

Comparación de la Alteración del Peso en el Mármol tipo Café Tabaco mediante Cristalización de Sales por Cloruro de Sodio

A. M. Morales-Tassinari^{1,*}, P. Cruz-Ortega¹, M. E. Velasco-Ordoñez¹, A. Servín-Martínez².

Resumen—El presente estudio tuvo como finalidad determinar el porcentaje de pérdida de peso en el mármol tipo Café Tabaco procedente de Agua de Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, mediante una prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio. Para la prueba de cristalización de sales se utilizaron 4 grupos de 12 probetas con dimensiones de 50X50X50 mm y una tolerancia de ± 0.5 mm en cada cara. La prueba de cristalización de sales consistió en el secado de las 48 probetas a temperatura de 60 ± 2 °C durante 16 horas, enfriado de las probetas a temperatura ambiente durante 2 horas e inmersión de las probetas a temperatura ambiente durante 6 horas en solución de cloruro de sodio con concentraciones de 10%, 16% y 20%. El resultado obtenido es que el mármol tipo Café Tabaco tuvo el mayor porcentaje de pérdida de peso del 95.76% en la solución de cloruro de sodio al 16%. Este porcentaje de pérdida de peso tiene un efecto adverso en el mármol tipo Café Tabaco; por lo que, tiene una pérdida de cohesión provocando con esto una disminución de sus propiedades tanto estéticas como físicas.

Palabras claves—Alteración del peso, café tabaco, cloruro de sodio, cristalización de sales, mármol.

Abstract—The present study had the purpose to determine the percentage of weight loss in the marble type Café Tabaco from Agua de Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, Mexico, through a salt crystallization test by sodium chloride. For the salt crystallization test, 4 groups of 12 specimens with dimensions of 50X50X50 mm and a tolerance of ± 0.5 mm on each side were used. The salt crystallization test consisted of drying the 48 specimens at 60 ± 2 °C for 16 hours, cooling the specimens at room temperature for 2 hours and immersing the specimens at room temperature for 6 hours in sodium chloride solution with concentrations of 10%, 16% and 20%. The result obtained is that the marble type Coffee Tobacco had the highest percentage of weight loss of 95.76% in the solution of sodium chloride to 16%. This percentage of weight loss has an adverse effect on the marble type Coffee Tobacco; so that, it has a loss of cohesion, thereby causing a decrease in both its aesthetic and physical properties.

Keywords— Weight alteration, coffee tobacco, sodium chloride, salt crystallization, marble.

XXX. INTRODUCCIÓN

En la localidad de Agua de Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, existe una cantera de mármol tipo Café Tabaco, que es una roca metamórfica de color café oscuro con vetas claras sin patrón de orientación, que puede ser utilizada para fines de construcción y ornamentales. En la Figura 1, se muestra una fotografía de este material:

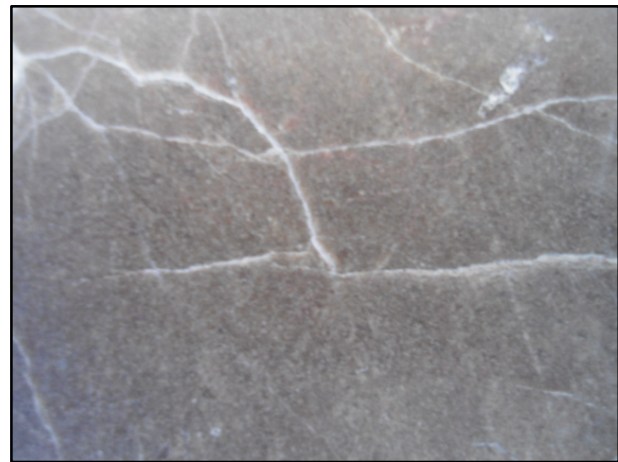


Figura 1. Mármol tipo Café Tabaco.

Las piedras 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, resistencia...); por lo que, el resultado de la alteración de los materiales rocosos puede verse como el paso de una roca sana más o menos compacta y coherente, a una roca alterada menos coherente o de peor aspecto [1].

En las últimas décadas, muchos estudios de campo y de laboratorio han demostrado que el deterioro salino es un mecanismo importante de la degradación de la piedra [2]. Las sales se movilizan en disoluciones acuosas hacia el interior de la roca, cuando el agua se evapora cristalizan dependiendo de la solubilidad de la sal, de las características del sistema poroso del material y de las

¹ Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez, Ingeniería Mecánica. Av. Tecnológico s/n, Colonia Barrio San Sebastián Sección Primera, C.P. 74690, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México.

² Instituto Tecnológico de Veracruz, Departamento de Metal-Mecánica. Cza. Miguel Ángel de Quevedo 2779, Colonia Formando Hogar, C.P. 82690, Veracruz, Veracruz, México.

* tassinari.adolfo1973@gmail.com

condiciones ambientales; de esta forma, si la sal es muy soluble puede aparecer cristalización en la superficie de las piedras en forma de eflorescencias, que no son estables y se ven modificadas por variaciones en la humedad, pero si la sal es poco soluble cristaliza en el interior de la roca siguiendo una pauta de distribución que depende en gran medida de las características físicas de la roca [3].

La presencia de sales solubles no solamente altera el aspecto cuando se hacen visibles como eflorescencias, sino que pueden originar daños considerables cuando cristalizan en el interior de poros y capilares; por lo que, ponen de manifiesto que todas las sales solubles pueden producir un deterioro muy fuerte en los materiales porosos, cristalizando en los poros pueden llegar a desmoronar la fábrica de dichos materiales [4].

La cristalización de sales solubles afecta a innumerables materiales empleados en la construcción, desde rocas y piedras naturales, morteros, revocos y ladrillos, a esculturas policromadas, pinturas murales y muchos otros materiales usados tradicionalmente en la construcción o como elementos decorativos [5]. Esta cristalización se da cuando una disolución rica en sales entra en el sistema poroso en un material, y puede precipitar fases minerales salinas cuya cristalización genera una determinada presión [6]; así, las presiones ejercidas por la cristalización de sales solubles en el interior de poros o microfisuras del material pétreo puede originar fenómenos disruptivos, sobre todo en aquellos materiales con mayor abundancia de microporos, dando lugar a diferentes formas de deterioro físico-químico [7]. La alteración sufrida por el material implica tanto alteración estética como disminución de propiedades mecánicas (pérdida de cohesión de material y pérdida de masa) [6].

El presente trabajo realiza un estudio comparativo de la alteración del peso sufrida por el mármol tipo Café Tabaco de la cantera procedente de Agua de Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, mediante una prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio.

XXXI. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

La empresa Mármol Tepeaca S.A. de C.V., procesó las probetas cúbicas de mármol tipo Café Tabaco; así, del grupo de probetas procesadas por la empresa, se seleccionaron 48 probetas con base al color característico café obscuro y que en cada una de sus caras tuviera una dimensión de 50 ± 0.5 mm. A las 48 probetas se les asignó un número para que fueran identificadas durante la prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio; de esta forma, las probetas PA01 a la PA12 son las probetas del grupo de control, las probetas PB01 a la PB12 son las probetas para la prueba con cloruro de sodio al 10%, las

probetas PC01 a la PC12 son las probetas para la prueba con cloruro de sodio al 16% y las probetas PD01 a la PD12 son las probetas para la prueba con cloruro de sodio al 20%. En la Figura 2, se muestra la fotografía de las 48 probetas:

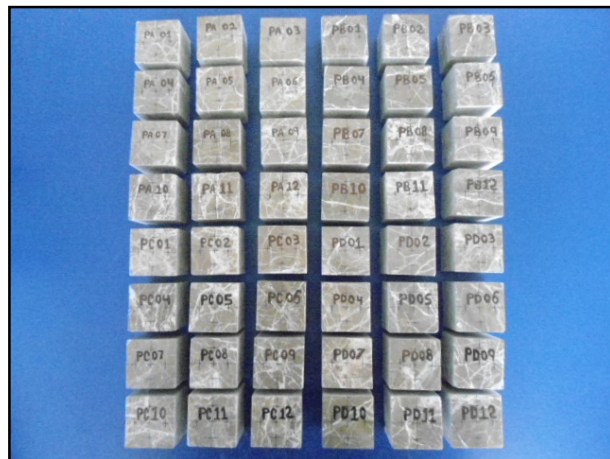


Figura 2. Probetas para la prueba de cristalización de sales.

A. Obtención del peso seco inicial de las probetas

Para el secado inicial de las 48 probetas de mármol tipo Café Tabaco, el horno de secado marca Memmert modelo UP500 se precalentó a una temperatura de 60°C . Después, se colocaron las probetas en dos charolas y se introdujeron en el horno de secado. Finalmente, las probetas se mantuvieron dentro del horno de secado a temperatura de $60 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 48 horas. En la Figura 3, se muestra una fotografía de las 48 probetas dentro del horno de secado:



Figura 3. Probetas dentro del horno secado.

Para garantizar que las probetas estuvieran secas, se pesaron con una báscula digital marca Mettler Toledo modelo PB3002-S DeltaRange® en la hora 46, 47, y 48, a

temperatura ambiente.

De esta forma, como los pesos no variaron se consideró que las probetas estaban secas. En las Figuras 4a), 4b), 4c) y 4d) se muestran las fotografías del peso seco inicial de las probetas PA01, PB01, PC01 y PD01 respectivamente:

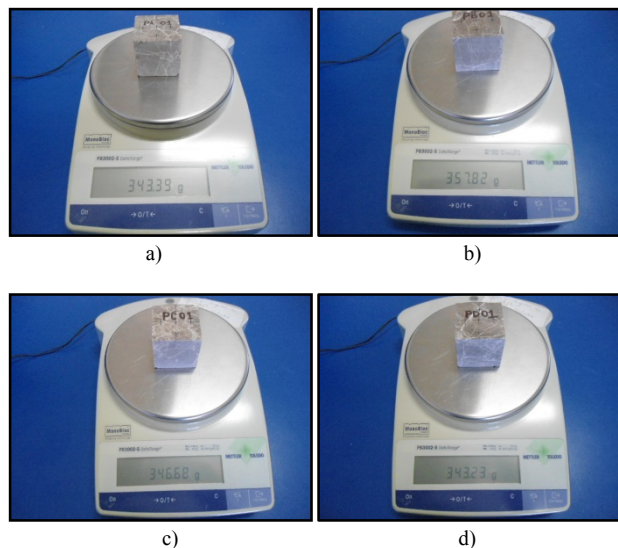


Figura 4. a) Peso seco inicial de la probeta PA01; b) Peso seco inicial de la probeta PB01; c) Peso seco inicial de la probeta PC01; d) Peso seco inicial de la probeta PD01.

B. Obtención del peso saturado de las probetas

Después de obtener el peso seco inicial, las probetas PA01 a PA12 del grupo de control se sumergieron en el contenedor con agua destilada, las probetas PB01 a PB12 se sumergieron en el contenedor con cloruro de sodio al 10%, las probetas PC01 a PC12 se sumergieron en el contenedor con cloruro de sodio al 16% y las probetas PD01 a PD12 se sumergieron en el contenedor con cloruro de sodio al 20%. En la Figura 5, se muestra una fotografía de las probetas sumergidas en las distintas soluciones:

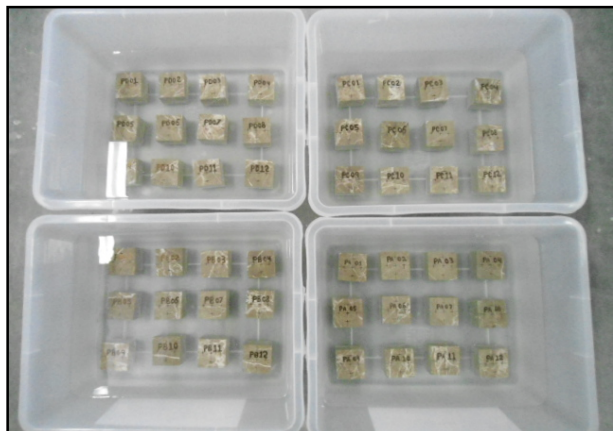


Figura 5. Probetas sumergidas en las soluciones.

Para garantizar que las probetas estuvieran saturadas, se pesaron con una báscula digital marca Mettler Toledo modelo PB3002-S DeltaRange® en la hora 46, 47, y 48, a temperatura ambiente; de esta forma, como los pesos no variaron se consideró que las probetas estaban saturadas. En las Figuras 6a), 6b), 6c) y 6d) se muestran las fotografías del peso saturado de las probetas PA01, PB01, PC01 y PD01 respectivamente:

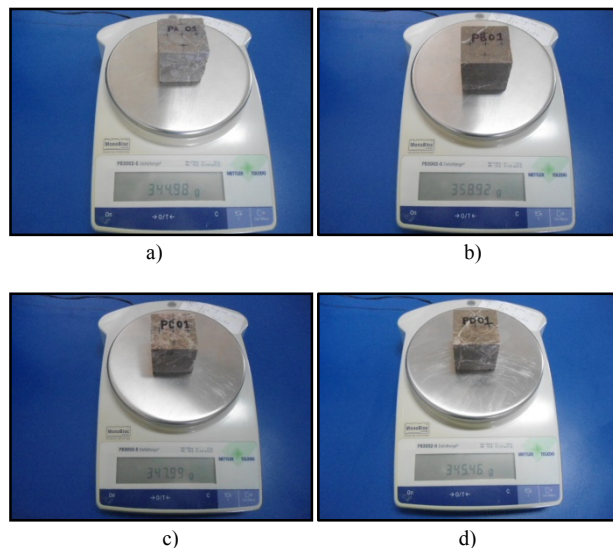


Figura 6. a) Peso saturado de la probeta PA01; b) Peso saturado de la probeta PB01; c) Peso saturado de la probeta PC01; d) Peso saturado de la probeta PD01.

C. Ciclo de prueba de cristalización de sales

El ciclo de prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio inició con el secado de las 48 probetas de mármol tipo Café Tabaco saturadas; para esto, se utilizó una horno marca Memmert modelo UP500 a una temperatura de 60±2°C durante 16 horas. Al terminar el tiempo de secado, las probetas se sacaron del horno y se pesaron con una báscula digital para obtener el peso de cada probeta y se dejaron enfriar a temperatura ambiente durante 2 horas, para evitar en lo posible un choque térmico superficial.

Después de haber estado durante 2 horas en enfriamiento a temperatura ambiente, las probetas se sumergieron en los contenedores con las distintas soluciones salinas; así, en el contenedor con agua destilada se sumergieron las probetas PA01 a PA12, en el contenedor con cloruro de sodio al 10% se sumergieron las probetas PB01 a PB12, en el contenedor con cloruro de sodio al 16% se sumergieron las probetas PC01 a PC12 y en el contenedor con cloruro de sodio al 20% se sumergieron las probetas PD01 a PD12. Cabe mencionar que, las probetas permanecieron sumergidas durante 6

horas a temperatura ambiente para que absorbieran la solución salina.

Al término de esas 6 horas, se sacaron las probetas de las soluciones salinas terminando así un ciclo de prueba de 24 horas. De esta manera, el ciclo de prueba de secado-enfriado-inmersión que duró 24 horas, se repitió durante 15 ciclos. En las Figuras 7a), 7b) y 7c), se muestran las fotografías del proceso de los ciclos de la prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio:

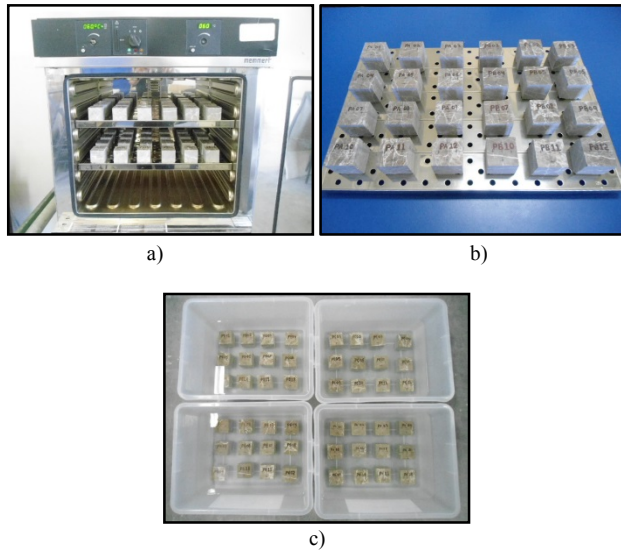


Figura 7. a) Secado de las probetas; b) Enfriado de las probetas; c) Inmersión de las probetas.

D. Lavado de las probetas

Después del quinceavo ciclo, las 48 probetas de mármol tipo Café Tabaco se lavaron con agua destilada hasta que la sal fuera eliminada por completo; para esto, se vertieron 10 litros de agua destilada en un contenedor y se lavaron superficialmente las probetas. Al término del lavado, las probetas se sumergieron en agua destilada durante dos horas y se verificó la resistividad del agua destilada. Se realizaron cuatro lavados hasta que la resistividad del agua destilada fuera la misma antes y después del lavado. En la Figura 8a), se muestra una fotografía del lavado superficial de las probetas; mientras que en la Figura 8b), se muestra una fotografía de la medición de la resistividad:



Figura 8. a) Lavado de las probetas; b) Medición de la resistividad

E. Obtención del peso seco final de las probetas

Para el secado final de las 48 probetas de mármol tipo Café Tabaco, las 48 probetas se introdujeron en el horno de sacado a una temperatura de $60\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 48 horas. En la Figura 9, se muestra una fotografía de las 48 probetas dentro del horno de secado:



Figura 9. Probetas dentro del horno de secado.

Para garantizar que las probetas estuvieran secas, se pesaron con una báscula digital marca Mettler Toledo modelo PB3002-S DeltaRange® en la hora 46, 47, y 48; por lo que, como los pesos no variaron se consideró que las probetas estaban secas. En las Figuras 10a), 10b), 10c) y 10d) se muestran las fotografías del peso seco final de las probetas PA01, PB01, PC01 y PD01 respectivamente:

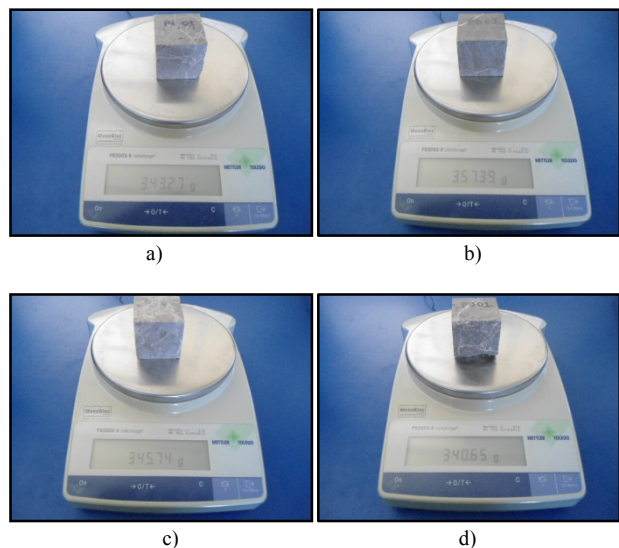


Figura 10. a) Peso seco final de la probeta PA01; b) Peso seco final de la

probeta PB01; c) Peso seco final de la probeta PC01; d) Peso seco final de la probeta PD01.

XXXII. RESULTADOS

A partir del peso seco inicial (M_o) y del peso seco final (M_f) se obtiene el porcentaje de la pérdida de peso (DWL) mostrada en la ecuación (1):

$$DWL = \frac{M_o - M_f}{M_f} \times 100\% \quad (1)$$

En la Tabla I, se muestran los resultados obtenidos del porcentaje de la pérdida de peso en las distintas soluciones.

Tabla I
PORCENTAJE DE PÉRDIDA DE PESO

Solución	No. Probeta	M_o (g)	M_f (g)	DWL (%)
Agua Destilada	PA01	343.39	343.27	0.03
	PA02	355.04	354.88	0.05
	PA03	358.39	358.25	0.04
	PA04	345.10	344.97	0.04
	PA05	363.38	363.25	0.04
	PA06	338.29	338.19	0.03
	PA07	350.53	350.41	0.03
	PA08	349.34	349.23	0.03
	PA09	346.17	346.06	0.03
	PA10	348.15	348.02	0.04
	PA11	348.31	348.22	0.03
	PA12	350.17	350.07	0.03
Cloruro de Sodio al 10%	PB01	357.82	357.39	0.12
	PB02	354.76	354.28	0.14
	PB03	329.92	329.59	0.10
	PB04	344.82	344.28	0.16
	PB05	344.21	343.71	0.15
	PB06	348.28	347.82	0.13
	PB07	354.13	353.83	0.08
	PB08	342.87	341.85	0.30
	PB09	347.36	346.79	0.16
	PB10	351.10	350.64	0.13
	PB11	338.87	338.19	0.20
	PB12	349.86	349.36	0.14
Cloruro de Sodio al 16%	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
Cloruro de Sodio al 20%	PD01	343.23	340.65	0.76
	PD02	347.25	346.77	0.14
	PD03	345.25	344.54	0.21
	PD04	344.26	343.62	0.19
	PD05	355.47	354.74	0.21
	PD06	345.84	345.54	0.09
	PD07	346.49	345.99	0.14
	PD08	354.01	353.55	0.13

PD09	339.37	338.26	0.33
PD10	354.65	354.40	0.07
PD11	349.90	348.99	0.26
PD12	356.75	356.16	0.17

Después, se realizó un análisis de varianza de un factor para determinar si existía una diferencia significativa entre el porcentaje de pérdida de peso y el porcentaje de cloruro de sodio. En la Tabla II, se muestra el resultado obtenido del análisis de varianza:

Tabla II
RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VARIANZA

Resumen						
Grupos	Cuenta	Suma	Prom.	Varianza		
Agua Destilada	12	0.41	0.03	0.00003		
Cloruro de Sodio al 10%	12	1.81	0.15	0.003		
Cloruro de Sodio al 16%	12	3.70	0.31	0.04		
Cloruro de Sodio al 20%	12	2.68	0.22	0.03		
Resultados del análisis de varianza						
Origen de las variación	Suma de cuad.	Grados de libertad	Prom. de los cuad.	F	Prob.	Valor crítico para F
Entre grupos	0.486	3	0.16	8.97	0.00009	2.82
Dentro de grupos	0.794	44	0.02	-	-	-
Total	1.281	47	-	-	-	-

De la Tabla II, se observa que el valor de $F=8.97$ es mayor que $F_{crítico}=2.82$; esto quiere decir que, con una significancia del 5% sí existe una diferencia significativa entre las distintas soluciones salinas de cloruro de sodio. Por lo tanto, en la solución de cloruro de sodio al 16% se tiene el mayor porcentaje de pérdida de peso; de tal forma que, el mármol tipo Café Tabaco pierde en promedio un 0.31% de su peso.

Además, mediante el mecanismo de disgregación granular las probetas presentaron alteraciones visuales como grietas y rupturas. En la Figura 11a), se muestra la fotografía de la probeta PC05 con una grieta pasando por el centro de la probeta y una ruptura en la parte central derecha; mientras que en la Figura 11b), se muestra una fotografía de la probeta PC12 con agrietamientos en la parte central y una ruptura en la parte central inferior:

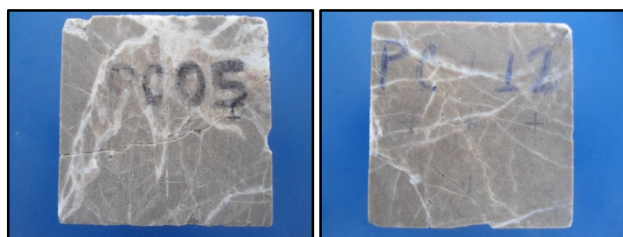


Figura 11. a) Grieta en la probeta PC05; b) Ruptura en la probeta PC12.

XXXIII. DISCUSIÓN, CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con el estudio realizado al mármol tipo Café Tabaco procedente de Agua de Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, sometido a una prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio se obtuvo un porcentaje de pérdida de peso del 0.31% cuando la concentración de cloruro de sodio es de 16%; además, por el mecanismo de disgregación granular algunas probetas presentaron fisuras y rupturas.

De esta forma, con base en la tipología para la alteración de peso en materiales pétreos dada por Benavente [8], el mármol tipo Café Tabaco se considera como Tipo I, ya que tiene una pérdida de masa de entre 0 a 1%; por lo tanto, este material resulta aceptable como piedra de construcción y se recomienda su uso para interiores y exteriores en ambientes salinos. Sin embargo, aunque el porcentaje de pérdida de peso es bajo, se debe considerar el uso de recubrimientos para mejorar la durabilidad de este material.

En otro orden de ideas, para conocer cómo se comporta el mármol tipo Café Tabaco en ambientes contaminados, es importante realizar un estudio de cristalización de sales por sulfato de sodio para determinar el porcentaje de la pérdida de peso y realizar una comparación con los resultados obtenidos en el presente estudio.

XXXIV. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez por el financiamiento otorgado; además, agradecen a la empresa Mármoles Tepeaca S.A. de C.V. por haber procesado las probetas para el estudio.

XXXV. REFERENCIAS

[54] Alonso, F. J.; Eibert, R. M., Ordaz, J. y Vázquez, P. (2006). "Análisis del deterioro en los materiales pétreos de edificación". *RECOPAR*, no. 3, pp. 23-32.

[55] Rodríguez, C. y Doehtne, E. (1998). "Salt weathering; Influence of evaporation rate, supersaturaton and crystallization pattern". *Earth Surface Processes and Landforms*, no. 24, pp. 191-209.

[56] Aria, N. (2007). "Pátinas oscuras sobre rocas graníticas: Génesis y composición" Tesis Doctoral. Departamento de Edafología e Química Agrícola, Facultad de Biología, Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela, España.

[57] Grossi, C. M. y Eibert, R. M. (1994). "Las sales solubles en el deterioro de rocas monumentales. Revisión bibliográfica". *Materiales de Construcción*, vol. 44, no. 235.

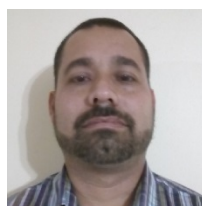
[58] Cardell, C. (2013). "Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al monasterio de San Jerónimo, Granada". Tesis Doctoral. Departamento de Minerología y Petrología. Universidad de Granada. Granada, España.

[59] Benavente, D.; Bernabéu, A. y Cañaveras, J. (2004). "Estudio de propiedades físicas de las rocas". *Enseñanzas de la Ciencia de la Tierra*, año 12, vol.1, pp. 62-68.

[60] Eibert, R; Montoto, M. y Ordaz, J. (1991). "La piedra como material de construcción: Durabilidad, deterioro y conservación". *Materiales de Construcción*, vol. 41, no. 221, pp. 61-73.

[61] Benavente, D. (2002). "Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos frente a la cristalización de sales" Tesis Doctoral. Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias. Universidad de Alicante. España.

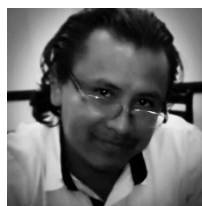
XXXVI. BIOGRAFÍA



Morales Tassinari Adolfo Manuel. Nació el 19 de Junio de 1973 en Veracruz, Veracruz, México. Es:
 -Ingeniero Industrial Mecánico titulado en 1998 por el Instituto Tecnológico Veracruz ubicado en Veracruz, Veracruz, México.
 -Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica titulado en 2015 por el Instituto Tecnológico de Veracruz ubicado en Veracruz, Veracruz, México.

El actualmente labora en el Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez ubicado en Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, como docente de Ingeniería Mecánica. Además, es líder de la línea de investigación de Caracterización e Industrialización de Materiales Pétreos.

M.C. Morales obtuvo el reconocimiento como Green Belt Lean Six Sigma en 2015 y al Mérito Investigador durante el Congreso Internacional de Academia Journals Fresnillo 2017.



Cruz Ortega Pedro. Nació el 05 de Octubre de 1985 en Ciudad Netzahualcóyotl, Estado de México, México. Es:
 -Ingeniero Mecánico titulado en 2008 por el Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez ubicado en Tepexi de Rodríguez, Puebla, México.

El actualmente labora en el Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez ubicado en Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, como docente de Ingeniería Mecánica. Además, es colaborador de la línea de investigación de Caracterización e Industrialización de Materiales Pétreos.

Ing. Cruz obtuvo el reconocimiento al Mérito Investigador durante el Congreso Internacional de Academia Journals Fresnillo 2017.



Velasco Ordóñez María Esperanza. Nació el 12 de Enero de 1971 en Tepexi de Rodríguez, Puebla, México. Es:
 -Ingeniera Mecánica titulada en 2002 por el Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez ubicado en Tepexi de Rodríguez, Puebla, México.

Ella actualmente labora en el Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez ubicado en Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, como Jefa de División de Ingeniería Mecánica. Además, es colaboradora de la línea de investigación de Caracterización e Industrialización de Materiales Pétreos.

Servín Martínez Alberto. Nació el 15 de Febrero de 1954 en Xalapa, Veracruz, México. Es:



-Ingeniero Industrial Mecánico titulado en 1984 por el Instituto Tecnológico Veracruz ubicado en Veracruz, Veracruz, México.

-Maestro en Ingeniería Mecánica titulado en 1995 por la Universidad Autónoma del Estado de México ubicada en Toluca, Estado de México, México.

-Doctor en Ciencias Químicas titulado en 2004 por la Universidad Nacional Autónoma de México ubicada en Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.

El actualmente labora en el Instituto Tecnológico Veracruz en Veracruz, Veracruz, México, como profesor-investigador y docente de Ingeniería Mecánica y de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica.

Dr. Servín obtuvo el reconocimiento como profesor-investigador en el 50vo. Aniversario del Instituto Tecnológico de Veracruz.