



## ESTUDIO COMPARATIVO DE ALTERACIÓN DEL PESO EN EL MÁRMOL TIPO CAFÉ TABACO MEDIANTE ENSAYO DE CRISTALIZACIÓN DE SALES POR SULFATO DE SODIO

ADOLFO MANUEL MORALES TASSINARI, MARÍA ESPERANZA VELASCO ORDÓNEZ, JAIME RAMÍREZ PEÑA

Tecnológico Nacional de México  
Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez  
Av. Tecnológico s/n, Col. Barrio San Sebastián Sección Primera  
CP. 74690, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México

*(Recibido 26 de julio de 2019, revisado 12 de noviembre de 2019, para publicación 14 de enero de 2020)*

**Resumen** – El presente estudio tiene como propósito determinar el porcentaje de pérdida de peso en el mármol tipo Café Tabaco extraído de la cantera ubicada en Agua de la Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, mediante un ensayo de cristalización de sales por sulfato de sodio. Para el ensayo se utilizaron 4 grupos de 12 probetas cúbicas con dimensión de  $50 \pm 0.5$  mm en cada lado. El ensayo consistió en secar las probetas a temperatura de  $60^\circ\text{C}$  durante 16 horas, después se enfriaron a temperatura ambiente durante 2 horas, y finalmente se sumergieron en solución de sulfato de sodio en porcentajes del 10%, 14% y 20% durante 6 horas. Este proceso de secado, enfriado e inmersión se repitió durante 15 ciclos. El resultado obtenido en este estudio fue que el mármol tipo Café Tabaco tiene un porcentaje de pérdida de peso del 7.54%; por lo que, presenta un cambio significativamente grande en su peso capaz de disminuir sus propiedades de resistencia, su brillo y su belleza estética. En conclusión, este material no se recomienda para usos en exteriores en ambientes contaminados. Sin embargo, el uso de recubrimientos permitiría mitigar esta pérdida de peso; por ende, mitigar las pérdidas de sus propiedades.

**Palabras clave** – Alteración del peso, ensayo de cristalización de sales, mármol tipo Café Tabaco, sulfato de sodio.

### 1. INTRODUCCIÓN

La roca es uno de los materiales más abundantes en la naturaleza y han sido consideradas como elementos constructivos y ornamentales. Las rocas son agregados naturales duros y compactos de partículas minerales con fuertes uniones cohesivas permanentes, que habitualmente se consideran un sistema continuo; por lo que, la proporción de diferentes minerales, la estructura granular, la textura y el origen de la roca sirven para su clasificación geológica [1]. En este sentido, las rocas se clasifican por su origen en: a) rocas ígneas, formadas por el enfriamiento y la solidificación del magma del interior de la Tierra; b) rocas sedimentarias, formadas por sedimentos y partículas mediante la meteorización de otras rocas, la acumulación de material de origen biológico, la precipitación de sustancias químicas o bioquímicas, o una combinación de ellas; y c) rocas metamórficas, son aquellas que sufrieron cambios en la mineralogía y estructura por la presión y temperatura a grandes profundidades en el interior de la Tierra [2].

Aunque se trate de un material considerado resistente a la intemperie, las rocas casi nunca se encuentran en equilibrio con el ambiente en el cual se hallan, lo que provoca modificaciones en sus características iniciales [3]. En la actualidad, el fenómeno de cristalización de sales solubles es uno de los agentes de alteración más frecuente y perjudicial que afecta a materiales rocosos empleados en la construcción [4]. La cristalización de sales se da cuando una disolución rica en sales entra en el sistema poroso en un material en el que precipitan fases minerales salinas cuya cristalización genera una determinada presión [5]. Además, la presión de cristalización es el mecanismo que mayor deterioro produce durante la cristaliza-

ción de las sales [6]. Entre las sales solubles, el sulfato de sodio se considera un factor muy peligroso para la descomposición de la roca, debido a su fuerte presión de cristalización [7]. Por lo que, la alteración sufrida en la roca implica tanto alteración estética (aparición de eflorescencias) como disminución de propiedades mecánicas (pérdida de cohesión de material, pérdida de masa) [5].

Un estudio importante a realizar en una roca con fines ornamentales y/o constructivos es la caracterización de su durabilidad, es decir, la resistencia que ofrece el material al deterioro producido por diferentes agentes de meteorización (agua, temperatura, cristalización de sales solubles) [8]. Además, para 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 en el tiempo [9]. Cabe mencionar que, la capacidad de un material para resistir la cristalización de sales generalmente se evalúa sometiendo los materiales pétreos a ensayos acelerados de cristalización de sales en el laboratorio [10]. En este sentido, la prueba de cristalización de sales es un ensayo acelerado de durabilidad que trata de reproducir de forma acelerada la alteración sufrida en un material expuesto a condiciones ambientales extremas [5]. Los daños se atribuyen al incremento de volumen debido a los procesos de cristalización y a los de hidratación de las sales, sobre todo cuando dichos procesos tienen lugar en el interior de los poros [11].

Además, el sulfato de sodio es el tipo de sal más perjudicial en las pruebas de cristalización, por esta razón a menudo se prescribe en los procedimientos de prueba [10]. Como el sulfato de sodio es una sal soluble, puede aparecer cristalizada en la superficie de la piedra en forma de eflorescencias [12]. En este sentido, la eflorescencia es la acumulación cristalina, pulverulenta y blancuzca sobre la superficie del material, como resultado de la evaporación del agua cargada de sales y alojada en los poros de la piedra [13]. Por lo tanto, estas eflorescencias provocan modificaciones en el peso de cualquier roca.

Existen diversas investigaciones donde se ha determinado el porcentaje de pérdida de peso en rocas mediante ensayos de cristalización de sales por sulfato de sodio, por ejemplo, en Galicia, España, el granito tipo Gis Alba tuvo un porcentaje de pérdida de peso del  $0.003 \pm 0.005\%$  [14]. Mientras que, en la Comarca de Macael, Almería, España, el mármol tipo Blanco Macael Río tuvo un porcentaje de pérdida de peso del  $0.19\%$  [15]. Además, en la Ciudad de Konya, Turquía, el travertino tipo Godene tuvo un porcentaje de pérdida de peso del  $0.20377 \pm 0.301928\%$  [16]. También, en la provincia de Syracuse, Cassibile, Sicilia, Italia, la caliza tipo Cassibile tuvo un porcentaje de pérdida de peso del  $19.65\%$  [17].

Ahora bien, una roca metamórfica importante 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, y compuesta principalmente por minerales de calcita y/o dolomita [18]. En la localidad de Agua de la Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, se encuentra una cantera de mármol tipo Café Tabaco cuyo color característico es café oscuro presentando vetas color claras sin un patrón definido. En una investigación realizada a esta cantera de mármol tipo Café Tabaco, se determinó que presenta morfologías con cristales de hábito irregular, muy planas, curvos en formas masivas y compactas con una dimensión de  $20 \mu\text{m}$  a  $150 \mu\text{m}$ . También, existen morfologías con un tamaño de grano no regular, con superficies fracturadas y mayor rugosidad con una dimensión de  $10 \mu\text{m}$  constituidas principalmente por C, O, Ca y Mg. Además, se identificaron dos fases presentes en los estratos correspondiente a la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y dolomita [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ] con un sistema cristalino romboédrico. Mientras que, por espectroscopia infrarroja se identificaron las tres bandas características del carbonato en  $1419.10 \text{ cm}^{-1}$ ,  $876.65 \text{ cm}^{-1}$  y  $727.44 \text{ cm}^{-1}$ ; así como, las bandas características de la dolomita en  $1040.14 \text{ cm}^{-1}$  y  $728 \text{ cm}^{-1}$  [19].

Además, mediante ensayos de caracterización física se determinó que el mármol tipo Café Tabaco tiene un porcentaje de absorción de agua del  $0.34\%$  y una densidad de  $2773 \text{ kg/m}^3$  [20]. También, mediante una prueba de humedad-sequedad se obtuvo un porcentaje de pérdida de peso del  $0.03\%$  [21] y un porcentaje de aumento en la rugosidad del  $26.54\%$  [22] debido al proceso de disgregación granular. Mientras que, mediante una prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio se obtuvo un porcentaje de aumento en la rugosidad del  $94.54\%$  [23] debido al deterioro por disolución de sales.

La presente investigación tiene como finalidad determinar el porcentaje de pérdida de peso mediante una prueba de cristalización de sales por sulfato de sodio en el mármol tipo Café Tabaco que se extrae de la cantera ubicada en Agua de la Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México. Para esto, se aplicó el ensayo de cristalización de sales, que consiste en la saturación de las muestras a ensayar en una disolución salina de sulfato de sodio, y su posterior secado; después de un periodo de enfriamiento, se completa el

ciclo con la nueva inmersión de las probetas en la disolución [5]. Cabe aclarar que, la norma UNE-EN 12370 menciona que se debe de utilizar una concentración de sulfato de sodio al 14% [24]; en este sentido, esta concentración de sulfato sódico anhidro se encuentra en estado saturado [25]. Sin embargo, puede ser interesante analizar el comportamiento de la pérdida de peso cuando se tiene una concentración de sulfato sódico menor o mayor que lo sugerido por la norma; de esta forma, se pudiera esperar que una concentración menor de sulfato sódico resulte en una menor pérdida de peso y una mayor concentración provoque una mayor pérdida de peso. Además, aunque la norma sugiere que se realice la medición de la pérdida de peso hasta el final de los 15 ciclos, se realizó la medición de la masa de las probetas al término de cada ciclo; de esta forma, se crea una serie de tiempo con las mediciones de la pérdida de la masa.

## 2. METODOLOGÍA

La prueba de cristalización de sales por sulfato de sodio realizada al mármol tipo Café Tabaco de la cantera ubicada en Agua de la Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, se realizó en el Laboratorio de Ciencias e Investigación en Materiales (LACIIM) ubicado en el Centro de Competitividad y Tecnología para la Industria del Mármol del Estado de Puebla (CECOTIMEP) perteneciente al Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez en la Ciudad de Tepexi de Rodríguez, Puebla, México. Para la realización de la prueba se utilizaron los siguientes equipos y materiales: pulidora marca MTI modelo UNIPOL-820, vernier digital marca POINT modelo DC-KH6, horno de secado marca MEMMERT modelo UP500, báscula digital marca METTLER TOLEDO modelo SP30002-S, termómetro digital marca MATEST, lijas con tamaño de grano 400, agua destilada marca HERCOTEC y sulfato de sodio anhidro.

### 2.1. Selección y preparación de las probetas

La empresa Mármoles de Tepeaca S.A., procesó las probetas del mármol tipo Café Tabaco empleadas para la prueba de cristalización de sales por sulfato de sodio. Para esto, se tomaron muestras de la cantera ubicada en la localidad de Agua de la Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México. En la Fig. 1, se muestra la cantera; mientras que en la Fig. 2, se muestra una fotografía de la superficie del mármol tipo Café Tabaco.

De las probetas procesadas, se seleccionaron 48 probetas que tuvieran una dimensión de  $50 \pm 0.5$  mm en cada lado; además, que tuvieran el color café oscuro característico del material. Estas 48 probetas seleccionadas fueron separadas en 4 grupos de 12 probetas de acuerdo con el diseño experimental para la prueba de cristalización de sales por sulfato de sodio. Para la preparación de las 48 probetas, las probetas fueron lijadas y pulidas con la pulidora para eliminar las imperfecciones del proceso de corte. Posteriormente, se les asignó un número para que fueran identificadas durante la prueba de cristalización de sales por sulfato de sodio; de esta manera, se les asignaron los números PA01 a PA12, PB01 a PB12, PC01 a PC12 y PD01 a PD12.



Fig. 1. Fotografía de la cantera.

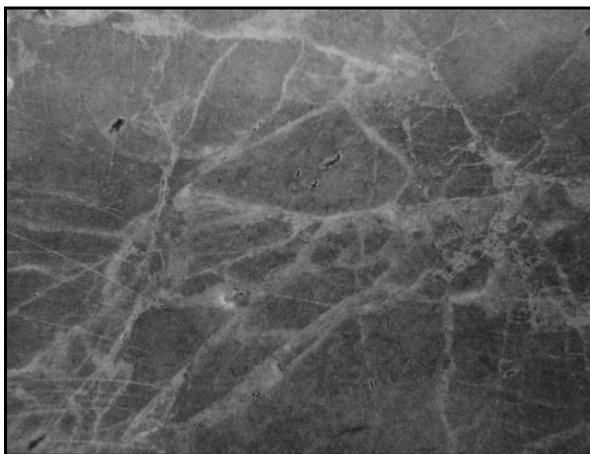


Fig. 2. Fotografía del mármol tipo Café Tabaco.



Fig. 3. Fotografía del lijado de probetas.

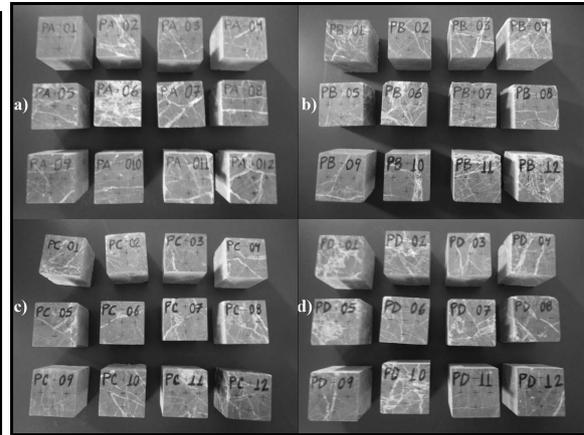


Fig. 4. Fotografías de las probetas para la prueba:  
a) Probetas PA01-PA12; b) Probetas PB01-PB12.

En la Fig. 3, se muestra una fotografía del proceso de pulido; mientras que, de la Fig. 4a) a la Fig. 4d), se muestran las fotografías de los 4 grupos de probetas debidamente preparadas para la prueba.

## 2.2. Peso seco inicial de las probetas

Para el secado inicial de las 48 probetas de mármol tipo Café Tabaco, el horno de secado se precalentó a una temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ . Después, se colocaron las probetas en dos charolas y se introdujeron en el horno de secado de la siguiente forma: en la charola de arriba se colocaron las probetas PA01-PA12 y PB01-PB12, mientras que en la charola de abajo se colocaron las probetas PC01-PC12 y PD01-PD12. Las 48 probetas se mantuvieron dentro del horno de secado a una temperatura de  $60 \pm 2^{\circ}\text{C}$  durante las 48 horas que duró el secado de las probetas. En la Fig. 5a), se muestra una fotografía del horno precalentado; mientras que en la Fig. 5b), se muestra una fotografía de las probetas dentro del horno de secado.

Para garantizar que las 48 probetas estuvieran secas, se pesaron con una báscula digital en la hora 46, 47 y 48; por lo tanto, como en estas tres horas consecutivas las 48 probetas no tuvieron cambio en su peso, se consideró que en la hora 48 todas las probetas tenían peso seco inicial. De la Fig. 6a) a la Fig. 6d), se muestran fotografías del peso seco inicial de las probetas PA01, PB01, PC01 y PD01 respectivamente.

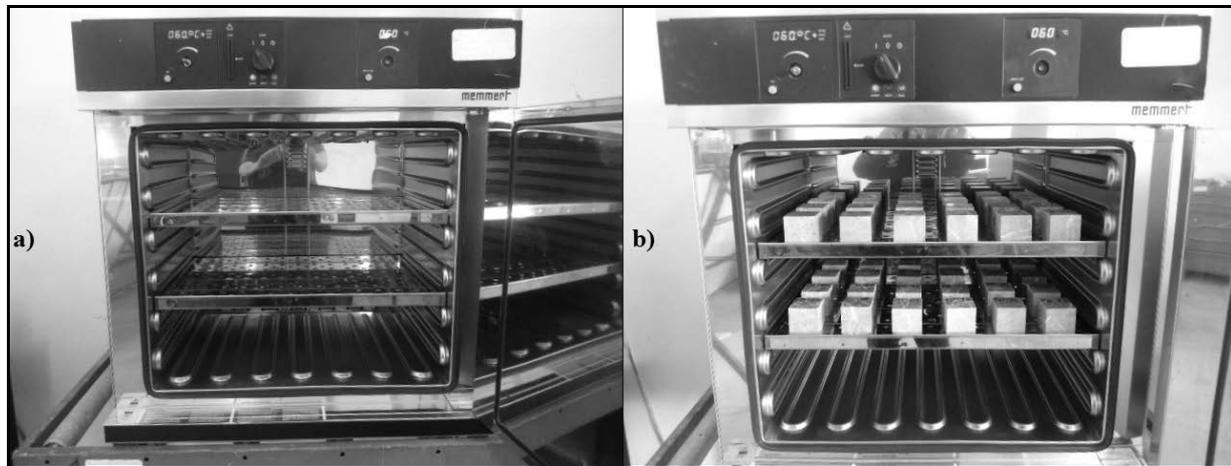


Fig. 5. Fotografías del secado de las probetas: a) Horno precalentado; b) Probetas dentro del horno precalentado.

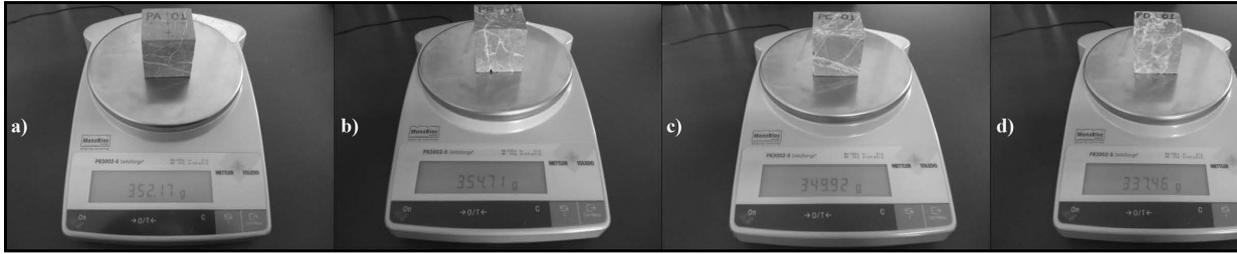


Fig. 6. Peso seco inicial: a) Probeta PA01; b) Probeta PB01; c) Probeta PC01; d) Probetas PD01.

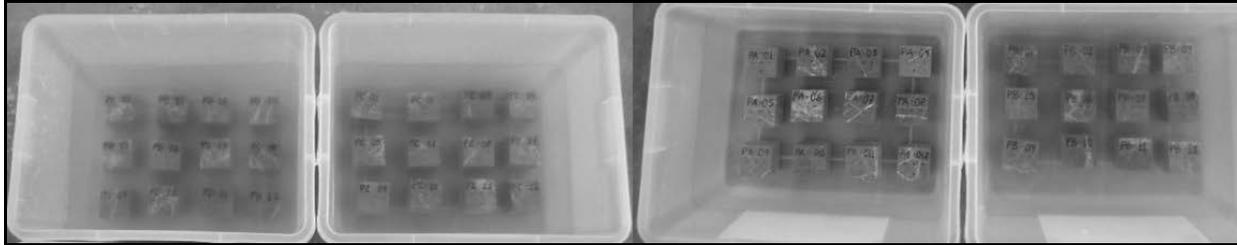


Fig. 7. Fotografía de las probetas sumergidas en las distintas soluciones preparadas.

### 2.3. Peso saturado de las probetas en las soluciones de sulfato de sodio

Para la saturación de las 48 probetas, se preparó un contenedor con 10 kg de agua destilada, un contenedor con 10 kg de solución de sulfato de sodio al 10%, un contenedor con 10 kg de solución de sulfato de sodio al 14%, y un contenedor con 10 kg de solución de sulfato de sodio al 20%. Posteriormente, las probetas se sumergieron en los contenedores con las distintas soluciones; de esta manera, en el contenedor con agua destilada se sumergieron las probetas PA01-PA12, en el contenedor con sulfato de sodio al 10% se sumergieron las probetas PB01-PB12, en el contenedor con sulfato de sodio al 14% se sumergieron las probetas PC01-PC12 y en el contenedor con sulfato de sodio al 20% se sumergieron las probetas PD01-PD12. En la Fig. 7, se muestran las probetas sumergidas en las distintas soluciones:

Para garantizar que las 48 probetas estuvieran saturadas, se pesaron con una báscula digital en la hora 46, 47 y 48; por lo tanto, como en estas tres horas consecutivas las 48 probetas no tuvieron cambio en su peso, se consideró que en la hora 48 todas las probetas tenían peso saturado. De la Figura 8a) a la Fig. 8d), se muestran fotografías del peso saturado de las probetas PA01, PB01, PC01 y PD01 respectivamente.

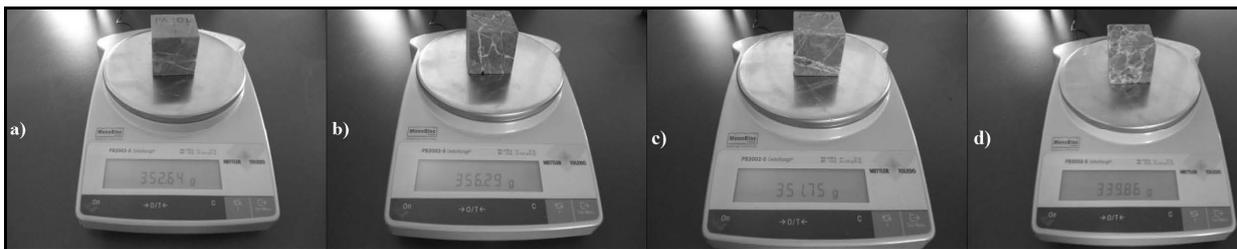


Fig. 8. Peso saturado: a) Probeta PA01; b) Probeta PB01; c) Probeta PC01; d) Probeta PD01.

### 2.4. Ciclos de la prueba de cristalización de sales

Una vez obtenido los pesos saturados de las 48 probetas de mármol tipo Café Tabaco, las probetas saturadas se secaron en un horno de secado a una temperatura de  $60 \pm 2^\circ\text{C}$  durante 16 horas y las 48 probetas se pesaron con una báscula digital a temperatura ambiente. Después, las probetas se enfriaron a tempera-

tura ambiente durante 2 horas; esto se realizó, para evitar en lo posible un choque térmico superficial cuando las probetas fueran a sumergirse en las soluciones. Finalmente, las probetas se sumergieron en las distintas soluciones; de esta forma, en el contenedor con agua destilada se sumergieron las probetas PA01-PA12, en el contenedor con sulfato de sodio al 10% se sumergieron las probetas PB01-PB12, en el contenedor con sulfato de sodio al 14% se sumergieron las probetas PC01- PC12 y en el contenedor con sulfato de sodio al 20% se sumergieron las probetas PD01-PD12. Los 4 grupos de probetas permanecieron sumergidas durante 6 horas a temperatura ambiente.

Al término de las 6 horas de inmersión, las probetas se sacaron de las soluciones salinas; por lo que, el ciclo de prueba de cristalización de sales por sulfato de sodio terminó. De esta manera, se inició otro ciclo de prueba con el secado de las 48 probetas. Cabe aclarar que, el ciclo de prueba de secado-enfriado-inmersión duró 24 horas, y se repitió durante 15 ciclos consecutivos. Cabe mencionar que, las probetas del grupo PB, PC y PD muestran eflorescencias en la superficie de las probetas; además, algunas muestran fisuras y, en algunos casos, rupturas-De la Fig. 9a) a la Fig. 9d), se muestran fotografías de las probetas después del quinceavo ciclo:

## 2.5. Lavado de las probetas

Al término 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 pusieron 10 litros de agua destilada en un contenedor y se lavaron superficialmente las probetas. Después, se sumergieron en agua destilada durante dos horas a temperatura ambiente. Finalmente se verificó la resistividad del agua para corroborar que las probetas no tuvieran sulfato de sodio. En la Fig. 10, se muestra el lavado superficial de las probetas; mientras que en la Fig. 11, se muestra la medición de la resistividad del agua:

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 de las probetas.

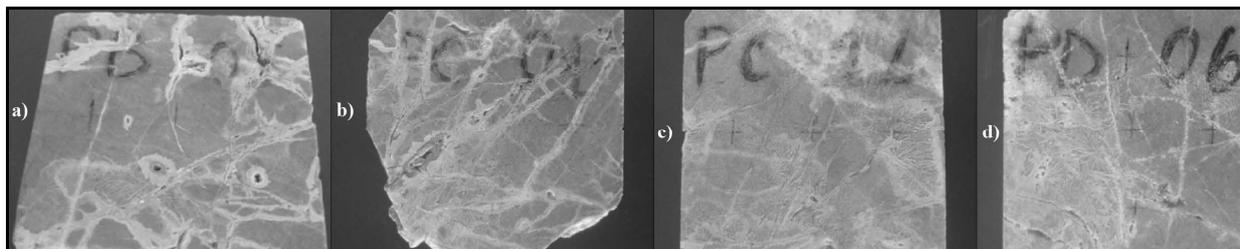


Fig. 9. Eflorescencias en las probetas: a) Probeta PB03; b) Probeta PC01; c) Probeta PC12; d) Probeta PD06.



Fig. 10. Lavado superficial de las probetas.



Fig. 11. Verificación de la resistividad del agua destilada.

## 2.6. Peso seco final de las probetas

Para el secado final de las 48 probetas de mármol tipo Café Tabaco, el horno de secado se precalentó a una temperatura de 60°C. Después, se colocaron las probetas en dos charolas y se introdujeron en el horno de secado de la siguiente forma: en la charola de arriba se colocaron las probetas PA01-PA12 y PB01-PB12, mientras que en la charola de abajo se colocaron las probetas PC01-PC12 y PD01-PD12. Las 48 probetas se mantuvieron dentro del horno de secado a una temperatura de  $60\pm 2^\circ\text{C}$  durante las 48 horas que duró el secado de las probetas. En la Fig. 12a), se muestra una fotografía del horno precalentado; mientras que en la Fig. 12b), se muestra una fotografía de las probetas dentro del horno de secado:

Para garantizar que las 48 probetas estuvieran secas, se pesaron con una báscula digital en la hora 46, 47 y 48; por lo tanto, como en estas tres horas consecutivas las 48 probetas no tuvieron cambio en su peso, se consideró que en la hora 48 las 48 probetas tenían su peso seco final. De la Fig. 13a) a la Fig. 13d), se muestran fotografías del peso seco final de las probetas PA01, PB01, PC01 y PD01 respectivamente.

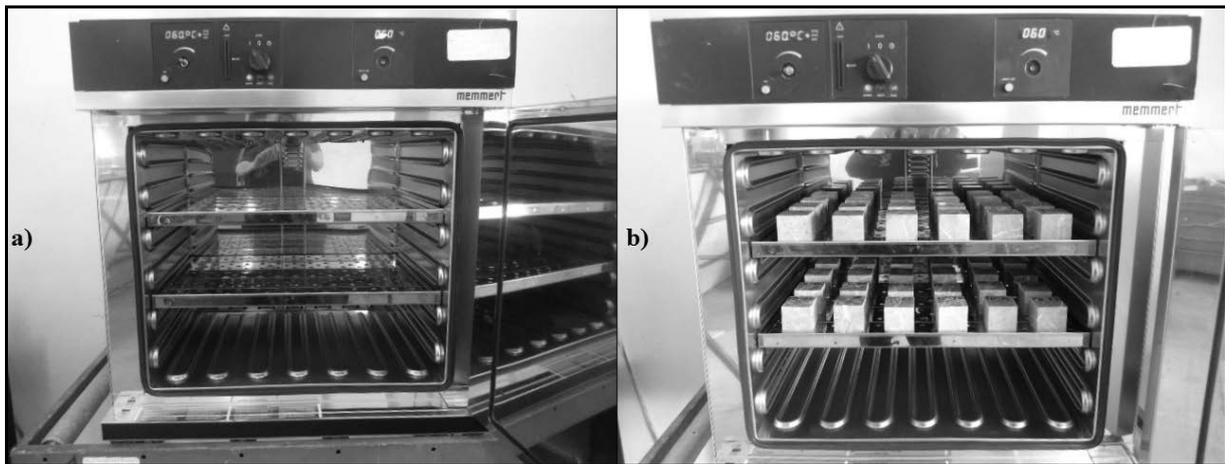


Fig. 12. Fotografías del secado final de las probetas: a) Horno precalentado; b) Probetas dentro del horno precalentado.

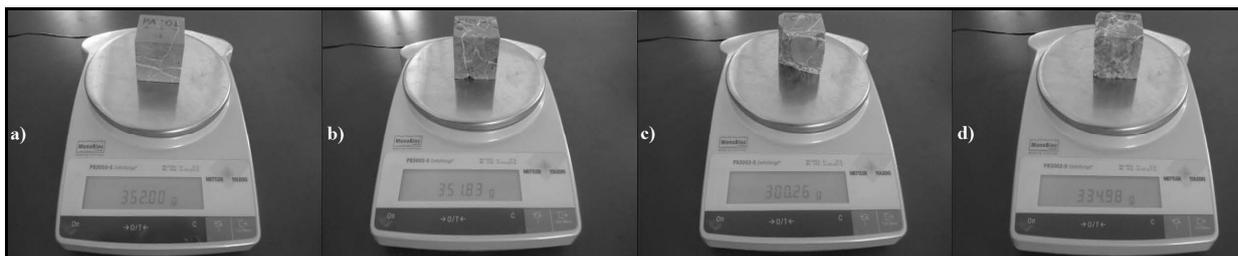


Fig. 13. Peso seco final: a) Probeta PA01; b) Probeta PB01; c) Probeta PC01; d) Probeta PD01.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Porcentaje de la pérdida de peso

Después de haber realizado la prueba de cristalización de sales por sulfato de sodio, los pesos que se obtuvieron fueron el peso seco inicial ( $M_O$ ) de cada probeta y el peso seco final ( $M_F$ ) de cada probeta; de tal manera que, el porcentaje de la pérdida de peso (DWL) de cada probeta se obtiene a partir de la ecuación 1:

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

En la Tabla 1, se muestran los resultados del porcentaje de la pérdida de peso de las 48 probetas después de la prueba de cristalización de sales por sulfato de sodio.

Tabla 1. Porcentaje de la pérdida de peso.

Solución	Número de Probeta	Peso Seco Inicial $M_O$ (g)	Peso Seco Final $M_F$ (g)	Pérdida de Peso $DWL$ (%)
Agua Destilada	PA01	352.17	352.00	0.05
	PA02	345.26	345.09	0.05
	PA03	353.57	353.41	0.05
	PA04	345.11	344.93	0.05
	PA05	343.45	342.93	0.15
	PA06	346.64	345.89	0.22
	PA07	337.72	337.45	0.08
	PA08	340.17	340.02	0.04
	PA09	351.24	351.08	0.05
	PA10	346.06	345.87	0.05
	PA11	348.58	348.40	0.05
	PA12	346.98	345.12	0.54
	Promedio			<b>0.11</b>
Desviación Estándar			<b>0.14</b>	
Solución de Sulfato de Sodio al 10%	PB01	354.71	351.83	0.82
	PB02	347.88	340.04	2.31
	PB03	346.48	338.77	2.28
	PB04	350.49	336.88	4.04
	PB05	340.84	337.51	0.99
	PB06	344.24	327.49	5.11
	PB07	349.32	346.31	0.87
	PB08	345.19	335.00	3.04
	PB09	366.09	363.07	0.83
	PB10	341.74	335.87	1.75
	PB11	347.93	339.66	2.43
	PB12	345.69	336.39	2.76
	Promedio			<b>2.27</b>
Desviación Estándar			<b>1.30</b>	
Solución de Sulfato de Sodio al 14%	PC01	349.92	300.26	16.54
	PC02	338.05	310.19	8.98
	PC03	343.04	311.53	10.11
	PC04	343.42	315.20	8.95
	PC05	367.97	357.43	2.95
	PC06	350.47	331.84	5.61
	PC07	342.79	309.64	10.71
	PC08	347.02	317.67	9.24
	PC09	353.16	318.84	10.76
	PC10	362.00	345.10	4.90
	PC11	347.47	341.02	1.89
	PC12	336.67	335.86	0.24
	Promedio			<b>7.57</b>
Desviación Estándar			<b>4.40</b>	
Solución de Sulfato de Sodio al 20%	PD01	337.46	334.98	0.74
	PD02	342.87	322.65	6.27
	PD03	344.60	324.51	6.19
	PD04	343.86	320.59	7.26
	PD05	341.61	335.10	1.94
	PD06	345.96	340.33	1.65
	PD07	340.33	328.80	3.51
	PD08	345.35	335.63	2.90
	PD09	343.15	339.18	1.17
	PD10	339.52	316.69	7.21
	PD11	342.74	340.49	0.66
	PD12	343.71	326.46	5.28
	Promedio			<b>3.76</b>
Desviación Estándar			<b>2.26</b>	

### 3.2. Comparación de la pérdida del peso

Para realizar la comparación de los resultados del porcentaje de la pérdida de peso en las distintas soluciones, se realizó un análisis de varianza de un factor para determinar si existe una diferencia significativa entre el porcentaje de pérdida de peso y el porcentaje de sulfato de sodio. En la Tabla 2, se muestran los resultados obtenidos del análisis de varianza realizado:

A partir de la Tabla 2, se observa que el valor de  $F=16.03$  es mayor que el valor de  $F_{\text{crítico}}=2.82$ ; esto quiere decir que, con una significancia del 5%, sí existe una diferencia significativa entre las distintas soluciones salinas de sulfato de sodio. Por lo tanto, al haber una diferencia significativa la solución que tiene mayor porcentaje de pérdida de peso es la solución de sulfato de sodio al 14%. De esta forma, el mármol tipo Café Tabaco de la cantera estudiada tiene un porcentaje promedio de pérdida de peso del 7.57%.

Tabla 2. Análisis de varianza de un factor.

Origen de la variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Prom. de los cuadrados	Valor de F	Prob.	Valor de $F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	134.55	3	11.38	16.03	$35 \times 10^{-6}$	2.82
Dentro de los grupos	258.61	44	7.38	-	-	-
Total	393.16	47	-	-	-	-

### 3.3. Gráficas del porcentaje de pérdida del peso

En la Tabla 3, se muestran los porcentajes promedios de la pérdida de peso de los diferentes grupos de probetas durante los ciclos que duró la prueba de cristalización de sales por sulfato de sodio; cabe mencionar que, el signo negativo indica que existe una pérdida de peso del mármol tipo Café Tabaco. Además, se observa que el grupo de las probetas PC fueron las que empezaron a tener una pérdida de peso a partir del tercer ciclo. Graficando los datos de la Tabla 3, se obtiene la gráfica comparativa del comportamiento del porcentaje promedio de la pérdida de peso de los grupos de las probetas sometidas a una prueba de cristalización de sales por sulfato de sodio. En la Fig. 14, se muestra la gráfica comparativa.

Como se observa en la Fig. 14, las probetas que estuvieron inmersas en una concentración del 14% de sulfato de sodio tuvieron una disminución en su peso mucho más rápida debido a que en esta concentración la solución de sulfato de sódico se encuentra en estado saturado. Además, con base a las mediciones obtenidas se puede notar que las probetas ensayadas en las concentraciones al 10% y al 20% tuvieron un comportamiento similar en cuanto a su pérdida de peso. Cabe mencionar que la norma UNE-EN 12370 sugiere realizar el ensayo con una concentración al 14% de sulfato de sodio; por lo que, a pesar de las variantes realizadas en el estudio realizado, los resultados arrojaron que esta concentración tuvo la mayor pérdida de peso. Se puede notar que, la concentración al 20% de sulfato de sodio no tuvo un efecto apreciable en la pérdida de peso como se suponía al inicio; esto debido a que, una solución de sulfato de sodio al 20% se encuentra sobresaturada, es decir, hay una cantidad de soluto que no entró en proceso de disolución.

Tabla 3. Porcentaje de pérdida de peso en los ciclos

Ciclos de Prueba	Porcentaje de Pérdida de Peso DWL (%) en cada ciclo			
	Agua Destilada	Sulfato de Sodio al 10%	Sulfato de Sodio al 14%	Sulfato de Sodio al 20%
Inicial	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.05	0.08	0.16
2	0.00	0.06	0.10	0.16
3	-0.01	0.07	-0.05	0.08
4	-0.01	0.05	-0.20	-0.01
5	-0.01	0.02	-0.33	-0.04
6	-0.01	-0.10	-0.51	-0.11
7	-0.01	-0.20	-0.87	-0.37
8	-0.01	-0.30	-1.55	-0.57
9	-0.03	-0.32	-2.01	-0.72
10	-0.07	-0.36	-3.17	-1.42
11	-0.09	-0.54	-3.71	-1.71
12	-0.09	-0.67	-5.07	-1.88
13	-0.09	-0.97	-5.19	-1.95
14	-0.10	-0.98	-5.87	-1.97
15	-0.10	-1.60	-6.37	-2.30
Final	-0.11	-2.27	-7.57	-3.73

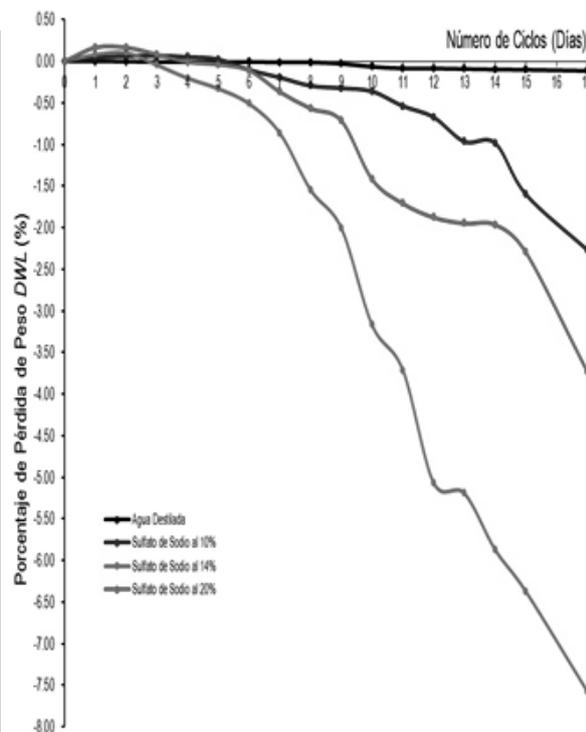


Fig. 14. Gráfica comparativa de la pérdida de peso

#### 4. CONCLUSIONES

De acuerdo con el estudio realizado al mármol tipo Café Tabaco procedente de Agua de la Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México, sometido a una prueba de cristalización de sales por sulfato de sodio se obtuvo que la concentración que más alteración presenta es la solución con sulfato de sodio al 14% con un porcentaje de pérdida de peso del 7.57%. En cuanto a la gráfica comparativa del porcentaje de la pérdida de peso por sulfato de sodio, se observa que las probetas sometidas a las distintas concentraciones de sulfato de sodio tienen comportamientos similares, en el que los primeros días ganan peso debido a la concentración de thenardita en su interior. Sin embargo, al transcurrir de los días las probetas pierden peso debido a que en el interior de los poros, la precipitación de mirabilita y thenardita empieza a ejercer presión en los poros hasta que las partículas superficiales empiezan a disgregarse. También, este estudio muestra alteraciones visuales importantes como agrietamientos y rupturas; esto implica, una pérdida de belleza estética. De tal manera que, se debe de considerar el uso de recubrimientos para mejorar la durabilidad y la belleza estética de este material ante ambientes salinos y/o contaminados.

Ahora bien, de acuerdo al porcentaje de pérdida de peso, se pueden definir cuatro tipos de materiales: Tipo I con una pérdida de peso menor del 1%, Tipo II con una pérdida de peso entre 1% y 5 %, Tipo III con una pérdida de peso entre 5% y 10% y Tipo IV con una pérdida de peso mayor del 10% [25]. Con base en la tipología para la alteración de peso en materiales pétreos, el mármol tipo Café Tabaco se considera como de Tipo III, ya que tiene una pérdida de peso de entre 5 a 10%; por lo tanto, este material no es recomendable usarlo en exteriores en ambientes contaminados. Sin embargo, se puede recomendar el uso de recubrimientos que permitan mitigar la degradación de este material; por lo que, se puede alargar su durabilidad.

Es interesante mencionar que el comportamiento de la pérdida de peso cuando se tiene una concentración de sulfato sódico menor (10%) resulta en una menor pérdida de peso; sin embargo, al tener una concentración mayor (20%) no implicó una mayor pérdida de peso. Este comportamiento se debe a que una concentración al 14% de sulfato de sodio se encuentra en estado saturado; mientras que una concentración al 10% de sulfato de sodio se encuentra en estado subsaturado y al 20% se encuentra en estado sobresaturado.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen a la empresa Mármoles Tepeaca S.A. de C.V. por haber procesado las probetas. Además, agradecen al Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez por haber prestado las instalaciones y equipos para la realización de las pruebas de cristalización de sales por sulfato de sodio.

#### REFERENCIAS

- [1] Navarrete, M., Martínez, W., Alonso, E., Lara, C., Bedolla, A., Chávez, H., Delgado, D., Arteaga, J., "Caracterización de propiedades físico-mecánicas de rocas ígneas utilizadas en obras de infraestructura", *ALCONPAT*, **3**(2), 132-142 (2013)
- [2] Orozco-Centeno, W., Branch, L., Jiménez-Builes, J., "Clasificación de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas en secciones delgadas a través programación estructurada", *Boletín de Ciencias de la Tierra*, **36**, 5-9 (2014)
- [3] Esbert, R., Montoto, M., Ordaz, J., "La piedra como material de construcción: Durabilidad, deterioro y conservación", *Materiales de Construcción*, **41**(221), 61-73 (1991)
- [4] Cardell, C., "Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada". Tesis Doctoral, Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, Granada, España (2013)
- [5] Benavente, D., Bernabeu, A., Cañaveras, J., "Estudio de propiedades físicas de las rocas", *Enseñanzas de la Ciencia de la Tierra*, **12**(1), 62-68 (2004)
- [6] Benavente, D., Cueto, N., Martínez-Martínez, J., García, M., "Durabilidad de rocas dolomíticas brechoides frente a la cristalización de sales", *MACLA*, **6**, 89-92 (2006)

- [7] Jamshidi, A., Reza, M., Khamechiyan, M., “Estimating the durability of building stones against salt crystallization: Considering the physical properties and strength characteristics”, *Geope*, **3**(2), 35-48 (2013)
- [8] Ruiz, V., Calleja, L., Suárez, L., Rodríguez, A., Celorio, C., “Durabilidad en ambientes húmedos de la arenisca de la Marina (Formación Lastres, Jurásico Superior de Asturias)”, *Trabajos de Geología*, **25**, 105-115 (2005)
- [9] Freire, D., “El granito como piedra de construcción en Madrid: Durabilidad y puesta en valor”. Tesis Doctoral, Departamento de Petrología y Geoquímica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2016
- [10] Lubelli, B., Van Hess, R., Nijland, T., “Salt crystallization damage: how realistic are existing ageing tests?” 3rd Int. Conference on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures, 259-273 (2014)
- [11] Alonso-Rodríguez, F., “Durabilidad de materiales rocosos”, Universidad de Oviedo, Departamento de Geología (Petrología y Geología), Oviedo, España, 1-20 (2013)
- [12] Daub, W., *Química*, México, Pearson Education (2011)
- [13] International Council on Monuments and Sites, “Glosario ilustrado de formas de deterioro de la piedra”, París, Francia: ICOMOS (2011)
- [14] Alonso, F., Vázquez, P., Esbert, R., Ordaz, J., “Durabilidad de granitos ornamentales: valoración de los daños inducidos por el ensayo de cristalización de sales”, *Materiales de Construcción*, **58**(289-290), 191-201 (2008)
- [15] Navarro, R., Cruz, A., Arriaga, L., Baltuille, J., “Caracterización de los principales tipos de mármol extraídos en la comarca de Macael (Almería, sureste de España) y su importancia a lo largo de la historia”, *Boletín Geológico y Minero*, **128**(2), 345-361 (2017)
- [16] Zedef, V., Unal, M., “Effect of salt crystallization on the building stones used in Konya, Central Turkey”, *Int. J. Econ. & Environ. Geol.*, **1**(1), 51-52 (2007)
- [17] La Rusa, M., Ruffolo, S., Belfiore, C., Aloise, P., Randazzo, L., Rovella, N., Pezzino, A., Montana, G., “Study of the effects of salt crystallization on degradation of limestone rocks”, *Periodico di Mineralogia*, **82**(1), 113-127 (2013)
- [18] Standard Terminology Relating to Dimension Stone, ASTM C119-16, Aug. 2016
- [19] Tlatempa, M., Estrada, R., Rubio, E., Rodríguez-Lugo, V., “Caracterización microestructural de mármol de la cantera Café Tabaco procedente de Tepexi de Rodríguez, Puebla”. *Acta Microscópica*, **20**(1), 60-65 (2011)
- [20] Morales, A., Velasco, M., Cruz, P., Chametla, C., “Estudio de absorción y densidad en el mármol tipo Café Tabaco procedente de Agua de Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México”, *Memoria del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals CICS Tuxpan 2017*, **9**(4), 1366-1371 (2017)
- [21] Morales, A., Guevara, J., Ortega, P., Hernández, J., “Estudio de alteración del peso en el mármol tipo Café Tabaco mediante una prueba de humedad-sequedad”, *Ingeniantes*, Año 4, **1**(1), 22-27 (2017)
- [22] Morales, A., Velasco, M., Chametla, C., Servín, A., Hernández, J., “Estudio en la rugosidad del mármol tipo Café Tabaco mediante una prueba de humedad-sequedad”, *Capital Intelectual*, **3**(9), 5-10 (2017)
- [23] Morales, A., Guevara, J., Cruz, P., Hernández, J., Servín, A., “Estudio comparativo de alteración en la rugosidad, del mármol tipo Café Tabaco mediante prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio”. *Revista Electrónica de Ingeniería Mecánica ITQU@NTUM*, **30**, 38-55 (2017)
- [24] UNE-EN 12370. “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales”. AENOR, 1999
- [25] Benavente, D., “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, Alicante, España (2002)

### **COMPARATIVE STUDY OF ALTERATION OF THE WEIGHT IN THE MARBLE TYPE CAFÉ TABACO THROUGH SALT CRYSTALIZATION TEST BY SODIUM SULFATE**

**Abstract** –This study has the purpose to determine the percentage of weight loss in the marble type Café Tabaco extracted from the quarry located in Agua de la Luna, Tepexi de Rodríguez, Puebla, Mexico, through a salt crystallization test by sodium sulfate. For the test, 4 groups of 12 cubic specimens with a dimension of  $50\pm 0.5$

mm on each side were used. The test consisted of drying the specimens at a temperature of 60°C for 16 hours, then cooled to room temperature for 2 hours, and finally they were immersing in sodium sulfate solution in percentages of 10%, 14% and 20% for 6 hours. This drying, cooling and immersion process was repeat for 15 cycles. The result obtained in this study was that marble type Café Tabaco has a weight loss percentage of 7.54%; therefore, it presents a significantly large change in its weight capable of decreasing its resistance properties, its brightness and its aesthetic beauty. In conclusion, this material is not recommended for outdoor use in contaminated environments. However, the use of coatings would mitigate this weight loss; therefore, mitigate the loss of their properties.

**Keywords** – Alteration of Weight, Salt crystallization test, Marble type Café Tabaco, Sodium Sulfate.