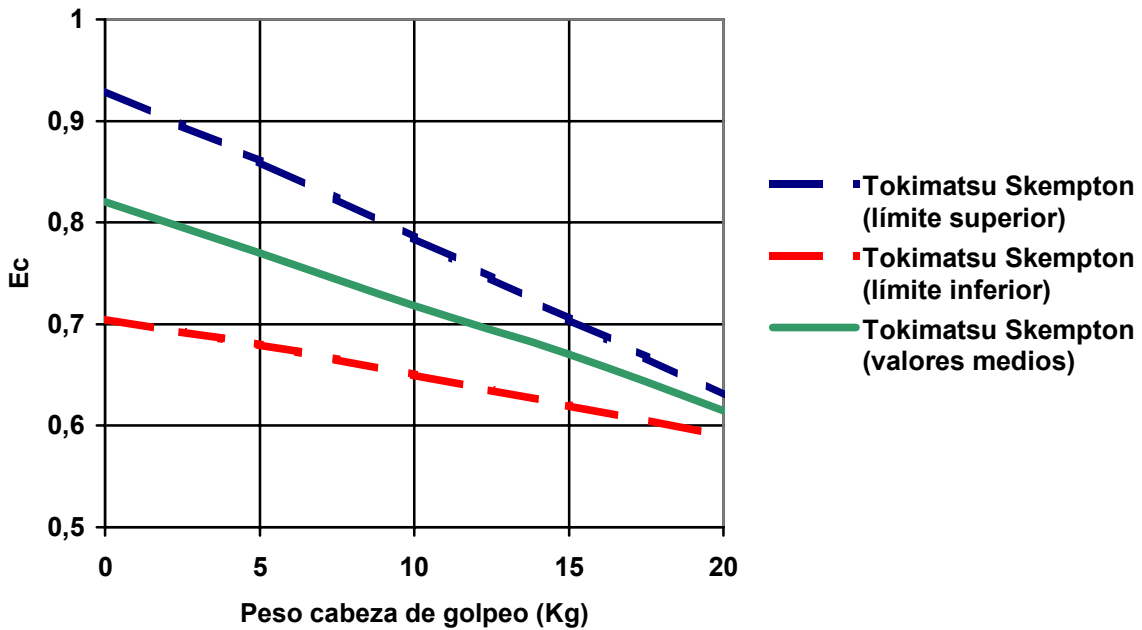


Figura8: Relación de la energía que absorbe la cabeza de golpeo durante el impacto. (ref. 7)

Pérdida de energía por reflexión (E_l)

Según Seed (ref. 26) cuando la longitud de las barras de perforación es inferior a 3 m hay una reflexión en las mismas que reduce la energía disponible que le llega al sacamuestras para generar su penetración. La reflexión entonces genera un aumento de la resistencia a penetración. Esta reducción de energía según Decourt, se evalúa a través de la relación:

$$E_l = f(M_r/M_h)$$

Donde M_r = peso de las barras

M_h = peso del martinete.

Según este autor, la energía que transmiten las barras sólo se transfiere totalmente al sacamuestras cuando $M_r/M_h > 1$. La figura 9 muestra la corrección E_l como función de M_r/M_h . Se debe calcular la inversa del valor K_2 para obtener E_l .

Pérdida de energía por reflexión

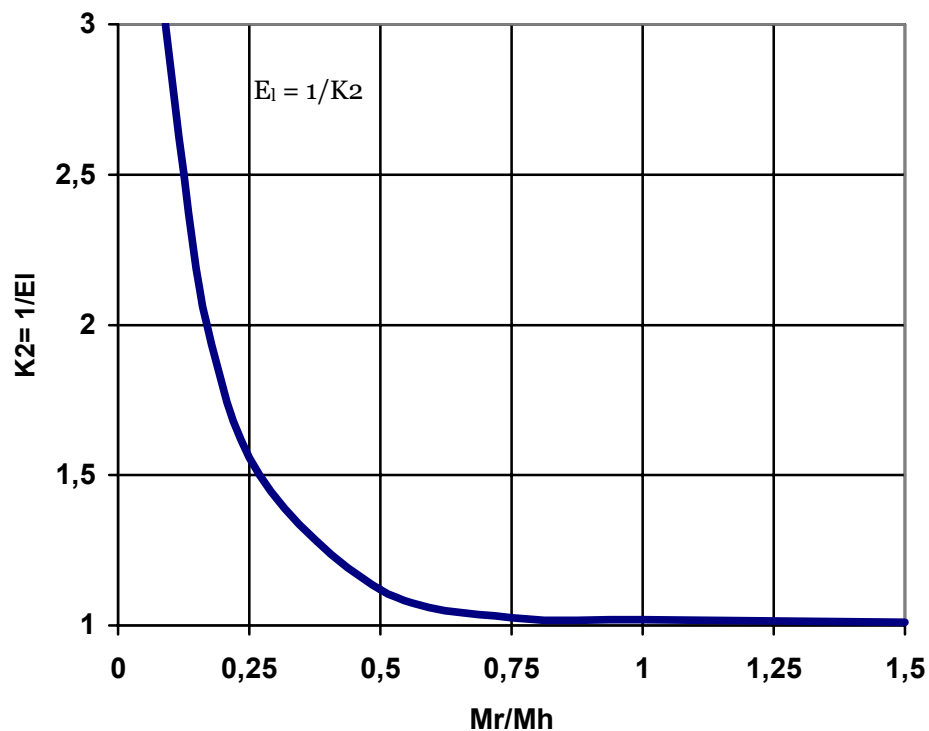


Figura 9: Corrección E_l en función de M_r/M_h . (ref. 7)

Nota: Para un conjunto : Barra A_x , de 14 m. de longitud y martinete de 70 kg. de peso, entonces $M_r/M_h = (5,15 \text{ kg/m} \cdot 14 \text{ m}) / 70 \text{ kg} \sim 1,03$, es decir que para una barra de 14 m. la corrección $E_l = 1$. Sin embargo conviene recordar que esta corrección $E_l = 1$ sería aceptable hasta longitudes del orden de 110 ft (34 m). (Ref.24)

Barras de gran longitud probablemente absorban una parte de la energía que les llega a las mismas con lo que N se incrementaría.

Otros factores de corrección de N

Correcciones de menor importancia se han investigado en relación con los diámetros de

las perforaciones y los revestimientos o tubos interiores de PVC destinados a alojar las muestras.

Diámetro de las perforaciones (E_D)

Para las medidas usuales de los diámetros de perforación ($2\frac{1}{2}$ " a 4") las correcciones de N no parecen tener relevancia, aunque si los diámetros se aumentan hasta 8", la sobrecarga lateral sobre el fondo de la perforación comienza a perder efecto sobre la resistencia N y en especial en arenas donde el valor de resistencia a penetración depende significativamente de la tapada.

Skempton (ref. 27) ha informado pequeñas correcciones que se transcriben en la tabla III.

Tabla III (ref. 27, 31)
Corrección E_D por diámetro de perforación

Diámetro de perforación	E_D
65 – 115 mm	1
150 mm	1,05
200 mm	1,15

Diámetro interno del sacamuestras (E_s)

Los sacamuestras partidos normalizados según ASTM tienen un diámetro interno constante de 35 mm ($1\frac{3}{8}$ ") incluyendo el tubo portamuestras.

Si no se emplea un portamuestras interno de PVC entonces el diámetro interior es de 38 mm ($1\frac{1}{2}$ "), ver figura 3. En este caso la fricción desarrollada por el suelo contra la pared interior del sacamuestras disminuye. La corrección ha sido investigada por Kovacs y otros (ref. 26) y sus resultados se presentan en la figura 10.

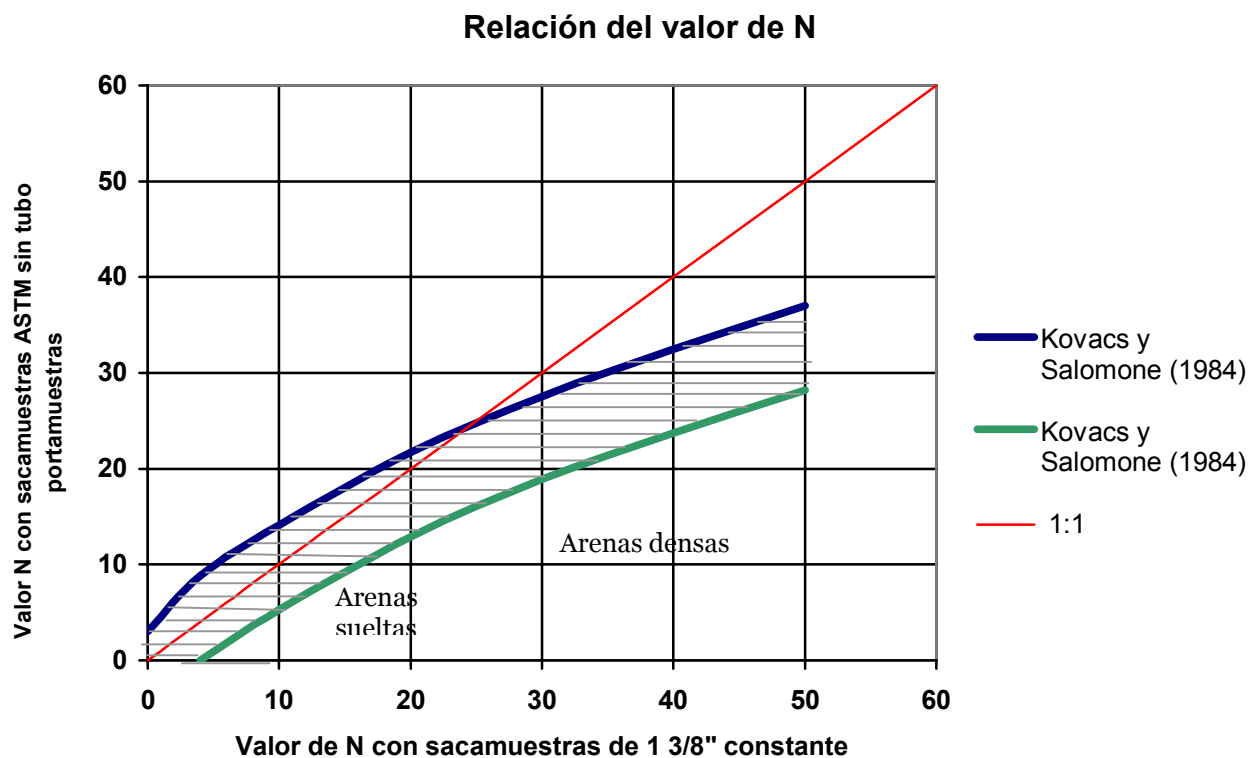


Figura 10: Efecto en el Valor de N según el tipo de sacamuestras. (Ref. 26)

La tendencia indica que el cociente $E_s = N(\Phi 38 \text{ mm}) / N(\Phi 35 \text{ mm})$ disminuye para arenas densas o muy densas, siendo su efecto despreciable en arenas sueltas.

RESUMEN DE CORRECCIONES

Los problemas que acarrearán el hecho de relacionar los resultados de N de distintos países contra el N_{60} que en definitiva proviene de una práctica un tanto particular de EEUU (liberación de energía con un malacate y dos vueltas de sogas) aparecen como cuestiones un tanto complicadas.

En el presente trabajo todas las correcciones que en definitiva son de eficiencia de los sistemas relativos en juego, pueden resumirse como sigue:

$$N_{60} = N \cdot ER \cdot (E_c \cdot E_l \cdot E_D \cdot E_s) \quad (A)$$

N_{60} se interpreta aquí como la energía que llega a la cabeza de golpeo cuando $ER = 60\%$.

N = Resistencia a penetración obtenida según el método de investigación local.

ER = Relación de energía a la barra (figura 7).

E_c = Relación de energía debido al peso de la cabeza de golpeo (figura 8).

E_l = Relación de energía por reflexión de la onda de compresión en las barras (figura 9).

E_D = Relación de energía que contempla el diámetro de la perforación (Tabla III).

E_S = Relación de energía que tiene en cuenta el diámetro interno del sacamuestras (figura 10).

La tabla IV obtenida de Seed (ref. 26) indica los valores de las distintas relaciones ER/E₆₀ que el autor consideró en uso en distintos países.

Tabla IV
Resumen de relaciones de energía
(ref. 26)

País	Tipo de martinete	Liberación de Martinete	Energía de la Barra (ER) (estimada en %)	Factor de corrección para 60% ER
Japón	Anillos *	Caída libre	78	78/60 = 1,30
EEUU	Anillos	Soga y malacate	60	60/60 = 1,00
Argentina**	Anillos	Soga y malacate	45	45/60 = 0,75
China	Anillos	Caída libre	60	60/60 = 1,00

* Según se muestra en la figura 4.

** No es usual el empleo del martinete de la figura 4.

OBSERVACIONES GENERALES

En las correcciones descriptas no se hace referencia a las consideraciones de Gibbs y Holtz para obtener N₁, que es el número de golpes normalizado para una tapada γ. h = 1 kg/cm². (ref. 12).

Se considera pertinente aclarar aquí que el valor ER publicado por Seed (tabla IV) no es generalizado y ni siquiera el más usual en Argentina.

Una cantidad importante de equipos de perforación en Argentina están provistos de un disparador tal como el mostrado en la figura 5, que libera el martinete en “caída libre” con una energía cercana a la teórica. Un valor estimado “prima facie” para su aplicación sería $ER \sim 90 \%$.

APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL SPT

Suelos friccionales o no cohesivos:

Los resultados del SPT pueden correlacionarse con algunas propiedades mecánicas de los suelos, y en especial en lo referente a las arenas. Las primeras referencias sobre el uso del SPT en arenas están citadas en (Terzaghi y Peck, ref. 29, 31) y representadas en una tabla que correlaciona el valor de N con la densidad relativa en arenas, (tabla V).

La densidad relativa (D_r) de una arena tiene una influencia importante en el ángulo de fricción interna (Φ), en su capacidad de carga y en el asentamiento de fundaciones que se apoyan sobre este material (ref. 7, 31). Por ejemplo si una arena sumergida es muy suelta, un choque brusco puede producir una potencial liquefacción del material (suspensión). En estado denso la misma arena es insensible a los choques y por lo tanto adecuada como base de las estructuras más pesadas. De allí la importancia de la densidad relativa frente a las demás propiedades a excepción de la permeabilidad.

TABLA V
(ref. 26)

<u>Arenas</u>	
Nº de golpes/30 cm (N)	Densidad relativa
0-4	Muy suelta
4-10	Suelta
10-30	Medianamente densa
30-50	Densa
+ de 50	Muy densa

Se debe tener cuidado en el uso de la correspondencia entre N y la densidad relativa y siempre y cuando el ensayo de penetración se haya realizado responsablemente.

Una correlación muy utilizada que relaciona el, valor N , D_r y sobrecarga efectiva, es la familia de curvas desarrolladas y estudiadas por Gibbs y Holtz, (ref. 13, 23) basadas en una serie de ensayos de laboratorio, según se indica en la figura 11. Esta correlación la utilizaron muchos ingenieros en todo el mundo para estudios de rutina in situ y otros lo hicieron para predecir la potencial licuefacción en suelos no cohesivos.

La figura 11 es un gráfico de doble alcance: por un lado se indican las curvas de diversos autores que correlacionan los valores de N con D_r y por otro la que relaciona N con los valores del ángulo de fricción interna (Φ).

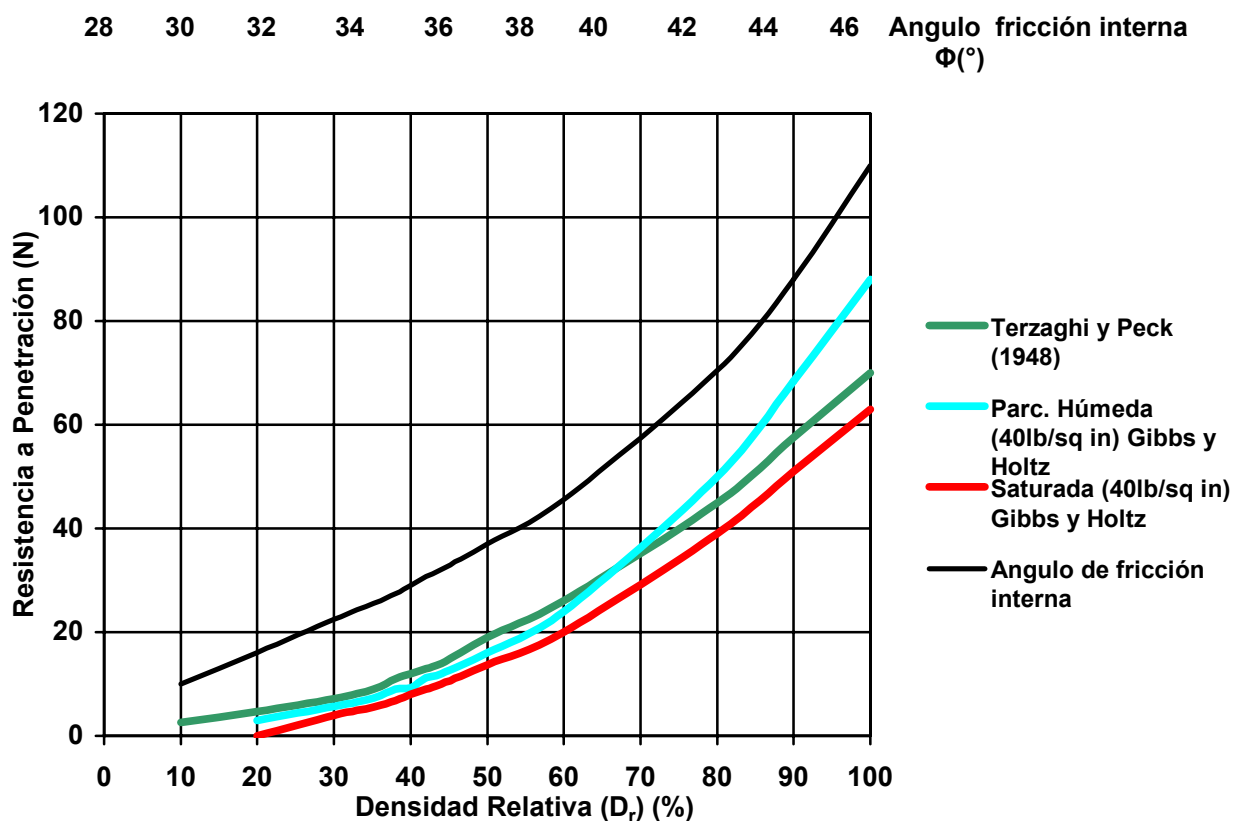


Figura 11: Relación general entre Resistencia a Penetración y la densidad relativa y el ángulo de fricción interna en arenas. (ref. 12, 21, 23)

En la determinación de la resistencia a penetración de una arena influye la profundidad a la cual se practica el ensayo, debido al confinamiento producido por la presión de la sobrecarga. Puede ocurrir que al aumentar la profundidad exhiba valores mayores de densidad relativa que la real. Si se considera normal el valor de N a una profundidad que corresponde a una presión efectiva de sobrecarga de 10 t/m^2 , el factor de corrección C_N que hay que aplicar a los valores de N para otras presiones efectivas diferentes está dado por la expresión:

$$C_N = 0,77 \log 200/p$$

Donde,

C_N = Factor de corrección

p = Presión efectiva debida a la sobrecarga (t/m^2). (ref. 23)

Suelos cohesivos:

La consistencia de las arcillas y de otros suelos cohesivos se describe con los términos: Muy blando, blando, medianamente compacto, compacto, muy compacto y duro. La medición cuantitativa básica de la consistencia es la resistencia a la compresión simple (q_u). Esta resulta representativa en los suelos arcillosos saturados uniformes, en el caso de las arcillas marinas, mientras que en el caso de suelos arcillosos de origen residual, eólico, fluvial, los cuales poseen una falta de uniformidad en su masa y pueden desarrollar microfisuras, el valor de la resistencia a la compresión simple tiene vacilaciones importantes. En este caso la metodología más adecuada para medir la resistencia al corte en el laboratorio es por medio de ensayos triaxiales. (ref. 31)

En las perforaciones de exploración del subsuelo se puede estimar groseramente la resistencia al corte de las arcillas por medio de los ensayos de penetración. En la tabla VI se observa la relación aproximada entre el N de cuchara partida y la resistencia a compresión simple (q_u) de las arcillas saturadas.

TABLA VI (ref. 26)

<u>Arcillas</u>		
(N)	Consistencia	Resistencia a compresión simple (q_u) (kg/cm ²)
- de 2	Muy blanda	- de 0,25
2-4	Blanda	0,25-0,50
4-8	Medianamente compacta	0,5-1,0
8-15	Compacta	1,0-2,0
15-30	Muy compacta	2,0-4,0
+ de 30	Dura	+ de 4,0

RELACIÓN ENTRE EL SPT Y EL ENSAYO DE PENETRACIÓN CON SACAMUESTRAS DE ZAPATOS INTERCAMBIABLES. (REF. 21)

Moretto (Ref 15) sostiene el uso de sacamuestras con zapatos intercambiables y tubos portamuestras de PVC que se pueden adaptar al tipo de suelo a ensayar (figura 12). Para suelos no cohesivos se usa el zapato N° 4 y para los suelos cohesivos, el operador estima la consistencia y emplea el zapato correspondiente. Extraído el sacatestigo, los dos trozos de tubo inferiores se tapan y se envuelven en polietileno, ó se sellan los extremos con parafina a fin de evitar que pierdan parte de la humedad original.

De los ensayos realizados en arenas entre el N (SPT) y el N' del sacamuestras de zapatos intercambiables se llegó a la siguiente relación experimental: (ref. 20)

$$N \text{ (SPT)} = 0,8 N'$$

Este sacamuestras tiene una relación de áreas (A_r %) mucho menor que la cuchara partida y en consecuencia permite la obtención de muestras “representativas” sobre los cuales pueden ejecutarse ensayos triaxiales cuyos resultados son de aplicación.

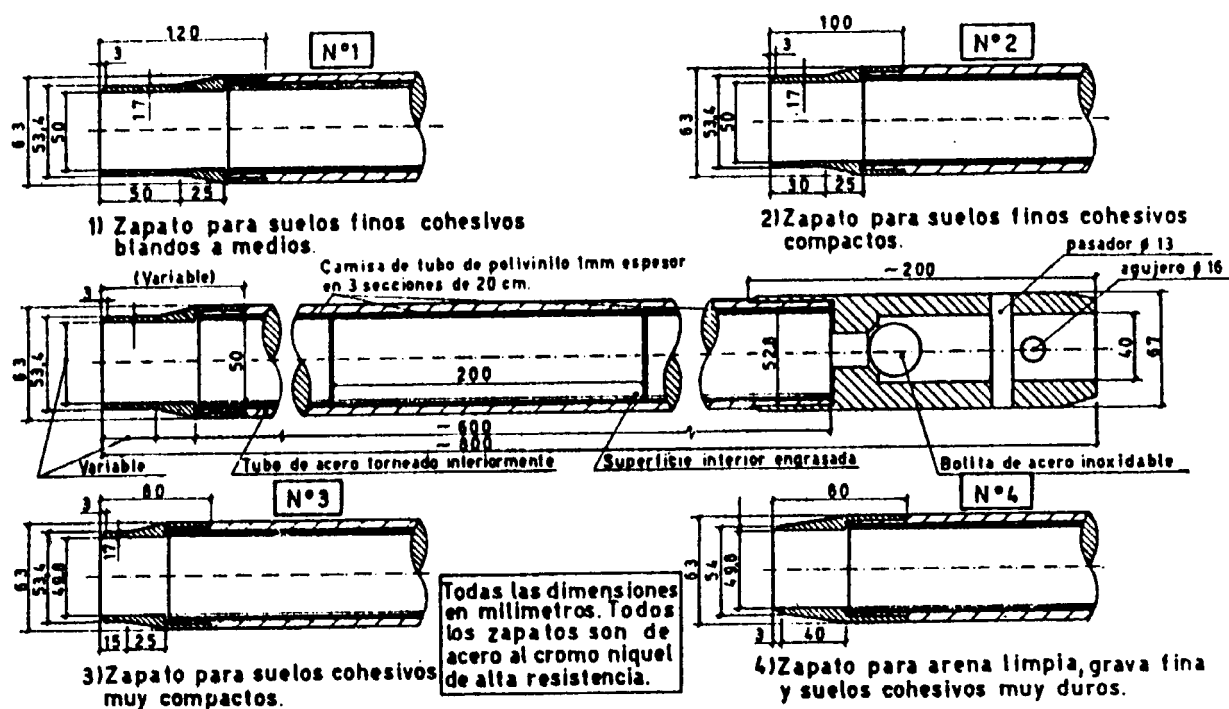
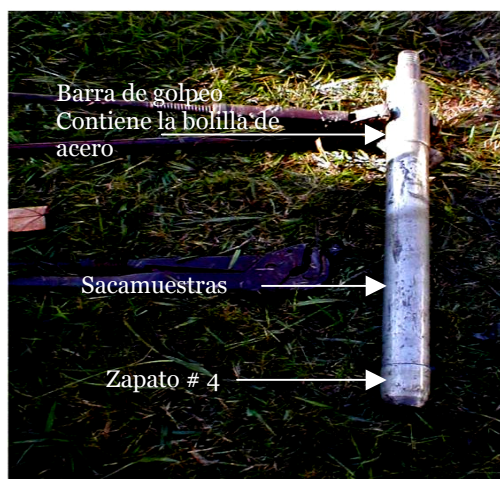


Figura 12: Zapatos intercambiables según (ref. 20)

A modo de ilustración se agrega la siguiente documentación fotográfica.



Sacamuestras de zapatos
intercambiables

SOBRE LAS FUNDACIONES EN ARENA

El valor N_{60} obtenido a partir del SPT se considera un método expeditivo y confiable para el cálculo de fundaciones en arenas estables (no colapsables).

Mesri (ref. 31) ha compilado la información tomada de Burland y Burbidge (1985) a fin de establecer una metodología razonable para la estimación de los asentamientos y la capacidad de carga en estos materiales.

Muchos ingenieros consideran que las arenas son materiales “incompresibles” lo cual no constituye una afirmación razonable. Lo que si es cierto, es la referencia respecto a la capacidad de carga estática a rotura sobre estratos de arena limpia. No se han reportado casos de rotura de fundaciones, aún teniendo en cuenta la gran variación de la densidad relativa de arenas en un mismo sitio.

Cabe señalar también que la obtención de muestras inalteradas de arena, para determinar en laboratorio las verdaderas relaciones tensión- deformación es una tarea compleja y costosa.

Con estas consideraciones, la práctica habitual de las cimentaciones debe limitarse a emplear métodos que resguarden con adecuados coeficientes de seguridad la rotura y los asentamientos.

El método empírico propuesto por Mesri parte de la ecuación:

$$S_c = Z_1 m_v q \quad (1)$$

que es muy similar a la conocida expresión de asentamientos en un material elástico

$$S = H. m_v. \Delta\sigma_2 \quad (2)$$

En la ecuación (1)

S_c = Asentamiento al fin de la aplicación de una carga permanente sobre una zapata (fin de construcción).

m_v = Coeficiente de compresión vertical del suelo dentro de la profundidad de influencia Z_1 de la carga sobre la base.

q = presión global en la fundación, que no es igual a la presión neta, siendo $q = P/A$, y P la carga total sobre la fundación y A el área de la misma.

A través de una abundante información de carácter empírico se demostró que en la ecuación (1)

$$Z_1 = B^{0,75} \quad (3)$$

$$m_v \sim 1,7/N_p^{1,4} \quad (4)$$

Donde B = ancho de la fundación (m)

N_p = Promedio de la resistencia a penetración N_{60} en la profundidad Z_1

Este procedimiento de tomar el promedio de la resistencia a penetración; se ha usado para el cálculo de zapatas de torres de alta tensión en 500 kV, pero debe ser empleado con un cierto cuidado si se tiene en cuenta que estratos sueltos, seguidos por estratos a veces muy densos pueden arrojar valores N_p que subestiman los asentamientos.

El valor de N_p según Mesri no es necesario afectarlo de la corrección por profundidad de tapada; sin embargo si las arenas son finas (SM) y muy densas ($D_r > 80\%$) el valor N en cada penetración del sacamuestras debe rectificarse como se indica:

$$N' = 15 + 0,5 (N-15)$$

Reemplazando las ecuaciones (3) y (4) en (1) y denominando N_{60} al valor promedio N_p resulta para arenas normalmente consolidadas un valor del asentamiento:

$$S_c = B^{0,75} (1,7/N_{60}^{1,4}) q \quad (5)$$

S_c : Asentamiento (mm)

B: Ancho de la zapata (m)

q: en KPa

Teniendo en cuenta que el examen de la preconsolidación de arenas no es un método de rutina, en determinaciones usuales puede emplearse la ecuación (5); que “per se” da los resultados más desfavorables.

La expresión (5) para los asentamientos, es aplicable a fundaciones de planta cuadrada ($L/B = 1$). Si el factor de forma es ($L/B > 1$), Burland y Burbidge (según ref. 31) recomiendan el siguiente procedimiento:

$$S_c (L/B > 1) = S_c (L/B = 1) \cdot [1,25(L/B)/(L/B)+1,25]^2 \quad (6)$$

La capacidad de carga admisible que los ingenieros adoptan, tradicionalmente se basa en los gráficos de Terzaghi y Peck (ref. 31) donde se limita el asentamiento individual de las bases más comprometidas a $S_c = 25$ mm.

Mesri (ref. 31), tomando los trabajos de Burland y Burbidge, ha reportado que los asientos de bases individuales con iguales dimensiones y con la misma carga varían con respecto al promedio de sus asentamientos en 1,6 veces, en consecuencia afirma que para asegurar que los asentamientos individuales no superen 25 mm. el valor admisible a considerar para la zapata de mayor dimensión en un edificio resultaría:

$$S = 25/1,6 = 16 \text{ mm}$$

Obviamente el asiento de zapatas más pequeñas debería ser en principio, menor de 25 mm.

De todas maneras, el factor de seguridad de capacidad de carga de las fundaciones de pequeño tamaño ($B < 1,20 \text{ m}$) es necesario verificarlo generosamente ($F_s > 3$) porque, para pequeñas dimensiones, asentamientos del orden de 20 mm. pueden estar relacionados con presiones cercanas a la ruptura.

Teniendo en cuenta que el valor N decrece si los niveles piezométricos coinciden con la fundación, Mesri estima que no deben efectuarse correcciones en asentamientos. Otra cuestión sería que, durante las exploraciones los niveles piezométricos se mantengan muy por debajo de las profundidades de cimentación y posteriormente asciendan.

La estimación de la capacidad de carga para bases cuadradas puede obtenerse a partir de la ecuación (5)

$$S_c = B^{0,75} (1,7/N_{60}^{1,4}) q_{ad} \quad (5)$$

Si se fija S_c en 16 mm resulta

$$q_{ad} = 16 \cdot N_{60}^{1,4} / 1,7 \cdot B^{0,75} = 16 Q \quad (7)$$

donde q_{ad} (KPa) para un asentamiento individual no mayor de 16 mm.

La figura 13 simplifica mucho los cálculos puesto que se obtiene Q en función de N_{60} promedio. El procedimiento descrito es recomendable para determinaciones habituales.

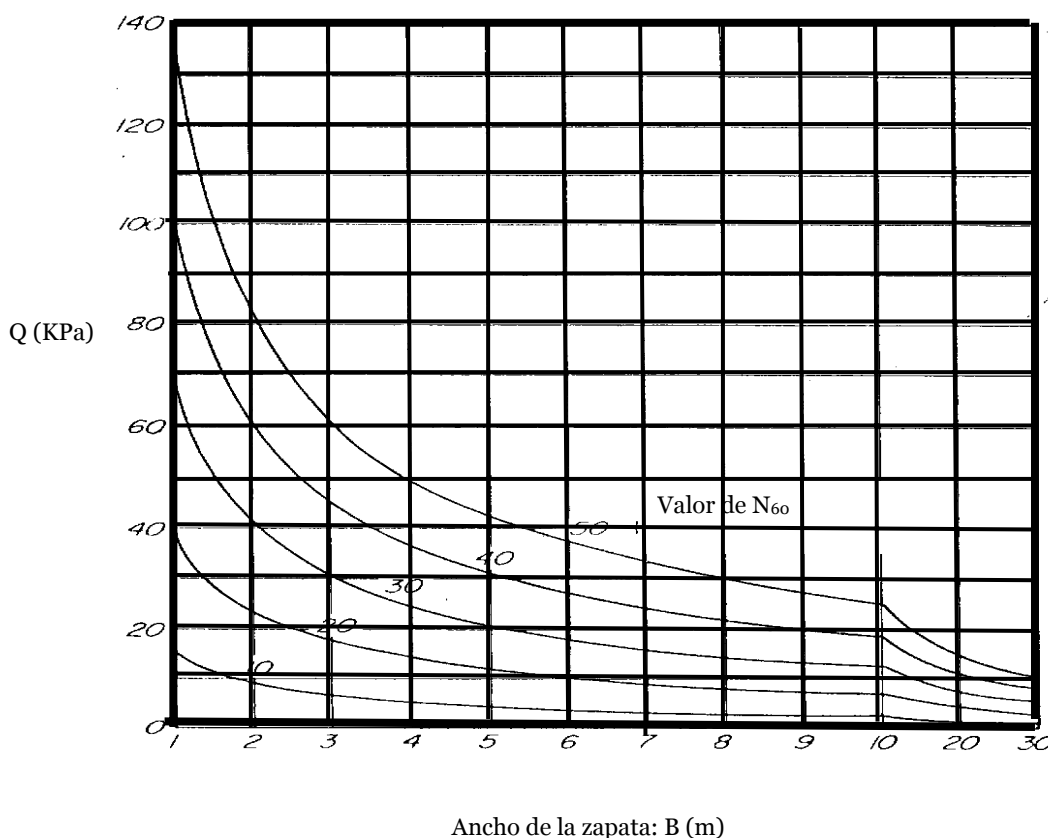


Figura 13: Diagrama para estimar la presión admisible del suelo para zapatas en arena basados en los resultados del SPT (ref. 31)

COMENTARIOS FINALES

En 1927, C. Gow y G. Fletcher diseñaron la cuchara partida, contemporáneamente con H. Mohr, y llevaron adelante la idea del Ensayo Normal de Penetración, sin mayores pretensiones. Hasta la fecha, numerosos investigadores han desarrollado teorías que intentan racionalizar en interpretar a la luz de la energía de hincado entregada al sacamuestras, el verdadero alcance del valor N, Resistencia a Penetración.

Existe la duda, sino hubiese sido mejor continuar con el simple método original, sin más alcance que el de obtener una grosera medición de la resistencia mecánica del suelo, especialmente con referencia a la instalación de pilotes.

Tal vez hubiera bastado complementar este alcance con las primeras tablas publicadas por Terzaghi y Peck en 1948 que relacionaban el valor N con la resistencia al corte del suelo atravesado.

En el transcurso de este trabajo se han sintetizado numerosas correcciones que tratan de obtener el valor de N que mejor representa las propiedades del subsuelo.

De esta manera aparecen entre otras, las correcciones relacionadas con la energía que llega a la cabeza de golpeo, las que tienen en cuenta la masa de la cabeza y el peso de las barras. Adquiere una gran relevancia el modo de liberación del martinete, que en algunos países, arrastra una soga envuelta en un tambor.

Naturalmente, tanto estos sistemas de operación como las particularidades regionales han producido una dispersión muy grande en los valores de resistencia a penetración.

Llegado a este punto es el momento de preguntarse, si el concepto de Ensayo Normal de Penetración es el que resulta de liberar un martinete en caída libre como en la época de Fletcher o en cambio el de normalizar los valores de N tomando como energía de referencia la entregada a la cabeza de golpeo por un martillo que arrastra una soga con dos vueltas en el tambor y que corresponde aproximadamente al 60% de la que produciría una caída libre teórica, en este caso el valor de N se convierte en N_{60} .

El problema debería resolverse de la siguiente manera.

- 1) En Argentina correspondería emplear un martillo de “caída libre” accionado por un disparador tal como el representado en la figura 5. Obtenido el valor N puede corregirse por la incidencia del peso de la cabeza de golpeo y del peso de las barras.
- 2) Para comparar los valores obtenidos en Argentina con los de los países que emplean N_{60} , como es el caso de EE.UU, (ver ref. 26, 31) puede emplearse la expresión desarrollada en este trabajo:

$$N_{60} = N \cdot ER \cdot (E_c \cdot E_1 \cdot E_D \cdot E_s)$$

SUGERENCIAS PARA LA EJECUCIÓN DEL SPT EN ARGENTINA

La Norma IRAM 10517 (1970) contiene las prescripciones básicas para ejecutar el Ensayo Normal de Penetración. Si se toma nota de las distintas cuestiones que se han desarrollado en el presente trabajo, es posible sugerir una complementación y actualización de la misma. En este sentido se proponen tentativamente los siguientes puntos de interés:

- 1) El Ensayo Normal de Penetración (SPT) solamente corresponde al método que se lleva a cabo para la extracción de muestras parcialmente alteradas con la cuchara

partida o sacamuestras enterizo equivalente cuyas dimensiones son las siguientes:

Diámetro externo	50 mm.
Diámetro interno final	35 mm.
Longitud total de la parte útil del sacamuestras	> 500 mm.
Longitud del Zapato o boquilla cónica	de 25 a 50 mm.
Angulo de ataque de la boquilla o zapato	~ 16 a 23 grados.
Espesor del filo de corte de la boquilla	~ 2,54 mm.
Cabezal y bolilla de desagote	

- 2) Se sugiere que la liberación del martinete se efectúe con un disparador que permita una “caída libre” con la única pérdida de energía producida por rozamiento de la guía del martillo que se desliza internamente a la barra de sondeo. El rendimiento de este sistema no ha sido medido en Argentina, pero puede estimarse en el 90% (ver como referencia la figura 7). Una disposición constructiva típica puede observarse en la figura 5 donde se muestra el martinete y el disparador.
- 3) Se sugiere el uso de un martillo de 63,5 kg. de peso cayendo desde 762 mm; el diámetro del martillo no debería superar 18 cm. a fin de reducir la excentricidad de las masas en juego. Una metodología como la descripta permite una interpretación simple de los resultados por cualquier profesional en la materia.
- 4) Los valores de N obtenidos con este procedimiento sufrirán una pequeña corrección debido al peso de la cabeza de golpeo y de las barras de perforación según se ha ilustrado oportunamente en las figuras 8 y 9. En Argentina no es usual emplear diámetros de perforación superiores a 4” de manera que la corrección de la Tabla III, no sería de aplicación habitual.

Si se desea en cambio, convertir el valor N obtenido con procedimiento sugerido, al valor N_{60} con el sólo objeto de interpretar resultados publicados en otros países, como ya se ha expresado, puede emplearse la ecuación:

$$N_{60} = N \cdot ER \cdot (E_c \cdot E_1 \cdot E_D \cdot E_s)$$

Referencias

1. Abou Matar H. and Goble G., "SPT Dynamics Analysis and Measurements", ASCE, JGGE, Vol. 123, Nº 10, p. 921-928, 1997.
2. ASTM, Designation D 1586-84 (reapproved 1992), "Standard Test Method for Penetration Test and Split Barrel Sampling of Soils", Oct. 1992.
3. ASTM, Norma 1586-64 T, "Método Tentativo de Ensayo de penetración y toma de muestras de suelo con tubo testigo hendido longitudinalmente", s/ J.Salas 1964.
4. Bosscher P. and Showers D., "Effect of Soil Type on Standard Penetration Test Input Energy" Technical Note, ASCE, Vol. 113, Nº 4, p. 385-389, 1987.
5. Campanella R. G. and Robertson P. K., "State of the art in in-situ testing of soils: Developments since 1978", University of British Columbia, Vancouver, Canada. Enero 1982.
6. Campanella R. G. and Robertson P. K. y Wightman A., "SPT-CPT Correlations", University of British Columbia, Department of Civil Engineering, Series Nº 62, Octubre 1982.
7. Decourt, L., Penetration tests on granular soils. A search for a more rational approach (1989).
8. De Mello V. F., "The Standard Penetration Test", State of the Art. Fourth Panamerican Conference 1971.
9. "Engineering and Design- Geotechnical Investigations: Penetration Resistance Test and Sampling with a Split-Barrel Sampler ", Department of the US Army, Corps of Engineers, marzo de 1988.
10. "Engineering and Design Standard Penetration Test", Department of the US Army, Corps of Engineers, marzo de 1988.
11. Fletcher G. F. A., "Standard Penetration Test: Its Uses and Abuses, ASCE, Vol. 93, SM 4, P. 67-75, 1965.
12. Gibbs H. J. y Holtz W. G., "Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing", Londres 1957.
13. "In Situ Testing" Ground Engineering, marzo 1996.
14. IRAM, Norma 10517, Método de ensayo para determinar la resistencia a la penetración y obtener muestras de suelo mediante sacatestigos. Septiembre 1970.
15. Ireland H. O., Moretto O. y Vargas M., "The Dynamic Penetration Test: A Standard that is not Standardized", Geotechnique 20, Nº 2, 185-192, 1970.
16. ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing, "Penetration Testing", SPT, ISOPT-1/Orlando/1988.
17. Jiménez Salas J. A., "Geotecnia y Cimientos II", 1976, tomo II.
18. Kovacs W. y Salomone L., "SPT Hammer Energy Measurement", ASCE, Vol. 108, GT 4, p. 599-621, abril 1982.
19. Kovacs W., "Velocity Measurement of Free Fall SPT Hammer", ASCE, Vol. 105, GT 11, p. 1-10, nov. 1979.
20. López A., "Experiencias sobre el uso del sacamuestras con zapatos intercambiables realizados por el Estudio Bolognesi-Moretto".
21. Marcuson III W. y Biegansky W., "SPT and Relative Density in Coarse Sands", ASCE, Vol. 103, GT 11, p. 1295-1309, 1979.
22. Mohr H.A., "Exploration of Soil Conditions and Sampling Operations", Harvard University, Graduate School of Engineering (Soil Mechanics, Serie Nº 9, segunda edición), 1940.
23. Peck, Hanson, Thornburn, "Ingeniería de Cimentaciones". Ed. Limusa 2000.

24. Schmertmann J. and Palacios A., "Energy Dynamics of SPT", ASCE, Vol. 105, GT 8, p. 909-926, 1979.
25. Schmertmann J., "Statics of SPT", ASCE, Vol. 105, GT 5, p. 655-670, 1979.
26. Seed B., "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations", ASCE, Vol. 111, Nº 12, diciembre 1985.
27. Skempton A. W., "Standard Penetration Test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation", Geotechnique 36, Nº 3, p425-447, 1986.
28. Subcommittee on Soil Sampling (ISSMFE), "International Manual for the Sampling of Soft Cohesive Soils", Tokio, 1981.
29. Terzaghi K., Peck R. (versión española O. Moretto), "Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica", segunda edición, abril 1973.
30. Terzaghi K., "Open discussion: Source of disturbance", IICSMFE, 1936.
31. Terzaghi K., Peck R. y Mesri G., "Soil Mechanics in Engineering Practice, 1996.
32. Yokel F., "Energy Transfer in Standard Penetration Test" Technical Note, ASCE, Vol. 108, GT 9, p. 1197-1202, 1982.

ANEXO 1