

Resistance correlation with compression uniaxial effective humidity and porous rocks

Manolo Galván-Ceballos & Iván A. Restrepo

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia, manolo.galvan@correounivalle.edu.co, ivan.restrepo@correounivalle.edu.co

Received: September 21th, 2015 Received in revised form: April 20th, 2016. Accepted: May 5th, 2016

Abstract

This research consists of the determination of the mechanical parameter of resistance to uniaxial compression in the rock and its correlation with moisture and effective porosity, physical properties of the rock. By its goal of study, the project comes within the framework of the mechanics of rocks. Rocks selected for research were taken from a quarry in South West Colombia. The investigation led to the determination of equations that allow to estimate the resistance to uniaxial compression of rock from its effective porosity and moisture content. It is important to highlight that such correlations are representative for rocks benefiting from lithological characteristics similar to those used in the experimentation. Finally the results are presented with their analysis and conclusions of the research.

Key words: Rock mechanics; Rock properties; Unconfined compressive strength; Quarry rock resistance.

Correlación de la resistencia a compresión uniaxial con la humedad y porosidad eficaz en rocas

Resumen

Esta investigación, consiste en la determinación del parámetro mecánico de resistencia a compresión Uniaxial en la roca y su correlación con la humedad y porosidad eficaz, propiedades físicas de la roca. Por su objetivo de estudio, el proyecto se engloba dentro del marco de la mecánica de rocas. Las rocas seleccionadas para la investigación fueron tomadas de una cantera del Sur Occidente Colombiano. La investigación condujo, a la determinación de ecuaciones que permiten estimar la resistencia a compresión Uniaxial de la roca a partir de su porosidad eficaz y del contenido de humedad. Es importante resaltar que este tipo de correlaciones son representativas para rocas que gocen de características litológicas similares a las utilizadas en la experimentación. Finalmente se presentan los resultados con sus análisis y conclusiones de la investigación.

Palabras clave: Mecánica de rocas; Propiedades de la roca; Resistencia a compresión inconfiada; Resistencia en rocas de cantera.

1. Introducción

Una definición ampliamente aceptada de la mecánica de rocas es la presentada por el Comité Nacional de Mecánica de Rocas de la Academia Nacional de Ciencias, Washington D.C. en 196, y complementada en 1974 [1], “la mecánica de rocas es la ciencia teórica y aplicada del comportamiento mecánico de la roca y macizos rocosos. Esta es la rama de la mecánica concerniente con la respuesta de la roca y macizos rocosos, a los campos de fuerza de su entorno físico”.

La mecánica de rocas hace parte del campo de la geotécnica y diferente de la Mecánica de Suelo, la cual se

define como “la aplicación de la ciencias de la mecánica de suelos y rocas, ingeniería geológica y otras disciplinas relacionadas, en la construcción civil, la industria minera y la conservación del medioambiente” [1].

Los requerimientos para realizar el ensayo a resistencia a compresión simple de las probetas son [2]:

- La relación altura/diámetro de 2.5 a 3.0
- Diámetro mayor a 10 veces el tamaño máximo de grano de la roca.
 - Diámetro no inferior a 50 mm.
 - Tolerancia de las caras de la probeta (ver Tabla 1).

How to cite: Galván-Ceballos, M. y Restrepo, I., Correlación de la resistencia a compresión uniaxial con la humedad y porosidad eficaz en rocas DYNA 83 (198) pp. 9-15, 2016.

Tabla 1.
Tolerancia de las probetas

| Tolerancia respecto a: | Deformabilidad de la roca: | | |
|---|----------------------------|---------|---------|
| | Poca | Media | Alta |
| Desviación de la generatriz respecto a la dirección axial | ±0.3 mm | ±0.4 mm | ±0.5 mm |
| Planitud de la base | ±0.02 mm | ±0.5 mm | ±0.1 mm |
| Desviación, respecto al ángulo recto, del ángulo del eje de la probeta con la base. | 10' | 20' | 30' |

Fuente: Tomada de [2]

Dichos requerimientos son de importante consideración, debido a que en algunos casos sean muy difíciles de alcanzar o hacen que el ensayo sea muy costoso. Algunas veces se ven obligados al incumplir con las recomendaciones de las normas, por ejemplo:

- Las discontinuidades del macizo rocoso pueden impedir la obtención de cilindros de roca de longitudes iguales o superiores a 125 mm, que corresponde a la probeta de menor longitud, para el menor diámetro de 50 mm.
- En el caso de algunas rocas cuyos granos o clastos que superen el centímetro (algunos granitos o pegmatita), las dimensiones de la probeta correspondiente, son imposibles de obtener y en caso de lograrlo, la probeta no podría romperse con una prensa convencional.

Para mitigar estos hechos, investigadores como [3,4], han correlacionado experimentalmente la resistencia a compresión de la roca con los resultados de ensayos indirectos o las características físicas de la roca estudiada, brindando procedimientos económicos y rápidos para la estimación indirecta de la resistencia de la roca.

Los parámetros mecánicos se obtiene a partir del ensayo de resistencia a compresión uniaxial y los parámetros físicos (Porosidad eficaz, contenido de humedad, gravedad específica) se determinan acorde a los procedimientos indicados en las normas [5,6]. Con los resultados de los ensayos, se procedió a la formulación de las ecuaciones que relacionan los parámetros, empleando métodos estadísticos de correlación y regresión lineal.

2. Geología de la zona de estudio

2.1. Características de la zona

A nivel nacional, se han adelantado investigaciones sobre el subsuelo por el instituto Ingeominas [7]. (A partir del 2012, Ingeominas cambia su nombre por el Servicio Geológico Colombiano), dando como resultado la construcción de los mapas geológicos en el año 2007, que brindan información de la distribución de distintos tipos de roca en Colombia.

De los mapas Geológicos, la plancha número 5-13, brinda la distribución de las unidades cronoestratigráficas y litológicas del Valle del Cauca. Es de especial interés indagar sobre las características de las rocas de Santiago de Cali y sus alrededores, lugares entre los que se encuentra ubicada la cantera. El análisis del mapa brinda la siguiente información del subsuelo, edad, litología y provincia:

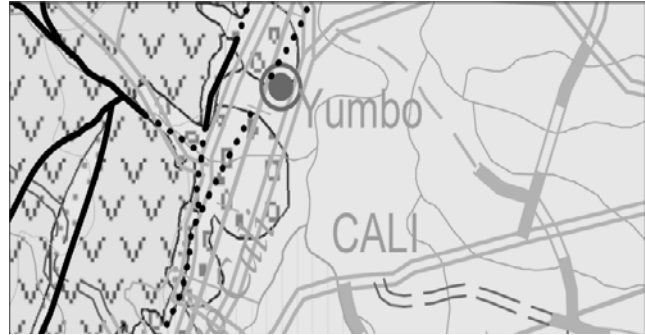


Figura 1. Detalle de la unidad crono-estratigráfica de Cali y Yumbo, en el Valle del Cauca

Fuente: Tomado de [7].

- Santiago de Cali: Suelo de la época Pleistoceno-holoceno, depósito aluvión de la provincia Litosférica Continental Mezo-proterozoica Grenvilliana (Q1Q2 -Q al, PLCMG).
- Yumbo: Suelo de la época Pleistoceno-holoceno, depósito Abanico de la provincia Litosférica Continental Mezo-proterozoica Grenvilliana (Q1Q2-Q ca, PLCMG).

3. Estado del arte

Para estimar la resistencia a compresión simple de una roca, se pueden usar métodos y/o ensayos que se realizan en campo y/o laboratorio. Su obtención va desde una estimación meramente subjetiva hasta una medición indirecta. Uno de estos métodos es la obtención de la RCS a través de las propiedades índice de la roca.

El investigador [8], presenta correlaciones obtenidas por diferentes investigaciones en rocas del golfo de México: areniscas, esquistos, caliza y dolomita. Estas correlaciones, son el resultado de múltiples ensayos y análisis de los núcleos de rocas, lo que permite caracterizar y correlacionar los parámetros para formaciones específicas de roca.

A excepción de la primera ecuación, todas las ecuaciones para la arenisca tienen una mala predicción de los datos de resistencia para tiempos altos de viaje $\Delta t > 100 \mu\text{s}/\text{ft}$, e inferiores a $\Delta t < 3000 \mu\text{s}/\text{ft}$, como informa [8].

En relación con esta investigación se puede observar, que a mayor porosidad de la roca se reduce su resistencia.

4. Trabajos experimentales

4.1. Propiedades Índice y Alterabilidad.

4.1.1. Porosidad (n)

Es definida como la razón entre el volumen de los espacios vacíos entre la roca y el total volumen aparente de la roca, también se refiere a la probabilidad de encontrar vacíos en el volumen total:

Tabla 2.
Correlación de la resistencia a compresión (MPa) con las propiedades físicas de la roca [8].

| Tipo de roca | Autor | Correlación (MPa) | Nomenclatura |
|--|------------------------------|---|---|
| Arenisca de Turingia, Alemania. | Freyburg, 1972 | $UCS = 0,035v_p - 31,5$ | Velocidad ultrasónica (P) v_p (m/s) |
| Arenisca grano fino, consolidada y no consolidada en la Cuenca de Bowen de Australia | McNally, 1987 | $UCS = 1200\exp(-0,036\Delta t)$ | Δt (μ s/ft)= $1/v_p$ |
| Areniscas débiles y no consolidadas en la costa del Golfo de los EE.UU. | Chang et al. 2006 | $UCS = 1,4138 \times 10^7 \Delta t^{-3}$ | - |
| Arenisca en el Golfo de México. | Chang et al. 2006 | $UCS = 3,87\exp(1,14 \times 10^{-10} \rho v_p^2)$ | densidad - ρ (g/cm^3): |
| Pizarra | Lal, 1999 | $UCS = 10(304,8/\Delta t - 1)$ | |
| Esquistos del Mar del Norte | Horsrud, 2001 | $UCS = 0,77v_p^{2,93}$ $UCS = 243,6 \phi^{-0,96}$ $UCS = 243,6\rho_0^{-0,96}$ | v_p (km/s) Φ : Porosidad en porcentaje. ρ_0 : Porosidad en porcentaje |
| Caliza y dolomita | Milizer and Stoll, 1973 | $UCS = (7682/\Delta t)^{1,82}/145$ | - |
| Caliza y dolomita | Golubev and Rabinovich, 1976 | $UCS = 10^{(2,44+109,14/\Delta t)}/145$ | - |
| Caliza y dolomita, en el Oriente medio. | Chang et al. 2006 | $UCS = 143,8 \exp(-6,95\Phi)$ | Φ : Porosidad en fracción. |

Fuente: Tomada de [8]

$$n = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{muestra}}} * 100 \quad (1)$$

Las dos descripciones más comunes de la porosidad, son la porosidad total definida anteriormente que considera todos los poros presentes en la roca y la porosidad efectiva o interconectada, que representa la razón entre el espacio de los poros interconectados y el volumen aparente de la roca descartando los poros aislados y cerrados. [5]

La porosidad se relaciona en proporción directa con la deformación de la roca y es inversamente proporcional con la resistencia y densidad. El aumento de la porosidad afecta ampliamente las características mecánicas de las rocas ya que la presencia de poros dan lugar a zonas de debilidad en la matriz rocosa.

Como lo indican los autores [8], la porosidad es controlada por la forma, tamaño y arreglo de los granos de la roca. Esto, a su vez depende de los procesos mecánicos (compactación, deformación y evaluación de fractura) y químicos (disolución, precipitación, cambios en la mineralogía).

4.1.2. Contenido de Humedad (w%)

Es definida [5], como la razón en porcentajes entre, la masa de agua contenida en los espacios o poros y la masa de las partículas sólidas que conforman la roca, una temperatura estándar de 110 +/- 5 °C es usada para determinar de manera individual esta última masa:

$$\%w = \frac{M_w}{M_s} * 100 \quad (2)$$

Se consideran dos condiciones extremas de contenido de humedad: Roca libre de humedad en la cual la masa de agua en la roca es cero y roca saturada para la cual la masa de agua en la roca es máxima, ocupando todos los espacios de vacío o poros.

4.2. Ensayo de resistencia a compresión simple (RCS)

La resistencia a compresión simple se determina mediante el “ensayo de resistencia a compresión uniaxial” (ECU), de una forma directa. El ensayo consiste en aplicar una fuerza axial F a una probeta cilíndrica de área A, llevándola hasta la rotura mediante una prensa. La resistencia viene dada por la Ec. (3).

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} \quad (3)$$

Los requisitos según la norma UNE 1990 [2], para las probetas a ensayar son:

- Forma cilíndrica, con dimensiones:
 - Relación altura / diámetro de 2,5 a 3,0.
 - Diámetro, mayor de 10 veces el tamaño máximo de grano de la roca.
 - Diámetro no inferior a 50 mm.
- Las probetas se elaborarán mediante perforación, corte torneado y pulido o cualquier otro método apropiado, de modo que:
 - La superficie lateral de la probeta debe ser lisa y estar libre de irregularidades.
 - Las bases deben ser planas y formar un ángulo recto con el eje de la probeta.
 - Se debe evitar el empleo de materiales de recubrimiento como igualadores para conseguir el paralelismo requerido de las superficies de las bases de la probeta de ensayo. Si fuera necesario desviarse de esta regla debido a las características propias del material a ensayar, habrá que indicarlo en el protocolo de ensayo.

Por lo tanto los requerimientos, en cuanto a la muestra a ensayar, no son fáciles de cumplir y en algunas ocasiones resultan imposibles.

5. Resultados y discusión

5.1. Correlación y regresión simple

Una vez concluida la experimentación sobre toda las muestras y procesado los datos, se presenta la Tabla 3, en la cual se indica el valor de varios parámetros para cada núcleo, como son: el contenido de humedad, porcentaje de porosidad interconectada, resistencia última a compresión simple, densidad real y módulo de Young. Los colores en la gráfica indican la magnitud de cada valor comparado con los demás de su grupo (o variable).

La Fig. 2, permite visualizar la relación ente el contenido de humedad y la RCU de los datos presentados en la Tabla 3.

Se observa en la Fig. 2, la dispersión de los datos, y se observa un índice de coeficiente de determinación cerca al 50%.

El análisis estadístico de los valores ha permitido obtener las ecuaciones que describen la variación de la resistencia a compresión de la roca según los diferentes estados de contenido de humedad:

Tabla 3.

Propiedades índices y esfuerzo último de los núcleos de roca.

| Id | Núcleos | Contenido de Humedad (%) | Porcentaje de Porosidad | Esfuerzo último (Kf/cm ²) | Esfuerzo último (MPa) | Densidad real ρ _r (g/cm ³) | Módulo de Young, E (MPa) |
|----------------------------|---------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------|---|--------------------------|
| 1 | M3-3 | 0.53% | 1.53% | 564.0 | 55.3 | 2.89 | 12.0 |
| 2 | M4-1 | 0.60% | 1.72% | 401.9 | 39.4 | 2.96 | 16.5 |
| 3 | M4-2 | 0.34% | 1.33% | 785.1 | 77.0 | 2.96 | 15.0 |
| 4 | M5-1 | 0.33% | 1.29% | 446.0 | 43.7 | 2.93 | 8.0 |
| 5 | M5-5 | 0.28% | 1.50% | 366.4 | 35.9 | 2.93 | 13.9 |
| 6 | M5-6 | 0.25% | 1.43% | 747.1 | 73.2 | 2.93 | 22.8 |
| 7 | M7-1 | 0.15% | 1.00% | 1321.5 | 129.6 | 2.92 | 35.4 |
| 8 | M7-2 | 0.12% | 0.76% | 1628.0 | 159.6 | 2.92 | 36.9 |
| 9 | M7-3 | 0.20% | 1.37% | 1191.9 | 116.9 | 2.92 | 32.8 |
| 10 | M8-1 | 0.20% | 1.37% | 1072.3 | 105.1 | 2.89 | 26.0 |
| 11 | M8-2 | 0.15% | 1.20% | 1326.8 | 130.1 | 2.89 | 24.7 |
| 12 | M8-3 | 0.16% | 1.28% | 972.3 | 95.3 | 2.89 | 31.5 |
| 13 | M8-4 | 0.17% | 1.38% | 1342.8 | 131.6 | 2.89 | 25.2 |
| 14 | M8-5 | 0.13% | 1.00% | 1225.6 | 120.2 | 2.89 | 25.5 |
| 15 | M8-6 | 0.11% | 0.97% | 1373.8 | 134.7 | 2.89 | 34.2 |
| 16 | M8-7 | 0.15% | 1.32% | 1305.2 | 128.0 | 2.89 | 27.1 |
| 17 | M8-8 | 0.12% | 1.30% | 1187.5 | 116.4 | 2.89 | 28.5 |
| 18 | M8-9 | 0.11% | 1.38% | 800.3 | 78.5 | 2.89 | 18.4 |
| 19 | M8-10 | 0.08% | 1.02% | 764 | 74.9 | 2.89 | 23.8 |
| 20 | M9-1 | 0.13% | 1.21% | 1273.3 | 124.8 | 2.9 | 28.1 |
| 21 | M9-2 | 0.15% | 1.29% | 1378.8 | 135.2 | 2.9 | 25.0 |
| 22 | M9-3 | 0.15% | 1.31% | 1057.8 | 103.7 | 2.9 | 29.0 |
| 23 | M10-1 | 0.09% | 1.30% | 1049.5 | 102.9 | 2.94 | 26.4 |
| 24 | M10-2 | 0.09% | 1.26% | 816.8 | 80.1 | 2.94 | 44.6 |
| Valores máximos | | 0.60% | 1.72% | 1628.0 | 159.6 | 3.0 | 44.6 |
| Valores mínimos | | 0.08% | 0.76% | 366.4 | 35.9 | 2.9 | 8.0 |
| Media aritmética | | 0.20% | 1.27% | 1016.6 | 99.7 | 2.9 | 25.5 |
| Desviación típica (σ) | | 0.131% | 0.206% | 341.36 | 33.19 | 0.024 | 8.51 |
| Varianza (S ²) | | 1.715 E-06 | 4.07 E-06 | 116525.67 | 1120.01 | 0.0004255 | 69.42 |

Fuente: Propia.

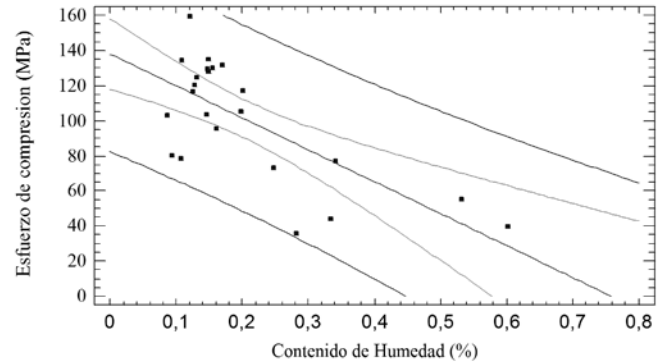


Figura 2. Variación de la resistencia a compresión uniaxial según el contenido de humedad.

Fuente: Propia.

Tabla 4.

Estadísticas de la regresión, RCU vs Contenido de Humedad

| | |
|--|--------|
| Coefficiente de correlación R | - 0,71 |
| Coefficiente de determinación R ² | 50,05% |
| R ² ajustado | 47,67% |
| Error típico | 19,67 |
| Observaciones | 23 |

Fuente: Propia.

Tabla 5.

Coefficientes de la regresión, RCU vs Contenido de Humedad

| Parámetro | Coefficientes | Error típico | Estadístico T | Valor-P |
|------------|---------------|--------------|---------------|---------|
| Intercepto | 137,993 | 9,6475 | 14,3035 | 0,0000 |
| Pendiente | -181,868 | 49,6481 | -4,5871 | 0,0002 |

Fuente: Propia.

$$RCU[MPa] = 137,993 - 181,868 * w(\%) \quad (4)$$

$$R^2 = 50.05\% \quad (5)$$

Del contenido de humedad se puede evidenciar que su aumento genera una disminución considerable en la resistencia a compresión de la roca, el coeficiente de correlación es de -0,71, lo que indica que hay una correlación negativa media, el estadístico R² indica que en el modelo el 50,05% de la variabilidad de la RCU se ve explicada por la variación del contenido de humedad.

5.2. Correlación entre la RCU y la porosidad (n).

La Figura permite visualizar la relación entre la RCU y el porcentaje de porosidad eficaz en las muestras de roca analizadas, descartando una muestra por su elevado valor de dispersión.

Se observa en la Fig. 3, la dispersión de los datos y hay una correlación del 57%.

El análisis estadístico de los valores nos ha permitido obtener las ecuaciones que describen la variación de la resistencia a compresión de la roca según los diferentes estados de porosidad interconectada.

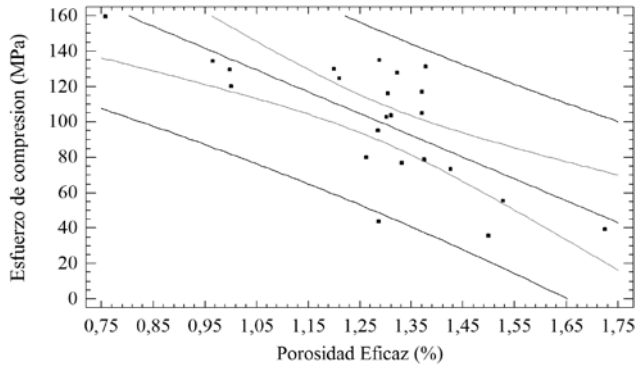


Figura 3. Variación de la resistencia a compresión uniaxial según la porosidad interconectada.

Fuente: Propia.

Tabla 6.

Estadísticas de la regresión, RCU vs %Porosidad

| | |
|--|---------|
| Coefficiente de correlación R | -0,7264 |
| Coefficiente de determinación R ² | 57,76% |
| R ² ajustado | 50,51% |
| Error típico | 24,30 |
| Observaciones | 23 |

Fuente: Propia.

Tabla 7.

Coefficientes de la regresión, RCU vs %Porosidad

| Parámetro | Coefficientes | Error típico | Estadístico T | Valor-P |
|------------|---------------|--------------|---------------|---------|
| Intercepto | 258,997 | 33,07 | 7,833 | 0,0000 |
| Pendiente | -123,401 | 25,48 | -4,843 | 0,0001 |

Fuente: Propia.

$$RCU[MPa] = 258,997 - 123,401 * n(\%) \quad (6)$$

$$R^2 = 57,76\% \quad (7)$$

Respecto al porcentaje de porosidad interconectado también se visualiza en la Figura 3. La correlación lineal inversa, a la que le corresponde un coeficiente de Pearson -0,73 que indica una correlación negativa media (Ver Tabla 7). A mayor porosidad en la roca se puede esperar una menor resistencia a compresión, desarrollando un análisis simple se puede notar en la Tabla 6, el impacto que tiene la porosidad. El coeficiente de determinación R^2 indica que en el modelo el 57,76% de las variaciones de la resistencia en la roca se debe a la variación en el volumen de los poros interconectados.

5.3. Correlación entre la RCU y el contenido de humedad y la porosidad eficaz.

Con el objetivo de explicar y predecir el efecto que tiene la porosidad eficaz y el contenido de humedad de la roca sobre su capacidad de resistencia a compresión simple, se emplean nuevamente los datos de la La Fig. 2, permite visualizar la relación ente el contenido de humedad y la RCU de los datos presentados en la Tabla 3.

Se observa en la Fig. 2, la dispersión de los datos, y se

observa un índice de coeficiente de determinación cerca al 50%.

El análisis estadístico de los valores ha permitido obtener las ecuaciones que describen la variación de la resistencia a compresión de la roca según los diferentes estados de contenido de humedad:

Tabla Las Figs. 4 y 5 permiten apreciar la dispersión de las observaciones y la tendencia del modelo.

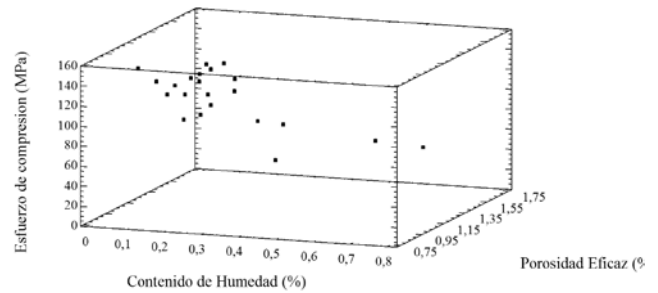


Figura 4. Efecto del Contenido de humedad y el porcentaje de Porosidad en la Resistencia a Compresión Uniaxial.

Fuente: Propia.

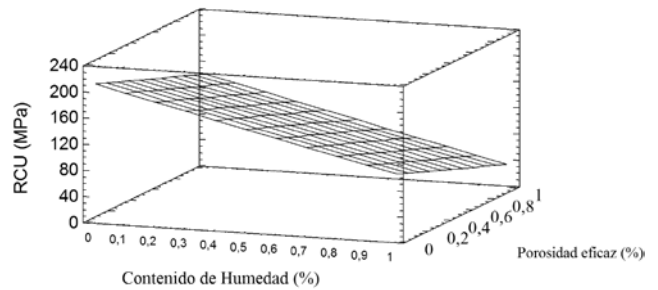


Figura 5. Modelo de regresión lineal múltiple, RCU vs contenido de humedad y porosidad.

Fuente: Propia.

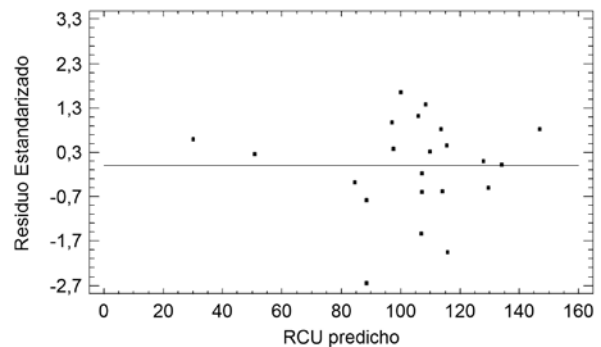


Figura 6. Gráfico de residuos estandarizados RCS vs porosidad eficaz y contenido de humedad.

Fuente: Propia.

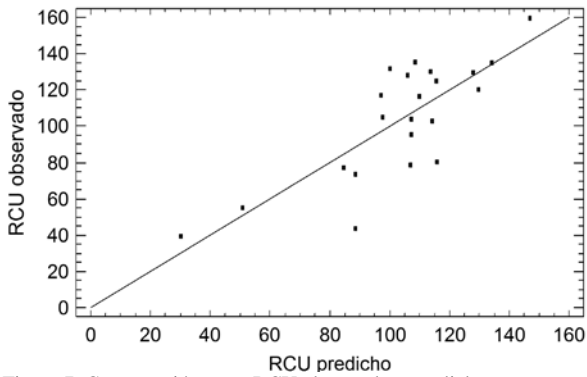


Figura 7. Comparación entre RCU observado y predicho.
Fuente: Propia.

Tabla 8.
Estadísticas de la regresión, RCU vs Contenido de Humedad y Porosidad

| | |
|--|---------|
| Coefficiente de correlación múltiple R | -79,37, |
| Coefficiente de determinación R ² | 62,99% |
| R ² ajustado | 59,10% |
| Error típico | 20,631 |
| Observaciones | 22 |

Fuente: Propia.

Tabla 9.
Coeficientes de la regresión, RCU vs Contenido de Humedad y % Porosidad

| Parámetro | Coefficientes | Error típico | Estadístico T | Valor-P |
|---------------------------|---------------|--------------|---------------|---------|
| Intercepto | 210,442 | 32,27 | 6,5202 | 0,0000 |
| Variable – Humedad (w, %) | -108,171 | 42,88 | -2,5223 | 0,0207 |
| Variable – Porosidad (n) | -66,7724 | 28,91 | -2,3094 | 0,0323 |

Fuente: Propia.

Tabla 10.
Residuos estandarizados de la regresión, RCU vs Contenido de Humedad y % de Porosidad.

| Fila | RCU | Predicción RCU | Residuos | Residuo estandarizado |
|------|------|----------------|----------|-----------------------|
| 4 | 43,7 | 88,55 | -44,85 | -2,65 |

Fuente: Propia.

Del modelo multi-variado se puede concluir que la información entregada por el software Statgraphics Centurion, es la ecuación que describe la recta que mejor se ajusta a las observaciones es:

$$RCU[MPa] = 210,442 - 108,171 * \%w - 66,77 * n(\%) \quad (8)$$

$$R^2 = 62,99\% \quad (9)$$

Entre las variables hay una asociación inversa, a medida que la porosidad eficaz y el contenido de humedad aumentan la RCU disminuye, esto es evidente por el signo negativo de los coeficientes humedad y porosidad, por el signo del coeficiente de correlación.

El coeficiente de determinación ajustado R² es 59,097%, Es decir que para el modelo logra explicar el 59,097% de la variación de la RCU en la roca.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación son un avance importante en la mecánica de rocas del departamento del Valle. Es importante recordar, que el tipo de modelos de regresión presentados en este documento, son aplicables y representativos para rocas que gocen de características similares a las utilizadas en la presente investigación.

Como conclusiones generales de la investigación se resaltan las siguientes consideraciones:

Se le determinaron parámetros físicos – mecánicos a las muestras de rocas consideradas en la investigación. A continuación, se presentan un resumen de los rangos de estos valores.

Tabla 11.
Rangos de magnitud de los parámetros físicos – mecánicos.

| Parámetro | Rango | Valor medio | Desviación estándar | Unidades |
|-----------------------------------|---------------------------|-------------|---------------------|-------------------|
| Resistencia a Compresión Uniaxial | 35,9 < σ_c < 159,6 | 99,67 | 34,19 | MPa |
| Módulo de Young | 8,0 < E < 44,6 | 25,47 | 8,51 | GPa |
| Porosidad eficaz | 0,76 < n < 1,72 | 1,27 | 0,21 | % |
| Densidad Real | 2,89 < ρ_r < 2,96 | 2,91 | 0,024 | g/cm ³ |
| Contenido de humedad | 0,08 < w% < 0,60 | 0,20 | 0,13 | % |

Fuente: Propia.

6.1. Relación entre el resistencia a compresión uniaxial (σ_c) y el contenido de humedad (%w)

De esta relación se puede concluir que al aumentar el contenido de humedad (pasar de seco a parcialmente saturado) su resistencia a compresión uniaxial se ve reducida, aproximadamente entre un 48% (con los datos experimentales) y en un 79% (con los datos analíticos). Se planteó un modelo matemático lineal, uno exponencial y otro inverso; para describir la relación entre las variables, la Tabla 12 presenta los modelos. Para el modelo lineal el coeficiente de correlación es de -0,71, indicando que hay una correlación negativa media entre las variables. El coeficiente de determinación R² indica que en el 50% de la variación de la resistencia a compresión uniaxial de la roca se debe a la variación de la porosidad eficaz.

6.2. Relación entre la resistencia a compresión uniaxial (σ_c) y la porosidad (n)

Las variables presentan una relación inversa de magnitud media (R = -0,73), por tanto a mayor porosidad eficaz se espera una disminución en la resistencia a compresión. Para la muestra de rocas estudiadas, esta pérdida de resistencia varía entre un 15% y un 59% para las rocas de porosidad media y alta, respectivamente, comparadas con las de baja porosidad. El coeficiente de determinación R² indica que en el modelo el 57,76% de las variaciones de la resistencia en la roca se deben a la variación en la porosidad eficaz.

6.3. Relación entre la RCU, el contenido de humedad y la porosidad eficaz

Del análisis de esta relación se generó un modelo matemático lineal multivariado para caracterizar la relación entre las variables. Este modelo aumentó la capacidad predictiva en comparación con los modelos lineales. Ambas variables continúan mostrando una relación lineal inversa, de modo que, al aumentar el contenido de humedad o la porosidad eficaz la resistencia a compresión disminuye. Los resultados del modelo indican que el 59,09% de las variaciones de la resistencia se deben a la variación del contenido de humedad y porosidad eficaz de la roca.

Tabla 12.
Resumen de ecuaciones desarrolladas en investigación.

| | Modelo (RCU[MPa]) | CD | CC |
|------------------------------|---|-----------------|----------------|
| RCU vs. Contenido de humedad | $RCU = 137.993 - 181.868 * w$ | $r^2 = 50,05\%$ | $r = -71,0\%$ |
| | $RCU = \frac{1}{0.0019 + 0.034 * w}$ | $r^2 = 55,76\%$ | $r = -74,67\%$ |
| | $RCU = e^{5,02-2.35*w}$ | $r^2 = 55,74\%$ | $r = -74,66\%$ |
| RCU vs. Porosidad eficaz | $RCU = 258,997 - 123,401 * n$ | $r^2 = 57,76\%$ | $r = -72,64\%$ |
| | $RCU = (18,244 - 6,531 * n)^2$ | $r^2 = 50,20\%$ | $r = -70,85\%$ |
| | $RCU = \sqrt{42072,2 - 24002,6 * n}$ | $r^2 = 56,30\%$ | $r = -75,03\%$ |
| RCU vs. Porosidad y humedad | $RCU = 210,442 - 108,171 * w - 66 * n$ | $R^2 = 59,09\%$ | |
| RCU v. porosidad y densidad | $RCU = 1439,54 - 410,245 * \rho_r - 111,05 * n$ | $R^2 = 65,51\%$ | |

Fuente: Propia.

6.4. Relación entre la RCU, la porosidad eficaz y la densidad real

En este análisis se determinó que hay una relación lineal inversa considerable ($R=-0,83$). El coeficiente R^2 ajustado indica que el 65,51% de la variación de la RCU se debe a la variación de la porosidad eficaz y la densidad real de la roca. Se resalta en el modelo que contrario a lo esperado, al aumentar la densidad se ve disminuida la resistencia a compresión, esto puede ser debido a que hay un pequeño

rango de densidades entre las rocas (2.9-3.0).

En la Tabla 12, se presenta de forma resumida las ecuaciones planteadas a lo largo de la investigación y presenta su poder predictivo.

Donde CD y CC son los coeficientes de determinación y correlación, respectivamente. Como se observa en la Tabla 12, se recomienda utilizar los modelos con el valor de R^2 mayor, aunque por no encontrarse muy alejados y por facilidad de utilización para ingenieros e investigadores se podría utilizar los modelos lineales para el contenido de humedad.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad del Valle por el financiamiento de esta investigación y al laboratorio de Geología y Mecánica de Rocas de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle por los ensayos realizados.

Referencias

- [1] Brady, B.H.G. and Brown, E.T., Rock Mechanics and Mining Engineering. Springer, Netherlands. 2006
- [2] Española, Una Norma. Ensayos para la determinación del módulo de elasticidad (Young) y del coeficiente de Poisson. 1990. UNE 22-950-90.
- [3] Galván, M., Correlación entre la resistencia a compresión simple y el índice a carga puntual I_s (50) en calizas de la Comunidad Valenciana (España). Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2011.
- [4] Hudson, J.A. and Harrison, J.P., Introduction. Engineering Rock Mechanics. Oxford: Pergamon. 1997.
- [5] ASTM 2010b. Standard test methods for laboratory determination of water (Moisture) content of soil and rock by Mass1. D2216-10.
- [6] ASTM 2010a. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. D7012-10.
- [7] Gómez, J., Nivia, A., Montes, N.E., Jiménez, D.M., Tejada, M.L., Sepúlveda, M.J., Osorio, J.A., Gaona, T., Diederix, H., Uribe, H. y Mora, M., Compiladores. Mapa Geológico de Colombia. Escala 1:1'000.000. INGEOMINAS, Bogotá. 2007.
- [8] Peng, S. and Zhang, J., Rock properties and mechanical behaviors. Engineering Geology for Underground Rocks. Springer Berlin Heidelberg, 2007.

M. Galván-Ceballos, es docente desde el año 2011 de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. En el año 2002 se graduó como Ing. Civil de la Universidad del Quindío, Armenia, Colombia, es MSc. en consultoría de empresas de ingeniería civil de la Universidad Politécnica de Valencia y Dr. en la misma universidad en el 2011 con una tesis doctoral sobre las propiedades de las rocas calizas de la comunidad Valenciana. Fue ingeniero residente de la empresa Seven S.L en Valencia, España y docente de la Universidad Politécnica de Valencia (España) en la asignatura Geotecnia y Cimientos I.
ORCID: 0000-0002-5503-2689

I. Restrepo, es Ing. Civil en 2012 de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Actualmente trabaja en una empresa consultora de ingeniería civil en la ciudad de Cali.
ORCID: 0000-0002-7997-6975