

Evaluación del decaimiento volumétrico en probetas de piedra sometidas a ciclos de cristalización de sales, registrado mediante fotogrametría digital

Eden Vizcaino, Miguel Soto, Alejandro Acosta

Resumen: Se ha formulado la posibilidad de dar seguimiento al volumen de piedras deterioradas por ciclos de envejecimiento acelerado, como un complemento para los registros mediante el peso seco, pues este último se ve alterado en los primeros ciclos hasta un 10% por la formación de cristales internos en la red porosa de las muestras. Para esto, cinco muestras de piedras Tobas volcánicas se han deteriorado mediante ciclos de cristalización con una salmuera de sulfato de sodio concentrada al 12% a temperatura ambiente que oscila entre los 18 y 20 °C. La recolección de los datos se produce en dos categorías: primero en "ciclos" que involucran peso seco y volumen por fotogrametría; y segundo en "periodos" que involucra peso seco, volumen por principio de Arquímedes y volumen por fotogrametría. Con esto se ha observado que el volumen también es afectado por la cristalización de sales, presentando un incremento en los primeros tres ciclos, además se ha demostrado la capacidad de la fotogrametría para adquirir el volumen de objetos de pequeña escala consiguiendo un error porcentual inferior al 4%.

Palabras clave: Cristalización, fotogrametría, piedras, principio de Arquímedes, sulfato de sodio, volumen

The volumetric decaiment in worked stones subjected cycles of crystalization, uses through digital photogrametry

Abstract: The possibility of monitoring the volume of stones deteriorated by accelerated aging cycles has been formulated, as a complement to the records using dry weight, since the latter is altered in the first cycles by up to 10% due to the formation of internal crystals, in the porous network of the samples. For this, five samples of volcanic Tuff stones have been deteriorated through crystallization cycles with a 12% concentrated sodium sulfate brine at room temperature ranging between 18 and 20 °C. Data collection occurs in two categories: first in "cycles" involving dry weight and volume by photogrammetry; and second in "periods" that involves dry weight, volume by Archimedes' principle and volume by photogrammetry. With this, it has been observed that the volume is also affected by the crystallization of salts, presenting an increase in the first three cycles, in addition, the ability of photogrammetry to acquire the volume of small-scale objects has been demonstrated, achieving a percentage error lower than that of 4%.

Keywords: Archimedes principle, crystallization, photogrammetry, sodium sulfate, stones, volume

Avaliação do decaimento volumétrico em provetes de pedra submetidos a ciclos de cristalização de sais, registado por fotogrametria digital

Resumo: Foi apresentada a possibilidade de acompanhar o volume de pedras deterioradas por ciclos de envelhecimento acelerado, como um complemento para os registos através do peso seco, pois este último vê-se alterado nos primeiros ciclos até 10% pela formação de cristais internos na rede porosa das amostras. Para isso, cinco amostras de pedras Tobas vulcânicas foram deterioradas por ciclos de cristalização com uma salmoura de sulfato de sódio concentrada a 12% à temperatura ambiente que oscila entre 18 e 20 °C. A coleta dos dados ocorre em duas categorias: primeiro em "ciclos" que envolvem peso seco e volume por fotogrametria; e segundo em "períodos" que envolve peso seco, volume por princípio de Arquímedes e volume por fotogrametria. Observou-se que o volume também é afectado pela cristalização de sais, com um aumento nos primeiros três ciclos. Foi demonstrada a capacidade da fotogrametria para adquirir o volume de objetos de pequena escala, obtendo um erro percentual inferior a 4%.

Palavras-chave: Cristalização, fotogrametria, pedras, princípio de Arquímedes, sulfato de sódio, volume

Introducción

Se sabe que el sulfato sódico (SFS) está entre los agentes más destructivos en piedras, hormigón o ladrillos, el daño producido depende de la concentración de sal en la piedra y las características de su red porosa, así como las condiciones ambientales de humedad y temperatura (Angeli *et al.* 2010). De tal manera que se utiliza el SFS como un material estandarizado, cuya capacidad para cristalizarse al perder humedad por el contacto con el aire (eflorescencia) resulta útil para estudiar la resistencia de estos materiales porosos, por ejemplo: el mármol café extraído en Puebla, México tiene una resistencia considerada baja, pues se identificó de entre cuatro categorías como material Tipo III, al presentar un decaimiento entre el 5 al 10% tras aplicar 15 ciclos de cristalización de sulfato (CCS) con una salmuera concentrada al 14% de SFS (Morales *et al.* 2020). En otros casos se utiliza para corroborar la eficiencia de los recubrimientos de sacrificio ante la brisa marina, para ello se estudiaron revoques en múltiples capas con distintas granulometrías, simulando el entorno mediante CCS (Speri *et al.* 2017). La degradación producida por dicho fenómeno comúnmente se reconoce cuantitativamente en laboratorio mediante el peso seco de las muestras estudiadas, donde los primeros ciclos registran un incremento en peso de hasta el 10% respecto al valor inicial, esto se debe a la concentración de cristales producto de la sub-eflorescencia en la red porosa de las piedras (Padilla *et al.* 2017); lo cual va en sentido contrario del deterioro que se aprecia visualmente, proporcionando una incertidumbre entre el peso adquirido por los cristales y el peso perdido por la erosión generada en las muestras.

La adquisición volumétrica de las muestras de piedra resulta simple al inicio de una experimentación que involucra desgaste por CCS, pues se trata de cubos que se pueden medir con instrumentos convencionales de laboratorio; no obstante, conforme avanza la degradación se convierten en objetos cada vez más complejos, adoptando una configuración libre superficialmente, prácticamente imposible de llevar a cabo manualmente.

Si bien es posible recurrir al principio de Arquímedes para obtener el volumen de cualquier objeto sumergible, registrando el desplazamiento de un líquido dentro de un recipiente graduado o calcularlo por el empuje vertical que ejerce el agua sobre dicho elemento (El Cid 2014: 22), esto no es aplicable para elementos delicados, de resguardo o

protegidos por su valor histórico, como tampoco funcionaría para elementos de gran tamaño integrados en edificaciones. Para ello en la actualidad se han desarrollado un par de técnicas que permiten capturar formas 3D sin alterar los objetos de estudio, el escáner laser y la fotogrametría se han convertido en técnicas reconocidas y confiables (Janvier *et al.* 2016). Se tienen registros del año 2000 donde se utilizó una tecnología precursora de ambas, mediante la utilización de telémetros laser para triangular la posición de puntos que se hicieron corresponder con píxeles de fotografías, con lo cual fue posible reconstruir digitalmente la geometría detallada y los colores de grandes estatuas reconocidas históricamente, como El David de Miguel Ángel (Levoy *et al.* 2015). Desde entonces las aplicaciones para la adquisición 3D con estas tecnologías indirectas se han diversificado tanto en la representación de grandes elementos, como son: el resguardo del aspecto y color de edificaciones históricas en formatos digitales (Cipriani *et al.* 2015); en incorporar a un software la geometría deteriorada de columnas antiguas; para el análisis estructural mediante elementos finitos (Almac *et al.* 2016). Como también para estudios que requieren precisión a pequeña escala, por ejemplo: se ha demostrado que el escáner laser tiene el potencial de reconstruir la superficie de cubos de piedra deterioradas por CCS, con una desviación promedio en el orden de 0.1 milímetros (Janvier *et al.* 2016); mientras que la fotogrametría se considera como una técnica de mayor aprecio para los estudios que requieren analizar colores y texturas; también ha presentado buenos resultados en la generación de mallas para cuantificar volumen, con un error porcentual inferior al 6% (Figuerola & Pacheco 2016). Gracias a la automatización digital, la fotogrametría de corto rango ha conseguido algunas ventajas frente al escáner laser al momento de ejecutarla, pues resulta accesible al no requerir equipos sofisticados, fácil de realizar sin la necesidad de un entrenamiento previo, adaptabilidad a las capacidades de procesamiento disponibles y además captura colores útiles para el mapeo e identificación visual de otras patologías distintas al relieve (Soto *et al.* 2016).

El objetivo de la presente investigación es evaluar la capacidad de la fotogrametría para generar modelos virtuales, que permitan adquirir el volumen de objetos aislados con formas libres. De tal manera que sea útil para el seguimiento y valoración de la decadencia de los materiales porosos que son desgastados en laboratorio por cristalización de sales.

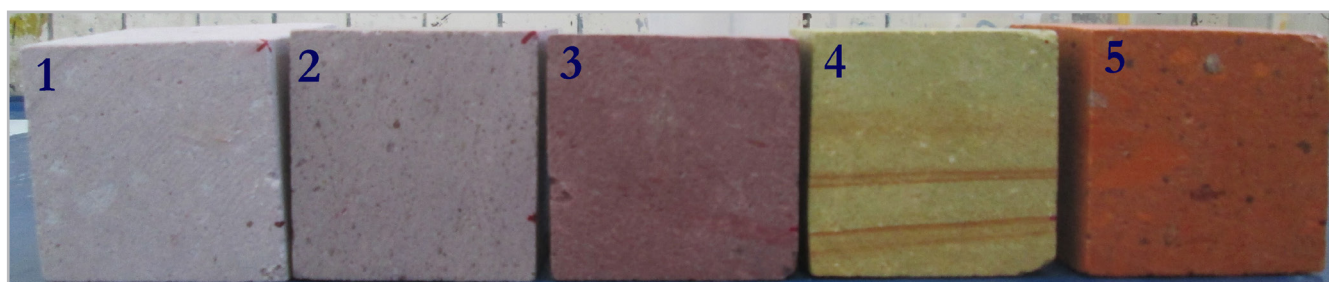


Figura 1.- Numeración de cinco muestras en su estado original.

Materiales y métodos

Para la experimentación se han utilizado cinco muestras cúbicas (~6.5 lado), actualmente estas piedras se extraen de los bancos de cantera ubicados principalmente en la comunidad de Valladolid, en el municipio de Asientos, Aguascalientes (SMG 2020). Su utilización se encuentra presente en el patrimonio arquitectónico del estado de Ags, México, por ejemplo: El Templo de la Purísima Concepción cuenta con la fachada y torres construidas en Cantera Blanca (muestras #1); el Templo del Santuario de Nuestra Señora de Guadalupe, con elementos en Cantera Rosa (muestras #2 y #3); el Templo de San Antonio de Padua construido de Cantera Hermosa con tonos amarillos y verdes (muestras #4); por último la cantera naranja presente en el actual edificio del Tribunal Electoral del Estado de Ags. En el transcurso de este artículo se hace referencia a las muestras por su color seguido por una numeración que se aprecia en la figura 1.

Estas muestras de piedra se encuentran dentro del grupo geológico de las "Tobas volcánicas" (López *et al.* 2018); una roca con textura afanítica cuyo origen ígneo resulta de la consolidación de cenizas volcánicas, estas partículas diminutas (diámetros <1 mm) se depositaron y compactaron como si de una roca sedimentaria se tratara (Heller & De sola 1967), algunas de ellas cuentan con vestigios de flujos piroclásticos atrapados en forma de piedras pómez, formando partículas de mayor tamaño (clastos de 5 a 20 mm) [ver Figura 2]. Las distintas características físicas y comportamiento hidromecánico que corresponden a cada una de ellas se muestran en la tabla 1.

Las muestras fueron deterioradas por envejecimiento acelerado siguiendo la metodología utilizada por (Angeli *et al.* 2010; R. Janvier *et al.* 2016) quienes siguen la norma europea "EN 12370" que es una prueba para la resistencia de las rocas ante la cristalización de sales. Donde se pueden rescatar los siguientes tres pasos:

- 1-Saturación de las muestras de piedra durante dos horas, utilizando una salmuera que cuenta con una concentración de Sulfato de Sodio (SFS) al 12% respecto al peso en gramos del agua destilada.
- 2-Secado en horno durante 16 horas a una temperatura

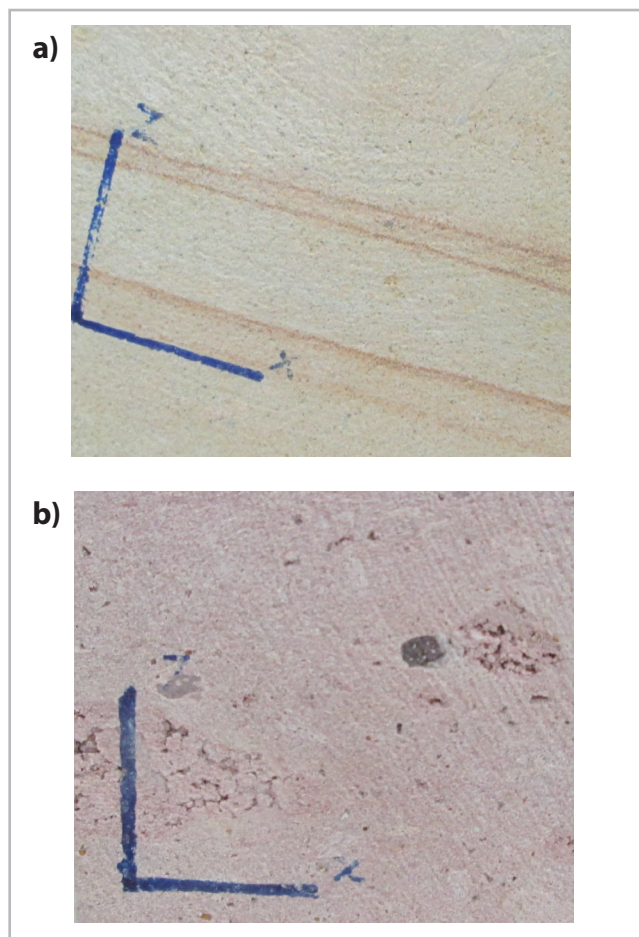


Figura 2.- Ampliación de las muestras, para apreciar las texturas y conformación de las muestras. a) Textura afanítica; b) Textura afanítica/piroclástica.

- de 100 °C para garantizar el secado las muestras.
- 3-Enfriamiento de las muestras dejando por lo menos dos horas a temperatura ambiente.

Para esta experimentación el conjunto de estos tres pasos (1, 2, 3) comprenden un "Ciclo" (C), registrando uno de cada tres de ellos por peso seco (4) y fotogrametría (5):

- 4-Tras el secado en horno posterior a los tres ciclos, inmediatamente se cuantificó el "peso seco" de las muestras por separado, para evitar alteraciones por

Muestra:	Peso Seco (g)	Porosidad (%)	Absorción (%)	Densidad aparente (g/cm3)	Densidad matriz (g/cm3)	Volumen (cm3)
Blanca #1	452.53 g	30.92	18.71	1.65	2.39	274.22
Gris #2	452.60 g	24.59	15.20	1.62	2.14	280.19
Rosa #3	517.25 g	13.43	7.05	1.90	2.20	272.11
Amarilla #4	469.60 g	25.93	14.99	1.73	2.33	271.70
Naranja #5	433.69 g	21.70	14.03	1.55	1.97	280.69

Tabla 1.- Características físicas e hidromecánicas originales.

humedad ambiental.

5-Posteriormente se limpiaron usando cepillo con cerdas de acero para la sesión fotográfica que permite generar el modelo digital, técnica que se describe en el apartado "Digitalización por fotogrametría".

Para comparar los resultados de volumen se utilizó el principio de Arquímedes; durante la experimentación fue evidente que este proceso altera el proceso, al saturarlas (6) se disuelven los cristales de SFS, por lo que las muestras pierden peso y liberan algunas partículas atrapadas, por ello fue necesario crear otro punto de medición que se denomina "Periodo" (P):

6-Una vez digitalizada cada muestra, se saturaron las piedras en agua destilada durante 24 horas.

7-Utilizando una báscula eléctrica con precisión de centésimas de gramo se registra el peso saturado (w_a), el peso sumergido (w_s) y el peso seco (m), datos que son necesarios para calcular la densidad aparente (d_p) de las muestras, conociendo la densidad del agua (d_w) se puede aplicar la formula: $d_p = (m * d_w) / (w_a - w_s)$

8-Al finalizar, se elabora un modelo digital utilizando la fotogrametría como lo explica el paso cinco (5) esta vez registrando el volumen para un "Periodo".

— Digitalización por fotogrametría

El proceso de fotogrametría consta de dos etapas: primero la parte física, donde se capturaron las fotografías utilizando una cámara convencional con una resolución de 12 megapíxeles, se asignaron las referencias físicamente en coordenadas (X, Y, Z); y segundo el procesamiento mediante el software Agisoft Photoscan® (APS).

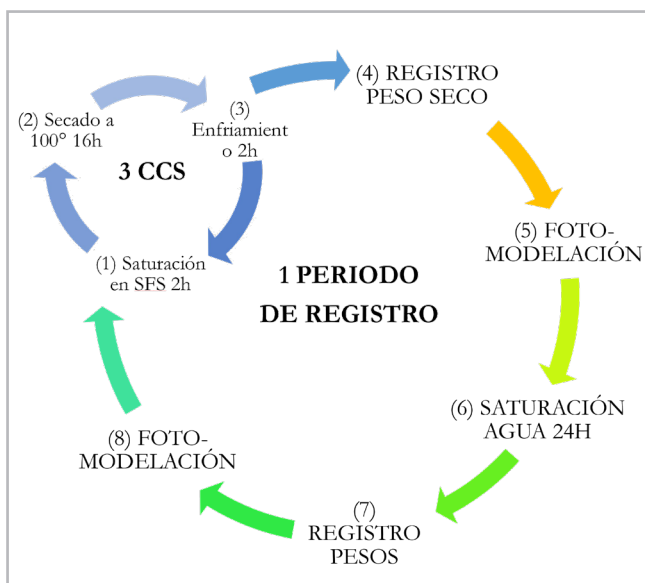


Figura 3.- Representación del proceso de ciclos de cristalización de sulfato y periodos de registros.

1-Para la obtención de las fotografías se implementó un estudio fotográfico que consta de un fondo de color solido mate, una base giratoria y un soporte blanco donde se trazaron tres puntos con las siguientes coordenadas:

Nombre	eje "X"	eje "Y"	eje "Z"
Point 1	0	0	0
Point 2	0	7.78	0
Point 3	7.78	7.78	0

Tabla 1.- Características físicas e hidromecánicas originales.

2-Al girar la base se capturo una fotografía aproximadamente a cada 22.5°, con lo que se obtienen 16 fotos para completar un giro de 360°, esto se repite a tres niveles diferentes obteniendo un total de 48 imágenes por cada sesión ver figura 4.

Al cargar las fotografías en la plataforma del programa APS, se sigue un flujo de trabajo para completar el procesamiento de las imágenes:

3- Orientación de fotos en calidad alta, con 20 mil puntos se obtuvieron mejores resultados.

4-Incorporar y vincular las coordenadas mediante marcadores, la ubicación se asigna visualmente en un 25% de las imágenes, el resto es detectado automáticamente por la aplicación.

5-Generar nube de puntos densa, la calidad baja es suficiente para la escala de las probetas.

6-El recorte de puntos por selección de color se facilita gracias al fondo oscuro mate del estudio, eliminando elementos extraños y perfeccionando los bordes en los modelos.

7-Para finalizar, APS genera una malla mediante la nube de puntos densa, con la opción de recortar y reparar posibles huecos.

Los valores obtenidos de volumen se cuantificaron en otro software, para este caso en SketchUp® y registrados en una tabla de cálculo para su comparación.

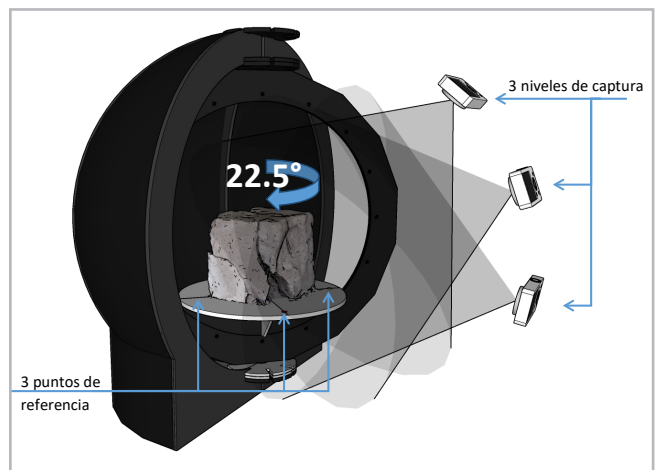


Figura 4.- Estudio fotográfico, representación de puntos de referencia, giro y niveles de captura fotográfica.

Resultados y discusión

Como se aprecia en la Figura 7, la decadencia de las piedras tras la aplicación de los ciclos de envejecimiento acelerado se percibe visualmente como un fenómeno acumulativo a partir del ciclo 3. Todas las muestras presentaron el característico emblanquecimiento superficial por la cristalización de sulfatos, junto con el desprendimiento progresivo de partículas pequeñas (< 5 mm); algunas muestras colapsaron o perdieron segmentos importantes por la presencia de partículas grandes (> 5 mm) dependiendo de los clastos integrados, que al ser de diferente tamaño y dureza pueden simplemente desprenderse como sucedió en la piedra Rosa #3 (la probeta pierde una esquina en la transición del P1 al C6); o generar la fracturación de la muestra Gris #2 (Se desarrollaron fracturas del C6 al P2); el último espécimen, la probeta #4 perdió la cohesión entre sus partículas, corresponde a la cantera hermosa de Aguascalientes [Figura 5].

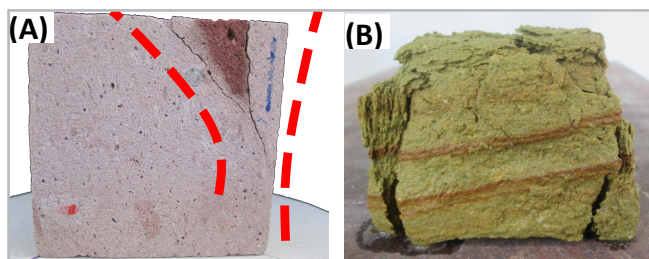


Figura 5.- (A) Separación de clasto con diferentes propiedades. (B) Pérdida de cohesión entre partículas.

— Registro de volumen por fotogrametría

Siguiendo los valores de volumen obtenidos mediante fotogrametría se aprecia un decaimiento variable, que presenta incluso ganancias en los primeros 3 ciclos, este incremento puede ser resultado de la cristalización superficial en forma de escamas y crestas que resistieron el cepillado, pues la forma y los bordes de las muestras Gris #2 y Naranja #5 se mantienen intactas, mientras que el volumen incrementó 5 y 7 cm³ respectivamente.

En otros casos el incremento de volumen se da por la dispersión o expansión del material, este fenómeno está demostrado que no es exclusivo de la humedad interactuando dentro de los materiales sedimentarios arcillosos, sino que también es producto de la presión interna generada por la sub eflorescencia desarrollada en la red porosa de las piedras (Wedekind *et al.* 2013) se estima que esto sucedió en las muestras Blanca #1 y Amarilla #4, puesto que las piedras incrementaron o mantuvieron su volumen a pesar de que la degradación es evidente por los bordes redondeados; solo la muestra Rosa #3 ha mantenido su volumen y su forma hasta el ciclo 3. A partir del Periodo 1 se aprecia en todas las muestras un decaimiento volumétrico progresivo [Figura 6].

— Registro de volumen por principio de Arquímedes

Mientras que los valores para el volumen mediante principio de Arquímedes se registraron únicamente

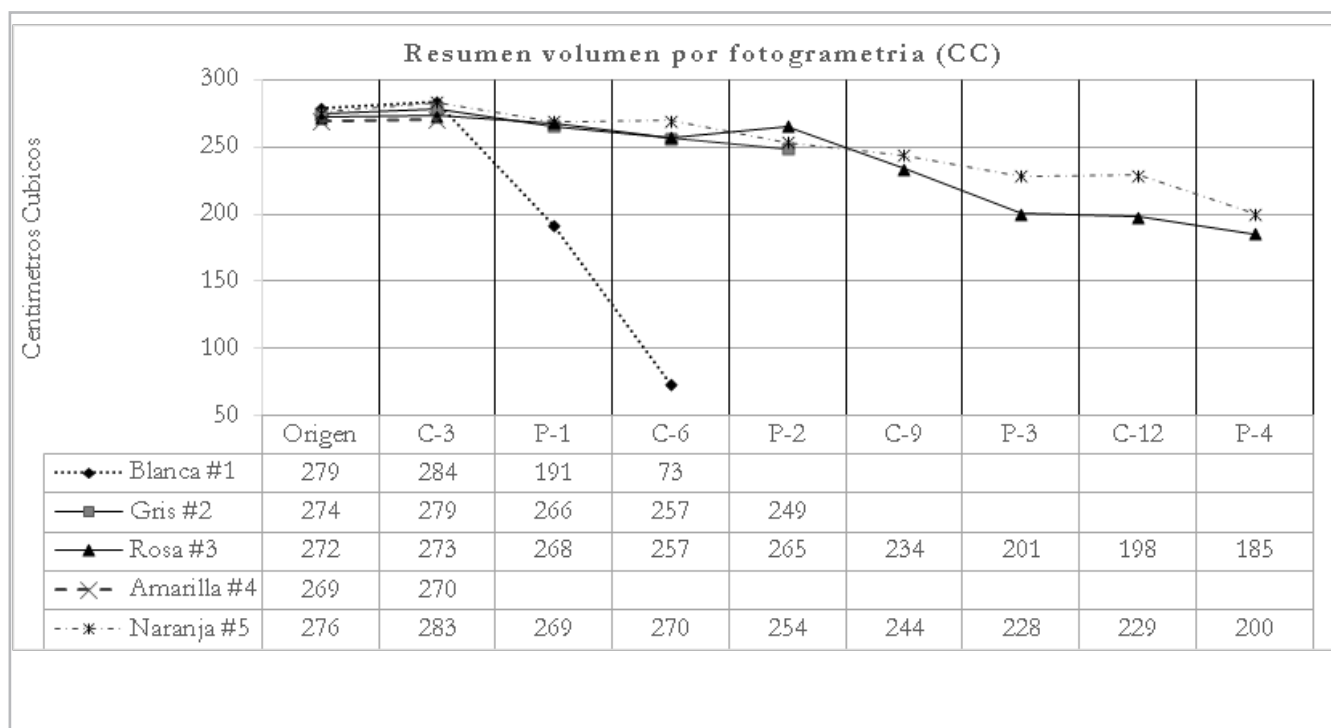


Figura 6.- Resumen de los registros obtenidos por fotogrametría.

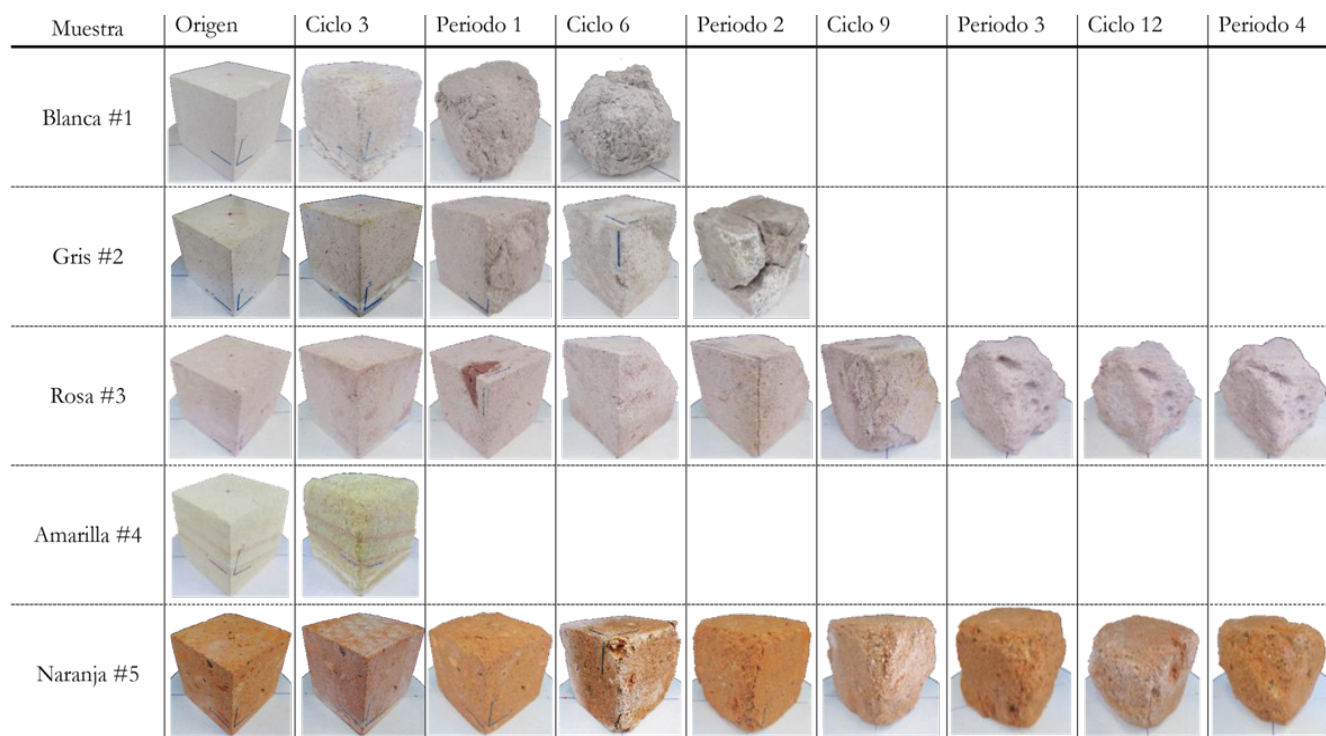


Figura 7.- Registro cronológico del envejecimiento acelerado en las muestras.

en las columnas denominadas como periodos (P), puesto que las muestras sufren una degradación tras la desalinización durante el proceso, dichos resultados se muestran en la Figura 8: en este gráfico se puede encontrar que el decaimiento volumétrico siempre es progresivo, pues al retirar parte importante de los cristales de sulfato alojados en la red porosa de las muestras se consigue eliminar parte de las alteraciones y expansión que generan los cristales; la muestra Rosa #3 ha mantenido su volumen inicial hasta el primer periodo. Las muestras #2 y #5 presentan un leve decaimiento inicial en comparación de la piedra #1 que perdió gran parte de su volumen en esta etapa de la experimentación; por último, para el caso de la Amarilla #4 al perder su integridad en este proceso de eliminación de cristales, ya no fue posible registrar resultados.

— Registros del peso seco

Cabe recalcar que el seguimiento del peso seco en esta experimentación no sigue la normativa, por tanto esta información no es representativa para identificar la resistencia de las muestras ante los CCS.

El peso seco a lo largo de la experimentación puede presentar ganancias tras los ciclos de cristalización de sulfato y generalmente los decrementos importantes se aprecian tras la desalinización ocasionada en los periodos de registros mediante principio de Arquímedes [ver Figura 9]; en general este comportamiento se repite a lo largo de la experimentación, siendo mas evidente y prolongado en la muestra Naranja #5, que junto con la Rosa #3 fueron las mas resistentes; la muestra Gris #2 completo el Periodo 2 con una

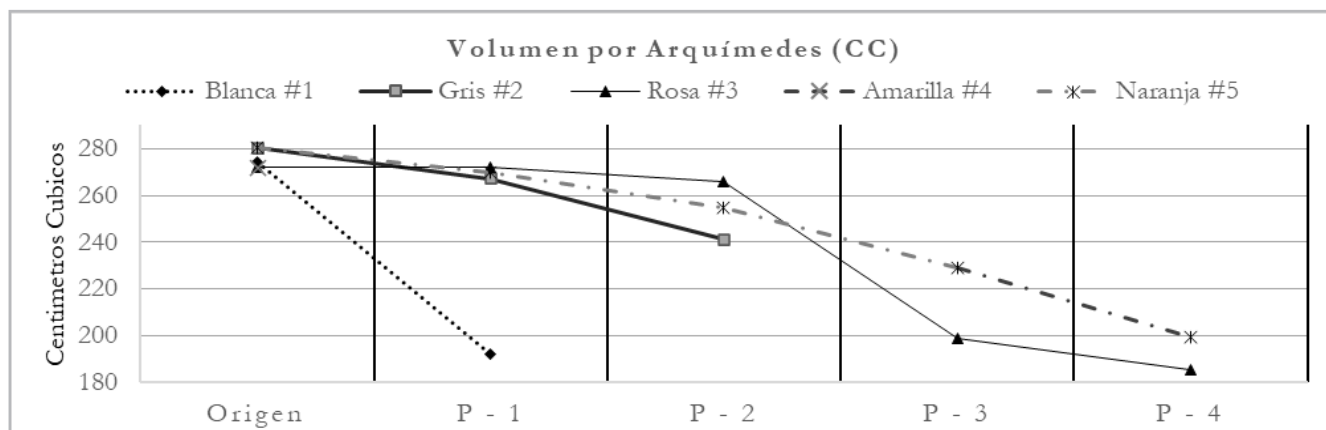


Figura 8.- Monitoreo del volumen por Arquímedes.

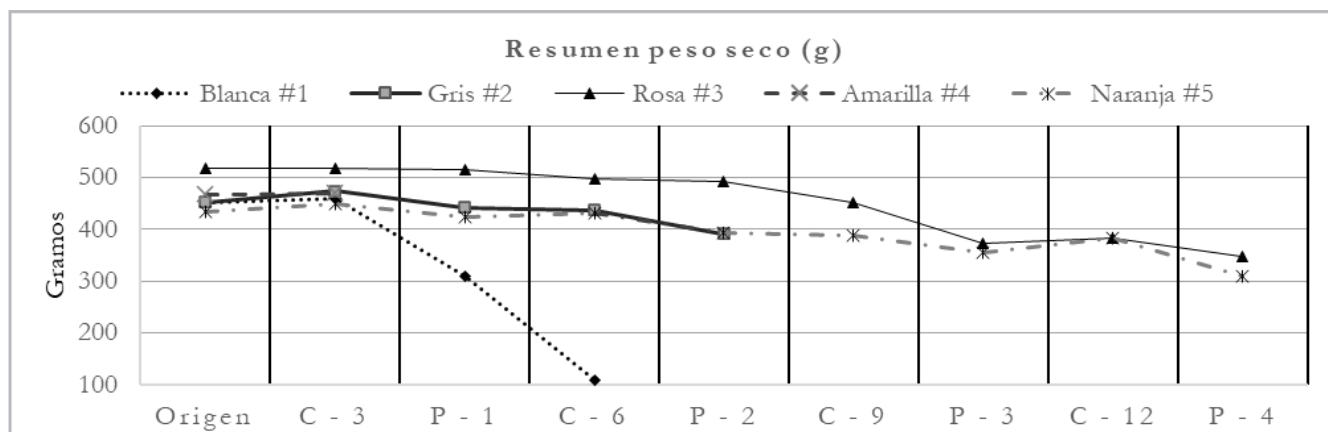


Figura 9.- Monitoreo del peso seco.

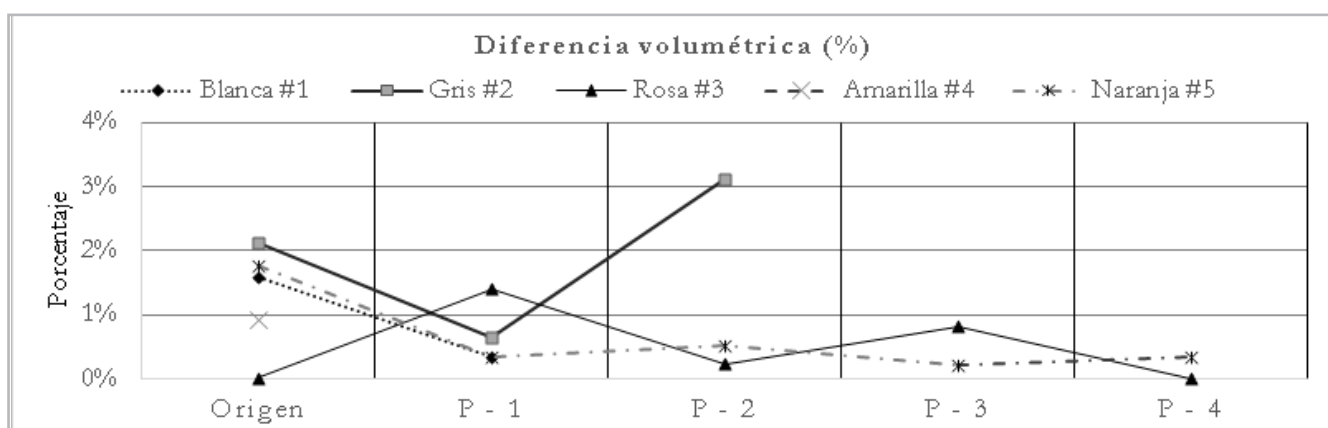


Figura 10.- Diferencia porcentual entre registros de volumen.

trayectoria y un peso final similar a la #3 y #5; mientras que la muestra Blanca #1 tras ganar peso en el ciclo 3, pierde peso considerablemente sin distinción de ciclo o periodo. La piedra #4 solo registra un leve incremento de peso en el ciclo 3.

— Comparativa de volumen

Contra poniendo los resultados de la medición de volumen por principio de Arquímedes [Figura 8] como valor real, y en segundo plano la medición por fotogrametría [Figura 6] como valor a comparar, se tienen una gráfica comparativa con indicadores para cada piedra, que demuestran gráfica y numéricamente la confiabilidad que la técnica de fotogrametría representa para la cuantificación del volumen, obteniendo un margen de error inferior al 4% [Figura 10]. Donde se puede apreciar en el caso de Blanca #1 y Naranja #5, que la medición por fotogrametría adquiere mayor precisión conforme la experimentación transcurre acercándose cada vez más al volumen que se obtiene por principio de Arquímedes; no obstante, se tiene para el caso de Gris #2 una medición alejada del valor real, puesto que la última degradación de esta muestra presenta agrietamientos que generan oquedades aisladas de la superficie aparente.

Conclusiones

La baja resistencia ante los CCS de las muestras #1 y #4, puede estar relacionada con su baja dureza, ambas son conocidas por ser un material deleznable. Siguiendo las observaciones de (López *et al.* 2018), estas muestras son menos resistentes a los CCS, debido a que presentan una porosidad y absorción mayor al resto de las muestras, ya que estas características permiten a las piedras incluir una cantidad mayor de cristales en su interior, los cuales son responsables de la degradación. Mientras que el resto de muestras con una absorción y porosidad menor, presentaron una resistencia mayor y las alteraciones representativas resultan de la separación de clastos con diferentes tamaños y dureza.

El peso seco al no seguir la norma, no puede utilizarse como información relevante en cuanto a la resistencia de los materiales aquí estudiados. Sin embargo, el proceso que se ha utilizado deja evidencia de que las muestras de piedra se ven afectadas tanto por la formación de cristales de SFS, como por el proceso de eliminación de los mismos. En cuanto a la utilización de fotogrametría de corto rango, se ha demostrado que es posible registrar el volumen de elementos deteriorados que adoptan formas libres e

irregulares mediante esta técnica, como una alternativa que permite la adquisición volumétrica con una precisión considerablemente baja (rango de error menor al 4%), pues con ello se observó: que algunas de las muestras de piedra al ser sometidas a ciclos de envejecimiento acelerado mediante la cristalización de sulfatos inicialmente incrementen su volumen (en sentido inverso considerando la degradación aparente), posiblemente por la expansión del material generado por los cristales al interior de la red porosa como lo explican (Wedekind *et al.* 2013). De igual manera, mediante el seguimiento que se dio al decaimiento de las probetas, se encontraron algunas debilidades de la técnica de fotogrametría para adquirir los modelos 3D: frente a cuerpos regulares lisos y de textura uniforme (como es el prisma original de las muestras); ante la aparición de elementos finos negativos (como son la aparición de grietas); y por último las depresiones estrechas y alargadas (poros y huecos).

Implementar la fotogrametría digital de corto rango supone un avance en la comprensión del comportamiento de las eflorescencias en los elementos patrimoniales de piedra o materiales porosos, al permitir registrar el volumen de los objetos de estudio de manera indirecta, sin alterar la composición y naturaleza de los elementos. Con esta técnica sería posible evaluar las afectaciones in situ del patrimonio construido con relación a su superficie y volumen, identificando cuantitativamente la degradación de los elementos.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México, por los recursos destinados a los distintos programas de posgrado. De igual manera a la Universidad Autónoma de Aguascalientes por proporcionar sus instalaciones y la colaboración de su equipo de investigadores.

Referencias

ALMAC, U., PEKMEZCI, P. & AHUNBAY, M. (2016). "Numerical Analysis of Historic Structural Elements Using 3D Point Cloud Data", *The Open Construction & Building Technology Journal*, 10: 233-245. <https://doi.org/10.2174/1874836801610010233>

ANGELI, M. *et al.* (2010). "Influence of temperature and salt concentration on the salt weathering of a sedimentary stone with sodium sulphate". *Engineering Geology*, 115: 193-199. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.06.001>

ARCE, L. P., DOEHNE, E. & PINCHIN, S. (2008). "Magnesium sulfate salts and historic building materials". *Materiales de Construcción*, 58: 125-142. <https://doi.org/10.3989/mc.2008.v58.i289-290.77>

CIPRIANI, L., FANTINI, F. & BERTACCHI, S. (2015). "El color en las piedras y los mosaicos de Ravena: Nuevas imágenes de los

monumentos antiguos a través de fotogrametría no convencional de última generación". *Expresión gráfica arquitectónica*, 26: 190-201. <https://doi.org/10.4995/ega.2015.4052>

FIGUEROA, M. & PACHECO, J. (2016). *Evaluación y calibración de las técnicas de fotogrametría digital aplicadas a la caracterización geométrica de obras patrimoniales*, Aguascalientes: UAA. <http://hdl.handle.net/11317/658>

HELLER, R. & DE SOLA, O. (1967). *Geología y ciencias afines*. Washington, D.C.: American Geological Institute.

JANVIER, R., BRUNETAUD, X., BECK, K. & JANVIER, S. (2016). "The potential of laser scanning to describe stone degradation". *13th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*, Paisley, Escocia, University of the West of Scotland, 2: 353-360.

JUAREGUI, M., JUAREGUI, L., Chacón, L. & VÍLCHEZ, J. (2013). "Modelado y visualización tridimensional de la estatua de María Lionza". *Boletín Antropológico*, 31: 66-72. www.redalyc.org/articulo.oa?id=71226945002

LEVOY, M. *et al.* (2015). *The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues*. <http://graphics.stanford.edu/projects/mich/> [consulta: 03/2021].

LÓPEZ, R., WEDEKIND, W., AGUILLÓN, A. & SIEGESMUND, S. (2018). "Thermal expansion on volcanic tuff rocks used as building stones: examples from Mexico". *Environmental Earth Sciences*, 77: 77-89. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7533-0>

MORALES, M., VELASCO, E. & RAMÍREZ, J. (2020). "Estudio comparativo de alteración del peso en el mármol tipo café tabaco mediante ensayo de cristalización de sales por sulfato de sodio". *Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 24: 69-80. <https://doi.org/1137-2729>

NAPOLITANO, R. & GLISIC, B. (2017). "Minimizing the adverse effects of bias and low repeatability precision". *Journal of Cultural Heritage*, 31: 46-52. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.11.005>

PADILLA, R., PACHECO, J., LÓPEZ, R. & ORENDAY, E. (2017). "Rock deterioration in the masonry walls of the Cathedral Basilica of Aguascalientes, México". *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34: 138-149. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.2.466>

SMG (2020). Panorama Minero del estado de Aguascalientes. *Servicio Geológico Mexicano*. <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/AGUASCALIENTES.pdf>

SOTO, Z., LOPEZ, D., GARAY, A. & VIZCAINO, H. (2016). "Digitalisation and documentation of stone deterioration, using close-range digital photogrammetry". *13th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*, Paisley, Escocia, University of the West of Scotland, 1051-1058.

FALCHI, L., SPERI, L., BALLIANA, E., ZUENA, M., & ZENDRI, E.

(2017). Behaviour of brick-NHL render systems in presence of NaCl solution. *Ge-conservación*, 11, 157-164. <https://doi.org/10.37558/gec.v11i0.468>

UNIVERSIDAD DE GRANADA (2017). *Propiedades de las Rocas de Construcción y Ornamentación*. <http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm> [consulta: 04/2021].

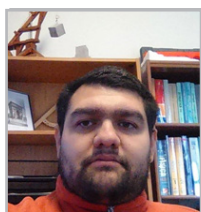
WEDEKIND, W. et al. (2013). "Weathering of volcanic tuff rocks caused by moisture expansion". *Environmental earth sciences*, 69: 1203-1224. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2158-1>

Autor/es



Isaías Edén Vizcaíno Hernández
edenv15@gmail.com
 Universidad Autónoma de Aguascalientes,
 México
<https://orcid.org/0000-0003-1477-4384>

Licenciado en Arquitectura en 2015 por Instituto Tecnológico Superior de El Grullo, y en 2018 Maestría en Ingeniería Civil: Construcción por la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Ha disfrutado de dos estancias de investigación con "Diagnóstico y evaluación de daños en monumentos históricos de piedra" Universidad Autónoma de San Luis Potosí en 2017; y con "XXV Verano de la Investigación Científica" en la Academia Mexicana de Ciencias, A.C. en 2015. Ha participado en numerosos congresos nacionales e internacionales. Su proyecto de investigación es "Diagnóstico y evaluación de daños en monumentos históricos de piedra"



Miguel Ángel Soto Zamora
miguelsotoic86@gmail.com
 Universidad Autónoma de Aguascalientes,
 México

Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos en 2019, Maestría en Ingeniería Civil: Construcción en 2016 y Licenciatura en Ingeniería Civil en 2013. Lleva más de 10 años como profesor en la Universidad Autónoma de Aguascalientes con el tema "Topografía, mecánica de materiales, costos y procesos de construcción". Ha publicado algunos artículos de revista y capítulos de libro. También ha participado en diferentes congresos especializados y ha dirigido 24 tesis. sobre los temas de Materiales, Edificios patrimoniales, Análisis Estructurales en la Universidad Autónoma de Aguascalientes, México.



Alejandro Acosta Collazo
aacosta@correo.uaa.mx
 Universidad Autónoma de Aguascalientes,
 México
<https://orcid.org/0000-0002-8655-2038>

Doctorado en Arquitectura por la Universidad Nacional Autónoma de México en 2005; Maestría en Planeamiento Urbano Regional por la Universidad de Guanajuato en 2004; Maestría en Restauración de Sitios y Monumentos por la Universidad de Guanajuato en 1997 y Licenciatura en Arquitectura por la Universidad Autónoma de Aguascalientes en 1993. Tiene una amplia experiencia como docente, profesionista y profesor investigador Interino en la Universidad Autónoma de Aguascalientes desde 1999 a 2009. Tiene publicados varios artículos de revista, así como, capítulos de libros. Ha dirigido 8 tesis en torno el tema "Estudios sobre la experiencia del entorno" y participa en varios proyectos de investigación bajo el tema "Urbanidad y patrimonio histórico" y "Urbanidad, movilidad y patrimonio industrial histórico".

Artículo enviado el 28/05/2021
 Artículo aceptado el 22/01/2022



<https://doi.org/10.37558/gec.v21i1.1006>