

Ajuste de valores de dispersión con el Martillo Schmidt

Adjustment of dispersion values with the Schmidt Hammer

Julio Chable ^A, Jorge López ^B,

^A. Ingeniero de Proyectos, JC Estudios Geotécnicos, Mecánica de Rocas

^B Ingeniero de Proyectos, Comisión Federal de Electricidad, GEIC, Mecánica de Rocas

RESUMEN: Después de conocer las condiciones geológicas y las propiedades geomecánicas de los materiales heterogéneos del sitio, el objetivo principal de este artículo es de presentar el procedimiento realizado para definir el ajuste de valores de dispersión entre la correlación del rebote realizado en campo con el martillo Schmidt (esclerómetro) y la compresión simple ensayada en laboratorio. Estos datos serán de importancia en la información generada para obtener una correlación más confiable con los ensayos realizados en campo, como en los levamientos realizados en superficie y en las excavaciones que se conforman dicho proyecto.

ABSTRACT: After knowing the geological conditions and the geomechanical properties of the heterogeneous materials of the site, the main objective of this article is to present the procedure carried out to define the adjustment of dispersion values between the correlation of the rebound made in the field with the Schmidt hammer (sclerometer) and simple compression tested in the laboratory. These data will be of importance in the information generated to obtain a more reliable correlation with the tests carried out in the field, such as in the surveys carried out on the surface and in the excavations that make up said project.

1 INTRODUCCIÓN

Derivado a la realización estudios geológico-geotécnicos en diferentes zonas de estudio, en particular para la clasificación geomecánica, la cual implica trabajos de campo y laboratorio (propiedades índices, mecánicas y dinámicas) para estimar la calidad del material de roca, en estas dos disciplinas se observó una variación en los resultados con relación de la resistencia a compresión con los ensayos realizados campo con el martillo Schmidt y los de laboratorio.

Debido a esta variación de valores que presentan las correlaciones del ábaco Miller, 1965 [2] (figura 1) y las ecuaciones empíricas (tabla 4) para cada tipo de material de roca, es necesario realizar un ajuste para reducir dicha dispersión de valores de campo y laboratorio.

2 OBJETIVO

Se entiende que para el cálculo de la resistencia a compresión en función del ensayo realizado en campo con el martillo Schmidt (tabla 1) en roca sana, es de acuerdo a una correlación empírica (tabla 2), dicha correlación está en función de los ensayos de compresión simple en laboratorio.

Por lo anterior, objetivo de este artículo es de presentar como realizar una correlación para cada tipo de material de roca, con los resultados obtenidos de los ensayos de martillo Schmidt y de compresión simple en laboratorio, con la finalidad de obtener valores más confiables.

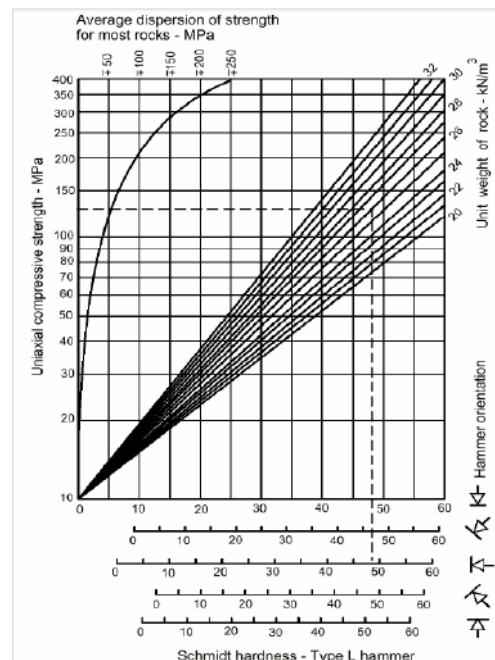


Figura 1. Cálculo de Resistencia a compresión con rebotes del martillo Schmidt, Miller 1965 [1].

3 METODOLOGÍA

3.1 Diagrama de procesos

A continuación se presenta un diagrama de procesos que sintetiza la metodología para realizar la correlación entre el ensayo del martillo Schmidt y laboratorio.

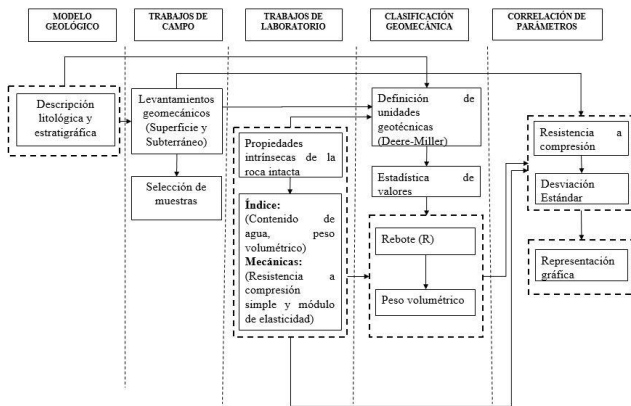


Figura 2. Diagrama de procesos para realizar la correlación de valores del ensayo del martillo Schmidt.

4 MARTILLO TIPO SCHMIDT

4.1 Tipos de martillos

Existen por lo regular dos tipos de martillos de rebote Schmidt estándares de acuerdo a la energía de impacto del rebote, el tipo N que se utiliza generalmente para concretos y el tipo L generalmente para rocas, el primero tiene un rebote (RN) con una energía de impacto de aproximadamente de 2.21 Nm, mientras que el segundo tiene un rebote (RL) con una energía de impacto aproximadamente tres veces menor de 0.74 Nm, la cual no daña la roca, razón por la cual se prefiere en los ensayos, Aylin, A. 2009 [2].

5 TRABAJOS DE CAMPO

5.1 Tipos de ensayos

Para realizar los ensayos tipo Schmidt hay diferentes criterios a seguir los cuales se describen en la siguiente tabla, (Ludger O. Suárez-Burgoa, 2014) [3]. Por lo regular para fines prácticos se utilizó el criterio (ASTM D5873, 2006) [4].

Tabla 1. Criterios para ensayos de rebotes del martillo Schmidt.

Autores	Procedimiento del ensayo
Young R.P., Fowell R.J.	Dividir el macizo rocoso en una malla reticular y promediar los impactos simples de cada retícula.
ISRM	Registrar 20 valores de impactos simples de rebote separados por al menos un diámetro de la aguja, y promediar los 10 más altos valores.
Goktan R.M., Ayday C.	Registrar 20 valores de impactos simples de rebote separados, por al menos un diámetro de la aguja. Desechar valores según el criterio de Chauvenet, y promediar las lecturas restantes.
Soiltest	Registrar 15 valores de impactos simples de rebote y promediar los 10 más altos. La máxima desviación respecto al promedio tiene que ser menor que 2.5.
Matthews J.A., Sha- kesby R.A.	Realizar 15 lecturas de cualquier muestra. Se calcula el promedio de los valores de rebote y se descartan aquellos cinco valores más desviados del promedio.
Kazi A., Al- Mansour Z.R.	Registrar al menos 35 lecturas de rebote, eliminar las 10 lecturas más bajas y promediar los restantes 25 valores.
Katz O. et al.	Realizar de 32 a 40 impactos individuales y promediar el 50% de valores más altos.
Poole R.W., Farmer I.W.	Seleccionar el valor más alto de una serie de cinco valores continuos en un punto. Promediar los máximos de tres grupos de ensayos realizados en tres puntos separados.
Poole R.W., Farmer I.W.	Seleccionar el valor más alto de rebote de 10 impactos continuos en un punto. Promediar los máximos de los grupos de ensayos realizados en tres puntos separados.
GBG	Registrar 12 lecturas en el punto de ensayo en un plano cortado a diamante. Descartar el valor más bajo y más alto para obtener un número promedio de rebote.
USBR	Realizar diez lecturas en varios lugares en cada superficie. Descartar los cinco valores más bajos y promediar los cinco más altos.
Sumner P., Nel W.	Extraer 15 lecturas en diferentes puntos y descartar cinco valores discordantes para obtener un valor promedio de los restantes 10 valores.
ASTM D5873	Registrar los valores de rebote en 10 lugares representativos de la muestra, separados en al menos un diámetro de la aguja. Se hace un ensayo por punto. Descartar las lecturas que difieran en 7 unidades del promedio de las 10 lecturas realizadas.
ASTM C805	Registrar los valores de rebote en 10 lugares representativos de la muestra, separados en al menos 25 mm. Se hace un ensayo por punto. Descartar las lecturas que difieran en 6 unidades del promedio de las 10 lecturas realizadas.

5.2 Levantamientos geomecánicos

En la realización de los levantamientos geomecánicos se realizaron ensayos (rebotes) de martillo Schmidt o esclerómetro por el criterio (ASTM D5873, 2006) [4], en roca sana y descomprimida en la zona de estudio, dichos levantamientos se llevaron a cabo en superficie y subterráneos en zona de roca con la metodología propuesta por (Bieniawski RMR, 1989) [6], (Barton Q, 2002) [7], (Hoek GSI, 2002) [8] y (Morelli, 2017) [9], en las cuales se observaron diferentes unidades litológicas.

5.3 Recolección de muestras

Ya teniendo identificada la distribución de los materiales por parte del departamento de geología, se recolectaron muestras en campo, como núcleos de barrenos y de pepena en las diferentes unidades de roca, dichas muestras fueron enviadas al laboratorio donde se le realizaron ensayos de sus propiedades índices y mecánicas.

6 TRABAJOS DE LABORATORIO

Inicialmente se escogen muestras sanas sin alteración y sin fracturas., posteriormente se procede a preparar las probetas según la norma (ASTM D 3148, 2019) [9], para luego realizar los ensayos y obtener sus propiedades índice y mecánicas.

Únicamente se tomaron en consideración los resultados de las muestras a las que se le realizaron ensayos de martillo Schmidt correspondientes a la unidad geotécnica Ug-2a-2, tabla 2.

6.1 Propiedades índice

Es necesario conocer el peso volumétrico de los materiales que conforman cada unidad litológica, ya que dichos valores son esenciales para realizar la correlación entre el rebote y la compresión simple, figura 3.

El cálculo de dicho ensaye se realizó bajo la norma (NMX-C-164-ONNCCE-2002, 2003) [10].

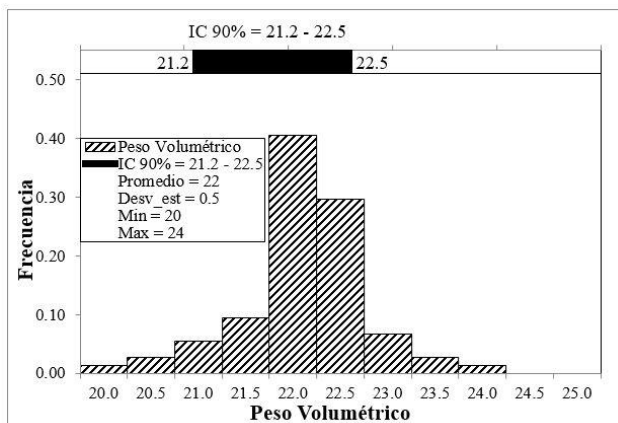


Figura 3. Estadística de valores de peso volumétrico de la roca intacta.

6.2 Propiedades Mecánicas

Para evaluar el comportamiento esfuerzo – deformación de la roca intacta, primeramente se realizaron los ensayos de martillo Schmidt (ASTM D5873, 2006) [4], luego se continuó con las pruebas de resistencia a la compresión simple con obtención de módulo de elasticidad, bajo el criterio (ASTM D 3148, 2002) [12]. Los resultados de la estadística de parámetros de la resistencia a compresión de la unidad Ug-2a-2 se muestran en la figura 4.

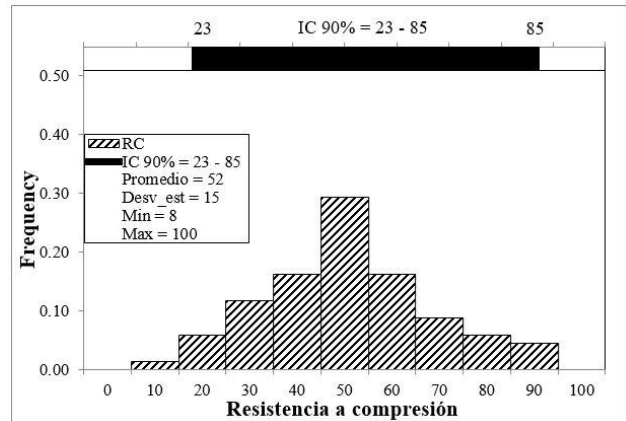


Figura 4. Estadística de resultados de parámetros de resistencia de la roca intacta.

7 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA

7.1 Definición de unidades geotécnicas

Con los resultados de las propiedades mecánicas obtenidos en laboratorio y tomando como referencia la información geológica en conjunto se procedió a definir las unidades geotécnicas, figura 5.

Con base en lo anterior se empleó la clasificación de (Deere y Miller, 1966) [5], la cual toma en cuenta la resistencia a la compresión simple (figura 4) y el módulo Et50 de la roca intacta. En la figura 5 se puede apreciar la distribución de valores para cada tipo de roca.

Tabla 2. Definición de unidades geotécnicas, Deere-Miller 1966 [5].

Unidad geológica	Unidad geotécnica	Descripción	RC	ME	MR	Clasificación
Tm-ic1	Ug-1b	Ignimbrita Corapan	67	19,031	283	C M
Tm-ct1	Ug-1c	Toba Corapan	67	18,931	284	C M
Tm-ic2-b	Ug-2a-2	Toba lítica	76	26,724	351	C M
Tm-ic-a	Ug-2a-1	Ignimbrita vesicular	94	28,142	301	C M
Tm-dd	Ug-3	Dique diabásico	32	17,801	558	D H

RC = Resistencia a compresión en MPa, MC = Módulo de Elasticidad en MPa, MC = Módulo relativo.

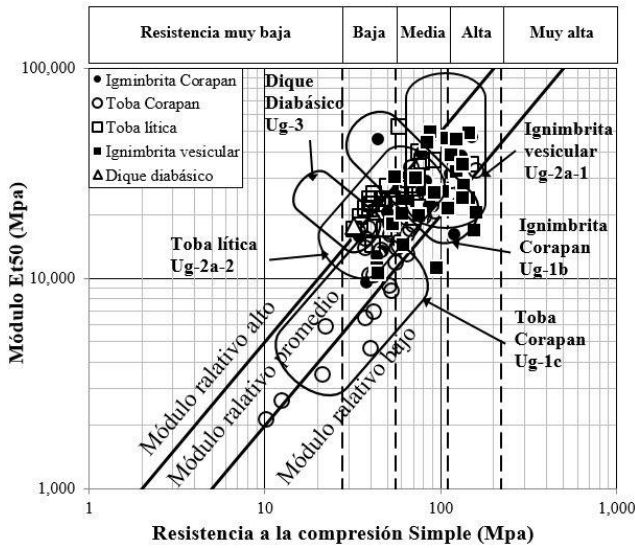


Figura 4. Clasificación de las unidades geotécnicas, criterio Deere-Miller 1966 [5].

7.2 Clasificación del rebote del martillo Schmidt

Una vez definidas las unidades geotécnicas con los resultados de laboratorio, para continuar con el proceso para definir una la correlación para el ensaye del martillo Schmidt, a continuación se realiza una estadística con los parámetros de cada unidad en función de los valores del rebote (R) del martillo Schmidt.

Se consideran los valores que se encuentren dentro de un intervalo de confianza del 90 %, para caso de la unidad Ug-2a-2, los rebotes tienen un intervalo de confianza de 51 a 59, figura 5.

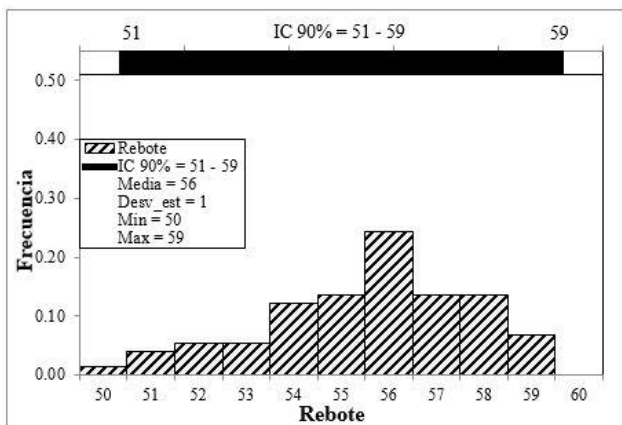


Figura 5. Estadística de valores del rebote del martillo Schmidt.

7.3 Clasificación del peso volumétrico y rebote

Una vez que se encuentran definidos los valores de los ensayos del martillo Schmidt ó rebotes (R), se procede a clasificar los parámetros del peso volumétrico (PV) de la unidad geotécnica (Ug-2a-2) en función de los rebotes ya definidos (51 a 59).

Se considera el promedio de los valores de dicha clasificación, como se describe en la figura 6.

Rebote (R)	Peso Volumétrico, γ_{amb} (kN/m ³)	Media
51	20.9, 21.0, 21.3, 21.8	21.3
52	20.6, 20.8, 21.4, 21.6	21.4
53	21.5, 21.6, 21.7	21.6
54	21.2, 21.4, 21.7, 22.7	21.7
55	20.8, 21.5, 21.8, 22.2	21.8
56	20.5, 21.1, 21.9, 22.5, 23.0	21.9
57	20.7, 21.2, 22.0, 22.2	22.0
58	21.6, 21.7, 22.2, 22.9, 23.0	22.2
59	21.9, 22.0, 22.3, 22.3	22.3

□ Promedio
 + Mínimo, Máximo
 ■ Rango (10 - 90 %)

Figura 6. Clasificación de peso volumétrico en función del rebote del martillo Schmidt.

7.4 Clasificación de resistencia a compresión y peso volumétrico

Cuando ya se encuentran una vez definidos los valores de del peso volumétrico en función de los rebotes (R) del martillo Schmidt, de igual manera se procede a clasificar los parámetros de la resistencia a compresión (RC) y la desviación estándar de la unidad geotécnica (Ug-2a-2) en función del peso volumétrico ya definido (21.3 a 22.3), figura 7.

Cabe señalar que los parámetros de la desviación estándar que resulten de dicha clasificación, son la dispersión de valores con relación a la compresión simple.

Para el resultado de la clasificación también se considera el promedio de los valores, como se ilustra en la figura 7.

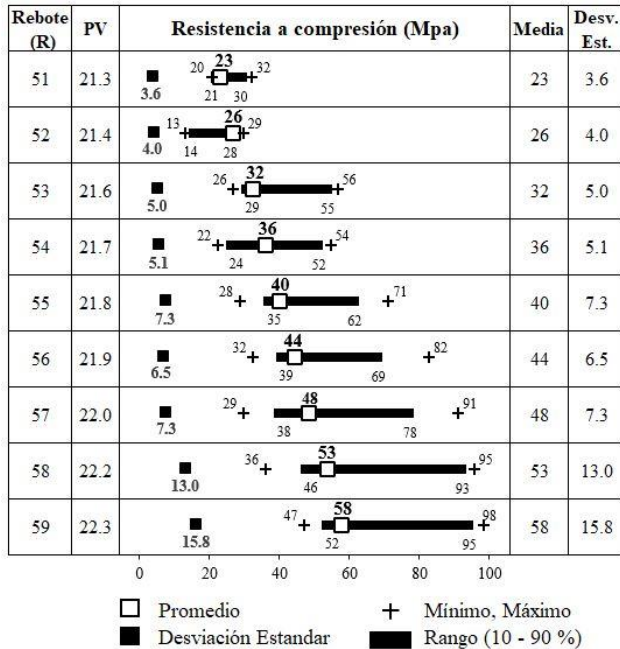


Figura 7. Clasificación de la resistencia a compresión en función del peso volumétrico (PV).

8 CORRELACIONES

8.1 Correlación parámetros de la unidad geotécnica

Una vez concluida la clasificación de los parámetros de la resistencia a compresión (23-58 MPa) y la desviación estándar (3.6-15.8 MPa) en función del rebote (R) del martillo Schmidt y el peso volumétrico (PV), se procede a realizar la representación gráfica y su correspondiente correlación encontrando la ecuación empírica, figura 8.

A continuación se describe un resumen con los resultados de las clasificaciones en la unidad geotécnica Ug-2a-2, tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de clasificación geotécnica en la unidad Ug-2a-2.

Rebote (R)	Peso volumétrico (kN/m ³)	Resistencia a compresión (MPa)	
		Promedio	Desviación Estándar
51	21.3	23	3.6
52	21.4	26	4.0
53	21.6	32	5.0
54	21.7	36	5.1
55	21.8	40	7.3
56	21.9	44	6.5
57	22.0	48	7.3
58	22.2	53	13.0
59	22.3	58	15.8

En la siguiente figura se ilustra la representación gráfica de la correlación para la unidad geotécnica y la comparativa con la correlación de (Miller 1995) [2].

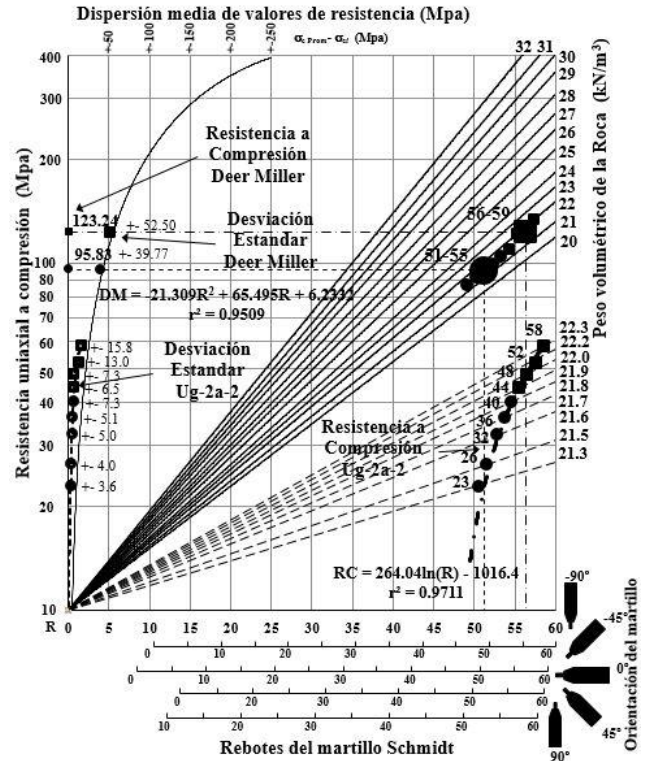


Figura 8. Comparativa entre la correlación Miller 1965 [2] y la Ug-2a-2.

8.2 Ecuaciones empíricas

Para el cálculo de la resistencia a compresión con relación al rebote (R) del martillo Schmidt, existen varias correlaciones empíricas de acuerdo al tipo de material litológico del macizo rocoso, en algunas también se considera como base el peso específico del material de roca, tabla 4. A pesar de que hay una diversidad de correlaciones entre el ensaye del martillo Schmidt y de compresión simple, cabe señalar que cada ecuación empírica es únicamente para un tipo de material de roca, el cual varía de acuerdo a sus propiedades índices (peso volumétrico) y mecánicas (resistencia a compresión, módulo de elasticidad), además de la composición de los minerales que la integran, y eso solo en el caso de la roca sana. Por lo que así mismo, es difícil encontrar una correlación para el material de roca de una zona específica, por lo que es necesario realizar una propiamente para cada zona de estudio, como anteriormente ya se ha descrito el procedimiento.

En un inicio se presentó en la figura 1, la gráfica de (Miller, 1965) [2] para el cálculo de la resistencia a compresión y la desviación estándar en función del rebote del martillo Schmidt, dicha correlación está regida mediante la siguiente ecuación:

$$RC = \log_{10} 0.00088 R + 1.01 \quad (1)$$

$$DE = -0.3467R^2 + 24.438R + 1.5937 \quad (2)$$

donde: RC = Resistencia a compresión en MPa, DE = Desviación estándar de la resistencia a compresión, R = Rebote promedio; γ = peso volumétrico de la roca en kN/m³.

De acuerdo al procedimiento de la clasificación geotécnica descrita anteriormente y a la representación gráfica (figura 8), la correlación para la resistencia a compresión y desviación estándar en función del ensayo del martillo Schmidt para unidad geotécnica Ug-2a-2 queda representada por la siguiente ecuación.

$$RC = 264.04 \ln R - 1016.4 \quad (3)$$

$$DE = -21.309R^2 + 65.495R + 6.2332 \quad (4)$$

donde: RC = Resistencia a compresión en MPa, DE = Desviación estándar de la resistencia a compresión, R = Rebote promedio.

Con la finalidad de realizar una comparativa con la ecuación de la unidad Ug-2a-2, se realizó el cálculo de la resistencia a compresión en función de los rebotes resultantes (51-59) en dicha unidad (figura 5), con una serie de ecuaciones empíricas descrita por (Ludger O. Suárez-Burgoa, 2014) [3] para diversos tipos de material de roca, tabla 4.

Tabla 4. Ecuaciones empíricas para el cálculo de la resistencia a compresión.

Tipo de roca	Ecuación empírica	R (51-55) R (56-59)	
		RC	RC
**Ug-2a-2	RC= 264.04 ln R - 1016.4	32	53
Miller, R.P. (1965)	RC=10 ^{0.00088Rγ} +1.01	103	134
	RC=0,792 + 0,067R ± 0,231	29	31
	RC=10 ^{1.4x10⁻⁴ *γR+3.16}	74	82
	RC=6.9x10 ^{1.348 lg(γR)+3.16}	81	94
	RC=12.74 exp ^{0.185 γR}	17	19
Todas la rocas	RC=4.5 x 10 ⁻⁴ (R γ) ^{2.46}	15	19
	RC=0.4 R - 3.6	18	19
	RC=0.994 R - 0.383	52	57
	RC=0.88R + 12.11	59	63
	RC=2.4736 exp0.0691 R*	96	131
Rocas sedimentarias	RC=2R	106	115
Arenisca, limolita, caliza, anhidrita	*RC=702R - 11 040	180	202
Mármol, limolita, dolomía	RC=4.294R - 67.516	160	179
Gabro y basalto	RC=1.31R - 2.52	67	73
Mármol	RC=10 ⁻⁴ R ^{3.265 8}	43	56
Yeso	RC=exp1.146+0.054R	6	6
	RC=exp0.818+0.059R	5	6
	RC=2.75R - 36.83	109	121
Rocas volcánicas	RC=104.3 ln R + 308.6	300	309
	RC=13.02 exp0.041 4 R	117	141

**Unidad geotécnica, * γ en pcf, *RC en psi, R* para tipo L, R=Rebote RC = Resistencia a compresión en MPa.

En la figura 8, en las gráficas con la correlación Miller 1965 y la Ug-2a-2, los valores del rebote promedio con rangos de (51-55), (56-59), presentan una resistencia a compresión de 98.83, 123.24 MPa y 32, 53 MPa, con una desviación estándar 39.77, 52.50 MPa y 5.1, 7.3 MPa respectivamente, donde podemos observar una variación considerable entre los valores de resistencia a compresión y la desviación estándar.

En la tabla 4, se presenta una serie de ecuaciones empíricas para para calcular la resistencia a compresión en función del rebote promedio con rangos de (51-55) y (56-59), donde de igual manera se presenta una diversidad de valores de la resistencia a compresión con relación a unidad geotécnica Ug-2a-2, incluyendo la ecuación de Miller 1965, motivo por el cual es necesario realizar una correlación para cada unidad geotécnica.

Finalmente la gráfica de la correlación para la unidad Ug-2a-2 se describe a continuación, figura 9.

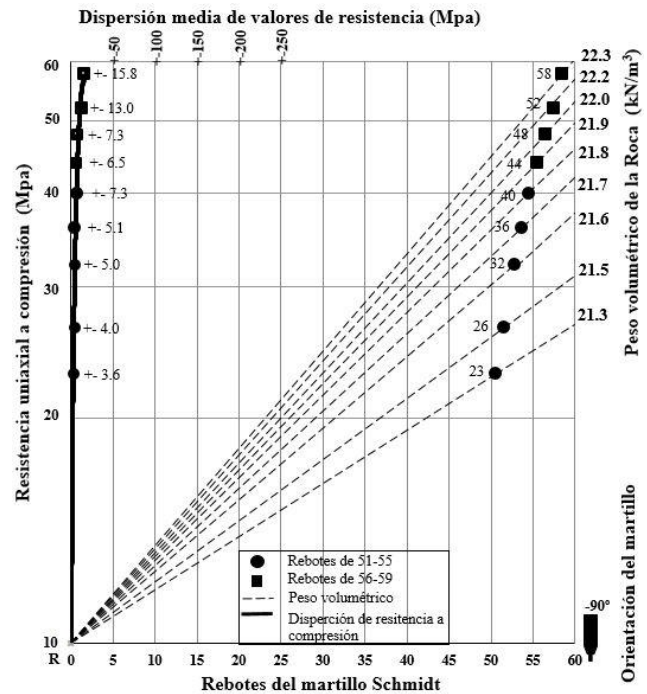


Figura 9. Correlación para la unidad geotécnica Ug-2a-2.

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Debido a que cada zona de estudio es diferente, se recomienda realizar este prendimiento para encontrar una correlación para cada tipo de material de roca, ya que es difícil encontrar una correlación para un material en particular, en este caso de realizó para la unidad geotécnica Ug-2a-2, ecuación 3.

Con el cálculo de la correlación (figura 9), se obtienen resultados más confiables, ya que la dispersión de valores o desviación estándar (ecuación 4) se reduce al mínimo, un 86% y 58% para los rangos (51-55) y (56-59) respectivamente, figura 8.

El proceso para calcular la correlación forma parte de los trabajos de campo así como de la clasificación geomecánica, mismos que son necesarios para la elaboración del modelo geotécnico de la zona de estudio.

Se pueden utilizar los resultados de laboratorio de un modelo geotécnico ya realizado, siempre y cuando también se hayan realizado los ensayos con el martillo Schmidt, o en su defecto realizar dicho ensaye a las muestras, para posteriormente hacer la correlación de los parámetros del modelo geotécnico con el rebote.

10 REFERENCIAS

- [1] Aydin, A. 2009. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *Int J Rock Mech Mining Sci.*
- [2] Miller, R.P. (1965). Engineering classification and index properties for intact rock. Ph.D. Thesis univ. Ill, 1- 322 P.
- [3] Ludger O. Suárez-Burgoa. 2014. Ingeniería y Ciencia, Estimación de la variabilidad mecánica de placas de roca por ensayos no-destructivos vol. 10, no. 19, pp. 221–246..
- [4] ASTM D5873-05. 2006. Test method for determination of rock hardness by rebound hammer method, 225, 227, PA: ASTM International, Philadelphia, Tech. Rep.
- [5] Deere, D. U., & Miller, R. P. 1966. Engineering classification and index properties for intact rock. Illinois Univ. At Urbana Dept. Of Civil Engineering.
- [6] Bieniawski, Z. T. 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons.
- [7] Barton N. 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International journal of rock mechanics and mining sciences.*
- [8] Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., and Corkum, B. (2002): 2002. Hoek-Brown failure criterion, edition. Proc. North American Rock Mechanics Society.
- [9] Morelli, G. L. 2017. Alternative Quantification of the Geological Strength Index Chart for Jointed Rocks, Springer International Publishing AG.
- [10] NMX-C-164-ONNCCE-2002. 2003. Organismo Nacional de Normalización y Certificación y Edificación, S.G., Diario Oficial de la Federación, Secretaría de Gobernación, México, D.F.
- [11] ASTM D 3148. 2019. Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances, PA: ASTM International, Philadelphia, Tech. Rep.
- [12] ASTM D 3148. 2002. Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression, PA: ASTM International, Philadelphia, Tech. Rep.