

Caracterización física y mecánica de diferentes tipos de roca en Yucatán

Marisela Chi Cob^{1,*}, Jorge Nieves Ontiveros¹, Javier Amaya Uicab¹, Ana Cabrera Pérez¹

¹.Academia de Geotecnia y Vías Terrestres, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán.

Fecha de recepción: 18 de octubre de 2024 - Fecha de aceptación: 29 de abril de 2025

Resumen

En el estado de Yucatán, México la roca más abundante es la caliza que se ha caracterizado antes, sin embargo, los datos reportados están generalizados o son escasos o casi nulos según el tipo de roca. Ante la escasa información acerca de las características físicas y mecánicas de las rocas según su tipo, surge la necesidad de obtener y correlacionar los datos para uso en excavaciones y en la construcción. En este estudio se realizaron caracterizaciones físicas y mecánicas a 62 muestras de 5 variedades de rocas, con el objetivo de reducir la variabilidad de datos que existe hoy en día. Este trabajo correlaciona las características físicas de estas rocas obteniendo el porcentaje de absorción (% Abs), el peso específico saturado (γ_{sat}), el peso específico seco (γ_d), la gravedad específica (S_s), la relación de vacíos (e) y la porosidad (n) de cada tipo con su resistencia a compresión simple no confinada (σ). Los resultados de estas correlaciones indican que, “crema maya” es la roca que presenta mejores condiciones para aplicación ingenieril donde los proyectos requieren alta resistencia y baja permeabilidad. La “conchuela”, por otro lado, suele presentar problemas para su uso en la construcción, debido a su baja resistencia, sin embargo, podría ser de utilidad en proyectos de infraestructura donde la porosidad sea un factor relevante.

Palabras clave: Rocas calizas, propiedades índices, características mecánicas, compresión simple, correlación de índices.

Physical and mechanical characterization of distinct types of rock in Yucatán

Abstract

In the state of Yucatan, Mexico the most abundant rock is limestone which has been characterized before, however, the data reported are generalized or they are scarce or almost non-existent depending on the type of rock. Given the scarcity of information about the physical and mechanical characteristics of rocks according to their type, the need arises to obtain and correlate data for use

*marisela.chi@correo.uady.mx

in excavations and construction. In this study, physical and mechanical characterizations were carried out on 62 samples of 5 varieties of rocks, with the aim of reducing the variability of data that exists today. This work correlates the physical characteristics of these rocks by obtaining the absorption percentage (% Abs), saturated density (γ_{sat}), dry density (γ_d), specific gravity (Ss), void ratio (e), and porosity (n) of each type with their unconfined simple compressive strength (σ). The results of these correlations indicate that "crema maya" is the rock that presents the best conditions with a higher quality. The "conchuela", on the other hand, usually presents problems for use in construction, due to its low resistance, however, it could be useful in infrastructure projects where porosity is a relevant factor.

Key words: Limestone rocks, index properties, mechanical characteristics, simple compression, index correlation

Introducción

La Península de Yucatán, rica en fenómenos geológicos únicos, destaca por sus formaciones rocosas distintivas, como cenotes y cuevas subterráneas (dolinas), sartenejas, conductos o tubos de disolución, así como cavernas y extensos sistemas de cuevas (Monrroy, 2023; Estrada et al, 2019). Según su geomorfología, figura 1, en el estado de Yucatán es común

encontrar regiones kársticas, que son lugares que se caracterizan por contener rocas carbonatadas, principalmente piedra caliza y dolomita, este tipo de regiones representa el 15% de la superficie de la Tierra (Jones & White, 2019). En la parte norte y este se puede encontrar las calizas-coquina, que son formaciones del Plioceno-Mioceno y al centro y sur se presentan calizas y margas del Eoceno (Bautista et al, 2015).



Figura 1. Geomorfología del estado de Yucatán. Fuente: Modificado de (Bautista, et al, 2015)

Existen algunos estudios relacionados con las características de las rocas en Yucatán entre los cuales la mayoría las identifica como un tipo (piedras calizas) sin considerar que dentro de esa clasificación existen particularidades que

determinan variaciones en algunas características con diferencias considerables. Es importante mencionar que los procesos de formación determinan las características y peculiaridades de textura de las rocas, y que

una clasificación más precisa toma en cuenta el porcentaje de granos diferente presentes en su estructura o matriz además de considerar sus comportamientos físicos y mecánicos, ya que estos permiten identificar la variabilidad existente de estas rocas para el uso particular en la construcción o como terreno de cimentación (Estrada et al, 2008; Alonzo et al, 2010).

Estrada et al (2008), realizaron pruebas de compresión a una variedad de rocas calizas de Yucatán en las que hallaron valores de esfuerzos máximos. Cabe mencionar que este estudio si realizó una clasificación de tres tipos distintos de roca caliza. Los resultados de este estudio arrojaron que los valores máximos de esfuerzo permitido fueron de 1.05 MPa para una roca denominada coquina, 18.50 MPa para la roja llamada laja roja y de 22.23 MPa para la roca laja crema, adicionalmente presentaron otros valores relevantes como la densidad de 1.6 g/cm³, 2.6 g/cm³ y 2.5 g/cm³ respectivamente.

En un estudio similar Alonzo y Espinosa (2003), sin identificar la clase de roca caliza, reportaron valores de esfuerzos mínimos de 18.10 kg/cm² (1.78 Mpa) y máximos de 660 kg/cm² (64.72 Mpa), además encontraron otros datos como el peso volumétrico, la densidad (Ss) y la absorción, en donde los mínimos y máximos fueron de 1.15 g/cm³ y 2.60 g/cm³; 1.24 y 2.56; 0.98 % y 28.93 % respectivamente.

Por otro lado, las rocas son esenciales en muchas áreas del desarrollo de infraestructura, las cuales van desde la elaboración de concretos hasta la construcción de cimentaciones que conectan las estructuras al suelo natural, que en la mayoría de los casos suele ser roca.

En los últimos años el estado de Yucatán, y en particular la ciudad de Mérida, capital del estado, crece rápidamente con nuevas construcciones y grandes desarrollos. Con la llegada del Tren Maya, la construcción de

nuevas plantas eléctricas, la ampliación de ductos de gas natural y con nuevas y grandes inversiones, se estima que la población prácticamente se duplicará en 2025 alcanzando los 2.2 millones de habitantes, de los cuales hoy en día, la mitad se concentra en la capital (Ruiz Torre, 2023). Ante estos desarrollos de infraestructura es importante conocer los parámetros técnicos de las rocas como elemento constructivo. Si bien existe información sobre las características físicas y mecánicas de las rocas en Yucatán, pero hay poca para cada tipo. Se realizó una búsqueda en la literatura disponible para identificar rangos de valores que permitieran contextualizar los resultados obtenidos en este estudio en donde se obtienen valores para las variabilidades, como el antes mencionado realizado por Estrada et al, 2008.

En este estudio se caracterizan 4 tipos de rocas calizas en las cuales se realizaron pruebas físicas para determinar los principales índices, porcentaje de absorción (% Abs), peso específico saturado (γ_{sat}), peso específico seco (γ_d), gravedad específica (Ss), relación de vacíos (e), porosidad (n) y de resistencia a compresión simple (σ), con el objetivo de correlacionar los parámetros principales que son de uso cotidiano en la construcción, explorando su comportamiento físico y mecánico.

Metodología

El muestreo se realizó considerando 22 talleres activos, dado que los talleres activos trabajan en promedio entre 3 y 5 tipos de rocas, se decidió aplicar un muestreo por conglomerados dirigido. Se eligieron 6 talleres de los 22 identificados, priorizando aquellos que trabajaban la mayor diversidad posible de tipos de roca y garantizando que al menos una vez estuviera presente cada una de las cuatro rocas principales, en la tabla 1 se muestra la representación de la cantidad de talleres que

trabajan un determinado tipo de roca. Los talleres seleccionados fueron el 2, 6, 20, 22, 24 y 27.

Tabla 1. Representación de cada tipo de roca en los talleres.

Tipo de roca	No de talleres que la trabajan
Crema Maya	5
Toc	5
Conchuela	4
Ticul	5

Los artesanos informaron que estas rocas se suministran de distintas canteras y que provienen de zonas del estado de Yucatán como Sisal, Chicxulub, Ticul y también de la misma población de Dzityá. Se observó que en estos talleres se trabajan principalmente 4 tipos de rocas de la región, que se identifican en su mayoría como “ticul” (laja roja), “crema maya” (laja crema o macedonia), “toc” (venado) y “conchuela” (coquina). Esta identificación se basó principalmente en la observación visual y en el conocimiento local de los talleres, donde estas denominaciones son ampliamente utilizadas. No se realizó un análisis petrográfico formal, pero en algunos casos se recurrió a la comparación con muestras previamente clasificadas y a criterios básicos como color, textura y densidad. Esta aproximación responde a la práctica común en la región, donde la nomenclatura local tiene una larga tradición y es funcional para fines constructivos y ornamentales. La roca ticul es una roca con tonalidades rojas o naranjas, de tipo ornamental; sin embargo, es posible encontrarlo como terreno de cimentación (laja

roja). La crema maya es conocida también como macedonia, en terreno natural se ve como laja crema, es una roca que posee tonalidades blanquecinas con apariencia densa. La roca toc es conocida también como venado es la más común de la región, en la cual no se observan grandes sedimentos orgánicos, su color es variado con tonalidades marrón o cremas con manchas en colores más oscuros. La conchuela, que en el estrato natural podría parecer una coquina, pero con menor cantidad de poros, presenta tonalidades blanquecinas, es una roca fosilífera en la cual se encuentran conchas de moluscos. Estas 4 variaciones de la roca caliza fueron identificadas de acuerdo con la experiencia de los artesanos; sin embargo, es preciso aclarar que, en el estrato natural, es habitual encontrar combinaciones entre estos tipos. Es por ello por lo que se incluyó en este estudio una muestra de variación de roca de conchuela con toc, debido a que es una combinación común de encontrar en la zona norte y este del estado. (Bautista, Fraustro, Ihl, & Aguilar, 2015).

Tabla 2. Distribución de muestras extraídas según el tipo de roca identificada.

Tipo de roca	Cantidad de muestras extraídas
Ticul	18
Crema maya (macedonia)	10
Conchuela	12
Toc	10
Conchuela/Toc	12

Se extrajeron 62 núcleos de roca, la distribución de las muestras según el tipo de roca se muestra en la tabla 2. El proceso de extracción de roca se basó en la norma ASTM D4543, en donde se establece que el diámetro mínimo de los núcleos es de 1 7/8 in (47 mm), y la relación de la longitud-diámetro (L/D) de 2:1 a 2.5, sin embargo, en algunos casos no fue posible la obtención de esa relación, debido al estado alterado de la roca estudiada, por lo que se decidió usar muestras con relaciones L/D menores de hasta 1:1, como se observa en la figura 2. Para las muestras con L/D menores a 2:1, se realizó un ajuste de la resistencia usando la ecuación correspondiente en la tabla 2. El diámetro máximo aceptable es de 3" y debe ser al menos 10 veces el tamaño del grano más grande de la roca (Brady & Brown, 2004). Para esta extracción se empleó un extractor de núcleos marca Milwaukee con una broca de punta de diamante de 2 3/4 in (7 cm) y muestras de ensaye cilíndricas. Se usó además una sierra de disco respetando la proporción antes mencionada de 2:1 y de 1:1. Se midieron las dimensiones de las muestras con ayuda del vernier y se registraron las medidas obtenidas,

procurando caras paralelas y respetando lo indicado en la normativa usada.

Se determinaron las características físicas o pruebas índice de las 62 muestras, siguiendo lo indicado en las normas ASTM D2216 para determinar el contenido de humedad de las rocas y ASTM C97 para obtener la absorción y gravedad específica unitaria de la roca dimensional. Para el porcentaje de absorción, se dejó saturando las muestras en contenedores de agua por 48 horas, después de este periodo se secaron superficialmente con un paño húmedo para ser inmediatamente pesados en una báscula de 0.1g de precisión (W_{SSS}). De esta manera, para examinar el valor de los pesos saturados sumergidos se empleó un contenedor de agua y una canasta conectada a la báscula para obtener el peso sumergido de la muestra (W_{sum}). Se dejó secando por 48 horas usando un horno a 60°C +/- 2 como se indica en la norma, para adquirir los pesos secos de los núcleos (W_s). Para la determinación de la absorción (Abs), el peso específico saturado (γ_{sat}) y seco (γ_d), la porosidad y la relación de vacíos se emplearon las ecuaciones presentadas en la tabla 3.

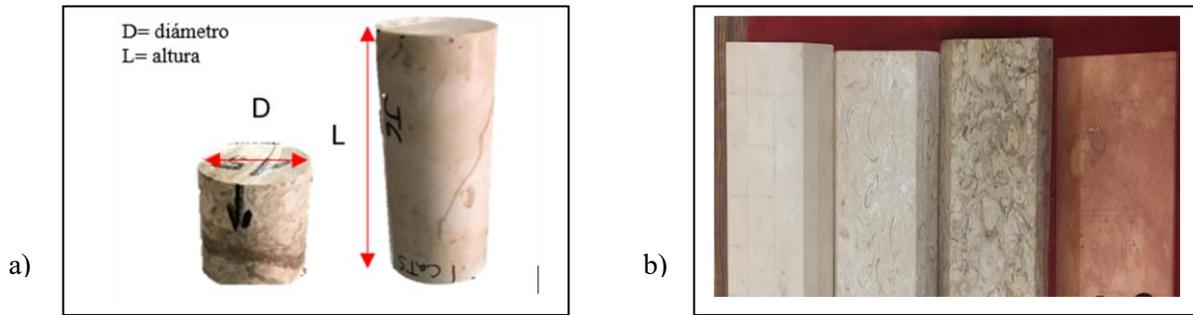


Figura 2. Muestras de rocas extraídas para el estudio a) dimensiones en proporción de los núcleos la primera es de (L/D), 1:1 y la segunda 2:1 de la relación longitud-diámetro, b) tipos de rocas estudiadas de izquierda a derecha, crema maya (macedonia), conchuela, toc (venado), ticul.

Para la gravedad específica, se calcula la relación entre la densidad de los sólidos y del agua destilada a 4°C (γ_s/γ_o). Para la determinación del índice de porosidad y la relación de vacíos, parámetros fundamentales para la caracterización del sistema de oquedades en las muestras ensayadas, se asume que los poros inicialmente ocupados por agua durante el proceso de saturación son

completamente desalojados durante el secado. En consecuencia, el volumen de vacíos (o volumen poroso) se calcula a partir de la diferencia de masa entre el estado saturado y el estado seco (W_w), dividida entre la densidad del agua (γ_w , en g/cm^3). Posteriormente, el volumen de sólidos se obtiene como la diferencia entre el volumen total de la muestra y el volumen de vacíos previamente determinado.

Tabla 3. Parámetros para los cálculos de las características de las rocas.

No.	Ecuación	Unidades	Índice
1	$Abs = \frac{W_w(g)}{W_s(g)} * 100$	%	Absorción
2	$\gamma_{sat} = \frac{W_{sss}(g)}{V_m(cm^3)}$	$\frac{g}{cm^3}$	Peso específico de la masa saturada
3	$\gamma_d = \frac{W_s(g)}{V_m(cm^3)}$	$\frac{g}{cm^3}$	Peso específico de la masa seca
4	$n = \frac{V_v(g)}{V_m(cm^3)} * 100$	%	Porosidad ¹
5	$e = \frac{V_v(cm^3)}{V_s(cm^3)}$	Adimensional	Relación de vacíos ²
6.	$C = C_\alpha/[0.88 + (0.24b/h)]$	Kgf	Corrección de cargas ³ para $1 < (b/h) < 2$

1. Es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de la muestra. Lin et al,2015; (International Society for Rock Mechanics, 1977). 2. Donde V_v =Volumen de poro calculado por $V_p=(M_{saturada}-M_{seca}/\rho_{agua})$ (Lin et al,2015; (International Society for Rock Mechanics, 1977). 3. Donde C= carga corregida, C_α = carga última del espécimen, b= diámetro y h= altura. (Hoek & Bray, 1981).

Las características mecánicas de las rocas se obtuvieron mediante pruebas de compresión simple siguiendo la norma (ASTM-D2938), realizado a las 62 muestras de roca. Para este procedimiento se cribó material arenoso por el tamiz No. 60, el cual sirvió para nivelar la superficie de las muestras de roca durante la

aplicación de la carga axial y garantizar la uniformidad de la distribución de cargas. Se colocó el material cribado en la base de la prensa y sobre la muestra, se verificó que la muestra se encuentre nivelada. Con ayuda del cucharón se enrasó el material sobre la muestra según se observa en la figura 3.

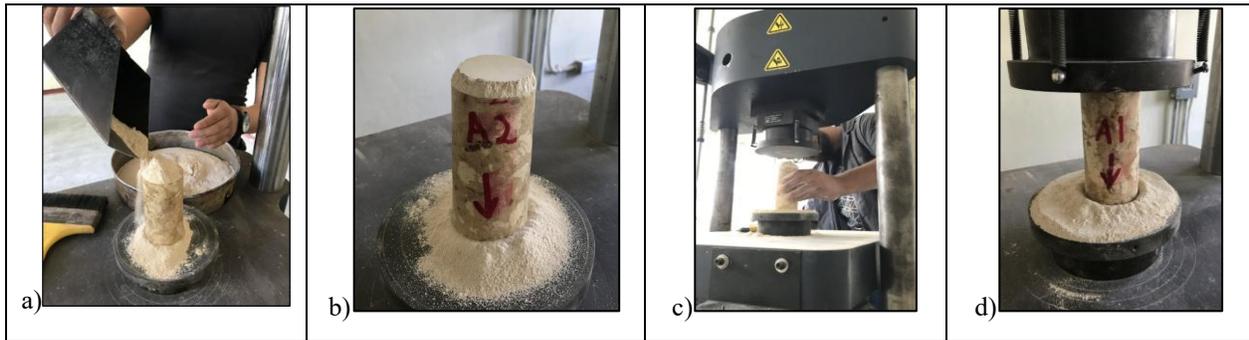


Figura 3. Ensayo de las muestras. a) colocación de un material fino para nivelar, b) material enrasado antes de la prueba c) ubicación de la muestra en la prensa d) colocación del cabezal de la prensa antes de iniciar la compresión uniaxial.

Se registró la resistencia compresión de cada ensaye, en el caso de las muestras con una relación de L/D menor a 2 se procedió a realizar una corrección del esfuerzo con la ecuación 6 de la tabla 2. Por el tipo de estabilización usado

(suelo fino cribado por el tamiz # 40) se cuidó que las muestras ensayadas a compresión simple tuvieran fallas diametrales, como se muestra en la figura 4, para que éstas sean válidas. (Galván et al. 2014).

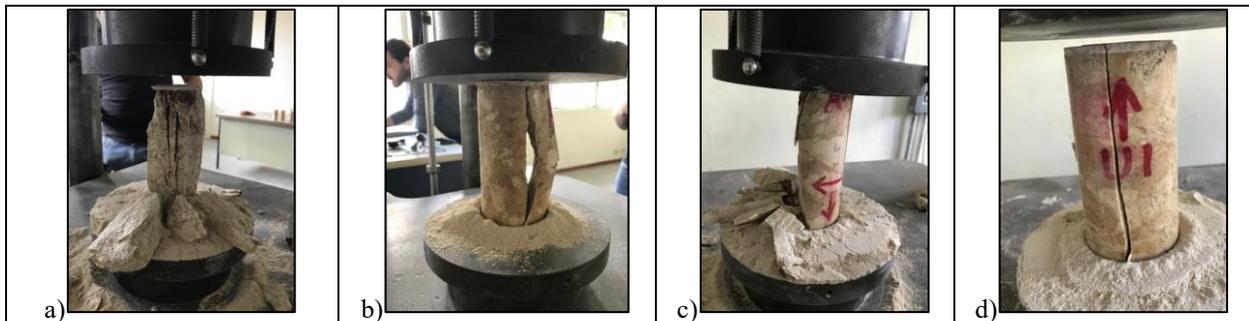


Figura 4. Modos de fractura de distintas muestras. Las probetas a, b y d son muestras válidas, mientras que la c, no es válida por el tipo de ángulo de falla.

Se realizaron análisis estadísticos de los resultados obtenidos, así como la elaboración de rangos de resistencias para una mejor identificación del comportamiento mecánico de los tipos de rocas estudiados.

Resultados

En la tabla 4 se muestran las medias aritméticas de las características físicas mediante las pruebas índice de las rocas, en la última columna se presenta las características mecánicas mediante los esfuerzos obtenidos de la compresión simple de rocas no confinadas. Los valores aquí presentados son la media aritmética de las muestras según el tipo de roca caliza.

Tabla 4. Características físicas y mecánicas de las muestras de rocas.

Tipo de roca	N	Abs (%)	γ_{sat} (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	Ss	e	n (%)	σ (MPa)
Ticul	18	3.84%	2.31	2.23	2.28	0.09	8.09%	20.60
Crema maya	10	3.23%	2.45	2.38	2.40	0.08	7.16%	25.32
Conchuela	12	12.79%	2.00	1.78	1.77	0.30	22.24%	9.61
Toc	10	8.10%	2.25	2.09	2.11	0.22	17%	19.52
Conchuela/toc	12	6.11%	2.22	2.13	2.16	0.15	13%	16.28

Nota= Abs= absorción, γ_{sat} =peso específico saturado, γ_d =peso específico seco, Ss= gravedad específica, e= relación de vacíos, n= porosidad, σ = esfuerzo último (resistencia). Los valores corresponden a la media aritmética.

Se observa que la roca tipo crema maya presentó la mayor resistencia y los menores valores de porosidad y absorción entre los materiales estudiados. Por el contrario, la roca tipo conchuela mostró valores significativamente mayores de absorción, porosidad (n) y gravedad específica (Ss), así como una menor resistencia promedio.

Como parte del análisis de datos se realizaron cálculos estadísticos con el objetivo de validar las pruebas realizadas y determinar el grado de dispersión de los resultados, como se muestra

en la tabla 5. En esta tabla se incluyen medidas de tendencia central (media, mediana) y medidas de dispersión (desviación estándar, varianza, mínimo y máximo) para cada tipo de roca caliza y sus propiedades físicas y mecánicas. Esto permite identificar la variabilidad dentro de cada grupo y aporta mayor solidez a la interpretación de las diferencias entre tipos de roca. En las últimas 2 filas de la tabla 4 de cada tipo de roca se observan los valores mínimos y máximos de las características planteadas, que indican los rangos variables.

Tabla 5. Datos estadísticos del análisis de resultados, según el tipo de roca estudiada.

TICUL (N=18)	Abs	γ_{sat} (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	Ss	e	n	σ (MPa)
Media	0.04	2.31	2.23	2.28	0.09	0.08	20.63
Error Std. De la media	0.01	0.04	0.05	0.05	0.01	0.01	2.10
Mediana	0.04	2.29	2.21	2.25	0.09	0.08	18.74
Desviación Std.	0.02	0.17	0.21	0.21	0.05	0.04	8.91
Varianza	0.00	0.03	0.05	0.04	0.00	0.00	79.52
Mínimo	0.01	2.05	1.90	1.97	0.01	0.01	8.75
Máximo	0.08	2.54	2.53	2.59	0.19	0.16	38.91
CREMA MAYA (N=10)	Abs	γ_{sat} (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	Ss	e	n	σ (MPa)

Media	0.03	2.45	2.38	2.40	0.08	0.07	25.31
Error Std. De la media	0.01	0.05	0.06	0.06	0.02	0.02	4.07
Mediana	0.02	2.51	2.47	2.50	0.04	0.07	28.87
Desviación Std.	0.03	0.14	0.20	0.20	0.07	0.06	12.88
Varianza	0.00	0.02	0.04	0.04	0.01	0.00	165.74
Mínimo	0.01	2.17	1.99	2.02	0.02	0.02	7.93
Máximo	0.09	2.56	2.54	2.57	0.22	0.18	39.73
CONCHUELA (N=12)	<i>Abs</i>	<i>Y_{sat} (g/cm³)</i>	<i>Y_d (g/cm³)</i>	<i>Ss</i>	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>σ (MPa)</i>
Media	0.13	2.00	1.78	1.71	0.30	0.22	9.20
Error Std. De la media	0.01	0.04	0.05	0.06	0.03	0.02	1.41
Mediana	0.14	2.08	1.81	1.73	0.32	0.22	9.61
Desviación Std.	0.05	0.14	0.17	0.19	0.11	0.07	4.88
Varianza	0.00	0.02	0.03	0.04	0.01	0.01	23.76
Mínimo	0.03	1.79	1.56	1.37	0.06	0.05	2.42
Máximo	0.17	2.15	2.03	1.94	0.43	0.30	19.32
TOC (N=10)	<i>Abs</i>	<i>Y_{sat} (g/cm³)</i>	<i>Y_d (g/cm³)</i>	<i>Ss</i>	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>σ (MPa)</i>
Media	0.08	2.25	2.09	2.11	0.22	0.17	16.31
Error Std. De la media	0.01	0.04	0.03	0.07	0.05	0.03	0.68
Mediana	0.07	2.24	2.11	2.11	0.17	0.17	17.09
Desviación Std.	0.04	0.13	0.11	0.23	0.15	0.09	3.70
Varianza	0.00	0.02	0.01	0.05	0.02	0.01	13.76
Mínimo	0.03	2.10	1.87	1.66	0.06	0.06	9.83
Máximo	0.16	2.50	2.23	2.42	0.52	0.34	21.44
CONCHUELA/TOC (N=12)	<i>Abs</i>	<i>Y_{sat} (g/cm³)</i>	<i>Y_d (g/cm³)</i>	<i>Ss</i>	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>σ (MPa)</i>
Media	0.06	2.22	2.13	2.16	0.15	0.13	19.50
Error Std. De la media	0.00	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	2.29
Mediana	0.06	2.23	2.12	2.15	0.15	0.13	17.95
Desviación Std.	0.01	0.08	0.09	0.08	0.03	0.02	7.93
Varianza	0.00	0.01	0.09	0.01	0.00	0.00	62.82
Mínimo	0.04	2.05	1.56	1.99	0.10	0.09	9.51
Máximo	0.08	2.31	2.54	2.29	0.20	0.17	29.71

Nota= Abs= absorción, Y_{sat}=peso específico saturado, Y_d=peso específico seco, Ss= gravedad específica, e= relación de vacíos, n= porosidad, σ = esfuerzo último (resistencia). Absorción y Porosidad presentados en decimales.

Resulta útil de igual forma, establecer correlaciones entre propiedades físicas y la resistencia mecánica de las rocas, con la finalidad de identificar relaciones que permitan estimar el comportamiento mecánico a partir de variables fácilmente medibles. Por ello, se elaboraron gráficas de correlación entre el esfuerzo a compresión simple y las propiedades físicas de las rocas estudiadas (figuras 4 a 9). Cabe destacar que, al considerar todos los tipos de roca en conjunto, se observa una baja correlación entre las variables,

reflejada en los bajos valores de R², en algunos tipos de roca.

La resistencia de la roca es un parámetro fundamental para la determinación de variables de diseño en un proyecto de construcción. Por ello, en la figura 10 se presentan los resultados de los cálculos de los intervalos de confianza obtenidos para las resistencias correspondientes a los distintos tipos de roca analizados.

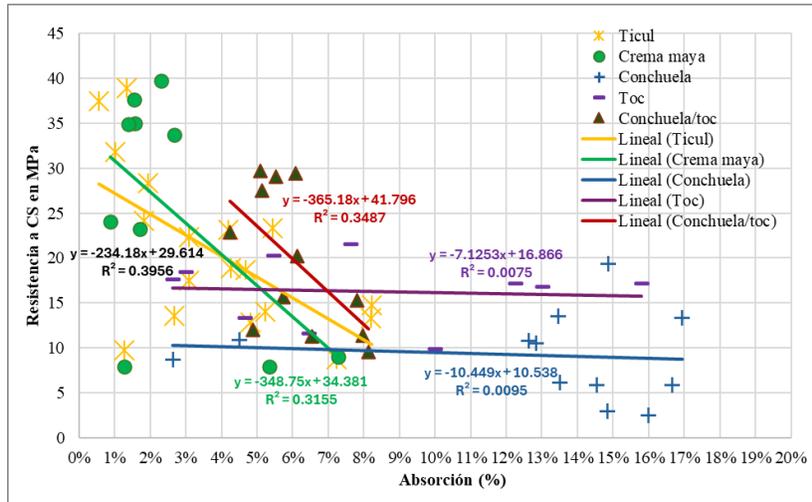


Figura 4. Correlación entre el porcentaje de absorción y la resistencia.

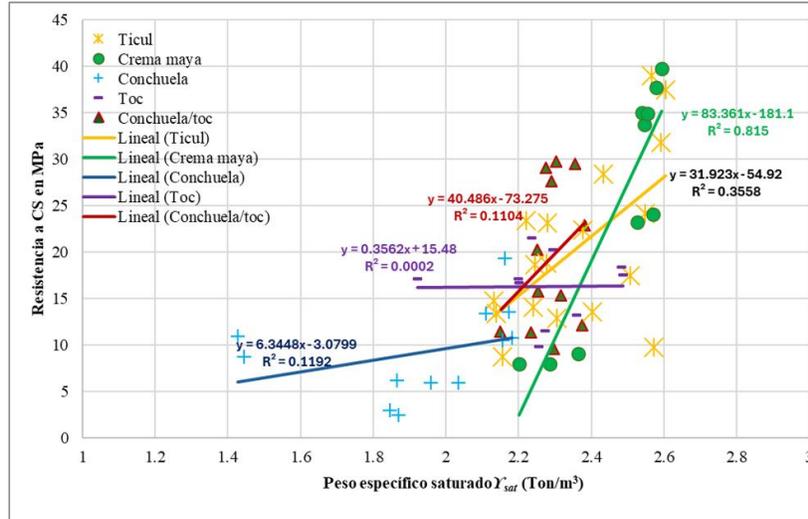


Figura 5. Correlación entre la densidad saturada y la resistencia

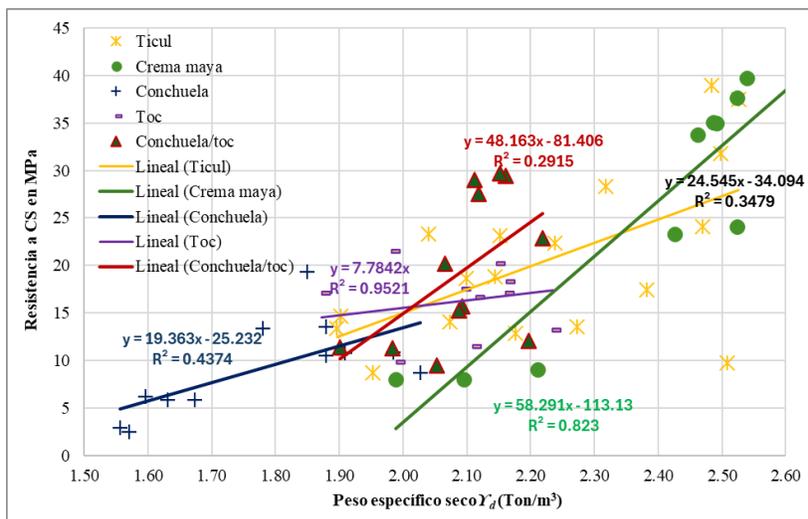


Figura 6. Correlación entre la densidad seca y la resistencia

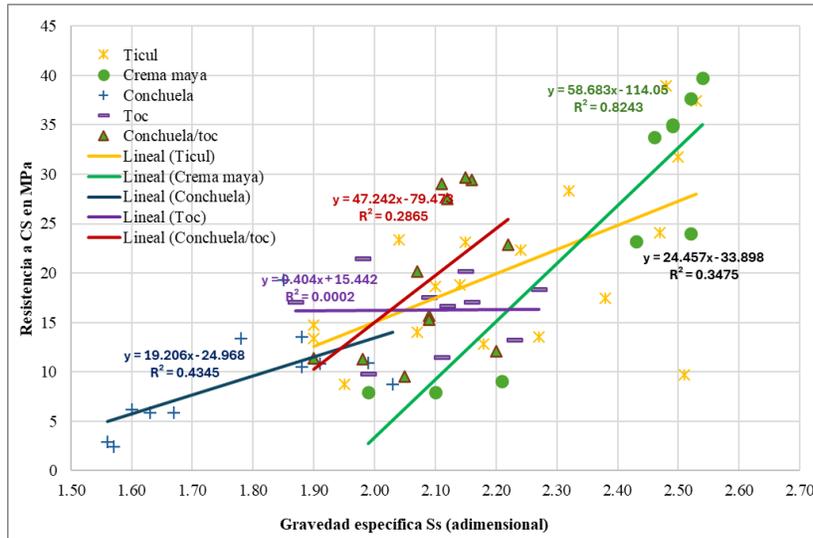


Figura 7. Correlación entre la gravedad específica y la resistencia

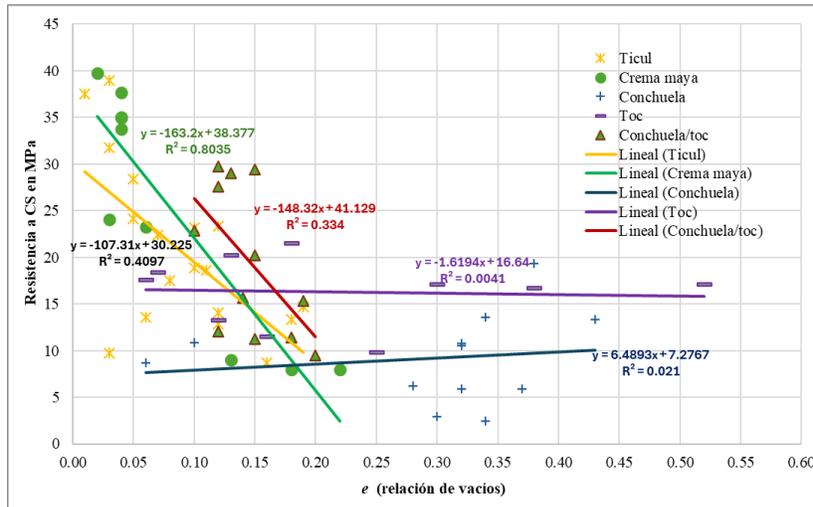


Figura 8. Correlación entre la relación de vacíos y la resistencia

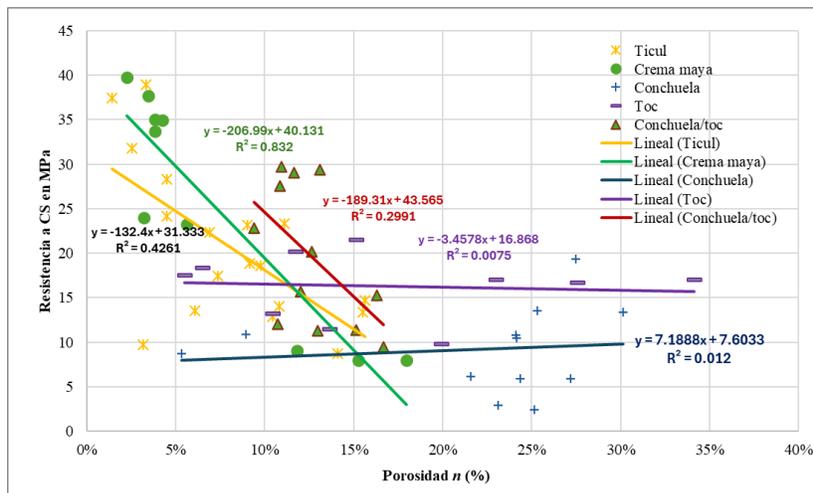


Figura 9. Correlación entre la porosidad y la resistencia

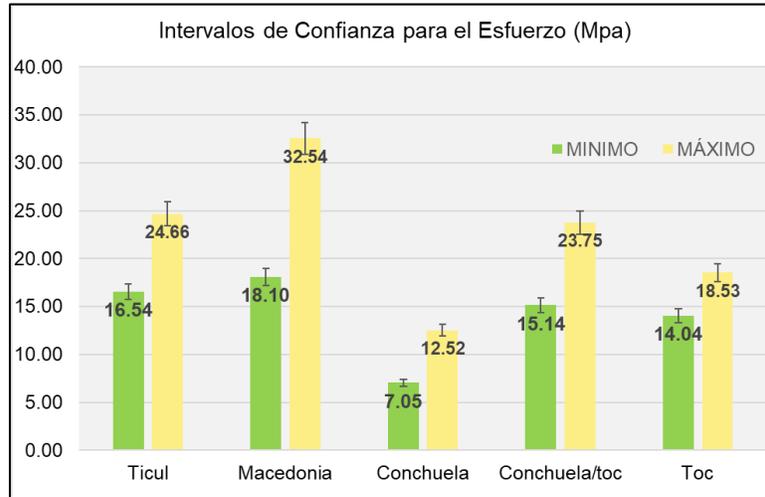


Figura 10. Intervalos de confianza para los diferentes tipos de roca.

Discusión

Para parámetros físicos como la porosidad, la densidad, absorción, relación de vacíos y gravedad específica se encontraron valores comparables a los presentados por Alonzo y Espinosa (2003) en la tabla 6, lo que valida parcialmente la caracterización realizada en esta investigación. Este estudio no realiza una

identificación específica de los diferentes tipos de roca; sin embargo, se observan valores máximos de absorción superiores a los obtenidos en el presente trabajo. Esto sugiere que es probable que el tipo de roca que presentó dicho valor correspondiera a una conchuela, ya que este tipo de roca mostró los valores de absorción más elevados.

Tabla 6. Resultados del estudio realizado por Alonzo y Espinosa (2003)

Indicadores	Abs (%)	γ_a (g/cm ³)	Ss	σ MPa
n	122	122	122	122
Media	7.1125	2.1102	2.1707	27.720
Mínimo	0.98	1.15	1.24	1.775
Máximo	28.93	2.6	2.56	64.725

Nota: Abs= absorción, γ_a =peso específico seco, Ss= gravedad específica, σ = esfuerzo último (resistencia).

En relación con la propiedad mecánica (resistencia compresión simple) realizada en este trabajo, se compararon los resultados de investigaciones similares. Estrada et al. (2008) reportaron datos de resistencia para diversas rocas como se muestra en la tabla 7, a las cuales denominaron *laja roja* (correspondiente a la

ticul), *laja crema* (equivalente a la macedonia) y *coquina*, esta última con características similares a la roca identificada como conchuela en el presente estudio, aunque con diferencias significativas de oquedades a simple vista, lo que resulta la razón de la diferencia entre los

valores obtenidos en este trabajo y los de Estrada et al (2008).

Tabla 7. Resultados del estudio realizado por Estrada (2008)

Tipo de roca	γ_d (g/cm ³)	σ MPa
Coquina suave	1.60	1.05
Laja crema	2.60	22.23
Laja roja	2.50	18.50

Nota: Abs= absorción, γ_d =peso específico seco, σ = esfuerzo último (resistencia).

Por otra parte, para la resistencia a la compresión de la roca *laja crema* (macedonia) que obtuvieron fue de 22.23 MPa, lo cual se encuentra dentro del intervalo de confianza reportado en este estudio (18.1-32.54 MPa) para el mismo tipo de roca. Para la roca tipo *laja roja* (ticul), obtuvieron un valor de 18.50 MPa, dentro del intervalo reportado en este estudio (16.54-24.66 MPa) para el mismo tipo de roca. Esta similitud muestra que los datos obtenidos en ambos estudios son comparables, por lo tanto, esto sugiere que los intervalos analizados son aceptables al menos con este estudio comparado. Para el estudio de Alonzo y Espinosa (2003) se observa valores incluso menores y mayores que en este trabajo (mínimo y máximo), lo que indica una gran variabilidad que va desde 1.7 hasta 64.7 MPa de resistencia (esfuerzo último). Lo anterior, revela que el valor menor podría deberse a alguna variación tipo coquina como el reportado por Estrada (2008).

En las correlaciones presentadas en este estudio, se observa que, para la roca tipo ticul se obtuvo valores entre 0.34 y 0.42 de coeficiente de determinación (R^2) para todos los parámetros estudiados, por lo tanto, se necesitaría más datos para determinar si es posible hallar alguna relación directa. En cuanto a la roca tipo crema maya se observan valores de 0.81 a 0.83 para los parámetros de γ_{sat} , γ_d , S_s , e y n , esto indica que la resistencia (σ) presenta una

dependencia a estos, mientras que para la absorción (0.3155), se necesitaría más datos para encontrar una correlación directa. Para la roca conchuela, se obtuvo valores 0.43 en promedio para γ_d y S_s en los coeficientes de determinación, consecuentemente, se requieren más datos para determinar alguna correlación, para los otros parámetros indican que no existe una correlación dependiente, aunque esto se tendrá que justificar con más datos. Los coeficientes de determinación para la roca tipo toc, nos indican una buena dependencia para (γ_d) con 0.95 mientras que para los otros parámetros no existe tal dependencia a la resistencia, aunque es posible que la baja cantidad de muestras haya influido. Para la última que es una combinación conchuela/toc, con valores de 0.11 a 0.34, nos sugiere una baja correlación.

En este estudio no se incluyó los orígenes geológicos exactos de las muestras estudiadas, se limitó a realizar un análisis estadístico de muestras en talleres artesanales de rocas, por lo que no se debe generalizar para todas las regiones de la península, además el número de muestras para cada tipo de roca son limitadas.

Conclusiones

Estos resultados indican que la absorción, porosidad y relación de vacíos son de utilidad para un acercamiento a la resistencia a

compresión simple, ya que mientras mayor sean estos valores se espera tener bajas resistencias y viceversa, ya que es un indicio de oquedades o porosidades importantes en la matriz rocosa. Por otro lado, la densidad saturada y seca, así como la gravedad específica nos indican que mientras mayor sean estos valores mejores propiedades mecánicas presenta la roca. La roca crema maya presenta mejores condiciones para aplicación ingenieril donde los proyectos requieren alta resistencia y baja permeabilidad, por lo que se recomienda su uso como, además es un excelente terreno de cimentación. La conchuela, por otro lado, suele presentar problemas para su uso en la construcción, debido a su baja resistencia y alta porosidad, no se recomienda su uso como agregado pétreo y como terreno de cimentación es preciso aplicar algún tipo de mejora para ayudarle a aumentar su resistencia. Sin embargo, podría ser de utilidad en proyectos de infraestructura donde la porosidad sea un factor relevante. Para la roca ticul y toc, si es posible usarlo como agregado pétreo ya que mostraron resultados favorables, aunque se deberá tener precaución con la absorción pues algunas de ellas tenían absorciones altas.

En este trabajo se ha demostrado una relación inversa entre la porosidad y la resistencia a la

compresión de las calizas analizadas en el suelo yucateco. La presencia de poros actúa como planos de debilidad, reduciendo significativamente la capacidad de carga de las rocas. La alta porosidad de las calizas, especialmente las de tipo conchuela, que se traduce en una mayor permeabilidad, debe ser considerada en el diseño de sistemas de drenaje y en la evaluación del potencial de asentamiento de las estructuras, especialmente en zonas con problemas de subsidencia (colapso de cavidades subterráneas) como los que pueden presentarse en áreas kársticas.

Para futuras investigaciones es importante realizar más estudios pertinentes de características mecánicas como módulo de elasticidad, esfuerzo cortante entre otros, para obtener con mejores datos el comportamiento de cada tipo de roca, ampliar el muestreo, investigar la influencia de la anisotropía entre otras características que conduzcan a un mejor conocimiento del subsuelo en la península de Yucatán. En conclusión, este estudio representa un importante avance en la comprensión de las propiedades geomecánicas de las calizas en el suelo yucateco para la toma de decisiones en proyectos de ingeniería civil, geotecnia e hidrogeología.

Referencias

- Alonzo Salomón, L. A., & Espinosa Graham, L. (2003). Estudio de las propiedades de la roca caliza de Yucatán. *Ingeniería Revista Académica*, 7(1), 27-36.
- Alonzo Salomón, L. A., Espinosa_Graham, L., & Vinajera Reyna, C. E. (2010). *Características geotécnicas de los suelos y rocas de los estados de Yucatán y Campeche*. Universidad Autónoma de Yucatán.
- Bautista, F., Frausto, O., Ihl, T., & Aguilar, Y. (2015). Actualización del mapa de suelos del Estado de Yucatán México: Enfoque geomorfopedológico y WRB. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 2(6), 303–315.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282015000300006
- Brady, B.H.G. & Brown, E.T (2004). *Rock Mechanics for underground mining: (3rd ed.)*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2116-9>

- Estrada Medina, H., Jiménez Osornio, J. J., Álvarez Rivera, O, Barrientos Medina, R. C. (2019). El karst de Yucatán: su origen, morfología y biología. *Acta Universitaria*, 29, 1-18. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2292>
- Estrada Medina, H., Valdez, S., Zanatta A., Casolco, S. R. (2008). Análisis de comprensión en rocas calizas de Yucatán. *Memorias del 14 Congreso Internacional Anual de la SOMIM* (pp.602-608). Obtenido de https://somim.org.mx/memorias/memorias2008/articulos/A3/A3_257.pdf
- Galván, M., Preciado Romero, J. & Serón, J. (2014). Correlación entre la resistencia a compresión simple y el índice de carga puntual I_s (50) en Calizas de la Comunidad Valenciana (España). *Acta Geotechnica Slovenica*, 11, 34–45.
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). Rock slope engineering (3rd ed.). London: *Institution of Mining and Metallurgy*.
- International Society for Rock Mechanics (1979), Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16(3), 141-156 [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(79\)91452-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(79)91452-9)
- Jones, W. K., & White, W. B. (2019). Karst Hydrogeology and Geomorphology. In N. Goldscheider & D. Drew (Eds.), *Methods in Karst Hydrogeology* (pp. 1-12). CRC Press.
- Lin, W.R., Tadai, O., Takahashi, M., Sato, D., Hirose, T., Tanikawa, W., Hamada, Y. & Hatakeda, K. (2015). An Experimental Study on Measurement Methods of Bulk Density and Porosity of Rock Samples. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 03(5), 72–79. <https://doi.org/10.4236/gep.2015.35009>
- Monroy Ríos, E. (2023). Mecanismos de formación del karst en Yucatán. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.*, 267, 28 -33. www.smig.org.mx.
- Ruiz Torre, J. (2023, 09 de noviembre). ¿Mérida se va a duplicar? *El Financiero*. Recuperado de <https://www.elfinanciero.com.mx/opinion/jonathan-ruiz/2023/11/09/merida-se-va-a-duplicar/>
- White, W. B., Culver, D. C., & Pipan, T. (Eds.). (2019). *Encyclopedia of Caves (3a ed.)*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01162-X>