

# Estimación empírica de la resistencia a compresión simple a partir del ensayo de carga puntual en rocas anisótropas (esquistos y pizarras).

Empirical estimation of the uniaxial compressive strength from the point load test in anisotropic rocks (schists and shales).



Burbano Danny

Ingeniería en Geología (Quito-Ecuador, UCE), Master en Ingeniería Geológica (Madrid-España, UCM), Docente UCE / dsurbano@uce.edu.ec

\*García Tania

Ingeniería en Geología (Quito-Ecuador, UCE), Master en Paleontología (Madrid-España, UCM), Docente UCE. / egarcia@uce.edu.ec

## Resumen

En este trabajo se establecen nuevas correlaciones empíricas entre la resistencia a compresión simple (RCS) y el índice de carga puntual  $Is(50)$  en rocas anisótropas, en particular en esquistos y pizarras. Se han empleado datos de 2.015 ensayos de carga puntual y 229 ensayos de resistencia a compresión uniaxial realizados en rocas anisótropas obtenidos en las diferentes etapas de estudio del proyecto hidroeléctrico Paute-Cardenillo, localizado en las estribaciones orientales de la cordillera de los Andes septentrionales (SE Ecuador). Se han identificado cinco litotipos de rocas anisótropas (esquistos y pizarras) para los que se han obtenido los valores medios de resistencia a compresión simple y del índice de carga puntual en función de su orientación con respecto a los planos de anisotropía. Finalmente, se comprueba que no existe una relación directa entre RCS y  $Is(50)$  por lo que no es fiable adoptar los modelos empíricos tradicionales de regresión lineal, que no tienen en cuenta el efecto de los planos de anisotropía en la resistencia de la roca. Por lo tanto, se proponen tres nuevas relaciones empíricas que permiten estimar la RCS a partir del  $Is(50)$  en rocas anisótropas.

**Palabras clave:** anisotropía; ensayo de carga puntual; esquisto; mecánica de rocas; resistencia a compresión uniaxial

## Abstract

*In this paper new empirical relationships are developed between uniaxial compressive strength and point load index  $Is(50)$  in anisotropic rocks, particularly in schists and shales. We have used data from 2015 point load tests and 229 uniaxial compressive strength tests performed in anisotropic rocks obtained during various stages of study of Paute-Cardenillo hydroelectric project, located in the eastern slopes of the northern Andes Cordillera (SE Ecuador). We have defined five anisotropic rocks types (schists and shales) for which the mean values of uniaxial compressive strength and point load index were obtained according to their orientation with respect to the planes of anisotropy. Finally, it is found that there is no direct relationship between uniaxial compressive strength and  $Is(50)$  so it is unreliable take traditional empirical linear regression models, which do not consider the effect of the planes of anisotropy in rock strength. Therefore, three new empirical relationships that estimate the uniaxial compressive strength from  $Is(50)$  in anisotropic rocks are proposed.*

**Keywords:** anisotropy; point load test; uniaxial compressive strength; rock mechanics; schists

## 1. Introducción

Este trabajo estudia la influencia de la anisotropía en el comportamiento de resistencia y deformación de las rocas. Una roca anisótropa presenta una variación de una o varias propiedades en función de la orientación considerada (Saroglou et al., 2004). La anisotropía está condicionada por planos de debilidad (esquistosidad, foliación, estratificación, clivaje, diaclasado, fisuras, etc.) donde la resistencia es controlada por la superficie de rugosidad, cohesión y la orientación de los planos con respecto a las direcciones de los esfuerzos principales (Mutukuri et al., 1995). Conocer el grado de anisotropía de las rocas es importante para comprender su comportamiento ante las cargas, y su omisión puede ocasionar errores en la estimación de su resistencia (Tsizzi, 1986). En general, la mayoría las rocas de bajo y alto grado de metamorfismo (fillitas, pizarras, esquistos) y los gneises son anisótropas (Ramamurthy et al., 1993).

La resistencia a compresión simple de las rocas es el parámetro más común para definir los criterios de rotura y el comportamiento geomecánico de un macizo rocoso (Bieniawski, 1989, Zare-Naghaddehi et al., 2011). Su obtención en ensayos de laboratorio requiere muestras cuidadosamente preparadas y de un tiempo considerable para conocer su resultado, lo que puede representar un alto costo. Las rocas anisótropas en particular son difíciles de ensayar por la variabilidad de su resistencia, por lo que, son necesarios numerosos ensayos para obtener parámetros representativos de todo el rango de resistencias. En los últimos años, se han desarrollado diferentes métodos indirectos para estimar la resistencia a compresión simple (Fener et al., 2005), entre los que destaca el ensayo de carga puntual (ISRM, 1985). Esto se debe a la relativa sencillez del ensayo, la facilidad de preparación de las muestras y su aplicabilidad en el campo. La ISRM (International Society of Rock Mechanics) indica que existe una relación lineal directa entre la resistencia a compresión simple (RCS) y el índice de carga puntual  $Is_{(50)}$ , que varía entre 20 y 25. Los resultados de estas estimaciones son relativamente aceptables en rocas isotropas o con muy bajo grado de anisotropía. Sin embargo, existen numerosos trabajos que han obtenido un rango más amplio de esta relación RCS/ $Is_{(50)}$ , entre 8 y 50, en ensayos con diferentes tipos de rocas, particularmente en rocas con moderada y alta anisotropía; por tanto, la aplicación de un factor de conversión único para los diferentes tipos de rocas, podría conducir a resultados erróneos.

Por otra parte, el potencial del ensayo de carga puntual aún no ha sido completamente evaluado para rocas anisótropas. Esto se debe a la dificultad de obtener muestras con diferentes orientaciones de anisotropías y a la limitación que expone la norma ISRM (1985), donde se considera un ensayo válido cuando la superficie de rotura contiene los dos puntos de aplicación de la carga. En el caso de las rocas anisótropas, el comportamiento mecánico está controlado por los planos de debilidad. Si bien, ni la norma tiene una estipulación diferente sobre la validez de los modos de ro-

tura de las rocas anisótropas, ni este tema ha sido explorado exhaustivamente por los investigadores (Basu y Kamran, 2010).

En base a esta problemática, en este trabajo se desarrollan nuevos modelos empíricos que permiten estimar la resistencia a compresión simple a partir del índice de carga puntual en rocas anisótropas (esquistos y pizarras). Para ello, se cuenta con 2.015 ensayos de carga puntual y 229 ensayos de resistencia a compresión simple de rocas anisótropas obtenidas de sondeos, galerías y en superficie, realizados en los diferentes estudios geológicos y geotécnicos del proyecto hidroeléctrico Paute-Cardenillo, localizado en las estribaciones orientales de la cordillera de los Andes septentrionales (SE Ecuador). Teniendo en cuenta las muestras obtenidas de este proyecto se han identificado 5 litotipos diferentes de rocas anisótropas: 1) Esquisto cuarzo-clorítico (Xqz-cl), 2) Esquisto micáceo-clorítico (Xm-cl), 3) Esquisto cuarzo-micáceo (Xqz-m), 4) Pizarra micácea grafitica (Pm-graf) y 5) Pizarra cuarzo grafitica (Pqz-graf).

## 2. Metodología

Se recolectaron 2.015 muestras destinadas para el ensayo de carga puntual y 229 muestras para los ensayos de RCS, entre esquistos, pizarras y cuarcitas, de las cuales 661 fueron tomadas en los afloramientos de roca durante las geo-travesías realizadas para la elaboración del cartografía geológica a detalle, 376 en galerías teniendo en cuenta su distribución litológica y que la muestra no haya sido afectada por el método de excavación, 978 de testigos de sondeo; por lo general se tomaron 2 muestras continuas, cada 10 m de roca perforada, en los 44 sondeos de investigación geológico-geotécnica.

Para la ejecución de los ensayos de carga puntual se utilizó una prensa Franklin, de fabricación italiana (TECNOTEST: TS 706) con precisión de  $\pm 1\%$ . Para el corte de las muestras en prismas cuadrangulares y los testigos de sondeo, se utilizó una cortadora de disco diamantado. Los ensayos de resistencia de compresión simple fueron ejecutados con una prensa hidráulica que ejerce una carga axial de 2.000 kN. La preparación de las muestras para los ensayos de carga puntual en rocas anisótropas se realizó según la norma ISRM (1985), donde se establecen los requisitos de tamaño para las pruebas diametral, axial y de bloque. En todos los casos se midió el ángulo  $\beta$  formado entre la dirección de aplicación de la carga y el plano de foliación. Las muestras para los ensayos de resistencia a compresión simple se tomaron a partir de testigos de sondeos junto a las muestras del ensayo de carga puntual. Se realizaron ensayos tipo axial y diametral teniendo en cuenta diferentes ángulos de inclinación de los planos de anisotropía de modo que se cubrió la mayoría de ángulos entre  $\beta=0^\circ$  a  $\beta=90^\circ$ . La variación del índice de carga puntual  $Is_{(50)}$  y de la resistencia a compresión simple en función del ángulo de aplicación de la carga ( $\beta$ ) se estableció para cada uno de los litotipos mediante el cálculo de valores medios para cada ángulo de foliación entre  $\beta=0$  a

$\beta=90^\circ$ . A partir de estos datos, se generaron gráficas de dispersión para determinar la correlación entre los dos ensayos. Finalmente, se proponen tres nuevas ecuaciones empíricas, adaptadas de las obtenidas en trabajos previos (Vutukuri et al., 1995; Khanlari et al., 2014), que permiten estimar la resistencia a compresión simple en función el índice de carga puntual aplicado a rocas anisótropas, en particular pizarras y esquistos.

## 2.1. Comparación entre la RCS y el índice $is(50)$ en rocas anisótropas

Se han comparado los resultados obtenidos de RCS con respecto a los de  $Is_{(50)}$  para cada uno de los litotipos (Figura 1), sin considerar el efecto del ángulo de anisotropía ( $\beta$ ). Se observa que existe una gran dispersión de la relación  $RCS/Is_{(50)}$ . El ajuste de regresión lineal presenta bajos coeficientes de correlación ( $R^2 < 41\%$ ) para cada variedad litológica (esquistos y pizarras). Esto indica que no existe una relación directa entre los valores de RCS y  $Is_{(50)}$ . Por tanto, para rocas con mediana y alta anisotropía, no es fiable adoptar los modelos empíricos tradicionales de regresión lineal para predecir la resistencia a compresión uniaxial a partir del índice de carga puntual.

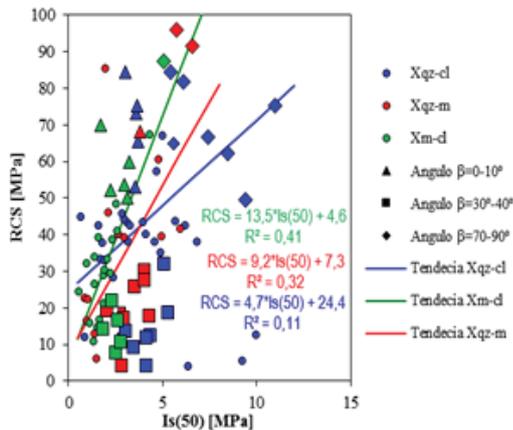


Figura 1. Correlación empírica lineal entre el índice de carga puntual  $Is_{(50)}$  y la resistencia a la compresión simple (RCS) para rocas anisótropas (esquistos).

## 2.2. Nuevos métodos de estimación de la RCS a partir del índice $is(50)$ en rocas anisótropas

### Coefficiente de correlación lineal ( $K_L$ )

Por medio de la relación  $K_L = RCS/Is_{(50)}$  se propone obtener un coeficiente de correlación lineal para cada ángulo de anisotropía en cada tipo litológico. En total han definido 10 coeficientes de correlación para los ángulos  $\beta=0^\circ$  a  $\beta=90^\circ$  (Tabla I). Estos pueden ser utilizados para obtener la RCS en cada ángulo de anisotropía, realizando el producto entre cada constante  $K_L$  con el valor del índice  $Is_{(50)}$  respectivo.

Tabla 1. Coeficientes de correlación lineal ( $K_L$ ) para cada ángulo de anisotropía y litología.

Ángulo anisotropía	Esquistos:			Pizarras:	
	$K_L = RCS/Is_{(50)}$			$K_L = RCS/Is_{(50)}$	
$\beta$ (°)	Xqz-cl	Xm-cl	Xqz-m	Pqz-graf	Pm-graf
0	29	32	30	16	30
10	20	19	19	10	18
20	10	8	10	6	12
30	5	4	6	5	9
40	6	4	5	6	9
50	9	8	8	7	11
60	13	11	12	7	14
70	15	14	17	8	18
80	18	15	19	10	21
90	21	17	19	11	24

### Coefficiente de correlación no lineal ( $K_{NL}$ )

Este método de obtención de coeficientes está basado en la correlación de Khanlari et al., (2014):

$$K_{NL} (\beta = i^\circ) = A \cdot \text{sen} (\beta + B)$$

donde:  $\beta$  es el ángulo de orientación entre los planos de anisotropía y la dirección de carga; A y B son constantes numéricas ajustadas para cada litología.

Los valores de las constantes A y B son diferentes entre los rangos  $0^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$  y  $30^\circ < \beta \leq 90^\circ$ . En la Tabla II se recopila valores deducidos para cada variedad litológica, así como las constantes para el cálculo generalizado de esquistos y pizarras.

Tabla 2. Constantes A y B para la determinación del coeficiente de correlación no lineal ( $K_{NL}$ ) para cada ángulo de anisotropía y litología.

Litología	$0^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$		$30^\circ < \beta \leq 90^\circ$	
	A	B	A	B
Xqz-cl	-46,9	27,6	37,3	-18,8
Xm-cl	-58,1	30,6	34,3	-18,1
Xqz-m	-48,1	28,4	42,8	-23,6
<b>ESQUISTOS</b>	<b>-52</b>	<b>29</b>	<b>39</b>	<b>-21</b>
Pqz-graf	-22,0	14,7	13,7	-3,7
Pm-graf	-40,9	27,6	40,2	-18,6
<b>PIZARRAS</b>	<b>-28</b>	<b>19</b>	<b>21</b>	<b>-8</b>

### 2.3 Coeficiente de correlación no lineal basado en el lineal ( $K_{VHF}$ )

El tercer método empírico es una adaptación de la ecuación propuesta por Vutukuri et al. (1995). Se requiere inicialmente el ensayo de carga puntual de al menos 10 muestras, aplicados perpendicularmente a los planos de anisotropía. El valor  $Is_{(50)}$  medio obtenido será multiplicado por el coeficiente de correlación lineal ( $K_L$ ) para  $\beta=90^\circ$ . Con el producto

de estos dos parámetros se obtendrá la RCS para  $\beta=90^\circ$  definido por la siguiente expresión:

$$RCS_{90^\circ} = K_{L, 90^\circ} \cdot Is_{(50), 90^\circ}$$

Para la predicción de la RCS en los restantes ángulos de anisotropía ( $\beta = 0-80^\circ$ ) se aplica el factor de reducción (Fr) del valor de  $RCS_{90^\circ}$  definido por la siguiente ecuación:

$$Fr = RCS(\beta = \beta) / RCS_{90^\circ}$$

donde: Fr es el factor de reducción de resistencia,  $RCS(\beta = \beta)$  es la resistencia a compresión simple para la inclinación del plano de anisotropía  $\beta$ , y  $RCS_{90^\circ}$  es la resistencia a compresión simple cuando la inclinación del plano de anisotropía es  $\beta = 90^\circ$ .

La ecuación para determinar el factor de reducción está definida por:

$$Fr = A - B \cdot \cos 2(\beta + \psi) + C \cdot \cos 4(\beta + \psi)$$

donde: A, B y C son constantes determinadas para cada variedad litológica (esquistos y pizarras),  $\beta$  es el ángulo de orientación entre los planos de anisotropía y la dirección de carga, y  $\psi$  es el ángulo necesario para trasladar la curva al valor de RCS de mínima resistencia. En general se utiliza valores entre  $5^\circ$  y  $10^\circ$ .

La Tabla 3 muestra los valores de las constantes A, B y C definidos para cada litotipo así como los valores generalizados para esquistos y pizarras.

**Tabla 3.** Constantes A, B y C para la determinación del coeficiente de correlación no lineal basado en el lineal ( $K_{VHF}$ ) para cada litología.

Litología	A	B	C
Xqz-cl	0,54	0,05	0,32
Xm-cl	0,52	0,02	0,39
Xqz-m	0,52	0,15	0,35
<b>ESQUISTOS</b>	<b>0,55</b>	<b>0,04</b>	<b>0,35</b>
Pqz-graf	0,52	0,08	0,19
Pm-graf	0,52	0,09	0,26
<b>PIZARRAS</b>	<b>0,50</b>	<b>0,06</b>	<b>0,23</b>

#### 2.4. Comparación de las estimaciones de la RCS a partir del índice $Is_{(50)}$

presentan pequeñas variaciones con los valores experimentales ( $< 7\%$ ), se considera que la ecuación con mejor ajuste en referencia a los valores de laboratorio es la del coeficiente de correlación lineal ( $K_L$ ). En la práctica, cualquier método de los propuestos puede ser usado para la predicción de la resistencia a compresión simple en función del índice  $Is_{(50)}$ , teniendo en cuenta que las constantes deducidas para cada uno de los métodos son exclusivamente para rocas anisótropas del tipo esquistos y pizarras.

### 3. Agradecimientos

Este trabajo ha sido patrocinado por la Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental de la Universidad Central del Ecuador, con el fin de difundir resultados científicos de estudios geológicos y geotécnicos. Agradecemos a la Corporación Eléctrica de Ecuador (CELEC P) por su autorización para usar los datos del proyecto hidroeléctrico Paute-Cardenillo para esta investigación.

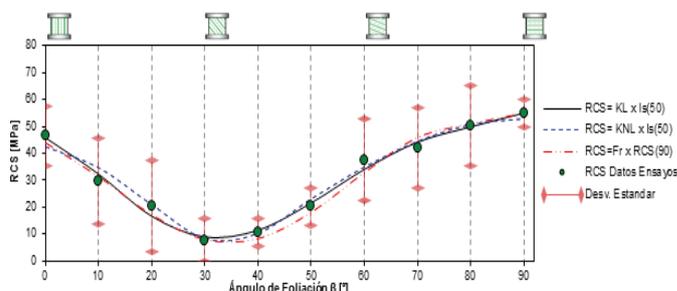


Figura 2: Ejemplo de estimación de la resistencia a compresión simple en función del ángulo de anisotropía mediante la aplicación de los tres métodos empíricos propuestos para el caso particular de los esquistos micáceo-cloríticos (Xm-cl).

### 4. Referencias Bibliográficas

Basu, A., & Kamran, M. (2010). Point load test on schistose rocks and its applicability in predicting uniaxial compressive strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (47), 823-828.

Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. John Wiley, New York, 251 p.

Fener, M., Kahraman, S., Bilgil, A. & Gunaydin, O. (2005): A comparative evaluation of indirect methods to estimate the compressive strength of rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38(4), 329-343.

ISRM (1985). Suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 22, 51-60.

Ramamurthy, T., Rao, G.V. & Singh, J. (1993). Engineering behavior of phyllites. *Engineering Geology*, 33, 209–225.

Saroglou, H., Marinou, P. & Tsiambaos, G. (2004). The anisotropic nature of selected metamorphic rocks from Greece. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 104, 215–222.

Tsidzi, K. (1986). A quantitative petrographic characterization of metamorphic rocks. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 33, 3-12.

Vutukuri, V.S., Hossaini, S.M.F. & Foroughi, M.H. (1995). A study of the effect of roughness and inclination of weakness planes on the strength of rock and coal. En: *Proc. of Second International Conference on the Mechanics of Jointed and Faulted Rock* (H.P. Rossmanith ed). Taylor and Francis, Balkema, Rotterdam, 151-155.

Zare-Naghadehi, M., Jiménez, R., KhaloKakaie, R. & Jalali, S.M.E. (2011). A probabilistic systems methodology to analyze the importance of factors affecting the stability of rock slopes. *Engineering Geology*, 118, 82-92.