

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE ROCAS MEDIANTE MÉTODOS INDIRECTOS DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA

Castro María Inés y Negrelli M. Mariel

Instituto de Investigaciones Mineras, Departamento de Ingeniería de Minas, FI, Universidad Nacional de San Juan, ARGENTINA

castromariaines43@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La caracterización geotécnica y mecánica de materiales rocosos es un aspecto esencial dentro de la ingeniería, ya que permite conocer el comportamiento de estos materiales ante diversas sollicitaciones.

Tradicionalmente, esta caracterización se ha realizado mediante ensayos destructivos en laboratorio, como los que determinan la resistencia a la compresión uniaxial, el módulo elástico y la densidad específica. Sin embargo, estos métodos suelen ser costosos, requerir tiempo y demandar preparación específica de las muestras.

En los últimos años, los ensayos no destructivos han adquirido un rol cada vez más relevante debido a su rapidez, menor costo y facilidad de aplicación en campo. Entre los más utilizados se encuentran el ensayo ultrasónico y el martillo de Schmidt.

El **método de ultrasonido** consiste en una técnica no destructiva que permite explorar las características internas de una roca a través de la propagación de ondas sonoras. La velocidad de estas ondas P al atravesar el material depende de la presencia de discontinuidades o heterogeneidades internas, ya que estas interfieren o atenúan su avance.

Por su parte, el **martillo de Schmidt**, también conocido como martillo de rebote o de impacto, permite estimar la dureza superficial de la roca. Este ensayo proporciona un valor empírico (número de rebotes) que puede correlacionarse con la resistencia a la compresión simple mediante ecuaciones o ábacos.

El propósito de este estudio es realizar un análisis comparativo entre la velocidad de propagación de ondas P y el número de rebotes del martillo de Schmidt, medidos en distintas muestras de roca. Se busca establecer el grado de correlación entre ambos métodos, lo cual resulta de gran interés práctico, ya que permitiría validar la confiabilidad de estas técnicas como indicadores indirectos de la resistencia del material rocoso.

OBJETIVO

Establecer un análisis comparativo entre la velocidad de propagación de ondas P y el número de rebotes del martillo de Schmidt, medidos en distintos tipos de muestras de roca, evaluando su grado de concordancia como métodos indirectos de estimación de la resistencia mecánica.

METODOLOGÍA

Para evaluar la correlación entre la velocidad de propagación de ondas P y el número de golpes del martillo de Schmidt, se trabajó con un conjunto de muestras de roca divididas en dos grupos.

El primer grupo se corresponden a rocas calcáreas, tomadas de un afloramiento sedimentario de la Provincia de San Juan, correspondiente a la Formación La Silla (Cámbrico sup. -Ordovícico inf.), y el segundo grupo obedece a rocas piroclásticas de afloramientos del sur argentino, (Comodoro Rivadavia).

Las muestras fueron caracterizadas de la siguiente manera:

- Mecánicamente mediante el ensayo con el martillo de Schmidt, utilizando un martillo de rebote tipo Schmidt (*modelo tradicional tipo N, marca Proceq, Suiza*).
- Dinámicamente utilizando el método de ultrasonido. Para este último ensayo, se contó con un equipo de *Ultrasonido Pundit Lab., de la serie PL02-001-0097, Software Versión '2.0.5', Hardware Revisión 'B0' - Signature '09000000'*.
- Determinación del volumen y densidad específica, con el fin de calcular propiedades físicas básicas en cada una de las muestras.



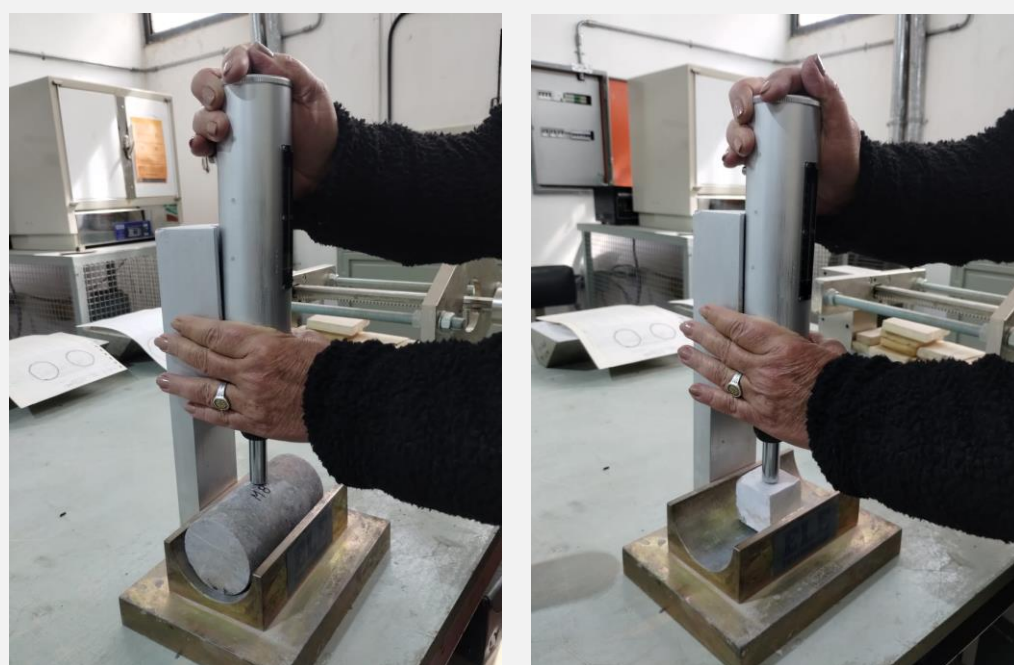
Probetas cilíndricas de rocas piroclásticas



Probetas cúbicas de rocas calcáreas



Equipo de Ultrasonido

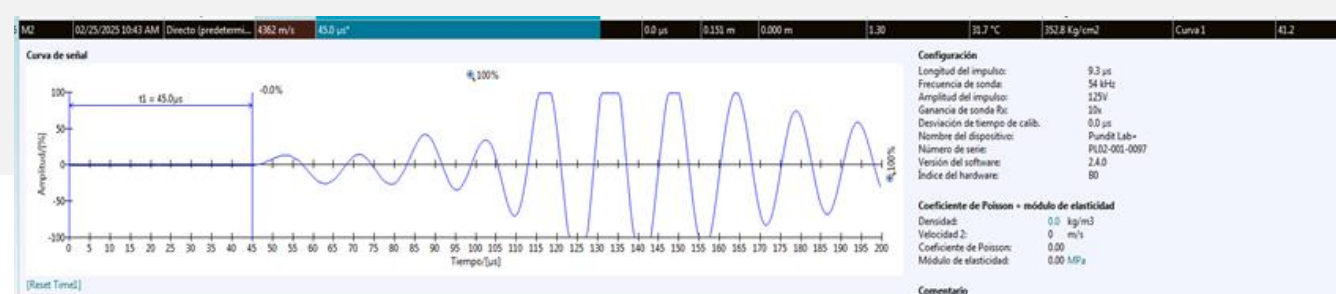


Equipo martillo de Schmidt

En el ensayo con el **martillo de Schmidt** como medida de dureza superficial y estimador indirecto de resistencia a la compresión, se aplicó la Norma RILEM 1993, y se utilizó una ecuación empírica y ábacos para obtener la Fuerza de Compresión Uniaxial.

Con el método de **ultrasonido**, fue posible obtener las propiedades de propagación de ondas como la Velocidad de la onda compresional (V_p), permitiendo mostrar como esta propiedad dinámica está influenciada por el nivel de fracturamiento que presenta el material.

Gráfico de velocidad P, obtenido por Equipo Pundit Lab



RESULTADOS

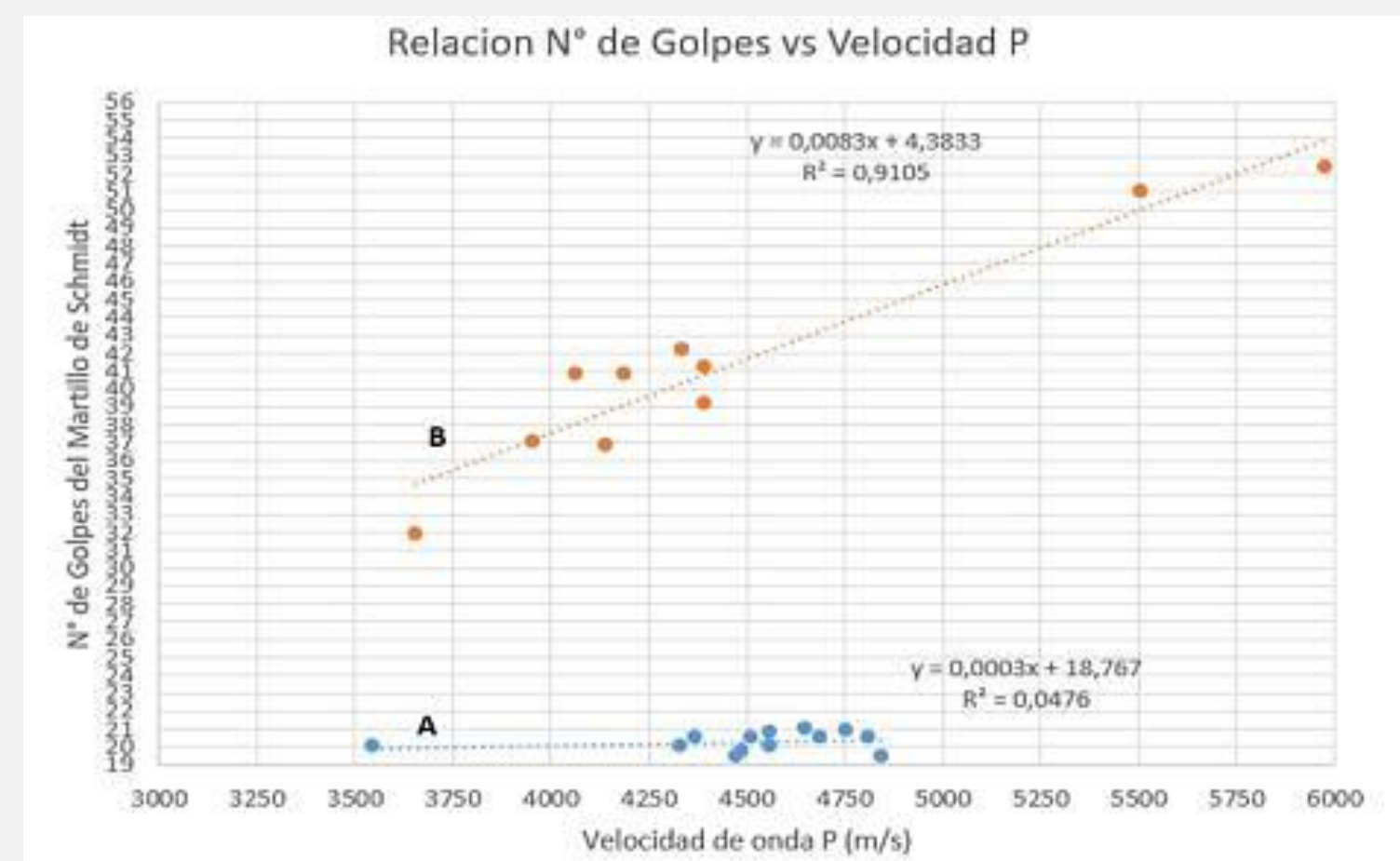
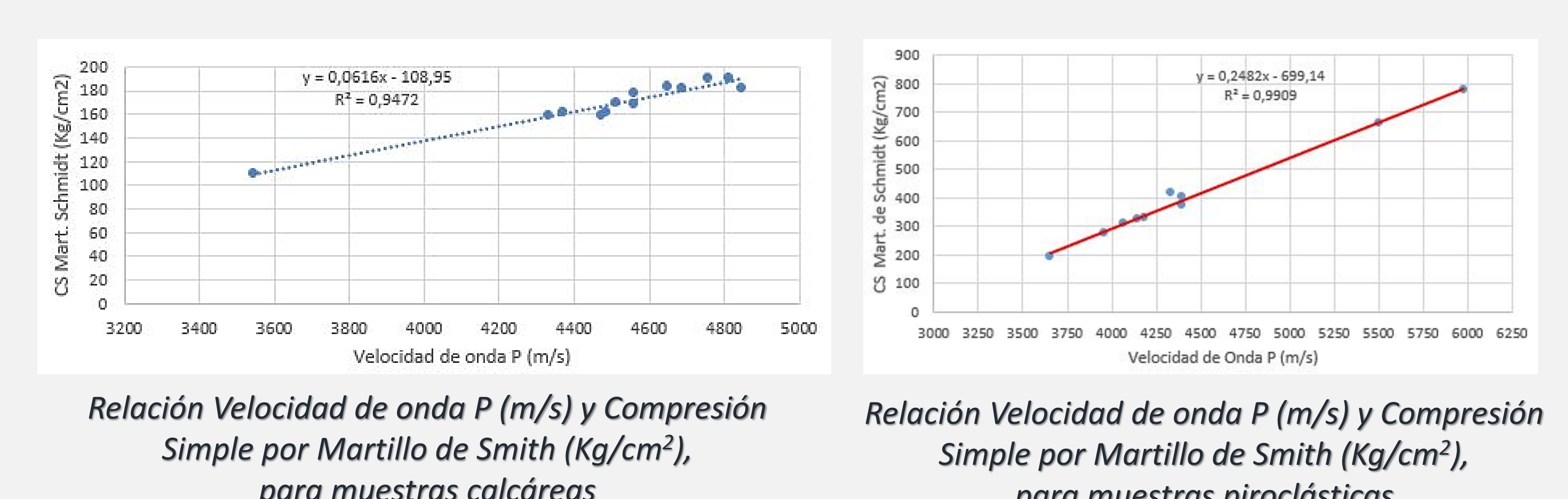
Los resultados de ambos ensayos se adjuntan en las siguientes tablas (Tabla 1 y Tabla 2)

Tabla 1. Resultado de Ensayos de Ultrasonido y Martillo de Schmidt de Rocas Calcáreas

Muestra	Volumen (m³)	Peso (Kg)	Dens. Espec. (Kg/m³)	Veloc. P (m)	Mód. Elást. (Kg/cm²)	Nº de Golpes Mar. Schmidt	C. Simple (Kg/cm²)
SI-1	0,000072246	0,1844	2553	4561	369343,62	20	168,3
SI-3	0,000070312	0,1911	2481	4811	391589,02	20,5	189,7
SI-4	0,000074964	0,1707	2277	4687	342098,52	20,5	181,5
SI-5	0,00007392	0,1866	2524	4649	343593,46	21	183,5
SI-7	0,000074883	0,1901	2539	4576	329585,88	20,8	177,4
CS-A	0,000067842	0,1652	2435	4846	347602,85	19,5	181,5
LS-7	0,000065436	0,1876	2867	4368	357094,80	20,5	161,1
LS-4	0,000063504	0,1706	2686	4512	385990,52	20,5	170,3
LS-5	0,0000576	0,1619	2811	4333	348143,32	20	159,1
LS-6	0,00004788	0,1238	2586	3545	159309,63	20	110,1
F2A	0,00007934	0,1946	2453	4756	352342,33	20,9	189,7
F2B	0,000070434	0,1711	2429	4487	335038,50	19,8	162,1
F2C	0,000060648	0,1557	2567	4475	322003,17	19,5	159,1

Tabla 2. Resultado de Ensayos de Ultrasonido y Martillo de Schmidt de Rocas Piroclásticas

Muestra	Volumen (m³)	Peso (Kg)	Dens. Espec. (Kg/m³)	Veloc. P (m)	Mód. Elást. (Kg/cm²)	Nº de Golpes Mar. Schmidt	C. Simple (Kg/cm²)
M1	0,0004422	1,120	2532,8	4186	321213,65	40,8	330,4
M2	0,0004466	1,070	2395,9	4392	305603,95	41,2	375,2
M3	0,0004495	1,030	2291,4	4066	219197,65	40,8	310,0
M4	0,000446	1,120	2511,2	5504	440961,67	51	664,8
M5	0,0003827	0,960	2508,5	5975	514013,12	52,4	778,4
M6	0,0003543	0,905	2554,3	4335	332415,93	42,2	421,1
M7	0,0003545	0,905	2552,9	4395	313496,43	39,2	402,8
M8	0,0003566	0,840	2355,6	4142	264502,25	36,8	325,3
M9	0,000322	0,755	2344,7	3953	211951,05	37	277,4
M10	0,00038977	0,905	2321,9	3655	174995,01	31,9	195,8



Para el **Grupo B** (correspondiente a rocas piroclásticas), se observa una amplia dispersión tanto en la velocidad de propagación de ondas P como en los valores del martillo de Schmidt.

Las velocidades de onda P se encuentran en el rango de 3655 a 5975 m/s, mientras que el número de rebotes varía entre 31.9 y 52.4.

Esta variabilidad permite establecer una relación lineal positiva y significativa entre ambas variables, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9105$, lo que indica una correlación fuerte. La pendiente positiva de la recta de regresión sugiere que a medida que la velocidad de onda P aumenta, también lo hace la resistencia superficial medida por el martillo de Schmidt.

Esta correlación puede interpretarse como un reflejo de que las rocas con mayor rigidez y densidad favorecen una propagación más rápida de las ondas sísmicas y, al mismo tiempo, ofrecen mayor resistencia al impacto. En concordancia con esto, diversos autores han señalado que existe una estrecha relación entre la velocidad de onda P, la resistencia a compresión uniaxial y la densidad, especialmente en litologías más compactas y homogéneas.

En contraste, el **Grupo A** (correspondiente a rocas calcáreas) presenta una menor dispersión en ambas variables. Las velocidades de onda P se mantienen dentro de un rango relativamente acotado, entre 4300 y 4900 m/s, y los valores del martillo de Schmidt muestran muy poca variabilidad.

Esta uniformidad se traduce en un coeficiente de determinación muy bajo ($R^2 = 0.0476$), lo que indica la ausencia de una correlación significativa entre las dos variables evaluadas. Esta falta de correlación puede atribuirse a dos factores principales:

- Limitaciones del martillo de Schmidt, cuya resolución puede no ser suficiente para detectar pequeñas variaciones de resistencia en materiales finos y compactos.
- Homogeneidad litológica, ya que las rocas de este grupo presentan granulometría fina, baja porosidad y escasa fracturación interna, lo cual resulta en valores constantes tanto en la velocidad sísmica como en la dureza superficial.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman la existencia de una correlación positiva significativa entre la velocidad de onda P y el número de rebotes del martillo de Schmidt, particularmente en ciertos rangos de rigidez y tipos de roca.

Esta correlación fue especialmente evidente en las muestras de rocas piroclásticas, donde ambas técnicas mostraron buena sensibilidad para reflejar variaciones en las propiedades mecánicas del material.

Sin embargo, en rocas muy compactas, como las calcáreas, el martillo de Schmidt presentó limitaciones en su capacidad para detectar diferencias sutiles, mientras que la técnica ultrasónica mantuvo un mayor nivel de discriminación.

Esto pone en evidencia la importancia de seleccionar adecuadamente la metodología de ensayo en función de la litología y de los objetivos específicos del estudio.

En términos generales, ambas técnicas no destructivas pueden ser utilizadas de manera complementaria para estimar propiedades mecánicas de las rocas de forma eficiente. En particular, las velocidades de onda P obtenidas mediante ultrasonido se revelan como un indicador confiable del comportamiento mecánico de las rocas, mostrando buena correlación con los valores obtenidos mediante el martillo de Schmidt, especialmente en materiales menos densos o con mayor heterogeneidad estructural.

El uso combinado de métodos no destructivos permite optimizar los tiempos y costos asociados a la caracterización geotécnica, sin comprometer la integridad del material. Este enfoque resulta especialmente valioso tanto en estudios de laboratorio como en trabajos de campo, al ofrecer una alternativa rápida, económica y suficientemente precisa para la evaluación inicial de la calidad y resistencia de los materiales rocosos.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- Faria, R. A., Nascimento, E. S., Gomes, R. A., & Cunha, A. P. Estimating uniaxial compressive strength, density and porosity of rocks from the P-wave velocity measurements in-situ and in the laboratory. REM - International Engineering Journal, 74(4), 547–554. 2021. <https://doi.org/10.1590/0370-44672021740063>
- Jobli, A. F., Hampden, A. Z., & Tawie, R. (2017). The role of ultrasonic velocity and Schmidt hammer hardness in predicting the compressive strength of rocks. AIP Conference Proceedings, 1875(1), 030005. 2017. <https://doi.org/10.1063/1.4998386>
- Gasparik, M. Evaluation of rock mass strength using Schmidt hammer. International Symposium on Rock Mechanics. 1992.
- <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- <https://www.tiempodesanjuan.com/mineria/la-industria-la-cal-no-duerme-la-siesta-y-10-anos-agrandara-la-torta-n349128>