

Estudio de las propiedades de la roca caliza de Yucatán

I.C. Lauro A. Alonzo Salomón; I.C. Leopoldo Espinosa Graham

RESUMEN

El presente artículo muestra las propiedades de la roca caliza así como las relaciones de correlación entre los valores de la resistencia de una roca y sus respectivas pruebas índice de clasificación, valores de esfuerzo, deformación y módulo de elasticidad, que a través de diversos trabajos como los proyectos de investigación denominados “*Determinación de valores de resistencia de una roca a partir del conocimiento de valores de su características índice*” (Alonzo L.), financiado por parte de la D.G.I.C.S.A. (clave 911301) y los trabajos “*Correlaciones entre las propiedades de la roca caliza de Yucatán y la velocidad de pulso ultrasónico*” (Sulub A.), “*Módulo de elasticidad de rocas calizas superficiales del estado de Yucatán*” (Carrillo D.), y “*Análisis de resultados en pruebas de roca caliza*” (Dzul F), que se han desarrollado en el Laboratorio de Geotecnia y Vías Terrestres, “*Ing. Luis R Roche Ontiveros*”, en los últimos años sirven de base para la elaboración del presente artículo.

Palabras claves: Propiedades en roca caliza, Resistencia en roca caliza, Correlaciones en roca caliza, Esfuerzo - Deformación en roca caliza, pruebas índice en roca caliza

INTRODUCCIÓN

Sin duda en el estado de Yucatán uno de los materiales más usados en la industria de la construcción es la piedra caliza. Dada la gran cantidad de este tipo de roca que se encuentran en la región y la importancia que tienen para las obras de infraestructura para la elaboración de materiales para la construcción y una amplia gama de aplicaciones que tiene en la ingeniería y el arte, siempre se ha considerado de importancia el conocimiento de las propiedades mecánicas e índices de éstas. Dichas propiedades se obtienen en los diversos laboratorios existentes, pero resultan costosas y lentas, y si tomamos en cuenta que las obras demandan resultados rápidos, surge la necesidad de contar con información de resultados y relaciones de las características de resistencia y deformabilidad respecto a sus propiedades índices y mecánicas, que nos ayuden a tomar una decisión.

“Las características distintivas de las rocas, dependen más bien de las relaciones entre los agregados sedimentarios, que de las relaciones de grano a grano que determinan y regulan las peculiaridades de la textura; estos caracteres se estudian mejor en el campo que en los ejemplares de mano”. (Alonzo L., 1987)

La formación de las rocas sedimentarias en capas o bandas más o menos paralelas, con ciertas dimensiones de espesor, no es un hecho casual, sino que corresponde al propio concepto de formación de la roca sedimentaria.

“No debe creerse sin embargo, que los estratos son o deben ser capas o bandas rigurosamente paralelas, con espesores constantes a lo largo de su extensión; en la mayoría de las veces, los límites inferior y superior de los mismos son superficies irregulares, sin llegar a ser superficies planas, sino alabeadas, lo que se traduce en variaciones notables de espesor”. (Alonzo L., 1987)

Limitante

La mayor limitante que se ha encontrado durante los trabajos de los diferentes proyectos de investigación a la roca caliza, es la de no poder realizar un estudio detallado de la península de Yucatán, puesto que las limitaciones económicas y del recurso humano no nos lo ha permitido, por lo que las pruebas se desarrollaron en muestras obtenidas de bancos de las cercanías de la ciudad de Mérida.

Dado que las pruebas mecánicas para la determinación del comportamiento de las rocas calizas son lentas y costosas, es conveniente utilizar pruebas índice que permitan la clasificación ingenieril de las rocas involucradas en un problema dado, las que así podrán ser agrupadas y posteriormente caracterizadas mediante la asignación de los parámetros de comportamiento mecánico obtenido del ensayo de especímenes representativos de cada muestra.

Considerando que existe una alta correspondencia entre los distintos resultados de las pruebas de clasificación o índice y su respuesta a solicitaciones esfuerzo deformación (resistencia a la compresión simple y valores de deformabilidad), es posible determinar de manera aproximada con un alto índice de correlación las respuestas de una roca cuando se le solicita en pruebas mecánicas.

METODOLOGÍA

1. Delimitar el campo para la obtención de las muestras de roca, fue siempre la primera etapa, se trabajó únicamente con muestras de lugares cercanos a la ciudad de Mérida, como los bancos de materiales denominados *Teya* (carretera Mérida – Valladolid), *Sacchich* (carretera Ticopó – Acanceh), *Canicab* (carreteras Ticopó – Acanceh), se tomaron también muestras de roca en la orilla de la carretera Mérida – Motul (libramiento de Cholul). En una segunda etapa del proyecto se obtuvieron muestras de roca caliza de diversos lugares de la Península tanto de Campeche como del estado de Quintana Roo, sin embargo en el presente artículo solo se reportaran los resultados de la primera etapa.

Para definir el tamaño de la muestra se consideró que ésta no debería ser menor de treinta y que con base en las ecuaciones de la distribución normal se tendría una idea del tamaño de la misma.

$$P \left[\left| \frac{k}{n} - p \right| \leq \varepsilon \right] = 2 \phi \left(\varepsilon \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{pq}} \right)$$

- p = Probabilidad de éxito
- q = Probabilidad de fracaso
- n = numero de intentos
- k = numero de éxitos
- ε = error

la ecuación anterior nos da una idea del tamaño de la muestra que el proyecto utilizó, considerando que el personal del laboratorio realiza los muestreos en roca en un 90% de las veces adecuadamente y esperando con un 95% de confianza un error no mayor de 10% la cantidad esperada de muestras para esta etapa fue $n \geq 60$, en el proyecto se trabajo con 122 muestras de roca caliza, buscando en todo momento contar con todas las clases y tipos de rocas.

2. Identificar las muestras obtenidas del campo con el objeto de sistematizar y llevar un control más riguroso y dar orden a los especímenes obtenidos por medio del labrado de los mismos utilizando un extractor de muestras con una broca de 2.50 pulgadas de diámetro, fue la segunda acción importante que se realizó. La identificación de los especímenes se realizó utilizando un sistema de notación de tres números en los cuales, el primer número identifica el número de la muestra obtenida del banco de materiales, en este proyecto se trajeron nueve muestras de diferentes lugares; el segundo número identifica al número de extracciones o corazones obtenidos por muestra, y el tercer número identifica el número de especímenes obtenidos por extracción.

En todo momento se buscó durante el proceso de extraer los corazones de las rocas que la relación peralte diámetro de todos los especímenes se encuentre en el rango siguiente: $1 \leq \frac{L}{D} \leq 2.5$, así

también se cuidó mucho emparejar las caras o bases de los mismos utilizando una cortadora con disco de diamante.

Finalmente en esta etapa del proyecto la obtención de los especímenes se realizó en el sentido normal a los estratos existentes en las muestras.

Realizar las pruebas índice y mecánicas a las rocas fue una de las tareas más importantes del presente proyecto, después de analizar la conveniencia de las diferentes pruebas se decidió realizar las siguientes pruebas:

Pruebas Índice

Porcentaje de absorción (%) ASTM – C97-83
 Peso volumétrico seco (g/cm^3) ASTM – C97-83
 Densidad relativa aparente (Ss) ASTM – C97-83

Pruebas mecánicas

- Resistencia a la compresión uniaxial no confinada (Kg/cm^2) ASTM – D2938-86
- Pruebas de esfuerzo – deformación (para algunas muestras) ASTM – D3148-86

Las siguientes fotografías muestran algunos de los equipos que se utilizaron para realizar las pruebas así como algunos especímenes obtenidos en el laboratorio de Geotecnia y Vías Terrestres de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.



Figura 1. Cortadora



Figura 2. Extractora



Figura 3. Especímenes de roca caliza



Figura 4. Máquina Universal



Figura 5. Especímenes de roca caliza



Figura 6. Broca extractora

RESULTADOS

Adicionalmente a las pruebas de laboratorio efectuadas, se realizaron correlaciones a los resultados obtenidos por el método de mínimos cuadrados, así como también, ensayos de esfuerzo deformación, a tres muestras de roca caliza.

En la Tabla 1 se muestran los resultados de las pruebas realizadas a la roca caliza, en ella se pueden apreciar los resultados estadísticos que arrojaron tanto el peso volumétrico, la resistencia, la densidad y la absorción.

Tabla 1. Estadísticas de la roca caliza de Yucatán

	Peso Volumétrico (g/cm³)	Resistencia (Kg/cm²)	Densidad (Ss)	Absorción (%)
n	122	122	122	122
Media	2.1102	282.6708	2.1707	7.1125
Error Standard. de la media	3.413E-02	14.5903	3.191E-02	.6361
Mediana	2.2900	296.2450	2.3400	3.5800
Moda	2.44	295.47	2.46	2.40
Desviación Standard	.3769	161.1550	.3525	7.0257
Varianza	.1421	25970.9318	.1242	49.3609
Rango	1.45	641.91	1.32	27.95
Mínimo	1.15	18.10	1.24	.98
Máximo	2.60	660.01	2.56	28.93

Para complementar los resultados de las pruebas realizadas y poder dar conclusiones en cuanto a los valores obtenidos se realizaron los histogramas

de cada una de las pruebas realizadas, así como sus diagramas de caja (Figura 7).

Roca caliza de Yucatán

Histograma peso volumetrico (g/cm³)

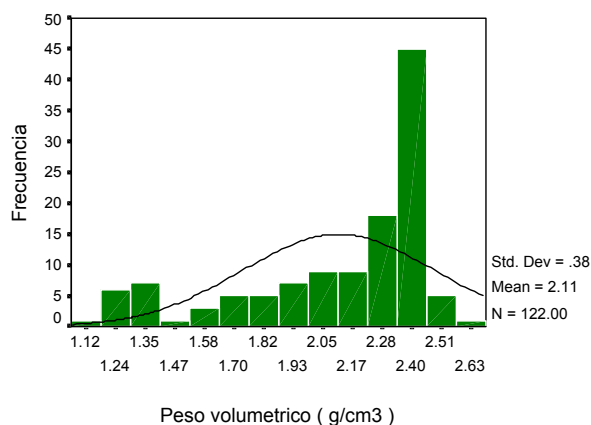
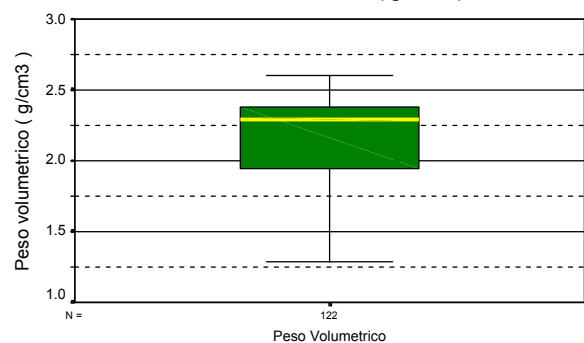


Diagrama de Caja

Roca caliza de Yucatán

Peso volumetrico (g/cm³)



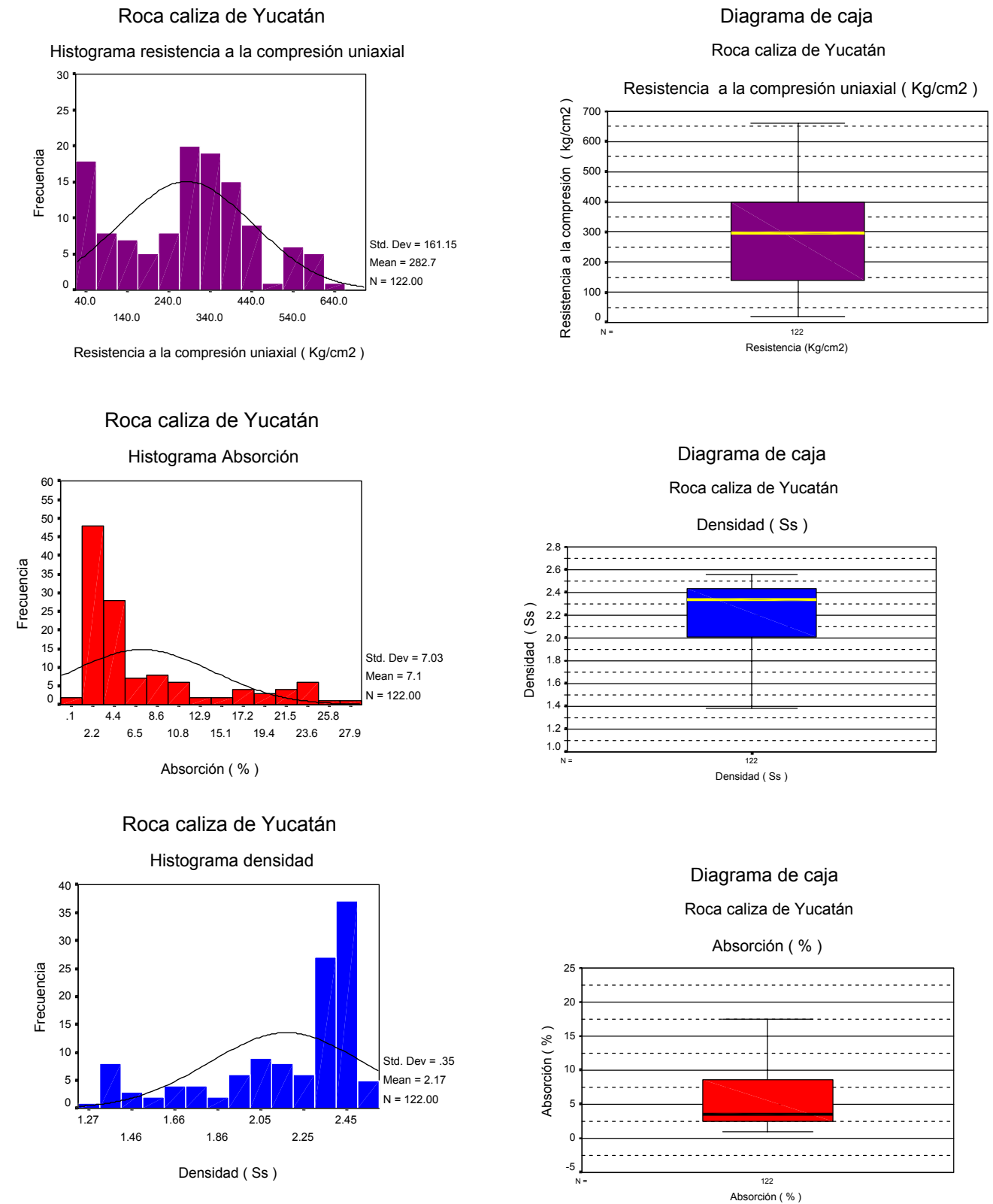


Figura 7. Histogramas y diagramas de caja de las pruebas realizadas

CONCLUSIONES

1.- Con base en los resultados ilustrados en el punto anterior se pueden inferir las siguientes conclusiones:

- Para el caso de la prueba peso volumétrico se puede apreciar que el 50% de los valores se encuentran entre 1.90 y 2.40 (g/cm³)
- Para el caso del valor de la resistencia a la compresión uniaxial se puede apreciar que el 50% de los valores se encuentran entre 140 y 400 (kg/cm²)

- Para el caso de los valores de la prueba densidad se puede apreciar que el 50% de los valores se encuentran entre 2.05 y 2.45

- Para el caso de la prueba absorción se puede apreciar que el 50% de los valores se encuentran entre 2.20 y 8.60 (%)

2.- De los resultados obtenidos de la roca caliza, se puede obtener los diferentes coeficientes de variación para las diferentes pruebas realizadas; ésto nos da una idea de la dispersión de los resultados en roca caliza, la Tabla 2 muestra los valores del coeficiente de variación.

Tabla 2. Valores del coeficiente de variación

	Peso Volumétrico (g/cm³)	Resistencia (Kg/cm²)	Densidad (Ss)	Absorción (%)
Desviación Estandar.	.3769	161.1550	.3525	7.0257
Media	2.1102	282.6708	2.1707	7.1125
Coeficiente de variación	17.86 %	57.01 %	16.24 %	323.66 %

En la Tabla 2 se puede apreciar que los valores de la prueba absorción muestran una considerable dispersión, en contraste con los valores de las pruebas peso volumétrico y densidad. La prueba resistencia a la compresión uniaxial nos muestra una dispersión del 57.01 % indicándonos que sus valores tienden a no ser muy dispersos tomando como referencia el valor medio de 282.67 (kg/cm²)

3.- Para el caso de la prueba de resistencia a la compresión uniaxial ésta mostró un rango de valores de 641.91 Kg/cm² esto debido a la diferencia entre el

valor máximo obtenido de 660.01 Kg/cm² y el valor mínimo de 18.10 kg/cm², lo anterior nos muestra la gran relación de valores de resistencia a la compresión uniaxial, sin embargo el diagrama de caja nos mostró que la mayoría de valores se encuentran entre 150 Kg/cm² y 400 Kg/cm² con una mediana de 296.24 Kg/cm².

4.- Si realizamos una correlación entre los distintos valores obtenidos para la roca caliza en las pruebas realizadas obtenemos las siguientes curvas de correlación:

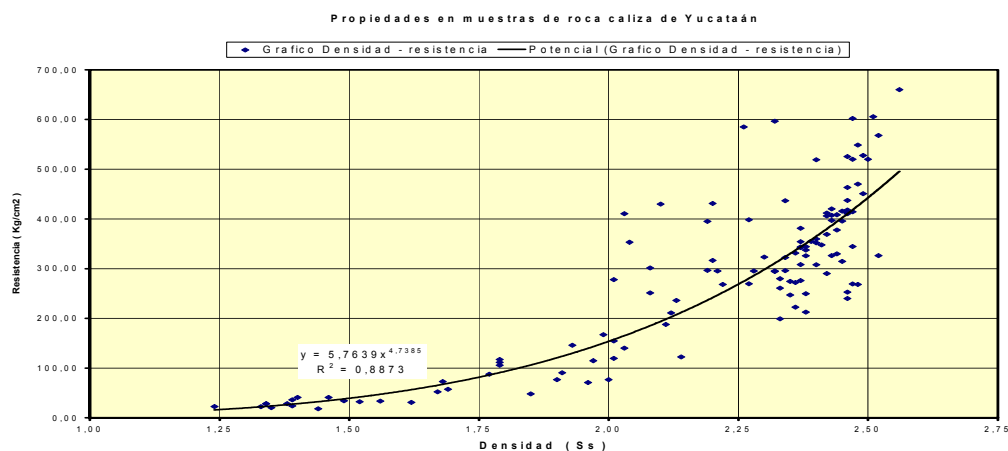


Figura 8. Correlación Densidad - Resistencia

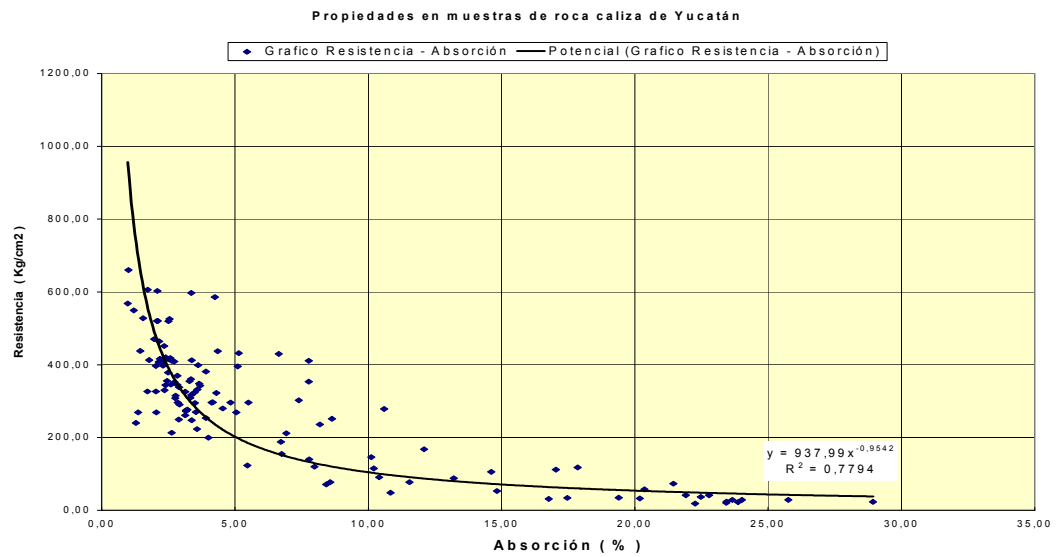


Figura 9. Correlación Resistencia - Absorción

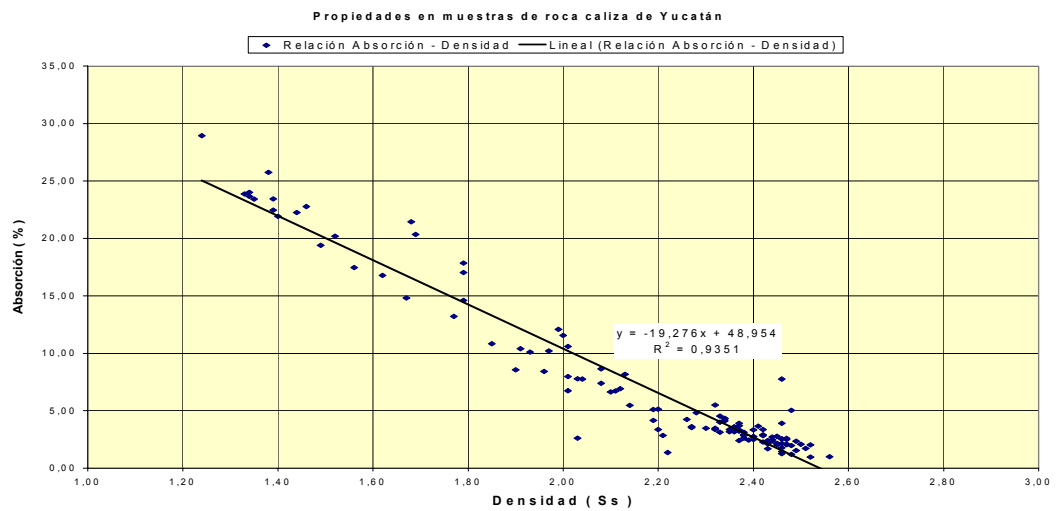


Figura 10. Correlación Absorción - Densidad

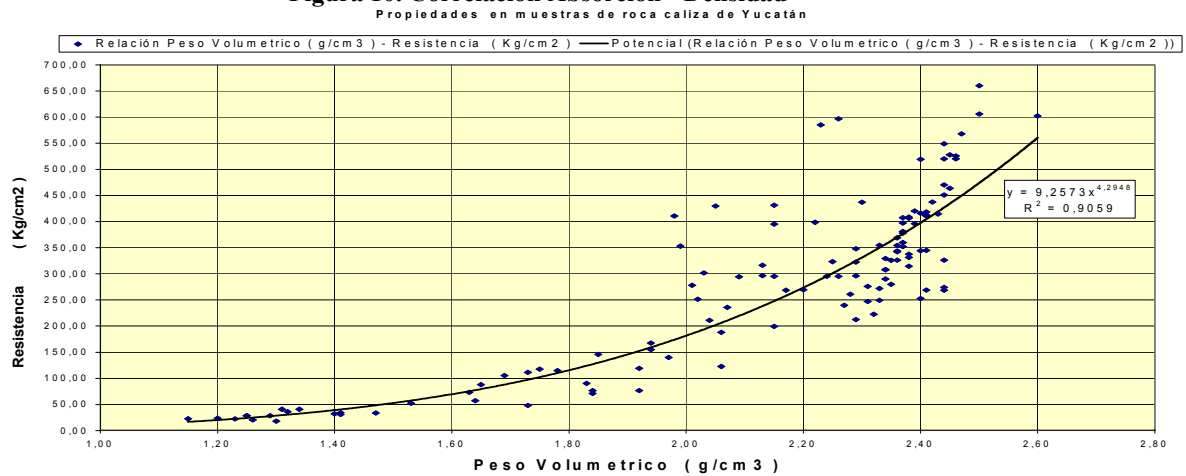


Figura 11. Correlación Peso Volumétrico - Resistencia

De las gráficas mostradas en las Figuras 8 al 11, se pueden obtener aproximaciones a los valores que una roca caliza puede tener con el solo hecho de tener un dato, sobre todo cuando se trata de pruebas con algún costo como la resistencia a la compresión uniaxial, o también se puede usar la ecuación señalada, por ejemplo en el gráfico de resistencia – peso volumétrico, la cual es: $y = 9.2573 \cdot x^{4.2573}$ donde : y es igual a la resistencia a la compresión uniaxial en Kg/cm² y x es igual al peso volumétrico en g/cm³.

cuales nos dan una idea sobre su deformabilidad, aunque este es un aspecto poco estudiado de las piedras, conocer la forma y sus comportamientos gráficos cuando se realizan este tipo de pruebas es información que se debe conocer. A continuación se presentan el gráfico 12 y el gráfico 13 los cuales son el resultado de una serie de pruebas de este tipo, en roca caliza. En el gráfico 12 se da la correlación de una muestra de roca caliza y en el gráfico 13 se da la correlación de tres muestras de roca caliza de diferente resistencia a la compresión uniaxial.

5.- Otro aspecto importante a considerar de la roca caliza son sus relaciones esfuerzo - deformación, las

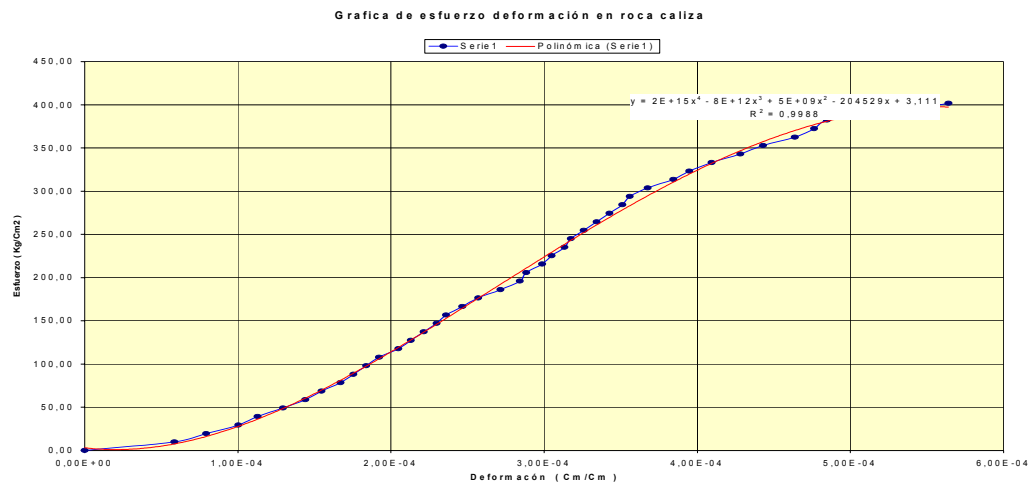


Figura 12. Correlación Esfuerzo – Deformación unitaria.

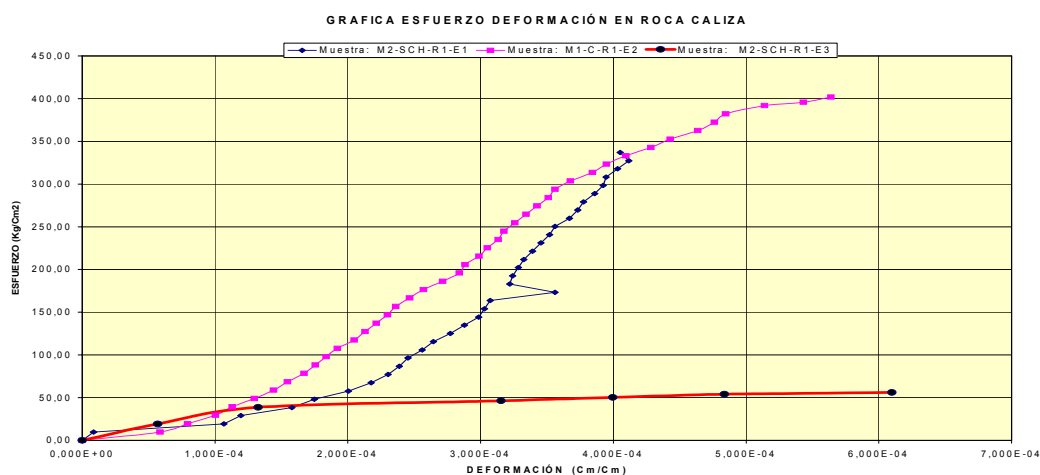


Figura 13. Esfuerzo – Deformación unitaria de tres muestras de roca caliza

En la Figura 12 se puede observar la tendencia de las rocas estudiadas en una prueba de esfuerzo, el gráfico resultante de la prueba nos da un comportamiento para la roca estudiada del tipo plastoelastoplastico, el cual es una de las curvas típicas del comportamiento de los materiales en pruebas de esfuerzo – deformación.

En la Figura 13 se puede apreciar los comportamientos de tres rocas calizas de diferente

resistencia a la compresión las cuales presentan el mismo comportamiento antes mencionado para la Figura 12.

Para el caso de los módulos de elasticidad los valores obtenidos por el método del módulo tangente en los tramos rectos máximos de cada curva de esfuerzo – deformación fueron los siguientes:

Tabla 3. Módulo de elasticidad de rocas calizas del Estado de Yucatán (D. Carrillo q991)

<i>Número</i>	<i>Espécimen</i>	<i>Módulo de Elasticidad* (Kg/cm²)</i>
1	M2-SCH-R1-E1	1 365 879.100
2	M1-C-R1-E2	1 041 666.670
3	M2-SCH-R1-E3	44 021.646

En relación a los módulos se puede observar que el espécimen marcado con el número 3 da el módulo más bajo y es también la muestra que dio el valor mas bajo de resistencia a la compresión simple uniaxial.

La investigación en rocas calizas de Yucatán es por su naturaleza muy interesante y

consideramos que debe estar siempre en constante estudio, esperamos al presentar este artículo de investigación contribuir al conocimiento de los materiales de la región sobretodo de un elemento tan usado como lo es la piedra caliza la cual tiene en la actualidad una diversidad de usos.

REFERENCIAS

Alonzo L.,(1987), “*Análisis estadístico de las propiedades del Sahcab para su uso en Pavimentos*”, Tesis, Facultad de ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua, México.

Carrillo D., (1991). “*Modulo de elasticidad de rocas calizas superficiales del estado de Yucatán*”, Monografía, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Dzul F., (1988). “*Análisis de resultados en pruebas de roca caliza*”, Monografía, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Ferrán M., (2001). “*SPSS para Windows, Análisis estadístico*”, Edit. Osborne, McGraw- Hill, España.

Laboratorio de Geotecnia y Vías Terrestres, “*Ing. Luis R Roche Ontiveros*”, (1987). “*Archivos Histórico*”, (2001), Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán.

Laboratorio de Geotecnia y Vías Terrestres, “*Ing. Luis R Roche Ontiveros*”, (1993), “*Determinación de valores de resistencia mecánica de una roca a partir del conocimiento de valores de sus características índice*”, Proyecto de investigación Aprobado DGICSA: 91-01-700. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Laboratorio de Geotecnia y Vías Terrestres, “*Ing. Luis R Roche Ontiveros*”, (1987), “*Estudio de las Características de Esfuerzo y Deformación en el material calizo conocido regionalmente como Sahcab*”, Proyecto

de investigación Aprobado DGICSA: C-87-01-0099, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Moreno J., (1973). “*Elementos de Probabilidad y Estadística*”, Representaciones y Servicios de Ingeniería, S. A., México.

Rico A., Del Castillo H., (1978) “*La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres*”, Edit. Limusa, México.

Rivero E., (1996). “*Relación entre las velocidades de pulso ultrasónico de especímenes de roca y de concreto*”, Monografía, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Schwar H., (1975). “*Métodos Estadísticos en Ingeniería de Transito*”, Edit. Representaciones y Servicios de Ingeniería, S. A., México.

Sulub A., (1990). “*Correlación entre las propiedades de la roca caliza de Yucatán y la velocidad de pulso ultrasónico*”, Monografía, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Zaldivar F., (1995). “*Resistencia a la compresión uniaxial no confinada a especímenes de roca de la ciudad de Mérida*”, Monografía, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.