

## Medición de energía en ensayos SPT

Emerson Figueroa Flores(1); Miguel Angel Jaramillo Bopp(2)

(1) *Ingeniero Civil Geotécnico, Endesa Chile*

(2) *Ingeniero Civil Geotécnico, Endesa Chile*

*e-mail: eff@endesa.cl, mjb@endesa.cl*

### Resumen

Para el desarrollo de un proyecto eólico para 52 aerogeneradores, ubicado a unos 10 km al Norte de la ciudad de Lebu, cercano a la costa y sobre depósitos de arena con nivel freático cercano a la superficie, se desarrolló una campaña de prospecciones con ensayos SPT y medición de energía con el objeto de evaluar el potencial de licuación del subsuelo.

Como parte de estos estudios, se realizaron sondajes con medición continua del ensayo SPT con un martillo Tipo Dona. Como es conocido, este tipo de martillo genera gran incertidumbre respecto al porcentaje de energía que entrega al sistema de barras, siendo por lo general el que menos energía transmite y el más usado en proyectos de ingeniería, por lo tanto, se realizaron ensayos de medición de energía con el equipo SPT Analyzer de PDI a cada ensayo ejecutado, además, se realizó un estricto control del equipo y procedimiento de ejecución de acuerdo a la norma ASTM D 1586 y D 6066.

De los análisis se determinó que la energía promedio transmitida fue de 57,5% con una desviación estándar promedio de 3,7%.

Se concluyó que a pesar de que se hizo un estricto control del cumplimiento de la norma ASTM en cuanto al equipo y procedimiento de ejecución, con dificultad se alcanzó el valor estándar habitualmente usado en las metodologías de cálculo, correspondiente al supuesto de un 60% de eficiencia. Esto hace suponer que en trabajos similares, sin inspección calificada, ni contratistas idóneos, ni equipos calibrados, las eficiencias en la energía entregada puede ser tan baja que puede llegar a valor del 40% o menos incluso.

La consecuencia de las mediciones SPT, con muy baja eficiencia y sin medición de energía, puede llevar a determinar parámetros mejores que los reales, produciendo diseños subestimados y poniendo en riesgo la estabilidad de las estructuras.

*Palabras-Clave: SPT, Licuación, Ensayos de Medicion de Energia*

### Abstract

For the development of Wind Farm project for 52 wind turbines, located about 10 km north of the Lebu City and near the sea about sand deposits with near surface water table. Geotechnical studies program was developed with SPT tests and energy measurement in order to evaluate the potential for subsurface liquefaction.

As part of these studies, borehole were made with continuous measurement of SPT test, with Donnut hammer type. As is known, this type of hammer produces great uncertainty regarding the percentage of energy delivered to the test, being usually less energy transmitted and the most widely used in engineering projects, thus energy measurement tests were conducted with SPT Analyzer PDI for each test run, also strict control of equipment and execution procedure according to ASTM D 1586 and D 6066 was performed.

From the analysis it was determined that the average transmitted energy was 57.5% with an average standard deviation of 3.7%.

It was concluded that although were perform a quality control of the ASTM standard, regarding equipment and procedure implementation, with difficulty the standard value commonly used in the calculation methodologies, corresponding to the assumption of a 60% efficiency, was achieved. This suggests that similar work without inspection qualified or suitable contractors or calibrated equipment, energy efficiencies delivered can be as low value that can reach 40% or even less.

The result of the SPT measurements with very low efficiency, without energy measurement, can lead to determine better parameters than the real, making understated designs and threatening the stability of structures.

Keywords: SPT Test, Licuefaction, Energy measurement test

## 1 Introducción

El ensayo SPT es una de las mediciones geotécnicas más usadas a nivel mundial, a través del cual son correlacionados múltiples parámetros del suelo. La norma ASTM D1586 [1] describe en detalle el proceso de ejecución y los equipos necesarios para su desarrollo, a modo de resumen el ensayo SPT consiste en la introducción en el fondo de un sondeo geotécnico de una zapata seguido de un muestreador normalizado (tipo cuchara partida) el cual es unido a barras hasta alcanzar la superficie del terreno y se procede al golpeteo mediante un martillo de masa 63,5 kg, el cual cae desde una altura de 76 cm. El golpeteo se contabiliza en tres tramos de 15 cm de avance cada uno, totalizando 45 cm. Se denomina al valor N, a la suma del número de golpes de los últimos 30 cm de avance por cada medición. En este documento se denomina ensayo SPT al conjunto de mediciones.

En la actualidad existen tres tipos de martillos que pueden ser utilizados: *Donut Hammer*, *Safety Hammer* y *Automatic Hammer*, siendo el primero de estos el más utilizado por las empresas de sondajes en Chile, aunque éste junto con el segundo son los que más problemas de ejecución presentan, debido a que depende en gran medida del operador del ensayo, por lo que el golpeteo del martillo no se mantiene constante a través del ensayo.

Como se sabe, el valor N de campo debe ser transformado a  $N_{60}$  para ser utilizado en la interpretación de los parámetros de resistencia del suelo en estudio. De acuerdo a la norma ASTM D6066 [2], esto es realizado a través del factor de corrección  $C_E$  que representa la proporción de energía transmitida, con respecto a la teórica, normalizada a un 60% de eficiencia. De la literatura técnica, Youd, T. L. et al. [3], se conoce que este valor tiene un rango de 0,5 a 1,0 para *Donut Hammer*, a modo de ejemplo, si se obtiene un valor N de campo de 20 golpes/pie, el valor  $N_{60}$  estaría entre 10 a 20 golpes/pie.

Debido a la incertidumbre con respecto a la energía que realmente es transmitida en un ensayo de SPT con *Donut Hammer*, y por consiguiente cual valor de  $C_E$  debe ser utilizado, fueron realizados ensayos de medición de energía de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM D4633 [4], mediante el equipo SPT Analyzer de la empresa Pile Dynamics Inc. (PDI), en un estudio geotécnico con fines de cimentación de aerogeneradores, donde existía la probabilidad de licuación de suelos. Este estudio se realizó en el borde costero de la VIII Región, al sur de Chile.

## 2 Normalización del valor de N medido en terreno

Como se ha mencionado, se denomina al valor N, a la suma del número de golpes de los últimos 30 cm de avance en la medición. El método de izaje y caída del martillo de 63,5 kg para el *Donut Hammer* es manual, el cual consiste principalmente de un sistema de poleas y cuerdas.

Evidentemente la energía del golpe que suministra este método no corresponde al 100% de la energía teórica producto de una caída totalmente libre ( $E_t$ ), debido principalmente a las pérdidas producidas por rozamiento o fricción del sistema de izaje y a la manipulación que realiza el operador que ejecuta el ensayo.

La energía teórica producto de una caída totalmente libre ( $E_t$ ) es de 0,476 kN m, tal como se indica en la Ec. (1). Esta energía representa la máxima energía que puede ser generada en un equipo de SPT.

$$E_t = 63,5 \text{ kg} \times 9,81 \text{ g} \times 0,76 \text{ m} = 476 \text{ N m} = 0,476 \text{ kN m} \quad (1)$$

Estudios efectuados por Terzaghi, et al. [5], han demostrado que la mayoría de los ensayos realizados, desarrollan una energía del orden del 60% de la teórica. Por lo tanto, muchas correlaciones de parámetros de suelo han sido propuestas a partir de esta energía, lo que hace necesario normalizar los valores de N a  $N_{60}$ . De acuerdo a la Norma ASTM D6066 [2], esta normalización puede ser ejecutada a través de la Ec. (2), la cual establece:

$$N_{60} = N \times C_E = N \times \frac{ETR}{0,60} = N \times \frac{EMX}{0,60 \times E_t} \quad (2)$$

Donde:

$N_{60}$  : Número de golpes normalizado al 60% de eficiencia;

N : Numero de golpes de los últimos 30 cm de avance de la medición;

$C_E$  : Factor de corrección por energía, normalizada al 60% de eficiencia;

ETR : Proporción de energía transmitida, con respecto a la teórica

EMX : Máxima energía transmitida en el ensayo, calculada a través de la medición de la fuerza y velocidad, tal como es recomendado en la norma ASTM D4633 [3], la cual es medida por el equipo de SPT Analyzer de Pile Dynamics Inc. (PDI);

$E_t$  : Energía teórica, producto de una caída totalmente libre.

## 3 Medición de energía de pruebas SPT

La Norma ASTM D4633 [3], establece que el método de EFV debe ser utilizado para el cálculo de la energía transmitida hacia las barras, producto del impacto del martillo. Este método consiste en medir la máxima energía transmitida a través de la fuerza  $[F(t)]$  y velocidad  $[v(t)]$  en función de la variación del tiempo, utilizando la ecuación Ec. (3).

$$EFV = \max \left[ \int F(t)v(t)dt \right] \quad (3)$$

El equipo utilizado en las mediciones de energía, corresponde al SPT Analyzer de la empresa Pile Dynamics Inc. (PDI), el cual cumple con lo establecido en la norma ASTM D4633 [3]. El equipo está integrado por dos acelerómetros, de los cuales se obtiene la velocidad transmitida, y de dos sensores de deformación, de los cuales se obtiene la fuerza transmitida; todos estos son conectados a una unidad de almacenamiento y análisis. La Fig. 1, Fig. 2 y la Fig. 3 muestran el detalle del equipo SPT Analyzer utilizado y un ejemplo de cómo se obtienen las mediciones de fuerza y velocidad respectivamente.

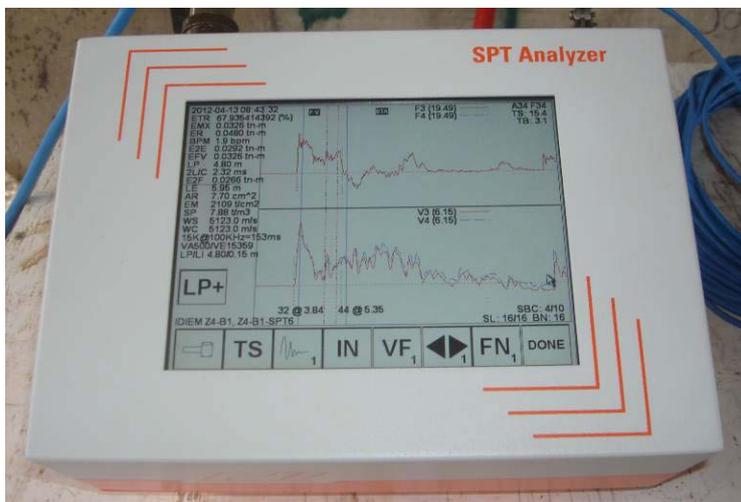


Fig. 1 - Equipo de SPT Analyzer, Unidad de adquisición de datos

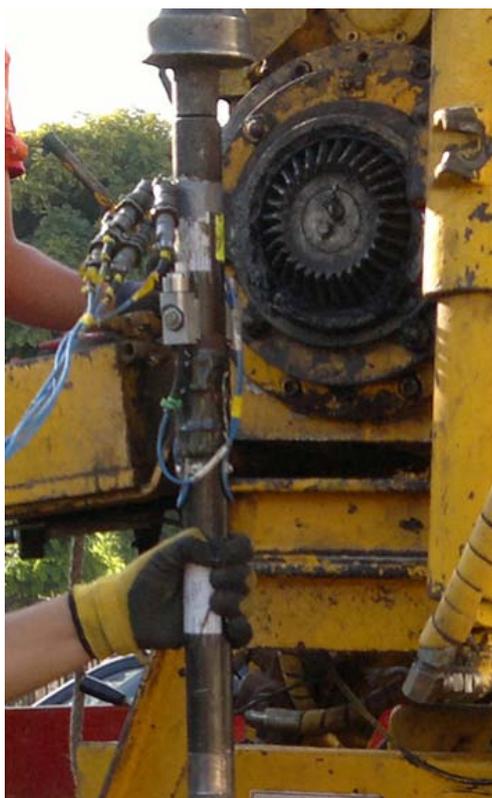


Fig. 2 - Equipo de SPT Analyzer, Barra instrumentada

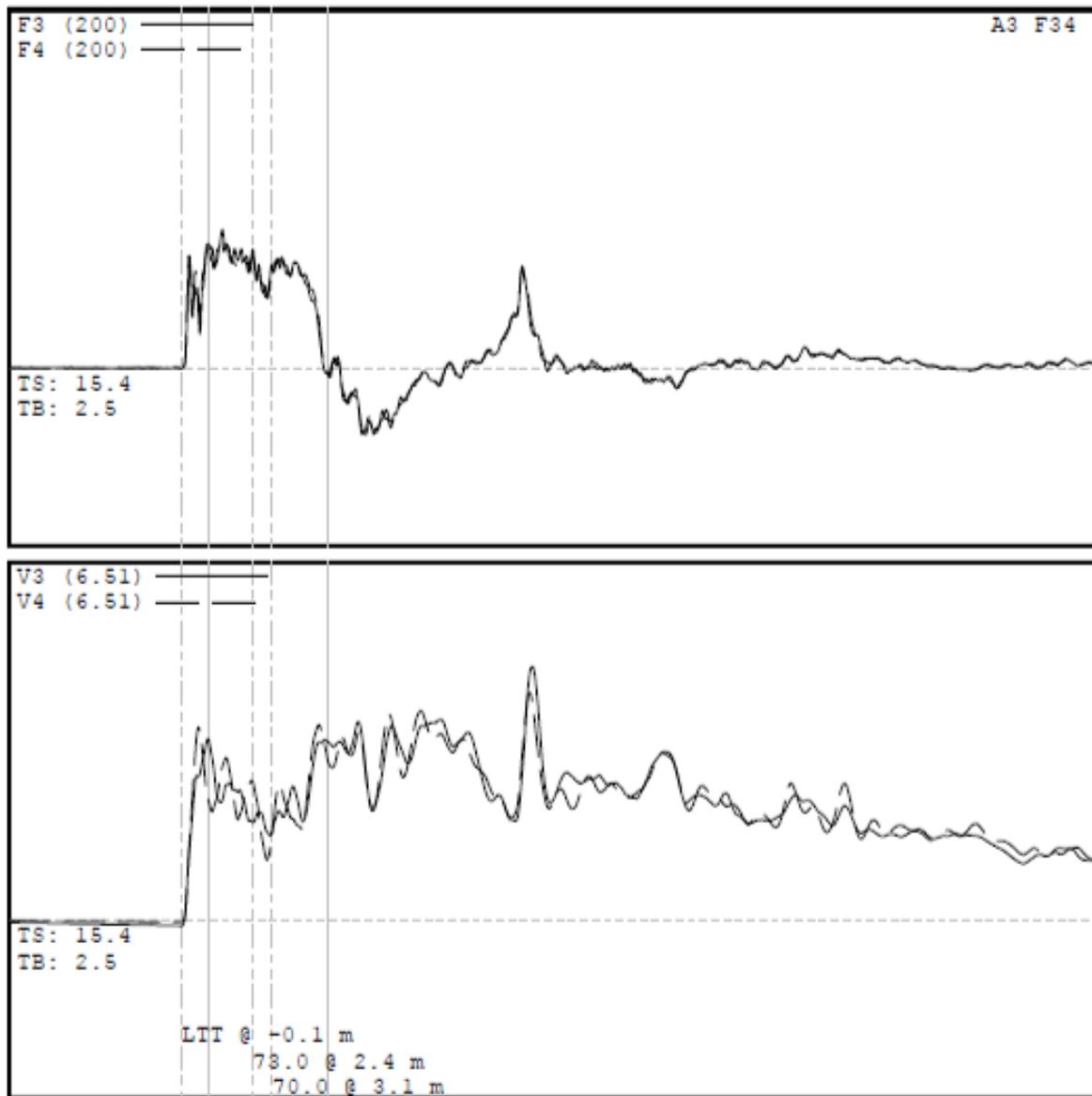


Fig. 3 – Mediciones de fuerza (Figura superior) y velocidad (Figura inferior) obtenidas del equipo de SPT Analyzer, para una medición.

#### 4 Descripción del equipo

La Fig. 4 y Fig. 5, muestran las características del equipo y martillo SPT tipo “dona”, utilizado.

Cabe destacar que el peso del martillo fue verificado por personal de la inspección antes del inicio de los ensayos, donde se comprobó que pesaba 63,5 kg. Además, se realizó una revisión completa del sistema de izaje, cuyo objetivo era verificar si éste se encontraba en buenas condiciones para ser utilizado durante toda la campaña de sondajes sin ser reemplazada o reparada alguna de sus piezas. Todo esto con el fin de poder extrapolar los resultados de medición de energía realizados a los demás sondajes donde no se ejecutó el control de energía.



Fig. 4 – Equipo de SPT *Donut Hammer*, Cabeza de golpes



Fig. 5 - Equipo de SPT *Donut Hammer*, masa de 63,5 kg.

## 5 Características de los ensayos realizados

De las once prospecciones ejecutadas, sólo se decidió realizar ensayos de medición de energía a 3 prospecciones. Para poder extrapolar los resultados obtenidos a los demás ensayos SPT donde no se realizaría mediciones de energía, se decidió realizar un estricto control de calidad de cada ensayo, el cual comprendía:

- Verificar que en cada medición se respete la altura de caída de 76 cm, de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM D1586 [1]

- Realizar los ensayos de medición de energía en el equipo de sondaje, sistema de izaje y martillo tipo “dona”, a utilizar durante toda la ejecución de las prospecciones seleccionadas.
- Tomar los nombres de los operadores que ejecutaban cada ensayo SPT.

La medición de energía fue realizada durante los 45 cm de cada medición, por lo tanto, el valor de ETR obtenido corresponde al promedio de todas las mediciones de energía realizadas en este tramo.

## 6 Resultados obtenidos

La Tabla 1 muestra el valor promedio y desviación estándar de la ETR obtenida para cada ensayo. Desde la Fig. 6 hasta la Fig. 8, se muestra el detalle de todas las mediciones de energía realizadas para cada medición.

Para la verificación de la calidad de las mediciones de energía obtenidas, es necesario realizar un análisis de las curvas de velocidad y fuerza obtenida en cada medición, tal como se establece en la norma ASTM D4633 [4]. Principalmente se verifica la proporcionalidad de las dos curvas de velocidad y dos curvas de fuerza obtenidas en cada medición. En este estudio se definió un rango aceptable de proporcionalidad de 0,8 a 1,2.

De los análisis realizados, se observó que menos del 15% de los resultados obtenidos presentaba un valor de proporcionalidad fuera del rango establecido, lo cual también se verifica con los bajos valores de desviación estándar obtenidos. Una de las causas que puede originar este problema, es una flexión excesiva en las barras AW, debido a un impacto no uniforme.

Tabla 1, Resultados de valores ETR y CE obtenidos en los tres sondajes ejecutados.

Sondaje	ETR (%)		C <sub>E</sub>			Número de Mediciones Realizadas
	Promedio	Desviación Estándar	Min	Prom	Max	
1	57,6	3,7	0,90	0,96	1,02	932
2	55,8	3,5	0,87	0,93	0,99	771
3	59,1	3,9	0,92	0,99	1,05	1017
Promedio	57,5	3,7	0,90	0,96	1,02	

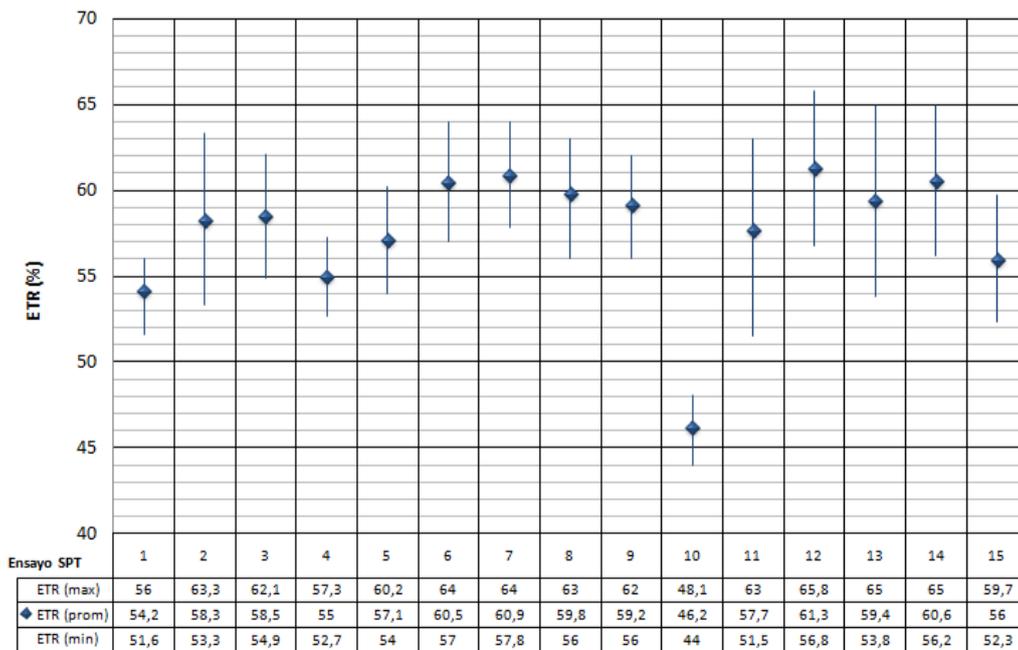


Fig. 6 – Resultados de ETR obtenidos en el sondaje 1

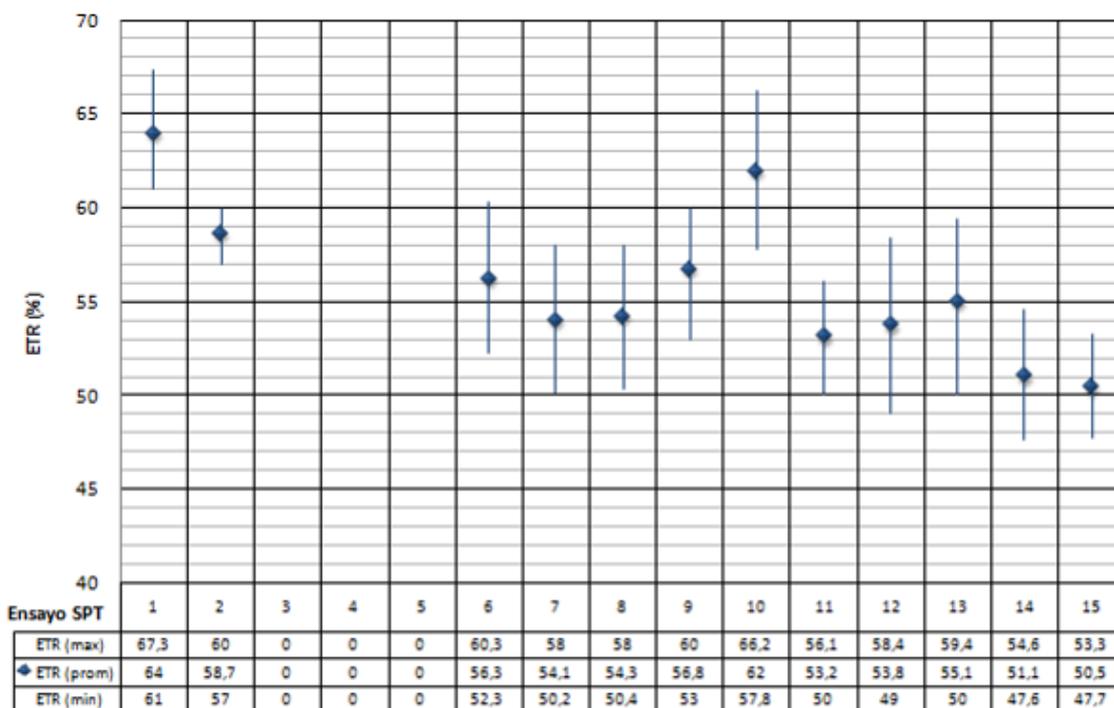


Fig. 7 – Resultados de ETR obtenidos en el sondaje 2

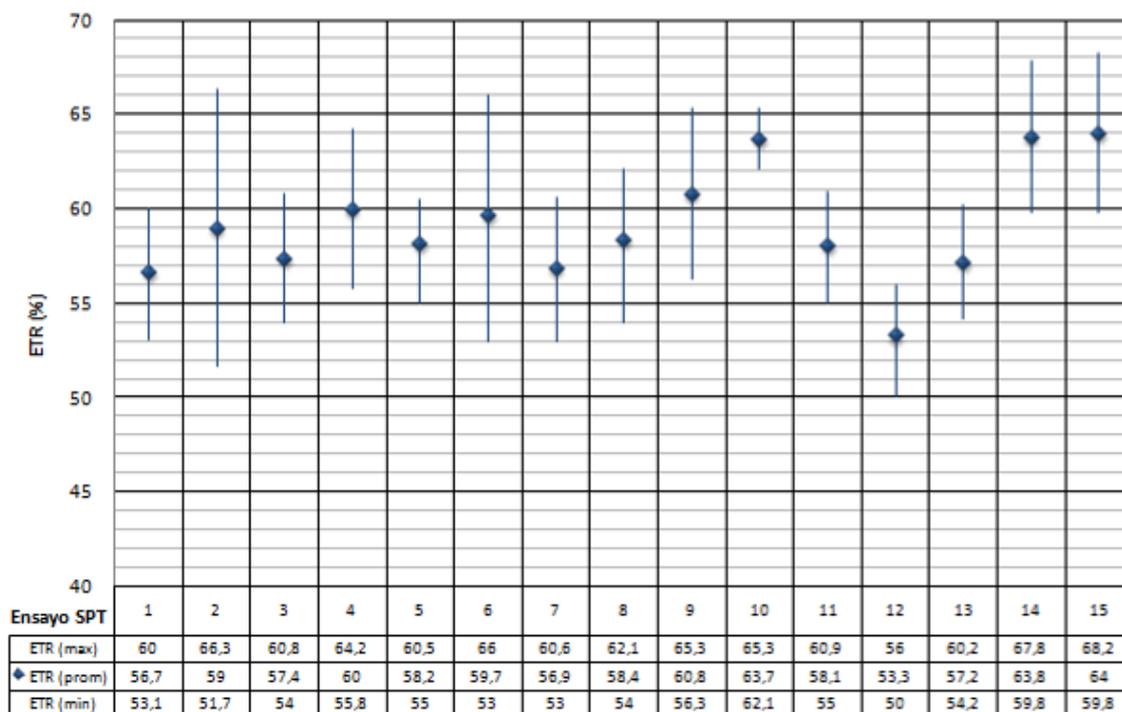


Fig. 8 – Resultados de ETR obtenidos en el sondaje 3

Además, fue realizado un análisis de las mediciones de energía ejecutadas por cada operador, independientemente del sondaje realizado, esto debido a que los ensayos fueron realizados con la misma máquina perforadora y sistema de izaje. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 2, Resultados de valores ETR y CE obtenidos para cada operador.

Operador	ETR (%)		C <sub>E</sub>			Número de Mediciones Realizadas
	Promedio	Desviación Estándar	Min	Prom	Max	
A	57,9	3,2	0,91	0,97	1,02	1098
B	59,1	4,6	0,91	0,99	1,06	851
C	55,6	3,6	0,87	0,93	0,99	531
D	56,3	3,2	0,89	0,94	0,99	240

Como se aprecia en la Tabla 2, el operador A y D mostraron el mejor desempeño, ya que obtuvieron los menores valores de desviación estándar, lo que significa que realizaron el ensayo de forma mas homogénea; mientras que el operador B fue el que obtuvo la mayor desviación estándar. No obstante, los cuatro presentaron valores relativamente homogéneos probablemente por tener una supervisión estricta de los procedimientos de ejecución.

## 7 Conclusiones

- El valor de  $C_E$  promedio de todos los ensayos de medición de energía realizados, con este *Donut Hammer* y los cuatro operadores, fue de 0,96, con una desviación estándar de 0,02 (2,1%), el cual se encuentra dentro de lo establecido en la literatura técnica.
- El promedio de energía entregado al sistema fue de 57,5%, valor levemente inferior al 60% recomendado por la normativa. Sin embargo, este valor se logró con un estricto control de calidad en terreno, por lo que no se descarta que ensayos realizados sin supervisión técnica y equipos no estandarizados, la eficiencia pueda ser incluso inferior al 40% o 50%, produciendo sobre estimaciones de los valores de resistencia del subsuelo.
- La desviación estándar promedio del valor de ETR, para todos los ensayos y considerando a los cuatro operadores fue de 3,7%. Aunque la desviación es baja la medición de energía permite visualizar el desempeño de los operadores que ejecutan el ensayo, esto permite tomar medidas correctivas en terreno o ser tomado en consideración por el ingeniero diseñador en los análisis que se haga con estos resultados.
- La gran mayoría de las mediciones de energía realizadas, presentaron una buena calidad en los datos obtenidos, lo que se traduce en que más del 85% de los resultados obtenidos fueron utilizados, (ver capítulo 6). En general los ensayos de medición de energía realizados fueron adecuados, lo que permitió extrapolar los resultados a los demás ensayos de SPT donde no se realizaron ensayos de medición de energía. Cabe destacar, que todo fue posible debido al estricto control de calidad ejecutado durante todos los ensayos SPT realizados.

## 8 Referencias

- [1] ASTM D 1586. Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils.
- [2] ASTM D 6066. Standard Practice for Determining the Normalized Penetration Resistance of Sands for Evaluation of Liquefaction Potential.
- [3] Youd, T. L., et al. Liquefaction Resistance of Soils: Summary report from the 1996 NLEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *J. Geotech. Geoenviron Eng.* 127(10), p. 817 – 833, 2000 .
- [4] ASTM D 4633. Standard Test Method for Energy Measurement for Dynamic Penetrometers.
- [5] Terzaghi, K., Peck, R.B., and Mesri, G. Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, Inc., Third Edition, New York, 1996.