

Los ensayos SPT y la calibración de los equipos

Medida de la energía del ensayo SPT. Correcciones a aplicar

En este artículo se presentan los resultados obtenidos en la calibración de los equipos utilizados para los ensayos SPT y se analizan el resto de correcciones que hay que aplicar al valor *N* del SPT 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 las cimentaciones.

Palabras clave: CAÍDA, CALIBRACIÓN, CORRECCIÓN, ENERGÍA DE GOLPEO, ENSAYO SPT, INSTRUMENTACIÓN, MAZA, PARÁMETRO, PROFUNDIDAD, SONDEO.

 **Albert VENTAYOL LÁZARO⁽¹⁾, Geólogo;**
y Carlos FERNÁNDEZ TADEO⁽²⁾, ICCyP.

(1) BOSCH & VENTAYOL GEOSERVEIS, S.L. (www.boschiventayol.com)
(2) CFT & ASOCIADOS, S.L. (www.fernandeztadeo.com)

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, S.L., en colaboración con la empresa CFT & Asociados, S.L., ha calibrado sus equipos de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 22476-3:2.006, tal como se describe en este artículo.

El ensayo SPT

El ensayo SPT consiste 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 con una maza de 63,5 kg de masa, cayendo desde una altura de 76 cm. El golpeo se contabiliza en tres o cuatro tramos de 15 cm de avance cada uno, denominándose valor *N* a la suma de los valores segundo y tercero.

Este ensayo 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 la difusión de fórmulas empíricas para cálculos directos de capacidad portante y asentamientos, entre otros.

Inicialmente, el sistema de elevación y caída de la maza era de tipo manual, mediante un sistema de cabrestante, 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:
 $63,5 \text{ kg} \cdot g \cdot 0,76 \text{ m} = 473 \text{ Nm} = 473 \text{ J}$.

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 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, denominado N_{60} .

De este modo: $N_{60} = N \cdot Er/60$ siendo *Er* el porcentaje de energía de golpeo obtenida con los métodos automáticos y *N* el valor SPT medido en campo.

Bosch & Ventayol Geoserveis, S.L. fue una de las primeras empresas españolas en disponer (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 variados 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 se tratará más adelante.

Utilizando los métodos propuestos por Skempton (1.986), Bosch & Ventayol Geoserveis, S.L. 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 sería de:

$$N_{60} = N \cdot 75/60 = 1,25 \cdot N$$

En definitiva, hace ya más de 15 años que Bosch & Ventayol utiliza en sus informes geotécnicos esta corrección por energía, así como las otras aplicables al ensayo SPT. Falta, 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; Biringen and Davie, 2008).

CFT & Asociados dispone de un equipo Analizador de Hincas 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 la entidad española ENAC, y por lo tanto dispone de reconocimiento en España.

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



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

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 (Fig. 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 Fig. 2. Los resultados obtenidos se han representa-

do según si el terreno es arcilloso o granular, y también en función de la profundidad de ejecución del ensayo SPT.

Análisis de los resultados obtenidos

Bosch & Ventayol 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

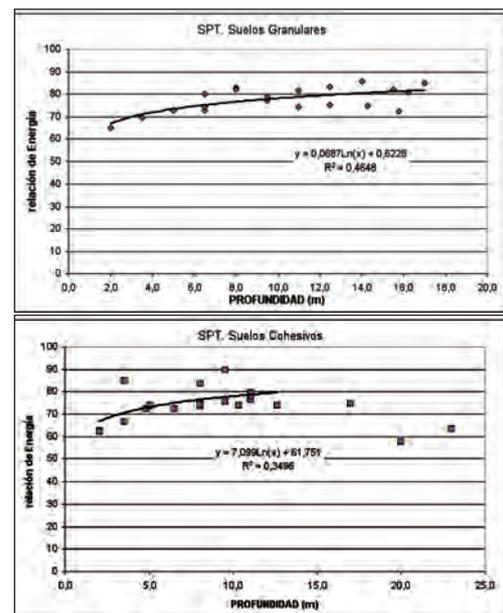
nº ensayo	sondeo	fecha	profundidad (m)	N SPT	Tipo de Suelo Granular/ Cohesivo	Er Energía media (KJ/m)	Coefficiente de variación	Relación de energía (%)
1	S2	09/07/2008	12,5	23	G	0,395	0,023	83,4
2	S2	09/07/2008	14,0	20	G	0,405	0,031	85,6
3	S3	24/07/2008	8,0	14	C	0,397	0,045	83,8
4	S3	24/07/2008	9,5	14	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	10/08/2009	6,5	9	G	0,343	0,032	72,5
11	S1	10/08/2009	11,0	9	G	0,352	0,05	74,4
12	S1	10/08/2009	12,5	8	G	0,356	0,049	75,3
13	S1	10/08/2009	15,5	12	G	0,388	0,047	82
14	S3	11/08/2009	2,0	100	G	0,308	0,081	64,7
15	S3	11/08/2009	3,5	7	G	0,328	0,038	69,3
16	S3	11/08/2009	5,0	8	G	0,344	0,048	72,7
17	S3	11/08/2009	6,5	11	G	0,351	0,067	74,1
18	S3	11/08/2009	8,0	6	G	0,388	0,155	82
19	S3	11/08/2009	9,5	7	G	0,372	0,08	78,7
20	S3	11/08/2009	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	0,369	0,082	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	S8	04/11/2009	2,0	35	C	0,298	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.

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

Las conclusiones de las medidas realizadas sobre las máquinas de sondeo Rolatec RL-48C y Rolatec RL-400 son las siguientes:

- En suelos granulares, la energía medida crece desde el 65% de la teórica a 2 m de profundidad, hasta valores del 75% hacia los 6 m de profundidad, situándose en el entorno del 80% a partir de los 10 m (Fig. 3).
- En suelos cohesivos los resultados son parecidos, aunque a partir de 20 m de profundidad la energía parece descender, si bien en esta franja de profundidades se dispone sólo de 2 medidas (Fig. 3).



[Fig. 3].- Valores de relación de energía en función de la profundidad para suelos granulares (arriba) y para suelos cohesivos (abajo).

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

Conclusiones

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

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

Donde:

- 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 de 42 ensayos **SPT** en dos sondas **Rolotec RL-400** y **RL-48** se ha estimado que el factor de corrección por energía a aplicar sobre el valor **N** de campo obtenido con las citadas sondas es, tal como especifica la citada norma **UNE EN ISO 22476-3:2.006**, el siguiente:

- $Er/60 = 80/60 = 1,33 \cdot N$, para ensayos **SPT** a partir de 10 m de profundidad.
- $Er/60 = 75/60 = 1,25 \cdot N$, para ensayos **SPT** entre 6 m y 10 m de profundidad.
- $Er/60 = 65/60 = 1,10 \cdot N$, para ensayos **SPT** entre 2 m y 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 en España emplea, 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 de entrar en el tomamuestras, lo que reduce el golpeo.

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 *Rolotec* ensayadas, el factor de corrección por energía es de 1,33, el valor final del factor de corrección por los primeros factores es de:

- 1,46, para ensayos a más de 10 m de profundidad.

- de 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**, que según la Norma **UNE-EN** es de 1,0 para tensiones verticales efectivas, al nivel del punto ensayado, de 100 kPa (1,0 kp/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 400 kPa (4,0 kp/cm²).

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

$$Cn = (98/p')^{0,5}$$

siendo **p'** (en kPa) la tensión vertical efectiva a la profundidad de 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 de sondas de perforación.

En cumplimiento de la norma, cada empresa dedicada a las investigaciones *in situ* debería calibrar sus equipos siguiendo un procedimiento similar al aquí expuesto, 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 corrector 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 y otros elementos estructurales.

Referencias

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND 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 AND 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/geophysics2002/063sjoblom_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**. *Associació Catalana d'Empreses de Sondeigs i Estudis Geotècnics (ACESEG)*. *Butlletí* nº 3.

BOSCH & VENTAYOL GEOSERVEIS, S.L.
 Rocafort, 261 • 08029 Barcelona
 ☎: 935 408 542 • Fax: 935 408 539
 E-mail: info@boschiventayol.com
 Web: www.boschiventayol.com

CFT & Asociados, S.L.
 Rosellón, 340 • 08025 Barcelona.
 ☎: 932 076 630 • Fax: 932 076 665
 E-mail: info@fernandeztadeo.com
 Web: www.fernandeztadeo.com