

Mecanismos de deterioro de la piedra caliza coralina estructural del Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís y ensayo de productos para su conservación

Cecilia Valdés, Francisco Corvo,* Eva González, Julia Pérez, Carmen Portilla y Osvaldo Cuesta.**

Departamento de Corrosión, Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Avenida 25 y Calle 158, Apartado Postal 6414, Ciudad de La Habana. Correo electrónico: cecilia.valdes@cnic.edu.cu. *Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad de la Habana. **Centro de Contaminación Atmosférica, Instituto de Meteorología, Ciudad de La Habana, Cuba.

Recibido: 14 de agosto de 2007. Aceptado: 26 de noviembre de 2007.

Palabras clave: piedra, deterioro, contaminantes atmosféricos, conservación, hidrofugante.
Key words: stone, deterioration, atmospheric pollutants, conservation, hydrofuge.

RESUMEN. El Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís, singular y antológico exponente de la arquitectura religiosa habanera del siglo XVIII, está ubicado en lo que fuera litoral de la bahía de La Habana. Actualmente, esta estructura presenta problemas de deterioro en sus paredes de piedra debido fundamentalmente a la humedad. A este efecto se une la deposición de contaminantes atmosféricos y el desarrollo de organismos biológicos sobre ellas, factores que causan una degradación apreciable de la piedra. Por otra parte, su ubicación en un área de gran desarrollo urbano, de intenso tráfico, con cercanía al mar e industrias, hace que el ambiente posea determinado nivel de contaminación, lo que puede afectar al material pétreo. En el trabajo se caracteriza el deterioro de la piedra estructural de esa edificación, se determinan la temperatura y humedad de las paredes y se relacionan con la cantidad y el tiempo de lluvia caída. Al mismo tiempo, se determinan cuali y cuantitativamente algunos contaminantes atmosféricos (NO₂, SO₂ y polvo sedimentable) y se ensaya la eficacia de dos productos hidrofugantes comerciales en la protección de la piedra. Se comprueba que los tres mecanismos de degradación de esta aplicables a Cuba, se manifiestan en la estructura de esa edificación: acción de las sales, de la biota y de los contaminantes de carácter ácido. Se concluye que la pared de la calle de los Oficios, al presentar una humedad que puede catalogarse de extrema, posee condiciones propicias para que esos mecanismos ocurran. Asimismo, se comprueba que la influencia de las precipitaciones no es determinante en la gran humedad detectada en esta pared y que el producto hidrofugante de base siloxano es el que presenta las mejores propiedades para la protección de la piedra estructural estudiada.

ABSTRACT. The San Francisco de Asis Convent and Basilica Minor, singular and anthological exponent of the Havana religious architecture of the XVIII century, is located at what was called before the bay reef. At this moment this edification has deterioration problems in its stone walls due fundamentally to the humidity. The deposition of atmospheric pollutants and biological organism's growth is joined to this effect, causing an appreciable damage of stone. On the other hand, this building is sited in a heavy traffic urban area near the sea and industries, that is, the environment presents a certain pollution level, it could have a negative effect on the stone. In the present paper, deterioration of this structure is characterized. Temperature and humidity were determined in the walls and related to the amount and time of fallen rain. At the same time, atmospheric pollutants are determined and the efficacy of hydrofuge commercial products on the stone protection is tested. It is confirmed that three weathering mechanisms of the stone possible to occur in Cuba are manifested: action of salts, of biota, and of pollutants of acid character. The wall of Oficios street pre-

sents a level of humidity that could be classified as extreme, it is the one which exhibits favourable conditions for degradation mechanisms to be manifested. The rain influence is not decisive in the high humidity detected in the wall of Oficios street. The hydrofuge product based on siloxane shows the best properties for the protection of the stone.

INTRODUCCIÓN

La piedra ha sido utilizada como material arquitectónico y estructural debido a sus propiedades mecánicas, su estabilidad al medio ambiente y su fácil obtención. La piedra caliza coralina fue la más utilizada en Cuba durante la etapa colonial. Numerosas e importantes edificaciones del Centro Histórico de la Ciudad de La Habana han sido construidas utilizando este material, entre las cuales se encuentran el Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís, singular y antológico exponente de la arquitectura religiosa habanera del siglo XVIII, ubicados en lo que fuera litoral de la bahía, con su frente hacia la calle de los Oficios y su costado hacia la tradicional Plaza de San Francisco.

Esta edificación fue terminada de construir en la tercera década del siglo XVIII, como parte de un conjunto religioso cuya fundación se remonta a 1575, cuando el Cabildo otorga licencia a la Orden Franciscana para

que se instale en la Villa de San Cristóbal de La Habana. El inmueble fue destinado a almacén, depósito y viviendas para empleados de la aduana luego de la promulgación de las leyes de desarmonización de los bienes de las órdenes masculinas en 1842, quedando instalados aquí en 1915 la Dirección General de Comunicaciones, el Centro Telegráfico y el Centro Telefónico. Una década después, se concretó su restauración paulatina. Entre 1990 y 1994 se restaura el inmueble donde finalmente el 4 de octubre de 1994, se inaugura la Sala de Conciertos.¹

Actualmente, esta edificación presenta problemas de deterioro de las paredes de piedra, debido fundamentalmente, a una excesiva humedad, lo que facilita el desarrollo de líquenes, musgos y otras plantas superiores. Por otra parte, su ubicación en un área urbanizada de intenso tráfico con cercanía al mar e industrias, hace que el ambiente posea determinado nivel de contaminación, lo que indudablemente afecta la piedra caliza coralina y los bienes museables que exhibe el inmueble. En algunas ventanas, paredes y columnas han crecido plantas superiores que han destruido las losas originales y afectan sensiblemente la estabilidad del material estructural (Fig. 1).

A nivel mundial, en la construcción se utilizan cinco tipos principales de roca, las que difieren de modo importante por sus características y propiedades (Tabla 1).² Entre ellas, se encuentran las rocas calizas, compuestas principalmente por carbonato de calcio, que se distinguen por su estabilidad en aguas neutras y ligeramente alcalinas y por disolverse rápidamente bajo condiciones ácidas, aspecto que puede facilitar la acción de los contaminantes atmosféricos sobre ellas.³

Los contaminantes urbanos e industriales bajo deposición húmeda influyen de manera negativa sobre la roca caliza, según reporte de ensayos de laboratorio.⁴

El granito, la pizarra y el mármol son materiales generalmente más duraderos y presentan poca porosidad. En cambio, la arenisca y la caliza tienen una menor durabilidad debido a que poseen una gran porosidad, con una mayor conectividad de poros que facilita el proceso de transporte de agua por capilaridad.²

Muchas de las edificaciones en las cuales se ha utilizado la piedra como material constructivo predominante, presentan problemas con la estabilidad de este, ya sea por modificaciones antropogénicas o por las variaciones del entorno como consecuencia del desarrollo urbanístico e industrial de las ciudades.

El deterioro de los materiales pétreos utilizados en la construcción no es una cuestión inherente a los tiempos actuales y se plantea que los mecanismos de degradación de la piedra son los siguientes:⁵

Ciclos de ataque por sales higroscópicas como el cloruro de sodio o el yeso. Las sales presentes originalmente en la piedra o suministradas por el medio ambiente se trasladan por los poros del material a través de

disoluciones acuosas. Dichas sales penetran en el interior de la roca por acción capilar y cristalizan cuando el agua se evapora generando presiones internas que pueden producir desprendimiento, delaminación, desmoronamiento y otros tipos de degradación.

Actividad biológica de los organismos vivos que puede desempeñar un papel importante en el deterioro de la piedra, dependiendo de si las condiciones del entorno favorecen su desarrollo.

Ataque por contaminantes atmosféricos de carácter ácido. En este proceso intervienen el CO₂, SO₂ y el NO₂ atmosféricos disueltos en el agua sorbida, dando un carácter ácido al material pétreo, lo que provoca su ulterior disolución. La piedra caliza es particularmente susceptible a este mecanismo.

Ciclos de hielo-deshielo. Proceso característico de climas en los que las temperaturas fluctúan alrededor del punto de congelación del agua (no es aplicable en Cuba).

Se han realizado ensayos de laboratorio que comprueban la in-



Fig. 1. Crecimiento de biota, presencia de costra por contaminación y pátina debido a desagües en la pared de la calle de los Oficios del Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís.

Tabla 1. Principales características de las rocas utilizadas en la construcción.²

Nombre	Composición	Tipo	Porosidad (%)	Permeabilidad (darcies)
Granito	Cuarzo, feldespato, aluminosilicatos	Ígnea	0,1 - 4,0	10 ⁻⁹ -10 ⁻⁶
Pizarra	SiO ₂ con silicatos	Metamórfica	0,1 - 5,0	10 ⁻¹¹ -10 ⁻⁸
Arenisca	Granos de cuarzo (SiO ₂) y feldespato (KAlSi ₃ O ₈ -NaAl ₂ Si ₂ O ₈)	Sedimentaria	1,0 - 30,0	10 ⁻³ -10
Caliza	CaCO ₃	Sedimentaria	0,3 - 30,0	10 ⁻⁹ -10 ⁻²
Mármol	CaCO ₃	Metamórfica	0,4 - 5,0	10 ⁻⁶ -10 ⁻³

fluencia de factores biológicos en la degradación de piedras sedimentarias.⁶ Dentro de los procesos de biodeterioro, se incluyen aquellos cambios materiales y estructurales de la superficie de la piedra que transcurren a través de la formación de pátinas, generalmente observables en forma de manchas de color verde, marrón o negro.⁷

Las plantas superiores se desarrollan sobre los edificios y monumentos donde sus raíces al penetrar en los poros, fisuras y microfisuras provocan tensiones, roturas y desprendimientos, causando un deterioro de graves consecuencias; además, provocan acciones químicas a partir de las secreciones ácidas que muchas de ellas producen y que atacan la piedra.⁸

Como un factor de biodeterioro adicional, puede mencionarse a los excrementos de ciertas aves, especialmente, el de las palomas (aves muy abundantes en el Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís) y los murciélagos que habitan frecuentemente en las edificaciones. Los excrementos de todos estos animales contienen ácidos que pueden provocar el deterioro y disgregación paulatina de los materiales constitutivos de las fachadas.⁹

La reactividad del sustrato depende de la mineralogía, la forma y el tamaño de grano, defectos del mineral y la existencia de rajaduras y poros. Se reporta la formación de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en la superficie de cinco variedades de roca calcárea en atmósfera corrosiva, condiciones en las que se observó eflorescencia en la roca.⁹

El efecto del intemperismo puede ser más o menos agresivo según el tipo de roca y, particularmente, atendiendo al volumen y la conectividad de la red de poros presente en ella. Estas propiedades determinan la migración de la disolución por capilaridad y evaporación y luego, la sal precipita en su superficie o en el interior de la red de poros. La posición de la sal con relación a la superficie es la que determina la forma de desgaste o deterioro.⁵

El análisis de los mecanismos de degradación de la piedra ha llevado a la conclusión de que es necesario protegerla, particularmente, de la acción del agua, la cual facilita la entrada de los contaminantes y sales en el interior de la piedra, así como el crecimiento de organismos biológicos. Para ello, se han utilizado diferentes clases de recubrimientos orgánicos sintéticos, en particular,

polímeros acrílicos y de siloxano, así como siliconas, ésteres de ácido silícico, dispersiones coloidales de partículas de sílice, éteres perfluóricos, poliolefinas fluorinadas, resinas epóxicas, acrílicas y otros.^{10,11}

Estos tipos de recubrimientos se pueden dividir en hidrofugantes, pinturas y consolidantes de acuerdo con su principio de protección. En general, todos estos productos deben cumplir con los requisitos siguientes: impermeabilidad al agua líquida, permeabilidad al vapor de agua, estabilidad química y fotoquímica, repelencia al aceite, buenas propiedades ópticas para preservar el color original, no afectar a la piedra ni al medio ambiente.

No obstante, para tratar la superficie deteriorada de una obra construida en piedra, la primera acción a realizar para abordar adecuadamente el problema debería ser la recopilación de información sobre sus propiedades físicas y químicas.¹² Sin embargo, los restauradores de obras de arte, al igual que muchos investigadores encargados de rescatar edificios o esculturas expuestas a la intemperie, enfrentan con frecuencia situaciones de emergencia, que requieren de medidas inmediatas para remediar el estado de deterioro de algunas piezas. Esto ha conducido en muchos casos a la aplicación de tratamientos con agentes que, lejos de mejorar las condiciones de una obra, la llevan a un estado de deterioro aún más grave.

El objetivo de este trabajo consistió en desarrollar la primera fase de evaluación de la influencia del medio ambiente en el deterioro de la piedra caliza coralina del Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís, así como realizar ensayos comparativos de las propiedades de la roca, con y sin la aplicación de dos productos hidrofugantes para su conservación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las paredes fueron escogidas considerando su ubicación, mejor representatividad, así como el contenido de humedad y la temperatura de sus respectivas superficies. Fueron seleccionadas la de la calle de los Oficios y la de la Avenida del Puerto. La primera, se encuentra apantallada del sol por edificaciones situadas al frente, mientras que la segunda, recibe sol y viento libremente, además de encontrarse protegida por un enlucido de cal.

Cada 30 min, mediante sensores electrónicos programados, se determinó la humedad y la temperatura

superficial de las paredes seleccionadas de la edificación, cuyas magnitudes fueron convenientemente almacenadas digitalmente para su posterior descarga y procesamiento por computación y análisis correspondiente. El seguimiento de esas variables a través de los sensores se realizó en el tercer nivel de la edificación durante un período de tres meses (julio, agosto y septiembre) correspondiente a la temporada lluviosa.

Se procesaron igualmente, datos relativos a cantidad de lluvia (mm) diaria caída durante esos tres meses, registrados en la estación de Casa Blanca del Instituto de Meteorología, ubicada al otro lado de la Bahía de La Habana y a menos de 5 km de la construcción bajo estudio. Con ambos conjuntos de datos, se realizó un análisis de la influencia de la lluvia sobre la humedad y la temperatura de las paredes.

Se efectuaron análisis de NO_2 , utilizando captadores pasivos y de deposición de partículas de polvo, empleando placas Petri, en el interior de la Basílica para determinar la concentración existente de ambos contaminantes en el lugar¹³ e igualmente, se tomaron muestras de la costra formada sobre la superficie de la pared de la calle de los Oficios (en la entrada principal de la Basílica), para determinar la presencia de sulfato por análisis químico cualitativo (disolución en ácido clorhídrico y precipitación con cloruro de bario).

Se realizó visualmente la evaluación del deterioro de la piedra estructural y se valoró la eficiencia en su protección de dos productos hidrofugantes de fachada comerciales, uno de ellos de base siloxano en disolvente orgánico y otro de base silicona en medio acuoso. El primero, recomendado para exteriores y el segundo, para interiores. Estos productos se aplicaron por el método conocido como "mojado sobre mojado", o sea, se aplica por brocha hasta cubrir toda la superficie y se repite la aplicación sin esperar que concluya el proceso de secado.

La absorción capilar de la roca se evaluó *in situ* por el método conocido como "Pipa de Karsten" que consiste en determinar la absorción de agua utilizando una pipa de cristal graduada, aditamento que se adhiere a la superficie de la piedra, se llena de agua y enrasa a 4 mL. El tiempo que toma la absorción de agua por la roca, sin y con productos hidrofugantes aplicados (30 min),

se determina por medio de un cronómetro.

Las evaluaciones se realizaron en una columna del patio interior y en la pared exterior orientada hacia la Plaza de San Francisco, sitios seleccionados para la aplicación de los hidrofugantes. No se aplicaron en la pared de la calle de los Oficios debido a la extrema humedad allí existente. En este caso, es necesario eliminar primeramente los problemas de impermeabilización para poder evaluar eficazmente la posible acción de los hidrofugantes.

A nivel de laboratorio, se determinó la "permeabilidad al vapor de agua" a nueve muestras de piedra de forma cilíndrica (de 37 mm de diámetro y 10 mm de ancho); tres sin tratamiento, tres con la aplicación del producto de base siloxano y otras tres con el producto de base silicona. Cada una se colocó entre dos cilindros plásticos, uno abierto por sus dos lados y otro cerrado por el otro lado en cuyo interior se depositaron 15 mL de agua destilada. La unión de los bordes de la muestra con los cilindros fue sellada con una cinta adhesiva impermeabilizante. Este conjunto, se pesó antes de introducirlo en una desecadora que contenía ácido sulfúrico concentrado en el fondo y cloruro de calcio en una cápsula colocada en su plato respec-

tivo, con el objetivo de garantizar una completa deshidratación en su interior. En estas condiciones, el agua contenida en el interior del cilindro plástico, solamente puede salir a través de los poros de la piedra hacia un ambiente de muy baja humedad. La cantidad de agua que circuló por la piedra, se determinó mediante pesaje diario en balanza analítica hasta peso constante. De esta forma, se calculó la permeabilidad al vapor de agua de la piedra con y sin productos aplicados.

Se obtuvieron isotermas de adsorción a temperatura ambiente [(25 ± 1) °C] de la piedra sin y con los productos aplicados según la norma ISO 12751.¹⁴ De igual manera, se determinó el coeficiente de absorción de agua por inmersión parcial de acuerdo con la norma ISO 15148.¹⁵

Se utilizó el programa estadístico Origin 6.0 para realizar la comparación de los valores medios obtenidos de las muestras con y sin tratamiento tomando el nivel de significación $P < 0,05$ para la prueba de la F de Fisher. Dicho análisis se realizó en los ensayos de permeabilidad al vapor de agua, isotermas adsorción y absorción de agua por inmersión parcial.

Mediante los exámenes anteriores se obtuvo una caracterización preliminar del ambiente, la piedra

estructural y los productos seleccionados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN
Ensayos *in situ*

Influencia de la lluvia en la humedad de las dos paredes seleccionadas

El comportamiento de la lluvia en el mes de agosto fue similar al de junio en el año 2006, mientras que en el mes de julio se registró menor frecuencia y cantidad de lluvia (Fig. 2).

La tendencia en el comportamiento de la humedad y la temperatura de la pared correspondiente a la calle de los Oficios en los diferentes horarios (24 h), fue similar durante los meses de junio y julio del 2006. Para una mejor comprensión de los gráficos, se escogieron los registros correspondientes a dos horas del día: 7:00 a.m. y 4:00 p.m., atendiendo a que a la primera debía existir una mayor humedad y menor temperatura y a la segunda, debía ocurrir lo inverso.

Se comprobó que al existir eventos de lluvia, tiene lugar un incremento de la humedad superficial y a su vez, un decremento de la temperatura de la superficie de la pared. Vale apuntar que la humedad se mantuvo la mayor parte del tiempo por encima del 80 %, llegando en ocasiones a alcanzar más del 95 %.

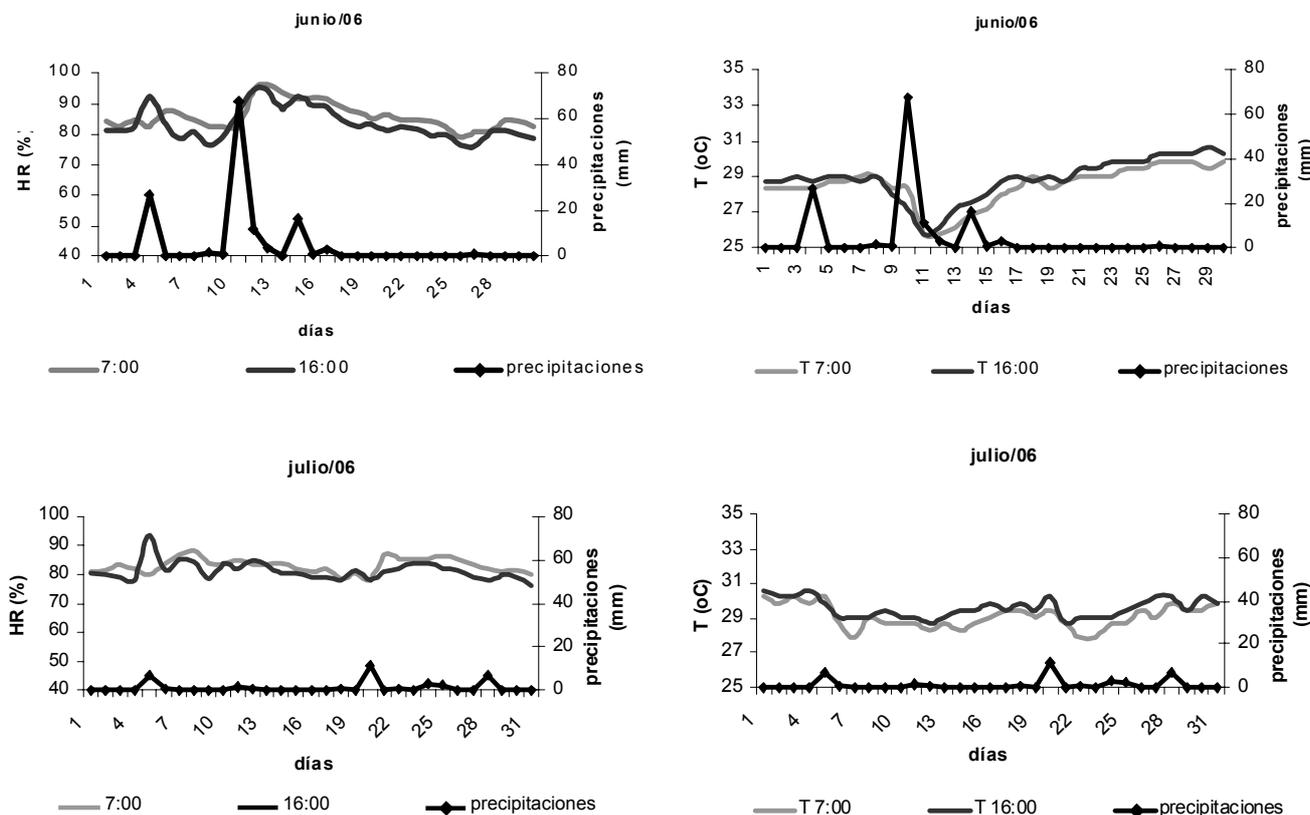


Fig. 2. Variación diaria de la temperatura y la humedad en la pared de la calle de los Oficios del Convento y Basilica Menor de San Francisco de Asís y la lluvia caída registrada en los meses de junio y julio de 2006.

Por otro lado, los resultados correspondientes a las mediciones de la humedad y la temperatura en la pared de la Avenida del Puerto en los meses y horarios antes referidos, arrojaron un comportamiento similar a los de la pared de la calle de los Oficios (Fig. 3). La diferencia entre ambas paredes radicó en que en la primera, la humedad resultó menor y la temperatura mayor con respecto a la segunda.

La temperatura y la humedad no tuvieron prácticamente variación en el mes de julio, ya que los eventos de lluvia ocurrieron con menor frecuencia y con menos intensidad, por lo que se comportaron de forma estable; aunque, en los máximos correspondientes a las precipitaciones tuvo lugar una pequeña variación en el comportamiento de esas variables, observándose en general la misma tendencia que en el mes de junio.

Se corroboró la diferencia que existe entre las dos paredes, dada por una mayor temperatura y una menor humedad en la de la Avenida del Puerto y viceversa en la de la calle de los Oficios (Tabla 2), lo que pudiera deberse a la presencia de defectos en la impermeabilización del techo y a la existencia y ubicación inadecuada de desagües en el tercer nivel, hecho que provoca que la pared de esta calle presente condiciones de extre-

ma humedad, aspecto confirmado por los registros de los sensores.

Contaminantes atmosféricos

El análisis de la deposición de polvo en la Sala de Conciertos (primer nivel) y en el Coro Alto (segundo nivel) del interior de la Basílica del Convento (Tabla 3), permitió con-

cluir que el empolvamiento en estos locales resulta mayor que el reportado para almacenes cerrados en Cuba¹⁶ y que en el caso del segundo, se alcanzan magnitudes similares a las registradas en un almacén abierto durante el mes de agosto,¹⁶ situación que estuvo relacionado con el

Tabla 2. Temperaturas y humedades medias correspondientes a las paredes de la calle de los Oficios y de la Avenida del Puerto del Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís, en los meses de junio, julio y agosto de 2006.

Pared	Temperatura media (°C)			HR media (%)		
	junio	julio	agosto	junio	julio	agosto
Calle de los Oficios	28,8	29,3	29,2	84	82	83
Avenida del Puerto	30,7	31,4	31,3	71	69	70

Tabla 3. Deposición de polvo sedimentable y cantidad de materia orgánica e inorgánica determinados en dos puntos situados en el interior de la Basílica Menor del Convento de San Francisco de Asís.

Mes/año	Lugar	Empolvamiento total	Materia [mg/(m ² · d)]	
			orgánica	inorgánica
Junio/06	Basílica	39,36	22,64	16,72
	Coro	39,05	27,33	11,71
Agosto/06	Basílica	26,52	18,19	8,33
	Coro	52,77	41,46	11,31

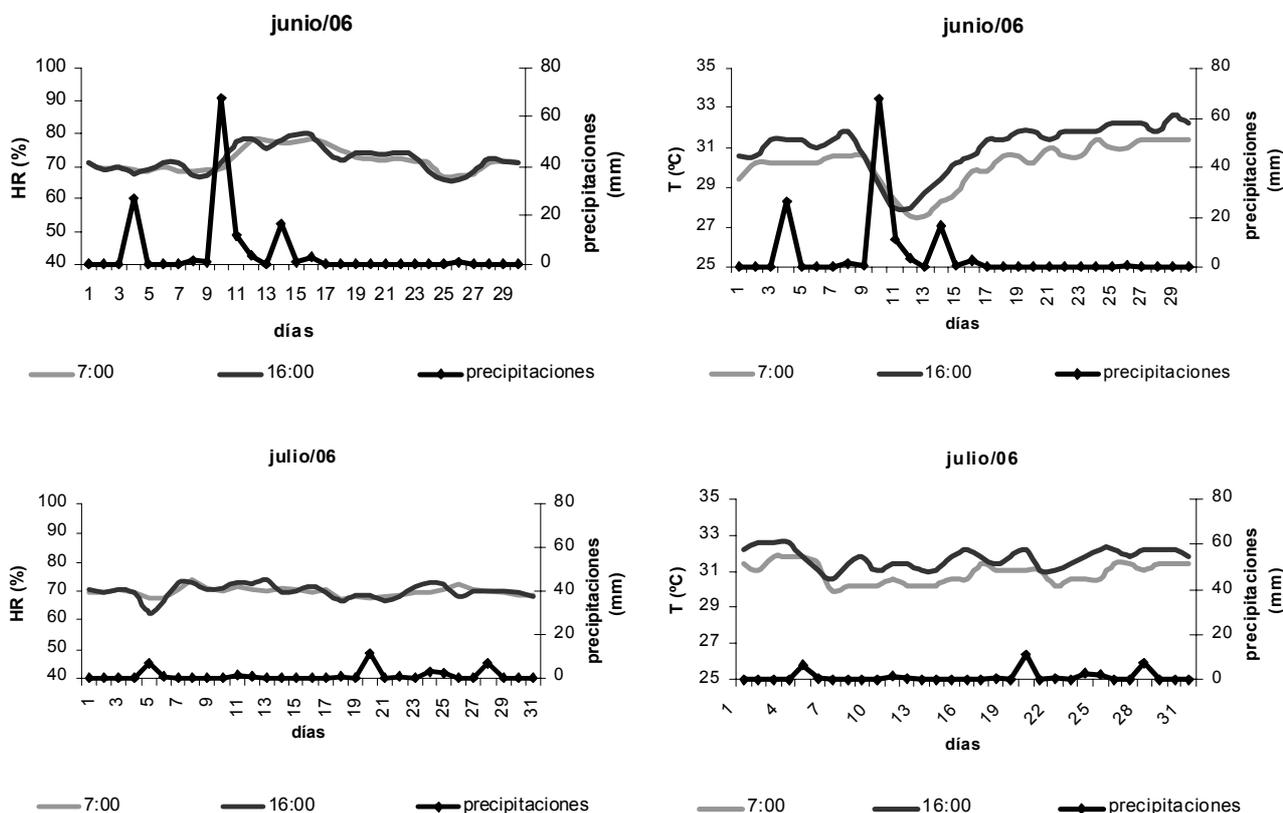


Fig. 3. Variación diaria de la temperatura y la humedad en la pared de la Avenida del Puerto del Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís y la lluvia caída registrada en los meses de junio y julio de 2006.

hecho de que en este último mes, la sala de conciertos permaneció cerrada al público, pero las puertas y ventanas del Coro permanecieron abiertas. Vale aclarar que solo se muestran los resultados correspondientes a los meses de junio y agosto debido a dificultades técnicas que se presentaron en el mes de julio.

Se debe destacar, que en todo el período de ensayo la cantidad de materia orgánica encontrada en el polvo sedimentado en las áreas de la edificación bajo estudio, resultó mayor que la inorgánica, a la inversa de lo reportado con anterioridad para almacenes de la región occidental de Cuba (Tabla 3).¹⁶ Esto pudiera deberse al desarrollo de organismos biológicos en la piedra, a expensas de la elevada humedad existente en algunas zonas de la edificación. Por otra parte, la materia inorgánica pudiera contener compuestos resultantes del deterioro de la propia roca, producidos bajo la influencia de los organismos biológicos, las sales y por la acción de otros contaminantes, todo lo cual deberá ser objeto de estudio para su apropiada verificación.

La concentración de NO₂ en la atmósfera interior del Convento (Tabla 4) se encontró por debajo del límite permisible para la salud humana y la ecología ambiental; no obstante, la presencia de este contaminante atmosférico puede provocar el deterioro de la piedra si al entrar en contacto con su superficie, se disuelve en el agua que pueda estar acumulada en ella, ya que la roca caliza es muy susceptible a los contaminantes de carácter ácido.

El análisis cualitativo para la detección de iones sulfato en la costra formada sobre la piedra de la calle de los Oficios resultó positivo, lo que indica la posible afectación de la roca por compuestos de azufre que pueden ser de origen atmosférico o biológico.

Evaluación de la eficacia de protección de las paredes de dos productos hidrofugantes comerciales. Adsorción capilar

Los resultados de los ensayos de adsorción de agua realizados *in situ* y a la intemperie meses después de aplicar el producto hidrofugante de base siloxano a las paredes, permitieron concluir que no se producen cambios apreciables en las superficies tratadas hasta los 18 meses de aplicado el producto (Tabla 5). Esto fue confirmado por observación visual al descartar la presencia de or-

ganismos biológicos, pátinas o costras en ellas. El coeficiente de adsorción de las superficies con tratamiento resultó muy inferior al de las superficies sin tratamiento, lo que confirmó la eficiencia en la protección del producto hidrofugante.

Ensayos a nivel de laboratorio Isotermas de adsorción

En las isotermas de adsorción de vapor de agua de las muestras de piedra caliza coralina con y sin la aplicación de los productos hidrofugantes (Fig. 4), se observó que las tratadas con el producto acuoso de

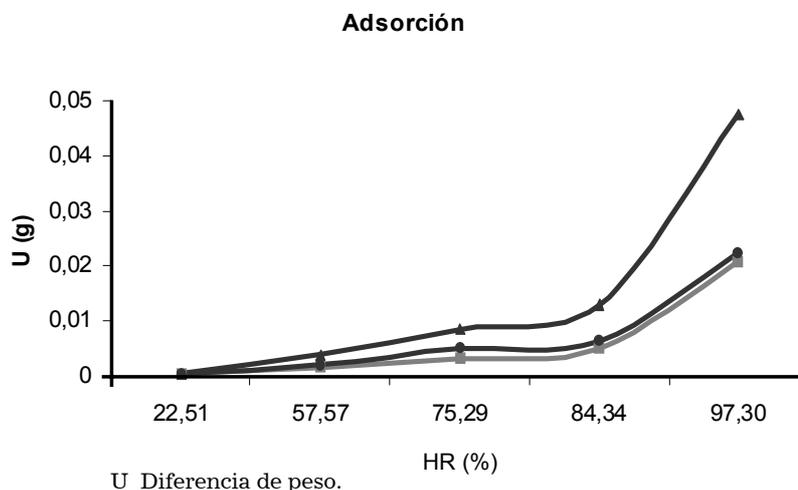


Fig. 4. Isoterma de adsorción de agua para muestras de piedra con y sin aplicación de productos hidrofugantes.

Tabla 4. Concentraciones de NO₂ determinadas en dos sitios en el interior de la Basílica Menor del Convento de San Francisco de Asís (Coro Alto).

Mes/año	NO ₂ (mg/m ³)	
	Punto	
	1	2
Noviembre/06	6,4	—
Diciembre/06	26,7	25,1
Enero/07	17,1	13,8
Febrero/07	13,6	13,8
Marzo/07	11,5	11,4
Valor medio	15,1	16,0

— Se perdió la evaluación por dificultades técnicas.

Tabla 5. Resultados de los ensayos de absorción de agua *in situ* realizados en dos sitios del Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís a la intemperie después de 4 y 18 meses de la aplicación del producto hidrofugante de base siloxano.

Superficie	Coeficiente de absorción [kg/(m ² · s ^{0,5})]			
	Patio interior		Basílica (Plaza de San Francisco)	
	4	18	4	18
	(meses)			
Piedra sin tratamiento	0,162	0,092 4	0,202	0,320
Piedra con producto hidrofugante de base siloxano	0,004 6	0,004 6	0,004 9	0,004 6

Cuestiones técnicas imponderables imposibilitaron realizar el ensayo para el producto de base silicona.

base silicona presentaban mayor adsorción de humedad, mientras que las tratadas con el de base siloxano presentaban una adsorción de agua similar a la piedra. El resultado fue confirmado mediante un análisis estadístico de varianza (Tabla 6), el que arrojó diferencias significativas entre el producto de base silicona con respecto a la piedra y al de base siloxano. Esto indicó que el primero aumenta la adsorción del vapor de agua y por tanto, sus propiedades lo hacen menos adecuado para la conservación de la piedra estructural. Una mayor adsorción de agua puede facilitar el desarrollo de organismos biológicos.

Pudo observarse también que en el intervalo de humedad entre 75 y 84 % (los valores medios correspondientes a la pared de la Avenida del Puerto están por debajo), tiene lugar un plato en la adsorción del agua, mientras que por encima de este último valor comienza a incrementarse notablemente la adsorción (efecto mucho más probable en la pared de la calle de los Oficios).

Permeabilidad al vapor de agua

El vapor de agua se puede adsorber en los poros de la roca, pero también puede pasar a través de los poros continuos de uno a otro lado de la piedra. En este caso, se determinó la permeabilidad al vapor de agua de la piedra y los resultados, se correspondieron con los de la evaluación de las muestras con y sin aplicación de productos hidrofugantes (Fig. 5).

Durante las primeras 120 h el producto de base silicona y la piedra sin tratar permitieron el paso de mayor cantidad de vapor de agua que el producto de base siloxano; sin embargo, después de las 120 h, el comportamiento de los dos productos fue muy similar al presentado por la piedra sin la aplicación de estos.

El análisis de varianza efectuado (Tabla 7) arrojó diferencias significativas entre los tratamientos empleados, así como entre los diferentes tratamientos con respecto a la piedra.

Como es conocido, un requisito indispensable de los productos de protección de la piedra es que mantengan la permeabilidad al vapor de agua. Además, los productos hidrofugantes utilizados para la protección de la piedra deben evitar la acción degradante del agua sobre la roca, creando una barrera impermeable al agua, pero permeable al vapor de agua y así evitar los agrietamientos o fisuras en aquella. Los resultados del estudio demostraron que ambos productos ensayados cumplen estos requisitos.

Tabla 6. Análisis estadístico de las isothermas de adsorción de vapor de agua de muestras de piedra con y sin aplicación de productos hidrofugantes.

Sistema	Significación	Diferencias significativas
Piedra – P. de base silicona	$P = 1,4315 \cdot 10^{-4}$	Sí
Piedra – P. de base siloxano	$P = 3,707 \cdot 10^{-7}$	Sí
P. de base silicona – P. de base siloxano	$P = 0,0025$	Sí

P. Producto.

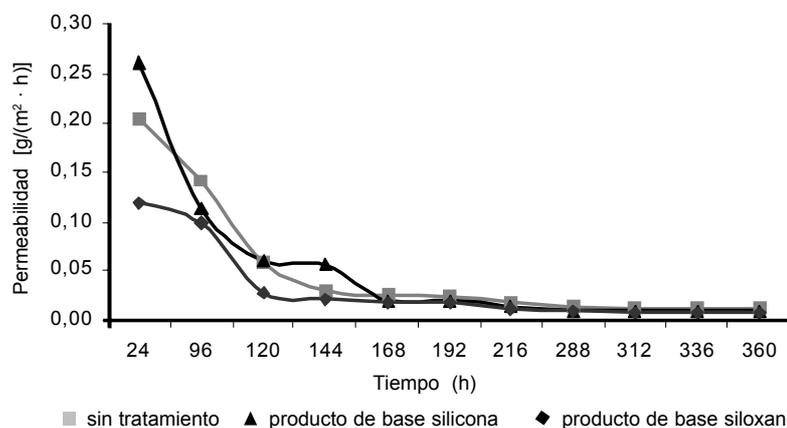


Fig. 5. Permeabilidad al vapor de agua de muestras de piedra con y sin aplicación de productos hidrofugantes.

Tabla 7. Resultados estadísticos del ensayo de permeabilidad al vapor de agua de muestras con y sin aplicación de productos hidrofugantes.

Sistema	Significación	Diferencias significativas
Piedra – P. de base silicona	$P = 1,4315 \cdot 10^{-4}$	Sí
Piedra – P. de base siloxano	$P = 3,707 \cdot 10^{-7}$	Sí
P. de base silicona – P. de base siloxano	$P = 0,0025$	Sí

P. Producto.

Absorción de agua por inmersión parcial

Una propiedad importante que deben cumplir los productos hidrofugantes es formar una superficie hidrófoba que impida la permanencia y el paso del agua líquida sobre la superficie de la piedra. Los resul-

tados de la determinación de la absorción capilar de agua por inmersión parcial en muestras con y sin aplicación de los productos hidrofugantes demostraron que el producto de base siloxano ofreció mayor resistencia a la absorción de agua (Fig. 6).

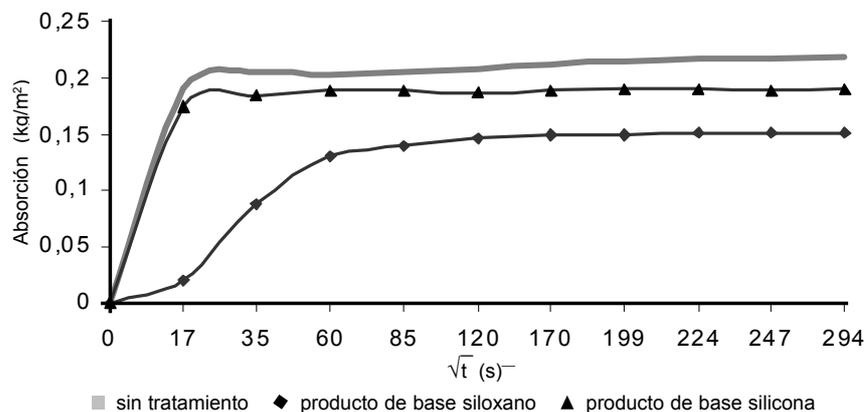


Fig. 6. Absorción de agua de las muestras con y sin aplicación de productos hidrofugantes.

Las piedras porosas toman el agua en dos fases sucesivas: en la primera, el agua se eleva a la parte superior del material, el cual experimenta un rápido incremento de peso en función del tiempo y en la segunda, el agua llena el espacio restante de los poros.¹⁷ Se pudo observar que el contenido de agua en el punto de inflexión (St) resultó superior para el producto de base siloxano, lo que indica que es el que ofrece mayor resistencia a la absorción de agua por capilaridad y por tanto, el que tiene mejores propiedades hidrófobas. El análisis de varianza (Tabla 8) confirmó estos resultados, o sea, se encontraron diferencias significativas entre los St correspondientes al producto de base siloxano, a la piedra y al producto de base silicona.

Este ensayo demuestra que el producto de base siloxano es el más perspectivo para la protección de la piedra, pues al proveerla de una superficie hidrófoba, impide la formación de microorganismos sobre ella, así como la acción de sales y compuestos de carácter ácido por disolución en el agua superficial. El producto de base silicona resulta menos eficiente, quizás por estar diseñado para ambientes interiores, o sea, para condiciones donde no es afectado por la lluvia.

Por otro lado, los hidrofugantes actúan como sellantes de la superficie, o sea, dificultan la interacción del agua con ella (haciéndola hidrófoba) y además, sellan parcialmente los poros más superficiales. Vale aclarar que en realidad, estos productos no constituyen un recubrimiento, en cuyo caso, sería de esperar una menor absorción de agua, pues constituirían una barrera para ella.

CONCLUSIONES

Se comprobó que las causas del deterioro de la piedra caliza estructural del Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís por el ambiente están constituidas por la acción de las sales higroscópicas, de los contaminantes atmosféricos de carácter ácido y de organismos biológicos.

La influencia de la lluvia no es determinante en la gran humedad detectada en la pared de la calle de los Oficios, sino los defectos de impermeabilización del techo y la existencia e inadecuada ubicación de los sistemas de desagüe en el tercer nivel.

La pared de la calle de los Oficios, debido a la humedad extrema que

Tabla 8. Resultados estadísticos del ensayo de absorción por inmersión parcial de muestras con y sin aplicación de productos hidrofugantes.

Sistema	Significación P < 0,05	Diferencias significativas
Piedra – P de base silicona	P = 0,453 56	No
Piedra – P de base siloxano	P = 0,008 9	Sí
P de base silicona – P de base siloxano	P = 0,035 3	Sí

P. Producto.

presenta, posee condiciones propicias para que se manifieste la degradación de la piedra, hecho confirmado a través de la observación visual. Esta degradación podría reducirse solucionando los problemas de impermeabilización del techo y con un rediseño apropiado de los sistemas de desagüe.

El hidrofugante de base siloxano presenta mejores propiedades protectoras que el de base silicona para la conservación de la estructura pétreo de la edificación estudiada.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Geltraud Ojeda, Directora del Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís y a su colectivo laboral por las facilidades brindadas, gracias a las cuales este trabajo pudo llevarse a cabo.

A Robert Engelfried por los conocimientos y materiales aportados a esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Taboada D. El templo encantado. **Opus Habana, III**, 4-15, 1999.
2. Leygraf C. and Graedel T. Atmospheric corrosion, Electrochemical Society Series, Wiley Interscience, 2000.
3. Sikiotis D. and Kirkitsos P. The adverse effects of nitrates on stone monuments. **The Science of the total Environment, 171**, 173-182, 1995.
4. Johnson J.B., Montgomery M, Thompson G., Wood G.C., Sage P.W. and Cooke M.J. The influence of combustion-derived pollutants on limestone derioration: 2. The wet deposition of pollutant species. **Corrosion Science, 38**, 267-278, 1996.
5. Chabas A. and Jeannette D. Weathering of marbles and granites in marine enviroment: petrophysical properties and special role of atmospheric salts. **Environmental Geology, 40**, 359-368, 2001.
6. Welton R.G., Cuthbert S.J., McLean R., Hursthouse A. and Hughes J.A. Preliminary study of the phycological degradation of natural stone masonry. **Environmental Geochemistry and Health, 25**, 139-145, 2003.
7. Videla H.A. Mecanismos de biodeterioro, biocorrosión y corrosión

atmosférica. Similitudes y diferencias. Curso sobre prevención y protección del patrimonio cultural iberoamericano de los efectos del biodeterioro ambiental, CYTED, Colombia, mayo de 2002.

8. Malaga-Starzec K., Panas I., Lindqvist J.E. and Lindqvist O. Efflorescence on thin sections of calcareous stones. **Journal of Cultural Heritage, 4**, 313-318, 2003.
9. Sierra-Jones A. El biodeterioro en el Patrimonio Arquitectónico de Antioquia. Curso sobre prevención y protección del patrimonio cultural iberoamericano de los efectos del biodeterioro ambiental, CYTED, Colombia, mayo de 2002.
10. Tsakalov A., Manoudis P., Karapanagiotis I., Chryssoulakis I. and Panayiotou C. Assessment of synthetic polymeric coatings for the protection and preservation of stone monuments. **Journal of Cultural Heritage, 8**, 69-72, 2007.
11. Maravelaki-Kalaitzaki P, Kallithrakas-Kontos N., Korakaki D., Agioutantis Z. and Maurigiannakis S. Evaluation of silicon-based strengthening agents on porous limestones. **Progress in Organic Coatings, 57**, 140-148, 2006.
12. Méndez Vivar J. Importancia de la química en la conservación de monumentos de piedra caliza y mármol. **Educación Química, 8**, 225-230, 1997.
13. Rocha J. Productos electro-electrónicos en ambientes tropicales. Capítulo 6, Edición 2003.
14. ISO 12571:200. Hygrothermal performance of building materials and products-Determination of hygroscopic sorption properties.
15. ISO 15148:2002. Hygrothermal performance of building materials and products-Determination of water absorption coefficient by partial immersion.
16. Corvo F, Torrens A.D., Betancourt N., Pérez J. and González E. Indoor atmospheric corrosion in Cuba. A report about indoor localized corrosion. **Corrosion Science, 49**, 418-435, 2007.
17. Martín Pérez A. Ensayos y experiencias de alteración en la conservación de obras de piedra de interés histórico artístico. Ed. Centro de Estudios Ramón Araces, España, 1990.