



Mecánica
de
Materiales

Ingeniantes

Medición de la alteración del peso en el mármol tipo Café Tabaco mediante una prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio



Colaboración

Adolfo Manuel Morales Tassinari; Javier Guevara Rivera; Pedro Cruz Ortega, Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez; Jorge Arturo Hernández Zárate, Instituto Tecnológico de Veracruz

RESUMEN: La presente investigación tiene como propósito realizar una prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio, para determinar el porcentaje de pérdida de peso en el mármol tipo Café Tabaco extraído de la cantera localizada en Agua de Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México. La prueba de cristalización de sales consistió de secado a 60 ± 2 °C durante 16 h, enfriamiento a temperatura ambiente durante 2 h e inmersión en solución de cloruro de sodio al 16% durante 6 h. La prueba se repitió durante 15 ciclos. Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que el mármol tipo Café Tabaco extraído de la cantera tiene un porcentaje de pérdida de peso del 0.31% con una desviación estándar del 0.19%. De esta forma, el mármol tipo Café Tabaco extraído de la cantera presenta una alteración baja; sin embargo, este material presenta agrietamientos y rupturas lo cual afecta sus cualidades estéticas.

PALABRAS CLAVE: Alteración, cloruro de sodio, cristalización de sales, mármol, pérdida de peso.

ABSTRACT: This research has the purpose to do a salt crystallization test by sodium chloride to determinate the percentage of weight lost in the marble type Coffee Tobacco extracted from the quarry located in Agua de Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México. The salt crystallization test consisted of drying at 60 ± 2 °C for 16 h cooling to room temperature for 2 h and immersion in sodium chloride solution for 6 h. The test repeated for 15 cycles. The results obtained in this research show that the marble type coffee tobacco extracted from the quarry has a percentage of weight lost of 0.31%, with a standard deviation of 0.19%. In this way, the marble type coffee tobacco extracted from the quarry presents a low alteration; however, this material presents cracks and ruptures which affect its aesthetic qualities.

KEYWORDS: Alteration, sodium chloride, salt crystallization, marble, weight lost.

INTRODUCCIÓN

Una roca se define como una asociación inorgánica de uno o varios minerales originados en forma natural por procesos geológicos endógenos o exógenos [1]. Además, la naturaleza y el aspecto de una roca están fuertemente influidos por los minerales que la componen; por lo que, la composición mineral y la textura de una roca son el reflejo de los procesos geológicos que la crearon [2].

Una de las rocas comúnmente utilizadas por su belleza es el mármol, que se define como una roca carbonatada que tiene una distintiva textura cristalina por recristalización, frecuentemente por calor y presión durante el metamorfismo [3]. El mármol está compuesto principalmente por minerales de calcita y dolomita, también suele tener diversos silicatos aunque en muy pequeña cantidad [4]; además, los cristales de calcita son de tamaño submicroscópico, de atractivas coloraciones y tienen un intenso brillo cuando son pulidos [5].

En la localidad de Agua de Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, existe una cantera de mármol tipo Café Tabaco como se observa en la Figura 1.



Figura 1. Cantera de mármol tipo Café Tabaco

El mármol tipo Café Tabaco es una roca metamórfica de color café oscuro con vetas color claro que no tienen un patrón de orientación y que, al ser pulido, presenta gran brillo, como se observa en la Figura 2.



Figura 2. Mármol tipo Café Tabaco.

Las rocas inmersas en un determinado ambiente durante cierto tiempo, tienden a alterarse; es decir, sufren cambios en su naturaleza, que pueden manifestarse en su aspecto externo (color, estado de agregación...) o en su comportamiento (dureza, re-

sistencia...) [6]. De esta manera, en el deterioro de una roca influyen factores intrínsecos (naturaleza, composición y propiedades) y factores extrínsecos (medio ambiente y agentes externos) que determinarán el mecanismo de alteración afectando al material puesto en obra, ya sea físico, químico o biológico [7]. Por ejemplo, en los ambientes costeros el agua de mar penetra la superficie de la piedra y daña sus partes interiores, tanto por presiones de cristalización de sales y disolución de minerales [8].

Así, la cristalización de sales es uno de los importantes mecanismos de alteración de las rocas [9]; a decir, la cristalización de sales se da cuando una disolución rica en sales entra en el interior del sistema poroso de una roca, precipitando fases minerales salinas cuya cristalización genera una determinada presión [10]. Por lo tanto, la cristalización de sales induce tensiones dentro de los poros de las rocas [11], provocando una pérdida de coherencia entre los granos y la matriz; además, el ciclo de disolución y cristalización causa pérdida de peso, un cambio en el tamaño de los granos y poros, ruptura y el deterioro visible de la superficie [9].

De esta manera, la cristalización de sales puede limitar la durabilidad de las rocas de construcción; además, la durabilidad está relacionada con sus propiedades físicas y su resistencia [11]. A decir, la durabilidad es la capacidad de resistir el deterioro y mantener el tamaño y forma de los cristales, la resistencia mecánica, la densidad, la porosidad, la velocidad de propagación de las ondas de ultrasonido, la permeabilidad, la rugosidad, el color y el aspecto estético, originales [12].

Dicho lo anterior, la prueba de cristalización de sales es un ensayo de durabilidad que trata de reproducir de forma acelerada la alteración sufrida en un material expuesto a condiciones ambientales extremas [10]; como resultado de la prueba, los daños se atribuyen al incremento de volumen debido al proceso de cristalización y en especial a los de hidratación de las sales, sobre todo cuando dichos procesos tienen lugar en el interior de los poros [13].

El presente estudio tiene como finalidad realizar una prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio en el mármol tipo Café Tabaco proveniente de la cantera ubicada en la localidad de Agua de Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, para determinar el porcentaje de pérdida de peso y la alteración visual sufrida, reproduciendo los daños que puede sufrir el material en ambiente costero.

MATERIAL Y MÉTODOS

La empresa Mármoles Tepeaca S.A. de C.V., procesó las probetas para la prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio; así, de las probetas procesadas, se seleccionaron 12 probetas de acuer-

do al color característico café oscuro y, que cada cara tuviera una dimensión de 50 ± 0.5 mm.

Ahora bien, a cada probeta seleccionada se le eligió una cara para que se lijara y puliera en una pulidora marca MTI KJ GROUP modelo UNIPOL-820; esto se realizó, para eliminar el exceso de rugosidad superficial proveniente del proceso de corte. Para el lijado y pulido se utilizaron lijas con tamaño de grano 240, 400 y 600, como se observa en la Figura 3.



Figura 3. Lijado y pulido de las probetas.

Además, para que las probetas fueran identificadas durante toda la prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio se les asignó la numeración PC01 a la PC12, como se observa en la Figura 4.



Figura 4. Probetas identificadas con la numeración PC01 a la PC12.

Para iniciar la prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio, el horno de secado marca Memmert modelo UP500 se precalentó a una temperatura de 60 °C durante 1 h; después, las 12 probetas se introdujeron en el horno de secado precalentado para que se secaran a una temperatura de 60 ± 2 °C durante 48 h, como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Secado inicial de las probetas.

Para garantizar que las 12 probetas estuvieran secas, se pesaron en una báscula digital marca Mettler Toledo modelo PB3002-S DeltaRange® a las 46, 47 y 48 h, obteniéndose pesos constantes; de manera que, a las 48 h, se obtuvo el peso seco en cada probeta. Cabe aclarar que, el peso seco inicial se obtuvo a una temperatura ambiente promedio de 22 °C, como se observa en la Figura 6.

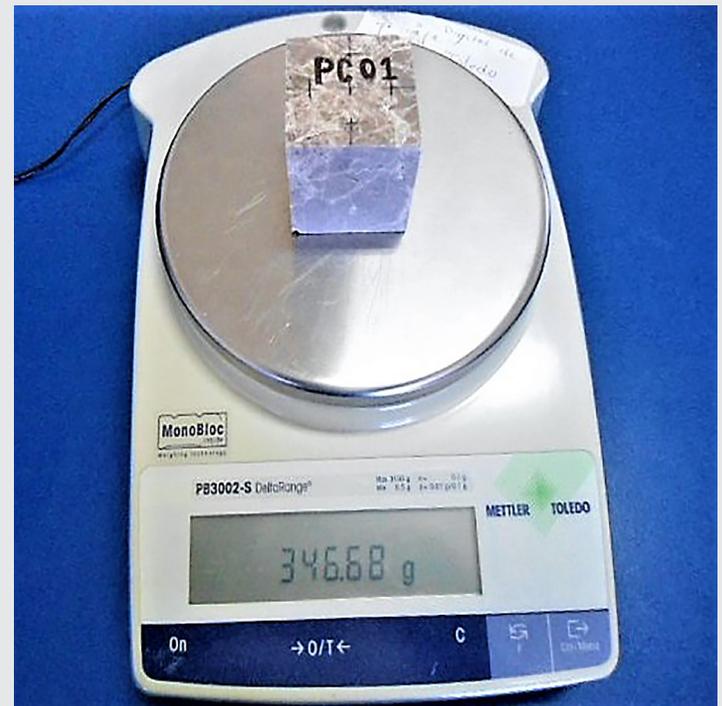


Figura 6. Peso seco inicial de la probeta PC01.

Después del pesado inicial, las probetas se dejaron enfriar a temperatura ambiente durante 2 h, como se observa en la Figura 7; esto se realizó, con la finalidad de que las probetas no sufrieran un choque térmico superficial cuando fueran a sumergirse en la solución salina de cloruro de sodio.

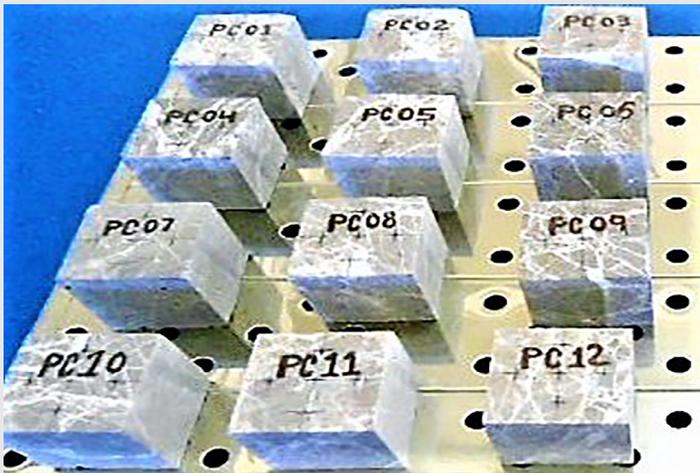


Figura 7. Enfriamiento de las probetas.

Durante el enfriamiento de las probetas, se preparó una solución de cloruro de sodio al 16%, conteniendo 1.6 kg de cloruro de sodio anhidro y 8.4 kg de agua destilada. Una vez transcurrido el tiempo de enfriamiento, las 12 probetas se sumergieron en la solución de cloruro de sodio al 16% a temperatura ambiente durante 48 h para que las probetas se saturaran, como se observa en la Figura 8.



Figura 8. Probetas en cloruro de sodio al 16%.

Para garantizar que las 12 probetas estuvieran saturadas, se pesaron en una báscula digital marca Mettler Toledo modelo PB3002-S DeltaRange® a las 46, 47 y 48 h, obteniéndose pesos constantes; de tal manera que, a las 48 h se obtuvo el peso saturado en cada probeta.

Cabe aclarar que, el peso saturado se obtuvo a una temperatura ambiente promedio de 22 °C, como se observa en la Figura 9.

Posteriormente de obtener el peso saturado, se inició el ciclo de prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio secando las probetas saturadas de cloruro de sodio en un horno de secado marca Memmert modelo

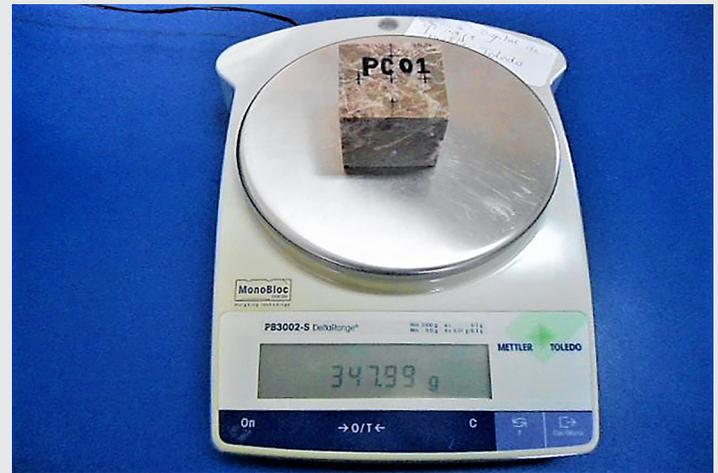


Figura 9. Peso saturado de la probeta PC01.

UP500 a una temperatura de 60 ± 2 °C durante 16 h. A continuación, las probetas se enfriaron a temperatura ambiente promedio de 22 °C durante 2 h, para prevenir un choque térmico. Pasado este tiempo, las probetas se sumergieron en la solución de cloruro de sodio al 16% a temperatura ambiente durante 6 h.

El ciclo de prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio cuyo proceso de secado-enfriado-inmersión duró 24 h, se realizó durante 15 ciclos para concluir la prueba. Cabe mencionar que, después de sacar las probetas del horno, se pesaron en una báscula digital marca Mettler Toledo modelo PB3002-S DeltaRange®, para obtener el peso de cada probeta en cada ciclo.

Al término del quinceavo ciclo, las 12 probetas de mármol tipo Café Tabaco se lavaron con agua destilada hasta que la sal fuera eliminada por completo; para esto, se vertieron 10 l de agua destilada en un contenedor y se lavaron superficialmente las probetas, como se observa en la Figura 10.



Figura 10. Lavado superficial de probetas.

Después, las 12 probetas se sumergieron en agua destilada durante 2 h, y se verificó la resistividad del agua destilada para corroborar que las probetas ya no tuvieran cloruro de sodio, como se observa en la Figura 11.



Figura 11. Medición de la resistividad.

Como la resistividad del agua destilada después del lavado no era la misma que antes del lavado, se realizaron cuatro lavados más hasta que la resistividad del agua destilada fuera la misma, antes y después del lavado.

Para finalizar la prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio, el horno de secado marca Memmert modelo UP500 se precalentó a una temperatura de 60 °C durante 1 h; después, las 12 probetas se introdujeron en el horno de secado precalentado para que se secaran a una temperatura de 60±2 °C durante 48 h, como se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Secado final de las probetas.

Para garantizar que las 12 probetas estuvieran secas, se pesaron en una báscula digital marca Mettler Toledo modelo PB3002-S DeltaRange® a las 46, 47 y 48 h, obteniéndose pesos constantes; de tal manera que, a las 48 h se obtuvo el peso seco final en cada probeta. Cabe aclarar que, el peso seco final se obtuvo a una temperatura ambiente promedio de 22 °C, como se observa en la Figura 13.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A partir de los datos obtenidos del peso seco inicial (M_O) de las probetas y de los datos obtenidos del peso seco final (M_F) de las probetas, se obtiene el porcentaje de pér-

didada de peso (DWL) de cada probeta individual mediante la Ec. (1):

$$DWL = \frac{M_O - M_F}{M_O} \times 100\% \quad \text{Ec. (1)}$$



Figura 13. Peso seco final de la probeta PC01.

En la Tabla 1, se muestran los resultados del porcentaje de la pérdida de peso de cada probeta después de la prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio obtenidos a partir de la Ec. (1).

Tabla 1. Porcentaje de pérdida de peso de las probetas.

Número de Probeta	M_O (g)	M_F (g)	DWL (%)
PC01	346.68	345.74	0.27
PC02	351.63	350.53	0.31
PC03	359.64	358.30	0.37
PC04	336.90	336.27	0.19
PC05	355.12	354.60	0.15
PC06	352.47	350.29	0.62
PC07	350.35	350.12	0.07
PC08	334.06	333.48	0.17
PC09	355.13	352.78	0.67
PC10	353.93	353.21	0.20
PC11	349.37	348.62	0.22
PC12	344.59	343.00	0.46
Mínimo			0.07
Primer Cuartil			0.18
Promedio			0.31
Tercer Cuartil			0.44
Máximo			0.67
Desviación Estándar			0.19

En la Tabla 1, se muestra que el porcentaje de pérdida de peso del mármol tipo Café Tabaco después de la prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio es de 0.31% con una desviación estándar de 0.19%. Además, la probeta PC07 fue la que perdió menos peso con un 0.07; mientras que, la probeta PC09 fue la que perdió más peso con un 0.67%.

El diagrama de caja-bigote mostrado en la Figura 14, representa los resultados del porcentaje promedio de pérdida de peso obtenidos de los datos de la Tabla 1.

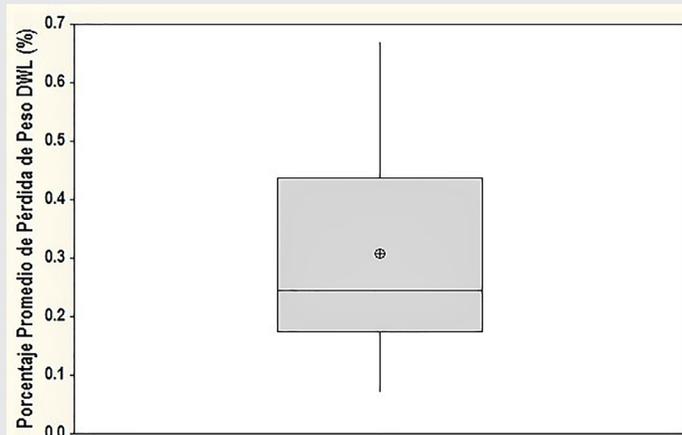


Figura 14. Diagrama de caja-bigote de pérdida de peso.

De la Tabla 2 a la 4, se muestran los valores obtenidos de los pesos secos de cada probeta durante los 15 ciclos de prueba.

Tabla 2. Peso seco de probetas del ciclo 1 al ciclo 5.

Número de Probeta	Pesos de las probetas por ciclo (g)				
	1	2	3	4	5
PC01	347.00	346.98	346.94	346.90	346.87
PC02	352.01	352.01	351.95	351.94	351.69
PC03	358.85	358.86	358.84	358.84	358.79
PC04	337.09	337.13	337.09	337.06	337.03
PC05	355.32	355.34	355.29	355.25	355.21
PC06	353.05	353.11	353.07	352.96	352.88
PC07	350.45	350.45	350.44	350.44	350.42
PC08	334.34	334.32	334.29	334.26	334.23
PC09	355.42	355.45	355.42	355.39	355.33
PC10	354.19	354.24	354.19	354.14	354.09
PC11	349.65	349.63	349.60	349.52	349.48
PC12	344.93	344.97	344.92	344.87	344.82
Promedio	349.36	349.37	349.34	349.30	349.24

En Figura 14, la parte baja de la caja es menor que la parte alta; por lo tanto, las pérdidas de peso comprendidas entre el 25% y el 50% de la población, están menos dispersas que entre el 50% y el 75%. Además, el bigote de abajo es más corto que el de arriba; por ello, el 25% de las menores

Tabla 3. Peso seco de probetas del ciclo 6 al ciclo 10.

Número de Probeta	Pesos de las probetas por ciclo (g)				
	6	7	8	9	10
PC01	346.59	346.52	346.47	346.44	346.42
PC02	351.61	351.54	351.49	351.43	351.41
PC03	358.76	358.75	358.72	358.69	358.68
PC04	336.99	336.97	336.92	336.89	336.72
PC05	355.19	355.11	355.09	355.05	355.04
PC06	352.76	352.69	352.64	352.58	352.49
PC07	350.42	350.40	350.39	350.35	350.33
PC08	334.20	334.18	334.12	334.08	334.05
PC09	355.32	355.29	355.25	353.46	353.41
PC10	354.08	354.01	353.96	353.89	353.84
PC11	349.44	349.41	349.33	349.30	349.23
PC12	344.80	344.44	344.38	344.34	343.89
Promedio	349.18	349.11	349.06	348.88	348.79

Tabla 4. Peso seco de probetas del ciclo 11 al ciclo 15.

Número de Probeta	Pesos de las probetas por ciclo (g)				
	11	12	13	14	15
PC01	346.41	346.31	346.28	346.26	346.23
PC02	351.34	351.24	351.21	351.16	351.13
PC03	358.68	358.64	358.64	358.60	358.59
PC04	336.71	336.66	336.64	336.64	336.63
PC05	355.03	354.98	354.96	354.95	354.95
PC06	352.43	352.33	352.28	352.21	350.99
PC07	350.35	350.30	350.29	350.28	350.28
PC08	334.01	333.99	333.95	333.93	333.89
PC09	353.31	353.22	353.20	353.19	353.18
PC10	353.83	353.77	353.71	353.69	353.68
PC11	349.25	349.15	349.09	349.07	349.03
PC12	343.88	343.83	343.81	343.79	343.77
Promedio	348.77	348.70	348.67	348.65	348.53

pérdidas de peso están más concentrados que el 25% de las mayores.

La Tabla 5, concentra los pesos promedio de los 15 ciclos, dados en las Tablas 2 a la 4, para obtener el porcentaje de pérdida de peso.

Tabla 5. Porcentaje promedio de pérdida de peso.

Tiempo (días)	Peso Promedio de las Probetas (g)	DWL (%)
0 (Inicial)	349.16	0.00
1	349.36	0.06
2	349.37	0.06
3	349.34	0.05
4	349.30	0.04
5	349.24	0.02
6	349.18	0.01
7	349.11	-0.01
8	349.06	-0.03
9	348.88	-0.08
10	348.79	-0.10
11	348.77	-0.11
12	348.70	-0.13
13	348.67	-0.14
14	348.65	-0.15
15	348.53	-0.18
17 (Final)	348.08	-0.31

A partir de los porcentajes promedio de la pérdida de peso en cada ciclo, se obtiene el comportamiento cinético del porcentaje de la pérdida de peso, mostrada en la Figura 15.

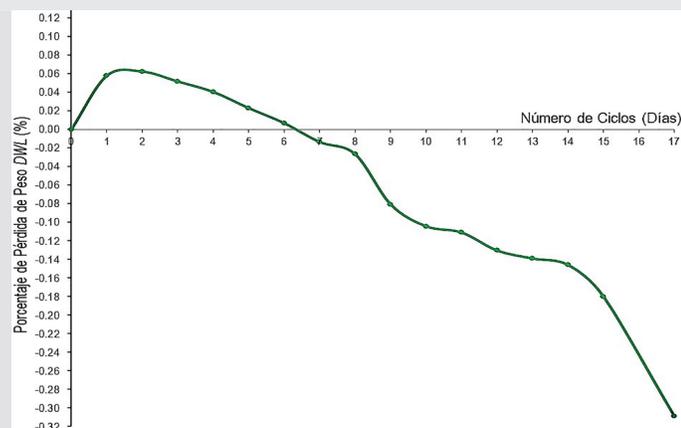


Figura 15. Gráfica del comportamiento cinético.

Como se observa en la Figura 15, en los dos primeros días el mármol tipo Café Tabaco expuesto a la cristalización de sales por cloruro de sodio gana peso debido a que absorbe cloruro de sodio; sin embargo, a partir del tercer día el material empieza a disminuir de peso. Además, en el séptimo día, en material empieza a tener una pérdida de peso, esto debido a que en algunas probetas se empieza a presentar disgregación granular.

Al término de la prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio, las principales alteraciones visuales sufridas en el mármol tipo Café Tabaco las cuales fueron: grietas superficiales como la mostrada en la probeta PC05 de la Figura 16, y rupturas como las mostradas en la probeta PC06 de la Figura 17.



Figura 16. Probeta PC05 con grietas superficiales.



Figura 17. Probeta PC06 con ruptura.

De los resultados obtenidos, se puede concluir que el mármol tipo Café Tabaco tiene un porcentaje de pérdida de peso de 0.31% con presencia de alteraciones visuales como agrietamientos y rupturas, y de acuerdo con la clasificación de Benavente [14], este material es de clase I, tiene una pérdida de peso menor del 1%; por lo tanto, este material es resistente a la cristalización de sales por cloruro de sodio, y es recomendable su uso para interiores y exteriores en zonas costeras.

Conviene subrayar que las alteraciones de peso y visuales presentadas afectan su principal cualidad estética que es el brillo; sin embargo, resulta adecuado que se pueda proteger utilizando hidrofugantes o antidegradantes que mitiguen las alteraciones, logrando con esto una mayor durabilidad.

Por otro lado, el presente estudio proporciona indicadores de cómo se comporta este material en condiciones de ambientes salinos, ayudando a los empresarios del sector marmolero de la región a conocer la calidad de su material. De igual forma, aporta en el área de la mecánica de rocas sobre estudios de degradación acelerada.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Orozco, W.; Branch, J.; Jiménez, J. (2014). *Clasificación de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas en secciones delgadas a través programación estructurada*. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (36), 5-9.

[2] Tarbuck, Eduard J.; Lutgens, Frederick K. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una Introducción a la Geología Física*. Editorial Pearson Education, S. A. Octava Edición. Madrid, España. ISBN: 84-205-4400-0.

[3] ASTM International. (2016), *ASTM C119-16 Standard Terminology Relating to Dimension Stone*. ASTM International. USA.

[4] Tlatempa, M.; Estrada, R.; Rubio, E.; Rodríguez, V. (2011). *Caracterización Microestructural del Mármol de la Cantera Café Tabaco, Procedente de Tepexi de Rodríguez, Puebla*. *Acta Microscópica*, 20(1), 60-65.

[5] Pancorbo Floristan, Francisco J. (2010) *Corrosión, Degradación y Envejecimiento de los Materiales Empleados en la Edificación*. Editorial Marcombo S.A. España. ISBN: 978-84-267-1576-0.

[6] Alonso, F.; Esbert, R; Ordaz, J. y Vázquez, P. (2006). *Análisis del Deterioro en los Materiales Pétreos de Edificación*. *RECOPAR*, 3, 23-32.

[7] De Rosario, I. y Feijoo, J. (2016). *Alteración de las Rocas y Otros Materiales de Construcción en los Monumentos*. *Técnicas de Conservación*.

Tecnología e Ciencias Experimentais. Universidad de Vigo. España.

[8] Leal, N.; Simao, J.; Gartmann, C. y Silva, Z. (2011). *Salt-fog experiments on consolidant and water-repellent treated dimension stones*. *International Conference of Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures*, 187-194.

[9] Unal, M.; Gundogdu, N. (2011). *The Effect of Salt Crystallization on Tuff used as Building Material*. *New World Sciences Academy*, 6(1), 41-49.

[10] Benavente, D.; Bernabéu, A. y Cañaveras, J. (2004). *Estudio de Propiedades Físicas de las Rocas*. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 12(1), 62-68.

[11] Jamshidi, A.; Reza, M. y Khamechiyan, M. (2013). *Estimating the Durability of Building Stones Against Salt Crystallization: Considering the Physical Properties and Strength Characteristics*. *JGeope* 3(2), 35-48.

[12] Freire, David. (2016). *El Granito como Piedra de Construcción en Madrid: Durabilidad y Puesta en Valor*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Geológicas, Departamento de Petrología y Geoquímica. Madrid, España.

[13] Alonso, F. (2013). *Durabilidad de Materiales Rocosos*. Universidad de Oviedo. Departamento de Geología (Petrología y Geología). España.

[14]. Benavente García, David. (2002). *Modelización y Estimación de la Durabilidad de Materiales Pétreos Porosos Frente a la Cristalización de Sales*. Tesis doctoral. Universidad de Alicante, Facultad de Ciencias, Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Alicante, España.