

Notas sobre los ensayos de penetración dinámica superpesada en la zona Andina (Ecuador y Perú)

Las pruebas de penetración dinámica, tanto en su tipo continuo (borro, DPSH, ConoPeck, etc.) como discontinuo (SPT) son ensayos económicos y que aportan información sobre la compacidad del terreno. Existen numerosas correlaciones de estos ensayos con parámetros geotécnicos y capacidades portantes para cimentaciones superficiales y profundas. La *facilidad* de estas correlaciones y economía del ensayo han hecho que a veces se abuse de estos. En el presente artículo se describen los principales ensayos de penetración dinámica superpesada y se hace hincapié en cuales son los más utilizados en la zona andina.

Los ensayos de penetración dinámica continuos se realizan tomando medidas de forma continua con la profundidad. El sistema empleado para hincar la puntaza metálica es el golpeo de una maza sobre la cabeza del varillaje, a través de una sufridera (Ministerio de Fomento, 2002).

pos de accionamiento completamente hidráulico (Fig. 1), los cuales son operados por una sola persona.

La zona andina de Chile-Perú-Ecuador-Colombia es actualmente una de las áreas de mayor crecimiento en el mundo y presenta una enorme demanda de trabajos de geotecnia. Los especialistas españoles no han sido ajenos a esta oportunidad y muchos son ya los que estamos trabajando en la zona. Una de las dificultades con las que nos hemos topado es de la aplicación de técnicas que se consideran (tal vez erróneamente) obsoletas, así como otros criterios de evaluación y de operatividad en los sondeos (escasa aplicación de la llamada técnica convencional).

Los ensayos de penetración sobre trípode y accionamiento manual o semiautomático están ampliamente desarrollados en la zona andina (Fig. 2). Es más a fecha de hoy casi podemos decir que son la tónica dominante, empleándose preferentemente el ensayo DPSH, Cono Peck y el SPT discontinuo o con tramos a destroza (Wash – Boring).

La compleja orografía de los Andes, con cotas habituales de ensayos geotécnicos (para hidroeléctricas y sobre todo proyectos mineros) por encima de los 4000 metros e incluso no raros a 5000, hacen que la logística a la que estamos acostumbrados no sea de aplicación.

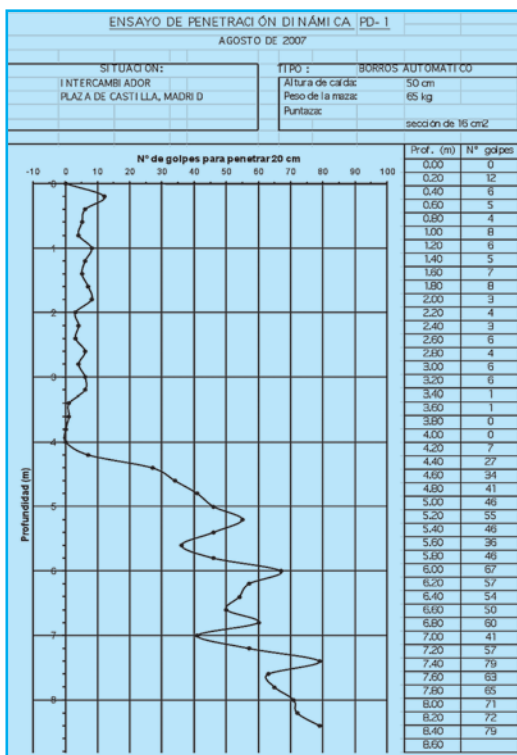
Es por ello que nunca dejaremos de ver en estos lugares equipos de penetración manual, que sean capaces de ser desmontados y movilizados a lugares remotos (Figs. 3 y 4).

Sin embargo el empleo de estos equipos ya obsoletos en el viejo continente en zonas urbanas y de acceso normal no está en absoluto justificado, requiriendo además una enorme mano de obra, habitualmente 3 y hasta 4 personas (Fig. 5).

Los proyectos mineros requieren de grandes infraestructuras, tales como presas, carreteras de, a veces decenas de kilómetros, puentes, aeródromos, subestaciones eléctricas y poblaciones de hasta 2000 habitantes

Palabras clave: BORRO, CONO PECK, DPSH, ENSAYOS, GOLPEO, MAZA, PENETRACIÓN DINÁMICA, SPT, WASH BORING

 **Rafael JORDÁ BORDEHORE**, Geólogo. Responsable Ecuador. RUDNIK Andina; y **Luis JORDÁ BORDEHORE**, Dr. Ing. de Minas. GEOCONSULT España. Oficina Lima



Ejemplo de un registro de penetración dinámica continua, tipo borro, realizado para un cálculo de pilotaje en el Intercambiador de Plaza de Castilla, Madrid (2007).

Con el boom de la edificación residencial y obra civil en España, desde mediados de los años 90 y especialmente desde las normas de edificación que exigen cierto número de ensayos, han proliferado los equipos de penetración dinámica automáticos. Hemos visto como los primeros equipos montados con soporte de trípode han sido superados por equi-



[Figura 1].- Ensayo de penetración tipo borro (Guadalix de la Sierra, Madrid, 2006)



[Figura 2].- Ensayo de penetración dinámica superpesada "cono peck" (cortesía Univ. de Piura).



[Fig. 3].- Desmontaje completo de equipo de penetración en 6 burros y transporte durante 3 días, zona de Huaraz, cordillera de los Andes, Perú a 4100 m (cortesía Luis Taricuarima).



[Fig. 4].- Campamento en tránsito. Es habitual acampar en las campañas geotécnicas en la cordillera, ante la ausencia total de infraestructuras (cortesía Luis Taricuarima).



[Fig. 6].- Sondeo convencional con ensayos de penetración dinámica - toma de muestra SPT e inalterada (El Viso, Madrid, 2008). Nótese a la izquierda de la torre de sondeo, la unidad de golpeo.



[Fig. 8].- Gravas del río Rímac, en la zona de Surco (Lima). Nótese la presencia de niveles arenosos y limosos donde si es factible la realización de un ensayo SPT (y no en la parte en gravas). En algunas zonas de Lima metropolitana el espesor del paquete de gravas con cambios de facies limo-arenosas, puede llegar a los 400 m.



[Fig. 5].- Ensayo SPT discontinuo en Ecuador.



[Fig. 6 bis].- Caja de sondeos donde se muestra la toma de muestra y ensayo SPT.



[Fig. 7].- equipo de sondeos en convencional sin la unidad de golpeo (SPT) integrada. Lima, Perú (cortesía Luis Taricuarima).

con edificios de 4 alturas, etc., para todos ellos se requieren sondeos, calicatas y ensayos de penetración dinámica o estática.

Ensayo SPT en sondeo

No es un reconocimiento continuo pero lo especificamos aquí al ser unos de los ensayos más característicos de la mecánica de suelos, y fue la base de partida de todos los demás ensayos dinámicos. El ensayo **SPT** (*Estándar Penetration Test*) esta normalizado en España por la UNE 103800.

En España estamos acostumbrados a unidades de **SPT** montadas sobre la torre de sondeos. Una vez alcanzada la cota de ensayos se retira la cabeza de rotación y colocamos en el eje, la maza del penetrómetro (Fig. 6).

Hemos visto en Perú en muchas ocasiones maquinaria de sondeos en convencional que no dispone de la unidad de golpeo integrada (Fig. 7), incluso maquinaria más específica de minería (*wire line*) poco adaptada a sondear en suelos. En estos casos se llega incluso a montar una torreta específica o *segunda torreta* para el **SPT** generando una gran confusión operativa.

Ensayo SPT discontinuo

Técnica sumamente laboriosa que consiste en hincar la cuchara de **SPT** extraerla y de nuevo volver a introducirla por golpeo, como si se tratase de un autentico sondeo de recuperación de testigo a percusión.



Wash Boring

Es una técnica de sondeos en suelos y gravas muy popular en Perú, y probablemente la técnica más desarrollada en el aluvial de gravas (400 m de potencia) del río Rímac en Lima Metropolitana (Fig. 8). También es frecuente su aplicación para medir la compacidad y tomar muestras en las balsas de estériles mineros (relaveras) de las grandes minas de los países andinos.

La técnica consiste en la ejecución de un sondeo a destroza con trialeta a rotación y circulación de agua gran presión. En las zonas a atravesar donde se quiere obtener valores de



[Figs. 8a, b y c].- Sondeo wash boring en Perú (cortesía David Moncca).

golpeo o bien donde se presupone hay niveles no conglomeráticos, se instala la cuchara de **SPT** (o puntaza ciega recuperable). Ver Figs. 8 a, b y c.

Ensayo Borro

Es un ensayo dinámico continuo muy difundido en España y en parte de Europa, que está recogido en la NLT 261. Este ensayo no es conocido en la zona andina.

La puntaza metálica es cuadrada, de 4x4 cm², va unida a un varillaje de 32 mm de diámetro, que por tanto es de menor tamaño que la referida punta. En el ensayo *Borro* el resultado N_B o N_{20} es el número de golpes necesarios para hacer avanzar la puntaza 20 cm. La maza tiene un peso de 65 kg (aunque resulta habitual, no obstante, el empleo de mazas de 63,5 kg por analogía con el *SPT* y *DPSH*). La altura de caída de esta es de 50 cm.

Ensayo DPSH

Es el ensayo de penetración continua más difundido, que comparte además maza y altura de caída con el ensayo *SPT*. En España está normalizado por la *UNE 103801*. La puntaza es de tipo cónico (Figs. 11 y 13).

Cono tipo Peck

El *Cono Dinámico Tipo Peck* es un equipo usado en el Perú como técnica de investigación del terreno, empleando la misma caída y peso del *SPT* y del *DPSH*. Cambia el ángulo del cono y el ancho del varillaje con respecto al *DPSH* (Fig. 9).

La norma peruana *E.050 "Suelos y cimentaciones"* del *R.N.E* acepta el cono dinámico tipo *Peck* como una técnica de investigación recomendada para suelos granulares de los tipos *SW, SP, SM* y *SC-SM*, y restringida para los de tipo *CL, ML, SC, MH* y *CH* (Fig. 12). Sin embargo, se encuentra en la práctica que el *Cono Tipo Peck* se aplica indistintamente sobre gravas y en los suelos indicados, pero sin la calibración previa con el *SPT*, lo que conduce a serias incertidumbres sobre la validez de sus resultados (Vivar Romero, 2007).

A inicios de los años 1970, se efectuó un programa comparativo de ensayos *SPT* con un equipo de auscultación (en Perú se denomina así a los ensayos de penetración, *n.d.a*) con punta cónica denominado *Cono de Peck* (Fig. 10), sobre suelos arenosos finos del tipo *SP*, encontrándose la siguiente relación:

$$N = 0,5 C$$

Donde:

N = número de golpes por cada 30 cm de penetración en el ensayo estándar de penetración (*SPT*).

C = número de golpes por cada 30 cm de penetración con el *Cono Peck*. Es importante señalar que a diferencia de los otros dos ensayos *DPSH* y *Borro* en el que se "cuentan" los golpes cada 20 cm, en el *Cono de Peck* se contarán cada 15 cm y se agruparán en un gráfico en intervalos de 30 cm.

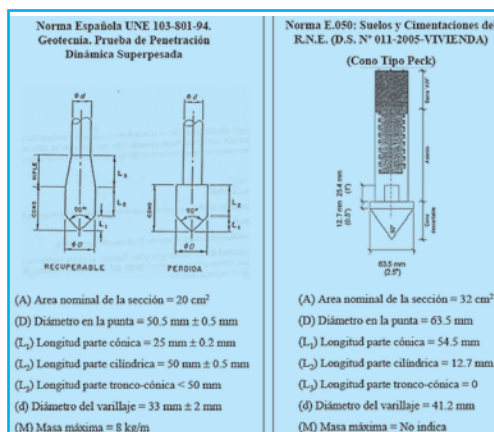
Los consultores de aquel estudio le dieron ese nombre al ensayo por un dispositivo mostrado en una publicación de *Peck et. Al.* De 1953 (Vivar Romero, 2007).



[Figura 9].- Varillaje de Cono Peck.



[Figura 10].- Detalle de la punta perdida del Cono .



[Figura 11].- comparación de medidas del varillaje y puntaza del ensayo *DPSH* y *Cono Peck* (Fuente. Vivar Romero, 2007).

[Figura 13].- Comparativo dimensiones y pesos ensayos *DPSH* y *Cono Peck* (CP)

| Elemento | DPSH/UNE/BS ¹ | CP ² |
|---|--------------------------|-------------------------------|
| Masa del martillo, kg | 63.5 ± 0.5 | 63.5 ± 0.5 |
| Altura de caída, m | 0.75 ± 0.02 | 0.76 ± 0.01 |
| Masa del yunque y de la guía (máx), kg | 30 | 50 |
| Longitud/diámetro (D) del martillo | ≥ 1, ≤ 2 | ≥ 1, ≤ 2 |
| Diámetro del yunque, mm | 100 < d < 0.5D | 100 < d < 0.5D |
| Long. de varilla, m | 1 - 2 ± 0.1% | --- |
| Masa de varilla (máx), kg/m | 8 | 8 |
| Desviación de la varilla (máx) en los primeros 5 m, % | 0.1 | --- |
| Desviación de la varilla (máx) debajo de los 5 m, % | 0.2 | --- |
| Excentricidad de la varilla (máx), mm | 0.2 | 0.2 |
| Diámetro exterior de la varilla, mm | 32 ± 0.3 | 41.2 |
| Diámetro interior de la varilla, mm | --- | --- |
| Ángulo del cono, grados | 90 | 60 |
| Área en la base del cono, cm ² | 20 | 32 |
| Diámetro del cono, mm | 51 ± 0.5 | 63.5 |
| Diámetro mín. del cono, mm | 49 | --- |
| Long. del manguito del cono, mm | 51 ± 0.2 | 50 ± 0.5 |
| Ángulo superior del cono, ° | 11 | --- |
| Long. de la punta del cono, mm | 25.3 ± 0.4 | 25 ± 0.2 |
| Máx. desgaste de la punta, mm | 5 | --- |
| Número de golpes por cm de penetración | 20 cm; N ₂₀ | 15 cm / 30 cm; C _n |
| Rango estándar de golpes | 5 - 100 | --- |
| Trabajo específico por golpe MgH/A, kJ/m ² | 238 | 149 ³ |

| Ensayos In Situ | Norma Aplicable | Aplicación Recomendada | | | Aplicación Restringida | | Aplicación No Recomendada | |
|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| | | Técnica de Investigación | Tipo de Suelo ⁽¹⁾ | Parámetro a obtener ⁽²⁾ | Técnica de Investigación | Tipo de Suelo ⁽¹⁾ | Técnica de Investigación | Tipo de Suelo ⁽¹⁾ |
| SPT | NTP339.133 (ASTM D1586) | Perforación | SW, SP, SM, SC-SM | N | Perforación | CL, ML, SC, MH, CH | Calicata | Lo restante |
| DPSH | UNE 103 801:1994 | Auscultación | SW, SP, SM, SC-SM | N ₂₀ | Auscultación | CL, ML, SC, MH, CH | Calicata | Lo restante |
| Cono tipo Peck | UNE 103 801:1994 ⁽⁴⁾ | Auscultación | SW, SP, SM, SC-SM | C _n | Auscultación | CL, ML, SC, MH, CH | Calicata | Lo restante |
| CPT | NTP 339.148(ASTM D3441) | Auscultación | Todos excepto gravas | q _c , f _c | Auscultación | --- | Calicata | Gravas |
| DPL | NTP 339.159 (DIN 4094) | Auscultación | SP | n | Auscultación | SW, SM | Calicata | Lo restante |
| Veleta de Campo ⁽³⁾ | NTP 339.155 (ASTM D2573) | Perforación/Calicata | CL, ML, CH, MH | C _u , St | --- | --- | --- | Lo restante |
| Prueba de carga | NTP 339.153 (ASTM D1194) | --- | Suelos granulares y rocas blandas | Asentamiento vs. Presión | --- | --- | --- | --- |

[Figura 12].- Aplicación y limitaciones de los ensayos según la norma peruana *E0.50*

Aparte de otro documento de *Moreno* (1998), no existía en la literatura otra referencia al *Cono de Peck*, hasta la publicación del *Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)* el año 2006, en el que se considera al *Cono Dinámico Tipo Peck* (Tabla n° 2 de la norma *E.050*) como una técnica de investigación del tipo *auscultación dinámica*, que requiere investigación adicional de suelos para su inter-

pretación y que no sustituye al *Ensayo de Penetración Estándar*.

La norma aplicable para la ejecución de este ensayo es según la *E.050* la norma española *UNE 103-801:1994*, manteniendo el peso del martillo, la altura de caída y el método de ensayo (Vivar Romero, 2007) pero con las siguientes excepciones:

a) Las barras de perforación serán reempla-

zadas por las *AW* que son usadas en el ensayo **SPT** (normas *NTP 339.133* y *ASTM D1586*).

- b) La punta cónico-hueca se reemplazará por un cono de 6,35 cm (2,5 pulgadas) de diámetro y 60° de ángulo cónico en la punta.
- c) El número de golpes se registra cada 0,15m (15 cm) y se representa gráficamente cada 30 cm, siendo *Cn* la suma de golpes por cada 30 cm.

Además, tal y como ya se ha apuntado en líneas precedentes, la E.050 recomienda su aplicación irrestricta a suelos tipo *SW*, *SP*, *SM* y *SC-SM*, restringida a los *CL*, *ML*, *SC*, *MH* y *CH* y no se recomienda su aplicación a los demás tipos, que se sobreentiende son los *GW*, *GP*, *GM*, *GC*, *OL*, *OH* y *Pt*.

El problema de la aplicabilidad de la aplicación del **Cono Peck (CP)** en el Perú, tal y como indica *Vivar Romero, 2007*, tiene muchas aristas. Algunas de las más importantes son:

- Se ha estado usando para todo tipo de suelos, incluyendo los restringidos por la *E.050*.
- Se ha estado utilizando con puntazas cónica no *regladas*.
- Se ha estado utilizando dentro de las perforaciones previamente efectuadas para el **SPT**, cuando se trata de dos tipos de ensayos diferentes, uno dentro de sondeos y otra de tipo continuo.
- Existe una problemática con las correlaciones, se ha estado utilizando $N = 0,5 c$ incluso para gravas. Para suelos cohesivos (arcillas y limos) se utiliza la expresión $N = 1.0 c$.

Correlación de los ensayos de penetración dinámica continua

La gran variedad de equipos existentes, con distintas puntas, pesos de mazas, alturas de caídas, mecanismos de escape de la maza, etc, hace que deban aplicarse correlaciones para poder compararlos. Ello obliga a recomendar que, en los estadillos de campo y resultados del ensayo se incluya claramente información sobre: peso y forma de la maza, altura de caída, tipo y dimensiones de la puntaza, varillaje, etc.

La equivalencia entre dos ensayos de penetración dinámica continua se basa en que el número de golpes debería ser inversamente proporcional a la energía específica de cada uno. Para dos ensayos con penetrómetros distintos 1 y 2, en el mismo, debería cumplirse:

$$N_1(W_1 h_1 / d_1 A_1) = N_2 (W_2 h_2 / d_2 A_2)$$

Donde:

- N_i = Número de golpes en el ensayo tipo *i*.
- d_i = Penetración correspondientes al número de golpes N_i en el ensayo *i*.
- A_i = Área de la sección transversal de la punta del penetrómetro *i*.
- h_i = Altura de caída de la maza del ensayo *i*.
- W_i = Peso de la maza del ensayo *i*.

Conclusiones

Los ensayos de penetración dinámica continua son de gran utilidad en la caracterización de la compacidad de suelos granulares. Es preciso hacer ciertas salvedades en suelos limosos y con fracciones cohesivas. Resultan excelentes para detectar horizontes blandos sobre ciertos basamentos. Para caracterizar adecuadamente el terreno de cimentación es importante correlacionar estos ensayos con resultados de laboratorios y **SPT** en sondeos del entorno.

En España son de gran aplicación los ensayos tipo **Borro** y **DPSH**, mientras que en Perú están implantados el **Cono Peck** y **DPSH**. Por su parte el ensayo **SPT** está difundido a nivel mundial para toma de muestras y determinación de la compacidad en suelos. Existen además numerosas correlaciones del golpeo **NSPT** con parámetros y cargas admisibles de cimentaciones.

Lo que si encontramos que varía enormemente a día de hoy entre España y la zona andina es el modo de aplicación del ensayo **SPT**, influenciado en cierta medida por la idiosincrasia y geografía de la zona andina. Encontramos que está muy desarrollada la llamada metodología *Wash boring* así como los **SPT** discontinuos sin sondeo previo.

Poco a poco vamos viendo que se implantan en la zona andina equipos de sondeo en *convencional* con equipos de penetración **SPT** incorporados. Estas configuraciones son sin embargo las que menos, y abundan equipos de sondeo tipo *wire line* o destroza combinados con torretas para ejecución de **SPT** implantadas sobre aquellos.

En el caso de la mecánica de suelos, en la zona andina además de los trabajos para edificación y obra civil (relacionada con carreteras ferrocarriles y demás de uso público) encontramos una enorme cantidad de reconocimientos orientados al sector minero. La minería no sólo demanda mecánica de rocas para el diseño de los huecos subterráneos y cortas a cielo abierto, sino mecánica de suelos para depósitos de finos de los lavaderos (relaveras), diques, taludes de desmonte, etc.

La metodología de ensayo debe pues, adaptarse a tan inmisericorde orografía y condiciones de implantación de reconocimientos. Los sondeos y **SPT** tipo *wash boring* y las maquinas manuales transportables por piezas

son pues de uso generalizado ahora y lo serán en el futuro.

Nuestra forma de proceder debe pues adaptarse también a las condiciones a dónde vayamos. La experiencia de los técnicos locales en la aplicación de estas técnicas es crucial para todos aquellos que nos acercamos a este entorno.

Terminamos con dos citas de grandes geotécnicos:

Un hombre conocedor de las teorías de la Mecánica del Suelo, pero sin experiencia, puede ser un enemigo público...

(Terzaghi)

La observación directa, en cambio, es la única que puede darnos la legitimación definitiva de nuestras teorías, en el caso de que coincida con nuestras previsiones. Y si hay discrepancias, no hay tarea más fecunda que la de rastrear sus causas.

(Jiménez Salas, J.A. y Justo Alpañés, J.L.)

Bibliografía

- **Monografías.** Ed. Dirección General de Carreteras. España
- MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO (2006). **Reglamento Nacional de Edificaciones, E.050 Suelos y Cimentaciones.** Perú
- MORENO, D.J.J. (1998). **Correlación del SPT y Cono de Peck – Limitaciones de su uso.** VIII Congreso Nacional GeoLima'98.
- NORMA ESPAÑOLA UNE 103-801:1994. **Geotecnía. Pruebas de Penetración Super Pesada.** Julio 1994.
- VIVAR ROMERO, G (2007). **Aplicabilidad del "cono dinámico tipo Peck".** XVI Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Arequipa (Perú). 1 – 5 octubre 2007.



RUDNIK ANDINA

Delegación Ecuador:

E-mail: rjorda@rudnikandina.com

Delegación Perú:

Calle Lord Nelson, 201

Lima Perú

E-mail: peru@rudnikandina.com

Web: www.rudnikandina.com

