

CORRELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN Y LAS PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DEL TERRENO

José Miguel Galera Fernández Geocontrol S.A.

Gracia Olivenza Jiménez Geocontrol S.A.

1. INTRODUCCIÓN

El registro de los parámetros de perforación es una técnica útil y económica para la investigación geotécnica del subsuelo.

Los parámetros de perforación se definen por una serie de medidas físicas llevadas a cabo en el equipo de perforación. Algunos de los parámetros más importantes son, por ejemplo, la presión sobre la corona, el par de rotación, la velocidad de rotación, velocidad de penetración, y la presión de fluido.

Estos parámetros pueden combinarse mediante ecuaciones más complejas, para obtener otros parámetros como la energía específica o el d-exponent, que pueden correlacionarse con las propiedades geomecánicas del terreno.

Los principales objetivos de la medida de los parámetros de perforación, son los siguientes:

- ◆ Caracterización del terreno mediante la evaluación de las propiedades físicas, mecánicas o hidrogeológicas del terreno a partir de estos parámetros.
- ◆ Detección de cavidades.
- ◆ Reducir el coste de los estudios del subsuelo en grandes proyectos, mediante la extrapolación de los parámetros obtenidos en sondeos a testigo continuo a los obtenidos en sondeos a destructivo.

2. ANTECEDENTES

El registro de los parámetros de perforación ha sido aplicado en la industria petrolera desde inicios de los años 60 (Somerton 1959); sin embargo, su aplicación en geotecnia no fue hasta principios de los 70, con un aparato denominado ENPASOL (Hamelin et al. 1982). Este sistema permitía el registro de varios parámetros de perforación, como el par de rotación, la presión sobre la corona y la velocidad de penetración.

Se utilizaba normalmente en sondeos a rotación, en destructivo, y de forma ocasional en sondeos a testigo continuo, como complemento cuando la recuperación era escasa.

Sistemas similares se utilizaron en los años posteriores para la identificación del límite suelo/roca (Smith, 1994) y en proyectos de mejora del terreno (Pfister 1985; Pazuki y Doran, 1995).

3. PARÁMETROS DE PERFORACIÓN

Los parámetros que controlan el proceso de perforación pueden agruparse de la siguiente forma:

- ◆ Parámetros relacionados con el equipo, tales como la máquina, la sarta de perforación, o la corona.
- ◆ Parámetros relacionados con el proceso de perforación, como la presión sobre la corona, la velocidad de rotación, las propiedades del fluido de perforación y su velocidad de circulación. Estos son los principales elementos, en los que el operario puede intervenir dentro de las posibilidades del equipo.
- ◆ Parámetros relacionados con la respuesta del terreno: velocidad de penetración, par de rotación y presión de fluido. Para unas condiciones de perforación dadas, estos parámetros dependen únicamente de las características del terreno.

El registro de estos parámetros, puede llevarse a cabo mediante mecanismos de tipo analógico o digitales. Los primeros, pueden registrar cuatro parámetros y proporcionan una única salida gráfica en papel. Los aparatos digitales, presentan numerosas ventajas ya que pueden registrar más parámetros con una mayor precisión, y las medidas se obtienen en formato digital por lo que los datos pueden tratarse posteriormente de forma matemática o estadística.

Los parámetros registrados por los principales aparatos son los siguientes:

- ◆ Presión de fluido (P_f)

- ◆ Par de rotación (T)
- ◆ Presión sobre la corona (F)
- ◆ Velocidad de rotación (N)
- ◆ Velocidad de penetración (V)
- ◆ Fuerza de retención (F_r)
- ◆ Vibraciones en la sarta de perforación
- ◆ Tiempo por cada 5 mm de penetración (t)

Las medidas obtenidas varían con el equipo de perforación y la forma de utilizarlo, por lo que es necesario estandarizar el proceso de investigación, manteniendo lo más constante posible, la presión de fluido, velocidad de rotación y presión sobre la corona, durante la perforación. Cuando estos parámetros se mantienen constantes, el estudio de la velocidad de penetración permite detectar cambios en la litología y compacidad de la roca, o la presencia de alguna anomalía como cavidades o fracturas.

Como ya se ha dicho anteriormente, las variaciones de los parámetros de perforación están relacionadas con las propiedades del terreno. Para un tipo de suelo o roca, generalmente es más representativo uno de los parámetros frente al resto. Sin embargo, aunque este hecho es de gran ayuda para la interpretación, puede ocurrir que en dos materiales diferentes predomine el mismo parámetro, por lo que es necesario efectuar una calibración inicial mediante la ejecución de al menos un sondeo en destructivo, muy próximo a otro en testigo continuo para comparar los valores obtenidos en cada tipo de material.

El estudio de cada parámetro de perforación permite realizar una primera interpretación de los resultados, de forma que en condiciones especialmente favorables, es posible realizar una descripción satisfactoria del terreno, pudiéndose detectar cambios de litología con un error menor a 0.10 metros de profundidad.

Para un análisis más detallado puede combinarse los valores obtenidos, en ecuaciones más complejas que proporcionan parámetros que pueden ser puramente empíricos o con un significado físico.

Los más utilizados son los siguientes:

1.- Índice de Alteración (Pfister, 1985)

$$A = 1 + \frac{W}{W_{\max}} - \frac{V}{V_{\max}}$$

W = peso sobre la corona (presión sobre la corona – fuerza de retención + peso de la sarta de perforación y de la corona) (kN)

W_{\max} = valor máximo teórico de W (kN)

V = velocidad de penetración instantánea (m/s)

V_{\max} = velocidad de penetración instantánea máxima (m/s)

El índice de alteración es un indicativo de la dureza del material, y varía desde 0 para suelos blandos a 2 en los más duros. Es un parámetro muy sensible en suelos de baja resistencia.

2.- Energía utilizada en la perforación (Pfister, 1985)

$$W = T \cdot \frac{N}{V}$$

T = par de rotación (kN . m)

N = velocidad de rotación (rps)

V = velocidad de penetración instantánea (m/s)

Este parámetro es muy útil en el análisis de suelos duros y rocas blandas.

3.- Resistencia a la perforación (Somerton, 1959)

$$S_d = W \cdot \sqrt{\frac{N}{V}}$$

W = peso sobre la corona (presión sobre la corona – fuerza de retención + peso de la sarta de perforación y de la corona) (kN)

N = velocidad de rotación (rps)

V = velocidad de penetración instantánea (m/s)

4.- Parámetro τ

$$\tau_{hard} = N \cdot F \cdot \frac{D^2}{V \cdot T}$$

N = velocidad de rotación (rps)

F = presión sobre la corona (kN)

D = diámetro de perforación (m)

V = velocidad de penetración (m/s)

T = par de rotación (kN . m)

El parámetro τ hace referencia a la dificultad con que se perfora un terreno, es decir, la dificultad con que las partículas del material son erosionadas y transportadas fuera de la corona de perforación, de modo que un terreno arcilloso será difícil de perforar ya que la arcilla puede adherirse a la corona atascándola y reduciendo con ellos su efectividad. Sin embargo en un terreno arenoso, la arena puede ser fácilmente evacuada de la corona por lo que es más fácil de perforar.

5.- Exponente E (Gui et al., 2002, modificado de Jordan y Shirley, 1978)

$$E = \frac{\log \frac{V}{N \cdot D}}{\log \frac{F \cdot D}{T}}$$

V = velocidad de penetración (m/s)

N = velocidad de rotación (rps)

D = diámetro de perforación (m)

F = presión sobre la corona (kN)

T = par de rotación (kN . m)

Este índice está relacionado con el parámetro empírico d-exponent, utilizado para el estudio de terrenos arcillosos, y que se describirá posteriormente.

6.- Energía específica E (Teale, 1964)

$$E = \frac{F}{A} + \frac{2\pi \cdot N \cdot T}{A \cdot V}$$

F = presión sobre la corona (kN)

A = área de perforación (m²)

N = velocidad de rotación (rps)

T = par de rotación (kN . m)

V = velocidad de penetración (m/s)

4. ENERGÍA ESPECÍFICA

La energía específica se define como la energía necesaria para excavar un volumen unitario de roca. Es un parámetro muy útil, que puede considerarse como indicativo de la eficiencia en un trabajo de perforación.

La energía específica combina cada uno de los parámetros registrados en la perforación, y puede expresarse de la siguiente forma:

$$E = \frac{F}{A} + \frac{2\pi \cdot N \cdot T}{A \cdot V} = e_t + e_r$$

Donde;

F = presión sobre la corona (kN)

A = área de perforación (m²)

N = velocidad de rotación (rps)

T = par de rotación (kN . m)

V = velocidad de penetración (m/s)

El primer miembro de la ecuación corresponde a la componente de presión, y el segundo miembro la componente de rotación.

La energía específica tiene las mismas dimensiones que la presión debido a que si una fuerza **F**, actúa sobre una superficie normal, **A**, a lo largo de una distancia **ds**, el incremento de trabajo realizado **dW**, es

F.ds. La variación de volumen efectuada durante la perforación **dV**, es **A.ds**. Si **E**, es la energía en cualquier punto, entonces $E = dW/dV = F/A = P$, la presión en ese punto.

Para una excavación dada, **A** es constante por lo que e_r es directamente proporcional a **F**. Para **A** y **N** dados, e_r es proporcional a **T/V**.

La representación gráfica del par de rotación, **T**, y la velocidad de penetración, **V**, se aproxima a una línea recta a través del origen. La pendiente es **T/V** y es aproximadamente constante.

De ello, se deduce, que para una superficie, **A**, y una velocidad de rotación **N**, dadas, la componente de rotación e_r y por tanto, la energía total, es constante.

Otra aproximación a lo anterior es poner en la ecuación el término “**p**”, tasa de penetración por cada revolución ($p = V/N$). Entonces, la ecuación de la componente de rotación de la energía específica puede escribirse de la siguiente forma:

$$e_r = \frac{2\pi \cdot T}{A \cdot p}$$

T es el par de rotación requerido para perforar una capa de roca de longitud **p** en una revolución. Como la cantidad de energía necesaria para perforar materiales frágiles como las rocas no se ve considerablemente afectada por la velocidad en la que se aplica, la relación entre **T** y **p** no se ve afectada por cambios en la velocidad de rotación. La relación **T/p**, puede por lo tanto, considerarse como un indicador útil de la energía específica.

En la **Figura 4.1** puede verse la relación entre la penetración por revolución y la energía específica realizada sobre varios sondeos perforados en argilitas.

En la ecuación de la componente de rotación, e_r , puede observarse que la energía específica puede alcanzar valores muy altos para bajas presiones sobre la corona.

Por debajo de un cierto valor, la presión es insuficiente para efectuar la penetración; a medida que esta se incrementa, el valor de la energía específica disminuye hasta alcanzar un valor a partir del cual, decrece lentamente para continuar de forma aproximadamente constante. Este fenómeno puede observarse en la **Figura 4.2**.

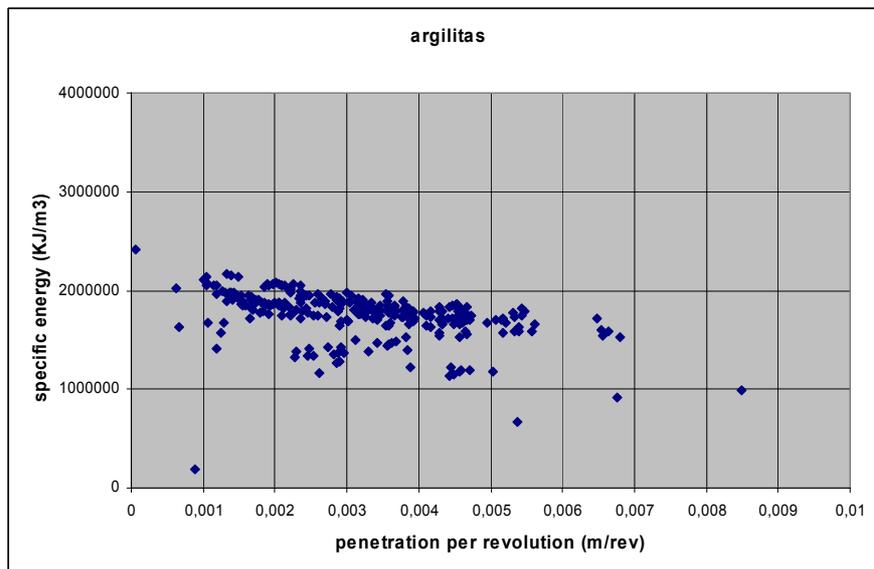


Figura 4.1.- Relación entre la energía específica y la penetración por revolución.

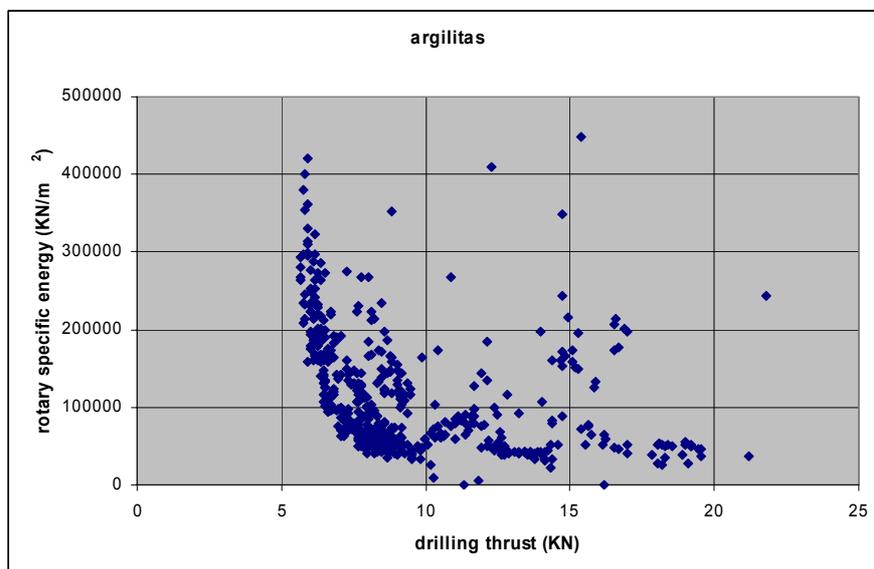


Figura 4.2.- Relación entre la presión ejercida sobre la corona y la componente de rotación de la energía específica en argilitas.

El mínimo valor adquirido por la energía es una medida de la eficiencia mecánica máxima de una herramienta concreta y en unas condiciones específicas.

Sin embargo, la energía específica no disminuye de forma indefinida; existe un momento en que un aumento de la presión sobre la corona provoca una sobrecarga y atascamiento de esta, reduciéndose la eficiencia y causando un nuevo aumento de la energía específica.

5. D – EXPONENT

Durante el proceso de perforación y bajo las mismas condiciones, la velocidad de rotación normalmente, disminuye con la profundidad. Existe una relación inversamente proporcional entre la tasa de penetración y la presión diferencial (la diferencia de presión entre el fluido de perforación y el material atravesado).

La velocidad de penetración se reduce considerablemente cuando la presión de fluido aumenta. La presión diferencial total aumentará con la profundidad y la velocidad de penetración debería disminuir para una material sometido a una presión intersticial normal.

Sin embargo, considerando la perforación de un mismo material bajo unas mismas condiciones, cuando se atraviesa una capa sometida a una sobrepresión, la presión del material se incrementa, y la presión diferencial se reduce, mejorando con ello la tasa de penetración.

Por ello, el conocimiento de la relación existente entre la velocidad de penetración y la presión diferencial existente entre el fluido y la formación puede ser de gran utilidad para:

- ◆ Mantener una presión diferencial mínima y por tanto mejorar la eficiencia de la perforación.
- ◆ Detectar formaciones con sobrepresión durante la perforación.

Estudios anteriores demuestran que existe, como se ha dicho anteriormente una relación, bajo condiciones constantes, entre la presión diferencial y la velocidad de penetración.

Bingham (1965) propuso una ecuación que relaciona la velocidad de penetración, el peso sobre la corona, la velocidad de rotación y el diámetro de perforación:

$$\frac{V}{N} = a \left(\frac{W}{D} \right)^d$$

Donde, **V** es la velocidad de penetración (m/s), **N** es la velocidad de rotación (rps), **W** es el peso sobre la corona (kN) y **D** es el diámetro de perforación. **a** y **d** son parámetros adimensionales; **a** es un parámetro empírico relacionado con la resistencia y constante para cada material y **d** es un exponente que hace referencia a la facilidad con que el material es perforado.

Jordan y Shirley (1966) resolvieron la ecuación mostrada anteriormente, para **d**, de la siguiente forma:

$$d = \frac{\log\left(\frac{V}{60 \cdot N}\right)}{\log\left(\frac{12 \cdot W}{10^6 \cdot D}\right)}$$

V = velocidad de penetración (m/s)

N = velocidad de rotación (rps)

W = peso sobre la corona (kN)

D = diámetro de perforación (m)

Existe una relación empírica entre el **d**-exponent y la presión diferencial, de modo que cuando un material sometido a una presión normal es atravesado, el **d**-exponent se incrementa con la profundidad. Sin embargo, cuando un material está sometido a una sobrepresión y la presión diferencial aumenta, el **d**-exponent disminuye.

6. CORRELACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN CON LAS PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LAS ROCAS.

Para evaluar la potencialidad de las expresiones anteriores se ha perforado un sondeo de 70 m en un terreno constituido por una alternancia de limolitas y areniscas (sondeo BH-1).

Los diferentes parámetros de perforación junto a la energía específica calculada según la ecuación de Teale (1965) puede observarse en la **Figura 6.1**.

En la Figura 6.1 puede observarse como todos los parámetros muestran un valor aproximadamente constante a lo largo del sondeo, con dos zonas en las que los valores son claramente diferentes de la media.

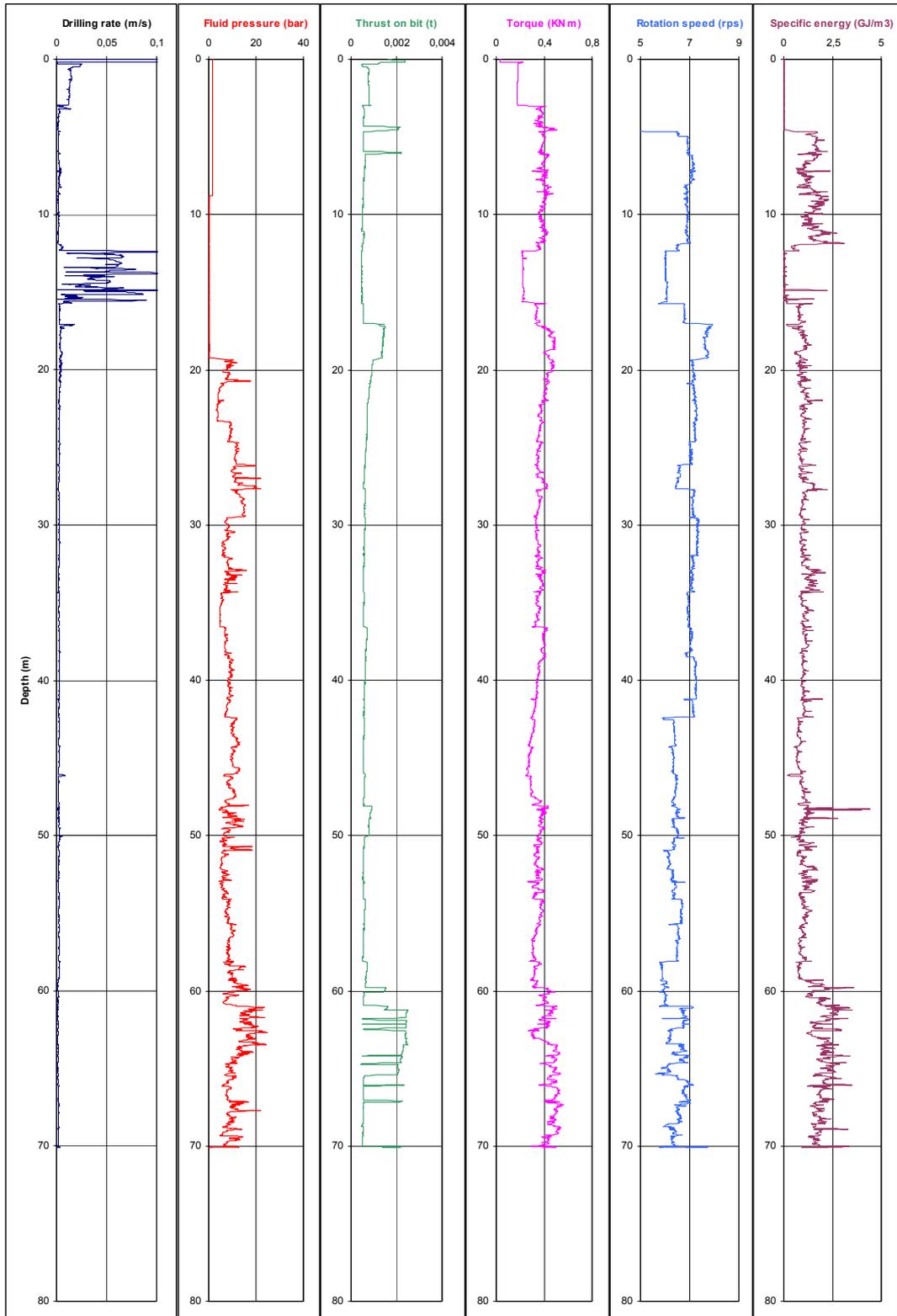


Figura 6.1.- Parámetros de perforación obtenidos y energía específica calculada según la ecuación de Teale (1965) para el sondeo BH-1.

La primera zona se localiza entre 12 y 16 metros de profundidad y está representada por un incremento de la velocidad de perforación acompañado de una disminución de los valores del par de rotación y de la velocidad de rotación. Esta primera zona, se corresponde aproximadamente con un material muy fracturado y meteorizado situado, en el sondeo, entre 6 y 15.65 metros.

La segunda zona se localiza entre 61 y 65 metros y se caracteriza por un incremento de la presión sobre la corona y valores del par de rotación ligeramente más altos. En el sondeo, esta zona está representada por un material sano, con elevada resistencia y un RMR superior a 50 puntos.

La energía específica refleja estos resultados con un mínimo entre 12 y 16 metros, correspondiente a la zona intensamente fracturada y un máximo entre 61 y 65 para los materiales de mejor calidad.

Cada uno de estos parámetros se ha comparado individualmente con el RQD, número de juntas por metro y RMR de la roca.

Algunos parámetros como la velocidad de penetración no muestran una buena correlación con la calidad de la roca, aunque los valores de velocidad de penetración más alto corresponden a tramos con un RMR inferior a 30.

Otros parámetros como el peso sobre la corona o el par de rotación muestran una mejor relación. En las **Figura 6.2 y 6.3** puede observarse como ambos aumentan con la calidad de la roca.

La velocidad de rotación muestra una relación directa con **RMR y RQD**. Esta relación debería ser inversa, con valores elevados de velocidad de rotación para macizos rocosos con pobres propiedades geomecánicas. Sin embargo, en algunos casos, con materiales muy fracturados y meteorizados, con elevado contenido en arcilla, esta puede obstruir la corona reduciendo su velocidad de rotación.

En la **Figura 6.4** se muestra la correlación entre la energía específica y el RMR, RQD y número de juntas por metro.

En la primera figura hay tres líneas teóricas que representan los valores medios, máximos y mínimos de la energía específica obtenidos para cada valor de RMR. En la segunda figura puede observarse los valores obtenidos en el sondeo BH-1 y los valores teóricos de RQD obtenidos a partir del número de juntas, según la ecuación de Palmstrong (1981). Los resultados obtenidos no muestran una buena correlación ya que según ellos los valores más altos de RQD corresponden a una energía específica baja. Sin embargo, los resultados mostrados en la última figura, muestran un comportamiento similar al teórico esperado; la energía específica decrece a medida que el número de juntas aumenta.

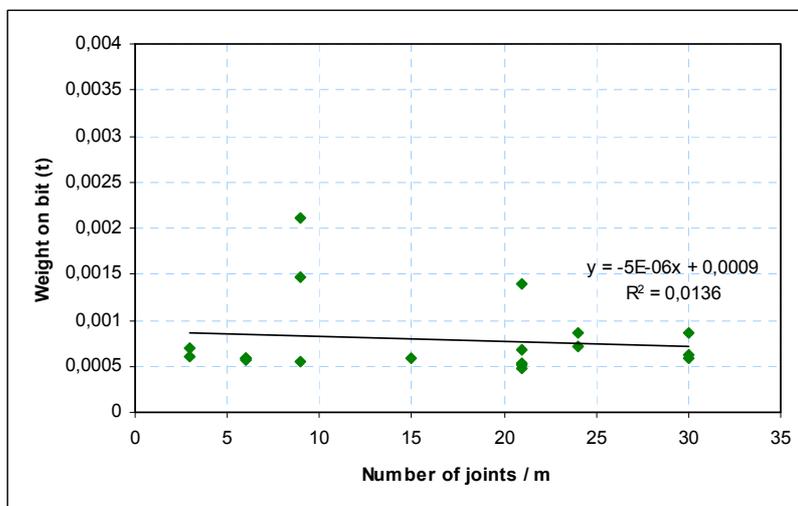
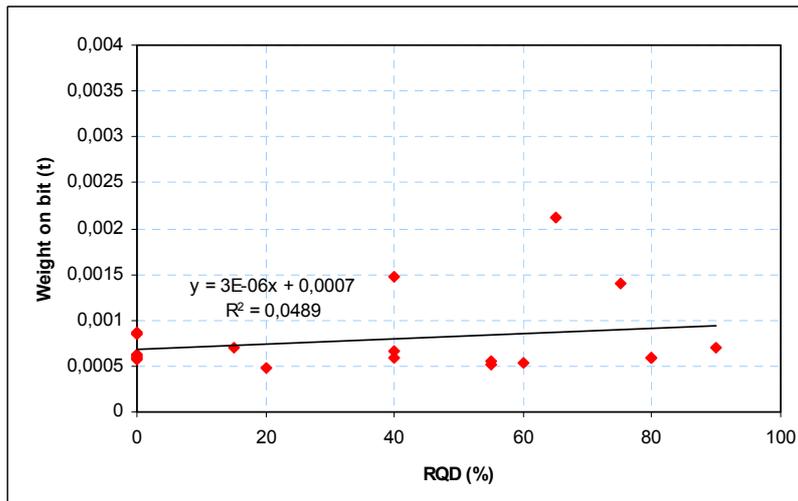
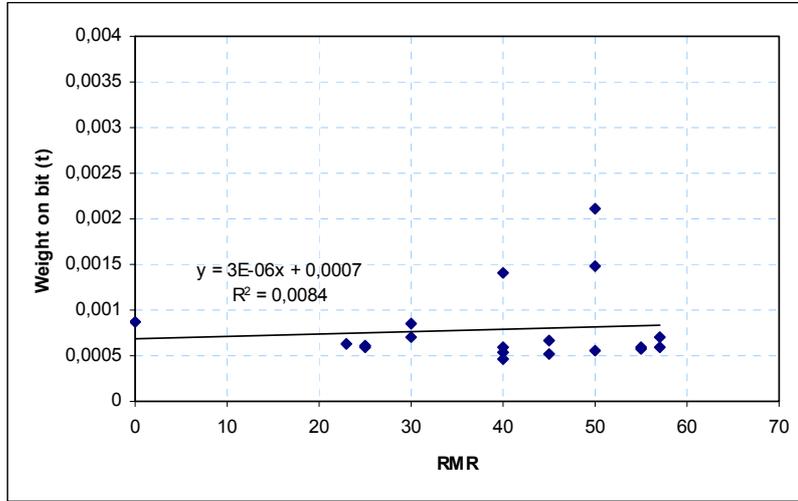


Figura 6.2.- Relación entre el peso sobre la corona y el RMR, RQD y número de juntas por metro en el sondeo BH-1.

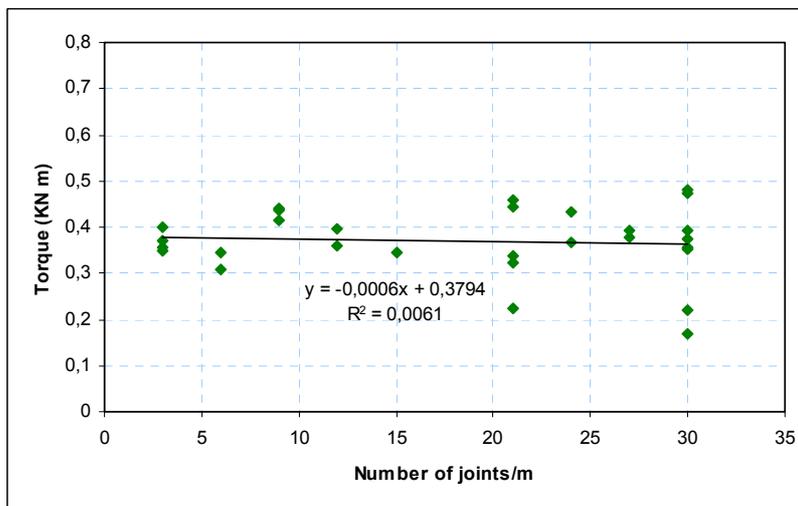
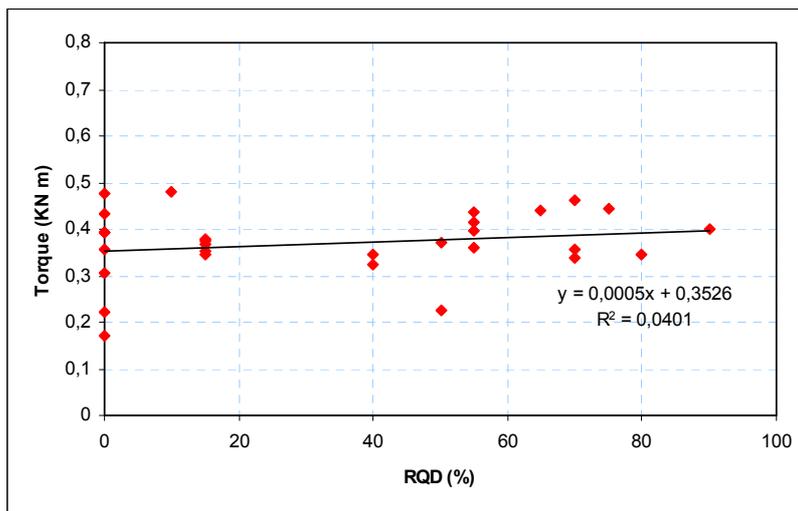
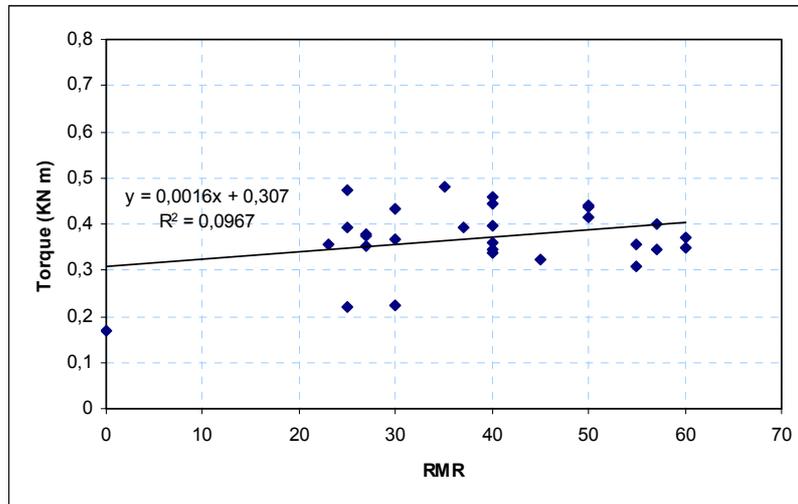


Figura 6.3.- Relación entre el par de rotación y el RMR, RQD y número de juntas por metro en el sondeo BH-1.

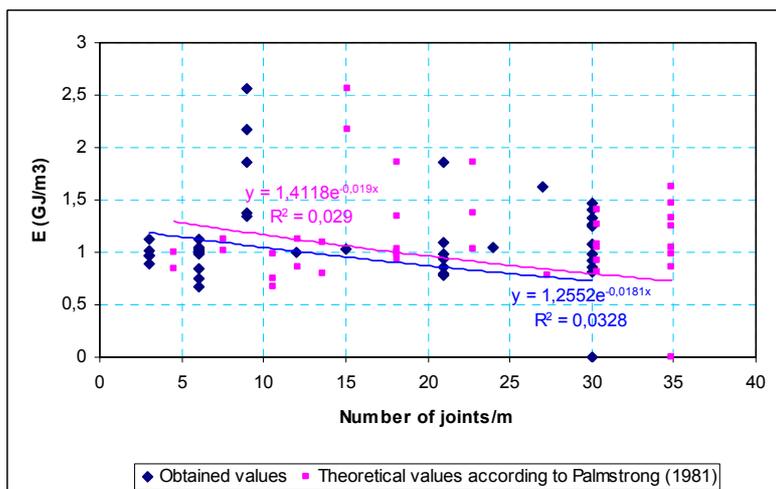
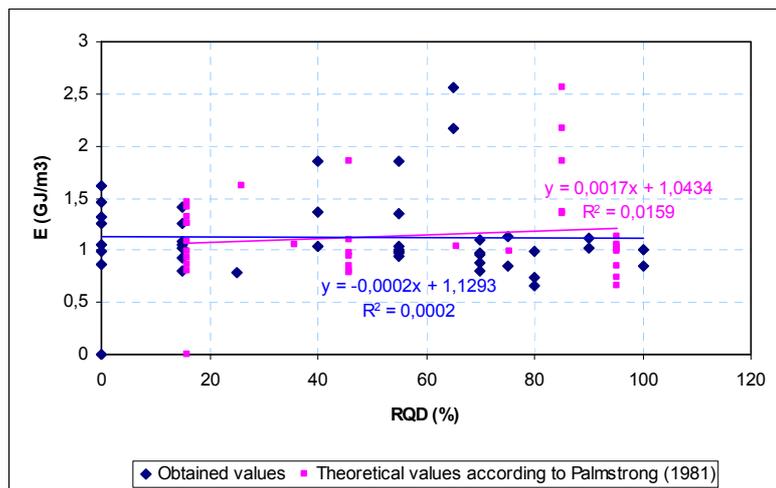
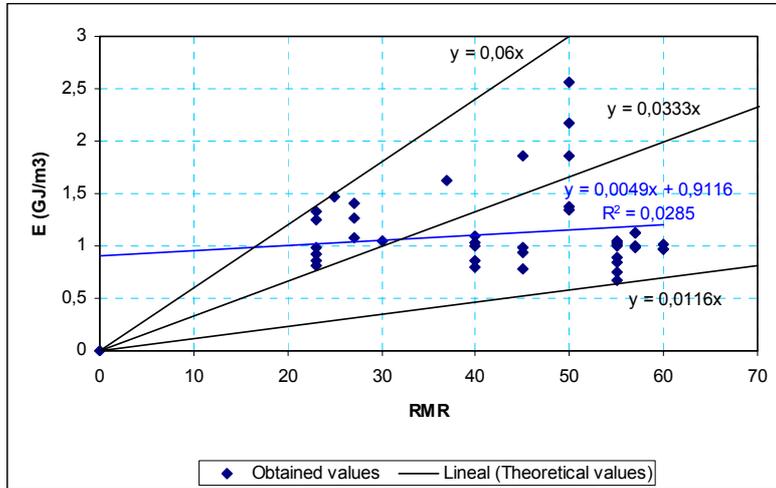


Figura 6.4.- Correlación entre la energía específica y el RMR, RQD, y número de juntas por metro. Comparación entre los valores obtenidos en el sondeo BH-1 y los teóricos según la ecuación de Palmstrom (1981)

Para la correlación entre las propiedades geomecánicas de la roca y los parámetros de perforación, se realizaron varios ensayos de laboratorio en 12 testigos parafinados. Los resultados obtenidos en estos ensayos se muestran en la **Tabla 6.I**. La resistencia del macizo rocoso se ha calculado a partir de la ecuación de Kalamaras/Bieniawski (1995):

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} e^{(RMR-100)/24}$$

donde;

σ_{cm} ; resistencia a compresión simple del macizo rocoso.

σ_{ci} ; resistencia a compresión simple de la roca intacta.

Muestra	γ_a (g/cm ³)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	V_p (m/s)	σ_c^m (MPa)	RMR	RQD	Nºjuntas/m	E_s (GJ/m ³)
1	2,41	19		576,08	3,58	60	70	3	0,96
2			2,05	450,7		60	70	3	0,96
3	2,67	37,2		1867,61	1,77	27	15	30	1,26
4	2,41	20,3	1,48		3,11	55	55	6	1,03
5				1157,09		55	55	6	1,00
6				1494,74		55	80	6	0,66
7	2,47	17,9	1,55	518,33	0,72	23	15	30	0,80
8				488,32		57	100	6	1,00
9				535,58		57	75	6	1,12
10	2,42	16,4			1,65	45	55	21	0,93
11	2,33	18		655,45	2,24	50	55	9	1,35
12				3144,65		50	65	9	2,56

Tabla 6.I. Resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Los resultados obtenidos se han comparado con los parámetros de perforación. En las **Figura 6.5** puede observarse la relación existente entre la energía específica y la resistencia a compresión simple de la roca intacta, del macizo rocoso y con la velocidad sísmica. En estas gráficas puede observarse como la energía específica aumenta con la resistencia de la roca y con la velocidad sísmica.

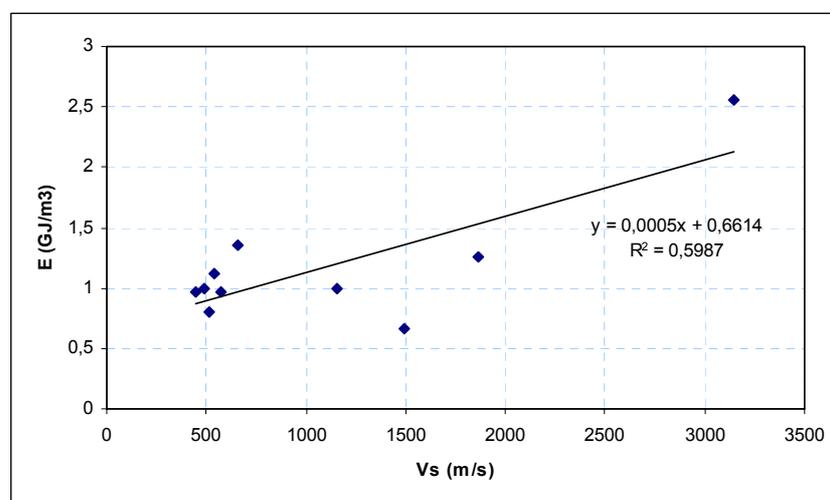
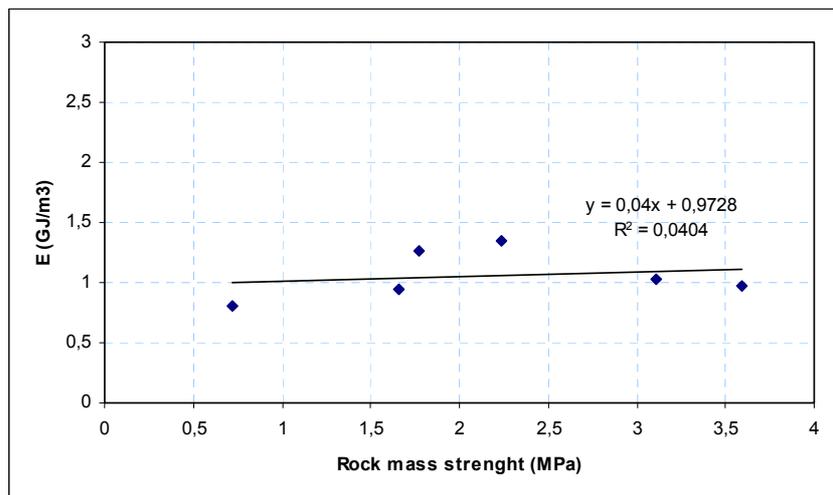
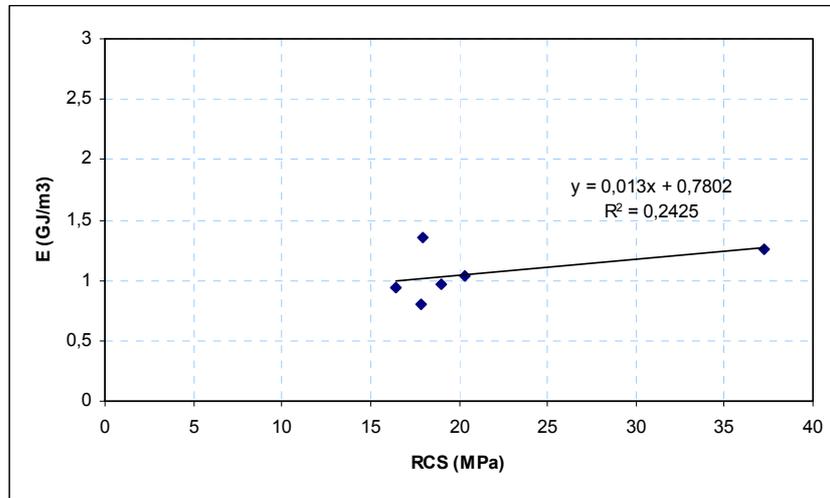


Figura 6.5.- Correlación entre la energía específica y la resistencia a compresión simple de la roca intacta, del macizo rocoso y la velocidad sísmica.

7. CONCLUSIONES

Los parámetros de perforación constituyen un mecanismo útil para la caracterización del terreno.

Para la sucesión de argilitas y areniscas estudiadas, los parámetros que muestran una mejor correlación con el RQD, nº de juntas por metro y RMR son el peso sobre la corona y el par de rotación.

Los parámetros registrados pueden combinarse en expresiones más complejas como la energía específica o el d-exponent. Aunque los ensayos de laboratorio realizados no son suficientes para establecer una correlación teórica entre los parámetros de perforación y las propiedades mecánicas de la roca, se ha podido observar como la energía específica muestra una relación directamente proporcional con la resistencia a compresión simple, de la roca intacta, resistencia del macizo rocoso y velocidad de ondas sísmicas. Para profundizar en estas correlaciones se realizarán más ensayos en distintos tipos de roca.

El d-exponent es un índice empírico más apto para determinar el perfil de compactación en suelos arcillosos y detectar posibles niveles con sobrepresión.

8. AGRADECIMIENTOS

Los resultados de este trabajo encuadran dentro del Proyecto de I+D+i – ADEMA (Contrato RFCR-CT-2005-00001) financiado por la Unión Europea.

9. BIBLIOGRAFÍA

- ◆ Fortunati, F; Pellegrino, G. “The use of electronics in the management of site investigation and soil improvement Works: Principles and applications”. Geotechnical Site Characterization, Robertson and Mayne (eds) (1998).
- ◆ Benoit, J. and Sadkowski, S.; Wallace A. Bothner. “Rock characterization using drilling parameters”. Proceedings ICS’2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Viana da Fonseca & Mayne (eds) (2004).
- ◆ Jordan, J. R.; Shirley, O.J. “Application of Drilling Performance Data to Overpressure Detection”. Journal of petroleum technology. (1966).
- ◆ Tani, K. “Importance of instrumented drilling”. Geotechnical Site Characterization, Robertson and Mayne (eds) (1998).

- ◆ Gui, M.W.; ASCE, M.; Soga, K.; Bolton, M.D.; and Hamelin, J.P. "Instrumented Borehole Drilling for Subsurface Investigation". Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. (2002).
- ◆ Pfister, P. "Recording drilling parameters in ground engineering" Ground Engineerign. (April 1985).
- ◆ Teale, R. "The concept of specific energy in rock drilling". Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Vol. 2, pp. 57-73. Pergamon Press 1965.
- ◆ Bieniawski, S.T. (1979). The geomechanics classification in rock engineering applications. In: Proc. 4th International Conference on Rock Mechanics. Montreaux. Balkema. Vol.2.
- ◆ Kalamaras, G.S. and Bieniawski, Z.T. (1995). A rock mass strength concept. In: ISRM International Congress of Rock Mechanics. Tokyo. Japan.
- ◆ Palmstrom A. (1981). Application of the volumetric joint count as a measure of rock mass jointing. Proc. Int. Symp. on Fundamentals of Rock Joints, Björkliden, pp. 103-110.