

Mediciones de energía para ensayos spt, para martillo automático

Energy measurements for spt testing, for automatic breaker

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Yan-Sen Chang¹

Historial del
artículo:

¹ Jorge Piddo y Cía. Ltda., Santiago, Chile, yan-sen.chang@piddo.com

Recibido
14-11-2023
Aceptado
03-12-2024
Publicado
30-04-2025

Palabras Clave:
Mediciones
Energía
Ensayo
SPT

Article history:

Received
14-11-2023
Accepted
03-12-2024
Available
30-04-2025

Keywords:
Measurements
Energy
Test
SPT

Resumen

En esta investigación se realiza un análisis de las mediciones de energía para ensayos SPT (Prueba Estándar de Penetración) en martillo automático. Para ello se utilizaron formulaciones teóricas, empíricas y resultados experimentales. Los aspectos principales de este estudio son: formulaciones básicas de la teoría de Terzaghi, formulaciones matemáticas, análisis de resultados obtenidos sobre las pruebas de campo realizadas con mediciones de energía para ensayos SPT en martillos automáticos. La investigación da como resultado principal la relación entre la energía transferida (ERi% o ETR%), y el 60% de la energía teórica del ensayo SPT en función del tipo de material a nivel de subsuelo y profundidad del ensayo. Los resultados obtenidos (relación ERi / 60) se aplican en un caso real, con el objetivo de analizar posibles consecuencias al no dimensionar adecuadamente las capacidades portantes del suelo a nivel de infraestructura (fundaciones).

Abstract

In this research, an analysis of energy measurements for SPT (Standard Penetration Test) tests in automatic hammer is carried out. Theoretical and empirical formulations and experimental results were used for this purpose. The main aspects of this study are: basic formulations of Terzaghi's theory, mathematical formulations, analysis of results obtained on field tests performed with energy measurements for SPT tests in automatic hammers. The research gives as main result the relation between the transferred energy (ERi% or ETR%), and 60% of the theoretical energy of the SPT test as a function of the type of material at subsoil level and depth of the test. The results obtained (ratio ERi / 60) are applied in a real case, with the objective of analyzing possible consequences of not adequately dimensioning the bearing capacities of the soil at the infrastructure level (foundations).

* Corresponding author at: Jorge Piddo y Cía. Ltda., Santiago, Chile
E-mail address; yan-sen.chang@piddo.com

RIOCI

journal homepage: <https://rioc.ufro.cl/index.php/rioc/index>

Vol. 13, no. 01, pp. 1–9, Abril 2025

1. Introducción.

El presente trabajo de investigación se refiere a las Mediciones de Energía para ensayos SPT (INN, 2014) automáticos. El ensayo SPT, consiste en un sondeo geotécnico, conformado por un muestreador de cuchara normalizada, ubicada en el extremo inferior a nivel de subsuelo, unido a barras de diámetro definido. Las barras descienden mediante golpes en el extremo superior (cabeza de golpe), a través de un martillo cuya masa es de 63,5 kg, el cual cae desde una altura de 76 cm. Los números de golpes (N), se contabiliza en tres tramos de 15 cm de avance cada uno, totalizando 45 cm. El valor "N", es la suma de los números de golpes de los últimos 30 cm de avance del ensaye, y se estandariza al ser multiplicado por la relación de energía transferida a la barra en un 60% de la energía potencial del martillo.

La característica principal de este tipo de investigación es lo observado en pruebas experimentales en dos o más máquinas de sondajes al ejecutar los ensayos SPT para una misma estratigrafía de suelo con diferencias importantes en el valor "N".

Para analizar esta problemática del valor "N" y sus diferencias en los números de golpes del ensayo SPT para un mismo tipo de suelo, es necesario mencionar sus causas y sus consecuencias. Por lo general, las máquinas de sondaje no cumplen los principios básicos que se debe considerar en este tipo de ensayo como son: altura de caída del martillo y peso del martillo, entre otros. Existe un trabajo de investigación que hace referencia a ésta misma problemática (Ventayol y Fernández, 2011) sobre la variabilidad de resultados en el ensayo SPT para un mismo tipo de material (suelo), en relación con el equipo utilizado, y la corrección en su metodología.

Una consecuencia al no medir la energía transferida en el ensayo SPT, es obtener posiblemente malas lecturas con respecto a la capacidad portante del suelo. Este tipo de escenario puede significar un mal diseño de fundación y, por ende, un costo elevado en su materialización o reparación futura tanto para la superestructura como infraestructura.

En este contexto el objetivo del presente trabajo de investigación es obtener una relación entre la energía transferida (ERi%) y el 60% de la energía teórica del ensayo SPT en función directa sobre el tipo de material (subsuelo) y profundidad del ensaye con mediciones de energía.

2. Metodología

2.1 Teoría de Terzaghi y aplicación

La metodología y desarrollo de la presente investigación, se basa en las formulaciones establecidas por Karl Von Terzaghi en el año 1947 con su publicación: "Tendencias Recientes en la Exploración del Subsuelo". Terzaghi, establece la metodología para obtener el ensayo SPT, realizando correlaciones matemáticas entre diferentes parámetros geotécnicos a nivel de subsuelo tales como: tensiones admisibles, asentamientos, ángulo de rozamiento interno, suelos licuables, resistencias a la compresión simple, resistencia al corte, entre otros.

La ecuación de Terzaghi hace referencia a la energía teórica (E_T) o energía potencial (Pile, 2017).

$$E_T = m \cdot g \cdot h = 63,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,76 \text{ m} = 473,4 \text{ J} \quad (1)$$

Donde:

E_T = energía teórica en J; m = masa del martillo en kg; g = gravedad en m/s^2 ; h = altura de caída del martillo en m.

La ecuación (1), describe cuantitativamente el momento que el martillo cae y pega en la cabeza de golpe. A continuación, se analizará el comportamiento de la onda que origina este golpe, y recorre las barras hasta la cuchara normalizada a nivel de subsuelo. Para esto es necesario describir y adaptar la ecuación general de onda unidimensional (Pile, 2017).

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2)$$

Donde:

ρ = constante de densidad del material (barra); E = constante, módulo elástico del material (barra).

El lado izquierdo de la ecuación (2) corresponde a la aceleración (segunda ley de Newton) y la expresión del lado derecho de la igualdad es la deformación (ley de Hooke).

Es importante notar que en la ecuación (2) se encuentran implícitas variables tales como: desplazamiento, velocidad y aceleración de partícula. La velocidad de onda y la impedancia o resistencia propio del material (barra instrumentada, ver figura 2) son constantes, ya que la velocidad de onda depende del módulo de elasticidad y de la densidad del material. La impedancia, depende del módulo de elasticidad, sección de la barra y de la velocidad de onda, todos valores conocidos y

normados.

A continuación, se presentará de forma gráfica el comportamiento del suelo (tensiones) en respuesta a la energía transmitida desde la cabeza de golpe producida por el martillo o martinete.

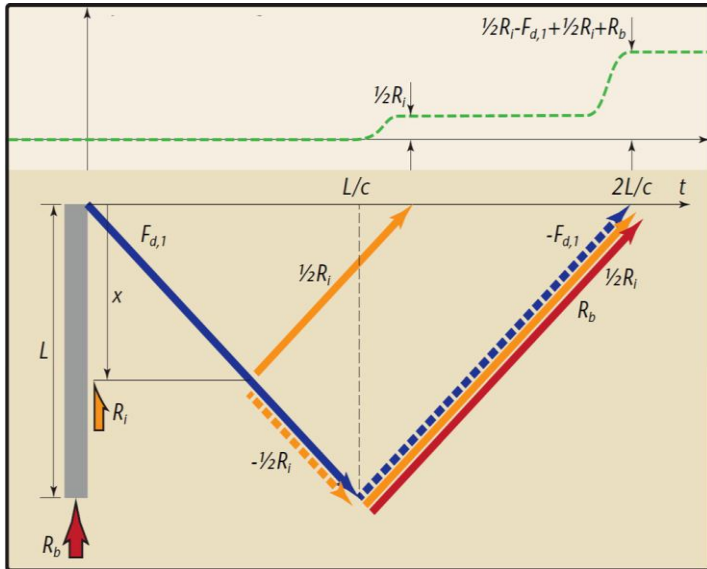


Figura 1. Ondas de fuerzas

En la figura 1, se muestran las ondas de fuerzas que aparecen en el momento que el martillo golpea la barra de largo "L" en el extremo superior. En términos generales, se produce una onda de compresión que se propaga a lo largo de la barra, reflejándose en el extremo inferior (interfaz entre el suelo y el muestreador de cuchara normalizada). El tiempo que tarda en recorrer la onda ida y vuelta a lo largo de la barra "L" es $2L/c$, siendo c , velocidad de la onda de propagación. En el momento que la onda se devuelve (reflexión de onda), se propaga como una onda de tracción hasta la cabeza de golpe. De la figura 1, se puede deducir la siguiente expresión (Pile, 2017):

$$F_{d1} = R_i + R_b = R_{estática} + R_{Dinámica} = R_{Total} \quad (3)$$

Donde:

F_{d1} = onda de tensión en Newton (N); R_i y R_b = tensión en Newton (N).

La expresión del lado derecho de la igualdad (3), representa la Resistencia total igual a: $R_i + R_b$, equivale a una resistencia estática más dinámica. Lo anterior es el resultado de cada golpe efectuado por el martillo, la cuchara normalizada desciende a nivel de subsuelo; esta acción es fundamental para entender que los resultados obtenidos, se encuentran relacionados con los

distintos tipos de suelo o estratos existente. La resistencia dinámica propia del suelo existente es una constante de amortiguamiento y como tal, existe disipación de energía propio de un sistema amortiguado.

Para obtener la energía total transmitida, es necesario realizar la integración del producto entre la fuerza y la velocidad, en un intervalo de tiempo (ASTM, 2016).

$$EFV = \max \left[\int F(t) \cdot V(t) \cdot dt \right] \quad (4)$$

Donde:

EFV = energía transferida en Joule (J); F = tensión en Newton (N); V = velocidad de la partícula en m/s.

La razón de energía transmitida por las barras de perforación se determina como (ASTM, 2016):

$$ETR = ERI = \frac{EFV}{E_T} (\%) \quad (5)$$

Donde:

ETR y ERI = razón de energía transmitida por las barras de perforación en porcentaje (%); E_T = energía potencial máxima teórica en J.

Dado que Terzaghi ha establecido condiciones de borde tales como: altura de caída y masa del martillo, se podrá deducir de forma directa, la cantidad de números de golpe por minuto (g.p.m.) que se deben respetar para cumplir los principios de este ensayo.

$$v_i = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (6)$$

Donde:

v_i = velocidad de impacto alcanzada en 76 cm (altura de caída) en $\frac{m}{s}$.

El tiempo que se demora el martillo en golpear es:

$$T = \frac{2 \cdot v_i}{g} \quad (7)$$

Donde:

T = tiempo en segundos.

2.2 Pruebas experimentales

Las pruebas experimentales fueron realizadas en siete pozos de 50 metros de profundidad cada uno. El número total de mediciones de energía es 120. Antes de comenzar las mediciones, se realiza un autocontrol al sistema hidráulico (altura de caída del martillo y peso del martillo), número de golpes por minuto, y una medición de energía de prueba. Para efectuar las mediciones de energía en los ensayos SPT, se utiliza una barra instrumentada conectada a un equipo electrónico de adquisición de datos y un software específico para la interpretación de los datos. La barra instrumentada se encuentra equipada con dos sensores de deformación y dos acelerómetros (ver figura 2). Estos sensores obtienen las señales de fuerza y velocidad para determinar la energía transferida. El ensayo de medición de energía se rige por la norma ASTM D4633-16.

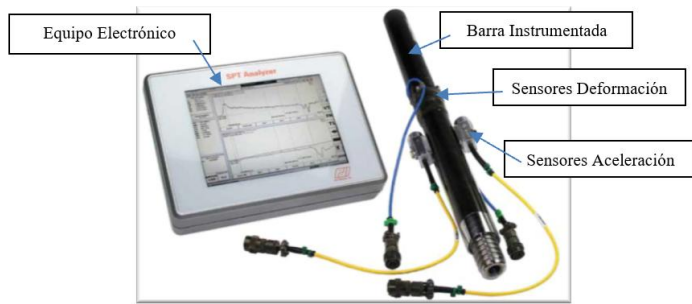


Figura 2. Barra instrumentada de largo 60 cm, diámetro AW, sensores y computador (Pile, 2017).

A continuación, se presentan los gráficos ETR o ERI (%) versus profundidad (m) según tipo de suelo de las pruebas experimentales.

2.2.1 Suelos grano grueso

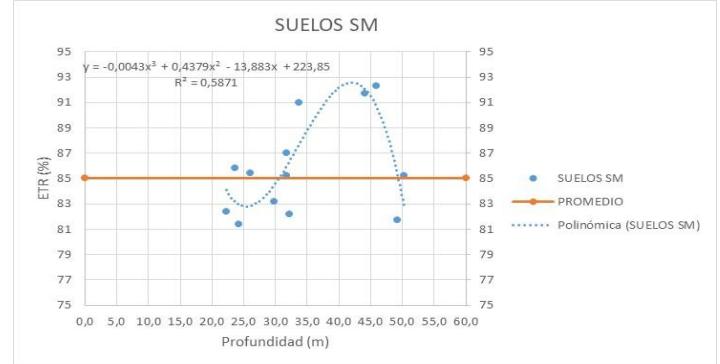


Figura 3. Arena limosa

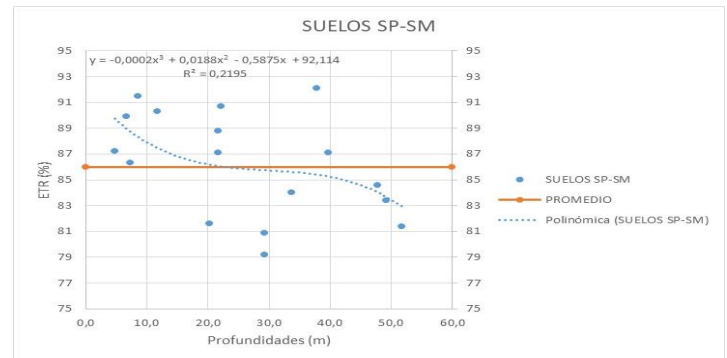


Figura 4. Arena fina limosa

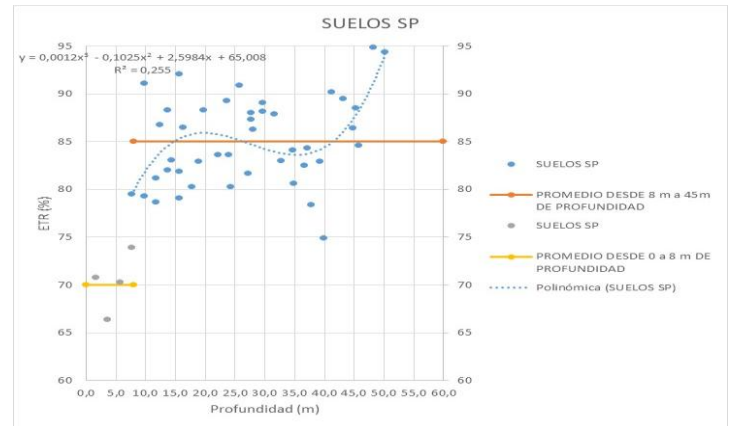


Figura 5. Arena fina



Figura 6. Arena gruesa limosa

Se presenta a continuación, la unificación de los gráficos de la figura 3 a la figura 6, para suelos clasificados como grano grueso:

2.2.2 Suelos grano fino



Figura 8. Limo y arcilla inorgánicas

Se presenta a continuación, los gráficos para suelos clasificados como suelos de grano fino:

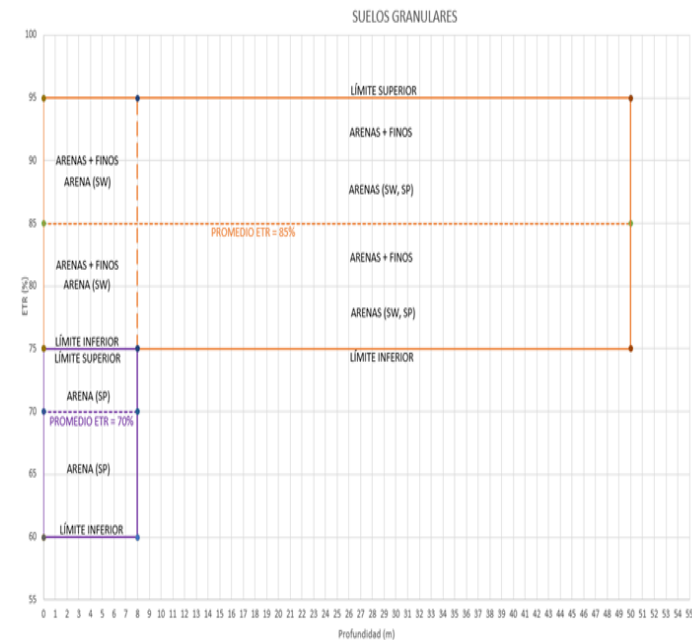


Figura 7. Clasificación de ETR (%) según tipo de suelo versus profundidad para Arenas

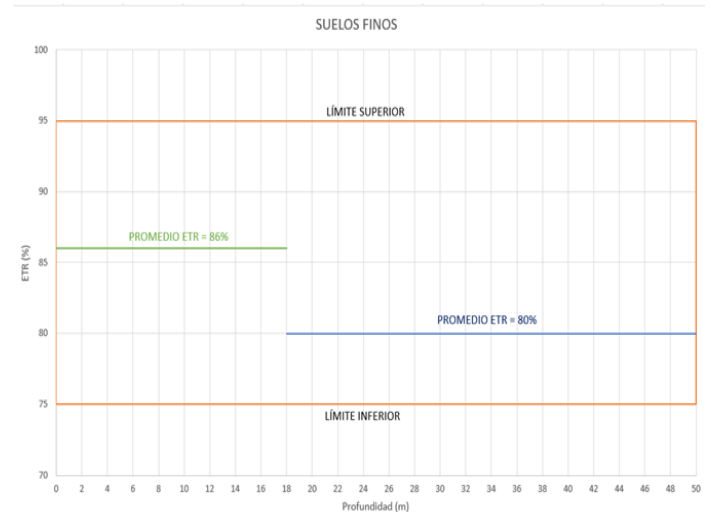


Figura 9. Clasificación de ETR (%) según tipo de suelo versus profundidad para suelos grano fino.

En resumen, de la figura 7 y figura 9 se unifican y se presentan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Relación (ERi/60) de acuerdo profundidad y tipo de suelo.

ERi o ETR (%)	Promedio ERi o ETR (%)	Relación (ERi/60)	Profundidad (m) del ensayo STP	Tipo de suelo
60% a 70%	70%	1,17	2m a 8m	Suelo grano grueso (arena fina)
75% a 95%	85%	1,42	8m a 50m	Suelo grano grueso (arena fina)
75% a 95%	85%	1,42	2 a 50m	Suelo grano grueso (arena finos) +
84% a 88%	86%	1,43	2m a 18m	Suelos finos
77% a 83%	80%	1,33	18m a 50m	Suelos finos

2.3 Ejemplo de aplicación práctico.

A continuación, se dará un ejemplo de aplicación práctico con el objetivo de analizar diferencias en pruebas experimentales referente a la variabilidad de resultados que se pueden obtener para una misma estratigrafía de suelo en relación con el equipo utilizado. Es importante mencionar que sólo la máquina N°3 se encuentra calibrada previo a la medición de energía en el ensayo SPT.

En base a la Norma Chilena NCh3364:2014, numeral A.5 "Medida de la energía aplicada en el ensayo", se debe obtener el $(N_1)_{60}$, vale decir, el índice de penetración estándar normalizado por presión de confinamiento de 1kgf/cm^2 y corregido al 60% de la energía normalizada. La expresión está dada por (INN, 2014):

$$(N_1)_{60} = N_m \cdot C_E \cdot C_N \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \quad (8)$$

Donde:

N_m = índice de penetración estándar normalizado por presión de confinamiento de 1kgf/cm^2 ; C_N = factor de normalización a presión confinante de 1kgf/cm^2 ; $C_E = \frac{ER_i}{60}$ = factor de corrección

para llevar al 60% de la energía teórica del ensayo; C_B = factor de corrección por diámetro del sondaje; C_R = factor de corrección por largos de las barras; C_S = factor de corrección para cucharas con y sin liner.

A fin, de poder visualizar de forma más clara y precisa, para este caso práctico, sólo se considerará la corrección por energía, omitiendo los factores de corrección ($C_N \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S$) (INN, 2014) de la ecuación (8).

$$N_{60} = N_m \cdot C_E = N_m \cdot \frac{ER_i}{60} \quad (9)$$

Donde:

ER_i = razón de energía transmitida por las barras de penetración en %; 60% = resistencia a la penetración normalizada al 60%.

Para el ejemplo de aplicación práctico se presente a continuación tres máquinas de sondaje con el siguiente detalle:

- Máquina N°1: No calibrada, sin autocontrol SPT y se efectúa medición de energía en la condición que se encuentre el equipo.
- Máquina N°2: No calibrada, sin autocontrol SPT y se efectúa medición de energía en la condición que se encuentre el equipo.
- Máquina N°3: Calibrada, con autocontrol SPT y posteriormente medición de energía para obtener ERi (%).

Para el cálculo del ángulo de fricción interna (ángulo de fricción- N_{60}) se ha utilizado la expresión dada por (Peck,1974) y (Das,1995):

$$\phi = 27,1 + 0,30 \cdot N_{60} - 0,00054 \cdot (N_{60})^2 \quad (10)$$

Donde:

ϕ = ángulo de fricción interna; N_{60} = número de golpes de penetración estándar corregidos.

3. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos más relevantes en el presente trabajo de investigación son:

- De la figura 1 y la ecuación (3), se destaca que la componente de resistencia dinámica o resistencia de amortiguamiento en la interfaz entre la cuchara normalizada y el suelo es un indicativo del tipo de estrato que podemos encontrar, en función a la energía transmitida por las barras de perforación.

- Para los números de golpe por minuto (g.p.m) del ensayo SPT, se determina que:

$$v_i = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{\left(2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,76m\right)} = 3,8615 \frac{m}{s} \quad (6)$$

El tiempo que se demora el martillo en golpear es:

$$T = \frac{2 \cdot v_i}{g} = \frac{2 \cdot 3,8615 \frac{m}{s}}{9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,787 s \quad (7)$$

Si se considera el tiempo de caída y alzamiento del martillo, el resultado de la ecuación (7) se debe multiplicar por 2, obteniendo el tiempo total de un golpe equivalente a 1,6 segundos. Si se realiza una relación directa en función al tiempo y número de golpe, se obtiene los números de golpe por minuto (g.p.m), vale decir, 38 golpes por minuto (g.p.m).

Por lo tanto, los 38 g.p.m, se encuentran directamente relacionado con la distancia recorrida de 0,76 metros del martillo. No obstante, es importante mencionar algunas excepciones en los números de golpes calculados, y estas pueden ser por causas y efectos del nivel freáticos presente en el ensayo o bien, al efectuar el ensayo en suelos finos saturados.

- De las pruebas experimentales con relación a las 120 mediciones de energía realizadas en terreno, distribuidas en distintas profundidades, para 7 pozos, y cada pozo con profundidad de 50 m, se obtiene que la relación de energía (ERi) para llevar al 60% de la energía teórica del ensayo son:
 - De la Tabla 1, para suelos granulares o grano grueso, las mediciones promedio de energías (ERi o ETR) aumentan a medida que se profundiza la perforación. Para suelos finos o cohesivos, las mediciones promedio de energías tienden a disminuir a contar de una profundidad de 18m.
 - Los resultados obtenidos en esta investigación son comparados con la publicación: "Medida de la energía del ensayo SPT. Correcciones a Aplicar" (Ventayol y Fernández, 2011). La presente comparación cumple el objetivo de analizar ambas investigaciones para obtener puntos de convergencia en los resultados obtenidos. La cantidad de

mediciones de energía tomadas en terreno para el caso del trabajo publicado de Ventayol y Fernández son de 42 mediciones. La diferencia en el número de mediciones para ambos trabajos de investigación puede conllevar diferencias en el análisis de resultados con respecto a los límites de energía obtenidos experimentalmente versus profundidad del ensayo tomado. Referente al artículo publicado de Ventayol y Fernández sus conclusiones 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."

"- 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."

- Los resultados de comparación y análisis entre ambos trabajos, si bien, no se obtienen una igualdad absoluta en las conclusiones cuantitativas, la tendencia de resultados es similar en la relación (ERi/60) versus profundidad del ensayo, tanto para suelos granulares como para suelos cohesivos.
- Del ejemplo de aplicación práctico, se presenta la Tabla 2, con los resultados obtenidos para tres máquinas de sondaje:

Tabla 2. Resultados de medición de energía y cálculo para el ángulo de fricción interna

Fecha de Medición Energía	Máquina N°	Número de golpes	Tipo Muestra Arenas + Finos	Profundidad (m)	Energía Teórica (ET) Joule	Energía transferida (EFV) Joule	ERi (%)	N60	Autocontrol I SPT	Cálculo de ángulo de fricción interna (Φ), grados	Diferencias en el calculo de angulo de fricción interna (Φ), grados
19-07-2019	1	49	SI	19	473,1	228	48,2	39,4	NO	38	7
	1	49					85,0	69,4	CORREGIDO	45	
19-07-2019	2	39	SI	14	473,1	477	100,8	65,5	NO	44	2
	2	39					85,0	55,3	CORREGIDO	42	
19-07-2019	3	10	SI	33	473,1	402	85,0	14,2	SI	31	0

De la tabla 2 (ver destacado) se corrige el Eri (%) obtenido para las máquinas N°1 y N°2, según tabla 1.

Para la máquina N°1, el Eri (%) obtenido es de 48,2%, se encuentra fuera de rango (ver tabla 1), esta condición es la más desfavorable, dado que se presentan rechazos en estratos de suelo que en la realidad no aplica, este escenario puede ser causado por:

- Menor altura de caída del martillo de lo establecido.
- Peso del martillo, menor a lo establecido.
- Falta de mantención o limpieza en el recorrido del martillo a la cabeza de golpe (aumenta la fricción).

Para la máquina N°2 se observa un Eri(%) obtenido mayor a 100%, se encuentra fuera de rango (ver tabla 1), condición que se pueda dar por los siguientes motivos:

- Mayor altura de caída del martillo de lo establecido.
- Peso del martillo, mayor a lo establecido.
- Exceso de tensado de la cadena en el alzamiento del martillo, golpeando el extremo superior (rebote), lo que origina una energía cinética inicial distinta a cero.

Para la máquina N°3 según Eri (%) obtenido y tabla 1, no aplica corrección dado que se encuentra dentro de los parámetros esperados.

Es importante destacar, que al no transmitir una adecuada transferencia de energía por no cumplir las condiciones básicas de la teoría de Terzaghi (altura de caída y masa del martillo, entre otras) se producirá un aumento de golpes falsos (Tabla 2, maquina N°1), lo que significará sobredimensionar las capacidades portantes del suelo. Este escenario es el más crítico,

ya que puede producir asentamientos y/o colapso de la estructura. Otro escenario es disminuir la capacidad portante del suelo, producto de una cantidad menor a los números de golpe real que se debe obtener (Tabla 2, maquina N°2), lo que implica un aumento económico en la materialización del proyecto.

4. Conclusiones

De este trabajo se pueden desprender las siguientes conclusiones:

- De acuerdo con el objetivo planteado del presente trabajo de investigación, los resultados obtenidos sobre las pruebas experimentales realizadas con mediciones de energía para ensayos SPT automáticos, se logra obtener (ver tabla 1) la relación entre la energía transferida (ERi%) y el 60% de la energía teórica del ensayo SPT ($ERi / 60$) en función al tipo de material a nivel de subsuelo y profundidad del ensaye.
- Se establece que el número de golpes por minuto es de 38 g.p.m. No obstante, se recomienda en condiciones con presencia de nivel freático, disminuir la frecuencia de números de golpes por minuto, estableciendo periodos de descanso entre golpes, para permitir la disipación de poros y la alteración de resultados. Es decir, al aumentar la presión de poros (falla no drenada), disminuye el esfuerzo normal entre partículas, con eso la fricción, y finalmente, la resistencia al corte, el cual hace más fácil la penetración (menor números de golpes), restando resistencia al suelo y finalmente, obteniendo números de golpes (N) ficticios o errados.
- Del ejemplo de aplicación práctico, tabla 2, se puede concluir que la maquina 3, el Eri (%) observado cumple con lo estipulado en las conclusiones y criterios

establecidos en el presente trabajo de investigación (ver Tabla 1): relación ($ER_i/60$) de acuerdo profundidad y tipo de suelo. El ER_i (%) obtenido según profundidad y tipo de estrato es de $ER_i = 85\%$. Para las máquinas 1 y 2 el ER_i (%) obtenido, se encuentran fuera de rango, el cual implica un potencial error al dimensionar adecuadamente la capacidad portante del suelo. En base a los argumentos desarrollados en el presente trabajo de investigación se puede concluir, cada 10 golpes corregidos, se obtiene una diferencia aproximada de ± 2 grados en el ángulo interno de fricción.

5. Agradecimientos

Para la preparación y desarrollo del presente artículo, mis agradecimientos por el apoyo por parte de la Empresa Jorge Piddo y Cía. Ltda. a su Gerente General Sr. Jorge Piddo Dacaret. Igualmente, al Laboratorio Nacional de Vialidad (LNV) Sr. Gabriel Palma y exfuncionaria Sra. Gabriela Muñoz; al Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad (MOP) exfuncionario Sr. Eduardo Aravena y finalmente, Sr. Marcelo Elgueta Vergara, exdocente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

6. Referencias

- American Society for Testing and Materials. (2016). *ASTM D4633-16 Standard Test Method for Energy Measurement for Dynamic Penetrometers*. West Conshohocken, Pensilvania, USA.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2014). *Norma Chilena NCh 336:2014. Geotecnia - Ensayo de Penetración Estándar* (Primera ed.). Santiago, Chile: INN.
- Pile Dynamics Inc. (2017). *Manual for the PDA and PDA-S Software*. Cleveland, Ohio, USA.
- Ventayol Lázaro, A., & Fernández Toledo, C. (2011). *Medida de la Energía del Ensayo SPT. Correcciones a Aplicar*. Barcelona, España.