

CAPÍTULO IV. “PRUEBAS DE LABORATORIO AL SUBSUELO CALIZO”

Después de conocer las propiedades del subsuelo de la Península de Yucatán, Historia Geológica, Zonificación, Propiedades Físicas y Químicas etc. En el presente capítulo se mostrarán pruebas de laboratorio realizadas al subsuelo, cuyos resultados tendrán fines prácticos para la Ingeniería en Cimentaciones; cada prueba representa diferentes condiciones del subsuelo, para conocer las variaciones mas comunes de resistencia ante esfuerzos mecánicos de las rocas calizas de la región.

IV. a ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE LA ROCA CALIZA DE YUCATÁN

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

El siguiente artículo muestra las propiedades de la roca caliza así como la 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 sus características índice*” (Alonzo L.), los trabajos “*Correlaciones entre las propiedades de la roca caliza de Yucatán y la velocidad de pulso ultrasónico*” (Sulub A.), “*Modulo de elasticidad de rocas calizas superficiales del estado de Yucatán*” (Carrillo D.) y “*Análisis de resultados en pruebas de rocas calizas*” (Dzul F.), que se han desarrollado en el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Autónoma de Yucatán 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

Como se ha estudiado a lo largo de esta tesis no hay duda de que en el estado de Yucatán uno de los materiales mas usados en la industria de la construcción es la roca caliza. Dada la gran cantidad de este tipo de rocas que se encuentran en la región y la importancia que tienen para las obras de infraestructura así como para la elaboración de materiales empleados en la construcción y una amplia gama de aplicaciones que tiene en la ingeniería e incluso en el arte (creación de esculturas, lambrines tallados de piedra, etc.), se ha considerado de gran importancia el conocimiento de las propiedades mecánicas e índices de estas. Dichas propiedades se obtienen en laboratorios de mecánica de suelos, pero en muchas ocasiones resultan costosas, lentas, y si tomamos en cuenta que las obras demandan resultados rápidos, surge la necesidad de contar con información de resultados, 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 mas bien de las relaciones entre los agregados sedimentarios, que las relaciones de grano a grano que determinan y regulan las peculiaridades de la textura; estos caracteres se estudian mejor en campo que en los ejemplares de mano” (Alonzo L. 1987).

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

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 lo ha permitido, por lo que las pruebas se desarrollan 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 vistas en la materia de comportamiento de suelos, que permiten la clasificación de las rocas involucradas en un problema dado, así podrán ser agrupadas posteriormente 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 sollicitaciones 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 sollicita en pruebas mecánicas.

Metodología

1. Determinar 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 reportarán 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 a 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 de laboratorio realiza los muestreos en roca en un 90% de las veces adecuadamente y esperando con un 95% de confianza un error no mayor del 10% la cantidad esperada de estas muestras para esta etapa fue $n \geq 60$, en el proyecto se trabajó con 122 muestras de roca caliza, buscando en todo momento con todas 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 en el banco de materiales, en este proyecto se trajeron nueve muestras de diferentes lugares; el segundo número identifica a la cantidad de extracciones o corazones obtenidos por muestra, y el tercer número identifica la cantidad de especímenes obtenidos por extracción.

En todo momento se buscó durante el proceso 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 INDICE

Porcentaje de absorción (%) ASTM-C97-83

Peso volumétrico seco (g/cm^3) ASTM-C97-83

Densidad relativa aparente (S_s) ASTM-C97-83

PRUEBAS MECÁNICAS

-Resistencia a la compresión uniaxial no confinada (kg/cm^2)

-Pruebas de esfuerzo-deformación (para algunas muestras)

Las siguientes fotografías muestran algunos de los equipos que se utilizaron para realizar las muestras, así como algunos especímenes obtenidos en el laboratorio de Geotecnia y Vías Terrestres de la Universidad Autónoma de Yucatán (Fig.1)



Figura 1. Cortadora



Extractora de espásimenes

Figura 2. Extractora



Figura 3. Espécimenes de roca caliza



Figura 4. Máquina Universal



Figura 5. Espécimenes de roca caliza



Figura 6. Broca extractora

Figura 1. Equipos de laboratorio empleados para las pruebas

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.

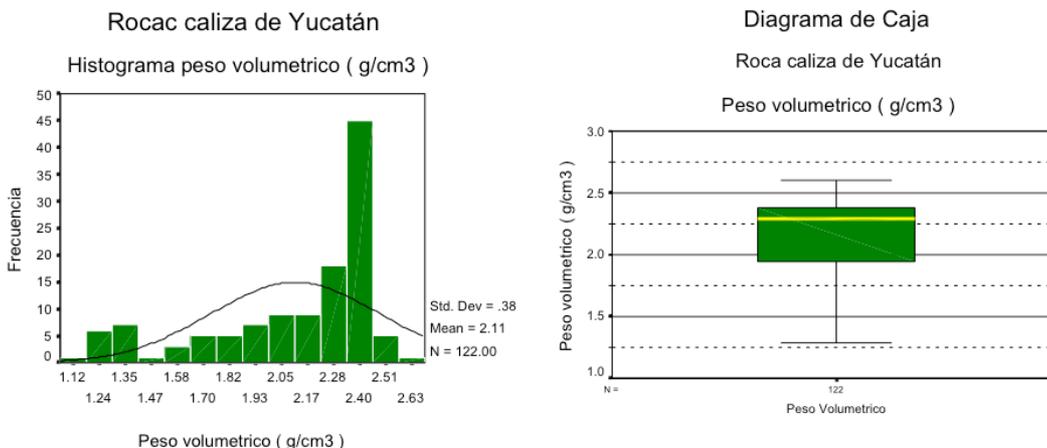
RESULTADOS

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/cm ³)	Resistencia (Kg/cm ²)	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 una de las pruebas realizadas, así como sus diagramas de caja (Figura 7).



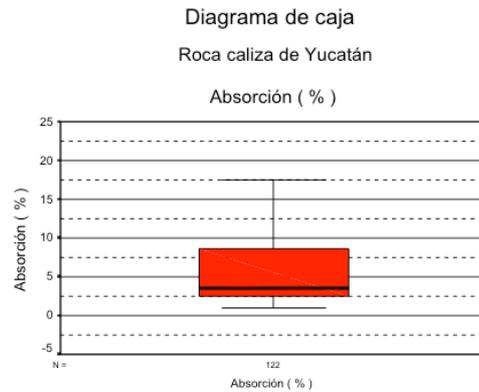
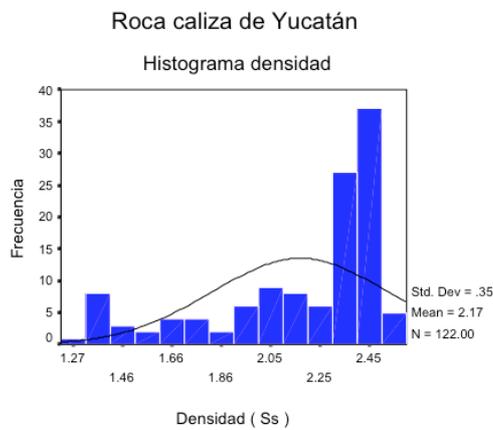
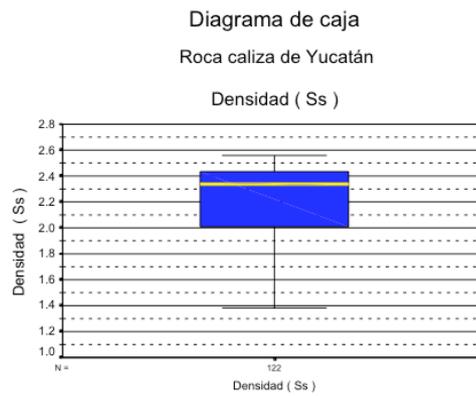
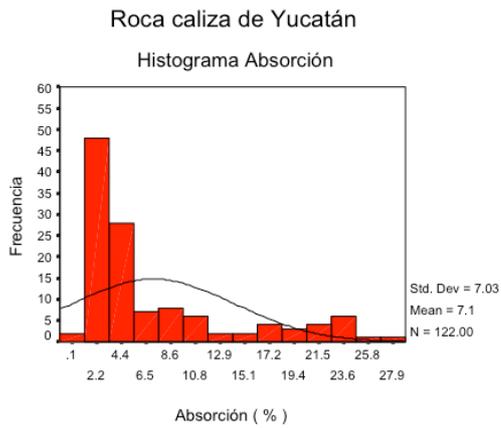
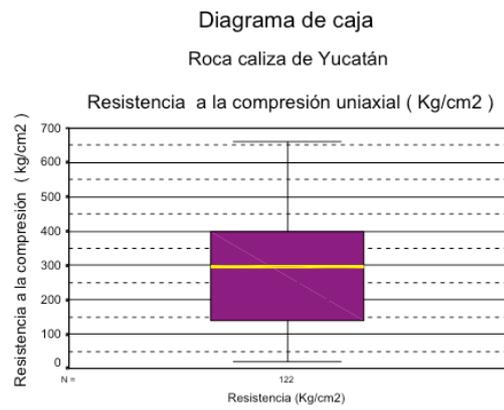
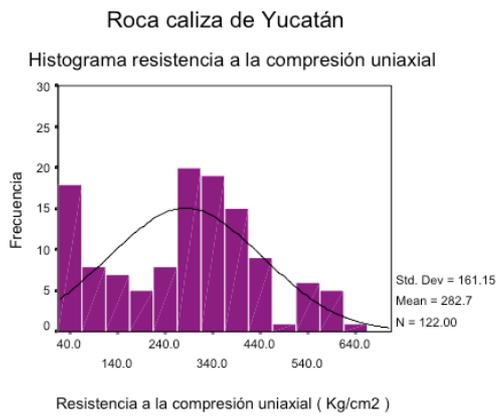


Figura 7. Histogramas y diagramas de caja de las pruebas realizadas

CONCLUSIONES

1.- Con base en los resultados obtenidos 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 de densidad se puede apreciar que el 50% de los valores se encuentran entre 2.05 y 2.45
- Para el caso de la prueba de 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 siguientes pruebas realizadas; esto nos da una idea de la dispersión de resultados en la 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
Coefficiente de variación	17.86 %	57.01 %	16.24 %	323.66 %

En la tabla superior se puede apreciar que los valores de la prueba de 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 los 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:

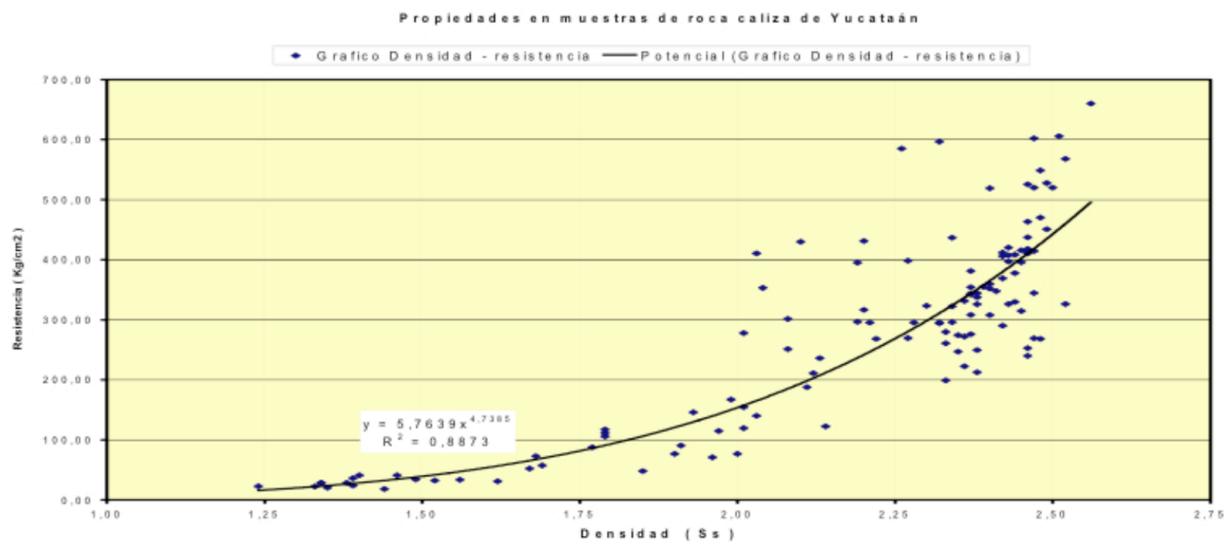


Figura 8. Correlación Densidad - Resistencia

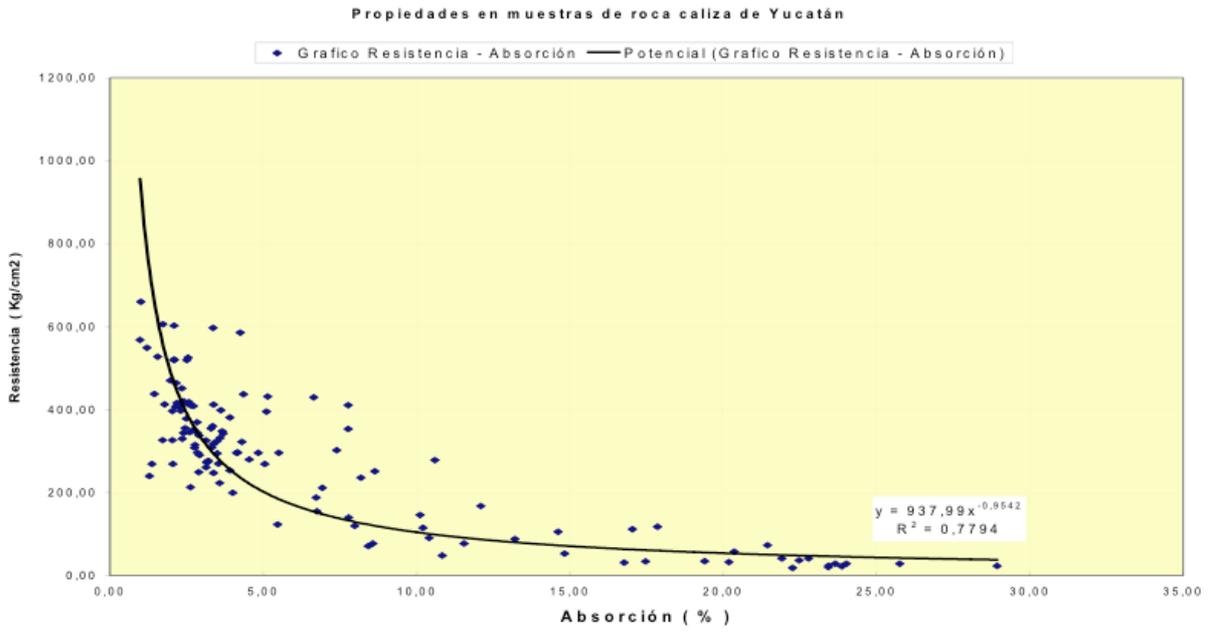


Figura 9. Correlación Resistencia - Absorción

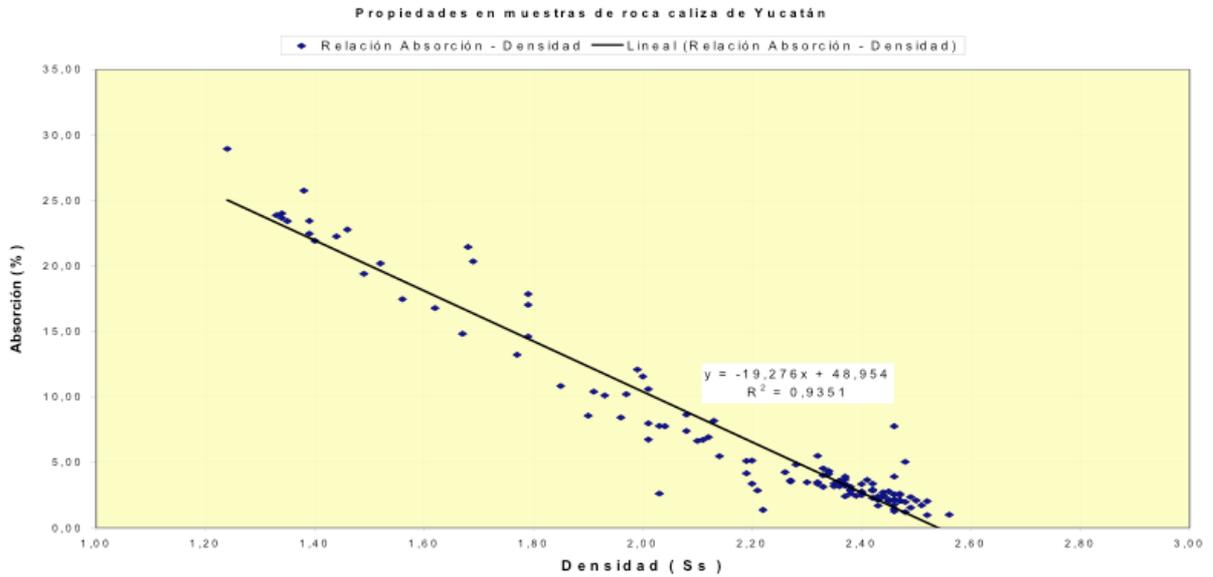


Figura 10. Correlación Absorción - Densidad

Propiedades en muestras de roca caliza de Yucatán

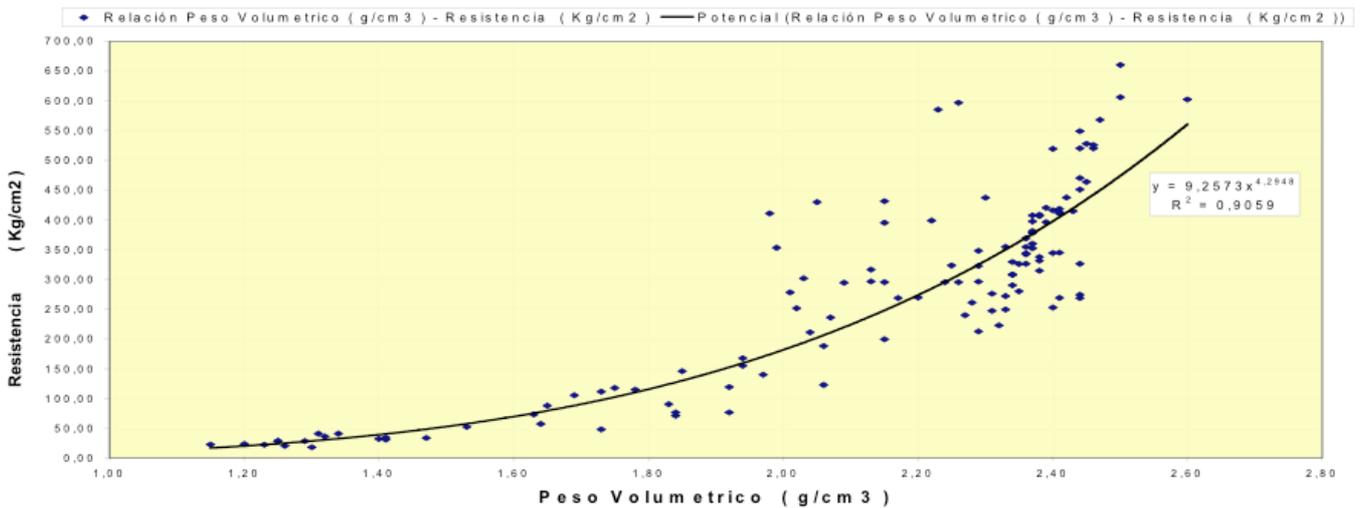


Figura 11. Correlación Peso Volumétrico - Resistencia

De las gráficas mostradas en las figuras 8 a la 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 utilizar 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.

5.- Otro aspecto importante a considerar de la roca caliza son sus relaciones esfuerzo-deformación, las cuales nos dan una idea sobre su deformabilidad, aunque este es un aspecto poco estudiado de las rocas, 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.

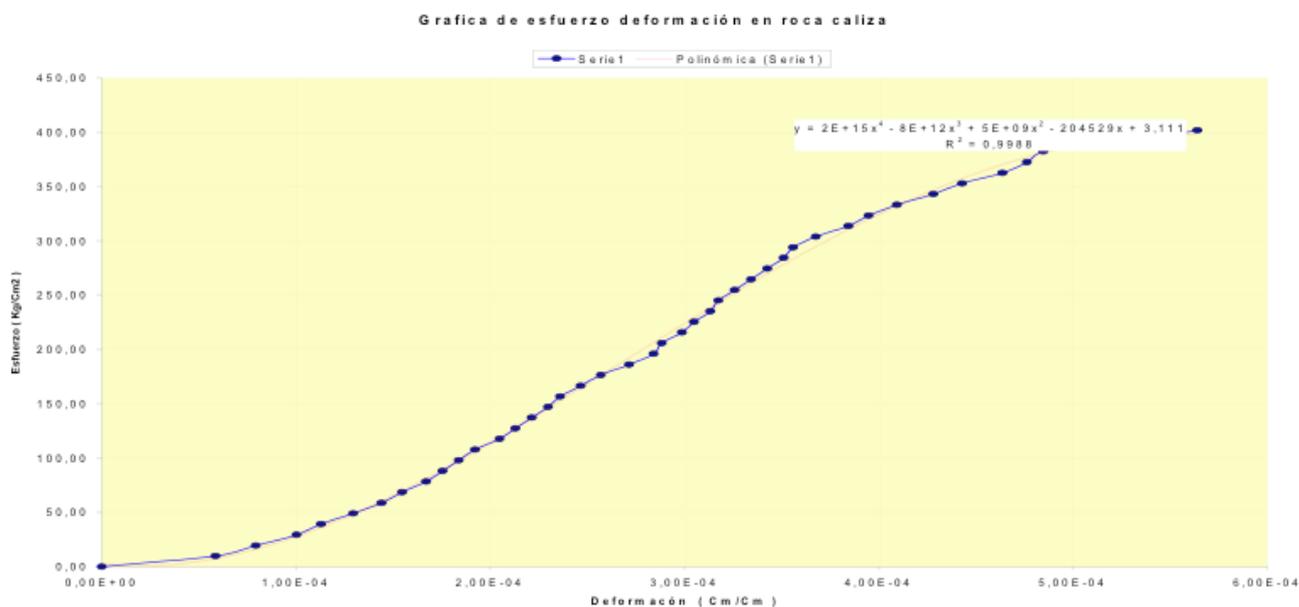
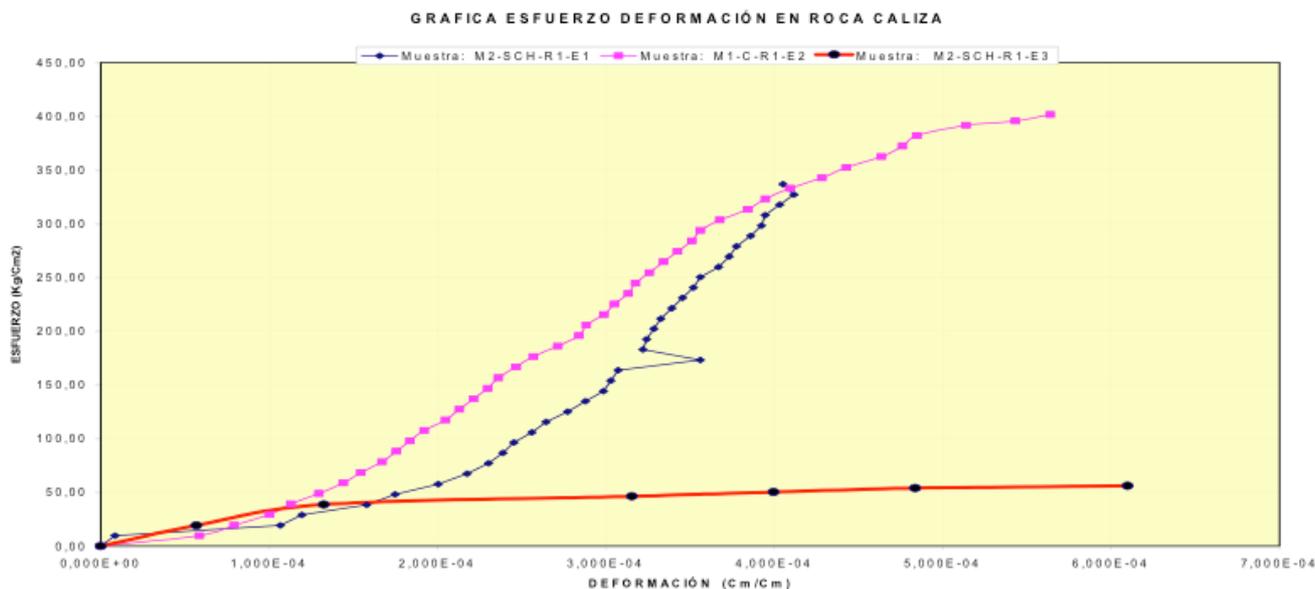


Figura 12. Correlación Esfuerzo – Deformación unitaria.



En la figura 12 se puede observar la tendencia de las rocas estudiadas en una prueba de esfuerzo, el gráfico de la prueba nos da un comportamiento para la roca estudiada del tipo elastoplástico, el cual es una de las curvas típicas del comportamiento de los materiales en pruebas 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 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 numero 3 da el módulo mas 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.

IV. b Prueba de laboratorio a la roca caliza no consolidada (Sascab)

El siguiente proyecto de investigación fue elaborado en la Universidad Autónoma de Yucatán, agradeciendo la información prestada para esta tesis.

Dicho proyecto se desarrolló adoptando la metodología que impone la descripción de las características físicas, mecánicas del material calizo que predomina en el estado de Yucatán, con miras a proponer una identificación del mismo, en el contexto de la construcción de caminos.

El procedimiento que se aplicó para obtener la información deseada fue el siguiente:

- Localización y muestreo
- Pruebas de laboratorio
- Resultados

Localización y muestreo

En lo referente a estas primeras actividades se tomó como base la distribución superficial de las unidades geológicas descritas con anterioridad, la formación Carrillo Puerto correspondiente al Plioceno – Mioceno, es la que predomina en la Península de Yucatán estando la ciudad de Mérida localizada sobre esta formación, así como el tramo Valladolid-Xcan del camino de cuota Mérida-Cancún. Se consideró que estudiando los bancos de materiales que se encuentran en la periferia de esta ciudad y algunos ubicados a lo largo del camino mencionado, se tendría una visión inicial del probable comportamiento del material calizo de Yucatán, en lo que se refiere a la formación Carrillo Puerto.

Una vez definido el alcance del campo de trabajo se procedió a ubicar las áreas específicas donde se realizarían los muestreos, las cuales fueron:

- Bancos ubicados a lo largo del periférico de la ciudad de Mérida
- Bancos de préstamo ubicados alrededor del Km. 158+160 al Km. 217+520 del camino de cuota Mérida-Cancún.

Así las muestras de material que se analizaron en este proyecto de investigación fueron obtenidas de los bancos señalados, siguiendo la presente metodología:

1. Ubicación de los bancos (Figuras 1 y 2)
2. Número de muestras por banco (Tabla 3)
3. Cantidad de material obtenido (100 Kg por muestra)
4. Profundidad del sondeo (variable entre 1 y 3 metros)
5. Método de excavación (excavación pozo a cielo abierto, muestreo en la pared y superficiales)

Pruebas de laboratorio

Las pruebas que se realizaron al material calizo sascab para su identificación fueron las siguientes:

- Granulometría (tabla No. 3)
- Límites de consistencia (tabla No. 4)
- Equivalente de arena (tabla No. 4)
- Análisis químico (tabla No. 5)
- Valor cementante (tabla No. 4)
- Contracción lineal (tabla No. 4)
- V.R.S. Estándar (tabla No. 4)
- Peso Vol. Seco Suelto (tabla No. 4)
- Peso Vol. Porter (tabla No. 4)
- Humedad óptima (tabla No. 4)
- Densidad de arenas (tabla No. 4)
- Absorción de arenas (tabla No. 4)

Normas de calidad

Se tomó como referencia las normas de calidad de los materiales que se fijan en la parte novena del libro 1 de la S.C.T (Edición ,1986).

Ubicación de los sondeos

En las figuras 1 y 2 se muestran los lugares donde se realizaron los muestreos de material que sirvió para la presente investigación.



Figura 1. Ubicación de los bancos de materiales alrededor del perímetro de la ciudad de Mérida

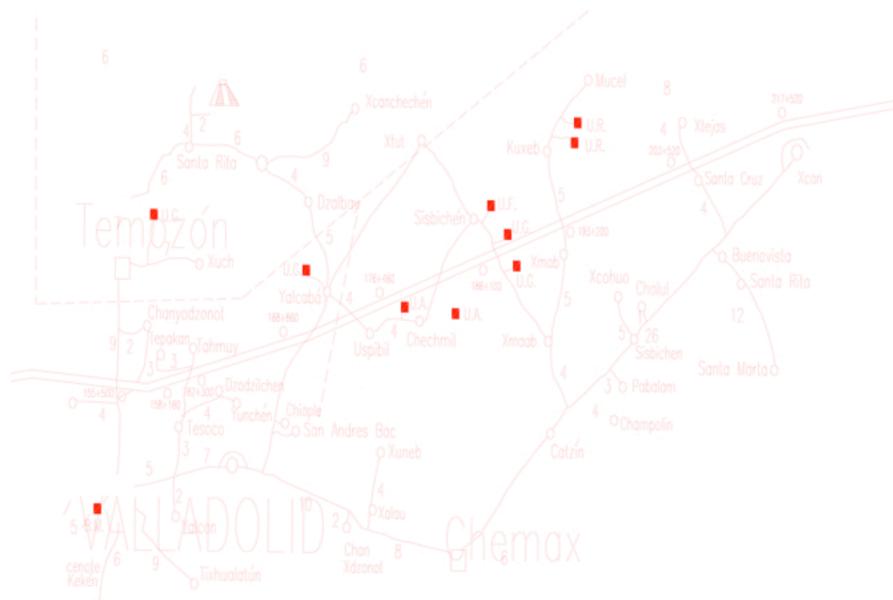


Figura 2. Bancos ubicados del km 158+160 al km 217+520 del camino de cuota Mérida - Cancún

La tabla 3 muestra el resultado del análisis granulométrico efectuado al material que se presento en este estudio, en ella se indica el banco de procedencia así como los diferentes porcentajes que pasan en la malla especificada.

Tabla 3. Resultados del análisis granulométrico efectuado al material calizo

Datos del muestreo			% que pasa la malla especificada							
Número	Banco	Muestra	3"	1 ½"	¾"	No. 4	No. 10	No.20	No.40	No.200
1	Teya	1	100	96	92	74	55	39	30	17
2		2	100	99	97	71	50	34	24	13
3		3	100	99	97	66	47	31	22	11
4	Cd. Blanca	1	100	98	96	82	66	50	49	20
5		2	100	96	93	78	68	56	45	21
6		3	100	94	90	65	54	43	34	18
7		4	100	95	91	63	45	32	24	10
8		5	100	92	87	58	40	30	24	14
9		6	100	100	99	95	86	72	60	33
10	Alexma	1	100	95	91	65	49	40	33	14
11		2	100	96	93	67	49	35	25	13
12	I. Benitez	1	100	98	96	88	78	65	51	26
13		2	100	97	93	68	56	42	31	15
14		3	100	99	97	68	48	33	23	10
15		4	100	95	91	68	53	39	31	16
16	km 158+160	1	100	98	88	69	61	54	47	36
17	km 161+780	1	100	93	90	63	54	45	36	23
18	km 162+300	1	100	88	75	54	48	43	38	32
19	km 162+880	1	100	89	80	39	31	25	20	13
20	km 168+860	1	100	92	72	42	32	26	21	16
Número	Banco	Muestra	3"	1 ½"	¾"	No. 4	No. 10	No.20	No.40	No.200
21	km 174+500	1	100	89	78	59	48	43	38	29
22	km 176+420	1	100	91	71	37	31	27	23	18
23	km 176+460	1	100	85	72	48	35	29	24	18
24		2	100	84	73	50	41	38	29	22
25	km 176+460	3	100	92	80	54	44	37	31	23
26		4	100	85	68	47	41	37	33	27
27	km 178+560	1	100	83	67	42	36	32	28	23
28	km 186+100	1	100	82	70	50	38	31	25	18
29		2	100	85	74	55	41	33	26	19
30	km 203+520	1	100	85	71	43	30	25	20	13
31	km 217+520	1	100	92	81	65	53	45	37	24
32		2	100	93	81	58	46	38	31	23

La tabla 4 ilustra los resultados de las diferentes pruebas de control de calidad realizadas al material calizo sascab, así como su clasificación por el método de la S.C.T.

Tabla 4. Resultados de las diferentes pruebas realizadas

Número	Banco	Muestra	V.R.S.	P.V.S.S.	P.V.P	W %	Ss	A %	L.L.	L.P.	IP	S.C.T.	C.L.	E.A.	V.C.
1	Teya	1	65.30	1290	1985	10.80	2.34	5.20	16.30	13.50	2.80	SM	1.00	59.50	9.40
2		2	70.20	1305	1997	9.20	2.20	4.95	15.40	11.20	4.20	SM	1.40	60.30	10.30
3	Cd. Blanca	1	78.60	1328	2047	11.30	2.13	7.50	18.20	15.60	2.60	SM	2.70	42.00	8.80
4		2	65.40	1401	2005	10.90	2.16	8.05	19.70	16.10	3.60	SM	2.10	39.30	7.90
5	Alexma	1	58.20	1420	2120	8.70	2.24	6.25	19.10	16.40	2.70	SM	2.90	68.00	7.20
6		2	65.30	1401	2048	8.40	2.15	5.80	20.70	17.10	3.60	SM	2.10	59.00	8.10
7	I. Benitez	1	67.80	1310	2065	12.20	2.19	7.05	21.90	17.2	4.70	SM	1.80	50.00	9.50
8		2	76.90	1452	1928	11.90	2.16	6.90	20.80	16.90	3.90	SM	2.20	56.00	10.10
9	km 158+160	1	58.80	1478	1956	12.60	2.16	4.0	29.30	21.70	7.60	SM	3.80	13.60	10.90
10	km 161+780	1	62.50	1364	1980	11.60	2.17	7.20	31.80	22.80	9.00	GC	4.40	19.10	18.60
11	km 162+300	1	58.80	1360	1877	11.70	1.82	11.07	18.30	15.30	3.00	GM	1.40	22.80	5.20
12	km 162+880	1	80.90	1389	1960	8.30	2.29	3.80	28.90	21.60	7.30	GC	3.70	17.80	17.90
13	km 168+860	1	176.50	1391	2041	8.90	2.26	5.66	17.50	15.90	1.60	GM	0.80	47.20	6.60
14	km 174+500	1	95.60	1454	1941	10.60	2.02	5.41	23.40	18.90	4.50	GM	2.10	28.30	4.30
15	km 176+420	1	55.10	1413	2029	8.8	2.20	4.20	19.0	16.90	2.10	GM	1.00	25.00	5.10
16	km 176+460	1	69.90	1402	2030	10.3	2.30	5.10	27.10	21.0	6.10	GM	3.00	20.70	12.90

Número	Banco	Muestra	V.R.S.	P.V.S.S.	P.V.P	W %	Ss	A %	L.L.	L.P.	IP	S.C.T.	C.L.	E.A.	V.C.
17		2	102.90	1427	2018	8.50	2.31	3.70	19.50	17.0	2.50	GM	1.00	24.30	5.90
18		3	128.7	1402	2126	8.40	2.32	3.12	26.40	20.50	5.90	GM	3.00	19.00	10.30
19		4	62.50	1255	1902	11.40	1.82	12.70	20.20	17.50	2.70	GM	1.30	26.40	17.50
20	km 178+560	1	73.50	1432	1989	9.70	2.02	9.20	21.80	17.40	4.40	GM	2.00	19.90	9.10
21	km 186+100	1	169.10	1734	2162	8.70	2.39	3.14	27.50	21.20	6.30	GC	3.00	27.70	17.50
22		2	172.80	1683	2145	8.10	2.44	3.75	27.0	21.0	6.00	GM	2.90	28.30	15.80
23	km 203+520	1	180.10	1489	2012	9.50	2.15	5.61	29.90	22.0	7.90	GC	3.90	21.90	27.50
24	km 217+520	1	138.70	1265	1811	14.30	2.04	7.35	20.10	17.30	2.80	SM	1.00	22.50	3.80
25		2	178.70	1571	2100	8.20	2.29	3.12	23.80	18.60	5.20	GM	2.50	50.80	21.70

Con el fin de determinar los componentes químicos del material, se efectuaron análisis de este tipo a muestras tomadas de los bancos de materiales. La tabla 5 nos muestra los resultados obtenidos.

Tabla 5. Componentes químicos del Sahcab en %

MATERIAL SAHCAB Color marfil	MUESTRA 1 Banco Cd. Blanca	MUESTRA 2 Banco Alexma	MUESTRA 3 Banco Ing. Benitez
HUMEDAD A 150° C (g)	2,000	1,100	1,250
CARBONATOS DE CALCIO	76,680	84,100	79,200
CARBONATOS DE MAGNESIO	12,820	9,900	10,800
CARBONATOS TOTALES	90,000	89,500	94,000
SULFATOS	0,004	0,005	0,004
ARCILLA	2,250	1,780	1,710
SILICE	1,110	1,250	0,300
NITRATOS	0,004	0,004	0,003
CLORUROS	0,002	0,008	0,002
OXIDO DE FIERRO	0,080	0,010	0,004

Con la finalidad de interpretar de la mejor manera los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio efectuadas al material calizo sascab se realizó un análisis de los valores con base en términos estadísticos; así, para la prueba granulométrica se puede observar en la figura 3 los resultados obtenidos en cuanto a la distribución de las partículas del material sascab para todas las pruebas efectuadas.

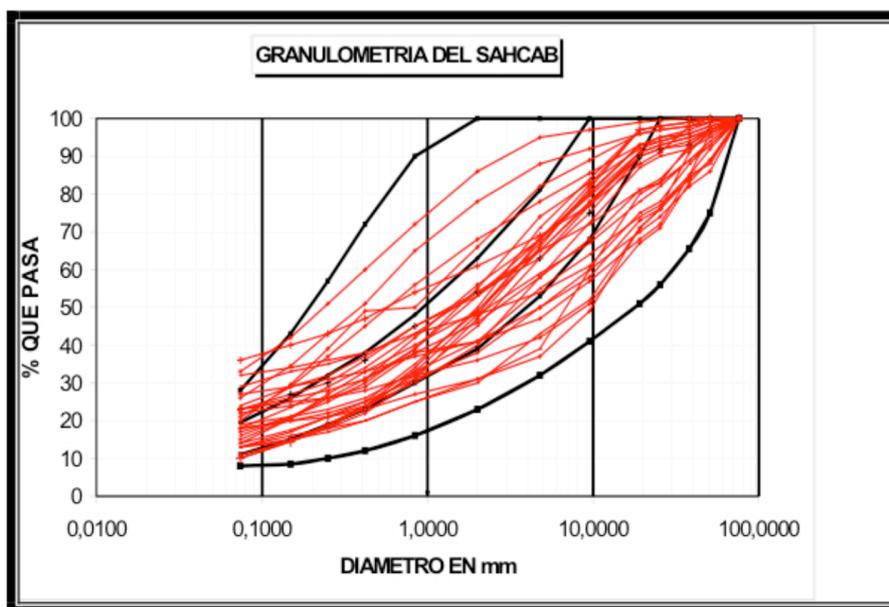


Figura 3. Resultados de las pruebas granulométricas

En la figura 3 se observa que la distribución de los diferentes tamaños que conforman la muestra sigue una tendencia relativamente suave sin cambios bruscos de pendientes, alojándose la mayor parte de las curvas en las zonas 1 y 2 de las normas de calidad que especifica la S.C.T.

A continuación se analiza estadísticamente el conjunto de todas las distribuciones granulométricas realizadas en los bancos de materiales descritos con anterioridad.

La tabla 6 muestra los resultados del análisis estadístico del material calizo sascab para las diferentes mallas que componen su distribución granulométrica.

Tabla 6. Análisis estadístico de la granulometría del material sahcab investigado

	MALLA 3"	MALLA 2"	MALLA 1 1/2"	MALLA 1"	MALLA 3/4"	MALLA 3/8"	MALLA No.4	MALLA No.10	MALLA No.20	MALLA No.40	MALLA No.60	MALLA No.100	MALLA No.200
N	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Media	100.0000	95.8750	92.3438	86.9219	84.1875	71.3906	60.9688	48.5625	39.0313	31.6563	27.3750	23.6563	19.6250
Error de la media	.0000	.7068	.9510	1.6030	1.8308	2.2902	2.4759	2.3070	1.9482	1.7498	1.5045	1.3182	1.1962
Mediana	100.0000	97.0000	93.0000	90.5000	87.5000	73.7500	63.0000	48.0000	37.5000	30.5000	26.0000	21.0000	18.0000
Moda	100.00	97.00	85.00	76.00	91.00	57.00	65.00	41.00	43.00	24.00	26.00	14.50	13.00
Desviación estandar	.0000	3.9980	5.3798	9.0679	10.3564	12.9551	14.0057	13.0506	11.0205	9.8982	8.5109	7.4568	6.7669
Varianza	.0000	15.9839	28.9425	82.2276	107.2540	167.8344	196.1603	170.3185	121.4506	97.9748	72.4355	55.6038	45.7903
Rango	.00	14.00	18.00	28.50	32.00	48.00	58.00	56.00	47.00	40.00	34.00	27.50	26.00
Valor mínimo	100.00	86.00	82.00	71.00	67.00	49.00	37.00	30.00	25.00	20.00	17.00	14.50	10.00
Valor máximo	100.00	100.00	100.00	99.50	99.00	97.00	95.00	86.00	72.00	60.00	51.00	42.00	36.00

Tratando de buscar que los resultados de la tabla No. 6 sean lo mas significativos posibles se procedió aplicar la metodología de control estadístico de la distribución t de student (para muestras pequeñas) con la finalidad de buscar un intervalo de confianza de la forma:

$$m - t_0 \frac{s}{\sqrt{n-1}} \leq \mu \leq m + t_0 \frac{s}{\sqrt{n-1}},$$

Tal que:

$$P[|t| > t_0] = P$$

Para la distribución antes señalada, con un 95% de confiabilidad. La tabla 7 y la figura 4 ilustran los resultados obtenidos al aplicar la fórmula estadística antes mencionada, a los resultados de la tabla No. 6.

Tabla 7. Intervalos de confianza para la distribución t de Student con un 95% de confiabilidad calculados con los datos de la Tabla 6

	MALLA 3"	MALLA 2"	MALLA 1 1/2"	MALLA 1"	MALLA 3/4"	MALLA 3/8"	MALLA No.4	MALLA No.10	MALLA No.20	MALLA No.40	MALLA No.60	MALLA No.100	MALLA No.200
Valor de la distr. t al 95%	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04
Valor mínimo	100	94	90	84	80	67	56	44	35	28	24	21	17
Valor máximo	100	97	94	90	88	76	66	53	43	35	31	26	22

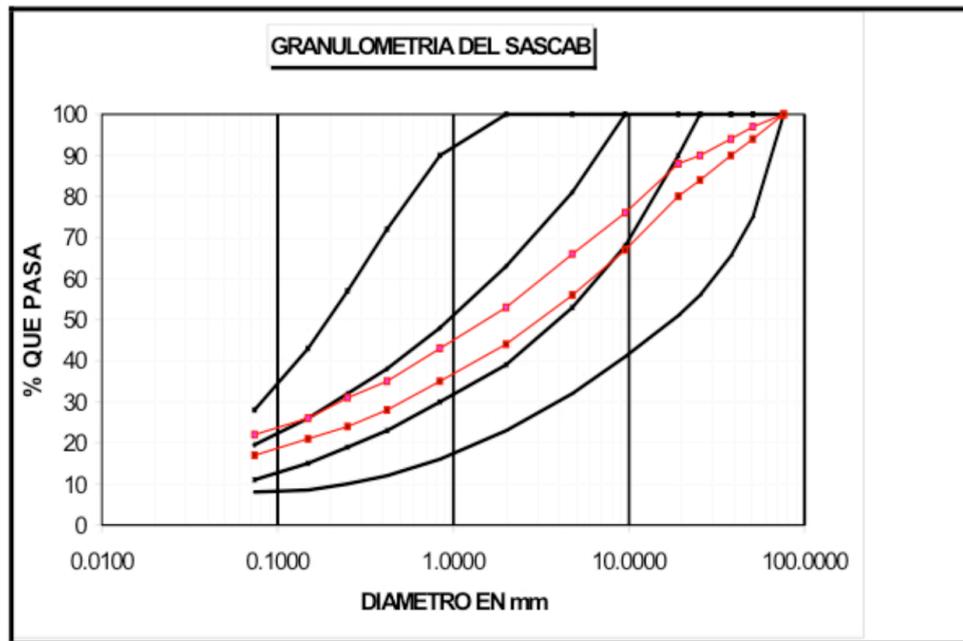


Figura 4. Gráfica de los intervalos de confianza indicados en la Tabla 7

La tabla 8 muestra del análisis estadístico efectuado al material calizo sascab para las diferentes pruebas índice.

Tabla 8. Análisis estadístico de las pruebas índice realizadas al material calizo sahcab

	V.R.S.	Peso V. Seco S	Peso V. Proctor	W %	Ss	A %	L. Liquido	L. Plástico	C. Lineal	Equivalente de arena	Valor cementante
N	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Media	96.5120	1416.6400	2010.9600	10.1200	2.1828	5.9932	22.5440	18.0240	2.2800	34.7760	11.2760
Error de la media	9.0413	22.8283	16.8624	.3378	3.052E-02	.4881	.9320	.5736	.2068	3.3265	1.1968
Mediana	73.5000	1402.0000	2012.0000	9.7000	2.1900	5.6100	20.8000	17.3000	2.1000	27.7000	9.5000
Moda	58.80	1401.00	1811.00	8.40	2.16	3.12	15.40	16.90	1.00	28.30	10.30
Desviación estandar	45.2065	114.1413	84.3122	1.6889	.1526	2.4404	4.6600	2.8681	1.0340	16.6325	5.9841
Varianza	2043.6286	13028.2400	7108.5400	2.8525	2.328E-02	5.9555	21.7159	8.2261	1.0692	276.6411	35.8094
Rango	125.00	479.00	351.00	6.20	.62	9.58	16.40	11.60	3.60	54.40	23.70
Valor mínimo	55.10	1255.00	1811.00	8.10	1.82	3.12	15.40	11.20	.80	13.60	3.80
Valor máximo	180.10	1734.00	2162.00	14.30	2.44	12.70	31.80	22.80	4.40	68.00	27.50

Si analizamos ahora los componentes que integran el suelo sascab de acuerdo a la tabla No. 5, obtenemos la Figura No. 5 la cual nos da una idea de los diferentes contenidos mineralógicos de las muestras de suelo calizo investigado.

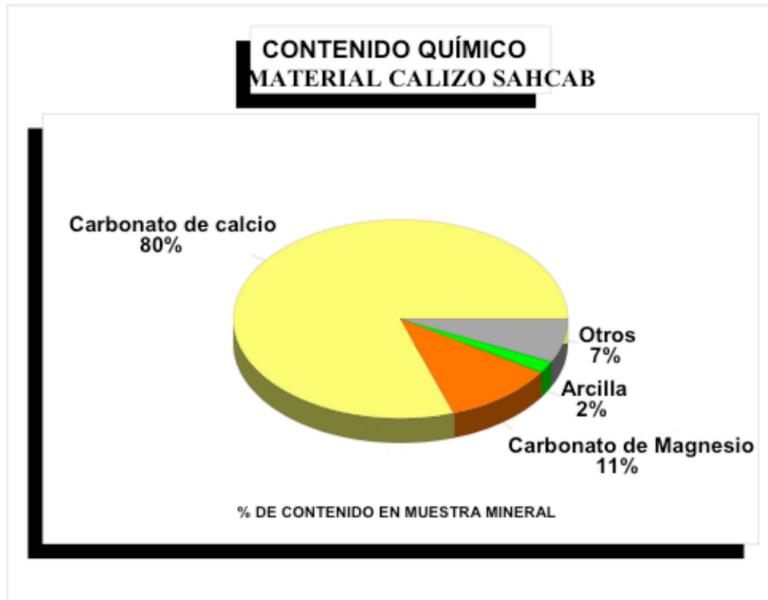


Figura 5. Contenidos químicos del material sahcab estudiado

De la Figura 5 podemos observar que el sascab está compuesto básicamente por carbonatos de calcio en un 80% y de carbonato de magnesio en un 11% resultando esto en un 91% de carbonatos, representando solamente un 2% el contenido de arcilla. De las pruebas químicas se pudo determinar que la humedad promedio del material calizo sascab a 150° es de 1.45 g así mismo materiales como: sulfatos, sílice, nitratos, cloruros, óxido de hierro, representan tan solo en promedio un 7% del contenido mineralógico del sascab.

Con base en los datos de la tabla 8 presentada anteriormente, y aplicando la fórmula estadística ya citada se obtuvieron los intervalos de confianza para las diferentes pruebas que se realizaron al material calizo utilizando la distribución t de Student con un 95% de confiabilidad, esto con la finalidad de conocer mejor el comportamiento probable del sascab.

Las figuras 6 a 10 y 12 a 15 muestran las cartas de control estadístico de las pruebas efectuadas al material estudiado, incluyendo el intervalo de confianza correspondiente.

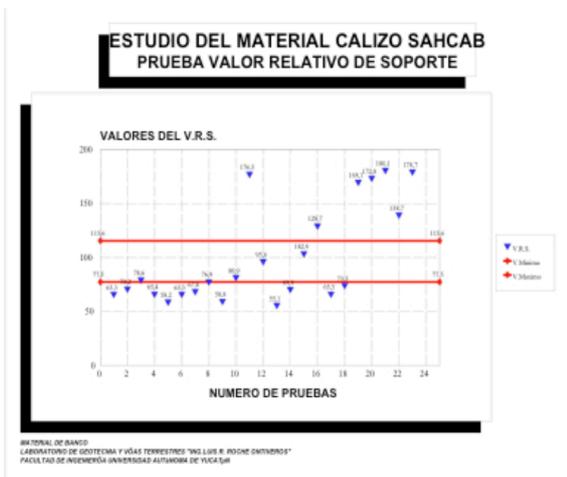


Figura 6. Carta de control estadístico De la prueba V. R. S.

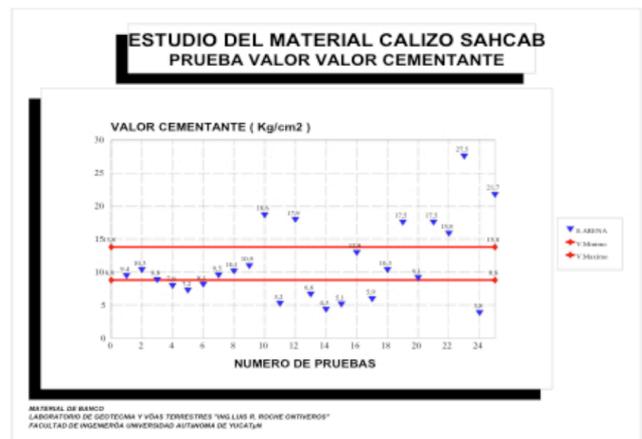


Figura 7. Carta de control estadístico de la Prueba V. C.

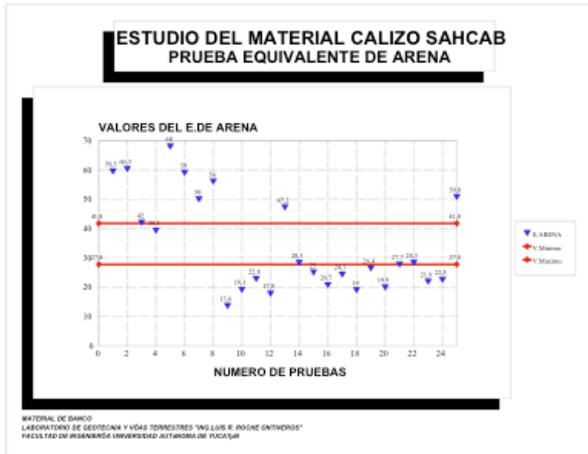


Figura 8. Carta de control estadístico De la prueba E. de A.

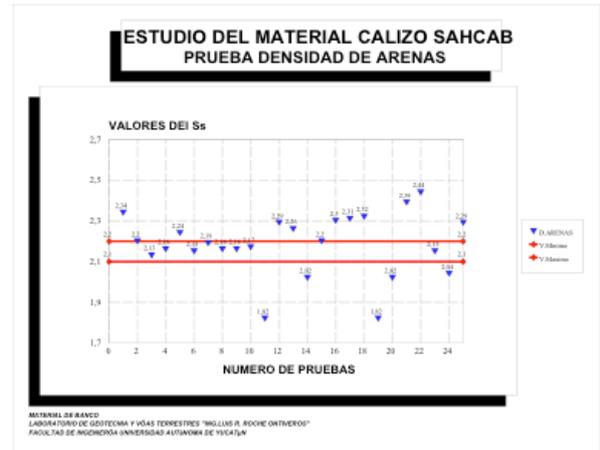


Figura 9. Carta de control estadístico de la prueba Ss

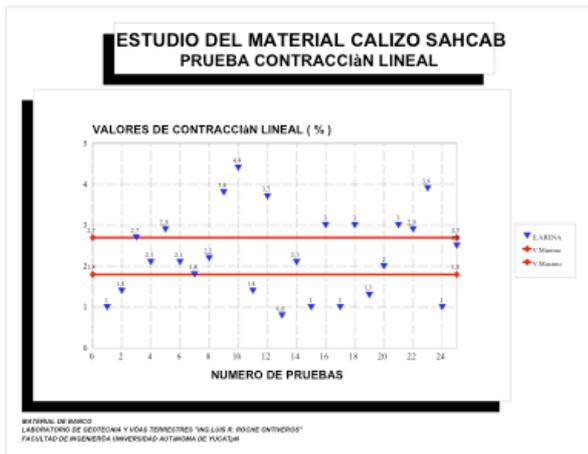


Figura 10. Carta de control estadístico De la prueba C. L.

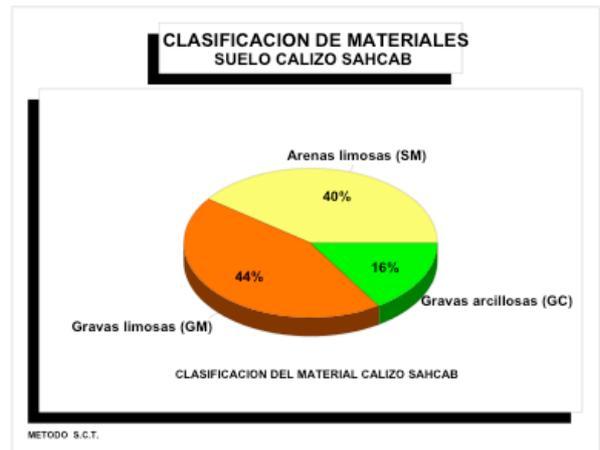


Figura 11. Clasificación del suelo

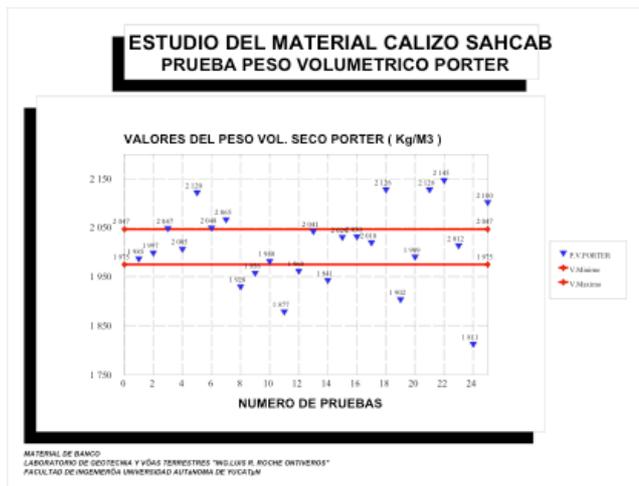


Figura 12. Carta de control estadístico de la prueba P. V. S. P.



Figura 13. Carta de control estadístico de la prueba P. V. S. S.

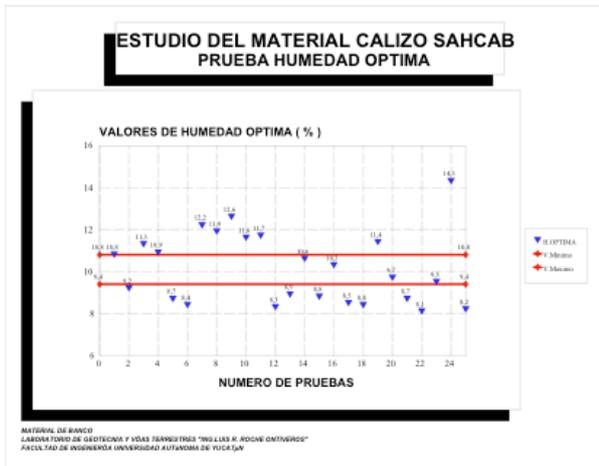


Figura 14. Carta de control estadístico de la prueba W

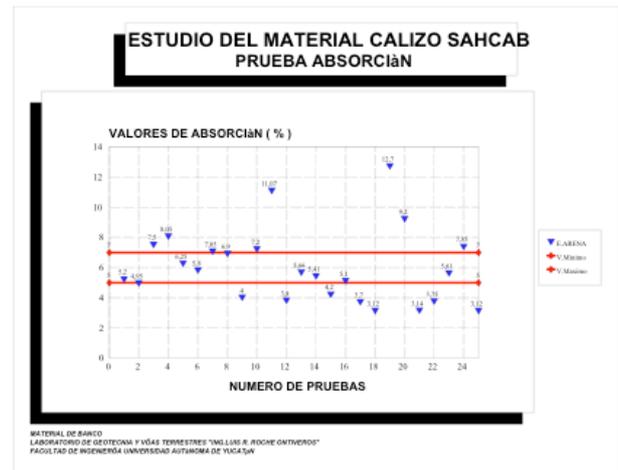


Figura 15. Carta de control estadístico de la prueba A

La finalidad de presentar cartas de control estadístico de los resultados del material sascab cuando se le somete a pruebas de laboratorio es la de dar un primer paso hacia el proyecto de especificaciones regionales en cuanto al uso de este material calizo.

CONCLUSIONES

La prueba anterior fue proporcionada en la Universidad Autónoma de Mérida, considero que muestra con claridad las características del suelo calizo estudiado sascab.

Con base en los resultados obtenidos en las pruebas de granulometría, límite líquido e índice plástico, se puede concluir que el material sascab estudiado, conocido geológicamente como roca caliza no consolidada, le corresponde la clasificación de arena limosa (SM) observando las tablas de resultados en un 40% de las veces, grava limosa (GM) en un 44% de las veces, y grava arcillosa (GC) en un 16% de las veces según el sistema de clasificación que utiliza la S.C.T. representada en la figura 11.

En cuanto a las granulometrías obtenidas, al observar la bibliografía en el que se basa la prueba que es “Materiales para revestimientos, sub-bases y bases de pavimentos” en el capítulo XCI inciso 91-03.2 de las especificaciones generales de construcción parte octava de la S.C.T. y los resultados observados en la figura No. 3 estos no tienen cambios bruscos de pendiente y se alojan casi en su totalidad en las zonas 1 y 2, de dichas normas, lo que nos da un material bueno para subrasante y sub-base. También los intervalos de confianza de la t de Student representado en la figura 4 para la granulometría confirman lo anterior.

Ahora la conclusión en cuanto a las pruebas de contracción lineal, valor cementante y valor relativo de soporte de la tabla 9 nos muestra una comparación entre las especificaciones que la bibliografía base de la prueba de la S.C.T. antes mencionada; muestra para los materiales que su gráfico granulométrico se aloja en la zona 2 y los resultados que se muestran en la tabla 8, para el valor mínimo y para el valor máximo.

De la tabla 9 se puede observar que en todas las pruebas valor relativo de soporte, valor cementante y contracción lineal efectuadas al material estudiado cumple con lo señalado en la especificación. En la prueba equivalente de arena el rango de valores nos muestra que el valor mínimo obtenido está por debajo del valor mínimo especificado, sin embargo esto no se obtuvo en cuatro muestras analizadas lo que nos dice que el material calizo analizado es altamente recomendable para usarse en capas de revestimiento y sub-bases en la construcción de

caminos y carreteras, cuando sus características tengan valores comprendidos dentro de las especificaciones señaladas.

Por otro lado cabe mencionar que el bajo contenido de contaminación orgánica y la baja plasticidad que arrojaron los resultados, garantiza que es un material estable sin excesivas deformaciones futuras ni cambios de volumen, situación que se ratifica con el bajo contenido de arcilla en las pruebas de tipo químico realizadas, y las pruebas de contracción lineal.

Afirmar que el material sascab es un buen material para capas de revestimiento y sub-bases no quiere decir que pueda ser útil en bases de pavimentos, por el contrario el material sascab no se recomienda por lo general para esta capa, sin embargo, dado que la curva granulométrica promedio del material estudiado muestra una adecuada distribución de los materiales (visto en la figura 4) de acuerdo a las normas y especificaciones vigentes y dado el rango de valores del V.R.S.; si este da un resultado mayor al 80%, dicho material se puede recomendar como capa base en caminos secundarios o de bajo tránsito.

Es justo recordar que los resultados y propuestas que se recomiendan para el material sascab en el estudio realizado, se obtuvieron en base a un tipo de material calizo del cual se reportan sus propiedades índice, por lo tanto las presentes recomendaciones no comparan a aquellos materiales cuyas características quedan fuera de los rangos estadísticos obtenidos y analizados en este proyecto de investigación, es decir tales propuestas de uso del sascab, únicamente son válidas para el material sascab estudiado.

Como dato curioso puede existir confusión en cuanto a la forma de escribir el material estudiado anteriormente si es Sahcab como en la prueba es mostrado o Sascab como se ha venido mencionando en el trabajo; en realidad ambas formas son correctas, ya que este nombre es utilizado por los pobladores.

IV. c PRUEBAS DE LABORATORIO A ROCAS CALIZAS (COQUINA SUAVE, LAJA CREMA, LAJA ROJA)

Ahora se presentará una prueba efectuada a la roca caliza de la ciudad de Mérida en Yucatán; dicha prueba fue presentada en el congreso internacional anual de la SOMIM efectuado del 17 al 19 de septiembre en la ciudad de Puebla en el año 2008; es un artículo relativamente reciente, que nos mostrará el comportamiento de la roca caliza cuando es sometida a compresión y la dureza de estas.

A manera de resumen antes de presentar la prueba. En dicho trabajo se realizaron pruebas a muestras de roca caliza pertenecientes a una cantera al sur de la ciudad de Mérida Yucatán, correspondientes a los tipos más comunes en el área. La laja se encuentra debajo del suelo (0.3 a 2.5 m) y la coquina entre 6-9 m de profundidad. Los ensayos mecánicos determinaron un valor de carga máxima de 585.66 kgf para la coquina suave, 10289.43 Kgf para la laja roja y 11273.88 kgf para la laja crema. Se utilizó un ladrillo como control, el cual tuvo una carga máxima de 647.27 kgf. El grado de compactación, la presencia de fósiles y la cantidad de impurezas son las principales causas de las diferencias observadas en el comportamiento mecánico de cada material. La dureza de la laja es el principal factor que restringe el desarrollo radicular.

INTRODUCCIÓN

En el norte de Yucatán se han identificado tres capas de sustrato calizo, cubiertos por los suelos típicos someros de la región (<30cm). La primera corresponde a una capa de roca dura, no porosa localizada inmediatamente debajo del suelo (0.3-2.5m); la segunda es una capa de sustrato muy suave y muy porosa (2.5-5.0m), la tercera es una capa fosilífera con diversos grados de porosidad y dureza (5-9 m). Estos tipos de sustrato son conocidos localmente como laja, sascab, y coquina respectivamente.

Los tres tipos de capas comparten las mismas propiedades mineralógicas pero sus propiedades físicas y su capacidad de retención de agua son muy diferentes; la laja presenta principalmente variaciones de color, puede ser blanca, crema, gris o rojo y retiene muy poco agua. El sascab es un sustrato normalmente blanco tan suave que incluso se puede deshacer en la mano; es muy poroso y retiene mucho agua. La coquina es un material altamente fosilífero, que varía en su grado de dureza; su retención de agua depende de su cantidad y tamaño de poros. Los nombres técnicos generales de estas rocas son: micrita y biomicrita. La clasificación más específica de cada muestra de roca depende del porcentaje de aloquímicos (granos diferentes a la matriz) pertenecientes a la matriz.

DETALLES EXPERIMENTALES

Las muestras fueron tomadas de diversas paredes expuestas después de la explosión y extracción de roca en una cantera de la ciudad de Mérida, Yucatán (Figura. 1). Se colectaron fragmentos de roca de aproximadamente (50x50x50) y se les marcó en la parte superior para recordar su posición en el campo. Las muestras se cortaron en piezas de (10x5x5cm) con una sierra cortadora eléctrica con disco de diamante. La parte superior de cada submuestras se marcó al igual que la original para ejercer la presión en ese punto durante los análisis de dureza. Se tomaron muestras de las variantes más abundantes de roca caliza encontrada en la zona de estudio.



Figura 1. Vista general de una pared expuesta en la cantera de donde se tomaron las muestras. La parte superior muestra el nivel original del terreno, la distancia con respecto a la parte inferior es aproximadamente 8 m.

ENSAYOS MECÁNICOS

Se realizaron seis muestras de cada uno de los diferentes tipos de roca (coquina suave, laja crema y laja roja) así como un material testigo (ladrillo macizo), que es una pieza cerámica, generalmente ortoédrica, obtenida por moldeo, secado y cocción a altas temperaturas a partir de una pasta arcillosa, cuyas dimensiones suelen rondar 24 X 11.5 X 6 cm. Antes del ensayo de compresión se comprobó que los cortes rectangulares presentaran paralelismo en ambas caras de acuerdo con la norma ASTM E9-89^a (2000) (figura 2.) se midió su masa por medio de una balanza modelo 700 ppw y se procedió a obtener la densidad de las muestras.

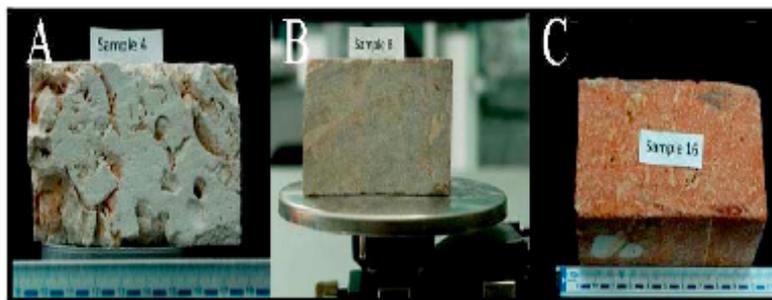


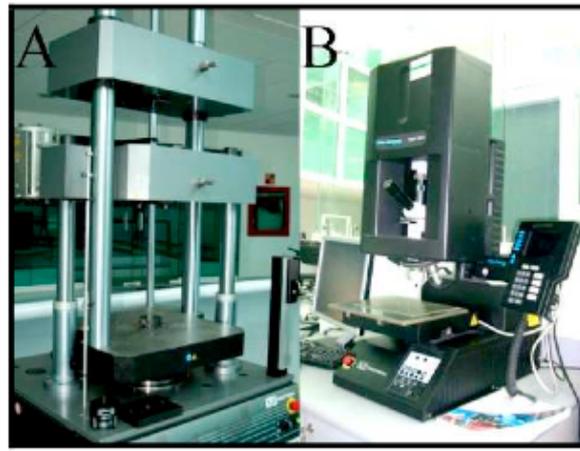
Figura 2. A) coquina suave; B) laja crema; C) laja roja.

Los ensayos de compresión se realizaron con una maquina universal del tipo INSTRON de la serie “satec series Modelo 600dx-F2-G1” (Figura 3A). Utilizando el programa partner, dicha maquina se programó para que obtuviera los datos y la gráfica de esfuerzo y carga durante todo el transcurso de la prueba.

La prueba se efectuó a temperatura ambiente con una velocidad de carga de 0.05 mm/min.

Para las pruebas de dureza se utilizaron los microdurómetros modelo INSTRON serie 210013 (Figura 3B), mediante las pruebas de Vickers y Rockwell. Se hicieron 10 identificaciones en cada probeta para obtener su dureza y sacar un promedio de la misma. La dureza es definida como la resistencia de un material a ser marcado.

Fue necesario emplear microdureza y dureza Rockwell, debido a que el material (Coquina Suave) no resiste la capacidad mínima de la prueba de dureza Rockwell, por lo que no permiten realizar el mismo ensayo de dureza a todas las muestras y fue necesario cambiar a Vickers por sus bajas cargas de penetración.



Figuras 3 (A) Maquina universal y 3 (B) Microdurómetro.

Las pruebas se efectuaron de acuerdo a las normas de la ASTM.

RESULTADOS

A) Análisis a la fractura:

El comportamiento mecánico de la coquina suave se muestra en la tabla 1. Mientras que la tendencia a la fractura mostró que en los primeros minutos de la prueba se inició una propagación a la fisura en la zona central de la pieza, esta propagación continuo en forma de ramificación en los bordes cerca de las aristas de la muestra, subsecuentemente mientras transcurría la prueba pequeños fragmentos del material se desprendían. La muestra en varias ocasiones se reacomodaba, esto se debe a su porosidad y a que en su interior tenia gran cantidad de fósiles. El tiempo estimado de la prueba fue de 25 minutos.

Las variaciones mecánicas de la laja crema se muestran en la tabla 1. La fractura de la serie se describe a continuación: en los primeros minutos del ensayo se rompieron las aristas de la parte superior e inferior de la probeta y se desprendieron pequeños fragmentos de las caras de la probeta, de tal forma que se obtuvo una alta densidad de fisuras en la parte central de la pieza, esto tuvo como consecuencia un desmoronamiento en la pieza llegando así hasta la ruptura del material a ensayar, el tiempo de ensayo para este caso en particular disminuyó con un tiempo prueba de 13 minutos.

Los resultados mecánicos de la laja roja se muestran en la tabla 1. La serie presentó un agrietamiento homogéneo en todas las caras de la probeta, caracterizado principalmente en una ruptura transversal en la pieza. En un tiempo de 3 minutos el ensayo tuvo una reacción precipitada efectuando una explosión en una de las caras laterales de la pieza, concluyendo el ensayo en un tiempo total de 7 minutos.

Los resultados obtenidos se compararon con el material testigo (ladrillo). De este se obtuvieron seis muestras rectangulares con las dimensiones estandarizadas de acuerdo a los ensayos anteriores y obteniendo valores que se presentan en la tabla 1. Los valores a la compresión alcanzaron características semejantes a la coquina suave.

En la figura 4 se muestra la evolución de las diferentes rocas analizadas en el presente estudio.

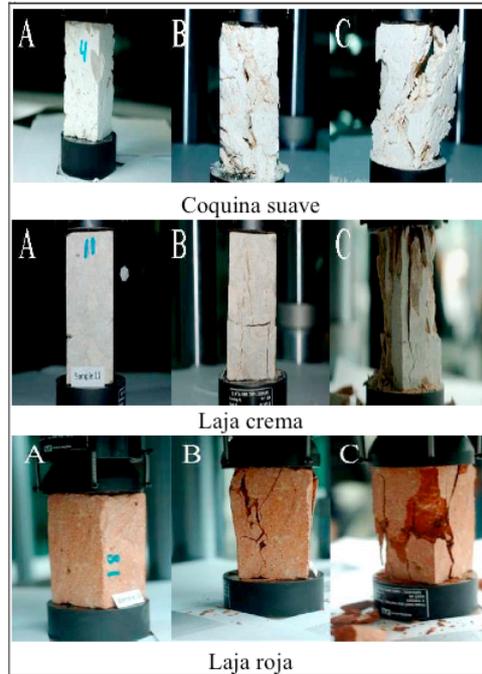


Figura 4. Diferentes momentos durante la compresión de las muestras. (A) comienzo de la prueba; (B) parte media de la prueba; (C) final de la prueba.

b) Identaciones por dureza micro Vickers.

En la figura 5 se pueden observar las superficies de las muestras ensayadas por microdureza. En la micrografía 5A, se aprecia la indentación de la huella con un debilitamiento de penetración debido a que el material en la mayoría de los casos es pulverizado con una baja carga de indentación de 0.02 grf. Para el caso de dureza tipo Rockwell las indentaciones de las muestras del tipo laja crema (Fig. 5B), denota una indentación más visible con un valor registrado en la tabla 1. Finalmente a mayor dureza se presenta una huella visible a un aumento de 50 X, en la zona identificada como se muestra en la imagen 5C.

Tabla 1. Densidad, carga, esfuerzo máximo, dureza y amortiguamiento de las rocas calizas

Muestra parámetro	Densidad (g/cm ³)	Carga Máxima (Kg _f)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Dureza HV/HRF	Amortiguamiento
Coquina suave	1.6	585.66	1.05	<0.1 HV	1.36%
Laja crema	2.6	11273.88	22.23	75.17HRF	26.9%
Laja roja	2.5	10289.43	18.50	41.15HRF	11.5%
Ladrillo	1.2	647.27	0.92	<0.1 HV	1.2%

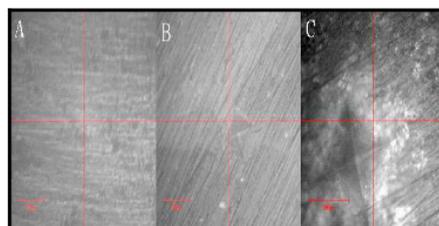


Figura 5. Imágenes obtenidas del microdurómetro. (A) Coquina suave, (B) Laja crema y (C) Laja roja.

c) Esfuerzo vs. deformación.

La gráfica de esfuerzo vs. posición (Figura 6) mostró lo siguiente: a) Coquina Suave: la gráfica presentó la cresta donde alcanzó el esfuerzo máximo, también indicó crestas en distintos puntos de la gráfica debido al reacomodo de la muestra, ya que es un material muy poroso. b) Laja Crema: la gráfica reveló cuando alcanzó el esfuerzo máximo fisurando el material por la mitad, obteniendo un decremento en el esfuerzo de la muestra mediante una recesión muy inclinada. c) Laja roja: la gráfica confirmó que a los 3 minutos de iniciado el ensayo presentó el esfuerzo máximo, después de ser alcanzado se redujo un poco y presentó otra cresta debido al reacomodo de la muestra, después su esfuerzo disminuyó notablemente.

Ladrillo: En la gráfica se puede observar que el esfuerzo máximo es menor que el de la muestra mas porosa de la roca caliza, siendo este un material frágil que presentó reacomodos durante la ejecución del ensayo.

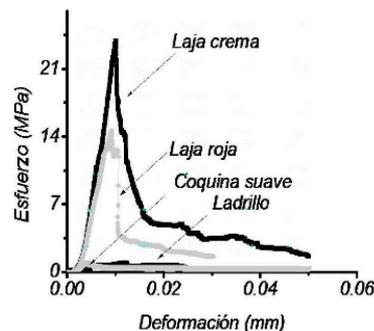


Figura 6. Esfuerzo contra deformación de todas las muestras.

A continuación se presentará el análisis y discusión de los resultados obtenidos en estas pruebas a las rocas calizas.

Coquina Suave: presenta propiedades muy parecidas a las del material testigo (ladrillo). Es muy importante hacer referencia que los fósiles son un factor determinante en esta roca como un material muy poroso (macro y microporos) de difícil predicción de ruptura. Por ende la coquina suave fue la muestra menos resistente ya que era la muestra mas porosa, esta característica se debe a que las muestras se encuentran a una profundidad de 5 a 9 m, lo que hace que almacene mas agua y no se filtre, en su interior como se mencionó contiene algunos tipos de fósiles (conchas, caracoles) por lo que presenta mayor fragilidad, lo interesante de esta es que mostró varios reacomodos durante la ejecución del ensayo. La dureza de este material es semejante a la dureza reportada del talco, por lo cual esto nos hace suponer que la resistencia mecánica es minima. Aunque los resultados muestran que puede ser tan resistente como un ladrillo su uso como material de construcción no es aconsejable, esto es a consecuencia de su baja compresibilidad, baja dureza, y principalmente por los bajos contenidos de absorción de agua y recuperación de material. Como dato adicional esta roca no presenta ninguna restricción mecánica para la penetración de las raíces debido a su suavidad y su porosidad.

Laja Crema: Es la roca mas dura y menos porosa. Sus propiedades mecánicas la hacen un buen material de construcción.

Laja Roja: La laja roja es una roca con propiedades muy parecidas a la laja crema. La diferencia quizá estriba en que esta roca contiene impurezas de hierro, lo que le confiere el color rojo y la vuelve mas dura que la laja crema. A continuación se presenta una comparación entre los resultados por Alonzo L. Et al, con respecto a los obtenidos en el presente trabajo (Tabla 2).

Tabla 2. Comparación de resultados.

	Esfuerzo (MPa)	
	Mínimo	Máximo
Este trabajo	1.05	22.23
Alonzo L. et al	1.78	64.72

Se determinaron las propiedades mecánicas para rocas de piedra caliza de diversas áreas en Mérida y enfocado principalmente a su comportamiento como material para la construcción, de esta manera es este trabajo el primer intento en correlacionar las propiedades mecánicas con el tipo de formación rocosa hallada en el sureste Mexicano. En general se observa claramente que en la tabla 2 que los rangos mínimos y máximos varían notablemente, lo que presupone que en el trabajo de Alonzo Et al; se analizaron muestras con impurezas en el material, lo que le da al material de ensayo valores más altos y con irregularidades; sin llegar a superficies planas; lo que traduce en variaciones notables.

CONCLUSIONES FINALES DE LAS PRUEBAS

Al término de las pruebas y análisis de los resultados se llegó a la conclusión de que la laja crema presentó mayor resistencia tanto en carga como en esfuerzo. Por el contrario la coquina suave fue la de menor resistencia. Con valores intermedios se encuentra la laja roja que presentó una carga menor con relación a la laja crema. El material testigo, tuvo resultados de carga y esfuerzos máximos cercanos a los de la coquina suave pero con distintos modos de fractura. Este tipo de roca caliza (laja crema) es en general un buen material que puede ser utilizado en la construcción, ya que sus propiedades lo hacen resistente. Así mismo se define que la profundidad a la que se encuentran las rocas esta relacionada con su resistencia, ya que a mayor profundidad la muestra es menos resistente y mas porosa.

En el próximo capítulo (Capítulo V) se mostrarán diferentes tipos de cimentaciones empleadas en la Riviera Maya (Playa del Carmen) en las cuales se revisarán los correspondientes estudios de Mecánica de Suelos efectuados para diseñarlas, también se hará una revisión a la reglamentación de construcción local, para conocer las limitaciones y los principales factores que se consideran para cimentar una obra; si se considera pertinente se realizará una crítica a dicha reglamentación.