

“MEDIDA DE LA ENERGÍA DEL ENSAYO SPT. CORRECCIONES A APLICAR.”

Albert Ventayol Lázaro⁽¹⁾ y Carlos Fernández Tadeo⁽²⁾

(1) Bosch & Ventayol Geoserveis SL
aventayol@boschiventayol.com – www.boschiventayol.com

(2) CFT & Asociados SL
carlos@fernandeztadeo.com – www.fernandeztadeo.com

INTRODUCCIÓN.

El ensayo SPT es uno de los más utilizados en el mundo de la geotecnia, aunque la variabilidad de sus resultados para un mismo material, depende en parte del equipo utilizado y de la corrección en la metodología. Por esta razón, es necesario que las empresas dedicadas a los sondeos y los estudios geotécnicos, calibren sus equipos a partir de la medida de la energía real empleada en el ensayo.

Bosch & Ventayol Geoserveis SL, en colaboración con la empresa CTF y Asociados SL, ha calibrado sus equipos de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 22476-3:2.006, tal como se describe en el este artículo.

Se presentan los resultados obtenidos, y se analizan el resto de correcciones que hay que aplicar al valor SPT N de campo, antes de utilizarlo en correlaciones y fórmulas. Hace años que se conoce la necesidad de estas correcciones, pero de momento, en España, sólo unas pocas empresas las aplican, con la ineficiencia económica que ello supone en el diseño de la obra.

EL ENSAYO SPT

El ensayo SPT consiste, de manera muy simple, en la introducción en el fondo de un sondeo geotécnico, de un tomamuestras normalizado, unido a un tren de varillas, mediante el golpeo en la cabeza de ellas, de una maza de 63.5 kg de peso, que cae desde una altura de 76 cm. El golpeo se contabiliza en tres tramos de 15 cm de avance cada uno, denominándose valor N a la suma de los dos últimos valores.

El ensayo SPT es uno de los más antiguos en geotecnia, y su uso universal y durante décadas, en todo tipo de terrenos, ha permitido establecer numerosas correlaciones con otros parámetros geotécnicos, así como cálculos directos de capacidad portante y asentamientos, ente otros.

Inicialmente, el sistema de elevación y caída de la maza era de tipo manual, mediante un sistema de poleas y cuerdas. Evidentemente la energía de golpeo que suministraba este método, no correspondía al 100% de energía teórica de una caída totalmente libre, ya que las pérdidas por rozamiento y otros factores, restaban parte de la energía teóricamente disponible.

Esta energía teórica es de $63.5\text{kg} \cdot \text{gravedad} \cdot 0.76\text{m} = 47.3 \text{ kg} \cdot \text{m} = 0.473 \text{ kN} \cdot \text{m} = 473 \text{ J}$.

Diversos estudios efectuados a lo largo del tiempo (Seed et al., 1985; Skempton, 1986; Cestari, 1990), han demostrado que los SPT realizados con el método antiguo (en uso en España al menos hasta 1.990), desarrollan una energía del orden del 60% de la teórica.

A partir de la fecha citada, empezaron a utilizarse sistemas automáticos de elevación y caída, con lo que el rendimiento de la energía aumentó, ya que se eliminaron parte de la fricción y otras pérdidas existentes con anterioridad.

En cualquier caso, para el cálculo de correlaciones con otros parámetros geotécnicos, se continúan aplicando las mismas fórmulas desarrolladas con el método antiguo que proporciona el 60% de la energía.

Resulta pues evidente, que si los SPT modernos dan mayor energía, el golpeo N resultante debe corregirse por un factor de energía, de manera que se obtenga un valor SPT normalizado, $N_{60\%}$ de manera que:

$$N_{60\%} = N \cdot E_r / 60,$$

siendo E_r el porcentaje de energía de golpeo obtenida con los métodos automáticos y N el valor SPT de campo.

Bosch & Ventayol Geoserveis SL, fue una de las primeras empresas españolas en disponer en 1990, de un equipo de golpeo SPT automático, y desde aquel momento ha sido consciente de la necesidad de aplicar dicha corrección (Ventayol, 1999).

Existen también otras correcciones al valor SPT, por factores como longitud de varillaje, presencia o no de camisa interior metálica, y por el grado de confinamiento, todas ellas recogidas por McGregor y Duncan (1998), así como en la nueva norma UNE EN ISO 22476-3:2006, y que trataremos más adelante.

Utilizando los métodos propuestos por Skempton (1.986), Bosch & Ventayol Geoserveis SL dedujo ya en 1.994 que la energía suministrada por el equipo SPT automático instalado en nuestras máquinas Rolatec, debía ser del orden del 75% de la teórica, con lo que la corrección a aplicar, por el concepto energía es de:

$$N_{60\%} = N \cdot 75 / 60 = 1.25 \times N$$

En definitiva, hace ya más de 15 años, que nuestra empresa utiliza en sus informes geotécnicos esta corrección por energía, así como las otras aplicables al ensayo SPT.

Faltaba sin embargo, comprobar directamente el valor de la energía realmente aplicada en el ensayo SPT.

MEDICIÓN DE LA ENERGÍA DEL SPT.

Fruto de la colaboración entre Bosch & Ventayol Geoserveis, y la empresa CFT & Asociados, durante los últimos años se han podido efectuar ensayos directos sobre dos máquinas de sondeo Rolatec, de forma similar a recientes investigaciones (Sjoblom et al., 2007; Biringer and Davie, 2008).

La firma CFT & Asociados dispone de un equipo Analizador de Hinca de Pilotes (Pile Driving Analyzer, PDA), de la firma americana Pile Dynamics, Inc. Este equipo está debidamente calibrado por el fabricante, a través de entidades reconocidas por ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation) donde también está ENAC, y por lo tanto tienen reconocimiento mutuo en España.

Paralelamente se ha instrumentado una varilla de perforación (ver figura 1), que también fue equipada por Pile Dynamics con unos acelerómetros y unos extensímetros. Todos estos elementos están también debidamente calibrados.

Conociendo además el módulo de Young de la varilla instrumentada y su sección transversal, el equipo PDA permite conocer la energía real transmitida por los equipos automáticos de golpeo de las sondas (ver figura 2).

Durante los últimos tres años, mediante el convenio de colaboración entre Bosch & Ventayol, y CFT & Asociados, se han realizado 42 determinaciones de la energía de golpeo SPT, en dos máquinas de sondeo.

La primera medida se efectuó el 9 de julio de 2.008 y la última el 14 de mayo de 2.010, tal como se observa en la tabla de la figura 2. Los resultados obtenidos se han representado según si el terreno es arcilloso o granular, y también en función de la profundidad de ejecución del ensayo SPT.

Tal como se observa en las gráficas correspondientes, los valores de energía varían también en función de la profundidad.



Figura 1. A la izquierda varilla instrumentada para la medida de energía del SPT en nuestra sonda Rolatec RL-400. Arriba, el equipo PDA (Pile Driving Analyzer).

nº ensayo	sondeo	fecha	profundidad (m)	N SPT	Tipo de Suelo Granular/ Cohesivo	Er Energía media (Kn*m)	Coefficiente de variación	Relación de energía (%)
1	S2	09/07/2008	12,5	23	G	0,395	0,023	83,4
2	S2	09/07/2008	14,0	20	G	0,405	0,031	85,6
3	S3	24/07/2008	8,0	14	C	0,397	0,045	83,8
4	S3	24/07/2008	9,5	14	C	0,425	0,042	89,9
5	S3	24/07/2008	16,2	100	G	0,383	0,059	80,9
6	S3	24/07/2008	17,0	100	G	0,403	0,039	85,1
7	S1	09/02/2009	9,5	100	G	0,364	0,04	77,1
8	S2	09/02/2009	6,5	100	G	0,377	0,049	79,8
9	S2	09/02/2009	8,0	100	G	0,392	0,051	82,8
10	S1	10/06/2009	6,5	9	G	0,343	0,032	72,5
11	S1	10/06/2009	11,0	9	G	0,352	0,05	74,4
12	S1	10/06/2009	12,5	8	G	0,356	0,049	75,3
13	S1	10/06/2009	15,5	12	G	0,388	0,047	82
14	S3	11/06/2009	2,0	100	G	0,306	0,091	64,7
15	S3	11/06/2009	3,5	7	G	0,328	0,038	69,3
16	S3	11/06/2009	5,0	8	G	0,344	0,046	72,7
17	S3	11/06/2009	6,5	11	G	0,351	0,067	74,1
18	S3	11/06/2009	8,0	6	G	0,388	0,155	82
19	S3	11/06/2009	9,5	7	G	0,372	0,09	78,7
20	S3	11/06/2009	11,0	15	G	0,385	0,157	81,5
21	S3	08/07/2009	3,5	48	C	0,401	0,142	84,9
22	S3	08/07/2009	4,8	79	C	0,343	0,087	72,5
23	S3	08/07/2009	6,5	100	C	0,342	0,075	72,3
24	S3	08/07/2009	8,0	100	C	0,348	0,064	73,5
25	S4	09/07/2009	2,0	8	C	0,297	0,051	62,8
26	S4	09/07/2009	3,5	100	C	0,316	0,092	66,8
27	S3	16/07/2009	8,0	100	C	0,358	0,076	75,6
28	S3	16/07/2009	9,5	100	C	0,359	0,062	75,9
29	S3	16/07/2009	11,0	100	C	0,361	0,069	76,4
30	S3	16/07/2009	12,6	100	C	0,349	0,059	73,9
31	S4	16/07/2009	5,0	100	C	0,348	0,149	73,6
32	S7	04/11/2009	11,0	46	C	0,369	0,054	78

33	S3	04/11/2009	2,0	35	C	0,296	0,085	62,5
34	S3	04/11/2009	5,0	22	C	0,351	0,088	74,1
35	S3	04/11/2009	8,0	30	C	0,353	0,063	74,6
36	S3	04/11/2009	11,0	24	C	0,376	0,132	79,6
37	S3	04/11/2009	17,0	30	C	0,354	0,139	74,9
38	S3	04/11/2009	20,0	38	C	0,273	0,136	57,7
39	S3	04/11/2009	23,0	44	C	0,301	0,116	63,5
40	S1	14/05/2010	10,3	4	C	0,351	0,053	74,1
41	S1	14/05/2010	14,3	26	G	0,353	0,048	74,6
42	S1	14/05/2010	15,8	11	G	0,342	0,055	72,3

Figura 2. Relación de ensayos SPT con medida de la energía.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

Bosch & Ventayol Geoserveis SL utiliza desde 1.994, en sus trabajos geotécnicos, las diferentes correcciones que se deben aplicar al valor N del ensayo SPT, siendo prácticamente la primera empresa de España en efectuar dichas correcciones. Estas correcciones incluían ya una por efecto de la energía derivada del uso, también pionero en el país, de dispositivos automáticos de elevación y caída de la maza.

Mediante la colaboración de las empresas Bosch & Ventayol Geoserveis SL, y CFT & Asociados, desde 2.008 se han implementado medidas reales de la energía de golpeo SPT, con el uso de varillas instrumentadas con acelerómetros y extensímetros de medida de la deformación, en combinación con un equipo Pile Driving Analyzer, de Pile Dynamics Inc.

La conclusión de los ensayos realizados sobre nuestras máquinas de sondeo Rolatec RL-48C, y Rolatec RL-400, son:

-En suelos granulares, la energía medida crece desde el 65% de la teórica a 2.0 m de profundidad, a valores del 75% hacia los 6.0 m de profundidad, situándose en el entorno del 80% a partir de los 10 m (ver figura 3).

-En suelos cohesivos los resultados son parecidos, si bien a partir de 20 m de profundidad, la energía parece descender, si bien en esta franja de profundidades se dispone de sólo 2 medidas (ver figura 3).

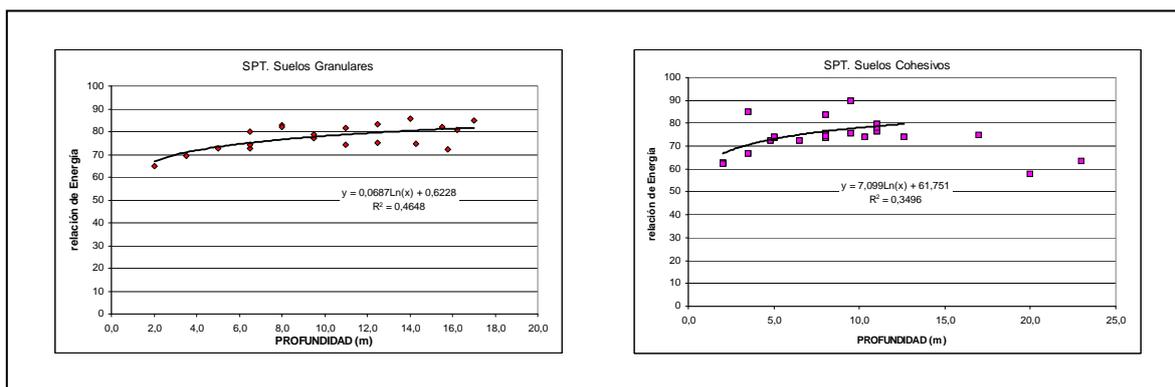


Figura 3. Valores de relación de energía en función de la profundidad para suelos granulares y para suelos cohesivos.

Vale la pena mencionar que un valor del 75% es el mismo que ya fue deducido por nuestra empresa en 1994 siguiendo los métodos analíticos propuestos por Skempton (1986).

CONCLUSIONES

Según la norma actual del SPT, UNE-EN ISO 22476-3:2006, el valor N de campo obtenido en el SPT, debe sufrir la siguiente corrección:

$$N_{60\%} = N \cdot (Er/60) \cdot a \cdot s \cdot Cn$$

Er= factor de energía como se ha expuesto anteriormente.

a=factor de corrección por pérdidas de energía debidas a la longitud del varillaje, en arenas

Cn= factor de corrección por tensión vertical debida a la sobrecarga del terreno, en arenas.

s= factor de corrección por presencia o no de camisa interior.

A partir de la medición de la energía real del ensayo SPT en 2 sondas Rolatec RL-400 y RL-48, mediante la ejecución de 42 ensayos, se ha obtenido que el factor de corrección por energía a aplicar sobre el valor N de campo es, tal como especifica la norma UNE EN ISO 22476-3:2.006, de:

Er/60 = 80/60= 1.33xN para ensayos SPT a partir de 10 m de profundidad.

Er/60= 75/60= 1.25xN para ensayos SPT entre 6-10 m de profundidad.

Er/60= 65/60= 1.10xN para ensayos SPT entre 2-6 m de profundidad.

En nuestra opinión, si se adoptan los anteriores valores, no sería necesario aplicar la corrección de pérdidas de energía por longitud de varillaje inferior a 10 m (a), que expone la norma UNE-EN-ISO-3:2006, ya que ello sería una redundancia.

Alternativamente, puede aplicarse la corrección con el factor multiplicador máximo de 1.33, y a continuación imponer la corrección (a) por longitud de varillaje inferior a 10 m, tal como especifica la norma:

Longitud de varilla	Factor de corrección, a
>10 m	1.0
6 a 10 m	0.95
4 a 6 m	0.85
<4 m	0.75

La siguiente corrección al valor SPT de campo, que está claramente expuesta en la norma, pero que casi nadie emplea en España, es la debida a que casi todos los tomamuestras SPT fabricados y utilizados aquí, no disponen de la camisa interior de zinc, que sí utilizaba Terzaghi (1948). En consecuencia, la muestra tiene menor dificultad en entrar en el tomamuestras, lo que reduce el glopeo.

Según la Norma vigente, hay que aplicar un valor multiplicador mínimo de s=1.1, que podría aumentar a 1.2 según la bibliografía.

En definitiva, asumiendo que en las sondas Rolatec ensayadas el factor de corrección por energía es de 1.33, el valor final corregido $N_{60\%}$, es de

$N_{60\%} = 1.46$ para ensayos a más de 10 m de profundidad

$N_{60\%} = 1.1$ a 1.4 para ensayos a menos de 10 m de profundidad

Finalmente, y a efectos de comparación de resistencia entre suelos a distintas profundidades, existe una última corrección debido a la sobrecarga del terreno, Cn, y que según la Norma es de 1.0 para tensiones verticales efectivas, a nivel de ensayo SPT, de 1.0 kg/cm², aumentando hasta 1.5 en ensayos con tensiones menores, y disminuyendo hasta 0.4-0.5 a profundidades que generen tensiones verticales efectivas de 4.0 kg/cm².

A efectos prácticos, puede adoptarse la relación (ver Norma):

$C_n=(98/p')^{0.5}$ siendo p' (en kPa)= tensión vertical efectiva a la profundidad del ensayo

Así pues, la aplicación de la normativa actual del ensayo SPT, implica la necesidad de hacer una medida real de la energía librada por el dispositivo de golpeo de cada sonda. Experiencias efectuadas en los últimos años, determinan que aún utilizando dispositivos automáticos, con peso de la maza y altura de caída correctos, los valores de energía medidos, difieren según modelos y marcas.

En cumplimiento de la norma, cada empresa dedicada a las investigaciones in situ, debería seguir un procedimiento similar al aquí expuesto, para calibrar sus equipos, ya que el factor de corrección de energía depende del tipo de máquina y del sistema de caída de la maza del SPT.

Finalmente debe observarse la necesidad de hacer estas correcciones, que generalmente, y salvo que se actúe a grandes profundidades, implican la aplicación de un coeficiente final superior a la unidad, por lo que de no hacerlas, se infravalora la resistencia correcta del terreno, con la ineficiencia económica que ello conlleva, en cuanto al coste que implica un sobredimensionado de cimentaciones u otros elementos estructurales.

REFERENCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). (2010) "Standard test method for stress wave energy measurements for dynamic penetrometer testing systems (D 4633-10)". Annual Book of Standards. Philadelphia.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). (2008). "Standard Method for Penetration Test and Split Barrel Sampling of Soils (D1586-08a)". Annual Book of Standards. Philadelphia.
- BIRINGEN, E, DAVIE, J. (2008). "Assessment of Energy Transfer Ratio in SPT Using Automatic Hammers". Geocongress 2008: Characterization, Monitoring, and Modeling of Geosystems (GSP 179) pg 356-363.
- CESTARI, F (1990). "Prove Geotechniche in sito". E. Geo-Graph, Segrate.
- MCGREGOR, J.A., DUNCAN, J.M. (1998) "Performance and Use of the Standard Penetration Test in Geotechnical Engineering Practice". Report of a study performed by Virginia Tech Center for Geotechnical Practice and Research. 134 pg.
- NORMA UNE-EN ISO 22476-3:2006. (2006) Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de campo. Parte 3: ensayo de penetración estándar.
- SJOBLUM, D., BISCHOFF, J., COX, K. (2007) "SPT energy measurements with PDA". http://www2.dot.ca.gov/hq/esc/geotech/gg/geophysics2002/063sjoblum_sptpda_report_final.pdf
- SKEMPTON, A.W. (1986), "Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation". Geotechnique 36, nº 3, pp. 425-447.
- SEED, H.B., TOKIMATSU, K., HARDER, L.F., CHUNG, R.M. (1985). "Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations." ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 111 (12): 1425-1445,.
- TERZAGHI, K., PECK, B. G., MESRI, G. (1948). "Soil mechanics in engineering practice". New York: Wiley.
- VENTAYOL, A. (1999): "Proposta de Correcció del Resultat de l'Assaig SPT. Efecte de la Utilització de Mètodes Automàtics de Colpeig." Asssociació Catalana d'Empreses de Sondeigs i Estudis Geotècnics (ACESEG). Butlletí nº 3.