

EXPERIENCIAS EN LA CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO CON MÉTODOS GEOSÍSMICOS

Ruth Norabuena, Orlando Felix & Emiliano Maquera

rnorabuena@svs.com.pe, ofelix@svs.com.pe, emaquera@svs.com.pe
SVS Ingenieros S.A.- Empresa del Grupo SRK, Lima, Perú

RESUMEN

Ciertos parámetros geomecánicos del macizo rocoso pueden ser obtenidos a partir de las velocidades sísmicas usando correlaciones empíricas; lo que facilita y contribuye en la obtención rápida de un modelo geomecánico. El presente estudio busca relacionar las velocidades sísmicas obtenidas de los métodos de refracción sísmica y el MASW con los índices geomecánicos RQD y RMR obtenida de los testigos de perforación. De los resultados notamos que son diferentes para cada método sísmico y que debe considerarse otros aspectos geológicos para la interpretación y para una correlación fiable en la que el perfil con velocidades de ondas de corte (V_s) da una mejor correlación.

INTRODUCCIÓN

Los métodos geofísicos a diferencia de otros métodos ofrecen ventajas notables respecto a otros métodos de investigación pues, son fáciles y rápidos de efectuar; además de tener un bajo coste. Con la refracción sísmica se mide las velocidades de ondas longitudinales identificadas como V_p y con el método MASW (Mutichannel Analysis of Surface Waves), las velocidades de las ondas de corte V_s .

La refracción sísmica es uno de los métodos de exploración del subsuelo más antiguo y fiable en profundidades pequeñas y medianas, que sirve para caracterizar el macizo rocoso usando correlaciones entre las velocidades longitudinales y los parámetros geomecánicos tales como el RQD (Rock Quality Design), el número de juntas y también con los parámetros geotécnicos tales como el módulo de Young, la resistencia de la roca intacta entre otros; una desventaja de este método es que es influenciada por la presencia del agua, aumentando el valor de las velocidades.

El MASW es un método moderno, que es usado frecuentemente en la exploración geotécnica; fue introducido en el año 1999 y permite estimar las velocidades de ondas de corte (V_s) del subsuelo a partir del análisis de las ondas de superficie Rayleigh o Groundroll generadas por una fuente; la distribución de las velocidades de corte (V_s) en el subsuelo es calculada como un sondeo. La máxima profundidad de investigación alcanzada está entre los 10 a 30 m, pudiendo variar por el lugar donde se realiza el sondeo. El método provee resultados altamente favorables y competentes (tienen una mayor resolución del perfil del subsuelo), en las que su uso permite reconocer principalmente los materiales arcillosos o sueltos. La velocidad de corte (V_s) es utilizado en la caracterización dinámica del suelo y la estimación de la resistencia del terreno; además las ondas de corte no son influenciadas por la presencia del agua.

En el presente trabajo exponemos algunas experiencias obtenidas en la caracterización geomecánica del macizo rocoso con los métodos sísmicos (brevemente descritos en los párrafos anteriores) en la estimación de los índices de calidad como RQD (Rock Quality Design) y RMR (Rock Mass Rating). Se ha utilizado la información del logueo geotécnico de los testigos de perforación y las velocidades V_p y V_s medidos con refracción sísmica y MASW, ejecutados en los estudios para cimentación de presas y en túneles.

ESTADO DEL CONOCIMIENTO DE LA GEOSÍSMICA EN LA GEOMECÁNICA

Desde principios de los 60' diferentes autores han realizado estudios e investigaciones con la finalidad de obtener correlaciones entre los parámetros sísmicos con los parámetros geomecánicos y geotécnicos que sean representativos del terreno y útiles al proyectista.

PRINCIPALES ESTUDIOS

Uno de los estudios más importantes fue el realizado por Sjøgren et al (1979), que presentó la correlación de las velocidades longitudinales (V_p) con los parámetros del macizo rocoso como el número de juntas por metro y el RQD (Fig. 1). La correlación fue para rocas competentes del escudo

escandinavo y Andes de Chile. Propuso varias relaciones teóricas entre las velocidades longitudinales y el número de juntas por metro. Su estudio determinó que las correlaciones no eran aplicadas cuando la roca tenía un alto grado de alteración y/o meteorización, y que existían variaciones para cada rango de velocidades, siendo estas remarcables cuando se consideraba la litología.

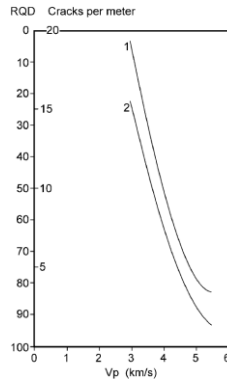


Figura 1. Curvas medias de regresión de la correlación entre las velocidades longitudinales V_p y el fracturamiento del macizo rocoso expresado valores de juntas por metro y RQD (Sjøgren et al, 1979). 1 RQD y 2 juntas por metro.

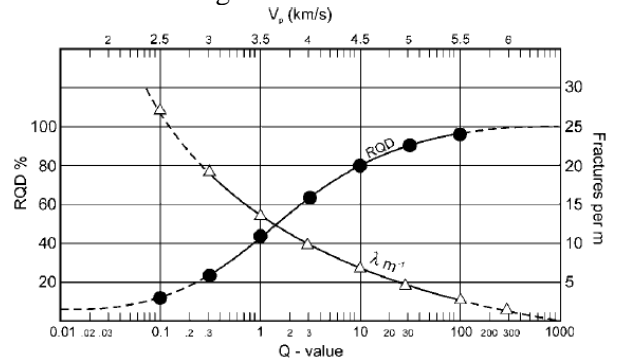


Figura 2. Correlación entre las velocidades longitudinales, el RQD promedio, las fracturas por metro y el Q (Barton, 1995)

Barton (1991) correlaciona el índice Q y las velocidades longitudinales (V_p) mediante la siguiente relación empírica: $V_p \approx 3.5 + \log_{10} Q$; esta correlación la obtuvo en el proyecto ubicado en una caverna en Noruega donde utilizó la tomografía sísmica de “crosshole”. Además, fue verificada en rocas competentes de baja porosidad, resistentes ($RCS \geq 100 \text{MPa}$) y a bajas profundidades. Deere y Merritt (1969) propusieron una correlación entre el índice de velocidad $(V_f/V_l)^2$ y el RQD, donde V_f y V_l corresponden a velocidades de ondas sísmicas medidas en el campo y laboratorio, respectivamente. Barton introdujo en el modelo de Sjøgren el valor de Q, los valores de las velocidades longitudinales y el RQD (Fig. 2).

EXPERIENCIA EN LA EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DE MACIZOS ROCOSOS CON LAS VELOCIDADES SÍSMICAS

Para nuestro trabajo los datos fueron tomados de los estudios de la cimentación de ocho proyectos de presas, relaves y botaderos. Se analizaron 22 taladros diamantinos, 22 perfiles de V_s y 22 perfiles de V_p . Los taladros diamantinos eran verticales y con diámetros de 9.6 cm (HQ) y 7,6cm (NQ), longitudes no mayores a 100 m y con registros que incluían la litología y los índices RQD y RMR. Los sondeos fueron perforados en el mismo perfil geofísico o a una distancia no mayor de 25 m. Las litologías evaluadas fueron, areniscas con limolitas y calizas (rocas sedimentarias); andesitas, brechas, ignimbritas y toba (como rocas ígneas), y filitas y pizarras (rocas metamórficas).

Para nuestro estudio los valores de RMR estuvieron comprendidos entre 22 a 70.

VELOCIDAD DE CORTE VERSUS PARÁMETROS GEOMECÁNICOS

Los análisis estadísticos de los datos son mostrados en las figuras 3 y 4, en ellos notamos que los resultados son diferentes para cada caso y tienen comportamientos similares según el tipo de roca.

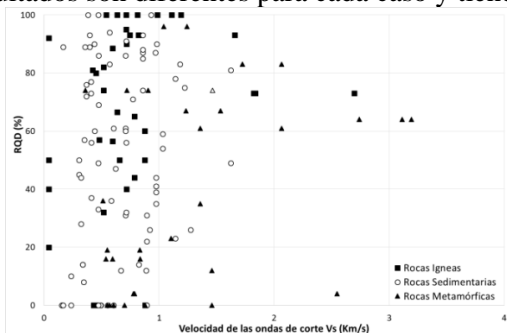


Figura 3 Gráfico entre el RQD y la velocidad de las ondas de corte (V_s).

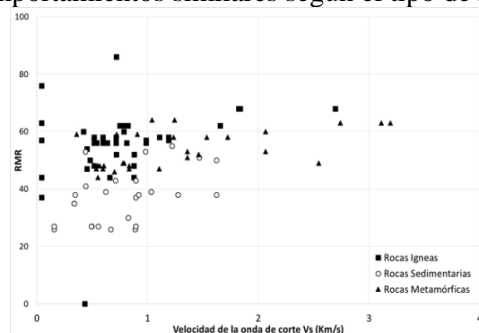


Figura 4. Correlación entre el RMR y la velocidad de onda de corte.

Los gráficos RQD-Vs (Fig. 4) muestran en general una alta dispersión y no se obtuvo una buena correlación, siendo mayor la dispersión para las rocas sedimentarias.

El rango de las Vs es 0.35 a 2 Km/s; las rocas ígneas y metamórficas alcanzan altas velocidades de corte. El gráfico RMR versus Vs (Fig. 5) muestra una tendencia neta progresiva de todos los datos. Según los tipos de roca notamos que los datos de las rocas sedimentarias se concentran en un sector del gráfico para valores bajos de RMR y con Vs < 1.6 Km/s. Una similar y mejor distribución (menor dispersión) tienen las rocas ígneas y metamórficas con valores de RMR superiores a 40.

VELOCIDADES LONGITUDINALES VERSUS PARÁMETROS GEOMECÁNICOS

El total de los datos RQD y Vp fueron proyectados en el gráfico de Sjøgren (Fig. 5) donde la curva uno corresponde a la correlación entre el RQD y Vp. Tal como se muestra en la gráfica los datos caen a la izquierda de la curva uno y se tiene valores de 100 % de RQD con valores de Vp más bajos.

La figura 6 muestra la distribución de los valores de RMR con respecto a las velocidades longitudinales (Vp), donde se observa que los valores están concentrados en una franja delimitada por las líneas discontinuas. Los valores de RMR se incrementan progresivamente con el aumento de las velocidades longitudinales. En la dispersión considerando los tipos de rocas es notorio dos tendencias: la primera agrupa las rocas metamórficas e ígneas y la segunda agrupa las rocas sedimentarias. Para las rocas sedimentarias existe una mayor dispersión.

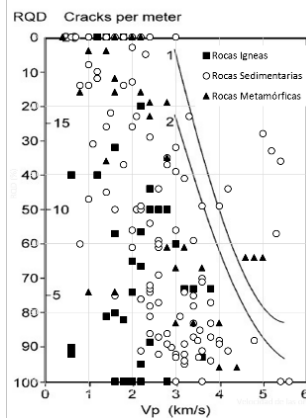


Figura 5. Correlación entre el RQD y las velocidades longitudinales usando el gráfico de Sjøgren (curva 1).

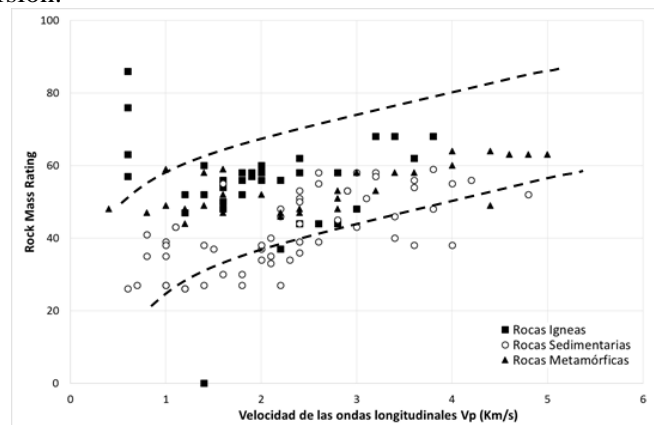


Figura 6. Correlación entre el RMR y Vp (km/s).

DISCUSIÓN

La investigación comprendió mayormente macizos rocosos de naturaleza heterogénea, tanto en geología como en geotecnia; lo que incidió en los resultados de los parámetros medidos, no permitiendo que de manera global podamos establecer una correlación neta entre los parámetros RQD, RMR y las velocidades sísmicas.

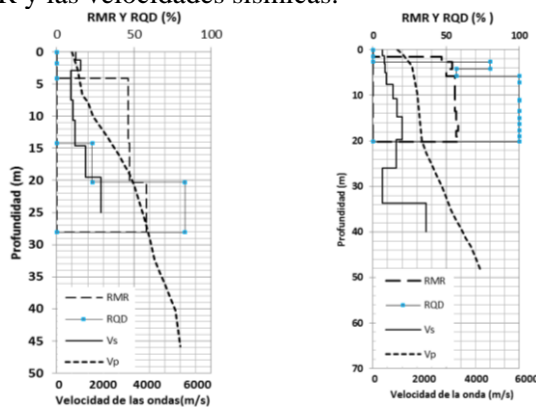


Figura 7. Gráficos del RMR, RQD, Velocidad de las ondas Vs y Vp, versus la profundidad de los sondeos P-7 y P-2 en filitas del Marañón.

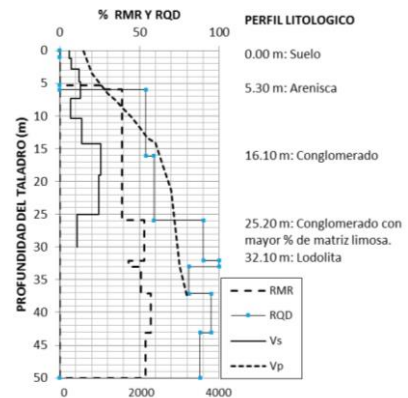


Figura 8. Gráfico de los perfiles geofísicos y geomecánicos incluyendo la litología de la perforación SRK-BH7.

En el estudio determinamos que en varios casos el perfil de velocidades de las ondas sísmicas de corte (V_s) se correlaciona mejor con el perfil litológico (sobre todo cuando el perfil litológico es heterogéneo), que las V_p ; pero que, esto alteraba la correlación con el RQD y RMR no siendo muy buena en dichos casos, un ejemplo de ello se muestra en la figura 8. Entonces notamos que la V_s es capaz de reconocer la posición de manera nítida o cuasi-exacta de estratos de menor velocidad que subyacen a un estrato de mayor velocidad pasando a un segundo plano la correlación con un parámetro geomecánico.

Si consideramos ambas velocidades sísmicas en un solo sitio de estudio con un solo tipo litológico, existe una mejor correlación entre los parámetros medidos tal como lo muestran las figuras 7, 9 y 10 para el caso de filitas del Marañón.

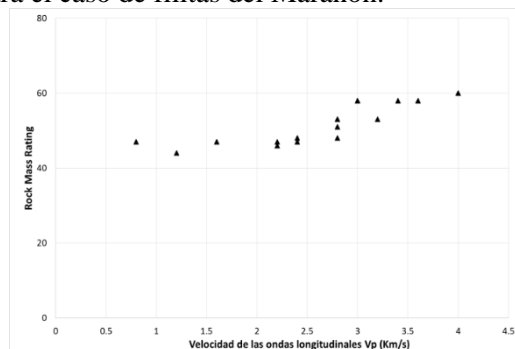


Figura 9. Gráfico RMR en función de las V_p para filitas en un contexto geológico particular.

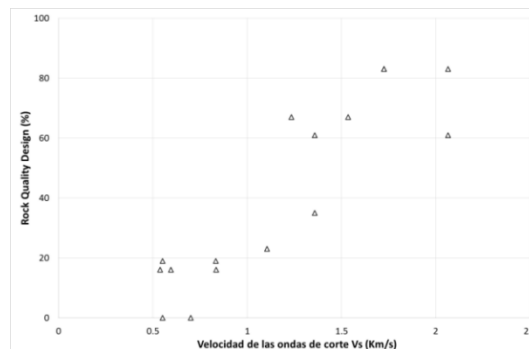


Figura 10. Gráfico RQD en función de la V_s para filitas en un contexto geológico particular.

CONCLUSIONES

Las correlaciones entre las medidas de las velocidades sísmicas y los índices de calidad del macizo rocoso no fueron muy definidas; debido a que los datos evaluados correspondían a perfiles litológicos variados. De manera general notamos que las correlaciones entre las velocidades longitudinales (V_p) con los índices de calidad del macizo rocoso muestran una menor dispersión, que las obtenidas con las velocidades de corte. Una mejor correlación entre los parámetros geomecánicos y las velocidades de corte fue obtenida cuando interpretamos perfiles de un lugar en particular en donde la ubicación de los sondeos geosísmicos y la perforación coinciden.

En la fase inicial de las investigaciones es recomendable realizar primero “mediciones paramétricas” entre las velocidades sísmicas del MASW y los parámetros geomecánicos de los testigos de perforación diamantinas, para establecer las correlaciones básicas para el sitio y que servirán luego para la interpretación geotécnica de los perfiles sísmicos restantes y elaborar un modelo geosísmico-geotécnico. Asimismo para mejorar las correlaciones entre los parámetros geosísmicos y geomecánicos debemos tener presente las condiciones geológicas del lugar que ayudarán a establecer el orden de los factores geológicos que incidirán o controlaran en las velocidades de ondas de corte.

REFERENCIAS

1. Barton N. 2007. Taylor and Francis Group (eds) *Rock Quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy* 65-75, Londres.
2. ChoonSunwoo&Sei-Ho Hwang, 2001, Correlation of rock mass classification methods in Korean rock mass *Korea institute of geology, mining and Materials, Taejon Korea.*
3. Jauch F. 2000. Using borehole geophysics for geotechnical classifications of crystalline rock masses n tunneling: 90-102, Suiza.
4. Mohamed EdyTonnizam et al. 2011. Assessment on excavability in weathered Sedimentary Rock Mass Using Seismic Velocity Method; *Journal of materials science and engineering*: 258-263.
5. Palmstrom A. 1995. Application of seismic refraction survey in assessment of jointing, *Conference on recent advances n tunneling technology*: 1 – 8 New Delhi.
6. Robert A. et al. (1997) High-resolution surface-seismic imaging techniques for NEHRP soil profile classifications and earthquake hazard assessments in urban areas, *U.S. Geological Survey open-file 97-501*
7. Sjøgren B., Øfsthus A. y Sandberg J., 1979. Seismic Classification of rock Mass Qualities, *Geophysical Prospecting* 27: 409-442.
8. T.L. Goh et al. 2011. Application of spectral Analysis of surface waves (SASW) Method: Rock Mass Characterizacion, *SainsMalaysiana* 40 (5): 425-430.