

APLICACIÓN DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR EN LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE SUELOS GRANULARES

CRISTIAN YAIR SORIANO CAMELO*

Recibido: 21 de Febrero de 2013

Aprobado: 17 de Mayo de 2013

Resumen

En el presente artículo se plantean los aspectos generales del ensayo de penetración estándar (SPT por sus siglas en inglés), en términos de la descripción de su ejecución basada en las especificaciones vigentes. Luego se presentan las correlaciones existentes que permiten obtener parámetros de resistencia en suelos granulares, se presenta un ejemplo de aplicación de las mismas para una perforación en particular y finalmente, se mencionan las respectivas recomendaciones y limitaciones del ensayo.

Palabras Clave: Ensayo de penetración estándar, correlaciones, parámetros geotécnicos.

Abstract

The present paper discusses general aspects of standard penetration test (SPT), in terms of its implementation description based on current specifications. Then the correlations, that can be used to obtain geotechnical parameters for granular soils, are shown. Finally an application example with these correlations for a particular drilling is shown with the essay respective recommendations and limitations.

Keywords: Standard penetration test, correlations, geotechnical parameters.

1. INTRODUCCIÓN

El ensayo de penetración estándar SPT es ampliamente utilizado en exploración geotécnica dado que existe una gran variedad de correlaciones entre el número de golpes del que se obtienen tras la ejecución del ensayo y algunos parámetros geotécnicos de gran importancia en el diseño de cimentaciones.

Este método permite obtener parámetros de resistencia del suelo tales como, el ángulo de fricción (F'), la cohesión (c'), la resistencia al corte no drenada (S_u) y algunos parámetros de deformabilidad como el módulo de Young (E), a partir de correlaciones propuestas por diferentes autores y que son de amplio uso en el diseño de diferentes estructuras geotécnicas dada la facilidad de su aplicación. Se ha observado en

general que los resultados que se obtienen son razonables y aproximados a los que se podrían obtener de pruebas más completas como es el caso de ensayos triaxiales para el caso de suelos granulares, y menos aproximados para el caso de suelos cohesivos.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Ejecución del ensayo

El ensayo consiste en hincar un muestreador de tubo partido el cual debe cumplir con unas dimensiones establecidas (ver Figura 1), mediante la caída de un martillo de 140 lb (63.5 Kg) desde una altura normalizada de 30'' (76 cm), el montaje del sistema se puede observar en la Figura 2.

*Ingeniero Civil – Universidad Nacional de Colombia - cysorianoc@unal.edu.co

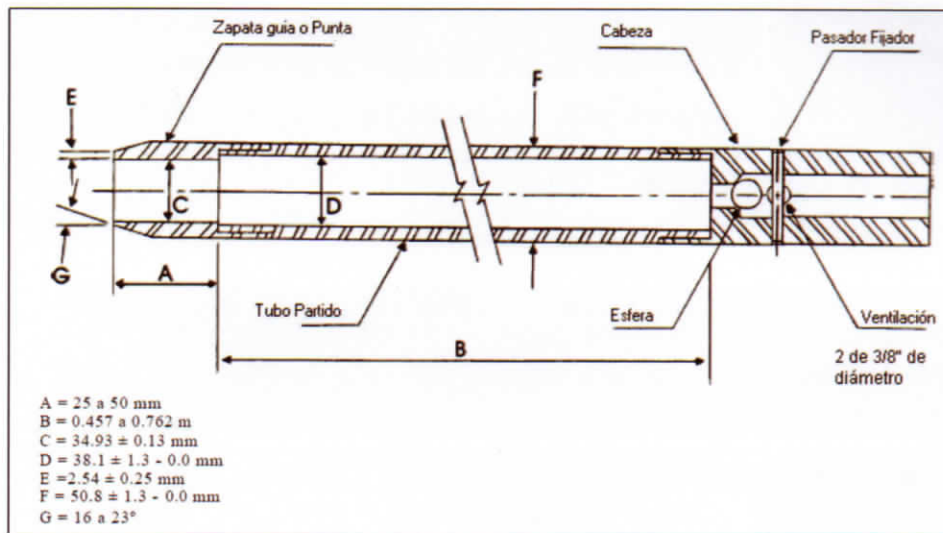


Figura 1. Muestreador de tubo partido.²

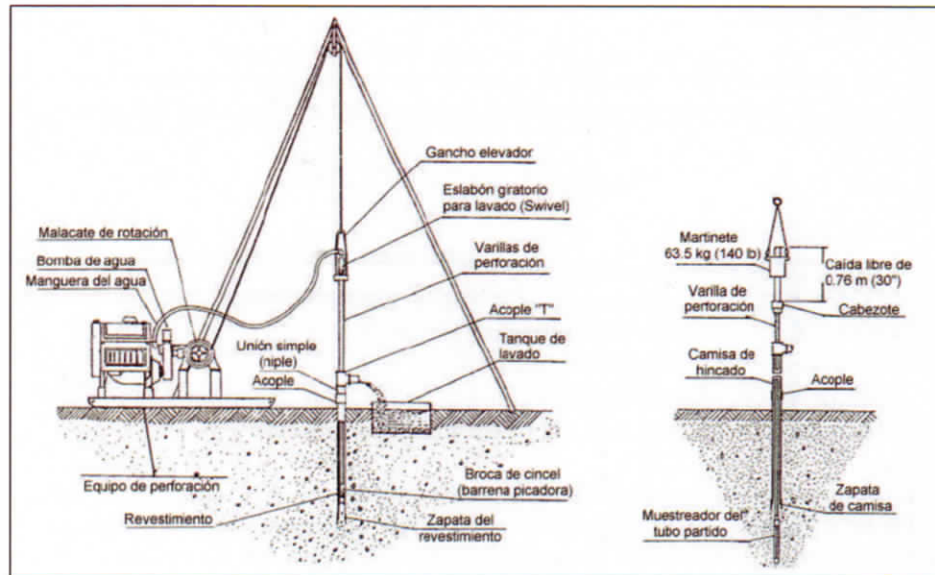


Figura 2. Montaje del equipo de perforación.³

El valor que se define como el N de campo es la suma de los golpes necesarios para avanzar 12'' (30 cm) de perforación y se expresa en golpes/pie, este valor corresponde a la suma de los dos últimos valores reportados en el tramo de 18'' (45 cm).

Por ejemplo, si se obtienen los siguientes resultados en una perforación:

² Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Norma INV E-111-07. Ensayo de penetración normal (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido. Bogotá D.C, 1996. p. 4.

³ Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Norma INV E-111-07. Ensayo de penetración normal (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido. Bogotá D.C, 1996. p. 6.

Profundidad (m)		N ₁	N ₂	N ₃	N _{CAMPO}
		golpes/pie	golpes/pie	golpes/pie	golpes/pie
0.00	- 0.45	4	7	9	16

Tabla 1. Ejemplo de reporte de datos de campo. Fuente: propia

El valor que se reporta en este caso es la suma de los dos últimos valores N₂+N₃ para un total de 16 golpes/pie.

El ensayo presenta unas condiciones de rechazo si:

- * No se han alcanzado 50 golpes en alguno de los incrementos de 6''
- * Cuando se han acumulado 100 golpes
- * Cuando no se observa avance del muestreador después de aplicar 10 golpes.

2.2 Factores de corrección

Los resultados del ensayo deben corregirse a partir de consideraciones que tienen en cuenta la energía, por lo tanto, el valor que se obtiene del N_{campo} debe incluir los siguientes factores :

$$N_{COR} = C_N * N_{CAMPO} * \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * \eta_4$$

Donde,

- N_{cor} = valor del N campo corregido
- C_N = factor de corrección dado por la sobrecarga efectiva del suelo
- n₁ = factor de corrección por energía del martillo
- n₂ = factor de corrección por longitud de la varilla
- n₃ = factor de corrección por resistencia interna del tomamuestras
- n₄ = factor de corrección por diámetro de la perforación

De acuerdo con la literatura disponible relacionada con el rema, los factores n₁, n₂, n₃ y n₄ se pueden asumir iguales a 1 y solo se efectuaría la corrección por confinamiento debido a que existen unas condiciones predeterminadas en campo bajo las cuales se realiza el ensayo, es decir, longitudes de varillas iguales o mayores a 10 metros y diámetros de perforación relativamente pequeños (60-120) mm. Sin embargo, existen correlaciones que requieren trabajar con diferentes energías de referencia, por lo que el factor n₁ se ajustará para fines del presente artículo.

2.2.1 Factor de corrección por energía

Este factor representa el rendimiento del impacto del martillo sobre el cabezal de golpeo, se define como:

$$n_1 = Er/E_{60}$$

⁴BOWLES J.E, Foundation analysis and design. 5th Ed. McGraw-Hill Book Co, 1997. p 158

Donde,

E_{60} es el valor de la energía de referencia base que usualmente es 60%
 E_r es el valor de la energía de referencia de la barra

En la Tabla 2 se observan los factores de corrección donde se observa que E_r varía de acuerdo con los equipos y su uso en diferentes países, en el caso de Colombia usualmente se trabaja con una E_r de 45%.

País	Energía de la barra (ER)	Factor de corrección para 60% ER
Japón	78%	78/60 = 1.30
EEUU	60%	60/60 = 1.00
Argentina	45%	45/60 = 0.75
China	60%	60/60 = 1.00

Tabla 2. Resumen de relaciones de energía⁵

Por ejemplo, si se requiere calcular un N de SPT para una energía del 45% el cálculo a realizar sería:

$$N_{45} = N \text{ campo} * 45/60$$

2.2.2 Factor de corrección por confinamiento

Existen diferentes propuestas para el cálculo de este factor de corrección, sin embargo la siguiente expresión propuesta por Liao y Whitman (1986)⁶, es la que se utiliza comúnmente, representa aproximadamente el promedio de dichas expresiones y es la más fácil de utilizar.

$$C_N = \left(\frac{95.76}{\sigma'_{vo}} \right)^{1/2}$$

Donde σ'_{vo} (kPa) es el esfuerzo efectivo vertical a la profundidad donde se desea obtener el valor del N corregido. En general se recomienda⁷ $C_N \leq 2.0$ por lo que para efectos del presente artículo cuando se obtengan valores superiores a 2.0 en este factor, se tomará este último con el fin de no incurrir en sobre estimaciones en los parámetros que se van a analizar.

2.3 Correlaciones con parámetros geotécnicos

La resistencia al corte drenada en suelos granulares se puede estimar a partir de las correlaciones que se presentan en la Tabla 3 y en la Tabla 4.

⁵ Fuente: LOPEZ M.R. Determinación in situ de propiedades ingenieriles de los suelos y su relación con el ensayo de penetración; Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional, 2003. p. 23.

⁶ BOWLES J.E. Foundation analysis and design. 5th Ed. McGraw-Hill Book Co, 1997. p 158

⁷ GONZALEZ A. J Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT. Bogotá D.C: X jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana. 1999. p 3.

Correlación	Referencia
$F' = 23,7 + 0,57N_{60} - 0.0006(N_{60})^2$	Meyerhof, 1965
$F' = 27,1 + 0,30N_{60} - 0.00054(N_{60})^2$	Peck, Hanson & Thornburn, 1974
$\phi' = \tan^{-1} \left[\frac{N_{60}}{32,5} \right]^{0,34}$	Schmertmann, 1975
$\phi' = \sqrt{20N_{60}} + 20$	Hatanaka & Uchida, 1996

Tabla 3. Correlaciones para estimar el ángulo de fricción en suelos granulares a partir del ensayo SPT

Tipo de suelo	Correlación (en kpa)	Referencia
Gravas	600(N+6) N ≤ 15	Bowles, 1996
	600(N+6)+2000 N > 15	
Arenas saturadas	250(N+15)	Bowles, 1996
Arenas (normalmente consolidadas)	500(N+15)	Bowles, 1996
Arenas	8*N ₆₀ *100	Schmertmann, 1970

Tabla 4. Correlaciones empíricas para estimar el módulo de Young (E) en diferentes tipos de suelo a partir del ensayo de SPT

3. EJEMPLO DE APLICACIÓN

A continuación se presentan los valores del N_{campo} de una perforación realizada para un proyecto de construcción de vivienda en el departamento de Santander. A partir de esta información se procederá a calcular los parámetros de resistencia con las correlaciones y factores anteriormente mencionados.

Perforación No.	Profundidad m			N ₁ g/pie	N ₂ g/pie	N ₃ g/pie	N _{CAMPO} g/pie
1	0.00	-	0.45	5	4	4	8
	0.45	-	0.90	3	5	7	12
	0.90	-	1.35	8	11	12	23
	1.35	-	1.80	11	15	16	31
	2.50	-	2.95	15	18	25	43
	2.95	-	3.30	9	12	R	R

Tabla 5. Valores del número de golpes para diferentes profundidades obtenidos a partir del ensayo de campo. Fuente: propia

En la Tabla 5 se presentan los valores que se obtuvieron en campo a partir de la perforación ejecutada; en la Tabla 1 se explica cómo se obtiene el valor del N_{campo} .

Con el N_{campo} como valor de entrada, se procede a calcular los parámetros de resistencia efectivos, en este caso ángulo de fricción y módulo de elasticidad.

PROFUNDIDAD			Prof.	Nivel Freático	N	σ'_{vo}	C_N	N	N_{70}	N_{60}
m			prom.	m	g/pie	KN/m ²	Liao y Whitman	corregido	g/pie	g/pie
0.00	-	0.45	0.23	-	8	4.05	2.00	16.00	5	6
0.45	-	0.90	0.68	-	12	12.15	2.00	24.00	8	9
0.90	-	1.35	1.13	-	23	20.25	2.00	46.00	15	17
1.35	-	1.80	1.58	-	31	28.35	1.84	56.97	20	23
2.50	-	2.95	2.73	-	43	49.05	1.40	60.08	28	32
2.95	-	3.30	3.13	-	R	56.25	1.30	R	R	R

Tabla 6. Ejemplo de cálculo de parámetros (parte 1). Fuente: propia

PROFUNDIDAD			ÁNGULO DE FRICCIÓN (F)°					Es(kPa)	
			Meyerhof, 1965	Peck, et al, 1974	Schmertmann, 1975	Hatanaka & Uchida, 1996	Promedio	Bowles 1968	Schmertmann 1970
m									
0.00	-	0.45	31	31	29	35	32	14045.5	9600.0
0.45	-	0.90	34	32	33	39	35	17318.2	14400.0
0.90	-	1.35	43	37	39	46	41	26318.2	27600.0
1.35	-	1.80	48	39	42	49	44	30807.6	34184.4
2.50	-	2.95	49	40	45	50	46	32078.8	36048.9
2.95	-	3.30	-	-	-	-	-	-	-
PROMEDIO							40	29734.9	32611.1

Tabla 7. Ejemplo de cálculo de parámetros (parte 2). Fuente: propia

Para complementar el ejemplo de aplicación se presenta el procedimiento detallado de cálculo de la primera fila.

- Profundidad promedio: $\frac{0,45 \text{ m} + 0,00 \text{ m}}{2} = 0,23 \text{ m}$
- Esfuerzo efectivo vertical: $\sigma'_{vo} = 0,23 \text{ m} \cdot 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 4,05 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Observación: para el cálculo del esfuerzo efectivo vertical se tomó un peso unitario promedio de 18kN/m³, el cual se obtiene a partir de los respectivos ensayos de laboratorio.

- Corrección por profundidad: $C_N = \left(\frac{95,76}{4,05}\right)^{1/2} = 4,86 > 2,0$ Se toma 2,0.
- Corrección del N: $N_{\text{corregido}} = 2,0 \cdot 8 \frac{\text{golpes}}{\text{pie}} = 16,0 \frac{\text{golpes}}{\text{pie}}$
- Valor de N para una energía^a del 70%: $N_{70} = 8 \frac{\text{golpes}}{\text{pie}} \cdot \left(\frac{45}{70}\right) = 5 \frac{\text{golpes}}{\text{pie}}$
- Valor de N para una energía del 60%: $N_{60} = 8 \frac{\text{golpes}}{\text{pie}} \cdot \left(\frac{45}{60}\right) = 6 \frac{\text{golpes}}{\text{pie}}$

Observación: Para el cálculo del N para energías del 70% y del 60% se tuvo en cuenta que el ensayo fue ejecutado en Colombia, por lo tanto, la energía de referencia es el 45% como aparece en el numerador de las anteriores expresiones, se procede a dividir por la energía que se desea obtener.

^aSe requiere realizar correcciones por energía dado que las expresiones propuestas por los diferentes autores fueron definidas para estos valores.

- Angulo de fricción, Meyerhof: $\phi' = 23,7 + (0,57 * 6,0 * 2,0) - 0,0006 * 6,0^2 = 31^\circ$
- Angulo de fricción, Peck: $\phi' = 27,1 + (0,30 * 6,0 * 2,0) - 0,00054 * 6,0^2 = 34^\circ$
- Angulo de fricción, Hatanaka y Uchida: $\phi' = (20 * 6 * 2)^{0,5} + 20 = 35^\circ$

Observación: Para el cálculo del ángulo de fricción por las tres anteriores metodologías, el valor de N60 se multiplica por el factor de corrección por profundidad CN, para el ejemplo de la primera fila de la Tabla 6 es 2,0.

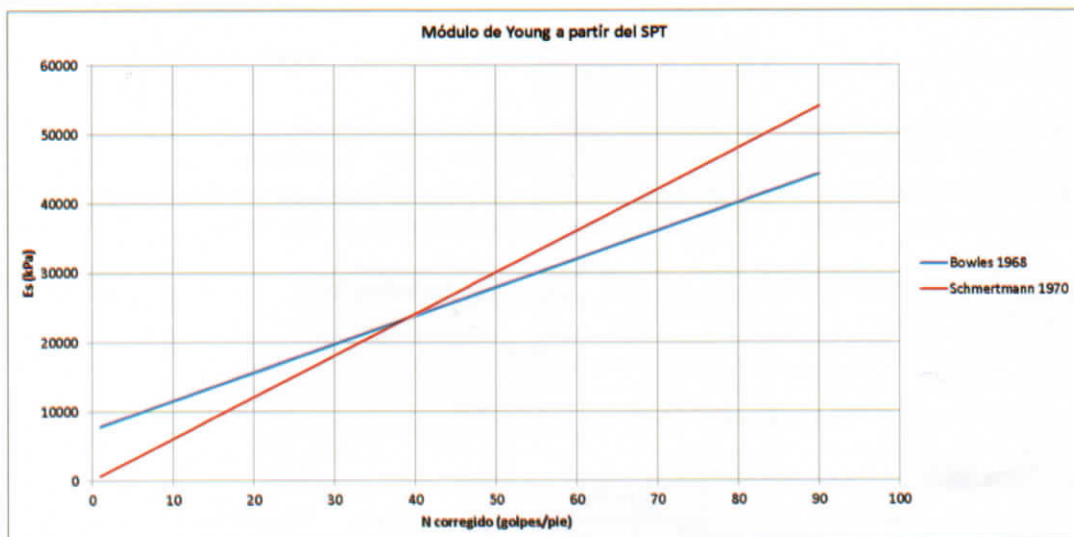
• Angulo de fricción, Schmertmann:
$$\phi' = \tan^{-1} \left[\frac{6}{32,5} \right]^{0,34} = 29^\circ$$

• Módulo de Young, Bowles:
$$E_s = \left(500 * \left(16 * \left(\frac{45}{55} \right) \right) \right) + 15 = 14045,5$$

• Modulo de Young, Schmertmann:
$$E_s = \left(8 * \left(16 * \left(\frac{45}{55} \right) \right) * 100 \right) + 15 = 9600,0$$

Observación: de acuerdo con las ecuaciones presentadas en la Tabla 3, el suelo con el que se trabajará es una arena normalmente consolidada para el caso de la ecuación propuesta por Bowles, esto se concluye a partir de la caracterización del suelo. El valor de N que se ingresa en las dos ecuaciones para el cálculo del módulo de elasticidad es el N corregido que ya incluye el factor CN, que para el ejemplo es 16 y se lleva a una energía del 55%, razón por la que se incluye el factor (45/55).

Finalmente se calculan los promedios para el ángulo de fricción y para el módulo de elasticidad, como se muestra en la Tabla 7, es importante aclarar que para el cálculo del promedio del módulo de Young se tuvo en cuenta la discrepancia de los valores que se obtuvieron entre las diferentes expresiones. En la gráfica 1 se muestra el comportamiento de las dos ecuaciones para diferentes valores de N corregido.



Gráfica 1. Representación del módulo de elasticidad en función del N corregido del SPT. Fuente: propia

Como se observa en la gráfica 1, para valores relativamente pequeños del $N_{\text{corregido}}$, el módulo de Young presenta variaciones significativas, a partir de 20 las dos ecuaciones comienzan a aproximarse y después de 60 comienzan nuevamente a divergir.

Por lo tanto, para el cálculo de los promedios se tomaron los resultados del $N_{\text{corregido}}$ entre este rango, de tal forma que se obtuvieran unos promedios a partir de datos que no presentaran mayor dispersión y obtener un valor representativo.

4. CONCLUSIONES

La metodología del SPT es bastante útil para la obtención de parámetros geotécnicos de resistencia y deformabilidad en suelos granulares y en suelos cohesivos, siendo esta más aproximada para el primer tipo de suelos.

Es necesario tener en cuenta que los parámetros que se calculan son aproximados y útiles para tener una idea inicial de las condiciones del suelo, sin embargo, se debe complementar con ensayos de resistencia en el laboratorio, tales como, triaxiales y cortes directos.

El ejemplo presentado en este artículo trata de reunir una metodología la cual se puede programar fácilmente en una hoja de cálculo; para el caso de la corrección por confinamiento se empleó una correlación y para el ángulo de fricción cuatro, teniendo presente que existen más propuestas por otros autores las cuales se pueden adicionar al ejemplo de cálculo.

BIBLIOGRAFÍA

LOPEZ M.R. Determinación in situ de propiedades ingenieriles de los suelos y su relación con el ensayo de penetración. Buenos Aires. Universidad Tecnológica Nacional, 2003. p. 23.

BOWLES J.E, Foundation analysis and design. 5th Ed. McGraw-Hill Book Co, 1997. p 158

GONZALEZ A. J Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT. Bogotá D.C: X jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana. 1999. p 3.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Norma INV E-111-07. Ensayo de penetración normal (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido. Bogotá D.C, 1996. p. 4, 6.

